



联合国
粮食及
农业组织

2022

粮食及农业状况

运用农业自动化
推动农业粮食体系转型

本旗舰出版物系联合国粮食及农业组织“世界之状况”系列之一。

引用格式要求：

粮农组织。2022。《2022 年粮食及农业状况：运用农业自动化推动农业粮食体系转型》。罗马，粮农组织。
<https://doi.org/10.4060/cb9479zh>

本信息产品中使用的名称和介绍的材料，并不代表联合国粮食及农业组织（粮农组织）对任何国家、领地、城市、地区或其当局的法律地位或发展状态，或对其边境或边界的划分表示任何意见。提及具体公司或厂商产品，无论是否含有专利，并不意味着这些公司或产品得到粮农组织的认可或推荐，优于未提及的其它类似公司或产品。

地图中使用的名称和介绍的材料，并不代表粮农组织对任何国家、领地或海区的法律或构成地位，或对其边界的划分表示任何意见。地图上的虚线表示可能尚未完全达成一致的大致边界线。

ISSN 1020-7619（印刷）

ISSN 2664-004X（在线）

ISBN 978-92-5-137029-2

©粮农组织，2022 年



保留部分权利。本作品根据署名 - 非商业性使用 - 相同方式共享 3.0 政府间组织许可（CC BY-NC-SA 3.0 IGO; <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/igo>）公开。

根据该许可条款，本作品可被复制、再次传播和改编，以用于非商业目的，但必须恰当引用。使用本作品时不应暗示粮农组织认可任何具体的组织、产品或服务。不允许使用粮农组织标识。如对本作品进行改编，则必须获得相同或等效的知识共享许可。如翻译本作品，必须包含所要求的引用和下述免责声明：“该译文并非由联合国粮食及农业组织（粮农组织）生成。粮农组织不对本翻译的内容或准确性负责。原英文版本应为权威版本。”

根据许可产生的并且无法以友好方式解决的争议将通过许可第 8 条所述的调解和仲裁解决，除非文中另有规定。适用的调解规则为世界知识产权组织的调解规则 <http://www.wipo.int/amc/en/mediation/rules>，任何仲裁均根据联合国国际贸易法委员会（UNCITRAL）的仲裁规则进行。

第三方材料。欲再利用本作品中属于第三方的材料（如表格、图形或图片）的用户，需自行判断再利用是否需要许可，并自行向版权持有者申请许可。对任何第三方所有的材料侵权而导致的索赔风险完全由用户承担。

销售、权利和授权。粮农组织信息产品可在粮农组织网站（www.fao.org/publications）获得，也可通过 publications-sales@fao.org 购买。商业性使用的申请应递交至 www.fao.org/contact-us/licence-request。关于权利和授权的征询应递交至 copyright@fao.org。

2022年 粮食及农业状况



运用农业自动化
推动农业粮食体系转型

联合国粮食及农业组织
罗马，2022年

目录

前言	iv	农业自动化的未来发展轨迹：包容性采用和环境可持续性的考量	53
方法	vii	结论	60
致谢	viii	第 4 章	
缩略语	ix	农业自动化的社会经济影响和机遇	63
术语表	x	要点	63
要点	xiv	通过农业粮食体系的视角分析社会影响	64
概要	xv	农业自动化对劳动力的影响	67
第 1 章		农业自动化带来了创业和转型的新机会，也影响着营养状况和消费者	72
农业自动化：		农业自动化进程的包容性	73
农业自动化是什么，为何如此重要	1	农业粮食劳动力的未来	77
要点	1	结论	78
历史进程	2	第 5 章	
农业自动化是什么？	3	实现高效、可持续和包容性农业自动化的政策选择	81
我们为什么需要利用农业自动化？了解关键驱动因素	7	要点	81
农业自动化进步带来的挑战	10	实现负责任的农业自动化	82
化挑战为机遇	12	创造有利于大环境的一般性政策	84
本报告的重点是什么？	13	针对农业的政策、立法和投资	87
第 2 章		确保农业自动化有利于农业粮食体系的可持续性和韧性的政策	91
了解农业自动化的过去，展望未来	17	确保农业自动化进程具有包容性并惠及所有人的政策	93
要点	17	结论	96
全球机动化机械化的趋势及其动力	18	附件	99
数字革命及其改变机械化和农业实践的潜力	24	附件 1	
农业数字自动化技术和机器人技术的现状	28	案例研究摘要	100
结论	36	附件 2	
第 3 章		统计表	128
投资农业自动化的商业逻辑	39	注释	134
要点	39		
论证机动机械化在各种情况下的商业逻辑，确认其广泛的潜力	43		
探讨投资农业自动化的商业逻辑：案例研究提供的经验	47		
除了商业价值之外，投资、政策和立法的作用	51		

表

1 案例研究数量,按生产者规模、自动化水平和部门分列	15
2 农业数字自动化的部分里程碑	29
A2.1 每 1000 公顷耕地拖拉机台数,最新年份数据	128

图

1 自动化系统的三阶段循环	4
2 农业自动化的演变	5
3 1991-2019 年农业就业在总就业中的占比,按收入(上图)和区域(下图)划分	8
4 每 1000 公顷可耕地使用的拖拉机台数	20
5 农业生产系统使用的部分数字技术和人工智能机器人技术	30
6 数字自动化技术推广条件的成熟程度	48
7 从农业粮食体系的视角看自动化对就业的影响	65
8 负责任地利用农业自动化的政策选择路线图	83

插文

1 克服农业机械使用报告中的数据挑战	19
2 解读撒哈拉以南非洲的机械化	22
3 数字工具助力普及机械化服务	25
4 与机械化无关的数字工具——自成一体的解决方案	26
5 畜牧业的数字自动化:拉丁美洲、非洲和欧洲的案例	31
6 新的水产养殖技术:印度和墨西哥的案例	33
7 林业部门的演变:机械化和数字自动化	34

8 机械化与人工和畜力牵引的成本效益比较分析:以埃塞俄比亚和尼泊尔的小麦生产为例	41
9 利用农业自动化提高食品安全	43
10 小型机动机械化提高小规模生产者的韧性	44
11 埃及机械化整作提高了生产力和水资源的可持续性	45
12 在老挝人民民主共和国使用滚筒式播种机省时、省力、省钱	46
13 机器人挤奶系统商业价值的演变	47
14 数字化果园喷雾器在欧盟的影响:来自波兰和匈牙利的证据	49
15 COVID-19 疫情激发对数字技术的兴趣:来自两个案例研究的证据	51
16 使用采摘机器人解决草莓农场的劳动力短缺	54
17 机动机械化对妇女的商业价值:来自尼泊尔的证据	55
18 低成本自主作物机器人的前景	58
19 从体面就业的角度分析农业自动化	68
20 甘蔗机械化收割对巴西劳动力的影响	70
21 自动化与农村移民输出社区:加利福尼亚的案例	71
22 对残疾人群体的包容性	74
23 妇女和青年参与自动化进程:案例提供的证据	75
24 坐在驾驶席上的妇女:通过拖拉机增强妇女权能	76
25 不同类型的政府支持如何促进农业自动化	84
26 斯洛文尼亚科门市的免费宽带网络	86
27 国家战略推动非洲农业采用数字工具	88
28 因地制宜的数字自动化:来自 27 个案例研究的证据	90

前言

本报告深入解析了农业的现状——农业部门正在经历深远的技术变革，且变革速度不断加快。几年前仍无从想象的新技术正在快速涌现。例如，基于电子标签的畜牧生产技术（包括挤奶机器人和家禽饲喂系统）正在部分国家逐步推广。全球卫星导航系统使得自动化作物生产成为可能，该过程中会利用自动转向拖拉机、撒肥机和喷药机。更为先进的技术也已经在市场上崭露头角。在农作物生产领域，除草机器人等自动化机器开启了商业化进程，无人飞行器（通常称为无人机）负责收集作物管理和投入品施用数据。在水产养殖领域，自动化饲喂和监测技术正在大行其道。在林业领域，木材砍伐和运输机械是当前自动化技术研发的主要目标。很多近期开发的技术推动了精准农业的发展，运用信息优化投入品和资源的使用。

近年来的技术发展让人耳目一新，为之称叹，激发了更深入研究的热情。然而，不容忽视的是，技术变革并非另起炉灶；更为重要的是，并非所有的农业粮食体系行为主体都能获取这些技术。几十年来，粮农组织对这个问题开展了持续研究。我们今天看到的只不过是农业技术漫长变革过程中的一个整合点。过去两个世纪以来，这一过程一直在加速发展。

变革过程提高了生产力，减少了繁复的农业劳动，使得劳动力可以解脱出来从事其他活动，从而最终改善了人们的生计和福祉。机械设备得以改进，有时甚至取代了农业作业中涉及的三个关键步骤：诊断、决策和执行。技术发展前后经历了五个阶段：手动工具的引入；畜力牵引的使用；1910年代以来实行的机动机械化；1980年代以来数字设备的采用；以及近期机器人技术的引用。本报告中所指的自动化实际上

是从机动机械化开始的，农业作业的执行部分实现了较高程度的自动化。得益于近期涌现的数字技术和机器人技术，诊断和决策过程也开始逐步实现自动化。正如本报告中所述，技术变革进程从未中断，但并非所有国家的所有农业生产者都处于同一阶段。

诚然，人们普遍担心节省劳动力的技术变革可能会带来不利的社会经济影响，尤其是工作岗位被取代及随之而来的失业。这种担心至少可以追溯到十九世纪之初。然而，回顾过往便可以看到，对于自动化提高了劳动生产率进而造成大范围失业的担心并未成为事实。这是因为，农业自动化是社会结构转型过程的一部分，农业劳动生产率提升会逐步解脱农业工人，使其得以进入工业和服务业等其他利润更高的行业。在转型过程中，农业人口占比一定会下滑，但其他部门的就业机会则会水涨船高。技术变革通常伴随着农业粮食体系内部的变革，上下游各部门也在同步发展，创造出新的就业和创业机遇。因此，要认识到农业是更宽泛农业粮食体系的一个重要组成部门。

本报告着重指出，农业现代化的潜在效益是多方面的，能够推动农业粮食体系转型，增强农业粮食体系的效率、生产率、韧性、可持续性和包容性。自动化能够提高农业劳动生产率和利润率；改善农业工人的工作条件；在农村地区创造对农村青年尤有吸引力的新创业机会；减少粮食损失，改进产品质量和安全；另外，还有助于加强环境可持续性和气候变化适应。近期开发的解决方案涉及精准农业和小规模设备，比起使用重型机械的机动机械化来更加适宜本地状况，有助于改善环境可持续性，增强抵御气候和其他冲击的韧性。得益于上述

诸多益处，农业自动化有助于实现若干个可持续发展目标。

尽管如此，本报告中也探讨了农业自动化相关的风险和问题。与任何的技术变革一样，农业自动化意味着对农业粮食体系的颠覆。若自动化进展过快，不顾本地社会经济和劳动力市场状况，就会冲击就业——这是一定要避免的常见问题。此外，自动化会增加对高技能劳动力的需求，压缩低技能工人的空间。若是富裕的大规模农业生产者比贫困的小规模生产者更容易获取自动化服务，则自动化就有可能加剧不平等，这一点是无论如何都要避免的。若管理不当，不考虑本地状况，则自动化，尤其是依赖重型机械的机械化，还可能危及农业可持续发展。这些风险都是真真切切的，本报告对其进行了分析确认。

正如本报告中所述，完全否定自动化并不可取。粮农组织坚信，没有技术进步和生产率提高，让数亿人摆脱贫困、饥饿、粮食不安全和营养不良就只能镜花水月。拒绝自动化只会让农业劳动力陷入恶性循环，在生产水平低下和回报率差强人意中止步不前。真正重要的是自动化进程的推进方式，而非是否要推进自动化。我们必须确保自动化的发展过程具有包容性，能够推动可持续发展。

在整篇报告中，粮农组织都在倡导负责任技术变革的理念，只有这样农业自动化才能取得成功。这意味着什么？

首先，农业自动化要成为农业转型进程的有机构成，与范围更宽泛的社会和农业粮食体系变革同向而行、相辅相成。故此，自动化要能

够响应真正的需要。劳动力节约型技术若以应对劳动力日渐短缺和农村工资不断上涨为着眼点，就会进一步推动农业转型进程。与之相对，若采用自动化或特定自动化技术的动机是人为创造的，例如通过政府补贴，尤其是在劳动力充足的背景之下，则推行自动化就会造成很大冲击，对劳动力市场和社会经济产生不利影响。政府政策不要制约自动化，否则农业生产者和工人就会陷入劳动力水平低和竞争力弱的泥沼。本报告认为，政府的恰当作用是营造有利环境，推动采用适宜的自动化方案，而非在可能不适合的背景下鲁莽推出某种解决方案，或以某种方式阻碍自动化的实施。

为助力实现可持续发展目标，自动化要具有包容性。自动化进程要为所有人提供机遇，包括小规模生产者和大规模商业农场，也包括妇女、青年和残疾人等边缘化群体。要克服各种实施阻力，至少是妇女面临的阻力。让各类生产者获得适宜的技术解决方案需要确保技术呈现规模中性特点，即通过共享服务等制度机制确保各种规模的生产者都能找到适合的技术并采纳和使用这些技术。通过教育和培训培育数字技能也很重要。此举能够促进技术采用，避免因不平等的知识和技能而出现的数字鸿沟。

为增强可持续性并真正具有包容性和变革性，自动化解决方案要因地制宜，不仅要考虑生产者的特点，还要考虑本地的生物物理、地形地貌、气候以及社会经济状况。本报告从实际出发，并不会提供放之四海而皆准的解决方案。最先进的技术解决方案未必最适合所有地方和所有人。正如文中实证显示，某些情况下，小型机械，甚至是手持设备等简单技术会给小

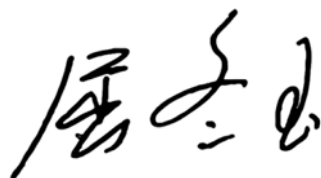
前言

规模生产者带来实实在在的好处，能够支持山地作业。甚至在某些情况下，生产者可以跳跃式前进，直接过渡到更为高级的技术解决方案。简而言之，农业生产者要自己选择最适宜自身需要的技术，政府则要营造有利环境，支持生产者做出适当的选择。

最后，本报告还指出，农业自动化必须有利于增强农业可持续性和韧性。过去大规模重型机械的使用常常给环境可持续性带来破坏。解决这个问题需要因地制宜地开发以小型轻量机械为特色的机械化方案。同时，助力精准农业发展的数字农业和机器人技术可以提供更加节约资源、更加具有环境可持续性的解决方案。应用型技术和农业研究有助于探索适宜方案，进一步实现环境可持续性目标。

本报告细致探究了这些问题，提出农业自动化的发展目标并开展深入分析，驱散了围绕农业自动化的种种误解，厘清了不同国家和地方背景下推行农业自动化的方向。本报告提出了政策干预和投资的重点领域，目的是确保农业自动化有助于包容性、可持续发展。

粮农组织从战略层面上坚信，技术、创新和数据，辅以适当治理、人力资本和适宜制度，是所有计划干预的关键跨领域、跨部门加速器，能够加速实现目标，减少利弊权衡。毫无疑问，这些加速器将促进所有背景下的农业转型。我希望，本报告能够以建设性方式推进这一领域的政策讨论，因其对于实现可持续发展目标具有重要意义。



联合国粮食及农业组织总干事
屈冬玉

方法

《2022 年粮食及农业状况》编写前成立了一个由粮农组织各相关技术部门代表组成的咨询小组，负责与外部专家小组协助调研和编写小组开展工作。报告编写工作参考了粮农组织和外部专家编写的六份背景文件和实证分析报告。咨询小组于 2022 年 1 月 24 日举行线上会议讨论了调研成果，2022 年 3 月对第 1 章初稿提出了意见。各章草稿首先提交咨询小组和外部专家小组，随后粮农组织农业食品经济司副司长于 2022 年 3 月 31 日至 4 月 6 日主持召开线上研讨会。根据这场研讨会及后续咨询小组会议提出的指导意见，本报告经修订后提交粮农组织经济及社会发展部门管理团队。修订稿还提交粮农组织其他部门以及粮农组织非洲、亚洲及太平洋、欧洲及中亚、拉丁美洲及加勒比和近东及北非区域办事处征求意见。所提意见均被终稿采纳，终稿已经粮农组织农业食品经济司副司长、粮农组织首席经济学家和总干事办公厅审查。

致谢

《2022 年粮食及农业状况》由联合国粮食及农业组织（粮农组织）跨学科团队编写，粮农组织农业食品经济司副司长 Marco V. Sánchez Cantillo 和高级经济学家、本出版物主编 Andrea Cattaneo 指导编写工作。粮农组织首席经济学家 Máximo Torero Cullen 和经济及社会发展部门管理团队给予统筹指导。

调研和编写小组

Theresa McMenomy、Fergus Mulligan（顾问编辑）、Ahmad Sadiddin、Jakob Skøt 和 Sara Vaz。

背景文件

Christina Cappello（瓦赫宁根大学及研究中心 [下文简称瓦赫宁根大学]）、Tomaso Ceccarelli（瓦赫宁根大学）、Aneesh Chauhan（瓦赫宁根大学）、Diane Charlton（蒙大拿州立大学）、Thoman Daum（霍恩海姆大学）、Alexandra Hill（科罗拉多州立大学）、Sander Janssen（瓦赫宁根大学）、Inder Kumar（瓦赫宁根大学）、James Lowenberg-DeBoer（哈珀亚当斯大学）、Mariette McCampbell（瓦赫宁根大学）、Giacomo Rambaldi（瓦赫宁根大学）、David Rose（雷丁大学）和 Edward Taylor（加利福尼亚大学）。

其他外部支持人员

Rabe Yahaya（国际玉米小麦改良中心）。

其他参与编写的粮农组织人员

Veronica Boero、Alban Lika、Madhusudan Singh Basnyat、Atef Swelam 和 Michele Vollaro。

粮农组织咨询小组

Maysoon Alzoubi、Huda Alsahi、Marwan Benali、Henry Burgsteden、Aziz Elbehri、Mayling Flores Rojas、Ken Lohento、Magnus Grylle、Karim Houmy、Dejan Jakov Ijevic、Josef Kienzle、Lan Li、Preetmoninder Lidder、Joseph Mpagalile、Ahmad Mukhtar、Eva Galvez Nogales、Santiago Santos Valle、Beate Scherf、Josef Schmidhuber 和 Xinhua Yuan。

外部专家小组

Imran Ali（中央昆士兰大学）、Christina Cappello（瓦赫宁根大学）、Tomaso Ceccarelli（瓦赫宁根大学）、Aneesh Chauhan（瓦赫宁根大学）、Diane Charlton（蒙大拿州立大学）、Thomas Daum（霍恩海姆大学）、Kit Franklin（哈珀亚当斯大学）、Alexandra Hill（科罗拉多州立大学）、Ivo Hostens（欧洲农业机械工业协会）、Sander Janssen（瓦赫宁根大学）、Inder Kumar（瓦赫宁根大学）、James Lowenberg-DeBoer（哈珀亚当斯大学）、Mariette McCampbell（瓦赫宁根大学）、Giacomo Rambaldi（瓦赫宁根大学）、David Rose（雷丁大学）、Salah Sukkarieh（悉尼大学）和 Edward Taylor（加利福尼亚大学）。

附件

Ahmad Sadiddin 和 Sara Vaz 在由 Christina Cappello、Tomaso Ceccarelli、Aneesh Chauhan、Sander Janssen、Inder Kumar、Mariette McCampbell 和 Giacomo Rambaldi 组成的瓦赫宁根大学团队的协助下编写。

行政支持

Liliana Maldonado 提供行政支持。

粮农组织领导机构服务司语言服务处提供翻译。

粮农组织新闻传播办公室出版处为所有六种官方语言版本提供编辑支持、设计和排版以及制作方面的协调。

缩略语

AI	人工智能	ICRISAT	国际半干旱热带地区作物研究所
AMS	自动挤奶系统	IFAD	国际农业发展基金
APNI	非洲植物营养研究所	IFC	国际金融公司
AUC	非洲联盟委员会	IFPRI	国际食物政策研究所
CAAS	中国农业科学院	ILO	国际劳工组织
CEA	受控环境农业	IoT	物联网
CIMMYT	国际玉米小麦改良中心	ISPA	国际精准农业协会
COVID-19	2019冠状病毒病	IT	信息技术
CSAM	联合国可持续农业机械化中心	ITU	国际电信联盟
CTA	农业和农村合作技术中心	IVR	交互式语音应答
DPGA	数字公共产品联盟	LSMS	生活水平衡量研究
EDRI	埃塞俄比亚发展研究院	LSMS-ISA	生活水平衡量研究 - 农业综合调查
EID	电子标识	R&D	研究和开发
ESCAP	联合国亚洲及太平洋经济社会委员会	RuLIS	农村生计信息系统
FAO	联合国粮食及农业组织	SDGs	可持续发展目标
GHG	温室气体	SMS	短信息服务
GIS	地理信息系统	UAS	无人飞行系统
GIZ	德国国际合作机构	UAV	无人飞行器
GNSS	全球卫星导航系统	UNICEF	联合国儿童基金会
GPS	全球定位系统	USDA	美国农业部
GSMA	全球移动通信系统	USSD	非结构化补充业务数据
GSS	一般性服务支持	VRT	可变速率技术
ha	公顷	WFP	世界粮食计划署
ICARDA	国际干旱地区农业研究中心	WHO	世界卫生组织

术语表

农业自动化：在农业作业中使用机械和设备，以期改进诊断、决策或执行，降低农业劳动的繁重性和 / 或提高农业作业的及时性，甚至于精准性。农业自动化包含精准农业技术。农业自动化领域使用的机械和设备包括：

- ▶ 拉动、推动或操作各类用于完成农业作业的器具、设备和工具的拖拉机（即执行功能自动化）；
- ▶ 传感器、机械、无人机和卫星，以及智能手机、平板电脑或软件工具（例如咨询应用程序和在线农场管理）等设备以及各类平台，用于监测动物、土壤、水和植物，支持就农业任务做出决策¹（即诊断功能自动化）；
- ▶ 更为先进的方案，例如根据需要并精准控制用量喷洒除草剂的除草机器人，或远程监测状况，并在空中施用化肥、农药和其他处理材料的无人机^{2,3}（即诊断、决策和执行三项功能全部自动化）。

自动化设备：系统中部分（部分自动化）或全部（完全自动化）功能，机械或机械系统的一项特定活动或行为，实现自动化，无需人工干预。⁴

农业机械化：运用各类技术 — 从简单基础的手动工具到更为精密的机动设备和机械 — 执行农业作业。⁶ 农业机械化有三种动力来源：手动工具技术（以人体肌肉为主要动力来源的工具和设备）；耕畜役畜技术（由动物提供动力的机械、工具和设备）；以及机动技术（由引擎或发动机提供动力的机械化）。⁷

农业机动机械化：使用各类机械发动机或引擎（不论能源来源为何）开展农业相关活动。⁷

农业生产者：从事农作物和畜牧业生产、渔业、水产养殖、牧业或林业等农业活动的家庭。

小规模（农业）生产者是指从事上述农业活动中的任何一种，但由于销路不畅，以及获取土地和水、信息、技术、资本、资产和制度等资源渠道有限，因而在生产中面临更大限制的生产者。⁸

人工智能（AI）：运用算法分析环境并采取行动以期实现具体目标的计算机系统，此类系统拥有一定程度的自主性。人工智能可以完全基于软件在虚拟世界中运行（例如语音助手、图像分析软件、搜索引擎、语音和面部识别系统），也可以嵌入到硬件设备之中（例如高级机器人、自动驾驶汽车、无人机或物联网应用）。⁵

机器学习：是一类人工智能和一套数据分析方法，运用计算机算法实现自动化分析建模。机器学习的底层逻辑是识别数据模式，在没有明确人为指令的条件下更精准地预测结果，不断改进机器绩效。

大数据：通过工具、传感器、金融交易、社交媒体以及其他数字化手段生成的大量、多样和复杂的数据集，通常超出个人电脑和基本分析软件的存储能力和处理能力。

企业对企业模式：企业之间，而非企业与个体客户之间的关系和销售。⁹

企业对客户模式：企业与作为产品或服务最终使用者的客户之间的直接关系，以及产品或服务直接销售。⁹

保护性农业(也被称作免耕): 是一种耕作体系, 旨在促进保持永久性土壤覆盖、最低程度的土壤耕作以及植物物种多样化发展。保护性农业加强了地表上下的生物多样性和自然生物过程, 有助于提高水分和养分的利用效率, 提高并维持作物产量。¹⁰

农业数字自动化: 在农业机械和设备(例如拖拉机及其附加工具、饲喂系统、挤奶机)上加装数字化工具, 通过智能交互网络、平台和农场管理系统提供的数据和数字化服务提升系统效率和精准度, 进而加强自动化过程。

自成一体 VS 内嵌式数字解决方案: 自成一体的数字解决方案主要基于软件, 不依赖农业机械, 需要的硬件资源有限, 通常为智能手机或平板电脑, 或是咨询应用程序、农场管理软件以及在线平台等软件工具。此类解决方案可以包括遥感和 / 或无人机, 但仅限于用于决策支持和巡查的数据。农业机械和设备加装数字工具后被称作内嵌式解决方案; 此种方案使得机器能够通过直接行动与环境互动(执行), 而不仅是观察和决策支持。⁹

电子标识(EID): 使用内嵌在标签、团块或植入物中的微芯片或电子应答器识别农场中的个体动物。⁵

农场: 生产作物、畜牧、农林或水产产品的集合管理职能的农业生产单位。

有偿服务: 是针对农场机器的一种商业模式, 即农民按服务单位(例如每公顷、每小时、每只动物或每吨收获物)向机器服务提供方支付费用, 而无需购置机器。⁵

全球卫星导航系统(GNSS): 使用卫星信号提供方位信息的系统, 例如美国的全球定位系统(GPS)、欧洲的伽利略定位系统、俄罗斯联邦的格洛纳斯系统(GLONASS)以及中国的北斗系统。⁵

自动转向: 是一种 GNSS 支持的技术, 为自驱式农业机械(例如拖拉机、联合收割机、饲草收割机、喷雾机)提供自动转向和定位。在最先进的自动转向技术中, 计算机几乎可以完成所有的田间转向, 包括田头转弯。自动转向技术通常需要操作员坐在驾驶室内, 以防机器出现故障或其他问题。该技术为精准农业技术的一个典范。⁵

全球定位系统(GPS): 美国的全球卫星导航系统。该系统为第一个民用全球卫星导航系统, 故而有些时候全球定位系统被用来指代全球卫星导航系统。⁵

物联网(IoT): 其中所有设备 — 包括移动电话、传感器、无人机、机器人和卫星 — 与互联网连接的系统。⁹

交互性: 机器和设备在围绕数据内容、背景和意义确定明确、共享预期的前提下, 编制、交换和消费数据的能力。⁹

随机应变: 就农机而言, 是指无需直接人力干预, 利用传感器数据算法就可以在田间自动调整作业。⁵

操作员辅助系统: 为农场机器操作人员提供帮助的系统。此类系统通常使用机器自身多个来源的传感器数据辅助操作员进行决策; 可以

术语表

自动调整机器设置来优化操作员的优先需求（例如燃料效率、完成工作的速度、产品质量），最早见于联合收割机。⁵

精准农业：收集、处理和分析时间、空间及个体数据，并将其与其他信息结合的一套管理策略，目的是精准管理田间变化，支持管理决策和机器精准行动，以期提高农业生产的资源使用效率、生产率、质量、营利性和可持续性。¹¹

精准畜牧：一种基于数据的畜牧管理策略，以持续、实时和自动化方式监测控制个体动物或动物群体的生产力、环境、健康和福利。该策略重在提高畜牧生产的资源利用效率、生产力、质量、营利性和可持续性。⁵

设施农业：在温室或垂直农场中生产高价值蔬菜和其他园艺作物。在这种模式下，农民可在无法从事传统耕种的细小、边缘和缺水土地上种植经济作物。这种模式也被称为设施栽培或设施作物生产。⁹

遥感：运用飞行器、卫星或其他配置传感器的平台远程收集地球上物体信息的过程。⁹

机器人：无需直接人为干预便能自动作业的机械，¹²可以是固定的（例如挤奶机器人），也可以是移动的（例如自动驾驶）。这个词语主要为媒体和大众所用，机器人常常采用拟人修辞。在技术性较强的讨论中，通常会使用自动机械或自动设备这样的说法。¹³

腿式机器人：是指借助机械肢体而非轮子移动的自动机械。⁵

挤奶机器人：无需人力，能够实现乳用动物（尤其是奶牛）自动挤奶的挤奶机，也被称为自动挤奶系统。

集群机器人：执行传统机械化模式下由一台大型机器完成的任务的若干、较小移动式自动化机器。

机器人学：计算机科学和工程的一个跨学科分支，包括机器人设计、制造、运行和使用。该学科融合了若干学科，包括机械工程、电力工程、信息工程、机械电子、电子学、生物工程、计算机工程、控制工程、软件工程和数学。

无人飞行系统 (UAS)：是一套大型系统，包括装载传感器的飞行器（无人机），飞行员操作的地面控制站，以及用于分析传感器收集数据的软件。⁹

无人飞行器 (UAV) 或无人机：一种能够飞行的自动机械，可以通过遥控或使用软件控制设备进行导航。在农业领域，无人机常被用于收集航拍图像，或用于施洒化肥、种子、农药或其他作物投入品。^{5,9}

非结构化补充业务数据 (USSD)：互动性强于短信息的一种信息服务，特点是使用以星号(*)开始、井号(#)结束的编码（例如 *845#）。一条 USSD 信息最多有 182 个字符，可用于获取农业、卫生、新闻、天气等信息。¹⁴

可变速率技术 (VRT)：一种将设备与软件结合的技术，调整田间化肥、农药、种子和其他作物投入品的使用量，基于作物需要优化单产，这样就能够以尽量少的投入获得尽可能高的产出。⁵

基于地图的可变速率技术：以地图为基础的可变速率技术，地图上记录了田间不同地块的空间信息。分析人员要事先单独准备空间信息地图，用于引导可变速率技术。

播种机排种器关闭系统：一种有全球卫星导航系统支持的可变速率技术方法，能够根据订制地图或传感器数据控制每行的播种装置。通常用于避免在非耕种区域播种，或在田地两头重复播种。

基于传感器的可变速率技术：以传感器在田间实时读取为基础的可变速率技术，引导可变速率技术的信息是自动采集的（不同于基于地图的可变速率技术）。通常情况下，传感器位于撒布器前段，通过算法调整速率的计算机装置在机械之上，施用设备位于机器后部。

喷雾机喷杆部分控制设施：一种有全球卫星导航系统支持的可变速率技术方法，能够根据订制地图或传感器数据控制农用喷雾机的部分喷杆。喷杆宽度可以从几米到一个喷嘴宽度不等。现有技术支持以喷嘴不同速率打开、关闭和抖动。

垂直农业：处于完全受控环境中的室内农业，用于全年垂直种植作物。⁹

虚拟围栏：一项基于给动物加装全球卫星导航应答器来确定动物位置的技术，通过声音警报、电击或其他提醒方式，让动物待在地理定位边界之内。这项技术可能会取代实体围栏；此外，全球卫星导航技术还能帮助养殖者在大面积开放性牧场中确定动物方位。⁵

要点

1 农业自动化可以通过增强韧性、提高生产力和资源利用效率, 以及提高粮食质量和安全, 在实现可持续发展目标方面发挥重要作用, 尤其是目标 1 (无贫穷) 和目标 2 (零饥饿) 以及与环境可持续性和气候变化相关的目标。

2 但若对小规模生产者, 以及青年和妇女等其他边缘化群体而言始终遥不可及, 则农业自动化反而会加剧不平等。某些技术 (大型机动设备) 会造成种植结构单一和土壤侵蚀, 进而产生不利的环境影响。

3 在数字化革命之前, 机动机械化 (如拖拉机) 是推动全球农业转型的重要力量; 然而, 各国之间以及国家内部在技术采用方面差异明显, 撒哈拉以南非洲大部分地区尤为受限。

4 若能因地制宜并辅以数字化工具, 机动机械化仍有潜力提高农业生产率, 从而减少贫困和加强粮食安全, 并对整体经济产生积极的溢出效应。

5 数字自动化技术的应用不断发展, 但大多集中在高收入国家。很多情况下, 数字技术的商业逻辑尚未成熟: 部分技术仍处于原型阶段; 还有一部分技术受限于农村基础设施落后 (如通网和通电), 故而难以推广, 在低收入和中等收入国家尤为如此。

6 投资建设支持性基础设施、提高农村服务可及性 (如金融、保险和教育) 是技术获取的关键, 特别是对小规模农业生产者和妇女等边缘化群体而言。

7 数字自动化技术在提高效率、生产力、可持续性和韧性方面潜力巨大。然而, 这个过程需要包容性投资, 让生产者、制造商和服务商都参与进来, 并要特别关注妇女和青年, 以便进一步开发技术并使其顺应最终用户的需求。

8 农业自动化对就业的影响取决于具体背景。在工资上涨、劳动力稀缺的情况下, 自动化可为有技能的青年工人创造机会, 对农业乃至农业粮食体系的雇主和工人都有裨益。

9 若农村劳动力充足且工资偏低, 则农业自动化就会造成失业, 尤其是人为补贴导致自动化成本低廉, 或者是突然而至的技术突破导致自动化成本快速下降的情况下。

10 在劳动力充足的背景下, 政策制定者不应补贴自动化, 而应着力营造有利的大环境推动技术采用, 尤其是确保小规模农业生产者、妇女和青年能够采用技术, 同时还要为最可能在转型中失业的低技能工人提供社会保护。

11 营造有利的大环境需要采取多方协调行动, 包括立法和法规、基础设施、制度安排、教育和培训、研究和开发, 以及为私营创新进程提供支持。

12 推动负责任农业自动化的投资及其他政策行动应立足于具体情况, 例如网络连通状况, 与知识和技能相关的挑战、基础设施的充足性以及获取方面的不平等等。

概要

长久以来，技术变革在提高生产力、收入和福祉方面都功不可没，不论是在农业粮食体系中，还是在其他部门。如今，在耕地有限、自然资源不可持续和气候变化等冲击和压力不断增多的大背景下，供养不断增长的全球人口已经离不开技术解决方案。技术解决方案需要提升各个部门的农业生产力和可持续性，包括农作物和畜牧业生产、水产养殖、渔业和林业，另外还要刺激农业粮食体系内部的生产率提高。

技术变革减少了农业对劳动力的需求。提高农业生产力，进而促使劳动力流向非农部门就业的这个过程常常被称为农业转型。顺利转型既需要投资建设农业粮食体系，也需要投资改进其他有形和市场基础设施。农业自动化可以成为转型的推动力量，创造新的机遇。机动自动化使得农业作业的执行环节实现了自动化，而近年来数字技术的发展则为实际作业前决策过程的自动化创造了新的机遇。

人们普遍担心自动化会导致失业增多；这种想法虽然可以理解，但本质上是杞人忧天。总体而言，自动化产生了多种积极影响，包括缓解劳动力紧张，增强农业生产韧性和效率，改进产品质量，提升资源使用效率，推动体面就业，以及加强环境可持续性。而当自动化进程与本地需求不匹配时，往往会产生不利的社会经济影响，例如失业增多。防范不利影响可以采取多种措施，包括为农村劳动力提供其他就业机会，清除贫困小规模生产者参与自动化进程的障碍，避免在劳动力充足和农村工资水平较低背景下对自动化进行补贴。

农业自动化：机遇颇多，但不无挑战

所有农业相关作业都包含三个阶段：诊断、决策和执行。机动机械化实现了执行自动化，例如犁地、播种、施肥、挤奶、饲喂和灌溉。数字自动化技术还会带来诊断和决策自动化。这些技术提高了农业作业的精准程度，支持更加高效地使用资源和投入品，在推动环境可持续性和增强面对冲击和压力时的韧性方面也有所助益。农业技术沿革是一个渐进的过程，从手动工具进化到畜力牵引，再到机动机械化、数字设备，最后是具有人工智能的机器人技术。

在此背景下，本报告提出了农业自动化的定义：

在农业作业中使用机械和设备，改进诊断、决策或执行，以降低农业劳动的繁重性，或提高农业作业的及时性，甚至于精准性。

农业自动化带来很多机遇：有助于提高生产率，支持更加细致的作物、畜牧、水产和林业管理；此外，农业自动化还可以改善工作条件，提高收入水平，减少农业工作负荷，创造新的农村创业机会。农场环节之外的技术有助于减少食物损失和浪费，提高食品安全水平，促进实现增值。

在很多国家，农村劳动力减少造成农业工资水平提高，这是农业自动化的一个主要驱动因素。此外，消费者对于食品质量、安全、口味、新鲜度以及环境问题的意识不断加强也刺激了数字技术的投资。随着畜牧生产养殖规模不断扩大，牲畜管理和动物福利方面的挑战也助推了自动化进程。

另一方面，农业自动化也有可能加剧社会不平等，因为教育背景更好的较大规模生产者更有能力（如资金、农村基础设施、技能）投资新技术，或掌握新技能。妇女和青年面临的阻力尤大，例如获得优质教育和培训，以及获取土地、信用和进入市场。此外，自动化可能会取代诸如种植、采收等日常性工作，但也会创造更多需要熟练技能（如接受过中学教育）的工作。在农村劳动人口数量庞大的国家中，这种就业结构转变可能会加剧不平等。应对这些挑战需要降低技术采用门槛，尤其是对小规模生产者、妇女和青年而言，要确保各种规模的农业生产者都能获取自动化解决方案。而达成这一目标就需要推动技术创新，让自动化适应小规模生产者的具体需求。此外，创新的制度安排，例如共享资产或机械租赁服务，可以突破规模限制，为设备所有者与小规模生产者搭建桥梁，后者通过支付费用获得自动化服务，而非必须购置农机。

依赖重型机械的农业自动化也可能会与环境可持续发展背道而驰，进一步刺激森林砍伐和农田单作，造成生物多样性损失、土地退化和土壤侵蚀。然而，一些新的自动化进展，尤其是有人工智能加持的小型设备，可以扭转部分不利影响。

了解农业自动化的过去，展望未来

全球范围内，机动机械化发展突飞猛进，但国家覆盖面较广的全球可靠数据仅限于拖拉机，且只更新到 2009 年。使用拖拉机作为农场动力是二十世纪最具影响力的创新之一。拖拉机于 1910–1960 年间始现于美国，1955 年之后进入日本和欧洲。随后，很多亚洲和拉丁美洲国家在机动机械化方面势如破竹；此外，

一些国家的农机制造业也开始崭露头角。随着机械租赁市场的发展，拖拉机的使用更加普及，小规模生产者也开始使用。然而，过去几十年间，拖拉机的应用在撒哈拉以南非洲裹足不前，轻型手持工具仍是农业设备的主要类型。上世纪 60 年代和 70 年代，政府向农民提供农机补贴，建立国营农场和公共租赁公司，希望以此推动机械化；然而，由于治理不善，这些行动投入不小，但收效甚微。当前，农业在非洲被再次纳入发展议程，上述情况正在逐步发生转变，自动化再度引发关注。

自上世纪 70 年代起，数字技术通过各种应用场景在农业领域大行其道。最初应用是简单的精准畜牧技术，基于电子标识（也称作电子标签）对个体动物进行管理；这项技术为 90 年代的挤奶机器人扫清了障碍。同时，嵌套在机械化操作中的数字工具（如安装全球卫星导航系统的农机）呼之欲出，拖拉机、撒肥机和配药机的自动转向成为可能。近年来，智能手机等自成一体的设备通过传感器、高分辨率摄像头以及内嵌其中的各类应用为生产者提供了有用的信息。这些技术可以降低成本，提高生产率；然而，技术采用似乎也受到非经济考量的影响，例如加强工作安排的灵活性，改善生活质量，挤奶机器人便是例证。

更加先进的技术仍在不断涌现，例如借助物联网解决方案监测作物、牲畜和鱼类，某些时候（至少在一定程度上）还支持自动决策。数字化服务还包括共享资产服务，将设备（如拖拉机或无人机）所有者同需要设备的农民联系起来，有些时候也会联络操作人员。

数字技术对于非机械化精准农业也有助益。手动定点施肥技术很早以前就开发出来了，

例如利用可变速率技术对水稻施肥；而若干低收入亚非国家已经在使用手持式土壤扫描仪。此外，无人飞行器服务（即广为人知的无人机）也在亚非国家的非机械化农民中得到越来越多的应用。全球卫星导航系统则被用于测量农田面积（亚洲）和绘制确定土地权属所需的农田边界（非洲）。

农业数字自动化技术和机器人技术发展现状

在农业领域，数字自动化和机器人技术的应用情况千差万别。内置各类传感器和高分辨率摄像头的智能手机是中低收入国家生产者最易获得的硬件（尤其是小规模生产者）。然而，农村地区数字化水平低，缺少适宜小规模生产者的技术，以及数字技术成本相对较高，这些问题仍是技术采用的最大障碍。

近年来，自动化作物机器人等先进技术（例如用于采收、播种和除草）已经开启了商业化进程。例如使用无人机收集信息，自动计算投入品施用量，但此类技术的应用往往受到严格的监管。

在水产养殖行业，受劳动力紧张和工资上涨因素影响，自动化发展呈上升态势。在林业部门，移动机器人在虚拟现实和遥感技术的加持下，已经使得很多木材采集工作实现高度机械化，为更高级自动化机械的应用扫除障碍。此外，遥感技术也被用于监测森林砍伐。数字化和自动化在受控环境农业中也可发挥作用，包括室内农业和垂直农业。温室是最为常见的受控环境农业模式，其本质上易于进行环境监测、控制和优化。

目前，面向高收入、中等收入和低收入国家不同情况，已经开发出多种技术解决方案。技术应用方向和采纳速度在很大程度上受到政策选择影响。政府要推动所有人对这些技术的获取，尤其是针对小规模生产者、妇女、青年以及其他弱势和边缘化群体，并确保技术能够因地制宜地适应生产者的具体需要。另外，政府应为创新技术提供公平的环境，支持私营部门满足自动化需求。

一次一小步：简单机动自动化仍有一席之地

数字技术和机器人技术令人称道，但机动机械化仍可带来多重惠益，包括提高收入、降低成本、减轻繁重劳动以及节约劳动力。机动机械化方案能将家庭劳动力解放出来，让农村家庭把更多的时间放到农业之外的活动中。机动机械化对整体经济会产生溢出效应。此种效应包括随着劳动生产率提高，农村家庭的非农物资和服务需求不断扩大；农业劳动力进入劳动生产率更高的其他行业，推动非农经济持续发展。此外，机动机械化结合保鲜和储存技术可以改进食品安全；还能增强农业韧性，尤其是面对气候冲击的韧性，支持农民更快速地完成农场工作，以及更灵活地适应天气变化。

因此，机动机械化在某些环境中仍有持续发力的空间。在低收入和中等收入国家，小规模生产者可能更青睐两轮拖拉机等小型机械，此类机械相比传统重型机械成本更低，也更具环境可持续性。近年来，根据本地需要调整机动机械方面出现了很多创新做法；创新性地将机械化操作与其他田间操作融合，有助于各国提高资源使用效率，节约稀缺资源（如水资源）。

因此，农业机械化在很多低收入和中等收入国家的政治议程中仍然占据重要地位。撒哈拉以南非洲尤为如此，而此前，国家主导的机械化项目以失败告终，农业机械化在相当长的时间内无人问津。

手动技术和畜力牵引在很多情况下也仍然发挥着重要作用。畜力牵引可以是小规模、散地块农场的重要动力来源，而较为先进的手动工具可以减少对人力的需要。耕畜役畜和先进的手动工具动力不及拖拉机，但在很多地区都可以弥补劳动力缺口，有助于提高作物产量，支持农田扩张。很多情况下，这些方法是增加动力供给的最可行方案。

放眼未来：投资数字自动化的商业逻辑

投资农业技术的商业逻辑在于私营部门能否盈利。相关行为主体，包括生产者、经销商和服务提供商，通常会做出理性决定，追求利润和福祉最大化。投资自动化技术会产生成本；若技术在本地应用范围不大，成本还会进一步提高。只有收益高于成本时，供应商和生产者才会做出必要的承诺。对某些技术而言，特定条件下私营部门的投资成本可能会超过收益；但对整个社会却是十分有益的。这种情况下，可以借助公共干预让私营部门收益与社会整体利益协调一致。

由于数据匮乏，本文基于对数字自动化服务提供商的访谈，通过 27 个案例研究分析了农业数字自动化的商业逻辑。案例研究涵盖了

所有区域和各类农业生产体系（作物、畜牧、水产和农林），代表了处于不同商业化阶段的多种数字自动化解决方案，很多仍处于开发和商业化的初期。分析结果表明，27 家服务提供商中只有 10 家能够做到盈利和财务可持续。这 10 家服务提供商大多集中在高收入国家，所采用的解决方案处于成熟阶段（即广泛采用），且多数服务于大规模生产者。在超过三分之一的案例中，农民的获益主要体现为生产率提高、效率提升和新的市场机遇。总体而言，分析结果表明，数字自动化技术的商业逻辑尚不成熟，一部分原因是很多此类技术仍处于原型阶段，另外也是因为技术采用仍然面临较高壁垒，尤其是在低收入和中等收入国家。

尽管很多技术的开发仍处于初级阶段，但案例研究中却可以汲取很多重要的经验教训。推动技术采用的关键因素首先是了解一种解决方案在顺畅完成农业作业方面的能力，其次是农民对于这种解决方案的掌握能力。采用技术方面常常遇到的障碍包括缺乏数字技能，连通性差，以及电力等其他支持性基础设施落后。除此之外，还有抵触变化的心理，通常是年老的农业人口。代际更迭是技术采用的一个推动力量，青年农民在数字化和高级自动化转型进程中发挥着积极作用。技术采用的另一个动力或障碍是市场环境——生产者之间竞争有力会促使他们承担更大的风险，采用可能提高生产率和效率的新技术。制约性因素包括对技术进口的监管、数据共享政策缺位，以及公共政策和激励机制不足。另一方面，若设计得当，法律法规和公共支持可以成为技术采用的强大动力。

商业考量之外：农业自动化会带来环境效益，但需要开展更多的研究

在高收入国家，以及低收入和中等收入国家的很多商业化农场中，农业机械化水平已经很高，主要依赖大型农机的使用。然而，此种机械化模式带来了土壤侵蚀、森林砍伐和生物多样性损失，而所有这些因素都在削弱农业韧性。自动化技术创新和应用型农艺研究有助于探索应对这些挑战的解决方案。例如，从小型、轻量机械着眼，因地制宜地改造机动机械化。可能适于小规模生产者的解决方案包括小型四轮和两轮拖拉机。小型机械化无需大费周章地清理和改造农田，因而会尽量减少生物多样性损失。动力除草机和移动式脱粒机等其他小型机动机械也可以对改进性别平等做出贡献，因为妇女可以便捷地操作这些机械。

支持精准农业的数字自动化技术也可能带来显著的环境效益，推动采用保护性耕作等可持续生产模式。使用计算机和物联网进行自动化温室管理已有很多成功先例，在节水和节约其他投入品方面表现优异。小型集群机器人技术可以实现环境效益，包括减少农药和除草剂的使用，优化投入品使用，减少土壤压实。此类机器人技术在某些环境中已具备商业可行性，但还需要开展更多的研究，尤其是对于小规模农业的潜力；相比于大型机械，小型机器人在不规则田地上更加具有优势。

这些环境效益目前只局限在特定区域；此外，很多解决方案仍然处于开发和商业化的早期阶段，因此还需要开展包括测试在内的更多研究。若政策制定者和生产者都完全知晓这些技术的利好，那么研发投入就有可能不断增加。转向可再生能源也很重要，能够为动力

自动化创造新的机遇，特别是在农村偏远地区。但无需赘述，还是要进一步开展研究，摸清哪种离网可再生能源解决方案能够最高效地为各类农机提供动力。

农业自动化对劳动力的影响较为复杂，但消费者可以从中获益

评估农业自动化对就业的整体影响十分困难，这需要收集海量数据，跟踪所有的转型过程以及工人的重新配置，不仅仅是农业活动，也要涵盖上游和下游。随着农业转型的推进，很多人离开农业去寻找薪酬更高的就业机会，农业就业人数比重逐年下滑。这个过程重塑了整个农业粮食体系的劳动力供求格局。当农业粮食体系的所有节点同步变化，要厘清农业自动化对劳动力市场和社会经济状况产生的具体影响几乎是天方夜谭。

农业自动化对农场就业的可能影响不一而同。随着很多任务被自动化取代，低技能劳动力需求可能会呈缩减态势。与此同时，自动化也刺激了对熟练工人的需求。从农业粮食体系整体来看，自动化会减少薪酬较低的季节性农场就业，但会刺激上下游行业增加薪酬高的非季节性就业机会。

自动化带来的影响在不同类型的农场中也有所区别。对小规模和自给自足型农民而言，自动化可以解放家庭劳动力，使其从事非农就业，同时促进扩大生产规模。在商业化家庭农场中，自动化可以解放家庭劳动力，减少对雇佣劳动力的需求；但若商业性农业活动在自动化的助力下有所增多，则对雇佣劳动力的需要可能会不降反增。企业商业化农场自动化水平最高；相应地，农场劳动力的需要也会随之减少。即

便在此种情况下，若采用自动化的原因是工资上涨、劳动力短缺，则自动化会促进劳动生产率和工资水平的提高，但不会带来失业。

若推行自动化的背景是劳动力充足，而且是通过补贴人为拉低成本，那么就会面临引发失业的严重风险，产生严重的社会经济后果，而首当其冲的自然是那些技能最低、无法另谋出路的劳动力。

农业自动化会对消费者产生显著的社会经济影响，因为自动化会降低食物成本。数字自动化还会创造对消费者有益的创业机会。例如，让难以自动化且富含营养的传统作物再度焕发活力，以及降低有机食品的生产成本，而目前有机食品的生产需要很多劳动力。

农业自动化进程必须具备包容性，且不让任何人掉队

农业自动化必须包容弱势以及被排斥和被边缘化的群体，尤其是小规模生产者、牧民、小规模渔民、小规模林农和森林社区，还包括农业计酬工人、非正式微型企业和工人、失地群体以及流动劳工。妇女、青年和残疾人群体置身其中尤为重要。

农场自动化的性别影响非常复杂。由于在获取资本、投入品和服务（如信息、推广、信贷和肥料）方面处于弱势，某些情况下甚至还有文化规范的影响，女性在农业技术采用方面不及男性。政策制定者和本地实施伙伴需要倡导考虑性别因素的技术研发、推广和服务。

青年农民往往是最先拥抱技术的先行者。农业自动化催生新的就业类型，需要更加扎实的技能。要重视制定完善的人力资本开发和能力建设议程，并重点关注青年。

随着节省劳动力的自动化技术在农场中不断普及，农业劳动力规模将会缩减，但技能水平也会提高。这方面的一个重要挑战是推动农业劳动力由低技能的手工活动转型成为掌握更复杂技术的人才。然而，担心自动化会让数百万农业工人无处谋生显然是没有依据的。农业操作自动化，以及与之伴生的农业劳动力结构转变，是一个循序渐进的过程，各个地区、各类作物和各种农业任务都会有所差别。对于能够以低成本自动化轻易替代的劳动密集型农业活动，采用节省劳动力的自动化技术动机最强。随着部分农业活动实现自动化，其他活动就需要更多劳动力。

若现有自动化技术只迎合大规模作业，则小规模生产者和加工商就有可能因为达不到规模经济门槛而被排挤在外，很难立于不败之地。然而，这并不是农业自动化的必然结果；突破规模限制、低成本自动化的关键是全面普及。

在任何情况下，通过限制自动化发展来保护农业就业和收入的想法都很难自圆其说。事实上，限制自动化的政策只会让农场在竞争中处于不利，无法扩大生产规模。对于农场而言，提高工人工资、改善工作条件的唯一途径就是采用新技术，不断提升生产效率。若无法通过技术变革提高劳动生产率，那么贫困农场工人摆脱贫困、实现粮食安全的前景就会变得十分渺茫。

高效、可持续、包容性农业自动化路线图：政策、投资和制度

农业自动化在促进包容性、可持续农业，进而推动可持续和包容性农村发展方面具有很大潜力；然而，这种潜力不会自动变为现实，而是会取决于具体的社会经济背景，以及农业自动化所处的政策和制度环境。一国在此过程中是赢是输取决于如何管理转型过程。实体、经济、法律和社会基础设施均已到位，能够支撑数字自动化的国家会占得先机。而对挑战置之不理的国家可能会因此败北。

同任何技术变革一样，农业自动化必然会带来某些颠覆，既会有人坐享其成，也会有人权衡利弊。本报告提出多种政策、制度、法律和投资方案。这些因素综合在一起，形成一份路线图，确保农业自动化有助于建设高效、多产、可持续、有韧性和包容性的农业粮食体系。某些方案侧重于为农业企业营造有利的环境，尤其是就自动化技术投资而言；此类措施需要辅以法规和其他行动，保证投资活动利于实现环境可持续性和气候韧性。最后，各项政策和计划必须就位，确保所有人，尤其是妇女、小规模生产者和青年等边缘化群体，都能获益于此过程。

政府还要权衡利弊——经济、环境和社会目标各有侧重，有时甚至是相互矛盾。下文讨论了拟议的政策、投资和其他公共行动，将其作为农业自动化路线图的组成部分，但在不同背景下这些行动的权重也会有所区别。政府必须基于实际挑战和本国能力对各项行动安排先后次序。政府干预的一个重要跨领域维度是一般性服务支持，即通过政府行动为农业和农业

粮食体系营造有利的商业环境，但又不会扭曲激励机制，或偏向某些行为主体（或某些农业部门）。

以农业为着眼点的政策和干预也会影响自动化技术的采用

很多农业政策可以直接支持自动化，帮助克服技术采用的障碍，尤其是对小规模生产者而言。政府可将信贷政策直接与农业自动化挂钩，影响技术采用进程。投资贷款是最为常见的自动化技术融资方式，例如基于合同的证券、贷款担保制度、连带责任小组、租赁以及配套赠款。此外，不会扭曲市场的“明智”专项补贴也可以有一席之地。加强土地权属保障非常重要，因为若土地权属没有保障，生产者就无法用地契作抵押来申请信贷。减少机械、数字设备和零部件的进口关税，简化通关程序，也有助于降低自动化技术的交易成本，促进技术采用。

弥合数字技能缺口需要开发人力资本，例如借助职业培训中心的力量。制造商、所有者、操作者、技术员和农民的知识与技能都要加强，其中青年是重中之重，因为青年通常是自动化的重要推动力量。改善农业推广和农村咨询服务也有助于技术采用。公共推广服务在确保包容性农业自动化进程中始终发挥着重要作用；然而，缺少训练有素的推广人员是多数低收入和中等收入国家面临的主要瓶颈。

人力资本对于使用者（即农民和服务提供商）来说十分重要，而对于参与创新的各方（如研究人员和科学家）也同等重要。政府可资助或开展围绕自动化技术的应用型研发活动，尤

其是适应本地需要、适于小规模生产者的自动化解决方案。精准农业解决方案影响评估是一个重要的研究课题，要对方案的营利性、环境可持续性以及包容性开展分析。小型机械和技术门槛较低的数字解决方案要作为研究重点，例如交互式语音应答、非结构化补充业务数据及短信息服务。小型机械可能更适于本地情况和小型农场，而技术门槛较低的解决方案更容易以较低成本惠及所有农民。

最后，政府要制定质量保障和安全标准，可以交由公立机构、市场或第三方机构进行管理。自动化安全法律法规要充分征询所有利益相关方的意见，必须做到透明，确保合规。

农业粮食体系之外的政策、制度和投资影响农业自动化技术的采用

并非立足于农业粮食体系的一般性政策和投资可以营造有利环境，包括基础设施。在低收入国家以及撒哈拉以南非洲大部分地区，道路基础设施尤为落后。改进道路基础设施可以降低获取机械、备件、维修和燃料的交易成本，催生服务市场。投资建设能源基础设施也同样重要，例如开发可再生资源的离网电力，因为任何自动化技术都离不开电力。利用本地投资开发可再生能源有助于抵御能源市场冲击和燃料价格波动。

改善通讯基础设施和网络连通状况对于农业自动化顺畅运转至关重要。连通性差的问题普遍存在，即便高收入国家的农村地区也是如此。政府可为农村地区的互联网服务商提供税收优惠或低息贷款。法律也可发挥重要作用——倡导公立—私营—社区三方合作，改善连

通性和相关基础设施，提供数据服务和支持。投资还应关注相关的支持性基础设施，例如天气预报公共数据集，以及农作物和畜牧业生产日历。

有形基础设施固然需要作为关注重点，但机构、宏观经济状况和总体制度能力对于农业自动化技术的采用也很关键。完善信贷市场对于自动化技术融资非常重要；实际上，小规模生产者通常很难以负担得起的利率获得信贷，因而根本无法投资自动化技术。制度和政治能力需要加强，引导自动化技术的开发；而另一方面，若实力强大的私营技术企业抢占先机，就可能产生不利影响，进而波及整个社会。另外，透明的国家数据政策（包括数据保护、数据共享和隐私规范）本身也有助于数字自动化的推进。其他有利因素包括建设国家数据基础设施，推动互联互通，即机器之间实现精准、可靠的通讯。最后，汇率政策和贸易政策也可能通过机械、数字设备和备件进口价格影响自动化格局。

若实施得法，农业自动化就会助推建设包容性、可持续农业粮食体系

即便政府能够提供公平竞争环境，支持私营部门提供创新技术，农业自动化也仍然面临挑战。农业自动化面临三重挑战：不让任何边缘化群体掉队；避免失业增多；预防环境损害。相关政策可为应对这些挑战助一臂之力，确保自动化技术推动包容性、可持续农业转型。因此，政策制定者需要采取行动。

首先，政府要确保妇女、青年和其他弱势群体能够从自动化进程中受益。着眼于帮助妇女应对困境的政策（例如改善妇女的土地权利，

或支持妇女获取信贷和推广服务)也有助于增加妇女对自动化技术的获取。公共研发活动应考虑到妇女的需要,重点攻关性别友好型机械化技术。此外,还需要制定面向农村青年和其他弱势群体的议程,确保他们掌握必要的技能,能够从事自动化相关的高技能工作。

其次,政府要防范自动化技术对就业造成的不利影响。若自动化进程由市场因素触发(如农村工资水平提高),且取代的是没有薪酬的家庭劳动,就不大可能造成失业。与之相反,若自动化进程是由政府行为刻意为之(如补贴机械进口),就会取代某些工作,引发失业,降低农村工资水平。因此,政策制定者不应在时机未到时刻意倡导自动化。反之,政策制定者也不应以自动化会取代劳动力、引发失业为由限制技术采用。通过一般性服务支持提供公共或集体产品——这种政策支持最有利于自动化进程平稳推进,不会引发失业。此类措施包括支持农业研发和知识转让服务。

再次,政策要确保农业自动化有利于建设可持续、有韧性的农业粮食体系。机动机械化带来诸多惠益的同时,也给环境造成了不利影

响,包括生物多样性损失、土壤压实和侵蚀,以及水质退化。精准农业等更为先进的数字自动化技术可以尽量减少甚或完全避免此种不利影响。应用型技术和农艺研究课题应探索最适于本地农业生态条件的自动化解决方案,政府则应促进采用环境友好型技术。农民可以根据当地农业生态条件选择最为适宜的自动化解决方案,而政府必须要营造有利环境,包括提供可用技术的信息。

总而言之,若上述挑战得以妥善应对,农业自动化就会成为助推力量,支持实现可持续发展目标,尤其是目标1、2、3、9和10。技术的适当组合,以及适度的政策、干预和投资,将取决于很多因素,包括经济发展水平、当前制度安排、本地农业特点以及政策制定者的具体目标。在综合运用政策工具实施具体行动之前,政策制定者要了解技术采用的背景特点,评估相关地区面临的具体问题(如连通性、不平等、贫困、粮食不安全、营养不良)。采用何种技术应由农业生产者自行选择,而政府要做的是营造包容性的有利环境,为创新提供沃土;另外还要建立必要的激励机制,确保技术采用进程的包容性。■



中国
农民用平板电脑监测辣椒作物。
©iStock.com/xijian

第 1 章

农业自动化： 农业自动化是什么， 为何如此重要

要点

- 总体而言，自动化为农业生产者和农业粮食体系带来了许多机遇，但由于国与国之间以及各国内部获取和采用自动化的水平并不均衡，其潜力并没有得以充分发挥。
- 具体而言，农业自动化可以提高生产力，增强韧性，改善产品质量和提升资源利用效率，减少人类繁重劳动，缓解劳动力短缺，加强环境可持续性，并促进适应和减缓气候变化。
- 农业自动化有助于实现 2030 年可持续发展目标，尤其是目标 1（无贫穷）和目标 2（零饥饿）以及与环境可持续性和气候变化相关的目标，并通过催生新的创业机会推动农业粮食体系全面转型。
- 若农业自动化对某些人来说始终遥不可及，特别是对小规模 and 女性农业生产者而言，就会导致不平等。若不妥善管理，自动化还会造成种植结构单一等负面环境后果。
- 为了充分释放农业自动化的潜力，必须保证技术对所有人的可用性、包容性和可及性，技术必须因地制宜以适合不同规模的农业生产，必须有助于改善环境的可持续性。

- 主要的挑战在于如何确保技术做到因地制宜，如何鼓励地方的创新进程，以及如何帮助生产者形成采纳和使用新技术的能力。

创新进程推动和促进技术变革，提高生产力和收入，改善人类的福祉，这是古往今来社会经济进步的主要动力。这条规律适用于经济的各行各业，农业粮食体系也不例外。当前，为了养活不断增长的世界人口，我们需要增加营养食物的产量，同时还要解决诸多难题，例如农业用地紧张，自然资源的使用不可持续，冲击和压力此起彼伏，气候变化加速的后果日益突显。因此，农业粮食体系必须以可持续的方式应对提高生产力的挑战。现在比以往任何时候都更迫切地需要实施新的技术解决方案，提高农业生产所有部门的生产力和可持续性，包括种植业、畜牧业、渔业、水产养殖业和林业，并提高农业粮食体系在初级生产之外其他阶段的生产效率。

技术变革持续地改变着我们的经济，数字技术日新月异，计算机速度越来越快，移动电话、传感器、机器学习和人工智能，各种新技术层出不穷，在此基础上，突破性的设备应运而生，从根本上改变了机械在农业生产中的使用

方式。和其他领域的技术一样，按照创新的整体规律，新的农业自动化技术可能会补充旧技术的不足，或者取而代之；旧技术和传统实践也有可能因为新技术的出现而重新焕发生机，或找到新的用武之地。自动化不仅有可能使农业生产摆脱繁重的体力劳动，甚至有可能使收集和分析信息数据并进行决策的脑力劳动变得可有可无。自动化可以提高操作的及时性以及投入品施用的准确性和效率，推动精准农业¹落地。

人类历史上，技术进步对劳动者的负面影响曾多次引起社会的忧虑，世人曾普遍认为自动化会导致工作岗位减少和失业增加，然而，历史事实证明这是杞人忧天。本报告认为，恰恰相反，包括数字技术在内的自动化可以增强农业生产的韧性，更好地抵御各种冲击和压力，例如干旱和加速的气候变化。农业自动化可以提高生产力，改善产品质量，提升资源利用效率，缓解劳动力短缺，通过减少繁重的体力劳动促进体面就业，并增强环境可持续性。然而，不容否认的是，引进自动化技术，特别是不考虑当地具体情况盲目引进，可能会给一些群体带来社会经济挑战，包括对劳动力市场造成冲击，但这些挑战可以通过适当的政策和立法加以解决，本报告对此进行了论述。另一个重大挑战是自动化的推广面临各种障碍，特别是对贫穷的小规模生产者而言，从而造成获取自动化的不平等。

农业自动化与多项可持续发展目标密切相关，尤其是目标1（无贫穷）和目标2（零饥饿）。就世界各地农业对自动化的接受程度而言，自动化也可以推动实现目标9（产业、创新和基础设施），该目标要求支持和提升技术能力、研究和创新，尤其是在低收入国家。同理，如果采用自动化的障碍能够被克服，自动化可以弥合技

术鸿沟，促进实现目标5（性别平等）、目标8（体面工作和经济增长）和目标10（减少不平等）。自动化有可能提供更安全的工作条件和更安全、更高质量的食物，因此有助于实现目标3（良好健康与福祉）。最后，成功采用增强环境可持续性的自动化解方案，有助于实现目标6（清洁饮水和卫生设施）、目标7（经济适用的清洁能源）、目标12（负责任消费和生产）、目标13（气候行动）、目标14（水下生物）和目标15（陆地生物）。

本报告的研究内容是，在农业中和食品供应链的早期阶段采用自动化，如何有助于实现可持续发展目标并确保产生积极影响。本报告分析了农业自动化的采用情况，包括实施的趋势、这些趋势的动力及潜在的社会经济影响。本报告还讨论了一系列政策和立法的选项和干预措施，以最大限度地提高自动化技术的效益，并降低其风险。本报告的第1章对农业自动化进行了定义，阐述了农业自动化与可持续发展的关系，并介绍了新的自动化技术可能带来的机遇、挑战和利弊权衡。本报告的分析遵循一个基本前提：农业自动化的进步有助于人类克服诸多挑战，实现营养食物的持续增产，但如果我们要使自动化的效益最大化，必须妥善管理可能伴随着自动化产生的新挑战。■

历史进程

历史上，技术变革的进程伴随着农业生产，人类为了减少繁重的劳动，一直在开发各种独具匠心的工具，并利用火、风、水和动物的力量。公元前4000年，美索不达米亚的农民就已经在使用牛耕；²约公元前1000年，在中国出现了水力磨坊。³在过去两个世纪中，由于蒸汽动力的发明（蒸汽脱粒机和蒸汽犁于19世纪中叶问

世)，技术变革加快了步伐；随后又出现了化石能源驱动的拖拉机、收割机和加工机械，新的食品保存技术也得以发明，技术变革进一步加速。^{4,5} 这一系列革新使世界各地的农业生产逐渐变得没有那么繁重，农民从重体力劳动中解放出来，因此，初级阶段的农业生产对劳动力的需求与之前相比大大减少，农民开始流向其他就业部门务工，例如从事工业和服务业。农村儿童有时间上学，妇女可以寻求非农就业机会或操持家务。与此同时，种子化肥等投入品和灌溉等农业操作也取得了巨大进步，引发了绿色革命，在农业劳动力减少和新增农田面积有限的情况下，粮食产量却大幅提高。⁶

农业生产力提高，农业劳动力开始从农业流向其他经济部门，这一过程通常被称为农业转型。随着经济的发展，农业工人被节省劳动力的技术排挤出农场，与此同时，非农部门赚钱的机会吸引他们进入工业和服务业。^{7,8,9} 因此，随着农业转型的推进，从事农业的人口比例逐渐下降。在工业革命之前，世界上大多数人生活在农村地区，依靠初级农业生产维持生计。对于经历了深刻农业转型的国家来说，现在的情况则完全不同。例如，在美国，2020年只有1.4%的就业人口从事农业。¹⁰ 其他高收入国家直接从事农业的人口比例也非常低。

这样的农业转型并不是一个孤立发生的进程，而是涉及整个经济的转型。事实上，人口不断增长，城市化程度越来越高，为了给越来越多的城市人口提供充足、安全和有营养的食物，不仅需要对农业生产进行投资，还需要对运输、储存和食品加工进行投资，建设各类实体基础设施和交易市场。农民要获得充足的农业投入品，包括各种物资和人力资本，要进入市场销售农产品，必须要有良好的道路和交通设施。

当前，农业自动化正在进行之中，其背景是不断演变的农业粮食体系。事实上，农业自动化对农业粮食体系的影响超出了初级生产的范畴，而且农业自动化本身也受到初级生产以外的事态的影响。初级生产的自动化可以推动农业粮食体系转型，尤其是通过在上下游创造新的创业机会。同样，上下游的自动化对初级生产的自动化也会产生影响，效果如何取决于农业粮食体系的活力、其各个阶段的状态以及彼此间的双向联系。

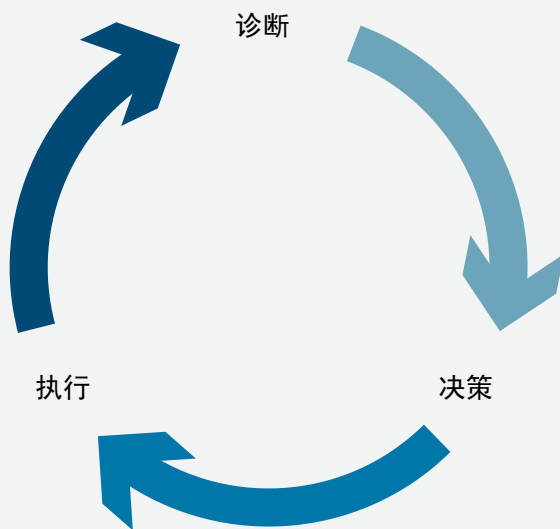
技术被采用也是一个渐进的过程，¹¹ 需要在各种各样的现实背景中实践、测试和调整，其影响要假以时日才能显现。例如，机动拖拉机的兴起无疑带来了许多好处，但也造成了负面的环境影响，包括毁林、生物多样性丧失和过度使用化石燃料，这些影响的显著性经过几十年才显露出来。^{12,13} 同样的道理可能也适用于绿色革命中采用的各种技术，毫无疑问，这些技术使产量大幅提高，但一些地方却为此付出了长期和高昂的环境代价。¹³ ■

农业自动化是什么？

机械化贯穿农业发展的历史，经历了漫长的演变，终于发展成今天的农业自动化。联合国粮食及农业组织（粮农组织）将机械化定义为在农业作业中使用各种机械和设备，从简单和基本的手动工具到复杂的机动机械。¹⁴ 因此，机械化指的是农业工作中的执行环节实现自动化，随着我们从基本的手动工具过渡到机动机械，自动化程度逐渐提高。

在执行任何农业操作之前，必须经过两个阶段：诊断和决策。如图1所示，诊断、决策和执行三个环节是一个循环往复的过程，彼此

图1 自动化系统的三阶段循环



资料来源：粮农组织为本报告编制。

之间有连续的反馈。无论是收割，或是疾病防控，还是灌溉，任何农业操作的实施通常都始于诊断当前面临的问题，以确定是否需要采取行动，以及采取什么样的行动。例如，在灌溉之前，种植户需要知道植物是否需要水。同样，养殖户在使用抗生素之前，需要了解动物的健康状况。农民可以凭借自己的经验进行诊断，但也可以通过监控传感器实现自动诊断。作出诊断后，农民需要决定做什么，例如需要浇多少水或使用多少抗生素，以及何时做，农民可以凭借自己的经验和知识做出决定，也可以由控制器来进行决策，控制器基于诊断阶段传感器提供的信息发出命令。执行是第三个也是最后一个阶段，农民可以直接使用手动工具或动物完成执行，也可以使用各种机器完成执行。最先进的自动化技术能够实现全部三个阶段的自动化，水果采摘机器人就是一个很好的例子，这些机器

人可以按顺序依次自动完成三个阶段的任务，而果农只需监控传感器和维护设备。

任何能使三个阶段中的至少一个阶段实现自动化的技术都可以归类为自动化技术。机电一体化¹⁵主要用于在三个阶段中的最后一个阶段：执行，如耕地、播种、施肥、挤奶、饲喂、收割和灌溉等农业操作的自动化，例子不胜枚举。就本报告而言，在图1所示的三个阶段中，任何能在一个或多个阶段协助农业生产者的技术都被视为自动化技术，例如农民使用传感器监测植物和动物，从而使诊断阶段自动化，但在没有自动化设备帮助的情况下需要根据自己的经验做出决策。在某些情况下，执行阶段也有可能用到传感技术（例如在收割期间创建单产图），然后反馈到诊断阶段，因而出现了图1所示的循环。

图 2 农业自动化的演变



资料来源：粮农组织为本报告编制。

随着数字技术和自动化设备的兴起，如具备机器学习和人工智能功能的传感器和机器人，诊断和决策的自动化成为可能。新型自动化诊断和决策数字设备日益成为机动设备的得力助手，甚至取而代之。例如，传统的拖拉机可以进行改装，变成大田里的无人驾驶自动播种车。¹⁵ 虽然机械化减轻和减少了繁重和重复性的工作，缓解了劳动力短缺，但数字自动化技术可以更精确地执行农业作业，更高效地利用资源和投入品，从而进一步提高生产力。因此，数字自动化可以提高环境可持续性，增强抵御气候冲击和

压力的韧性。然而，本报告接下来提出，需要认真考虑数字自动化可能对劳动力产生的影响。

图 2 展示了数字自动化技术的发展历程，农业技术如何从只协助执行实际操作演进到协助诊断和决策，每种技术都有相应的实例。技术的演进可以通过以下技术类别进行概括：

- ▶ **手动工具：** 人类进行诊断和决策，用简单工具辅助执行，如斧头和锄头。
- ▶ **畜力牵引：** 仍然由人类进行诊断和决策，但

是实际操作由动物牵引农业机械（如犁）独立或者配合人力执行。

- **机动机械化：**人类进行诊断和决策，但由机动机械和设备执行操作。这一类技术标志着农场的能量来源从内部（如人体肌肉和动物）转向外部（如化石燃料和电力）。然而，这种转变需要相应的基础设施来确保能源供给源源不断。
- **数字设备：**各种各样的数字工具通过将脑力劳动自动化或提高动力机械的精确度，协助人类改进诊断和决策。
- **人工智能机器人：**人类依赖农业机器人通过人工智能完成诊断、决策和执行，这些机器人可以是固定的（如挤奶机器人）或移动的（如水果采摘机器人）。人类监控传感器并对机器人进行维护。这一类别包括最先进的自动化技术，其中一些尚未大规模应用或仍在开发之中。

遗憾的是，繁多的工具和技术让人眼花缭乱，导致文献中对农业自动化的定义并不统一，收集自动化数据的工作因此也并不顺利。¹¹ 例如，一些人将农业自动化定义为机器人在没有人类干预的情况下自主导航，提供精确的信息以完善农业作业。¹⁶ 还有人将农业自动化定义为通过移动、自主和有决策能力的机电设备完成生产任务。¹⁷ 然而，这些定义都有明显的局限性，并没有涵盖自动化的方方面面和所有形式，自动挤奶机这样的固定设备就是一个例子。此外，这些的定义不仅排除了大多数实现农业作业自动化的动力机械，也排除了仅用于自动化诊断的数字化工具，如传感器。

图 2 以简化的形式呈现了自动化技术发展的真实历史，尽管各个技术类别之间可能存在重叠和模糊不清的灰色区域，这仍有助于突显本报告的侧重点和对农业自动化进行定义。农

业自动化的概念体现在三个蓝色阴影框中，这正是本报告的重点内容。在此基础上，本报告将农业自动化定义为：

在农业作业中使用机械和设备，改进诊断、决策或执行，以降低农业劳动的繁重性，或提高农业作业的及时性，甚至于精准性。

根据这一定义，农业自动化包括精准农业，这是一种管理策略，通过收集、处理和分析数据改善管理决策（见术语表）。

从**图 2** 的第一个蓝色阴影框讲起，机动机械化包括由人类操作机器执行诸如耕地、灌溉和挤奶等任务。然而，人类会基于自己的观察或通过测量简单的参数来做出诊断，然后根据自身或他人的经验知识和可供参考的资料做出决策。**图 2** 的最后两个类别涵盖了数字自动化，这包括各种各样的工具、设备和软件，而且往往是多功能和跨学科的，使整个系统的资源管理高度优化、个性化和智能化，并且有很强的可预测性。¹⁸ 随着数字自动化技术（人工智能机器人）的发展，诊断、决策和执行三个阶段都可以实现自动化，而人的作用在很大程度上仅限于监控和维护自动化设备，水果采摘机就是一个例子，机械臂收到来自控制器的命令后，基于从传感器获得的信息，就会开始采摘水果。

这三个阶段相互衔接，自动化可以仅仅涉及其中一个阶段，当然也可以涉及任意两个阶段或者全部三个阶段。例如，诊断可以由传感器完成，而决策和执行完全依赖于人；或者诊断和决策都通过数字技术完成，而执行由人来完成。自动喷雾机器人是三个阶段完全自动化的例子，系统首先获得土壤肥力数据，然后决定该次的作业面积和施肥比率，最后按照既定的比率执行施肥。■

我们为什么需要利用农业自动化？了解关键驱动因素

农业自动化是农业粮食体系全面转型不可或缺的重要组成部分，随着大量劳动力放弃农业投身薪酬更高的其他经济部门，自动化可以帮助农业生产者维持甚至扩大生产规模。除了缓解农业生产对劳动力的需求，自动化还可以在农业粮食体系的其他环节创造就业机会，进一步推动农业粮食体系转型。从历史上看，随着国民经济的发展，很多农民被其他工作机会吸引而离开农村。节省劳动力的创新通过降低单位产出的劳动力需求来提高农业生产力。^{7, 8, 9} 在劳动力的供应趋势和需求趋势共同作用下，农业就业人口的比例随着时间推移逐年下降，低收入和中等偏下收入国家也不例外（见图3）。

伴随这一转型进程，创新、技术变革和投资越来越频繁，这些都是社会经济发展的重要因素，对农业粮食体系在初级生产之外的各个阶段都会产生影响。例如，为了向日益城市化和富裕的人口提供充足、安全和有营养的食物，不仅需要对农业进行投资，还需要对运输、储存、食品加工和其他基础设施进行投资，农业部门与非农部门也因此通过上下游千丝万缕的联系紧密结合在一起。²⁰ 作为农业粮食体系转型的一部分，农业自动化可以带来以下多种好处。

对于农业生产者的机会

农业自动化为初级生产以及整个农业粮食体系带来了许多机会。例如，自动化可以通过更及时和更精细的作物和牲畜管理，提高土地和

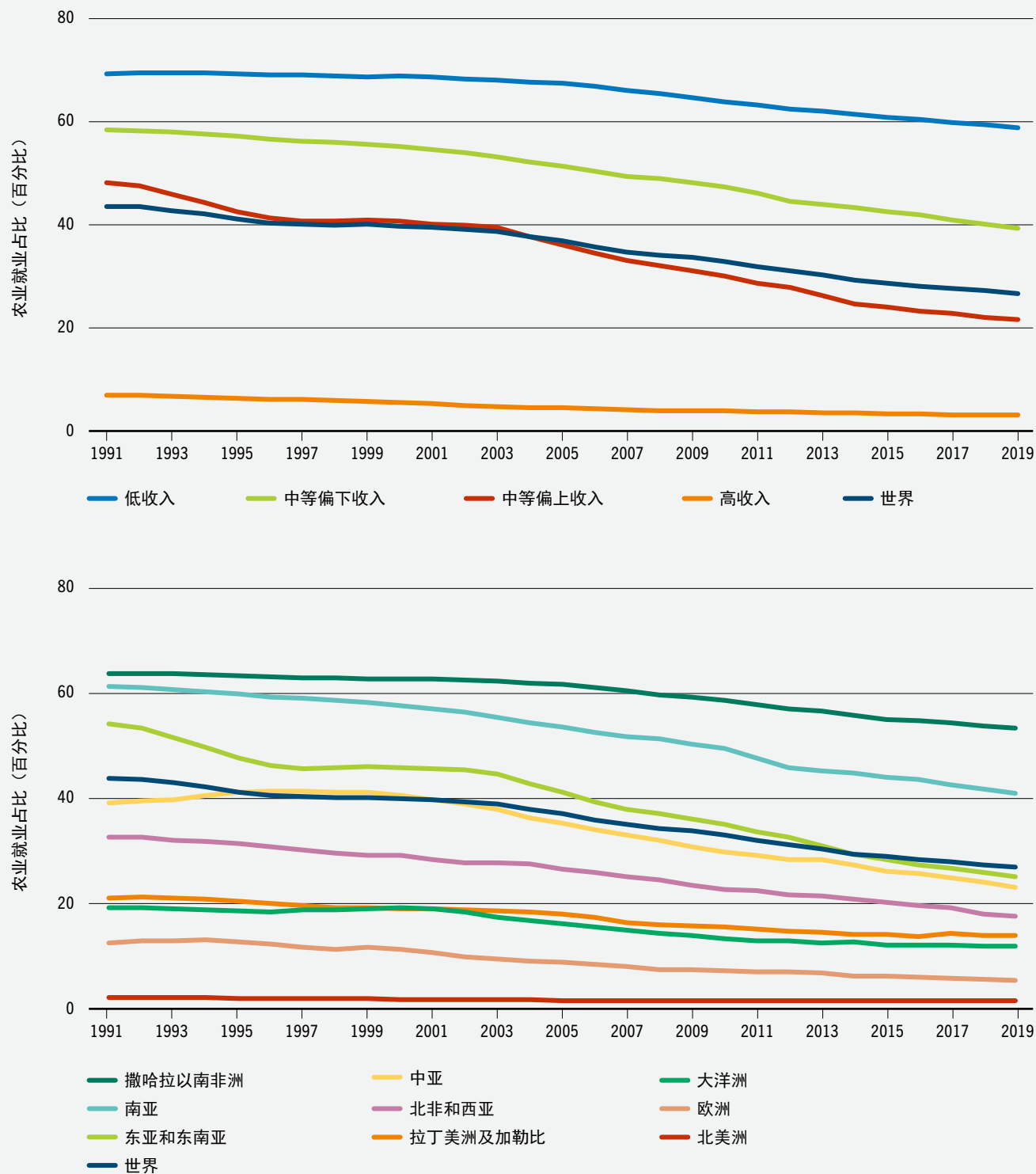
劳动力的生产力及经济回报，^{21, 22, 23} 而这又有助于增加农民收入，²⁴ 降低风险，提高韧性和增强环境可持续性。随着数字技术的进步，农业自动化有可能不再受制于经营规模，换句话说，自动化解决方案不仅可以用于大型农场，也可以惠及中小农户，这可以通过研发小型的机器和设备来实现，也可以通过农机共享数字平台来实现（见第3章）。

农业自动化可以创造更好和更安全的工作条件，让农民赚取足够的生活费，减少繁重的农活，这有利于促进体面就业。大部分农活是由家庭成员（包括妇女和儿童）承担的，并没有报酬。^{25, 26} 自动化可以让成年人腾出时间从事副业或非农工作，照顾家人的起居饮食，²⁷ 也可以让儿童腾出时间玩耍和上学。^{26, 28, 29} 证据表明，机器挤奶改变了奶农的生活方式，奶农有时间从事其他工作，有时间与家人相守，日常的工作安排更为灵活，这些是采用挤奶机的奶农最为看重的好处。^{30, 31} 自动化可以减轻繁重的劳动，这对于农村妇女地位的提升有积极影响，她们有了更多可以自由安排的时间，可以考虑尝试新的营生，或者扩大现有的农业经营。自动化也有助于吸引年轻人从事农业。

农业自动化还有另外一个重要作用，那就是有可能为农村地区带来创业机会。例如，制约有机农业的主要因素之一是劳动力成本过高和人手短缺。虽然在许多国家，消费者对有机食品的需求很大，但他们并不太愿意为有机食品支付溢价。用机器人完成除草、选择性收割和其他田地作业，可以显著降低有机农业的生产成本，从而为更多的从业者创造商机。

在过去，为了顺利地使用机械自动执行某些操作，农业生产的方式需要进行相应

图 3 1991-2019 年农业就业在总就业中的占比，按收入（上图）和区域（下图）划分



资料来源：粮农组织，2022。¹⁹

的调整。例如，随着番茄收割机在美国被广泛采用，一个新的番茄品种被培育出来，这种番茄在藤上均匀成熟，果皮坚韧，哪怕机器收割的动作很粗暴，也不会轻易破裂。³² 随着数字自动化技术的进步，更加精细的农业作业成为可能。例如，工程师目前正在开发用于收获草莓的机器人解决方案，而草莓是最娇嫩的作物之一，采摘极其耗费人力。

在农场之外，加工、保存、储存和运输技术有助于减少粮食损失和浪费，提高粮食安全，实现农产品的增值，³³ 建立高效的农业粮食体系，以可持续的方式为所有人提供健康膳食，这些都是必不可少的要素。自动化还可以为从业人员提供更安全的工作条件，例如，通过减少农药使用降低职业风险。

填补劳动力缺口

从就业的角度看，农村劳动力短缺是一个极为紧迫的问题，尤其是在高收入国家（见图 3），而农业自动化被视为是解决这个问题的可行办法。统计数据显示，在过去十年中，欧盟已有 250 万人离开了农业，而且预计农业就业人口在 2030 年前每年会下降 2%。³⁴ 造成这种局面的主要原因是务农作为一种职业缺乏吸引力（工作条件恶劣、工资低、没有前途等等）。COVID-19 疫情导致的封锁和社会隔离加剧了劳动力短缺，而移民法规和政策往往被政治事件左右，会限制使用来自海外的季节性农业工人。

许多农业企业依靠人工完成采摘、包装和疾病防控等各项任务，这一点在水果和蔬菜生产中尤为突出，畜牧业等其他农业部门也需要大量劳动力。自动化解决方案可以填补劳动力的严重短缺，使农业生产者能够适应扰乱劳动

力市场的突发冲击，从而具有更强的韧性。与此同时，这些解决方案可以创造大量技术岗位，提供合理的收入和工作条件，吸引有技能的青年工人，从而有助于实现体面就业。³⁵ 需要开展培训和能力建设，以确保平稳和包容的就业市场转型（见第 4 章和第 5 章）。

随着经济持续转型，全球农村劳动力的数量不断下降（见图 3），有鉴于此，维持和提高农业生产力很可能需要借助自动化，至少需要用自动化执行劳动密集型的作业。在世界许多地方，农村劳动力供应的减少导致了农业工人的工资上涨，推动了节省劳动力的技术的进一步采用。^{3, 36}

消费模式的变化

在全球化的影响下，人们的膳食结构、对食品的偏好和消费需求发生变化，食品安全的标准也日趋严格。³⁷ 消费者越来越关心他们吃的是什麼，以及他们吃的东西是如何生产、加工和运输的，高收入国家的消费者更是如此。³⁸ 动植物疫情频繁暴发，农药和其他化学制剂被滥用，造成了各种健康隐患，也让人们越来越担忧。先进的数字自动化技术有助于及时识别疫情爆发点，以便开展及时和精准的治疗，这不仅可以保护消费者的安全，还可以减少生产者的经济损失。这一点对于畜牧业尤为重要，因为约 60% 的新发传染疾病源自动物，自动化系统可以在预防和控制人畜共患病方面发挥有效作用。³⁹ 数字自动化技术可以更精准地瞄准病虫害，减少作物上农药和化学制剂的用量，在确保有效植物保护的同时，将对人类健康的风险降至最低。这些精准技术可以以标准化的方式遵循食品安全程序，因此与人工作业相比，能更好地预防和控制病虫害，从而大幅度改善食品安全。自动化系统不仅能更有效地杀死病原

体，阻断传播途径，还能最大限度地减少化学制剂的使用。⁴⁰

消费者越来越关注食品的质量、口味和新鲜度，这进一步刺激了对数字自动化技术（如传感器和测绘系统）的投资，这些技术有助于监控温度和湿度条件。因此，快速变化的消费者偏好和需求是实现农业自动化的主要动力之一。⁴¹

环境的可持续性和动物福利

围绕粮食生产和消费产生的环境问题和伦理问题越来越尖锐，突显了农业自动化对农业粮食体系未来的重要性，其中以数字自动化的诸多优势最为显著。集群小型自主机器人（见术语表）可以减少土壤压实和河流污染，实现生态农业，而受到精心呵护的土地、土壤和生物多样性有利于粮食生产和农业发展，并改善农业生产中的生态系统服务。⁴² 数字自动化技术还可以优化水和其他自然资源的使用，自动灌溉就是一个例子。软水果行业使用自主机器人，可以减少杀菌剂和能源的使用；此外，如果机器人由太阳能供电，还可以减少碳排放。当然，在计算碳足迹时，必须要考虑机器人和精准农业中使用的其他技术设备在制造过程中所消耗的能源。⁴³

农业自动化有助于应对气候变化带来的一系列挑战，促进对气候变化的适应。数字自动化技术这方面的作用尤为突出。例如在精准农业中应用自动化技术，可以帮助农业生产者在越来越不利的条件下提高资源利用效率。此外，数字自动化技术用于传感和预警，有助于应对因气候变化加速而越来越变幻莫测的天气条件。

养殖动物数量的增加导致动物福利日趋恶化，如何管理牲畜越来越具有挑战性。⁴⁴ 在这种情况下，精准养殖等新型自动化技术可以助农民一臂之力，通过连续、实时和自动化的方式监测和控制动物产量、环境影响以及健康和福利参数。⁴⁵ 各种各样的技术系统使用传感器、摄像机和麦克风等设备检测异常情况，并直接向农民发出警报，使他们能够在早期阶段进行干预。这些技术潜力巨大，但使用这些技术引发了伦理问题，因为人与动物的关系有可能随之改变，这一点很关键，会影响到动物福利和产量，特别是动物可能会被物化，农民作为饲养员和看护者的身份可能会丧失。^{46, 47} 所以在评估不同的技术方案时，必须同时考虑经济利益和伦理问题。

数字自动化能在多大程度上提高农业的效率、生产力、包容性、韧性和可持续性，主要取决于是否能顺利克服阻碍技术采用的重重障碍，而这需要有利的大环境和因地制宜的解决方案。■

农业自动化进步带来的挑战

同其他技术进步一样，农业自动化会带来负面的社会和环境后果，因此，前文列举的种种好处并非唾手可得，必须通过妥善管理才有可能实现。农业和整个经济存在着一些结构性的因素，可能会破坏农业自动化的包容性和持续采用，例如，在许多地区，土地过于分散就是一个严重的制约因素，使农业自动化不具有经济可行性。道路、网络连接和电力等基础设施薄弱，也可能影响自动化的采用，并将偏远地区的弱势农民排斥在外。在某些情况下，农业自动

化可能会抢走农村劳动力的饭碗，并导致负面的环境后果，如土地退化和生物多样性丧失。这些挑战将在以下章节中进行列举，并在第2章和第4章中详细讨论。

能力的不平等

农业自动化有可能带来种种收益，但不见得会在农民和其他利益相关方之间公平分配，社会不平等会因此加剧，甚至有可能偏向粮食生产中的强势方，进而造成新的不平等。^{48, 49} 例如，本来就很强大并可以支配市场的高科技公司不仅可以截留和拥有数据，还有可能违反数据保护政策任意使用数据，导致数据垄断。⁵⁰ 一些生产者经营规模更大、经济更宽裕，受教育程度更高，因而更有实力（如资金、农村基础设施、技能）投资新技术或通过再培训学习新技能，不平等也会因此加剧。事实上，许多农民可能并不具备操作数字自动化技术的基本技能，更谈不上理解其工作原理。优秀的农民并不一定同时也是数字技术专家，农技推广和服务人员也是如此。能力建设和因地制宜对于自动化设备的采用和恰当使用至关重要，只有具备相应能力，农民才能充分利用自动化的潜力。¹⁵

在这方面，与男性相比，女性在受教育的问题上往往被边缘化，¹⁸ 获得融资也更为困难。⁵¹ 男性往往包办农作物的买卖，新设备往往也归他们所有，由他们操作，而女性对产生的收入几乎毫无控制权，通常只能从事耗费体力的劳动，如除草和移栽。⁵² 同样，农村青年也面临重重障碍，很难获得优质的教育和培训，土地、信贷和市场也与他们无缘，农村青年女性更是如此。⁵³

对劳动力市场的干扰

其他行业涌现的证据表明，自动化可能会增加对高薪工作的需求，而这些职位往往要求中等教育资质，如数据管理和分析，人类从事这些工作比机器更有优势；但对种植和收获等按部就班的劳动而言，需求会减少。^{54, 55} 随着国民经济的发展，农业总就业人数会下降；尽管如此，世界上仍有大约3-5亿农业工人靠赚工资维持生计。⁵⁶ 许多国家的农业劳动力的比例仍然很高，如布隆迪（86%）、索马里（80%）、马拉维（76%）、乍得（75%）、尼日尔（73%）和乌干达（72%），这些国家的文盲率、贫困率和性别不平等往往也居高不下。

在这些国家，降低单位产出的直接劳动力需求可能会造成不平等或加深现有的不平等。因此，农业自动化有时候可能对于政府并没有吸引力，也不具有可行性。最终，自动化对劳动力和工资的影响将由一系列因素决定，包括在农业部门之外创造新的和更有吸引力的工作机会，让剩余劳动力有体面就业的选择。农民通过自动化扩大生产规模并增加收入，产生规模效应，这是否足以抵消劳动力被挤出农业部门的替代效应，这也是一个重要的因素。⁵⁷ 总之，如果有恰当的政策，辅之以恰当的立法和监管环境，农业自动化完全可以创造经济机会，促进体面就业，提供合理的收入和工作条件，并吸引青年回流到农业部门。

环境问题

有人担心，如果管理不善，某些类型的农业自动化，特别是依赖重型大型机械的农业自动化，可能会导致毁林、种植结构单一化、生物多样性丧失、土地退化、土壤压实和侵蚀、土地盐碱化和排水系统失灵，从而危及环

境的可持续性和韧性。⁵⁸ 这些问题的确不容忽视，但通过适当的政策和立法，许多问题是可以避免或尽量减少的。此外，随着自动化机械和设备不断进步完善，特别是具备人工智能的小型设备的开发，旧的自动化机械造成的一些负面环境影响实际上是可以逆转的（见第3章）。

农业自动化的潜在机遇、挑战和后果取决于使用的具体技术及其设计方案，以及在多大程度上做到了因地制宜。此外，社会经济发展水平，体制上和政治上的制约因素，这都决定了哪些技术是经济适用的，有可能会被采用。因此，农业自动化的积极和消极影响因具体环境而异。在提出具体的自动化解决方案之前，必须评估每个国家或区域的环境、社会和政治条件是否适合。并非所有的自动化技术都放之四海皆准，往往需要对现行方案进行调整和改进。■

化挑战为机遇

为了充分发挥农业自动化的潜力，必须保证人人都能获得自动化技术，尤其是低收入国家的小规模农业生产者。在低收入国家，农民仍然普遍使用手动工具和畜力，抑制了农业生产力，不利于提高生活水平。换句话说，自动化的进程不能受制于农业经营的规模。如果各方面的情况都很有利，甚至可以实现跨越式的发展，从依靠体力或畜力的低技术农业直接过渡到农业自动化，这需要技术方案在设计的时候兼顾大中小各种规模，在制度安排上进行创新（如合作社和农协），优化市场机制帮助小农户摆脱经营规模的制约。例如，农民可以临时雇佣服务商提供机械化服务，从而也能用上昂贵而复杂的农业设备，而服务商其实往往自己也

是生产者，只不过他们先前已经购置了耕畜或拖拉机这样的设备。

数字化工具也为租赁服务带来了巨大的商机，可以通过创新的商业模式帮助小规模农业生产者采用自动化技术。有人就开发了一个共享拖拉机的应用，类似于共享出行的优步，可供农民租借拖拉机。数字技术是机器人和人工智能的基础，因此，各国需要大力普及数字技术，推动建设关键的基础设施，建立适当的法律框架，传授基本的数字知识和技能。

为了实现这一目标，农业生产者和政府都必须首先认识到，传播和采用数字技术能带来经济、社会和环境效益，其次必须确保数字技术的可用性、包容性、可及性和因地制宜，并积极接触广泛的潜在受益者，以避免技术鸿沟因此进一步扩大，导致妇女等弱势群体和偏远地区更加边缘化。2018年，粮农组织和非洲联盟委员会发布了《可持续农业机械化：非洲框架文件》，列出了需要优先考虑的一系列问题，为各国制定可持续农业机械化战略提供了参考。⁵⁹ 根据这一框架，机械化必须沿着整个农业价值链建设，由私营部门主导，兼顾环境问题，适应气候变化，此外还必须具有经济可行性，不能过于昂贵，尤其是对占非洲农业生产者大多数的小农而言。同样重要的是，机械化应关注妇女和青年，特别是要提升农业的吸引力，使其成为体面就业和创业的理想选择。

因此，在鼓励采用自动化时，必须优先考虑适合当地条件和契合生产者具体需求的技术。简单地把一个外来技术移植到一个完全不同的环境中，可能根本无法解决实际问题。在这方面，研究表明，农民可以自发地引领创新。例如，在缅甸，3D打印技术提高了农业的效率，而且在推广的过程中，贫困地区的农民可以发

挥自己的个性和创造性，参与物料、农机零部件和工具的设计和制作。⁶⁰ 农业生产者引领技术创新的作用逐渐得到公认，相关的术语和方法也已经发生演变，融入了创新系统的理念，并强调不同层面的利益相关方的参与，包括农民和农业专家。必须重视促进公共和私营部门之间的知识共享、交流协作和联合参与，以共同开发新思路和解决方案。⁶¹

自动化解决方案必须考虑特定各国和各区域的农业创新体系，在全球各地采用一刀切的方法是行不通的。一项解决方案哪怕已经经过验证和测试，如果在新环境或不同的条件下实施，仍然需要谨慎行事。实施的背景至关重要。■

本报告的重点是什么？

本报告讨论了自动化在初级农业生产（种植业、畜牧业、林业、渔业和水产养殖业）中的作用。就农业粮食体系整体而言，本报告还涉及价值链下游贴近初级生产阶段的自动化，如农产品收获后的处理和加工，然而，本报告的重点是在初级生产。本报告将内容限制在初级生产和价值链的初始阶段，主要基于两个考虑。首先，初级生产和其他农场活动的自动化对于实现与改善粮食安全和营养、农村减贫和增强环境可持续性至关重要，能够推进相关的可持续发展目标。面对此起彼伏的冲击和压力，农业自动化也有助于建设有韧性的农村生计。此外，农业自动化有助于确保农业生产者和农业工人有更安全的工作条件。其次，本报告承认农业自动化不会孤立进行，肯定会与农业粮食体系其他组成部分的类似进程相互交织，但对于一份篇幅有限的单行报告而言，全面探讨自动化在初级生产之外的动力和影响会力不从心。

因此，本报告的研究重点是粮食供应链初始阶段的农业自动化，分析农业自动化如何促进农业和整个农业粮食体系实现生产力的提升，并保证可持续性和包容性，推进可持续发展目标。本报告研究了如何克服自动化技术采用的障碍，如何使自动化带来的变化更具包容性，如何与减贫、改善粮食安全与营养、环境可持续性目标更加契合。

本报告分析了以下问题：

- 采用农业自动化的动力和障碍分别是什么，尤其是在低收入和中等偏下收入国家？
- 自动化能在多大程度上提升效率，从而证明其商业价值？
- 自动化如何适应情况各异的小规模生产者的需求，特别是妇女和青年的需求？
- 自动化对劳动力、体面就业和包容性可能产生哪些影响？
- 自动化如何促进环境的可持续性，提升抵御冲击和压力的韧性？

本报告整理了 27 个案例研究所获得的证据，如图 2 所示，这些案例涵盖了用于不同生产规模（小、中、大）和不同部门（种植业、畜牧业、水产养殖业、林业）的自动化技术。案例展示了来自世界各地的各种类型的服务商，包括私营企业、非营利组织和生产者协会。表 1 按照技术类型、服务对象的规模及其生产系统对案例进行了汇总。附件 1 则是各个案例的摘要，本报告委托的两个技术研究则提供了更为详细的案例分析。^{62, 63} 本报告还参考了对文献和现有数据及证据进行总结的四份背景文件。^{20, 64, 65, 66} 对于委托的技术研究和案例未涉及的领域，如林业或小规模机械化，本报告援引了文献中的案例和相关调查数据，即粮农组织农村生计信息系统数据库和世界银行生活水平衡量研究。

案例的分类反映了在不同背景下采用自动化的主要挑战、机遇和可能的后果, 包括: (1) 实施成本(购置价格或运营成本), 高昂的成本可能使一些人觉得无利可图; (2) 生产者、青年和其他利益相关方的知识和能力, 比如生产者可能缺乏相应的数字技能, 不知道如何操作自动化设备; (3) 获取、处理和分享数据所需的数据管理和 IT 基础设施的可用性; (4) 技术维护和售后服务, 以修理设备和提供运营支持;

(5) 健康和安全, 自动化可以大幅度降低劳动的繁重, 但网络安全的威胁和工作事故的风险也随之增加; (6) 对可持续性和环境潜在的正面和负面影响, 包括能源使用的问题; (7) 社会文化和传统习俗在促进或阻碍技术推广方面的作用。

本报告其余部分的组织结构如下: 第2章介绍了农业自动化技术的概况, 包括自动化技

术推广的趋势及动力, 以及在不同地区的差异, 分析了数字自动化技术如何补充或取代旧的机械, 研究了对非机械化农业实施数字解决方案的潜力。第3章论证了采用农业自动化技术的商业逻辑, 分析了生产者和服务商各自面临的挑战, 探讨了政策、立法和投资如何对私人形成激励, 如何克服技术采用的障碍, 如何因地制宜打造个性化的自动化解方案, 以及如何利用数字设备改善环境可持续性。第4章重点讨论了农业自动化对体面就业和劳动力供求关系的积极和消极影响, 特别关注妇女、青年和农业工人等弱势群体。第5章作为报告的收尾, 提出了政策、立法和投资的路线图, 以解决技术采用的障碍, 确保农业自动化助力实现高效、多产、可持续、有韧性和包容性的农业粮食体系, 并指出在这些不同目标之间可能需要进行权衡, 各国应如何根据自身经济发展水平、体制状况和决策者的目标确定行动的轻重缓急。■

表 1 案例研究数量，按生产者规模、自动化水平和部门分列

自动化进程	农业经营规模		
	小规模	中等规模	大规模
机动机械化	 (3)	 (2)	 (1)
	 (1)	 (1)	 (1)
数字设备	 (1)		
	 (2)	 (2)	
	 (11)	 (9)	 (12)
	 (4)	 (3)	 (2)
人工智能 机器人	 (1)	 (1)	
	 (1)	 (4)	 (5)
		 (2)	 (2)
 林业  水产养殖业  种植业  畜牧业			

注：表中括号内的数字表示涵盖特定部门或生产规模的案例研究数量。一个案例研究可能涵盖多个维度，因此括号内数字之和大于 27。没有发现小农户使用人工智能机器人的案例，但有一份背景文件专门研究了该技术对小农户的潜力。⁶⁵
资料来源：粮农组织为本报告编制。



俄罗斯联邦
喂奶牛的机器人。
©ANDREY-SHA74/
Shutterstock.com

第 2 章

了解农业自动化的过去, 展望未来

要点

→ 机动机械化是农业生产自动化的一种重要形式, 其采用程度参差不齐, 在撒哈拉以南非洲尤为受限。尽管如此, 机动机械化仍然是全球农业转型不可或缺的组成部分。

→ 关注包括妇女、青年和其他边缘化群体在内的小规模农业生产者, 使他们能有机会持续地使用农业机械, 这需要技术创新和制度创新, 比如依托数字平台的机械化服务市场。

→ 数字技术日益丰富, 使用也越来越频繁, 这有可能从根本上改变农业, 随着这些技术逐渐

普及, 即使是中低收入国家的农业也会随之改变。

→ 推动自动化被采用的动力因技术和环境而异。例如, 采用挤奶机器人, 主要是奶农希望有更灵活的工作时间和更高的生活质量; 采用作物自动化技术, 主要是为了追求更高的利润; 而林业采用自动化技术, 主要是为了实现更安全的工作条件。

→ 已经有了一系列技术解决方案, 适用于不同发展阶段的国家, 而且还有更多解决方案正在

酝酿之中。通过适当的政策和立法, 政府可以推广适合不同生产者具体情况和需求的解决方案。

→ 尤其需要关注小规模农业生产者, 向他们提供经济适用的数字自动化技术, 使他们能够采用这些技术并从中获益。

在漫长的历史中, 人类依靠自己的肌肉和动物作为农业生产的主要动力。长期以来, 农业自动化在很大程度上是指在用机动设备取代耕畜和人力执行各项农业操作, 包括整理土地、除草、收割、灌溉、挤奶和喂食, 以及脱粒和碾磨等就地加工活动。

近年来, 数字自动化技术(见图2)已经进入农业领域, 出现了各种各样的应用, 有时是嵌入到现有的农业机械中, 有时是自成一体, 无论是哪种情况, 数字自动化技术都有潜力改善农业生产者的诊断和决策。嵌入数字自动化技术的农业机械可以更精确地执行农业操作, 进一步提升效率和生产力。

因此, 数字自动化技术有能力改变农村生计和农业各个部门的面貌, 包括种植业、畜牧业、水产养殖业和林业。在种植业中, 这些技术可以提高种子、肥料和水等投入品的使用效率。在畜牧业和水产养殖业中, 这些技术可以减少繁重的工作, 提高作业的及时性, 并提高饲料等投入品的使用效率。在农业的所有部门, 特别是在林业部门, 自动化机械可以改善工作条件, 为工人提供一个更安全的工作环境。

本章介绍了全球自动化技术的趋势, 分析了这些趋势在不同国家和地区之间的差异以及背后的原因。由于缺乏数据, 本章的叙述部分主要依赖文献中的案例和为本报告编写的

两份背景文件。^{1,2}(共27个案例研究, 摘要见附件1)本章采用了历史的视角, 先介绍机动机械化的出现及其在高收入国家的推广, 然后介绍这些技术如何向中低收入国家转移。本章讨论了这些技术在采用过程中获得的动力和遇到的障碍, 并尝试用这些因素来解释不同区域技术普及程度的差异。本章还揭示了推动自动化产生时需要权衡的一些利弊, 包括机动机械可能造成的负面环境影响。本章也分析了数字技术如何正在改变农业机械的使用方式, 并研究了对于非机械化农业实施数字解决方案的可能性。最后, 本章描述了世界各地的数字自动化技术的发展现状, 指出数字自动化有可能取代传统机械化并扭转其造成的负面影响。■

全球机动化机械化的趋势及其动力

不同区域的采用情况大相径庭

机动机械化在世界范围内大幅增长。证据表明, 机动机械化的大规模采用最早出现在美国, 当时拖拉机一跃成为农场的主要动力来源, 在1910–1960年间取代了大约2400万头耕畜。³英国紧随其后, 在1930年代首次采用拖拉机。日本和欧洲国家(丹麦、法国、德国、西班牙和前南斯拉夫)则要等到大约1955年才开始大规模使用拖拉机。之后, 机动机械化发展势头越来越迅猛, 很快就完全取代了畜力牵引。⁴使用拖拉机作为农业动力是二十世纪影响最深远的现代化进程之一, 因为这引发了其他农业机械和设备的创新, 如脱粒机、收割机和各种相关工具。⁵机动机械化减轻了农业劳动的繁重, 使农民能够更及时地完成任务。后来, 许多亚洲和拉丁美洲国家在采用机动机械方面

插文 1 克服农业机械使用报告中的数据挑战

2009 年之前，粮农组织统计数据库定期报告农业机械和设备的使用和贸易（数量和金额）。该项统计始于 1961 年，但发布的数据仅涉及为数不多的农业机械和设备，包括全农用的拖拉机、收割机和脱粒机、挤奶机、土壤机械和其他农业机械。

数据的主要来源是分发给各国对口部门由其填写的年度问卷，包括使用和贸易两个方面。问卷收集的一部分数据来自各国的全国农业普查（通常每十年进行一次），并在普查间隔期间尽可能利用统计年鉴、部级单位发布的数据和数据门户网站进行更新。大多数国家报告了贸易数据，但没有报告实际投入使用的机械的数量，这引发了对数据的疑虑，说明有必要提高数据的质量和详细程度。

2010 年代初，粮农组织修订了调查问卷，要求各国提供更为详细的信息，特别是机械类型方面的信息。联合国商品贸易统计数据库中关于贸易数量和金额的数据也提供了有益的补充。其他缺失的数据则通过一系列二手数据源进行补充，其中包括各国的案例。

然而，修订后的调查问卷的答复率不及预期，只有少数几个国家能够提供更为详细的信息，外部渠道获得的信息总体上不够可靠。因此，修订后的调查问卷后来无人过问，本报告的数据目前只能截止到 2009 年（2011 年收集），导致的结果是，人们对过去十年的农业机械和设备的发展知之甚少，这对于我们理解农业体系如何演变是一个主要的空白。

粮农组织统计司已开始整合不同的数据来源，以更新农业机械的数据。整合的方法仍在开发中，与以前的方法相比，新方法更加依赖调查和农业普查的数据。在未来几年，粮农组织在其参与的一系列项目的框架下，可能会开展调查数据的收集工作，包括农业综合调查计划（AGRISurvey）和弥合农业数据缺口的“50x2030 倡议”。这些项目旨在提供技术援助，促进一系列专题农业数据的收集，涉及社会经济变量和环境变量，并通过简约的模块化方法涵盖两次普查之间的间隔期。关于农业机械获取和使用的数据就是拟定的模块之一。

此外，农业普查的微观数据的发布方式越来越系统化。在两次普查之间的间隔期，关于农业机械使用和存量的数据可从一些调查中获得，如世界银行一直在推动的的入户调查——生活水平衡量研究，还有各国开展的类似调查。粮农组织农村生计信息系统数据库从此类调查中收集了一系列具有共性的指标和微观数据，为机械使用提供了另一个数据来源。

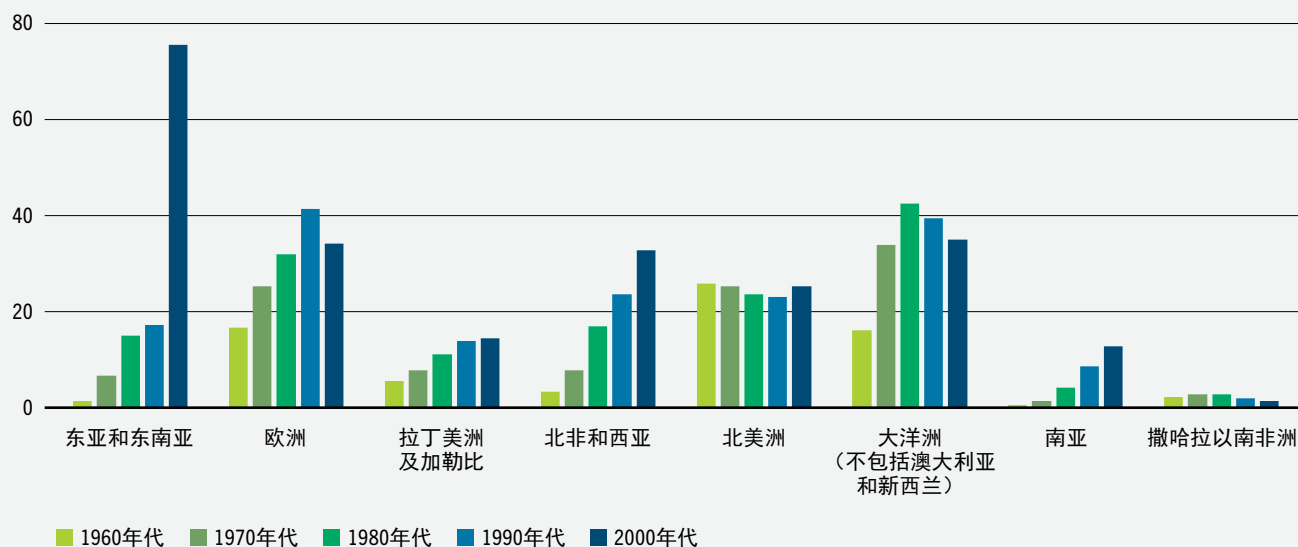
更新后的数据集将包括机械设备的产量和使用量、以及机械设备进出口的数量和按汇率换算后的贸易金额。

粮农组织计划在 2023 年前，通过收集、处理和开发标准化数据集，尽可能对所有可靠数据来源进行评估。长远来看，通过向各国分发修订后的调查问卷收集数据，仍将是更新农业机械数据的主要方法。

也取得了长足的进展。⁶撒哈拉以南非洲是唯一的例外，在过去几十年间，机动机械化一直裹足不前，⁷而其他一些非洲国家采用机动机械的进展则非常快。

在分析农业机械采用趋势时，数据匮乏是一个公认的难题。农业机械化中使用的机械和相关设备种类繁多，这对数据的收集构成重大挑战（见插文 1，粮农组织计划如何应对这一

图 4 每 1000 公顷可耕地使用的拖拉机台数



注：拖拉机是指用于农业的全轮式、履带式和铺轨式拖拉机。截至 2000 年，第四种类型拖拉机（手扶拖拉机）被考虑应用于部分国家。只统计了在 1961–2009 年间持续提供数据的国家（共 108 个国家）。由于数据缺失，中亚没有纳入其中。完整的国家名单见附件 2，包括截至 2000 年第四种类型拖拉机（手扶拖拉机）被考虑应用的 33 个国家。

资料来源：粮农组织，2021。⁹

挑战)。这些机械一般可分为两类：(1) 有发动机的机械，如拖拉机、水泵和收割机；(2) 没有发动机但与有发动机的机械相结合的配套设备（例如与拖拉机配套的犁和播种机、灌溉系统等）。收集的数据往往仅限于有发动机的机械，而且由于各国的农业生态和农业条件差异甚大，即使是这一类数据也很稀少。不同的农业气候区、土壤条件、地形和生产定位要求使用不同类型的机械和设备。例如，拖拉机有不同的尺寸和参数，有四轮和两轮拖拉机。此外，畜牧业和水产养殖业需要的机械类型可能差别很大，例如，牲畜生产需要的是饲喂机和挤奶机。

分析工作尽可能利用近年来的数据，并承认这些数据有遗漏和仍然偏于陈旧，在此前提

下，图 4 展示了 1961–2009 年间世界各区域的机械化进展。应当指出，该项指标（每 1000 公顷可耕地使用的拖拉机台数）既没有反映拖拉机的大小，也没有反映其他配套设备。尽管如此，使用这项指标来体现总体机械化水平还是情有可原，其中一个原因就是缺乏其他效果更好的数据，而且毕竟拖拉机目前是很多农业作业的主要动力来源，如整地、播种、施肥和喷洒化学制剂。除了运输以外，拖拉机还可以为取水灌溉和挤奶机提供动力。

透过每 1000 公顷可耕地使用拖拉机的台数，现有统计数据（见图 4）清楚表明，机械化在世界各地进展并不均衡。高收入国家（北美洲、欧洲和大洋洲）在 1960 年代已经高度机械

化,但在以中低收入国家为主体的区域,机械化程度仍然较低。1990年代至21世纪初,欧洲的拖拉机使用量有所下降,其中俄罗斯联邦下降幅度最大(超过50%),这可能是由于该国在此期间经历了政治和经济转型;其他国家也出现了大幅下降,例如阿尔巴尼亚、丹麦、德国、爱尔兰和荷兰,而且背后的原因尚不明。随着拖拉机的不断发展,农场和农田变得更为集中,单台拖拉机服务的公顷数也增加了。

1960年代后,亚洲和北非经历了快速的机械化。例如,在东亚、东南亚和南亚,每1000公顷使用拖拉机的台数分别增加了56倍和36倍,总量从1960年代的270万台增加到2000年代的2030万台。然而,2000年后东亚和东南亚地区指数级增长背后的部分原因是测量分析中纳入了第四类拖拉机(手扶拖拉机);例如中国、缅甸和菲律宾,纳入手扶拖拉机后,拖拉机总数显著增加。同一时期,北非和西亚增加了十倍,从每1000公顷3台增加到33台。拉丁美洲及加勒比地区也经历了显著增长,每1000公顷可耕地使用的拖拉机台数几乎增加了两倍,从1960年代的5台增加到2000年代的14台。撒哈拉以南非洲是农业机械化没有显著进步的唯一地区,拖拉机的使用数量增长异常缓慢,在1980年代仅为210万台(每1000公顷耕地2.8台拖拉机),在2000年代下降到70万台(每1000公顷1.3台)。最近对该地区11个国家农业机械化进行的调查发现,轻型手持工具是当地农民使用的主要设备类型,这证实了当地机械化水平较低。研究表明,该地区只有18%的抽样家庭能够使用拖拉机驱动的机械,而其余家庭要么使用简单的手持工具(48%),要么使用畜力牵引设备(33%)。⁸

证据表明,在亚洲和北非,畜力牵引早已广泛使用,这为1960年代向机动机械化转型奠定了基础。绿色革命推动了农业集约化,工

业化和经济结构的变化导致农村地区工资上涨,这些现象都进一步巩固了向机动机械化转型的进程。⁶同样的趋势在拉丁美洲及加勒比地区也表现得很明显,当地推动农业机械化的主要力量是私营部门,然而政府也发挥了关键作用,为机械化创造了有利的环境,例如阿根廷、哥斯达黎加、厄瓜多尔和秘鲁提供政府低息贷款和税收减免。^{10, 11}一些国家还免除了农业机械的进口税(如秘鲁)。¹⁰

亚洲(中国和印度)和拉丁美洲及加勒比(巴西和墨西哥,阿根廷在一定程度上也可以算进来)的一些国家发展出强大的农业机械制造业,使全球出口机械更加多元化,¹¹降低了小型设备(如两轮拖拉机和四轮拖拉机)和其他机械(如浅管井泵、脱粒机和谷物碾磨机)的购置成本,两轮拖拉机的价格在亚洲下降得尤为明显。^{12, 13, 14}还有证据表明,农机租赁市场的兴起有助于推广农业机械化,因为这使小规模农业生产者能够以可负担的价格使用农业机械。⁶

1960年代和1970年代,在撒哈拉以南非洲地区,为了推广机械化想了很多办法,例如向农民发放购机补贴,开办国营和集体农场,建立公共租赁中心,这些项目往往得到外国捐助者的资助。^{15, 16}然而,事实证明这些手段成本过于高昂,而且以失败告终,原因是基础设施落后,没有重视投资进行知识和技能的培训,不具备维护能力,燃料和备件供应不足,缺少对机械化的实际需求,没有解决寻租和腐败等治理问题。^{6, 16}在撒哈拉以南非洲和其他机械化程度仍然有限的地区,公共部门似乎并不积极,没有采取措施为机械化创造一个有利的环境,如提升知识和技能,提供便利的融资,改善农村基础设施。¹¹在该地区推行任何可持续的农业机械化战略,建立可自负盈亏的商业租赁市 »

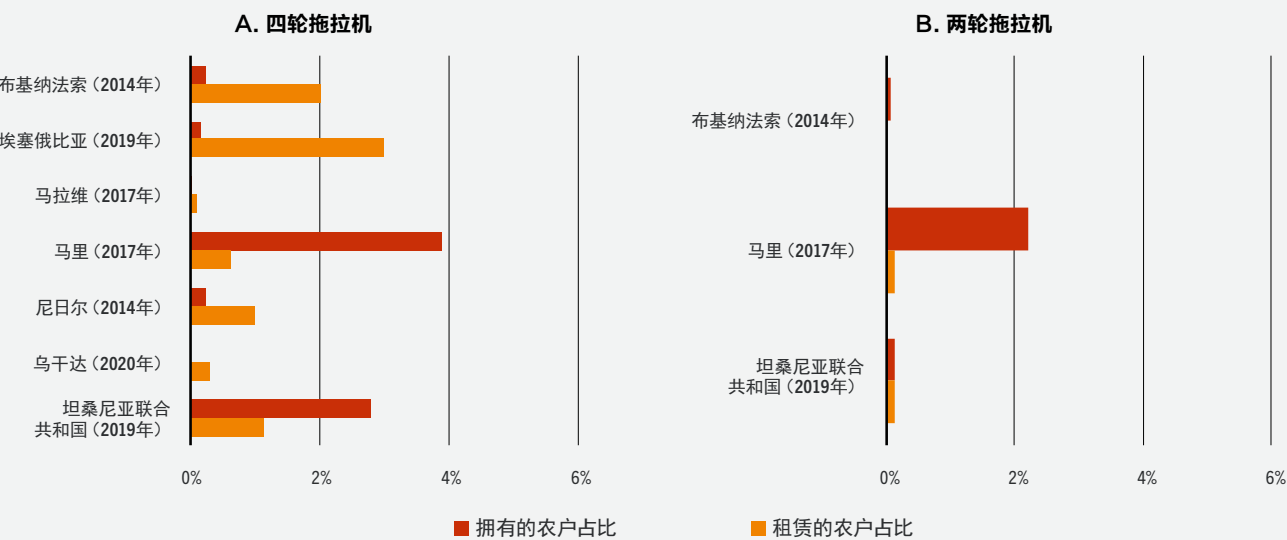
插文 2 解读撒哈拉以南非洲的机械化

依赖人力和畜力的农业生产在撒哈拉以南非洲仍然占主导地位，这限制了生产力的发展。尽管世界各地的采用水平参差不齐，拖拉机仍称得上是过去 70 年中普及程度最高的农业机械之一。¹⁵ 然而，拖拉机的价格居高不下，大多数农民还是负担不起。因此，长效的租赁机制是让农民获得机械化的关键，对小规模生产者更是如此。拖拉机租赁服务在撒哈拉以南非洲得以开展，既包括传统的四轮拖拉机，也包括两轮拖拉机（即动力耕作机），但后者的租赁业务开始得比较晚，而且也不如前者活跃。政府经营的拖拉机租赁服务口碑并不好，与之相反，撒哈拉以南非洲拥有拖拉机的个人数以千计，他们可以向农民提供拖拉机租赁服务。加纳的 TROTRO Tractor 公司就是一个例子（见插文 3）。

下图反映了撒哈拉以南非洲部分国家四轮（左）和两轮（右）拖拉机的使用现状（自有或租赁），这些数据取自生活平衡量研究中的农业综合调查项目。

拖拉机在农村家庭中的保有量仍然很低，即使是通常更为便宜的两轮拖拉机，情况也是如此。拖拉机租赁业务的只是略微提高了四轮拖拉机的使用率，而两轮拖拉机的使用率极低，相应的租赁市场几乎不存在，这表明供应商亟需建立两轮拖拉机及其零备件的供应链，在农村各地全面开展可持续的租赁业务。¹⁵ 通过私营企业或政府合资建立商业上可自负盈亏的租赁业务，是在撒哈拉以南非洲实施可持续农业机械化战略的当务之急。

图 部分国家使用拖拉机的农户占比



资料来源：世界银行，2022。¹⁷

» 场都是当务之急（见**插文 2**）。

相比之下，关于非拖拉机机械化的数据更为有限，但证据表明，即使在撒哈拉以南非洲，一些地点固定的作业很早之前就实现了机械化，例如用机械碾磨机完成原来需要耗费大量人力的碾磨。¹⁶ 全球来看，包括收割和除草在内的一系列作业的机械化程度仍然很低。此外，尽管联合收割机和固定式脱粒机在各国使用有所增加，但目前只能用于收割和处理谷物。全球水果和蔬菜生产几乎都没有实现机械化，只有为数不多的几个例子是例外。⁶

平均值掩盖了显著的区域差异，甚至是国与国之间的差异

虽然一些区域的拖拉机平均保有量高于其他区域，但由于结构性变化、农业转型、以及技术变革的差异，区域内部可能存在显著分化。例如，虽然 1960 年代拖拉机在日本快速普及，但亚洲其他国家（如泰国）直到 1990 年代至 21 世纪初才出现了类似的趋势。⁹ 另一方面，在中国，拖拉机的使用从 1970 年代和 1980 年代开始普及，而在孟加拉国、印度、缅甸和斯里兰卡，根据最近的统计，多达 90% 的农田（主要用于水稻生产）使用机动机械进行整地。^{18, 19, 20, 21} 地形条件也限制了机械化，导致了机械化在一些亚洲国家发展并不均衡。^{6, 14} 例如在尼泊尔山区，只有 23% 的农业生产者使用拖拉机和动力耕作机，而在该国平坦的特莱地区，这一比例达到 46%。在拉丁美洲及加勒比地区，大规模农场和小规模农场之间存在显著差异，大规模农场的机械化程度比小规模农场高得多，因为小规模农场主要分布在偏远山区。^{10, 11, 22, 23}

即使在机械化程度最低的撒哈拉以南非洲，国与国之间和国家内部的采用水平也不均

衡。例如，2000 年，博茨瓦纳和南非每 1000 公顷可耕地使用的拖拉机分别为 8 台和 5 台，而在马达加斯加、马里和塞内加尔等国家，每 1000 公顷可耕地使用的拖拉机不超过 0.4 台。在加纳，据估计平均有三分之一的农户使用拖拉机（主要用于耕作），但这一比例在林区只有 2%，而在热带草原上则高达 88%。⁶ 在坦桑尼亚，商业化农业区的机械化水平最高。²⁴ 在尼日利亚，7% 的生产者使用拖拉机，另外 25% 的生产者使用自有或租用的畜力牵引整地。²⁵ 在埃塞俄比亚，只有大约 1% 的农田通过使用拖拉机实现了机械化，但主要是用于易于机械化的小麦和大麦生产，而这些作物系统往往由大型生产者主导，甚至还出现了小麦联合收割机服务市场。

关于畜牧业和水产养殖业的机械化，现有的有限数据告诉了我们什么？

畜牧业和水产养殖业采用机械的数据非常匮乏，也非常零散，甚至根本不存在，林业的此类数据也是如此。对有限数据的分析表明，畜牧机械（如挤奶机）集中在高收入国家。另一方面，低收入和中等收入国家虽然也有一些畜牧设备，但往往仅在大规模畜牧生产中使用。鉴于数据的匮乏和不一致，很难准确评估各种情况下的机械化状况。此外，到底什么设备才称得上是挤奶机，每台挤奶机能服务多少头奶牛，这些都不清楚。随着技术的发展，由机器挤奶的奶牛数量会增加，而机器的数量可能会减少。丹麦就是一个很好的例子，丹麦是一个产奶大国，但挤奶机的使用呈下降趋势，很可能是出现了更为先进的工艺或技术，而这并没有被统计数据捕捉到。⁹ 然而，或许一个案例研究（Lely）能提供一个不够严谨的证据：北欧的奶牛场进行了整合，带来了技术升级和更

大的规模经济, 这是挤奶机数量下降的深层次原因。² ■

数字革命及其改变机械化和农业实践的潜力

很多人认为第四次农业革命蓄势待发, 在这场革命中, 数字技术将发挥关键作用, 推动农业生产(包括种植业、畜牧业、水产养殖业和林业)转型, 提高效率和可持续性。数字技术包括人工智能、无人机、机器人、传感器、全球卫星导航系统和其他数字工具, 可以在各种农业活动中实现诊断、决策和执行的自动化, 从而提高精确度和效率。² 其中一些技术已经商业化, 而其他技术正在日益接近商业化。²⁶

对未来几年和几十年的各种农业情境的预测表明, 各种数字和自动化技术的使用可能会增加。^{27, 28} 近年来, 手持设备(如移动电话和智能手机、传感器、物联网终端)的大规模普及有目共睹, 这在很大程度上归功于移动网络接入的改善和互联网覆盖范围的扩大, 即使在这个世界上最偏远的地区也是如此。例如, 2020 年, 拉丁美洲及加勒比地区 69% 的人口、亚太地区 64% 的人口和撒哈拉以南非洲 45% 的人口拥有智能手机; 到 2025 年, 预计将分别增加到 81%、79% 和 67%。²⁹ 这是政府和私营部门对基础设施进行大规模投资的结果。例如, 谷歌的 Equiano 计划正在投资建设非洲第一条海底互联网电缆。³⁰

接下来将介绍和分析这些技术在改变机械化和农业作业方面的潜力。

数字技术正在改变传统的农业机械

政策制定者和国际组织越来越相信, 数字化将改变农业领域的游戏规则。对于大多数数字技术而言, 关键在于能否实现数据的收集和交换, 从而支持农业生产者或其他利益相关方的决策, 并最终提高效果和效率。^{31, 32} 近年来, 数字技术和相关服务受到了捐助者、研究机构和发展机构的极大关注。^{29, 33, 34, 35} 数字技术越来越多地被内置于机械, 甚至有可能改变这些机械的用途, 提高农业作业的效率和精度, 使农业机械的使用范围扩大到新的地区或社会经济群体, 如小规模生产者。

许多数字技术都是通过智能手机的应用程序或语音呼叫 / 短信息服务进行操作。资产共享服务是数字服务的一个类别, 将设备(如拖拉机或无人机)的产权人与需要此类设备的农业生产者联系起来, 有时还有操作员, 极有可能扩大机械化的覆盖面, 农业生产者按小时或按服务面积向产权人付费, 中介收取一定比例的佣金或一笔固定费用作为酬劳。共享资产服务最著名的例子是 Hello Tractor (在七个非洲国家以及孟加拉国、印度和巴基斯坦运营)。¹ **插文 3** 介绍了在非洲国家和缅甸的两个成功案例。

资产共享服务的主要好处是优化了成本效益比: 农民无需重金购买机械设备, 也可以享受所需的机械化, 而他们支付的租金降低了产权人拥有机械设备的成本。在撒哈拉以南非洲, 自己拥有设备的人极为有限, 因此资产共享服务显得尤为重要(见**插文 2**)。

另一类数字服务是设备监控解决方案, 这是一些简单的应用, 可以自动操作灌溉泵,^{36, 37} 或自动操作全球卫星导航系统, 以跟踪设备或

插文 3 数字工具助力普及机械化服务

优步共享出行的模式催生了一系列数字工具，有可能降低拖拉机租赁业务的交易成本。加纳的 TROTRO Tractor 和缅甸的 Tun Yat 通过数字平台和移动电话开展机械出租和共享，这些工具表明包容性农业机械化的确具有很大的潜力。

TROTRO Tractor 的数字平台将小规模生产者与他们需要的农业机械（主要是拖拉机）及其产权人进行匹配，生产者可以通过智能手机上的应用程序访问平台，没有智能手机的用户可以通过非结构化补充业务数据获得服务。目前，TROTRO Tractor 在贝宁、加纳、尼日利亚、多哥、赞比亚和津巴布韦有 75000 名注册用户，既面向企业，也面向个人客户，根据租赁价格收取一定比例的佣金。

除了拖拉机（可用于耕地、耙地、种植、播种和喷洒等各种类型作业）和联合收割机，TROTRO Tractor 提供的平台还对生产者与无人机的机主进行撮合，无人机机主可以提供测绘和除草剂喷洒服务。农民日渐认识到土地权属的重要性，知道在向银行或保险公司申请金融服务时，准确的土地数据至关重要，因此对无人机测绘的需求越来越大。

资料来源：Ceccarelli 等人，2022。²

Tun Yat 通过智能手机应用程序提供拖拉机服务，专门面向中小生产规模的农民，尤其重视妇女（占客户的 30%）和青年（25-30% 的客户年龄在 30 岁以下）。Tun Yat 拥有五台拖拉机和五台联合收割机，为 20000 多名用户提供一系列机械化和撮合服务，服务项目包括翻耕、整地、播种、针对不同类型的收割使用不同割台的联合收割机（如绿豆或玉米）以及采摘（如芝麻或花生）。多数用户是土地不到 2 公顷的小规模生产者，他们特别需要可靠和价格相对低廉的机械化服务。

Tun Yat 的商业模式是多元化经营，其业务包括农资（如化肥）经销和信贷中介。Tun Yat 还开展激光平整，帮助洪涝地区农民平整农田和修建排水系统。Tun Yat 还从农民合作社直接购买食材加工成小吃，在便利店出售。

总体而言，优步式的商业模式对没有拖拉机的农民和拥有拖拉机的人都有利，后者可以使拖拉机物尽其用，并能对拖拉机的使用和燃油消耗进行密切监控和筹划，从而让更多的人能以低廉的价格用上拖拉机。

动物的运动，中低收入国家首次尝试智能农业解决方案，往往就是这类服务。³⁸ 物联网解决方案则是更为高级，例如，对作物、牲畜或水产进行监控，并在一定程度上进行自动化决策，从而优化诊断、决策和执行，这样做提高了精确度、效率和生产力，同时减少了繁重的劳动。物联网可以用于精准农业，中国就有具体案例，在茶叶生产中通过集成系统进行自动遥感、预警和微喷灌溉，系统会探测环境条件的变化，

及时发出警报，并在必要时自动启动灌溉，从而避免高温、低温或干旱造成破坏。³⁹

对拖拉机和收割设备等机动机械而言，数字技术往往并不能大刀阔斧地对其进行改造，尤其是在低收入和中等偏下收入国家。^{1,2} 另一方面，机动机械使用的组织模式正在发生重大变化。在低收入和中等收入国家，人们越来越重视机械共享的价值，而不是个人产权。资

插文 4 与机械化无关的数字工具 — 自成一体的解决方案

自成一体的数字解决方案（见术语表）与机械化无关，主要是指基于软件的解决方案，不依赖于农业机械的使用，但需要配备智能手机和平板电脑这样的基本硬件，还需要一些软件工具，例如咨询服务小程序、农场管理软件和网络平台。与之形成对比的是嵌入到机械中的数字解决方案，数字工具需要与机器相结合，才能与环境互动。

自成一体的数字解决方案可以包括遥感，但仅限于用数据支持决策和侦察。下面这些来自世界各地的例子显示，这些技术在全球范围内的应用越来越广泛。南非的 Aerobotics 公司在 18 个国家开展业务，利用无人机和遥感技术为水果和坚果种植者提供独立的数字解决方案，用于支持决策。这些技术可以及早发现病虫害，及时监测对水、肥料和养分的需求，并优化产量管理。

在摩洛哥，SOWIT 提供的独立数字解决方案使用了遥感、无人机影像收集和基于实地测量或天气数据库的机器学习。这些技术可应用于果树、谷物和油菜籽，通知农民按要求进行灌溉和施肥，测算产量，监测饲料的干物质含量，并对地块进行巡查。

在尼泊尔，Seed Innovations 向农民提供一个安卓应用程序，让他们使用基于卫星的分析数据、全球卫星导航系统和人工智能来监控作物表现，识别水和养分的不足或过剩，发现病虫害威胁，获取和交流农艺信息。

TraSeable Solutions 总部位于斐济，在太平洋七个小岛屿发展中国家拥有约 2000 名活跃用户。公司提供两大解决方案，包括通过移动应用程序向农民提供农业部门的信息，记录和管理农场数据，实时掌握资源、存货、销售和

»

产共享已经存在了很长时间，但是由于种种问题，例如农民、操作员和出租人之间相互不信任，以及机械得不到妥善维护，产生的效果并不尽如人意。最近，物联网和全球卫星导航系统解决方案正在被服务商广泛采用（包括插文 3 中提到的），尽管小规模生产者作为用户仍然很少见。通过监测机械的状况，增强了服务商和生产者之间的透明度和信任。或许最重要的变化是传统机械设备与物联网设备的相互结合，例如农民租赁收割机，全球卫星导航系统对收割机进行监测并采集传输数据，训练有素的操作员驾驶收割机，这可以更有效地利用机械，并提高产量。¹

数字技术在非机械化精准农业中的潜力

上一节描述了数字技术如何正在改变农业机械化的面貌，使机械化变得更精确、更容易为人所用。然而，在许多中低收入国家，尤其是撒哈拉以南非洲国家，机动机械化在农业中的采用仍然很有限。关于非机械化精准农业生产的研究越来越多，实际应用也越来越多。^{40, 41, 42} 基于全球卫星导航系统的手动定点施肥技术很早以前就开发出来了，例如利用可变速率技术对水稻施肥⁴³，而几个低收入亚非国家已经在使用 AgroCares 的手持式土壤扫描仪，⁴⁴ 亚洲和非洲的非机械化农场正在采用无人飞行器（也称为无人机），非机械化农场可以使用全球卫星导航系统绘制农田边界和确立土地权属。⁴⁵

插文 4 （续）

费用的情况。该应用程序还可以帮助在农业价值链各利益相关方之间建立业务联系。另一个重点业务是渔业，特别是金枪鱼，每一条金枪鱼从捕捞上岸到销售，该解决方案会沿着价值链全程对其进行标记和跟踪。该解决方案还提供有关船员、渔船运营和维护成本的信息，优化船队管理。此外，该解决方案还能提供金枪鱼捕捞的详细信息，包括行程日志、渔获量记录表、渔场分析和自动生成的报告。

在秘鲁，Coopecan 沿着整个羊驼毛价值链全程提供数字服务。一系列技术为牧场管理（卫星图像）、动物健康（动物标签）、羊驼毛加工和出口销售（区块链技术）等环节提供数字解决方案。此外，一些畜牧业生产者可能还需要管理畜群或天然牧场方面的特别支持，例如处理棘手的动物健康问题，或避免过度放牧导致牧场日益

退化，他们可以获得技术人员的帮助。Coopecan 还培训农民使用这些解决方案，并建立了可追溯系统，从动物健康、纤维质量和环境及社会责任等维度对生产出来的羊驼毛进行认证，从而改善工作条件、实现公平薪酬和提高动物福利。

最后，在多民族玻利维亚国、哥斯达黎加、厄瓜多尔、危地马拉和墨西哥，Agrinapsis 是一个专注于农业的社交媒体平台，由美洲农业合作研究所运营，旨在促进小规模生产者之间的知识和经验交流。所有用户可以在平台上发布信息，也可以对别人发布的信息进行验证和打分，如果某条信息被标记为可疑或质量低，平台的技术团队会进行检查和修改。Agrinapsis 也为小规模生产者提供了一个开展电子商务的平台，生产者可以在平台上出售产品或购买符合环保要求的投入品。

资料来源：McC Campbell, 2022; ¹ Ceccarelli 等人, 2022。 ²

然而，关于数字技术采用水平的信息很匮乏，我们不清楚有多少农业生产者在实际使用数字技术。⁴⁶ 为本报告委托进行的两项技术研究^{1, 2}的结论表明，在生产一线，世界各地的小规模农业生产者和牧民越来越多地使用各种数字工具、遥感和制图技术（见**插文 4**）。内置各种传感器和高分辨率摄像头的智能手机在当今中低收入国家基本上可以说人手一部，智能手机内置了应用程序，结合适当的界面，可以提供非常有用的创新，非常适合中低收入国家和小规模农业生产者，有可能带来实质性的变化。GoMicro 就是一个例子，通过夹在手机摄像头上的显微镜镜头，结合人工智能，可以快速诊断病虫害，⁴⁷ 并协助对谷物、鱼类、水果和蔬菜等农产品进行高效、准确的质量控制和分级。¹ 还有一些数字解决方案用算法分析卫星或无人机

数据（如产量、土壤条件和植物健康状况），分析结果可与农业生产者凭借观察和经验获得的信息进行比对，并向生产者提出建议。¹

数字解决方案值得政策制定者和国际组织关注。需要进行更多的研究，使数字解决方案适应中低收入国家小规模生产者的需求，特别是在机械化程度最低的国家，如撒哈拉以南非洲。¹ 研究和经验表明，数字技术有助于对作物进行分片区管理，可以提高产量，减少非机械化农场的投入品消耗。然而，有两个制约因素不容忽视。首先，鉴于目前的设备成本，数字技术对小规模生产者来说可能过于昂贵。例如，手持式氮传感器的价格在 300–600 美元之间，对于一年只需要使用几次的小农场主来说过于昂贵，⁴⁸ 更为精密的 AgroCares 扫描仪可以提供

全面的土壤养分信息,但售价格超过 3000 美元。其次,生产者需要学习如何使用这些技术,如果没有相应的专业知识,不正确的操作会适得其反,例如反而增加了投入品的使用量。

世界上还有一些地方,主要是撒哈拉以南非洲,很多小规模生产者和农村人口没有智能手机。^{1,2} 2020 年的数据揭示,发展中国家在互联网接入方面存在巨大的城乡差距:城市地区 65% 的人口可以接入互联网,而农村地区只有 28%。⁴⁹ 证据表明,高成本是阻碍小规模生产者采用这些技术的根本原因,尽管这些技术对于提高生产力有巨大潜力。这表明,仅靠捐助者提供补贴,降低小规模生产者获得数字技术的成本,不见得可行。

因此,需要另辟蹊径让这些技术能够被更多的人使用,上面提到的资产共享服务就是其中之一,已经有服务商可以提供一系列适用于小型和大型农场的机械。然而,农业生产者的数字技能低下很可能是数字工具采用缓慢的一个重要原因。因此,在许多非洲国家,与小规模生产者的沟通需要借助短信息、交互式语音应答和非结构化补充业务数据。例如,在撒哈拉以南非洲运营的 ICT4BXW 和 Justdiggit 最初采用的是智能手机等先进技术,但由于当地智能手机普及率较低,且民众数字技能不高,后来改为使用更简单的方式(即短信息、交互式语音应答和非结构化补充业务数据)。¹

如果农民数字技能较低,必须提供频繁和持续的技术支持,讲解数字技术的相关信息。现在几乎每个人都至少有一部具备基本功能的手机,但在撒哈拉以南非洲,智能手机仍未普及。因此,面向生产者的咨询业务仍需要结合传统手机才能开展,根据卫星数据拟定符合生产者

需求的建议,通过手机把相关信息传送给生产者,可能是牧民和牲畜养殖户需要了解的水源和牧场信息,也可能是香蕉种植户需要了解的疫情信息。¹ ■

农业数字自动化技术和机器人技术的现状

本章前几节介绍了农业中机械化的趋势和动力,并讨论了数字技术在农业转型中的作用,尤其是在推动精准农业和扩大农业机械包容性方面的潜力。本节根据现有证据,将深入介绍数字自动化技术在农业中应用的现状,以及推动其采用的主要动力。

一项技术是否被持续使用是一个最有说服力的指标,这能表明这项技术能否至少为一部分农业生产者和企业带来好处。⁴⁸ 相关文献分析了农业数字自动化进程带来的效益与挑战和采用的趋势。总而言之,数字自动化技术在农业中的采用有两个主要动力:自然资源减少,而对粮食的需求增加;其他经济部门的发展推动了农业部门的创新。⁴⁸

由于数据匮乏(特别是在低收入和中等收入国家),为了解农业数字自动化技术的趋势,必须从各种来源收集信息。此外,还没有一个国家或组织系统地收集关于农业数字自动化的使用数据。由于相关技术和国家各不相同,就事论事的个别分析的价值有限。只有把信息进行汇总,规律才会呈现出来。**表 2** 展示了农业数字自动化的若干里程碑,并列出了每项技术的先行者。确定每项技术被生产者采用的日期并非易事,因此表中列出的日期、国家和技术仅代表大致情况。事实上,没有哪项技术从实验室或

表 2 农业数字自动化的部分里程碑

年份	技术或行动	企业或组织	国家	索引
1974	牲畜电子身份证	蒙大拿州立大学	美国	Hanton and Leach, 1974 ⁵⁰
1983	允许民用GPS的行政命令	美国政府	美国	Brustein, 2014 ⁵¹ Rip and Hasik, 2002 ⁵²
	无人机施用肥料和农药	雅马哈	日本	Sheets, 2018 ⁵³
1987	计算机控制的VRT施肥机	Soil Teq	美国	Mulla and Khosla, 2016 ⁵⁴
1992	挤奶机器人	Lely	荷兰	Lely, 2022 ⁵⁵ Sharipov et al., 2021 ⁵⁶
1997	GNSS农业设备导航	Beeline	澳大利亚	Rural Retailer, 2002 ⁵⁷
	氮素传感器	雅苒	挪威	Reusch, 1997 ⁵⁸
2006	自动喷雾器喷杆部分控制器	天宝	美国	Trimble, 2006 ⁵⁹
2009	分行播种机	Ag Leader	美国	Ag Leader, 2022 ⁶⁰
2011	除草机器人	Ecorobotix Naïo Technologies	瑞士 法国	Ecorobotix, 2022 ⁶¹ Naïo, 2022 ⁶²
2013	联合收割机操作员辅助系统	Claas	德国	Claas, 2022 ⁶³
2017	首个完全自主的大田作物生产系统	哈珀亚当斯大学	英国	Hands Free Hectare, 2018 ⁶⁴
2018	无人驾驶随行翻斗车	Smart Ag	美国	Smart Ag 2018 ⁶⁵
2022	无人驾驶大型拖拉机	约翰迪尔	美国	John Deere, 2022 ⁶⁶

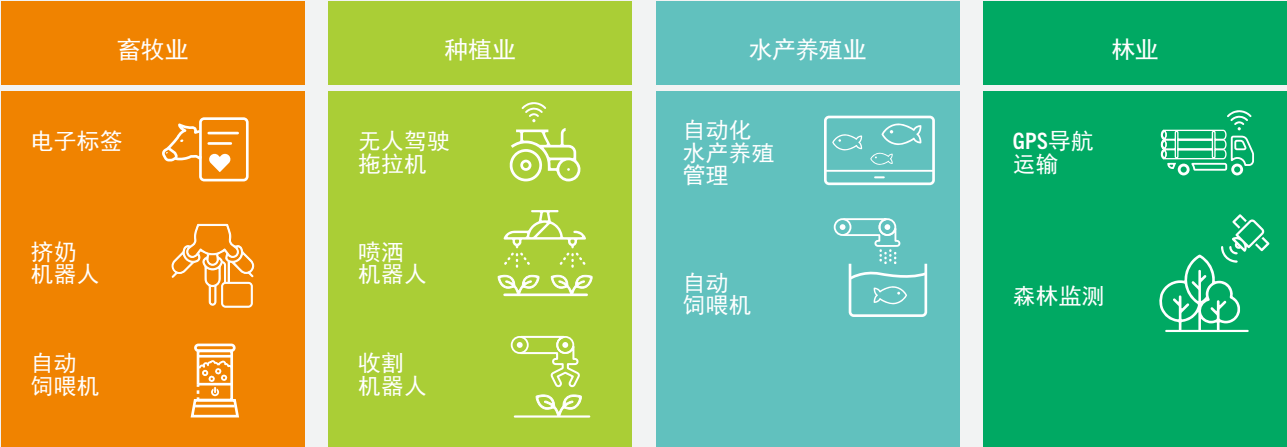
注：GPS 即全球定位系统；VRT 即可变速率技术；GNSS 即全球卫星导航系统。
资料来源：Lowenberg-DeBoer, 2022。⁴⁸

设计工作室出来就尽善尽美，很多改进是在进入田间地头之后完成的。技术采用是一个迭代的过程，从基础研究发现潜在的应用开始，然后将科研人员的想法转化为可以实际使用的商业产品。延续本报告图 2 的做法，图 5 提供了本章所介绍的技术的大量实例，并按农业生产系统排列，这不是重复，而是对表 2 列出的技术的补充。

畜牧业生产的自动化进展

如表 2 所示，最早一批数字自动化技术不少是出自畜牧业。通过在动物身上或畜舍设备上安装传感器，可以调节环境气候，监测动物的健康状况、运动和需求，例如与繁育有关的需求，让精准养殖成为可能。⁶⁷ 已经出现了好几种精准养殖技术，这些技术通过电子标识来完善对动物个体的管理，最常见的是挤奶机器人，

图 5 农业生产系统使用的部分数字技术和人工智能机器人技术



资料来源：粮农组织为本报告编制。

可以在没有人类直接参与的情况下给奶牛挤奶。传统的挤奶机使用了真空技术，但是仍然需要操作员将挤奶机放置在奶牛身上，挤奶完毕后再移开。而挤奶机器人利用电子标识技术，可以访问储存奶牛乳房坐标的数据库，从而实现整个流程的自动化。⁶⁸ 这种全自动系统适应牲畜生产的需求，可以节约成本和提高生产力，前景非常可观。⁶⁹ 然而，挤奶机器人到底有没有带来经济回报，相关证据见仁见智：一些研究给出了肯定的回答；^{70, 71, 72} 而其他研究则认为，与传统挤奶机相比，挤奶机器人并没有产生经济收益。⁷¹ 因此看起来，是否采用新技术不仅有经济因素的考量，也有社会因素的考量，如工作时间更为灵活，生活质量得以提高，中小型奶牛场的经营者对此尤为看重。最近由于劳动力短缺，大型的奶牛场（超过 1000 头奶牛）加入了中小型奶牛场的行列，开始采用机器人挤奶

系统。但是，在大型的奶牛场，决定使用挤奶机器人可能是处于完全不同的考虑。⁴⁸ 插文 5 展示了非洲、欧洲、拉丁美洲及加勒比地区畜牧业数字自动化的例子。

自动挤奶系统的全球销售额从 2016 年的 12 亿美元增长到 2019 年的 16 亿美元，表明需求在不断增长，但目前仍主要集中在高收入国家，德国、荷兰和英国等国是第一批采用者。^{73, 74} 事实上，虽然没有各个区域和国家的采用统计数据，但有证据表明挤奶机器人的使用局限于高收入国家，主要是北欧。⁷⁵ 农村劳动力的缺乏和农业人口新老更替是创造这种需求的原因。表 2 显示首个商业自动挤奶系统于 1992 年在荷兰使用，这种技术随后传播到了其他国家。⁶⁹ 而中低收入国家缺乏这方面的数据，这表明中低收入国家几乎与这种技术无缘。^{48, 76}

插文 5 畜牧业的数字自动化：拉丁美洲、非洲和欧洲的案例

Cattler 于 2019 年在阿根廷起步，后来将其业务扩展到其他国家，包括巴拉圭和乌拉圭，最近又扩展到巴西和美国。Cattler 为肉牛养殖场提供基于卫星信息的自动化养殖场管理系统，并提供反馈和建议以改善养殖场的管理。该公司的目标客户是中型养殖场，而不是那些巨型养殖场。该公司称，养殖户有简化运营和获得投资回报的需求，这是推动他们采用数字解决方案的主要动力。

在布基纳法索和马里，在荷兰发展组织的支持下，GARBAL 有针对性地向农民提供关于牲畜和作物生产、饲料、牛奶和谷物市场行情的信息和建议，而且很快会把业务推广到尼日尔。GARBAL 的数字解决方案特别关注妇女和青年，帮助萨赫勒地区受气候变化影响的小规模生产者和牧民做出关于牧场、畜群迁移、天气和农作方式的决策。解决方案依赖于卫星图像、手机短信和非结构化补充业务数据，并设立了由讲当地方言的话务员组成的呼叫中心，使用手机就可以轻松地利用该解决方案。项目的推进主要得益于政府和私营部门开展合作，并向用户发放补贴。当地农民和牧

民组织积极参与，传统经验和现代科学知识相互融合，也起到了积极作用。主要挑战包括如何确保解决方案契合特定用户的特定需求，如何应对一些国家国内动荡不安的局势。用户不具备相应的数字技能，能力建设任务极其繁重；网络基础设施薄弱，信号接收不好；数据质量低下，这些也是需要解决的问题。

Lely 是荷兰的一个家族企业，为奶牛场提供机器人和管理软件解决方案，目标客户是拥有 100 头以上奶牛的大中型奶牛场，目前还没有服务超大型的奶牛场。Lely 的主要技术是固定式挤奶机器人，其次是粪便清扫机器人和饲喂机器人，此外还有可以优化饲草产量的割草机器人，并且很快会推出有助于减少排放的产品。Lely 还提供可用于所有农场作业的管理软件，其中包括管理动物状况和福利信息的功能。Lely 的技术可以解决劳动力不足、排放监管和动物福利等问题。推动这些技术采用的主要动力是提高能源效率和减少使用化学制剂的需求，劳动力短缺也是一个助力因素。

资料来源：Ceccarelli 等人，2022。²

除了挤奶机之外，还有自动饲喂技术，可以根据产奶量向奶牛投喂不同数量的精饲料。⁷⁷ 这同样适用于家禽养殖，饲喂系统会根据家禽的重量和产蛋数投喂饲料，计算机控制的通风系统会根据温度和湿度进行自动调节。⁷⁸ 然而，关于这些技术的采用趋势及动力的数据和证据甚至更为匮乏。

种植业的自动化进展

作物生产自动化需要使用多项精准农业技术，包括可变速率技术、全球卫星导航系统、机器人、无人机和人工智能。这需要在地理信息系统的基础上收集空间数据，利用作物模拟模型提供的信息确定投入品的用量，从而实现产量和利润最大化。⁶⁷ 这些应用的基础是传感器，包括近感（如测量土壤中的氮）和遥感（如卫星成像）。如果网络条件许可，操作人员可以

用智能手机与利益相关方共享这些数据, 通过简易的手机应用程序, 将数据一目了然地呈现出来。³⁵

这些技术的采用程度因农产品的种类、设备成本、劳动力成本和其他经济因素而异。无论如何, 小规模农业生产者的采用少到几乎可以忽略不计, 原因是几乎没有关于这些技术应用于小规模农业的研究, 将这些用于机械化作业的技术拓展到非机械化作业也并非易事。

全球卫星导航系统和可变速率技术与机动机械相结合, 在作物生产中得到极为广泛的应用, 实现了自动调节和投入品的实时施用。基于全球卫星导航系统的技术在投入品(例如肥料)施用期间可以避免遗漏和重复, 节省了投入品的用量, 这是推动这些技术被采用的主要动力之一。其他动力包括减少疲劳, 让家庭成员能够工作更长时间; 可以雇用不太熟练或经验没那么丰富的人员作为操作员; 减少重复施用对环境的影响; 此外还有一些其他难以量化的好处。这些好处往往有助于抵消采用新技术带来的副作用。全球卫星导航系统的优势很快得到公认, 例如, 减少重复施用节省投入品的效果几乎是立竿见影, 农民和周围邻居也都有目共睹, 例如用传统的方式施用除草剂难免有遗漏, 会留下一簇簇斑驳野草让村邻指指点点, 这种效果的对比也有助于新技术的推广。⁴⁸

可变速率技术可以减少投入品的施用, 优化作物产量, 这也带来了环境效益, 如果能遏制过度施用, 环境效益将更为明显。关于可变速率技术施肥机能否增加生产者的利润, 相关证据并不统一,^{79, 80} 这或许能解释为什么基于地图的可变速率技术施肥机在世界范围内的采用程度只是尚可而已, 而且大多是用于盈利比较稳定的作物, 如给甜菜施用氮肥。

在最先进的自动化技术这一类别中, 自主作物机器人直到最近才投入商业应用。作物机器人主要出现在高收入国家(如法国), 用于为有机蔬菜和甜菜除草。⁸¹ 2016年在英国启动了Hands Free Hectare(“解放双手”)项目, 旨在开发和展示农业自动化, 这是自主作物机器人参与商业作物的生产和收获的首次公开演示。⁶⁴ 随后, 制造商纷纷宣布生产自主机器人(见表2), 目前有超过40家初创企业正在进行研发。自主作物机器人可以节省劳动力, 优化操作时间点, 更准确施用投入品, 减少土壤压实(尤其是小型集群机器人)。通过分析18个案例, 我们发现用于收割、播种和除草的自主作物机器人在特定情况下具有经济可行性。⁸²

在一些国家, 自主作物机器人需要始终有人在现场监督, 在这种情况下, 使用传统设备反而对农民更有利。⁸³ 一项研究发现, 自主操作必须相对让人省心, 才能采用远程监控, 例如从农场的办公室进行监控。⁸⁴ 这表明自主机器人必须具备更强大的人工智能, 能够在没有人工干预的情况下解决更多问题。同样道理, 美国目前对自主作物机械进行限速, 这有可能让使用这些机器得不偿失。⁸⁵

有人提议为中小型农场开发小型和低成本的自主作物机械, 以帮助解决中低收入国家农业劳动力不足的问题, 这对农村青年尤其有利。^{86, 87, 88, 89} 遗憾的是, 目前还没有针对中低收入国家的可行性分析。然而, 现有文献表明, 在中低收入国家采用自主机器人具有以下潜在好处: (1) 在劳动力稀缺的地方, 减少人力需求; (2) 降低成本和支持小规模经营, 使用传统机械化的农场也能获得自主作物机械技术; (3) 能够以较高的性价比利用不规整的田地, 避免农村景观面目全非, 统统变成单调的方块大田, 破坏农村社区的肌理, 而传统的机械化特别适合整齐划一的大田。

插文 6 新的水产养殖技术：印度和墨西哥的案例

水产养殖业在全球粮食安全和营养中的重要作用已经被世人公认，水产是世界上最主要的动物蛋白来源之一，自 1970 年以来产量每年增长 7.5%。⁹⁵ 鉴于水产养殖有进一步增长的潜力，以及该行业在提高产量时面临的巨大环境挑战，必须实施新的战略，实现水产养殖业的可持续发展。新战略需要利用饲料、遗传选择、生物安全、疾病控制和数字创新等领域的新技术，以提高精确度，改善决策，实现对鱼类的自动和持续监测，减少对体力劳动的依赖，改善工作人员的安全、鱼类健康和福利，同时提高效率、产量和环境可持续性。⁹⁶

印度的 Aquaconnect 就是一个很好的例子。印度是世界上最大的水产生产国之一，2018 年的产量达到 700 万吨，⁹⁵ 但印度的水产养殖业缺乏透明度，价值链极其低效。Aquaconnect 使用人工智能和卫星传感技术监控水产养殖场的表现，并向鱼虾养殖户（大多数是中小型规模）提供提高生产力的建议。该解决方案还联合了一个全渠道电商平台，让农民能以实惠的价格采购农业投入品。农民和金融机构之间的隔阂也被弥合，建立了紧密的业务联系。通过 Aquaconnect，印度各地的 6 万多名鱼虾养殖户提高了效率，掌握了水产市场的行情，并有机会申请正规信贷和保险。¹ 与此同时，印度政府已拨款约 30 亿美元用

于农业现代化，其中包括建设水产养殖业和渔业的价值链，并表示有兴趣支持实施技术和促进创新的举措（如初创企业）。

另一个雄心勃勃并有望改变水产养殖业的项目是位于墨西哥瓦哈卡的 Shrimpbbox，这是世界上首个机器人养虾场（见附件 1 中的 Atarraya 案例研究）。该技术提供了自动化系统，可以通过有学习和决策能力的软件进行远程监控。系统集成基于微生物技术的生物控制手段，可以减少硝酸盐积累、预防疾病，节约虾养殖的用水，从而显著降低水消耗、劳动力需求、疾病风险和损失。² 该技术的发明者称，0.5 公顷的机器人养虾场的产量与传统 100 公顷的养虾场相当，而只需要用 5% 的水，并且不含抗生素。⁹⁷ Shrimpbbox 也可以用于寒冷的气候条件和不靠海的地区，这意味今天只能进口冷冻海产品的地区也可以吃上新鲜和高品质的虾。

Aquaconnect 和 Shrimpbbox 只是新技术的两个例子，这些技术旨在推动水产养殖业变得更可持续、更包容和更高效。然而，在非洲和其他技术落后、存在严重粮食不安全和营养不良的地区，当务之急仍然是积极发展水产养殖，提高产量。⁹⁵

类似于基于地图的可变速率技术，无人机也可用于收集信息和自动施用投入品。然而，由于担心滥用投入品、农药漂移和航空事故，无人机的使用通常受到严格的监管。^{90, 91} 例如，在英国，仅允许无人机去人类无法到达的地点施用除草剂，而且要遵守各种限制条件。而瑞士在这个问题上则更为灵活，可能会被其他欧洲国家效仿。^{83, 92} 2021 年，美国约有 14% 的农业零售商提供无人机施用投入品的服务，预计到

2024 年将增加到 29%。⁹² 无人机施用投入品在一些中等收入国家也很常见，如巴西和中国。⁹³

鲜为人知的自动化进展：水产养殖业、林业和受控环境中的种植业

由于劳动力短缺和工资上涨，水产养殖部门的数字自动化正在兴起。尽管投资成本高，但自动投喂和监控的创新技术已被广泛采用，因 »

插文 7 林业部门的演变：机械化和数字自动化

从历史上看，林业部门的工作既辛苦又危险，尤其是在采伐阶段。没有技术含量的采伐需要组建一支专门的伐木小队，由一名伐木工和一名辅助工人组成，还需要配一组工人修剪树枝。树枝修剪后，还需由一名标记员、一名横向切割员和两到三名拖拉员组成另一个专门小队负责将树木切割成原木。¹⁰⁰ 由于这套流程需要太多人手，而且对工人来说很危险，现在这样的人力采伐已经很少见了。

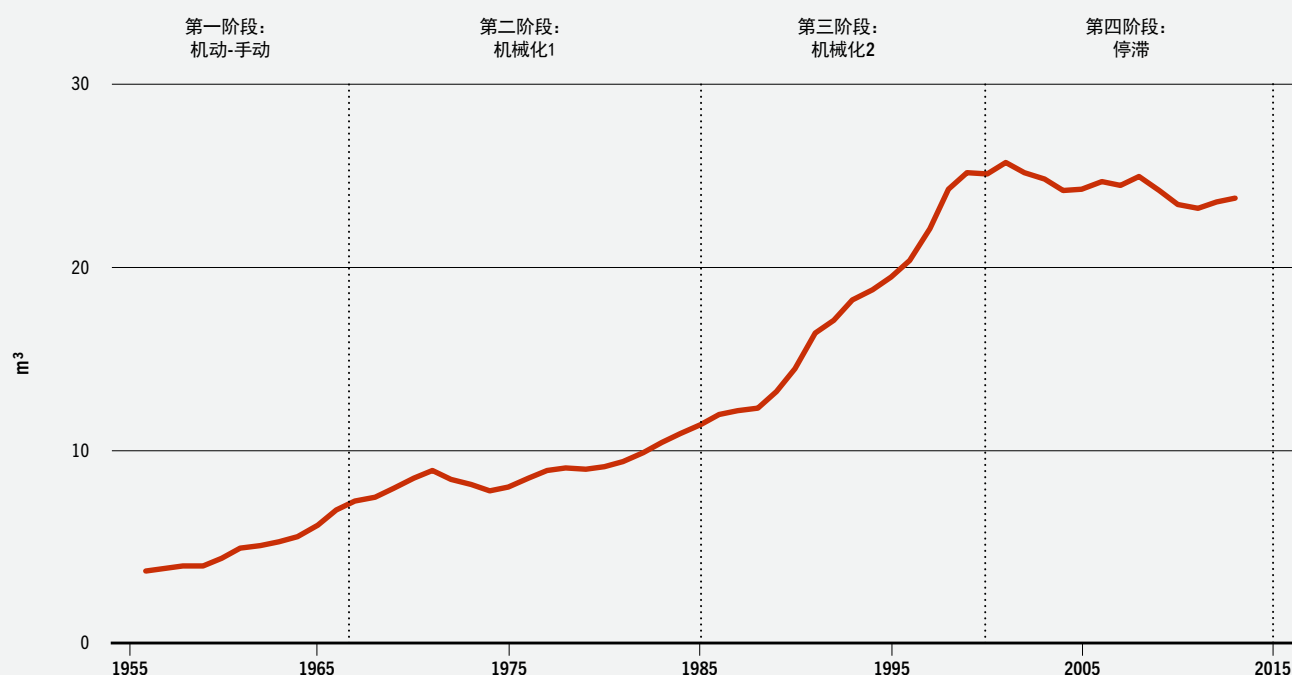
1950年代，伐木业的机械化和半自动化开始启动，以摆脱对手工劳动的依赖。林业采伐可以分为四个不同的阶段：砍倒树木、牵引出林场、在装车场分类和装载、运输到木材市场。木材采伐机已经能够进行多种操作（砍伐、牵引、切割和分类）。这种机器大大提高了效率，改善了工作条件。机械化和数字自动化还提升了采伐机操

作员的安全性和舒适性。在此过程中，劳动生产率大幅提高。在瑞典，从1960年到2010年，每个工人的生产率增长了6倍（见下图）。

然而，即使已经采用了机械化伐木，人工通常仍占欧洲国家木材企业运营成本的30%-40%。¹⁰² 而且工作环境压力很大，因为操作员需要迅速同时做出许多决定，例如操纵复杂的机械，并识别原木质量的差异，因此他们不能长时间工作。为了进一步提高效率，提高自动化水平不失为一种办法。效率和运营成本的考量推动了自主设备的采用。虽然半自动机器的速度通常慢于操作员操作，但仍更具成本优势，而且操作员可以同时操作多台半自动机器。

大多数现代林业机械很容易进行改造，以相对较低的成本转换为远程控制，可以选择的功能 >>

图 瑞典林业每个工作日的木材蓄积量，三年滚动平均值



资料来源: SkogForsk, 据麦肯锡公司报告, 2020。¹⁰¹

插文 7 （续）

也非常多。如上所述，机器操作通常较慢，任务复杂的时候这一缺点尤为明显，如果仅仅是为了追求效率，这样的技术在林业中并不会被采用，之所以被采用往往是出于其他考量，例如保护操作员的安全，或全职的现场操作员的工作量并不饱和。

目前木材采伐尚未出现完全自主的系统，但是机器人利用全球定位系统导航，对树干和原木进行牵引然后运输的技术已经呼之欲出，所需的研发投资并不多，很快就可以实现。从长远来看，由机器人完成砍倒树木的作业，在经济上也是可行的，但这需要大量的投资进行研发。¹⁰³ 最后，在木材供应链中，砍伐后的木材的公路运输作为林场经营的一部分，也需要提高效率。无人驾驶卡车技术发展迅速，其优势在于自动卡车降低了劳动力需求，从而降低了成本。除了公路上的卡车外，自动驾驶技术已经应用在矿山作业中，扩展到林业具有现实可行性。

更环保的伐木新技术也正在开发中。现在，步行式采伐机已经可以在陡峭、敏感或不平坦的地形上作业。研发的目标之一是通过定点触地减少对森林土壤的负面影响，避免轮式或履带式采

伐机在土地上留下持续的压痕。¹⁰³ 这种系统还远未达到商用阶段，但是在新西兰，摆动式森林采伐机可以在不接触森林土壤的情况下运行，不受地形条件（陡度和平整度等）影响，其原理是采伐机悬空，利用树木本身的支撑从一棵树移动到另一棵树，从而减少对土壤的扰动。¹⁰⁴

开发这些对环境友好的技术对森林意义重大，因为在机械化砍伐会造成土壤压实和侵蚀，以及生物多样性的丧失。最后，人们需要认识到森林的作用远远超出供应木材，森林可以储存碳，提供非木材的森林产品，防止水土流失，净化水资源，供人们旅游休闲，因此如何通过基于传感器的数字自动化让这些效益最大化，相关评估工作势在必行。一个尤为重要的应用是利用卫星数据监测森林砍伐，特别是非法砍伐。监测毁林的能力已大大增强，数据的精确度不断提高，每月发布的全球森林数据分辨率目前已经达到5米。例如在亚马逊流域的厄瓜多尔，卫星监测发现油棕榈种植园肆意扩张，导致土著领地上的森林被毁。¹⁰⁵ 在全球范围内免费提供这些数据，这是一个很好的做法，充分说明数字解决方案可以用于诊断问题。

- » 为这些技术能最大限度地降低劳动力成本和其他可变成本，雇佣几个熟练操作员就足以。⁹⁴ 插文 6 展示了印度和墨西哥近期在水产养殖上的创新。

在林业部门，许多木材采伐作业已经高度自动化，使用的机动机械也逐步升级为数字工具。最近，移动技术与虚拟现实和遥感技术相结合，为在林场采用先进的自动机器铺平了道路。木材收割机和运送机（用于木材切割和运输的先进机器）是目前林业自动化的重点。⁹⁸

基于数字的新技术越来越普及。最近的一项研究显示，森林监测、规划和管理的工作非常重视利用基于遥感的创新技术，其中机器学习技术也在数据收集、处理和分析中发挥了重要作用。数字工具的持续采用可能会对森林生态系统提出新的问题，牵涉到动态性、社会性、生态性和技术性的维度。未来的研究应密切地关注林业研究人员、管理人员和利益相关方的看法和态度，他们将如何预测和适应森林生态系统的环境和技术不确定性。⁹⁹ 插文 7 总结了机械化和新兴的数字自动化在林业部门的演变历程。

另一个极具潜力的数字自动化领域是受控环境农业, 包括温室农业和垂直农业。温室是受控环境农业最常见的形式, 顾名思义, 受控环境意味着很容易对环境进行监测、控制和优化。低成本和低功耗的传感器和仪器、通信设备、数据处理的移动应用不断创新, 设计、模拟建模和园艺工程技术也在不断进步, 推动了传统温室转变为智能控制环境。¹⁰⁶ 一批专门从事受控环境农业的初创企业发展迅猛, 显示这一领域的确具有潜力, 如匈牙利的 Food Autonomy、大韩民国的 ioCrops 和智利的 UrbanaGrow。²

在进行大规模商业开发之前, 鉴于温室自动化和垂直农业的初始成本较高, 需要进行准确的经济分析。¹⁰⁶ 与本章介绍的所有技术一样, 实施自动化既会增加成本, 也会增加利润, 两者的相对关系如何把握极为关键, 应在未来的研究中予以充分考虑, 以证明进一步提高自动化的水平物有所值。■

结论

本章介绍了各种农业生产系统中机械化的趋势并讨论了其动力, 以及最新的数字自动化技术。报告强调了世界各地在机械化方面的巨大差异: 在农业制度演变、结构转型和城市化的推动下, 亚洲和拉丁美洲及加勒比地区在机械化方面取得了长足进展, 而在撒哈拉以南非洲却乏善可陈。本章还讨论了数字自动化在农业中成功应用的方式和领域, 以及其改变农业机械使用方式的潜力。

讨论农业机械化和数字自动化的好处, 通常都会从节省劳动力讲起, 但很快就会涉及其他优势。就机动机械化而言, 除了在农业劳动

力稀缺和季节性波动的情况下提高作业的及时性之外, 最公认的好处是减少了劳动的繁重性。虽然机械化对劳动效率、减贫、粮食安全、营养改善、健康和福祉有积极影响, 但也引起了人们对一系列问题的担忧, 包括失业、¹⁰⁷ 生物多样性丧失、^{108, 109} 土地退化、^{15, 110} 大农场和小农场之间的差距日益扩大。^{111, 112} 以大型四轮拖拉机为代表的大型机动机械主导农业生产是让很多人产生如上担忧的主要原因。^{7, 113, 114}

关于数字自动化的文献声称, 数字技术可以扭转机动机械化带来的上述社会和环境问题。⁴⁸ 数字自动化的好处包括: 数字设备比较小巧, 适合各种规模的现场作业; 施用投入品更为精准; 小型集群机器人可以减少土壤压实; 能够在人工或机械技术无法企及的地方进行实地作业, 例如潮湿的土壤和陡峭的山坡; 耕作不规则的小块土地并产生经济效益; 以及自动收集作物和牲畜的数据。^{54, 82, 115}

本章表明, 已经有一系列技术解决方案, 可供处于不同发展阶段的国家采用。政府面临的挑战是如何促进所有人获取这些技术, 包括小规模生产者、妇女、青年和弱势群体, 实现包容性的采用, 并确保现有技术解决方案适合不同生产者的具体情况和需求。

确保包容性采用技术充满挑战, 但能使各国真正受益于数字自动化技术, 并有助于以公平和可持续的方式推动农业粮食体系转型。本章介绍的案例显示, 小规模生产者可以从机械化服务和数字自动化中受益, 并同时减少环境足迹。然而, 越来越多的证据表明, 政府如何进行政策选择, 将影响这些技术的发展方向以及在不同国家和不同生产者中的采用程度。政府的政策选择决定了获得信贷、培训和相关信息的机会。理想的情况是, 各国政府努力为有利

于当地农业粮食体系的创新技术创造一个公平的竞争环境，使私营部门能够去平衡机动机械化、数字自动化和机器人的供求关系。下一章将介绍这些技术的商业价值及其改造农业的潜

力，并重点讨论机动机械化（通常与数字解决方案相结合）如何能继续发挥重要作用，特别是对低收入和中等偏下收入国家的小规模生产者而言，而这些国家的采用速度一直很慢。■



塞尔维亚
田间的自动收割机。
©Scharfsinn/
Shutterstock.com



第 3 章

投资农业自动化的商业逻辑

要点

→ 投资机动机械化在商业上有充分的理由，机动机械化可以降低生产成本、实现规模化和集约化生产，提高生产力。阻碍其被采用的主要障碍包括无法获得必要的服务，如贷款和农业技术推广，特别是弱势、受排斥和边缘化的群体，其中包括小规模生产者和妇女；缺乏有利的商业环境；缺乏适合小规模农业的技术；以及基础设施薄弱。

→ 许多中低收入国家采用机动机械化的速度很缓慢，但机动机械化仍然可以让这些国家受益非浅。中低收入国家应积极利用现有的各种

机械，开发多种用途，并根据当地需求定制机械，特别需要关注那些经营不平坦小块土地的小规模生产者的需求。

→ 数字技术可以提高农业经营的精准性和及时性，使农业咨询服务更加有效，并解决过去机械化带来的环境挑战（如土壤侵蚀），同时建立抵御冲击和压力的韧性。

→ 数字技术使机械租赁服务变得可行，在低收入国家也是如此，这使小规模生产者和女性

生产者等经常被排斥的群体能够用上农业机械。青年农民值得特别关注,他们是家庭农业向自动化农业转变的主要动力。

→ 采用数字自动化技术的商业逻辑还没有得到充分论证,特别是在低收入和中等偏下收入国家,原因是网络连接和电力供应没有保障,相关服务(如金融、保险和教育)很难获取。对于人工智能机器人来说,情况更是如此,预计主要是高收入国家的大规模生产者会加速采用这些技术。

→ 充分发挥数字自动化技术的潜力,需要解决阻碍采用的各种因素:基础设施薄弱,农民数字技能低下,新技术价格高昂,大环境不够有利,同时还需要在全球范围内投资研发和测试,因地制宜地开发数字自动化技术。

第2章讨论了农业自动化的趋势和动力,包括机械化和支持精准农业的新数字自动化技术。机动机械化已在世界各地被广泛采用,尽管在国与国之间和各国内部发展并不均衡。撒哈拉以南非洲大部分国家仍然落在后面。其他区域的机械化普及程度也并不平等,小规模生产者和妇女等弱势群体往往与之无缘。世界当前正处于农业数字自动化浪潮的初期,传感器、机器人、人工智能和其他数字工具可以使农业运营的一项或多项任务实现自动化:诊断、决策和执行。许多国家已经广泛采用机动机械化,但就数字自动化而言,农民和农业企业仍保持谨慎,他们会考虑当地条件和已经在使用的技术,对数字自动化技术进行筛选,希望找到物有所值和适合自己需求的解决方案。推广数字自动化的一个主要障碍是购置或运维

成本过高,即使考虑当前的人力成本,这样的投资也很难让人觉得会有好的回报。阻碍推广的其他因素包括:缺乏适合小规模生产的技术,无法及时获得维护和修理,用户数字化水平低,网络连接时断时续,以及人们对创新怀有疑虑。本章分析了这些因素对农业自动化商业逻辑的影响,并提出如何才能让推广农业自动化更有理有据。

投资农业技术的商业理由是否充分,取决于农业生产者以及参与技术设备制造、经销、维护或修理的相关各方有可能获得多大的收益。有一个基本假设作为前提:农业生产者、经销商、维护人员和提供售后服务的商家都是理性的,他们的决策是为了实现自身利润和福祉的最大化。投资自动化技术需要成本,如果这些技术在当地并不普及,成本往往会居高不下。农业生产者和技术供应商只有在收益大于成本的情况下才会主动接受自动化。

对于某些技术而言,在某些条件下,投资成本可能会超过潜在收益,至少在短期内是如此,这可能会阻碍投资的积极性,尽管这些技术对未来整个社会极为有利,这时往往需要政府进行干预,使私人利益与全社会的利益相一致,通过激励机制使新技术具有商业前景。本章还探讨了与机动机械化相关的问题(主要是环境问题),并分析了如何通过新的数字自动化技术(包括仍在研发中的技术)解决这些问题(至少是部分解决)。这对于一些低收入和中等偏下收入国家意义尤其重大,在这些国家,机动机械化的采用一直以来进展缓慢,但数字技术的兴起有可能改变局面,推动可持续、高效和包容的机动机械化。

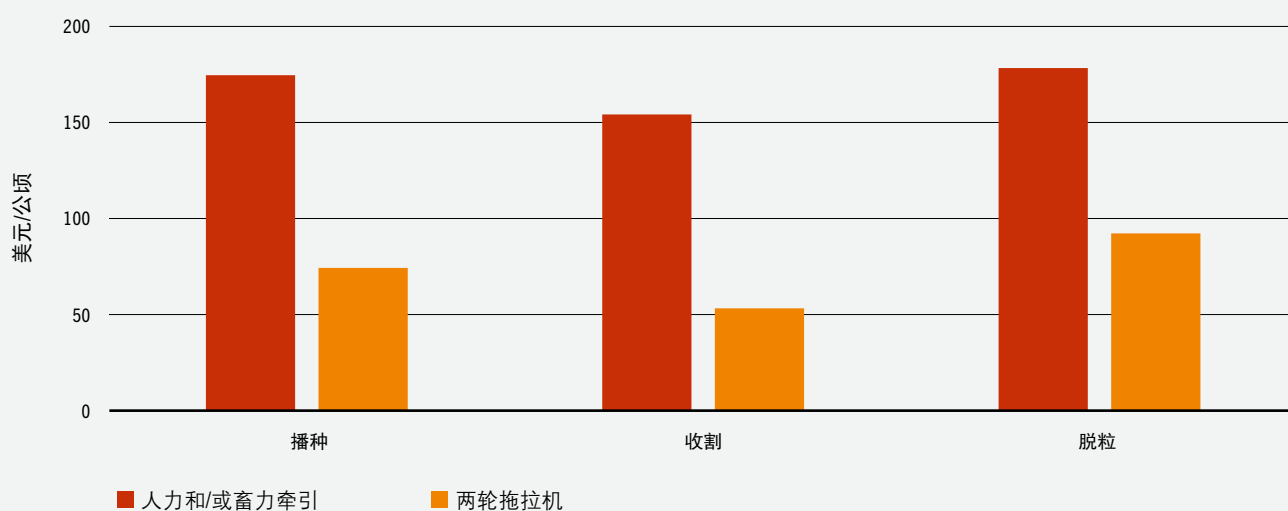
插文 8 机械化与人工和畜力牵引的成本效益比较分析：以埃塞俄比亚和尼泊尔的小麦生产为例

在埃塞俄比亚，与使用手动工具或畜力牵引的传统技术相比，农民在小麦生产中使用两轮拖拉机分别将播种、收获和脱粒这些基本操作的成本降低了 46%、65% 和 48%（见下图）。运输成本也下降了。平均总收入从传统做法的 1964 美元增加到机械化作业的 2567 美元。机械化和传统耕作系统的平均总可变成本分别为 526 美元和 818 美元。

因此，机械化运营将毛利润提高了 78%，达到 2041 美元。这些结果表明，小麦的机械化生产比非机械化生产具有更高的效率和利润。

同样，在尼泊尔，小麦生产使用机动机械，包括施肥机、收割机和拖拉机驱动的脱粒机，使农场总运营成本降低了近一半，毛利润增加了 81%，达到 514 美元（见下表）。>>

图 小麦生产中使用机动和非机动设备的农业运营成本 — 以埃塞俄比亚为例



资料来源：Yahaya, 即将出版。¹⁵

在为本报告编写的案例研究和其他文献的基础上，本章提出并总结了推广机动机械化和

数字自动化技术的商业依据，然后讨论了政策和投资会如何强化这些商业依据，形成推动自

插文 8 （续）

表 小麦生产中使用机动和非机动设备的农业经营成本 — 以尼泊尔为例

项目	手工操作成本 美元/公顷	机械化操作成本 美元/公顷
粪肥	68	34
种子	71	71
化肥	87	87
总投入成本	226	192
整地、播种和施肥	85	25
灌溉	36	11
收割	102	48
脱粒	174	116
农场经营总成本	396	200
运输	13	13
总可变成本	635	405
粮食生产	868	868
秸秆生产	51	51
总收入	919	919
毛利	283	514
收益-成本比率	1.45	2.27

注：截至 2021 年 4 月 6 日，根据尼泊尔中央银行汇率，1 美元 (USD) = 117.57 卢比 (NPR)。
资料来源：粮农组织，2022。¹⁶

动化技术采用的激励机制。最后，本章分析了各种技术的未来发展轨迹，指出这些技术有可能推动农业转型，解决各地生产者面临的不同挑战，实现农业的可持续发展。■

插文 9 利用农业自动化提高食品安全

新技术的引入极大地改善了食品的保存条件和安全性，包括食品冷藏、冷链运输、脱水和熏制的新工艺。例如，在畜牧业中，屠宰场中用于胴体修整的垂直肉轨系统简单而有效，能防止肉被污染。粮食收获、分拣和包装实现自动化，可以大大降低食源性病原体从工人传播到食品的风险。对花生进行机械分类，可以剔除被真菌深度感染的果仁，极大地改善了公众的健康。但是，遵守恰当的设备卫生和个人卫生习惯，以防止机器本身传播食源性风险也很重要。例如，用于收集农作物的机器可能会将过敏原引入供应链，必需进行适当的清洁。机器还可能通过机油泄漏、

液压油、废气和其他方式造成食品安全风险。

数字自动化的进步也有助于快速检测食品中的污染物，为及时调查食源性疾病暴发提供更好的工具，并增强监督和监测系统。精准农业中的遥感技术可以及早发现虫害，有针对性地及时施用农用化学品，防止滥用。但是，这些好处并不见得都能兑现。例如，在某些情况下，为了达到预期的目标，自动化反而可能会增加农用化学品的投入，这对人类和环境都是有害的。同样重要的是，要确保农民获取技术的公平性，并解决数据隐私和权属的相关问题。

资料来源：粮农组织，2022。¹⁷

论证机动机械化在各种情况下的商业逻辑，确认其广泛的潜力

关于机械化给农业和农村发展带来的好处，有大量和丰富的文献进行了论述。机械化让生产者更快、更有效地开展农业经营，提高农业生产力，增加收入，节省劳动力和成本，减少繁重的工作。例如，在亚洲的集约式湿地水稻生产系统中，用动力耕田机替换畜力犁，极大地节省了用于整地的劳动力成本。通过机械共享的方式实现整地和脱粒的机械化，提高了水稻种植密度和产量。¹ 给稻谷脱壳或把谷物磨成粉非常耗费人力，而且极其单调枯燥，使用小型机械磨完成这些任务，大大增加了人们的闲暇时间，对妇女尤其意义重大。¹ 机械化有助于减少作物破损和损耗，例如在印度，联合收割机减少了水稻损耗，将产量提高

了24%。² 插文 8 是近期的两个案例，表明在埃塞俄比亚和尼泊尔投资机械化有充分的商业依据。

即使在没有广泛采用机械化的撒哈拉以南非洲（第2章），也有证据表明机械化带来了巨大的好处。在科特迪瓦，拖拉机的使用促进了现代投入品的施用和作物管理的优化，提高了土地和劳动力的生产率。一项针对11个非洲国家的研究发现，拖拉机的使用使玉米单产增加了约0.5吨/公顷。³ 在埃塞俄比亚和加纳，使用拖拉机的农户可以通过耕种更多的土地提高产量，而非费力提高单产。^{4,5} 在赞比亚，使用拖拉机的农户通过扩大耕种面积实现收入几乎翻番，农业劳动的每小时毛利润是其他农户的两倍。⁶ 尽管每公顷的劳动力需求减少了一半，由于耕种面积扩大，非机械化劳动对人手的需求实际上有所增加，需要雇佣帮手。从使用家庭劳动力转变为使用雇佣劳动力，减轻了妇女和儿童的负担，儿童能够去学校接受教育。

插文 10 小型机动机械化提高小规模生产者的韧性

为应对 2015 年缅甸若开邦的热带气旋和随后于 2016 年发生的旱情，粮农组织与缅甸政府启动了一个由日本政府资助的为期一年的项目（2016/2017 年），目标是改善家庭粮食安全，提高冲突和自然灾害易发地区小规模生产者的韧性。作为项目的一部分，粮农组织提供了双轮拖拉机和水泵等小型农业机械，机械化在若开邦受洪水和冲突影响的 7 个乡镇和 73 个村庄展开。项目总计分发了 55 台两轮拖拉机和 94 台水泵，并开展了关于使用和维护小型机械的培训。此外，146 名村民接受了拖拉机操作培训。

结果显示，农民和整个社区受益良多，土地整理的成本降低（1.6 美元 / 公顷），并大大节省了时间（两轮拖拉机比畜力牵引快 7 倍）。及

资料来源：粮农组织，2019。²⁴

时的土地整理进一步转化为更强的韧性，因为农民能更从容地应对变化无常的天气、劳动力短缺和其他灾害。机械化的其他好处还包括提高了农民收入和粮食安全，因为在旱季安装的水泵让农民可以种植豆类和蔬菜，既可以供家庭食用，也可以在集市上销售。

烘干机、脱粒机和收割机等其他小型机械也可以对小规模生产者的韧性产生积极影响，同时创造农村就业机会，并减轻工作负担。然而，选择哪种技术取决于当地实际情况和需求评估。此外，机械化服务要长期保持下去，有必要在村庄或周边地区设立维修网点，配备技术人员提供技术支持。最后，项目得出结论，如果项目能更多地关注妇女和青年，效果会好很多。

因此，农业机械化的好处远远超出提高农业生产本身。机械化可以解放家庭劳动力，农业家庭能够将时间从农业劳动中抽出来做其他事情，如精心准备餐食改善家庭营养，或从事有助于提高生活水平的非农工作。^{7, 8, 9} 机械化还可以进一步创造新的就业机会，例如维护和修理设备的技工。由于对非农业商品和服务的需求增加，可能会对经济的各行各业产生溢出效应。^{10, 11} 机械化还包括保存和仓储技术（如干燥机和冷库），在实施得当的情况下可以改善食品安全，减少食品变质。¹² 插文 9 展示了农业自动化在改善食品安全方面的作用。

机械化也能加强农业生产的韧性，尤其是提高抵御干旱等气候冲击的能力，因为机械化

使农民能够更快地完成耕作活动，并根据不断变化的天气灵活地调整工作，例如，在降雨没有规律和长期干旱的地方（近东和北非）¹³ 使用灌溉泵可以增加或稳定产量。¹ 机械化还有助于农业家庭和农业雇工抵御疾病的冲击，而健康问题往往会严重干扰农业生产。¹⁴

根据当地需求定制机械化解方案是强化商业逻辑的关键

现有证据表明，机动机械化的使用仍有持续增长的空间，特别是在目前机动机械化程度低或完全不存在的地区。跨越式发展是有可能的，跳过机械化阶段，直接采用具有人工智能的数字自动化和机器人技术，但这只有在少数

插文 11 埃及机械化垄作提高了生产力和水资源的可持续性

机械化垄作种植是行之有效的方法，可以提高生产力和作物产量，节约稀缺的水资源，优化排水从而避免土壤积水。埃及将机械化垄作用于小麦生产，改进了单产，生产力提高了 25%，种子成本降低了 50%，用水量减少了 25%，劳动力成本也得以降低。因此，机械垄作现在已成为埃及全国小麦运动的重要组成部分。据测算，到 2023 年，埃及将利用机械垄作技术种植大约 80 万公顷小麦。据进一步测算，为期 15 年的项目将产生超过 40 亿美元的经济效益，其中大部分将惠及埃及的 100 多万户小麦生产者。其他好处包括减少对进口小麦的依赖（到 2025 年减少 50% 以上），提高 20 多万公顷干旱土地的水资源使用效率。

资料来源：Alwang 等人，2018；²⁵ Swelam，2016。²⁶

要取得好的效果，机械化垄作必须因地制宜，技术方案的具体构成也要根据具体情况而有所调整。在埃及，经过长期评估形成了一套明确的技术方案，包括使用改良的小麦品种，播种量为 108 公斤 / 公顷，11 月 15 日至 30 日期间为播种期；使用机械犁 / 播种机进行整地和种植，氮肥施用量为 168 公斤 / 公顷。机械化垄作技术经过恰当调整后，特别适合中小型农场，因为成本相对低廉，很容易用小型拖拉机实施，适合当地现有的作物，包括单作作物（如小麦或水稻）和多作间种作物（如玉米、甜菜和蚕豆）。

高收入国家才有现实可行性（见第 2 章）。相比之下，低收入和中等偏下收入国家可以尝试各种各样的机动机械化解方案。推广机动化机械化的商业理由是否充分，主要取决于当地条件和考虑采用的机械类型。对于位于平原的大型农场，联合收割机和四轮拖拉机等大型机械有用武之地，可以为农业生产者带来效益。然而，对小规模生产者而言，小型四轮和两轮拖拉机等小型机械可能更合适，小型机械成本更低，而且可以照顾到环境的可持续性。¹⁸ 事实证明，小型的机械化解方案是缩小亚洲机械化差距的关键。^{2, 19, 20} 小型机械更适合小农场，可以绕过树桩和石头，而且更容易操作、维护和修理，申请小额贷款也更容易成功。此外，小型机械还可用于牵引松土机和操控播种机，实现生态农业的机械化，从而提高适应气候变化的

韧性。^{21, 22} 插文 10 展示了一个实例，说明小型机械有助于提高缅甸小规模生产者的韧性。

根据当地需求定制机动机械，近期在这方面涌现了一系列创新，而这不仅仅是为适应当地需求简单地调整机械的尺寸。近东和北非国家水资源日益短缺，农业产量难以提高。

插文 11 展示了埃及机械化垄作种植协同创新的案例，使用机械化工具，结合投入品施用和大田农艺的改良，不仅提高了产量，也节约了稀缺的自然资源。

目前许多低收入国家将农业机械化作为施政重点，特别是在撒哈拉以南非洲，在之前政府主导的机械化方案失败后，农业机械化曾被搁置了一段时间。²³ 关于政府和发展伙伴应支

插文 12 在老挝人民民主共和国使用滚筒式播种机省时、省力、省钱

在老挝人民民主共和国的沙耶武里，在粮农组织的支持下，政府和小规模生产者实施了一个项目，对滚筒播种机进行实地测试，以实现水稻的可持续集约化生产。滚筒播种机是一种用于播种水稻秧苗的手动工具，比传统的人工移栽和撒播等种植方式更具优势。事实上，滚筒播种机让种植时间缩短了 90%，劳动效率提高了 40% 以上，生产成本降低了 20%，种子

用量也节省了 60% 以上。滚筒式播种机不需要化石燃料，是一种环保技术，可用于生态农业，如鱼稻共生系统。滚筒式播种机提高了农民面对气候变化的韧性，使他们能够更灵活地选择种植时间，及时进行种植。此外，如果自然灾害毁坏了新播种的水稻，农民可以迅速而轻松地用滚筒进行补种。

资料来源：Flores Rojas, 2018。²⁸

持哪种技术路线，尤其是在尚未引进自动化的地方应如何选择，例如撒哈拉以南非洲的大部分地区和许多山区，目前正在就这些问题进行探讨。没有放之四海而皆准的方法，相反，适合当地条件的方案才是最好的方案。¹⁸ 农业自动化的决策应考虑当地的条件，包括面临的机遇和障碍，以及市场对相关机械化技术的需求。

人力和畜力仍然不可或缺

尽管机械化带来了种种好处，但证据表明，手动技术和畜力牵引仍然有重要意义。对于规模很小和分散的农场来说，畜力牵引可能是一种重要的动力来源，特别是在有草场、有水源和动物疾病可控的情况下。¹⁸ 畜力牵引可以将畜牧业和种植业结合起来，优化资源利用，例如，将动物粪便作为作物的肥料，用作物残渣饲养动物。对许多生产者来说，这也是在过渡到机械化之前克服动力短缺最直接和最好的办法。^{21, 27} 对大多数非洲小规模生产者来说，过渡到畜力牵引已经是实实在在的进步。¹⁸

同样的道理也适用于高级手动工具，即主要依靠人力但通过智能设计能事半功倍的工具。这种工具特别适用于机械难以操作的农场，可以节省劳动力，让劳动力可以腾出时间休息或从事副业，降低成本，减少繁重的工作，增强韧性。插文 12 的案例分析了手动滚筒播种机对老挝人民民主共和国和尼泊尔的收入、效率、环境可持续性和韧性的积极影响，展示了高级手动工具的优势。

总而言之，耕畜和高级手动工具的潜在用途取决于具体情境。虽然耕畜和手动工具没有拖拉机强大，但仍然有助于克服劳动力瓶颈，提高作物产量，扩大耕作面积。在许多情况下，先进的手动工具和畜力牵引可能是增加农业动力供应的最佳选择。政府和发展伙伴在思考应推广哪些技术路线时，可以用最优匹配框架进行筛选，并结合相应的机制建设和投资，同时考虑到本国农业生态的现状和社会经济条件。农业机械化的创新进程应反映这些不断变化的条件，技术路线需要适时进行调整和改进。■

插文 13 机器人挤奶系统商业价值的演变

畜牧业自动化技术的采用正在增加，尤其是高收入国家的机器人挤奶系统。³² 节省劳动力（测算为 18-30%）³³ 和增加牛奶产量（每头奶牛 10-15%）^{33, 34, 35} 可以带来经济效益。证据表明，中小型奶牛场（100-300 头奶牛）率先采用机器人挤奶，工人不需要每天给奶牛挤两三次奶，工作条件和时间更为灵活，尤其受到青年农民的欢迎。挤奶机器人的商业价值更多体现为灵

活的工作时间和更高的生活质量，而不是纯粹的经济效益。然而，最近有证据表明，大型奶牛场（超过 1000 头奶牛）正在采用机器人挤奶系统以应对劳动力短缺。²⁹ 机器人挤奶机的购置成本较高，对于规模很小的农场往往不具经济可行性，这些小农场主要位于低收入和中等收入国家。这项技术可能对拥有相对较大畜群的商业畜牧场更有吸引力。

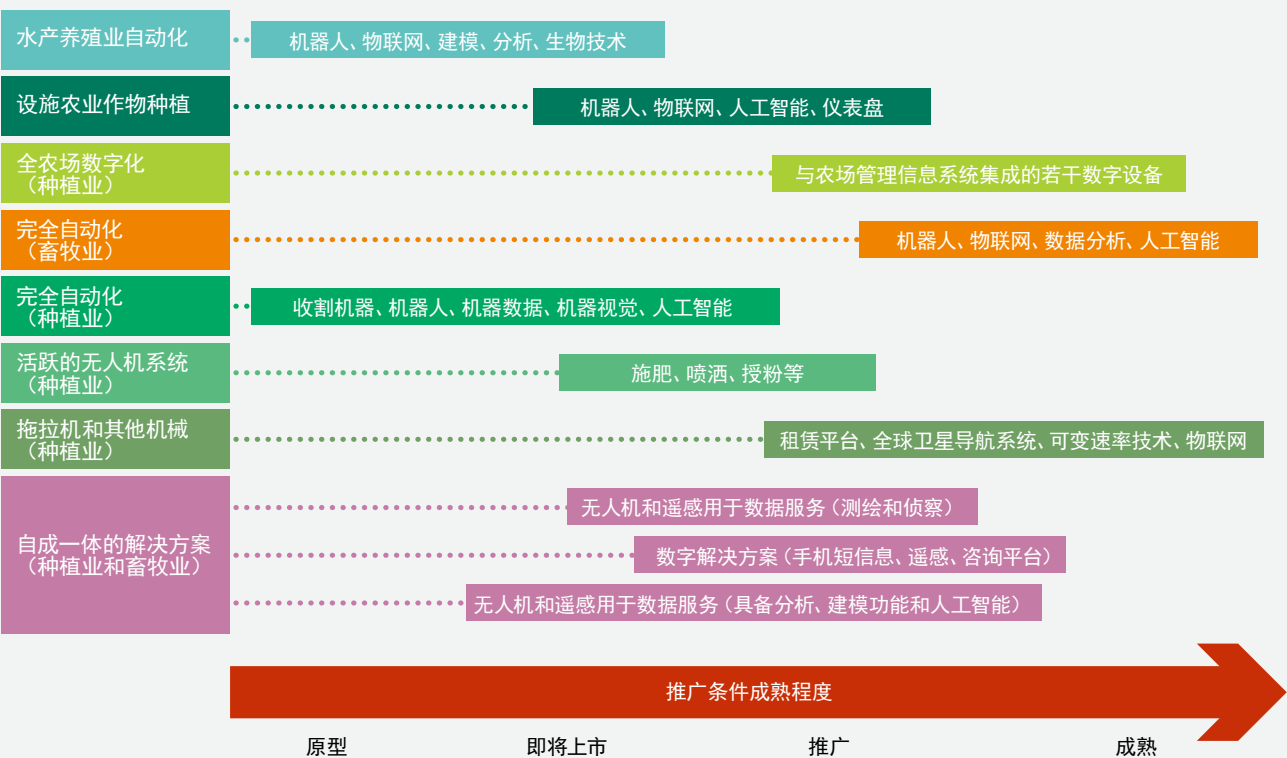
探讨投资农业自动化的商业逻辑：案例研究提供的经验

上一节讨论了推广机动机械化的商业依据，强调机动机械化可以提高韧性、生产力和资源使用效率，减少繁重的人力劳动，缓解劳动力短缺；同时还指出，在某些情况下，人力和动物牵引力仍然有其价值。本节将探讨投资数字自动化技术的商业依据。提高生产力和资源利用效率，节省劳动力，这是采用数字自动化技术的主要动力。然而，数字自动化技术并非免费的午餐，往往需要大量的前期投资，并且要求用户掌握特定的技能和知识才能有效运行。如果创新脱离传统，与文化和社会习俗格格不入，农民会对投资这些创新产生疑虑。在这种情况下，政府和服务商可能需要进行干预，大力宣传投资新技术的预期收益，还可能需要开展试点、实验和成本效益分析，帮助农民建立信心。

评估农业数字自动化技术商业价值面临一个难题：关于数字自动化创造的经济效益的信息非常匮乏。不同于机动机械化，数字自动化技术是全新的事物，关于其采用程度的数据零零散散，而且缺乏一致性（见第 2 章）。同样，关于数字自动化的经济效益的信息也莫衷一是，经济效益的高低在一定程度上取决于各种技术在农业中的普及程度。²⁹ 因此，本节的讨论主要基于本报告委托的两项技术研究的发现。^{30, 31} 这两项研究基于 27 个案例研究，而这些案例是通过采访世界各地相关人员获取的信息形成的。因此，案例研究提供的证据大部分是定性的，主要是数字自动化服务提供商分享的经验，也有一小部分是农业生产者分享的经验。27 个案例研究涵盖了世界所有地区和所有农业生产系统（种植业、畜牧业、水产养殖业和林业），代表了机动机械化和数字自动化的新型农业解决方案，规模有大有小，在大中小各种类型的农场上都有应用。这些案例反映的是服务商的视角，而不是作为最终用户的农业生产者的视角。（关于这些案例及其研究方法的简要说明见附件 1^a）

a 详情见 McCampbell, 2022³⁰ 和 Ceccarelli 等人, 2022。³¹

图 6 数字自动化技术推广条件的成熟程度



注：UAS 即无人飞行系统；IoT 即物联网；AI 即人工智能；FMIS 即农场管理信息系统；MV 即机器视觉；GNSS 即全球卫星导航系统；VRT 即可变速率技术；RS 即遥感；DS 即决策支持。商业化程度分为四个阶段：（1）原型 — 概念已经在有限的试验中得到测试和验证；（2）即将上市 — 解决方案在真实生产环境下可以发挥功能，服务提供商正在研究一种或多种商业模式以开发客户；（3）推广 — 解决方案已被多个最终用户 / 客户采用，并且形成了一个或多个盈利的商业模式；（4）成熟 — 解决方案有专门的客户群，形成了一个或多个盈利的商业模式，并且需求在不断增长。
资料来源：Ceccarelli 等人，2022。³¹

农业自动化技术是否准备好大规模推广：一个分析框架

这 27 个案例研究来自世界各地，就商业推广是否准备就绪而言，案例研究中的技术彼此差异很大。图 6 展示了一种技术在可以商业推广前需要经历的四个阶段。处于成熟期的解决

方案大多为与畜牧业自动化和全农场数字化有关的技术。全自动设备和机械用于动物生产，在节约成本和提高效率方面的确前景广阔（见插图 13）。

图 6 展示了正在普及的各类技术，包括自成一体的数字解决方案（见术语表）、无人飞行

插文 14 数字化果园喷雾器在欧盟的影响：来自波兰和匈牙利的证据

欧盟已向 SmartAgriHubs 投资 2000 万欧元，旨在实现欧洲农业的数字化。项目包括智能果园喷洒应用程序，利用内置物联网设备的智能喷洒技术，优化果园的运营效率和处理质量。支持物联网的喷雾器可以根据果园特定的区域和单棵果树的条件自动启动，显著减少农药的使用。智能

果园喷雾应用云与农民现有的作业流程和应用软件进行集成，进一步提高了水果生产的效率、利润和可持续性。由于具有可追溯性，这项技术还可以提高食品安全和质量。决策的优化使果农每年每公顷可节省 517 欧元的燃料费，农药成本也降低了 25%，利润得以增加。

资料来源：IoF, 2019。³⁷

系统（俗称无人机）和遥感、配备全球卫星导航系统的机械化解解决方案、可变速率技术和设施农业解决方案。早在 1990 年代，大量文献论证了使用全球卫星导航系统的商业价值，³⁶ 促进了这项技术的推广。相比之下，可变速率技术的情况却不容乐观，因为关于其是否能产生经济效益，目前的证据众说纷纭（见第 2 章）。²⁹

一些技术还未真正进入市场，或仍停留在原型机阶段，包括用于传感和投入品施用的无人机、用于大田农业、设施农业和水产养殖的高级自动化技术和机器人。一些技术的商业回报已经得到证明，并正在取代高收入国家的体力劳动，执行灌溉、虫害侦察、收获、除草和水果选择性采摘等一系列任务，而没有证据表明这些技术在低收入和中等收入国家得到采用。

许多解决方案仍处于研发和商业化的早期阶段，商业逻辑尚不明确。在 27 个研究案例中，一些只是初具雏形（GRoboMac 和 Seed Innovations），而其他解决方案很快就可以上市（如 Atarraya、Food Autonomy、GroboMac、

Harvest CROO Robotics、Hortikey 和 UrbanaGrow）。有几个解决方案正在逐步推广（如 Aerobotics、Cattler、Cropin、ioCrops、SeeTree、SOWIT、TROTRO Tractor 和 Tun Yat）或日益成熟（Lely、ZLTO、ABACO、Egistic 和 Igara Tea）。有关各项技术所处的商业化阶段，详细信息见附件 1。

深入审视案例研究的结论

从服务提供商的角度来看，案例研究反映出的最为重要的一点是，27 家企业中只有 10 家表面上是盈利的，具有财务可持续性。这些企业处于成熟阶段（见图 6），大多位于高收入或中等偏上收入国家，主要为大规模生产者服务，但也有例外，例如乌干达的一家茶叶企业以小型茶农为目标客户。这些企业大多数在高收入国家经营，也有几家位于中等偏上收入国家，如南非的 Aerobotics、墨西哥的 Atarraya 和阿根廷的 Cattler。这一事实表明，投资这些技术的商业逻辑或许在高收入国家更有说服力。

从用户的角度来看,超过三分之一的案例表明,解决方案提高了产量和效率,并带来了新的市场机会,农民因此从中受益。例如,在乌干达,通过 Igara Tea 这个旨在提高茶叶产量和生产效率的数字解决方案,7000 名农民在五年内将产量提高了 57%。缅甸的农机租赁公司(Tun Yat)让使用其服务的农民每人每年大约能多挣 240 美元,主要是因为租用的农机提高了脱粒的质量,机械化操作也减少了收获后的作物损耗。³¹在另外三个案例中,GARBAL 用于畜牧业,TROTRO Tractor 从事种植业机械化租赁业务,SeeTree 用于果树种植,尽管目前还没有充分的证据证明采用这些技术的经济可行性,但农民既然愿意花钱购买这些解决方案,说明这些技术的确具有商业价值。在缺乏商业价值信息的情况下,某种解决方案吸引的用户或投资数量也可以用来说明财务可持续性。例如,五个案例的服务商提供了使用其服务的生产者数量信息(Aerobotics、Cattler、Egistic、Lely 和 SOWIT),两个案例的服务商提供了公司所获得的投资信息(Atarraya 和 Harvest CROO Robotics)。

这些技术很多仍处于开发的初级阶段,商业价值尚不明确。需要开展进一步的成本效益分析,从而搜集证据,以便更好地对技术进行因地制宜的调整(插文 14 为欧洲的案例)。

解读目前已经收集到的信息,有助于了解影响数字自动化采用的动力和障碍。首先,解决方案采用率上升不仅表明技术可以成功地执行农业操作,而且表明农民掌握了这些技术的使用方法。一个关于作物和牲畜数字化应用的案例(ZLTO)表明,农业生产者往往没有时间去学习和熟悉新的解决方案,如果数字解决方案没有内置于农业机械内,难度会进一步加大。

相反,如果新款的农业机械已经配备了全球卫星导航系统,农民就很容易上手,能在作业过程中对机器进行精确的定位。³¹

农业生产者采用数字自动化技术举步维艰,其中一个主要原因是农民普遍缺乏数字技能,并且对这些解决方案的潜力没有充分的认识。此外,人们都想安于现状,尤其是老龄化严重的农业人口。各国的案例都体现了这些因素的影响(欧洲的 AbacoAbaco、大韩民国的 ioCrops、尼泊尔的 Seed Innovations、美洲及欧洲和南非的 SeeTree、斐济及其他太平洋岛国的 TraSeable Solutions,以及缅甸的 Tun Yat),这些因素并非仅仅在低收入或中等收入国家才存在。出于这个原因,人口的代际更替可能会推动新技术的采用,青年农民被寄予厚望,他们可能是实现家庭农场向数字化和先进自动化转型的关键。来自大韩民国(ioCrops)和美国(Atarraya 和 Cattler)的三个案例表明,青年农民更容易被创新所吸引。因此,能力建设对于推动新技术的采用至关重要。

影响新技术采用的另一个动力或障碍是对风险的态度。两个案例(Aerobotics 和 Cattler)表明,南非和阿根廷的大型生产者通常比美国的同行更为主动,对数字自动化解决方案的态度更为开放。这主要是因为美国的生产者承受的市场风险较小,而阿根廷和南非的生产者需要在国际市场上进行激烈竞争。事实上,阿根廷和南非的生产者锐意进取,敢于冒险,很可能是迫于国际市场上的竞争压力,才导致他们更踊跃地采用新技术。

第 2 章中也提到了推动新技术采用的其他动力,包括劳动力短缺(例如季节性短

插文 15 COVID-19 疫情激发对数字技术的兴趣：来自两个案例研究的证据

在为本报告编写的 27 个案例研究中，有两个案例研究提到了 COVID-19 疫情推动新技术采用的特殊作用。TROTRO Tractor 在几个撒哈拉以南非洲国家开展业务，而疫情是其业务得以推广的重要动力。尽管疫情限制了人员流动，由于有 TROTRO Tractor 提供的平台，作物生产并没有中断，平台发放电子代金券也促进了采用。

资料来源：Ceccarelli 等人，2022。³¹

TraSeable 提供一款带有简单数字工具的移动应用程序，让太平洋岛国的农民能够及时了解最新的农业行情。COVID-19 疫情也推动了 TraSeable 的采用。该应用于 2020 年发布，据受访者称，疫情暴发后，应用的下载量显著增长，因为疫情防控要求减少人员面对面接触。

缺，GroboMac、Igara Tea、SOWIT 和 TROTRO Tractor)，以及对安全工作条件和减少的繁重劳动的诉求（Lely 和 SOWIT）。TROTRO Tractor 的案例反映出一个有趣的现象，劳动力短缺是推动女性农民采用新技术的强大动力，因为她们比男性农民更难雇到工人。此外，妇女通常只有等男性用完机器后才能自己用，等轮到她们的时候天已经黑了。TROTRO Tractor 的解决方案让女性自主地使用机器，而不受男性的支配。³⁰ 另一个有趣的现象是，COVID-19 疫情在两种情况下可能推动了新技术的采用，因为疫情期间需要尽量避免或减少身体接触，数字解决方案的价值得以突显（见插文 15）。■

除了商业价值之外，投资、政策和立法的作用

上一节回顾了论证农业自动化技术商业价值的相关证据。研究表明，机动机械化总体上给农业生产者带来了可观的回报，而且如果能因地制宜进行调整，机动机械化还可以提高资源利用效率，节约稀缺资源，产生环境可持续性的效益。尽管相关证据比较有限，人们已经积累了一些重要的经验，能更好地认识到数字自动化技术的商业价值。最重要的信息是，采用数字自动化的商业理由仍不够充分或不够成熟，原因有很多，包括农民不愿承受采用新技术的风险，或者缺乏基本的数字技能来操作新技术。

本节的分析更进一步，研究除商业价值之外的其他因素对自动化技术采用的影响，包括政策、立法和公共投资，这些结构性的因素如

何形成激励机制，鼓励农业生产者和提供自动化技术的商家承担采用新技术的风险。例如，非洲的农业机械化落后于其他区域，而需求却很大，且不断高涨。然而，农民缺乏基本的知识，也不掌握操作和维护机械的技能，贸易法规和海关政策又施加重重限制，再加上基础设施薄弱，机械化的推广举步维艰。¹⁹ 许多非洲国家的基础设施很落后，很难通达城市市场，机械化服务的价格因此居高不下。³⁸ 特别是对只拥有小块土地的小规模生产者而言，⁹ 他们没有投资新技术的积极性。^{19, 39} 改善运输基础设施和道路网络可以降低生产者获取技术、零备件、维修服务和燃料的成本，并促进租赁市场的出现。⁴⁰ 通过改善电力和可再生能源供应，政府可以推动机械化的采用，如太阳能灌溉水泵和用于农产品加工和保存的机械^{19, 41, 42}。

同样，落后的基础设施阻碍了数字自动化技术的采用，特别是在低收入国家。^{30, 31} 在大多数低收入和中等收入国家，包括在前面的一些案例中（例如墨西哥的 Atarraya 和西非的 GARBAL），网络连接和其他必要的基础设施（如电力和数据基础设施）极为落后，甚至根本不存在，一直是妨碍数字自动化推广的主要障碍。就互联网和智能手机而言，农村人口普遍处于弱势，因此很难获得有价值的服务。反之，如果基础设施投资到位，会极大地促进新技术的采用，两个案例（斐济的 TraSeable 和缅甸的 Tun Yat）表明，移动通信技术的快速渗透可以为数字自动化解决方案的推广创造有利环境。³¹

土地权属对新技术的采用也很重要，因为是否拥有土地会影响贷款发放，还会影响生产者对承担风险的态度。农业机械化往往首

先被大型农场采用，大型农场的土地权通常有更好的保障，也更容易获得贷款、农技推广服务和市场商机，大型农场承担风险的能力也更强。⁴³ 全球各地的证据表明，大型农场通常比小型农场更早实现机械化。^{4, 44, 45, 46} 然而，如果能专门为小型农场设计机械化的技术和制度解决方案，农场的规模不一定会成为采用的障碍。巡回式机械化服务就是一个例子，农业机械长途巡回，甚至跨越不同的生态区和国界，供沿途有需要的农民租用，这种模式在许多亚洲国家和一些非洲国家很受欢迎，但很多非洲国家基础设施落后，还存在未决的边界问题，影响了效果。^{4, 19, 47, 48}

现有文献和本报告委托的 27 个案例研究显示，^{30, 31} 立法往往是一个不利因素，对新技术施加各种限制，官僚主义严重，这影响了各种解决方案在低收入和中等收入国家的推广和采用，如无人机、传感器和气象站。在一些中等偏上收入和高收入国家也是如此，例如欧盟和南非对飞行执照有严格的限制（见 Aerobotics），美国对自主机器进行限速，^{31, 49} 一些国家还限制进口无人机和物联网设备（乌干达的 Igara Tea 和北非及西亚的 SOWIT）。立法也会影响特定部门对数字自动化技术的采用，如设施农业下的作物种植和水产养殖。人们普遍认为这样的做法违反自然规律，因此很多部门的公共政策会对其加以限制。例如，欧盟的立法认为不使用化学品的有机食品生产并不属于设施农业的范畴。³¹

制约数字技术采用的其他重要因素包括：缺乏关于数据共享和相关基础设施的政策和立法（西非的 GARBAL），缺乏支持创新（北非的 SOWIT）和公私伙伴关系（哈萨克斯坦的

Egistic)的公共政策、立法和激励措施。而在一个案例中(墨西哥的 Atarraya),受访者认为没有监管反而是件好事,因为监管会导致人浮于事的官僚主义。

在其他案例中,立法被认为是推动新技术采用的主要动力。在大韩民国,ioCrops 案例提供的证据表明,政府投资高科技农业系统,牵头进行试验、示范和能力建设,有助于促进农业数字自动化的普及。在尼泊尔,关于保险的公共政策积极支持数字和自动化解决方案的推广(见 Seed Innovations 案例)。

政府的投资、政策和立法可以发挥重要作用,促进形成一个有利于创新的环境,让所有人都可以获得和使用新技术,并确保新技术有助于实现众所期待的社会目标,如包容性和环境可持续性。许多情况下,公共政策、立法和政府投资是必要的,可以解决私人无法克服的制约因素,第5章将对此进行详细讨论。■

农业自动化的未来发展轨迹：包容性采用和环境可持续性的考量

本节讨论了农业自动化技术在不同类型的国家和农场的未来发展轨迹,分析了可能影响这些技术传播和采用的结构性因素。本节还探讨了实现机械化农业可持续发展的前景。机动机械化在带来种种好处的同时,也带来了一些负面的环境影响,特别是牺牲森林和非洲

热带草原的草场换取更多的农田。⁵⁰此外,本节还讨论了小型农业生产自动化的潜力,以及自动化进一步发展可能会造成的经济和社会影响。

高度机械化农业增强可持续性的前景

在高收入国家,农业已经高度机械化,在低收入和中等收入国家的许多商业化农场上也是如此,这主要是为了应对农业劳动力的稀缺或季节性短缺。为了实现规模经济,机械化主要使用大型机械,然而,证据表明这导致了土壤侵蚀、毁林、温室气体排放增加和生物多样性丧失。⁵¹在许多国家,服务提供商往往使用大型机械,服务对象通常是那些已经清除了地块上的树木和树桩的农场;^{40, 52}但是,清除农场上的树木,再加上机械化导致的种植结构的变化,往往会引发水土流失。⁷此外,重型大型机械造成的土壤侵蚀和退化也会导致产量下降。^{38, 53}大型拖拉机的使用从根本上改变了农村的景观面貌,生产者往往会扩大地块,改变地块的形状,为了生产粮食和发展农业,不惜让农田整齐划一,牺牲生物多样性。^{50, 52}机动机械化也导致作物多样性降低,因为更容易机械化生产的作物会成为首选,如小麦、玉米和水稻。⁴遗憾的是,农民往往不会采用增强生物多样性的做法,如生态农业、间作和轮作,因为这些做法非常耗费人力。⁵⁴机械化往往导致专业化程度提高,种植结构变得越来越单一,这可能会破坏农业生产者的韧性。⁵⁵

为了应对这些挑战,机动机械化亟需创新,开发小型的轻便机械,从而减少土壤压实并减轻对环境的负面影响,因地制宜的自动化契合

插文 16 使用采摘机器人解决草莓农场的劳动力短缺

自动化采摘机可以自动采摘、检查、清洗和包装作物。美国开发了 Harvest CROO Robotics，通过机器人采摘解决草莓行业劳动力短缺的问题。每台采摘机有 16 个独立工作的机器人，它们在农场中巡视，检查草莓的质量和成熟度，然后进行采摘、清洗和包装。因此，这项技术完全取代了诊断、决策和执行中的人力。

Harvest CROO Robotics 是美国目前为数不多的草莓采摘解决方案之一，吸引了全美约 70%

资料来源：Ceccarelli 等人，2022。³¹

的草莓种植者（通常是大规模种植者）的投资，以解决劳动力缺乏和成本的问题。采摘机采用先使用后付费的模式，种植者根据草莓的采摘量付费。

这项技术得以大规模采用后，计划组建一支可以从操作中心远程控制的采摘机机队，除了采摘、检查、清洗和包装外，还可以收集数据与种植者分享。

当地农业生产的规模，可以减少这些负面影响。由可再生能源驱动的自主机器人可以减少化学制剂的使用、能源的消耗和温室气体的排放。⁵⁶ 开展应用技术和农艺研究，有助于找到最适合当地农业生态条件的机械化解方案。政府还可以制定政策，推广经过验证的更加环保的机械和设备。^{38, 40}

生态农业使用松土机或直接播种机代替犁铧，可以减少土壤侵蚀。结合作物轮作和永久土壤覆盖，这些尽量避免扰动土壤的做法可将土壤侵蚀降低 99%。⁵⁷ 生态农业似乎是农业的一大发展方向，但需要因地制宜的解决方案才能避免相应的阻力。⁵⁸ 在此背景下，2019 年 5 月，联合国可持续农业机械化中心（联合国亚洲及太平洋经济社会委员会下设的区域性机构）和在柬埔寨的各合作伙伴共同举办了关于适用于生态农业机械化的区域培训。⁵⁹

向可再生能源过渡不仅是保护环境的要求，也是企业财务的要求。加纳的 TROTRO Tractor 和缅甸的 Tun Yat 的案例表明，燃料价格的上涨和波动是妨碍新技术采用的重要障碍（见附件 1）。可再生能源也为沿着价值链推动自动化提供了新的契机，对偏远农村地区可能特别有吸引力。⁶⁰ 然而，当前可用的可再生能源并不足以保证所有的农业操作都能高效运行，比如电力并不适合动力密集型的整地作业。需要开展研究，筛选出适当的离网可再生能源解决方案，最有效地为价值链上的各类机械提供动力。⁵¹

第 2 章表明，解决劳动力短缺，提高效率，增强应对气候冲击和压力的韧性，这些诉求正在推动高度机械化的农场采用数字自动化和人工智能机器人。证据表明这些技术对环境有益，并可用于进一步引领未来的创新。然而，鉴于数据有限，以及许多解决方案仍处于开发和商业化的早期阶段（见图 6），无法对其潜在的好

插文 17 机动机械化对妇女的商业价值：来自尼泊尔的证据

机动机械化可以通过三种方式为女性赋能，满足她们的需求。妇女可以是：（1）机械化服务的客户，机械化减少了繁重的农业劳动，让妇女可以腾出时间休息或从事其他社会或经济活动；（2）机械和设备的操作员或租赁企业的雇员，她们可以利用自己的技能赚取收入；（3）创立和运营农业机械租赁业务的企业家，向其他农民提供机械化服务并创造收入。

粮农组织最近发布了一份报告，汇总了尼泊尔可用于作物种植和收获后作业的机械设备的信 息，这些都是经过了市场检验行之有效的机械设备。此举是为了促进和支持妇女作为操作员和管理 人员参与农业机动机械化。妇女采用的机动设备包括：

- 几种类型和尺寸的动力除草机，可以对蔬菜、玉

米和甘蔗等宽行距作物进行除草和行间种植。报道称，与人工劳动相比，一台动力除草机可以清除大片土地上的杂草。来自当区种植玉米的女农民称，通过使用大功率除草机，她们省去了人工除草的费用，每比嘎（相当于 0.66 公顷的面积）可以节省 10000 卢比（84 美元）。

- 移动式脱粒机是一种发动机驱动的机械，用于成捆的水稻或小麦，可以让人摆脱手工脱粒的苦差，不仅节省了时间，而且大大增加了脱粒的谷物量（比手工脱粒多 8-10 倍）。脱粒机效率很高，农民可以购置脱粒机以个人的身份提供脱粒服务，农机租赁中心也可以对外出租脱粒机。
- 玉米剥粒机用于从穗轴上把玉米粒剥离，可以让人摆脱手工剥玉米的枯燥和疼痛，节省了时间，并大大增加了单位时间内脱粒的谷物量（比手工脱粒快 30-40 倍）。脱粒后的玉米去掉了玉米棒，节省了空间，更容易储存。

资料来源：Justice、Flores Rojas 和 Basnyat, 2022。⁶⁶

处一概而论。随着这些技术在世界范围内得到进一步开发和更广泛的采用，包括通过共享或租赁服务，采用范围可能会扩大到小农户。³¹

在高收入国家，机器人正在取代人的体力劳动，从事灌溉、侦察虫害、收获、除草和水果选摘。例如，在一个案例（Harvest CROO Robotics）中，服务提供商指出，美国已经有 70% 的草莓生产者购买了其开发的草莓收获机器人技术（见插文 16）。机器人技术如果能减少或避免杀虫剂和除草剂的使用，将会给环境带来好处。自主作物机器人可以节省劳动力，改善作业时间，优化投入品的用量，减少土壤压

实，小型集群机器人减少土壤压实的效果尤为明显。根据对 18 项研究的分析，在特定情况下，用自主作物机器人进行采摘、播种和除草具有经济可行性。^{61, 62, 63} 集群机器人用于小型不规则田地具有明显的成本优势。⁶⁴ 政策制定者和生产者需要更清楚地认识到这些好处，以便增加对相关技术开发的投资。

自动化对未机械化或机械化程度很低的小规模农业的潜在好处

小规模农业生产者彼此不尽相同，有些可能已经高度商业化并采用了现代技术，包括机

动机械化,而有些则仅仅使用最简单的工具勉强自给自足。但总体而言,他们都严重依赖家庭劳动力,哪怕已经采用了机械化,也仅仅是对部分农场作业的机械化。在许多地方,扩大机械租赁市场可以让小规模生产者受益。租赁市场往往主要提供大型机械,这些机械在国内和跨越国境巡回,覆盖各种农业生态区。为了利用这样的农机服务,生产者不得不调整自己的农场和生产方式,向大规模农业生产靠拢。因此,迫切需要开发量身定制的机械化方案,首先解决机械化过去造成的负面影响,其次促进机械化的推广,从而以可持续的方式提高生产力。

小型机械更适合小规模农业

两轮拖拉机和小型四轮拖拉机等技术是亚洲提高其机械化水平的关键。^{2, 19, 20} 两轮拖拉机的经济效益可能更好,更适合小型农场。两轮拖拉机可以绕开树桩和石头,不需要大刀阔斧地清理场地,从而最大限度地减少了生物多样性的损失。两轮拖拉机也更容易操作、维护和修理,更容易申请到小额贷款。^{22, 65} 同样的道理也适用于其他各种小型农业机动机器,使用这些机器不需要大规模改造或清理场地,更有利于生物多样性。此外,小型机械也有可能促进性别平等(见**插文 17** 尼泊尔妇女使用小型机动机器的成功案例),通过节省劳动力和资源提升妇女地位。

数字自动化技术好处多多,但小规模农业采用数字自动化面临重重挑战

关于低收入和中等偏下收入国家实施精准农业的研究越来越多,深刻表明必须挖掘数字自动化技术用于小规模农业的潜力。^{67, 68, 69} 为

了推动数字自动化技术的采用,一些服务提供商表示愿意向小规模生产者提供免费咨询服务,其商业模式是通过出售从农民那里收集的数据赚取收入。³¹ 这种模式有可能带来发令人鼓舞的变化,但前提是必须符合关于数据共享和隐私的标准。此外,相邻的农民往往倾向于种植同样的作物,以分摊无人机咨询服务的费用(例如在布基那法索⁷⁰、加纳⁷¹和卢旺达⁷²)。

数字技术有力地推动了面向小规模生产者的农业咨询业务。³⁰ 在低收入国家,自成一体的数字工具因为成本较低,是部署得最多的数字解决方案,但其对生产力和环境可持续性的影响基本上还没有定论。此外,现有数据仍然很匮乏,还不足以生成小规模生产者所需的个性化建议。此外,用户数字技能低下导致数字解决方案难以推广,数字鸿沟仍然触目惊心,妇女和其他弱势群体往往与数字解决方案无缘。许多国家缺乏数据隐私和保护的立法,这也是一个新问题,可能导致第三方滥用数据。⁷³

关于使用无人机在小型农场施用化肥和化学制剂等投入品也有相应的研究,其中包括非洲。^{74, 75} 商业化应用已经起步,但大多数解决方案都是基于地图的应用,几乎没有自主决策的能力。通过无人机施用投入品有许多优势,包括提高精确性,减少农药暴露,在普通机械无法企及的场地中作业(因为场地过于潮湿或地形崎岖),避免机械移动对直立作物造成损害。采用无人机的经济效益取决于设备成本、施用的效果、点施模式节约的投入品,以及避免地面机械对作物的破坏而挽救的产量。小规模农业生产者通常自己并不拥有无人机,因此是否有无人机可供租赁,租金是否合理,这对于他们很重要。使用无人机也带来了许多技术

挑战，例如如何重新填充喷雾罐、肥料箱或种子料斗，如何给电池充电，局部施用如何根据不同片区使用不同的农药，如何培训用户，以及如何预防偏航进入非目标区域。克服这些问题需要相应的技术能力和机构能力，而对许多低收入和中等收入国家来说，这又构成了一个重大挑战。⁷⁶

妨碍小规模生产者采用数字自动化的因素之一是成本，因此改进技术、调整规模和开发创新的商业模式尤为重要，这有助于降低用户的经济负担。计算机和智能手机这样的设备原来高不可攀，但一旦大量生产，价格就大幅度下降，可以在精准农业中广泛使用。³¹ 一些地方的农业生产面临缺水的挑战，马里有一个自动化温室的成功案例，用计算机控制灌溉和农药施用，表明数字自动化可以提高水和农药的使用效率。⁷⁷

精准畜牧业

精准畜牧业的解决方案主要应用于高收入国家的集约化生产系统，通过传感器监测动物的健康、繁殖和行为。为了提高产品质量，电子标签和区块链越来越多地被用于对大型农场销售的牲畜进行追踪。²⁹ 然而，对于低收入国家的绝大多数畜牧业生产者来说，这样的先进技术仍然过于昂贵，在这些国家，精准畜牧业解决方案更多地体现为虚拟围栏系统，通过音频警报、电击或其他提示，将牲畜限制在一定范围内，这有助于减少繁重的劳动和对劳动力的需求，改善动物繁殖管理，促进信息收集和集约管理，实体围栏也因此有可能变得可有可无。此外，全球卫星导航系统可以帮助生产者确定动物在大型开放牧场上的位置，还可以与传感

器相连，监测动物体温、运动轨迹及其他与健康 and 生殖状态有关的指标。然而，目前对于大面积牧场来说，对每只动物都使用全球卫星导航系统的成本过于高昂。与用于种植业的解决方案一样，这些畜牧业解决方案需要重新设计，以降低成本和实现批量生产，并需要开发创新的商业模式，使这些技术可用于低收入国家的大型畜牧业生产系统。²⁹ 开发应用程序，用于访问牲畜管理的相关信息，这是发展精准畜牧业极具潜力的领域。⁷⁸ 来自肯尼亚的经验表明，牧民越来越多地使用这种应用程序来了解草原的状态，并相应地带着畜群四处移动以找到足够的饲草。⁷⁹ 基于卫星数据的应用程序可以帮助发现和报告动物疾病，使牧民和养殖户能够迅速采取有针对性的措施。⁷⁸

通过资产共享实现机械化

数字工具也可以有力地支持资产共享，帮助小规模生产者实现农业机械化。例如，类似于优步的共享出行模式，利用全球卫星导航系统跟踪农业机械，再配合车队管理软件，有望大幅降低小规模生产者与机械租赁公司之间的交易成本，并能让机械主人对机械使用情况进行监督。²⁹ 这方面的案例包括非洲的 TROTRO Tractor 和亚洲的 Tun Yat。当然这些解决方案仍面临着各种挑战，如道路破败和网络连接时断时续。需求的季节性也是一个问题，在特定时期会供不应求。租赁公司正在考虑利用制度创新来克服这一系列挑战，例如通过中介预订将小农户聚在一起，降低与农民打交道的交易成本，并避免机械闲置。⁸⁰ 资产共享有可能逐步推动全球卫星导航系统的采用，实现精确定位和对机械的高度掌控，也有可能推动可变速率技术用于中低收入国家的精准农业。问题

插文 18 低成本自主作物机器人的前景

对于小规模生产者来说，小型轮式自主作物机器人值得关注，这种机器人可以播种、除草和收割，价格与一辆摩托车相当（500–1000美元），而低收入国家许多农业家庭都拥有摩托车，因此容易接受这个价格水平。腿式机器人因为可以跨越各种障碍，在田地中也很有用，但是价格要贵得多。自主作物机器人有通过人工智能进行学习的能力，有可能大幅度提高粮食产量，甚至远远超过当前的产量极限。然而，如果为每种作物和特定的农业生态条件专门生产机器人，成本会过于高昂，而且产量也上不去。因此，更为合理的商业模式似乎是，制造商生产一种通用的自主机器，并配备一系列适合不同任务的工具，其中一些工具可以由各地自行制造。自主机器可以安装全球卫星导航系统，从而能够通过绘图体现各种信息，例如土壤颜色、基于锄地所需力量的土壤硬度、单产数据。自主机器人可以使用各种能源作为动力，例如化石燃料、太阳能和甲烷。农民可能会因为自主机器人高昂的价格而望而却步，尤其是在早期阶段，为此，自主机

资料来源：Lowenberg-DeBoer, 2022。²⁹

器人可以对外出租，或者按次向农场收取服务费。

有了通用的自主作物机器人，各种各样的数字自动化也成为可能。例如，通过结合作物传感器，自主机器人可以利用先前记录的土壤、植物和产量图，确定肥料需求，⁸⁴并识别害虫、疾病和杂草，根据需要施用杀虫剂、杀真菌剂或除草剂。

虽然对小规模生产者来说，实现数字自动化是一项挑战，但与此同时，数量庞大的生产者意味着巨大的商机和诱人的新市场。在非洲和南亚，密封储粮技术的研究、开发和商业化历程可以给我们提供一些启示。⁸⁵在普渡大学推出改进作物储藏袋之前，制造商认为小规模生产者没有购买力，不愿意投资为他们开发粮食储藏的新技术。后来，普渡大学发明的改进作物储藏袋畅销30多个国家，销量已数百万计，原来对此不屑一顾的制造商纷纷效仿，加入到竞争的行列中。

在于，在大型机械上使用全球卫星导航系统，要求场地必须是方正的，而许多小规模生产者的土地往往并不规整。

人工智能机器人

为高收入国家的农场设计的机器人通常并不适合低收入和中等收入国家。在这些国家，农业仍然以小规模生产者为主，主要依靠家庭

劳动力手工完成各项操作。例如，高收入国家的自动棉花采摘机效率很高，但只适用于同时成熟的棉花，因为机器在采摘时会损毁棉花植株。这种解决方案并不适合印度或西非的传统农场，当地的棉花品质很高，但分批开花，开花季持续约150–160天，期间需要进行三到四次采摘。³¹

高昂的成本是采用机器人的另一个障碍，特别是对于低收入和中等收入国家的小规模

生产者而言，这些国家采用机器人解决方案的例子非常少。在这些国家，传统种植的作物和相应的种植方式都以手工劳动作为前提，体现了当地的条件和制约因素，现有的农业结构无需进行大幅调整，甚至完全不需要调整。社会经济因素可能是推动采用机器人技术的动力，其中劳动力季节性短缺是一个突出因素。其他因素也在发挥作用，例如人们有了更好的受教育机会，农村人口流向城市，社会认为体力劳动低人一等，政府向失业人口发放救济金，这些都会导致人们对低收入体力工作逐渐失去兴趣。^{73, 81, 82, 83}

文献表明，根据低收入和中等收入国家的国情专门设计的自主机器人可以带来以下好处：

(1) 减少对人力的需求；(2) 降低成本和支持小规模经营，确保使用传统机械化的小型农场也能使用机器人；(3) 在形状不规则的田地中高性价比地使用机器人，避免传统机械化导致农村景观变得单调和整齐划一。遗憾的是，目前还没有对这些国家投资机器人技术的可行性分析，无法论证这些技术的商业价值，²⁹ 原因之一是开发机器人解决方案的企业往往是小型企业，面临大企业的竞争，很难吸引或留住能够进行这种分析的人才。³¹ 插文 18 展示了为小规模生产者开发机器人的潜在机遇和挑战。

数字自动化技术对农业的其他影响

农业技术的经济、社会和环境的影响往往远远超出农场本身的收益和成本。例如，农业机械化往往导致农场规模扩大，田地形状发生改变和农村人口减少。如前所述，应对高度机械化农业造成的环境问题，数字自动化技术极具潜力。如果能做到因地制宜，特别是与经

过改造的机动机械相结合，数字自动化在小规模农业中也有巨大的潜力。展望未来，如果本章讨论的数字自动化技术（包括机器人和人工智能）能得到很好的开发和广泛采用，可能会产生极为广泛的积极影响，包括以下内容：

- **农场结构：**小型集群机器人不受制于农场经营规模，生产者不必扩大农场规模，从而避免扰乱社会组织结构和破坏环境。小型集群机器人可以减少繁重的劳动，提高经济效益，提升农业作为高科技产业的形象，让年轻人愿意留在农村，并吸引其他部门的工人投身农业（详见第 4 章关于青年的内容）。机械化农业导致了形状不规则的小块农田被荒废，集群机器人可以实现对这些荒废土地的商业利用，这些土地通常土质良好，降雨充沛，邻近市场。集群机器人有助于提高这类农田的经济收益，从而降低政府对小规模农场进行补贴的经费开支。此外，小型农场和仍然依赖畜力牵引的大型农场都有可能跳过机动机械化，直接采用数字自动化，无需改变农村景观，从而保持丰富的生物多样性。
- **农业设备市场结构：**确保中小型农业（包括种植业、畜牧业和水产养殖业）获得各种数字自动化技术，可能会导致相关设备市场发生结构性的变化，有技术能力的创业者因此会迎来商机，开发价格合理和性能可靠的自主机器人和设备，并结合创新的商业模式推向市场。
- **作物保护作为一个服务项目：**作物保护市场目前主要是依靠销售大量农药。有针对性的喷洒可以减少多达 90% 的农药用量，具有显著的环境效益，而利用机械或激光控制杂草可以完全替代除草剂。²⁹ 这对于地方上的创业者来说是一大商机，他们可以提供标准化

的自主机器来识别杂草和有害生物。这些机器可以按次收取服务费，或者直接卖给农民。

► **更安全、更高效、更有韧性的畜牧业和水产养殖业：**数字自动化可以极大地促进远程作业，最大限度地减少工作负荷，同时改善管理。⁸⁶越来越多的研究表明，数字技术用于水产养殖业极具潜力，可以推动行业商业模式和养殖场实现重大转型。⁸⁷例如，物联网技术可以自动监控水体状况，便于养殖户立即采取行动。⁸⁸在畜牧业中，生物传感器的使用越来越普及。生物传感器可以监控动物个体的健康和行为，让生产者获得实时信息，从而采取有针对性的行动，这可以带来诸多好处，包括减少抗生素的使用。传感器还支持区块链技术，可以保证动物产品从农场到餐桌的可追溯性，在监测疫情和预防相关经济损失与食源性流行病方面极具优势。⁸⁹

随着技术的发展和日益普及，其他的影响也会相继显现。具体会有什么影响取决于多种因素，包括技术特征、网络连接、法律和监管框架、企业和创业者的商业决策、社交媒体上的反响，以及对农业数字自动化的社会态度。政府可以通过建设数字基础设施，制定适当的法律和监管措施，开展研究和教育培训，促进数字自动化的采用，实现正面的效果（见第5章）。■

结论

本章通过证据论证了各种自动化技术的商业价值。农业机动机械化的商业价值已经得到公认，包括减少劳动力使用，提高农业作业的

时效性，减少繁重的劳动，实现农业生产的规模化和集约化，增强应对气候变化和疾病的韧性，从而节省大量成本。此外，机械化有助于解放农户的家庭劳动力，他们可以从农活中腾出时间，从事改善生计的非农工作。

未来十年，在机械化进展缓慢的国家，特别是撒哈拉以南非洲，机械化仍有可能在农业转型中发挥重要作用，但必须审慎评估当地需求，并制定有针对性的战略。不同类型和尺寸的机械可用于不同的地形和农业气候区，满足小规模生产者的需求。小型四轮拖拉机、两轮拖拉机以及众多其他小型机械用于粮食生产和农业，更有利于农业生物多样性，可以在机械化水平低的地区重点推广。

尽管机械化有可观的潜力，但由于结构性因素，如基础设施落后、技术技能低下，商业环境不够给力，世界上仍有很多地方机械化水平偏低。许多地区和社会经济群体仍然与机械化无缘，原因是缺乏资金或受结构性因素的制约，如限制性的政策或落后的基础设施。政策需要支持一般性公共服务，提供公共或集体产品，其中包括开展农业研发并传递知识（如培训和技术援助），以及建设和维护基础设施（如改善农村道路、灌溉系统和仓储）。以这两种公共服务作为切入点，可以在不扭曲市场机制的情况下营造有利于自动化的大环境，而且这两点往往也是论证自动化商业价值的必要条件，特别是在低收入和中等收入国家。⁹⁰

相比之下，数字自动化技术，特别是作物机器人和水产养殖业的数字自动化，仍处于研发和商业化的早期阶段，对农业生产者的经济

影响仍只能靠推测。另一方面，精准畜牧业相对更为成熟，但其应用主要集中在高收入国家。其他技术也在逐步普及，如自成一体的数字解决方案、自主无人机和遥感、使用全球卫星导航系统和可变速率技术的机械化解方案，以及设施农业解决方案。本章分析了来自世界各地的 27 个案例研究，结果显示这些技术对高收入国家和大规模生产者的商业价值已经得到证明。显然，需要进一步收集关于这些技术成本与收益的证据，以判断哪些技术也适用于其他类型的生产条件。

与机械化一样，结构性因素影响了数字自动化技术的商业价值，包括落后的网络连接和电力基础设施、低下的数字技能和对新技术的浅薄认知。文献和案例提供的证据表明，青年农民在家庭农业向数字化和先进自动化转型方面发挥着重要作用。推动数字自动化采用的其他主要因素包括国际市场竞争的加剧、劳动力短缺、以及减少繁重劳动和改善工作条件的诉

求。在一些地方，数字平台帮助妇女获得机械化服务，这有助于克服社会对妇女的偏见，增加女性获得服务的机会（见第 4 章）。

数字工具大幅度降低了交易成本，扩大了机械租赁市场，改变了机械化的格局。此外，一些数字自动化技术有可能扭转之前机械化造成的环境破坏。为了应对破坏环境的问题，机动机械化的创新工作有必要进行调整，以鼓励研发更小巧和轻便的机械，从而减少土壤压实，减轻对环境的负面影响。开展应用技术和农艺研究，有助于发现最适合各地农业生态条件的机械化解方案。

本章还介绍了公共政策、立法、投资和创新的作用，这些方面的工作有助于解决妨碍新技术采用的结构性障碍，并确保干预措施有针对性地解决小规模生产者面临的挑战和环境问题。第 4 章和第 5 章分别对自动化的社会影响和公共政策的作用进行了更深入的讨论。■



肯尼亚

一名从事保护性农业的农民在马库尼县的卡通兹韦尼驾驶拖拉机。

©粮农组织 /Luis Tato

第 4 章

农业自动化的社会经济影响和机遇

要点

- 农业自动化进程可以提高农业和整个农业粮食体系的生产力，并创造新的就业岗位，为青年工人、妇女和残疾人等边缘化群体带来机会。
 - 为了理解农业自动化的所有社会影响，我们必须超越初级生产，看到自动化对整个农业粮食体系的影响。
 - 在工资上涨和劳动力短缺的情况下，自动化对生产者和雇佣工人都有利。特别是，自动化可以帮助小规模农业生产者克服劳动力短缺，从农业中腾出时间从事其他活动，从而改善生活。
 - 另一方面，如果劳动力充足，而且补贴降低了采用自动化的成本，就存在工作岗位被机械取代的风险，农业工人可能会因此失业，尤其是那些贫困的和没有一技之长的人。
 - 包容性的自动化要求采取自下而上的方法，优先提升技能和能力，让妇女、青年以及所有相关利益相关方参与设计技术开发方案，考虑他们的关切、需求和知识水平。
 - 政府不应当实施有增加失业风险的扭曲性补贴，也不应以保护就业和收入为由限制自动化，这样做会降低农业的竞争力和生产力。相反，政府应关注如何创造一个有利的环境，确保妇女、青年、小规模生产者和其他弱势与边缘化群体的充分参与，让自动化惠及所有人。
 - 与此同时，必须解决造成贫困、脆弱性和边缘化的根本原因，以确保自动化不会加剧对最弱势和边缘化群体的排斥。
- 第 2 章和第 3 章研究了机械化和数字自动化技术的趋势和动力，以及对生产力、效

率、韧性和环境可持续性的潜在影响。本章探讨了农业自动化对包容性的影响，具体而言，就是辨别自动化进程中的赢家和输家。本章首先概述了农业粮食体系的特点以及自动化如何影响其中的劳动力，然后讨论了农业自动化对体面就业的影响，以及对参与自动化进程的不同社会经济和人口群体的影响，包括大规模生产者与小规模生产者、无地农民与自营农业工人、妇女和青年。本章进一步指出，农业和结构转型程度不同的国家将承受不同的影响，因此在自动化问题上面临不同的政策挑战。■

通过农业粮食体系的视角分析社会影响

农业生产正在迅速变化，从低收入和中等收入国家采用拖拉机、脱粒机和收割机，到高收入国家采用高科技人工智能解决方案，都体现了农业转型和农业粮食体系持续演变的进程。

了解农业粮食体系的发展动态，对于分析和预测体系中任何节点的自动化效果至关重要，同时要权衡可能的利弊，考虑意料之外的后果。要理解自动化对农业生产、农产品价格、农产品贸易和体面就业的影响，也必须关注上游和下游做出的反应。这一切也取决于农业粮食价值链的类型，如《2021 年粮食及农业状况》¹中所述：

(1) 传统型，主要是小规模自给自足的农业生产；(2) 过渡型，主要是中小型农户从事商业化农业生产；(3) 现代型，主要是大型企业从事商业化农业生产。三种类型的价值链在许多方面都不尽相同，包括对劳动力的需求。把握农业粮食价值链的双向联系对于理解自动化技术的影响至关重要，包括农业粮食体系不同环节

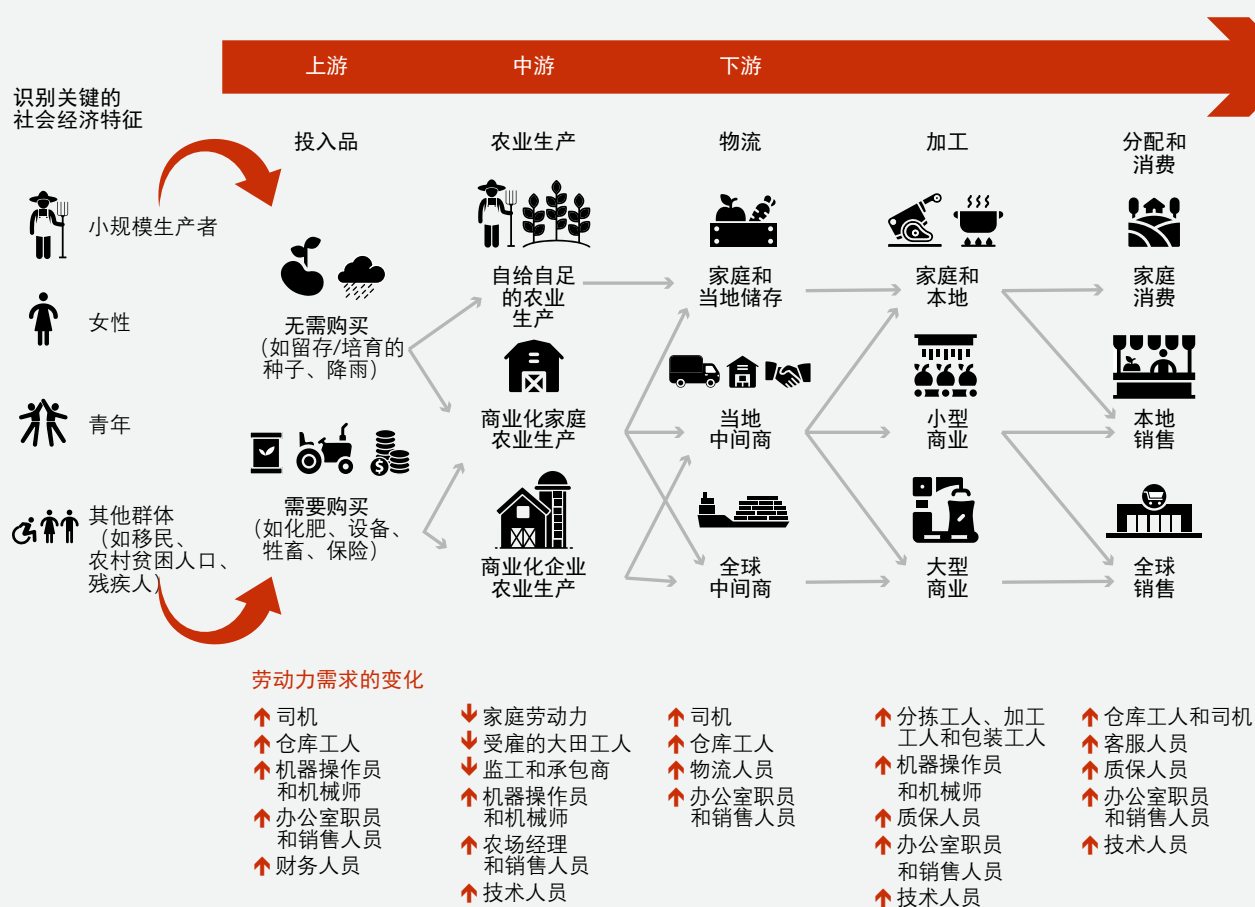
的劳动力需求如何变化，以及工人在这些环节之间转移的可能性。自动化的影响还取决于性别角色、农业工人的类别（例如是迁徙工人还是本地工人，是季节性工人还是非季节性工人）和农业工人的技能水平。

拆解农业粮食体系

图 7 提供了一个概念框架，可用于分析自动化如何影响农业粮食体系各个构成部分的就业问题。框架体现了上述三种典型的农业粮食价值链各自的主要特征，区分了上游、中游和下游市场，并列出了在每个市场开展的主要活动。框架还揭示了不同市场之间的联系，并强调自给自足、家庭商业化和企业商业化三类农业生产者，哪怕从事一样的市场活动，彼此的差异也是十分明显。不同的社会经济和人口群体（图左侧）都被视为是农业粮食体系中的关键主体，其中包括小规模生产者、妇女、青年和其他边缘化群体（如残疾人和移民），而他们往往是最受排斥、最被边缘化和最弱势的群体。农业自动化进程有可能推动实现包容性，通过增加机会、提供生产资料和自然资源、增强权能和能动性，以及尊重人们的权利，确保所有人都能参与自动化进程并从中受益特别是弱势、受排斥和边缘化群体。包容性既是提供更好和更公平的自动化服务的手段，也是自动化的目的，以确保不让任何人掉队。²

图 7 的底部列出了各个市场的主要劳动力类型，用向上和向下的箭头标明自动化技术对每类劳动力需求的影响，需要指出的是，具体的影响取决于具体情况，必须通过实证研究进行验证。虽然自动化技术减少了相应任务的劳动力需求，但同时也催生了需要新型劳动力的

图 7 从农业粮食体系的视角看自动化对就业的影响



资料来源：粮农组织根据 Charlton、Hill 和 Taylor 编制，2022。³

新任务，如设备维护和操作。以图7作为参考点，接下来进一步讨论了农业自动化对包容性的影响。本节探讨了农业粮食体系内各个市场的相互联系，这对于劳动力在农业粮食体系各组成部分之间转移就业有重大影响。

农业生产的类型

农业生产（中游）是核心，包括上述三种类型（见图7）。在自给自足农业生产中，农业生产是家庭谋生的基本策略，农民很少购买投入品，生产的大部分农产品供自己一家人消费。⁴ 自给自足的农业生产在低收入国家尤为

常见,但也同样适用于高收入国家农村地区的小块自留地。⁵ 这种模式的特点是生产的粮食供自己和家人消费,但这并不意味着一定可以生产出家庭所需的所有粮食,事实上,所谓的自给自足往往非常依赖从外界购买粮食。^{6, 7, 8}

在商业化家庭农业生产中,农业生产是家庭创收的基本策略,大多数投入品需要从外界采购,生产出来的农产品在当地、国内和全球市场销售。商业化家庭农场包括高收入和低收入国家的小规模农场,以及高收入国家由家庭拥有和经营的中型和相对大型的农场。

最后,企业化农业生产的主体是大型农业企业,在高收入国家很常见,但也存在于低收入国家,而且往往以种植园和大型庄园的形式出现。⁹

在生产环节,农业粮食体系的活动直接体现为种植业、畜牧业、渔业和水产养殖业,以及林业和农林业。相关操作包括土壤维护和土地整理、种植、除草和植物管理、修剪和收获,以及育种、饲养、日常护理和健康监测。生产环节某些农业任务实现自动化,可以提高产量,并对下游活动产生影响,包括运输、包装、储存、加工和经销,下游活动将需要更多的各类工人,这样才有能力处理增加的产量。

上游和下游活动

上游活动包括为农业生产提供投入品的所有相关活动,总体上包括生产和经销种子、肥料、机械、动物饲料和灌溉设备,以及提供保险、技术援助和资金。对于自给自足的农业而言,投入品无需购买,例如农民可以自己留

种,自己种植作物作为动物饲料,浇水依靠降雨而不是人工灌溉。¹⁰ 对于商业化家庭农场而言,使用的投入品可以购买,也可以自己生产,或两者兼而有之,具体情况取决于其规模、位置和其他特点。在农业粮食体系上游(见图7),农业技术创新通常体现为投入品的进步,例如种子、饲料、肥料和设备机械得到改良或成本降低,其中也包括自动化技术的推广。新技术一旦被采用,农业生产(中游)使用投入品的方式也将随之改变。

下游活动包括收获、屠宰和捕捞后的各项作业,如储存、运输、加工、包装、批发和零售,以及最终的家庭消费和餐饮经营。在自给自足的农业中,这些操作在家庭或村庄内进行。^{11, 12} 在商业化家庭农场中,物流活动可能在家庭或村庄内进行,但也可能会借助当地或全球的中间商。另一方面,大型农业企业则会从不同的地点采购物资,并将其储存在指定的大型仓库中,运输包括海运、空运、铁路和公路等各种形式,经销活动则是向加工企业或批发商供应大宗农产品。自动化技术往往导致中游的农业生产增加产量,这进一步又可能导致下游的扩张、增长和进一步的技术创新。例如,机动番茄采摘机投入使用后,需要加工的番茄的数量激增,这刺激了加工部门的技术创新。¹³ 反过来,下游的创新也会影响对上游和中游产品的需求,进而影响农业生产者对技术的采用。例如,罐装番茄的加工成本降低,可以刺激番茄消费,从而诱导番茄种植者通过采用相关技术(如改良品种、灌溉设备和采摘机)提高番茄产量,满足日益增长的消费需求。

批发商和零售商,包括不太正式的微型企业,以及家庭消费和餐饮业消费,构成了农业

粮食体系的最终节点。批发、零售、餐厅和供餐服务的自动化减少了对劳动力的需求¹⁴，提高了生产力和销售额。¹⁵ 电子商务是全球经销环节最为重大的技术进步，¹⁶ 进一步推动了上游的技术创新，特别是注重可持续性的创新，如更具有可持续性的包装¹⁷，也进一步推动了低收入国家的交通基础设施、物流和互联网服务的改善。^{18, 19, 20} 在印度，电子商务平台激增使农民能够与更广阔的市场建立联系，并卖出更高的价格。²¹ 中国的一些案例研究表明，在农村发展电子商务，可以为全国各地的农村人口和社区创造机会，实现多元化经营，开辟新市场，惠及妇女和青年等弱势群体。²² ■

农业自动化对劳动力的影响

自动化可以通过多种方式影响农业生产和体面就业。在种植业中，自动化使扩大耕作面积或提高每公顷单产成为可能，产量因此得以增加。在畜牧业中，自动化可以提高劳动生产率，工人能够以最少的人工干预完成挤奶或动物饲喂，繁重劳动大幅减少。渔业、水产养殖业和林业（见第2章）的情况也很类似。就林业而言，推动自动化的另一个重要考量是提高工作的安全性。自动化的种种优势有助于大幅度改善劳动力的福利。当自动化用于大规模经济，大规模生产者广泛采用自动化有时会使小规模生产者破产，并加速农业部门的整合。随着对农业劳动力需求的减少，新技术的采用会使一些技能变得可有可无，一些农业工人可能会因为自动化失去工作，而且往往是最贫穷的农业工人首当其冲，他们可能很难再找到其他工

作。必须制定适当的政策和立法，进行相应的投资，以避免、减轻和解决自动化造成的负面社会影响，尤其是要关注自动化对最弱势群体的冲击。

以下章节分析了农业自动化在不同地区对农业粮食体系中就业岗位的影响。本报告从体面农村就业的这一视角出发，探讨了农业自动化的影响，体面就业指的是提供足以谋生的收入且具有合理工作条件的工作。插文 19 介绍了体面就业的标准，用于评估农业自动化技术的影响。

农业自动化对就业的影响很难衡量，因为通常会涉及农业生产各项活动变化，而且上游也会因为对投入品的需求不断变化而发生变化，下游的运输和物流、加工、经销和零售也会发生相应变化。如第1章所述（见图3），随着农业转型的展开，人们离开农业部门去寻找收入更高的工作，农业就业人口的比例持续下降。这一过程会重新塑造整个农业粮食体系的劳动力供求关系，因为粮食和其他农产品的生产、加工和经销都会受到影响。当农业粮食体系中的所有节点或多或少同时发生改变时，很难甚至不可能将社会影响归因于农业自动化的某个具体事件，例如体面就业形势发生的变化，或者是性别关系、青年和小规模生产者处境发生的变化。理解农业粮食体系的转型，是把握自动化的社会影响最基本的一步，特别是对就业的影响。请注意，本章并不涉及采用自动化技术的潜在间接影响，例如对开发和改进技术的科研人员需求增加，也不涉及对整个国民经济的影响，而实际上宏观经济的变化也可能导致重大的社会后果。一系列潜在影响最终

插文 19 从体面就业的角度分析农业自动化

体面农村就业是指农村地区的女性和男性、成年人和青年为了薪酬或盈利而从事的任何活动、职业、工作、商业或服务，²³ 且（1）尊重国际劳工组织各项公约中界定的核心劳工标准（即反对童工和强迫劳动及歧视，并保障谈判自由）；（2）提供足以谋生的收入；（3）确保充分的就业保障和稳定性；（4）采取安全和健康措施；（5）避免工作时间过长；以及（6）促进培训。为了从体面就业的角度分析农业自动化，有必要考察农业自动化对以下方面的影响：

童工。最近一项对七个发展中国家的实证研究表明，拖拉机的使用（以及在印度联合收割机的使用）将使用童工的概率降低了 5%-10%，同时儿童的入学率得以提高。然而，在受教育机会有限的地方，引进农业机械可能只会导致儿童从农业童工转变为非农业童工。²⁴

足以谋生的收入。在某些情况下，自动化可能有助于提高收入、改善生计、增加盈利和创造就业机会。^{25, 26} 例如，在乌干达，移动电话的普及改善了进入市场、获得服务和信息的机会，促进了家庭收入的提高和家庭内部的性别平等。²⁷

职业安全和健康。新技术可以减少繁重的工作，降低健康风险，例如减少除草剂和杀虫剂的使用。²⁸

缩短工作时间。农业自动化节省的时间可以让人们有更多的时间休息和娱乐，也可以使小规模生产者参与非农就业，获得更稳定的收入，并提升生计的韧性。

如何在现实生活中体现出来，这仍然是一个需要实证研究才能回答的问题，也取决于不同国家和社会的具体情况。

图 7 说明了两点。首先，农业自动化可能产生的影响是多方面的，对农业就业的影响也可能是多种多样的。随着许多任务实现自动化，对低技能劳动力（无论是家庭劳动力还是雇佣劳动力）的需求可能会下降。一些任务的自动化可以解决劳动力瓶颈问题，通过扩张规模或集约化增加产量。自动化也可能会增加对熟练工人的需求，以操作和维护新技术。第二，就农业自动化对体面就业的影响而言，整个农业粮食体系与个别农业经营区受到的影响可能大不相同。自动化往往会减少农场上低收入的季节性

工作，但往往也会增加上游和下游的高收入非季节性就业岗位。收入较高且不受季节影响的就业机会增加，的确会产生积极的社会影响，但问题在于这是否足以抵消低收入季节性工人就业机会减少带来的负面影响，后者是否有可能另谋出路。

就业的季节性是全球农业都面临的一个问题。种植业和畜牧业天然具有季节性，这意味着在某些季节，失业率和半失业率会很高，而在其他季节则可能出现严重的劳动力短缺。对于农业生产者来说，在关键时期（如作物收获期和牲畜剪毛期）无法获得劳动力，可能会对农场经营产生严重影响，可能导致经济损失，甚至导致放弃农业生产。理论上，在某些季节

有助于缓解劳动力紧张的自动化可以在其他季节维持就业水平。这也提出了一个重要的问题，在哪个季节哪些种植任务最容易自动化，是否恰逢农场劳动力短缺？反过来说，一旦农业企业启动自动化，贫穷和没有一技之长的工人变得冗余，失业会对他们造成什么影响？哪些政策可以确保自动化进程不仅提高生产力和效率，也可以实现可持续性和包容性？

对于劳动力最密集的作物（主要是水果和蔬菜），需要在劳动力最紧张的季节完成的任务往往最难以自动化，因为机械可能会造成植物或水果破损。一个现象很能说明问题，在高收入国家的农业区，农场工资相对较高，自动化解决方案也最为普及。在美国加利福尼亚州，土地整理普遍实现了机械化，包括犁地、翻土和平整土地。作为原材料的作物（如西红柿或酿酒葡萄）采摘也实现了自动化。然而，采摘供最终直接消费的新鲜水果和蔬菜仍然依赖于人工，自动化难度要大得多。但是在采摘工人短缺和工资快速上涨的刺激下，农产品采摘机器人呼之欲出。

这些新的就业机会包括各个工种，驾驶员、库房工人、机器操作员和机械师并不需要接受正规教育，但就薪酬水平、工作稳定程度和技能要求而言，他们的情况各不相同。^{29, 30} 这些工作也可能是季节性的，尤其是在小型加工企业，但大型商业化加工企业提供的工作往往是稳定的。不管怎样，这些岗位都没有农业生产岗位的季节性强，而且这些工作大多数由男性承担。^{31, 32} 办公室职员、销售人员和专业技术人员往往需要具备更正规的教育和培训背景，并拥有一定的从业经验，他们的收入也更高，其中女性雇员的比例通常也较高。³³

对小规模和自给自足生产者的影响

对劳动力需求的影响取决于工作和生产类型。自给自足的生产者使用家庭劳动力从事农业生产。³⁴ 在多民族玻利维亚国，高达 83% 的小规模生产者是贫困人口，而全国平均贫困率约为 61%。在埃塞俄比亚，30% 的人口生活在国家贫困线以下，而小规模生产者的贫困人口比例为 48%。在越南，一半以上的小规模生产者是贫困人口，而在整个国家只有大约 20% 的人生活在贫困线以下。这种情况说明，从事农业的人贫困率较高，至少一部分原因是生产力低下，因为他们从事的是自给自足或半自给自足的农业，只能勉强维持生存。如果采用自动化，他们有可能通过扩大生产规模来提高生产力，改善收入和生计，甚至有可能发展成为商业化家庭农场。例如，赞比亚的家庭小农场获得拖拉机后，生产者的收入增加了一倍多，主要通过扩大耕种面积和施用更多的投入品（主要是化肥）把产量提高了 25%。³⁵ 采用自动化可以让农民腾出时间从事其他活动，农村儿童也可以去学校接受教育，为家庭带来长远的经济效益。自动化还可以让家庭成员有可能在非农部门找到工作。

农业自动化还可以让生产者进入利润更高的市场，自动化有助于保证产品质量和产量的稳定，农户因此可以与超市或外国买家签订购销合同。参与这种高利润的市场可以极大地改善农业家庭的生活。在肯尼亚，小菜农通过与超市签订供货合同使家庭收入增加了 40% 以上，贫困家庭的各项多维贫困指标大幅下降。³⁶ 向超市供货的农户的卡路里、维生素 A、铁和锌的摄入量也明显增加。³⁷

插文 20 甘蔗机械化收割对巴西劳动力的影响

为了保护环境，巴西制定了一系列法律法规，从 2020 年起禁止在收割前焚烧甘蔗林，这终结了人工收割，因为焚烧是人工收割前的一道必要工序。甘蔗种植者因此加大了对机械化收割技术的投资。这些立法减少了污染，带来了环境效益，也提高了生产力。但据测算，甘蔗生产对劳动力

的需求也减少了 52%-64%，资质最低的工人（教育程度不足三年）受到的影响最为严重，而对熟练劳动力的需求预计将会增加。这种就业格局的变化要求政府立即采取行动，保护最弱势群体免受自动化的负面影响。

资料来源：Guilhoto 等人，2002。³⁹

即使在劳动力相对丰富、生育率较高的非洲其他地区，也有证据显示，农业劳动力的短缺限制了农业生产。因此，自动化为提高生产力和家庭收入带来了希望。研究东部和南部非洲四个国家的农场数据，可以发现目前非洲致力于实现农业机械化的确有其道理，因为在抑制非洲农业生产力的各种因素中，劳动力和农业所需的其他动力不足似乎是一个主要因素。³⁸

农业自动化的许多潜在好处既不是立竿见影的，也不是理所当然的。小规模生产者和自给自足的农民缺乏管理经验和技术能力，很难把握住农业自动化带来的机遇。他们还需要调整和创新商业模式，以符合当前市场的要求和标准。这突出了能力建设和建立有效的农村咨询服务体系的重要性，这可以帮助他们及时获得技术信息和了解市场行情（见第 5 章）。

对大中型商业化生产的影响

商业化家庭农场是农户自己的产业，由家庭劳动力经营，但也可能使用雇佣劳动力（如

雇佣大田短工、监工和承包商）。自动化可以减少对这三类劳动力的需求，也可以促使生产者扩大经营规模，如果生产者选择将家庭农业扩张为农业企业，家庭劳动力很可能被雇佣的专业人员取代，包括农场经理、销售人员、机器操作员和维护人员。工资上涨和劳动力短缺在现实生活中屡见不鲜，这将刺激新技术的采用。农业自动化可以提高劳动生产率和雇佣工人的工资，生产者和雇佣工人的福利将得到改善。然而，自动化也会让工人失业，特别是贫穷和没有技能的工人，他们将被迫去寻找其他工作，这可能会压低非熟练工人的工资水平，因为他们没有一技之长，很难找到其他工作（见插文 20）。另一种可能性是，商业化农场采用新技术直接导致小农场不断被兼并，也就是所谓的行业整合，自给自足的农业生产销声匿迹。在这些情况下，政策、立法和投资必须到位，以确保自给自足的小规模生产者和低技能工人不会被自动化淘汰，必需让农业自动化也惠及他们。在过渡期间，往往有必要提供有针对性的社会保护和培训。

插图 21 自动化与农村移民输出社区：加利福尼亚的案例

随着作物产量的增加，而国内农场劳动力的供应减少，一些国家将外国移民作为新的农场劳动力来源。例如，在美国加利福尼亚州，90%以上的农业劳动力是外国移民。在当今的高收入国家，依赖外国农场工人是一个普遍现象。自动化似乎会对移民输出社区产生负面影响。然而，加州的农业自动化并不是在真空中发生的。墨西哥是加州大多数外国移民的祖国，而墨西哥的生育率逐年下降，入学率也大幅提升，非农就业机会日益增加，国内农村劳动力的供应日益萎缩。墨西哥农村地区大力兴建中学，男童和女童在上完小学后可以继续学业，无须进入农场务工，这一切都加快了墨西哥的农业转型。事实上，受教育程度较高的人更有

可能在非农部门工作，即使他们移民到国外也是如此。⁴⁴ 因此，加州的农业劳动力供应大幅下降，2008–2018年间，农业工资的增速比非农部门快18%。

在来自墨西哥的农业劳动力供应下降之前的1990年代，加州几乎没有任何动力采用和开发节省劳动力的新技术。如今在美墨两国，自动化进程和农业劳动力日益减少的趋势在相互角力。自动化进程通常始于劳动最为密集和最容易自动化的操作，但随着更为先进的解决方案的开发和商业化，特别是在美国，更为复杂的操作也纷纷开始自动化，如水果和蔬菜的采摘。

资料来源：Charlton、Hill 和 Taylor, 2022;³ Taylor 和 Charlton, 2018。⁴⁵

商业化的大型农业企业会雇用各种类型的劳动力，家庭劳动力除外。这些农场技术最为先进，自动化程度通常很高。这些农场拥有庞大的规模经济和充裕的资本，也愿意进一步投资机器人技术，从而大幅减少对劳动力的需求，这可能对工人（尤其是低技能工人）产生负面影响。农场所需的劳动力类型可能也会发生改变，例如实施数字自动化后，拖拉机驾驶员转岗成为自主作物集群机器人的监控员，或者接受再培训后成为维修员。然而，对于大多数农场来说，机器人往往并不具有经济可行性，除非劳动力极度短缺。例如，虽然机器人挤奶技术几十年前就投入商业使用，但美国很少有奶牛场采用这种技术，因为奶牛场的劳动力相对来说仍然比较便宜。⁴⁰ 相比之下，西欧自1990年代就开始推广商业挤奶机器人。

总体而言，在劳动力并不短缺的地方，自动化技术的成本可能因为政府补贴等人为因素降低，在这种情况下，采用自动化有取代工人和造成失业的风险。被自动化取而代之的农场工人会陷入困境，受影响的程度总体上取决于他们能否在上游或下游产生的新工作岗位上找到工作（见图7）。另一方面，随着工资上涨和对紧缺劳动力的竞争日益加剧，农业技术的采用有可能提高工资和总体生产力，使生产者和雇佣工人都从中受益。

高收入国家或高收入地区的农场实施自动化，可能会冲击外来的农业务工人员，他们可能会失业，无法继续向祖国或故乡汇款。如果对没有技能的移民工人需求减少，他们的祖国或故乡的失业水平可能因此上升，汇款收入也

可能会减少。⁴¹ 在巴西，咖啡豆采摘实现自动化后，对非熟练工人的需求大大降低，他们主要是来自巴西贫困地区的国内移民，但同时对高技能工人的需求又有所上升。⁴² 出现这种情况后，需要立即采取包容性的社会政策，帮助这些失业的非熟练工人找到其他工作。

在移民输出地区，农业劳动力逐渐减少，工资逐渐上涨，而这种现象似乎通常会伴随自动化出现。插文 21 的案例表明，墨西哥移民输出社区的劳动力日益短缺，推动了美国的农业自动化。美国的另一项研究发现，温室自动化增加了园艺企业的总收入，这些企业因而能用更高的工资挽留移民工人长期工作，同时减少雇佣不熟练的新手。⁴³ ■

农业自动化带来了创业和转型的新机会，也影响着营养状况和消费者

农业自动化的新进展可以创造新的创业机会，有机农业和芳香、药用和营养成分的高价值植物就是很好的例子。自动化也有助于富含营养的古老品种的复兴，而这些品种往往难以机械化生产。一些高收入国家已经开始行动了。2018 年，法国使用了 150 个机器人为有机蔬菜和甜菜除草。⁴⁶ 在劳动力成本高昂的地区，有机农业或生物动力农业的发展受到制约，使用自主除草机控制杂草，并使用人工智能识别植物疾病，可以快速扩大有机农业的生产规模，从而大幅降低有机农产品的价格。这对于那些

青睐有机农产品但又囊中羞涩的消费者来说是个好消息。⁴⁷

另一个例子是玉米。随着玉米生产的机械化，为了便于机械收割，杂交玉米的穗经过培育具有大约相同的高度，然而杂交育种导致玉米丢失了一部分营养成分和风味。现在这些性状有可能失而复得，因为具有人工智能的自主机器能够收割更美味和更有营养的传统玉米品种，哪怕传统品种的穗高度各异。同样，番茄采摘的机械化要求品种成熟均匀，但这一要求会导致营养价值和风味的损失，用自主机器进行选择采摘可以使风味浓郁的传统品种实现商业化生产。⁴⁷

除了上面提到的创业机会，自动化可以给消费者带来诸多好处，因为自动化有可能实现粮食的低成本生产。从消费者的角度来看，自动化的主要风险是引发食品行业的集中，少数大企业占据主导地位后，可以设定垄断价格，损害消费者利益，并故意降低产量以维持高价。另一方面，大型企业享有规模经济，相较于较小的竞争对手，能够以更低的成本生产商品，如果能避免过度集中和垄断的问题，与由众多小生产者组成的完全竞争市场相比，大型企业的存在有利于提升消费者的福利。在美国的大洛杉矶地区，与小型食品零售商不同，大型超市并不会因市场集中或占有很高市场份额而随意提高食品价格。超市之间的竞争使垄断价格无法达成，因此消费者能受益于规模经济带来的效率提升，享受更低的价格。⁴⁸ 促进市场竞争的政策对于限制企业合并和保护消费者利益极为重要。³

还存在另一种风险，如果自动化技术要求一定的规模，小型生产者和加工者可能会因为

不具备保持竞争力的规模经济，被排挤出市场，但这并不一定是在农业中采用数字自动化的必然结果。为了避免发生这种情况，需要普及低成本（即规模可大可小）和高效的数字自动化技术，让其变得像手机一样随手可得。一旦有了合适的数字基础设施以及法律、监管和社会环境，集约化但又可持续的农业生产就会成为可能，这将推动农村经济的可持续发展。农业自动化是福是祸，取决于一个国家如何妥善管理转型的进程，在中低收入国家尤其如此。那些建立了必要的实体、经济、法律和社会基础设施的国家必将从数字自动化中受益。而忽视这一挑战的国家可能会错失良机，一方面会丧失现有的低工资农业体力劳动岗位，另一方面又与自动化带来的高工资农业就业岗位无缘。历史表明，国际合作对做好转型的准备至关重要，认识到机会所在并愿意采取相应行动的政治意愿也同样重要。^{3, 47, 49} ■

农业自动化进程的包容性

本报告认为，农业自动化既是一个机会，也是一种责任，可以将那些在农业粮食体系中谋生的弱势群体及被排斥和边缘化的人纳入其中，其中包括小农户、牧民、小渔民、林业工人和林业社区、农业雇佣工人、非正规微型企业及工人、没有土地的人和移民。²

他们生产了大量的粮食，是自然资源和生物多样性的看护人。然而，他们一直被边缘化，很难公平地获得资源。他们没有土地权，也无法参与政策和决策的制定过程。在气候变化和

极端气候事件中，他们首当其冲受到影响。他们往往缺乏安全和有营养的食物，没有资源，无法进入市场，享受不到最基本的公共和社会服务、基础设施、工具技术和社会保障，经济创收的机会更是与他们无缘。² 解决这些人面临的重重障碍和制约因素，对于实现农业自动化进程的包容性至关重要，这将促进可持续、有韧性和多产高效的小规模农业。

农业自动化进程应该关注贫困和极端贫困，因为上述各个群体都深陷其中。每五个生活在国际贫困线以下的人中，就有四个是农村地区的居民，完全或部分依靠农业粮食体系维持生计。⁵⁰ 对于大多数农村贫困人口而言，他们的利益遭到侵害，个人和集体的基本人权被剥夺。法律框架可以发挥重要作用，确保承认、保护和促进所有人的人权。政府应采取措施，在决策过程中保证边缘化和弱势群体（如土著人民和残疾人）得到充分代表，分析自动化对人权特别是上述群体的人权的潜在不利影响，并采取特别行动来预防、终结或减轻自动化的负面影响。

性别和青年是包容性问题的另外两个关注重点。粮农组织《2022-2031 年战略框架》将性别和青年视为独立而又贯穿各个领域的综合性问题，突显其重要性，以确保相关议题得到特别关注。² 政策、立法和投资应采用基于人权的方法进行监测，包括收集分类数据，以衡量对青年和妇女的生计、权利和机会的影响。以下各节分别讨论了性别和青年问题。不仅是青年和妇女，其他许多人群也因种族、性别、贫困和社会经济地位、语言、民族、宗教、年龄、残疾、种姓和其他各种原因被排斥和边缘化，无缘于

插文 22 对残疾人群体的包容性

残疾人由于社会心理、身体、感官或智力方面的缺陷，往往被排除在发展进程之外，不能公平和平等地获得社会经济机会。贫困、粮食不安全和营养不良往往是造成残疾的原因，而且残疾人更容易遭受贫困、饥饿和营养不良。农业是三大高风险工作部门之一，有各种各样的隐患，而且劳动时间长，工作条件差，保障职业健康和安全的政策和立法也往往缺位。

自动化有助于确保体面的工作机会，消除劳动过程中的危险因素，打破贫穷、营养不良和残疾之间的必然联系。让残疾人充分参与自动化进程，还需要：（1）改造和改进现有的或开

发新的农业自动化技术，以满足残疾人的特殊要求；使用替代性的交流媒介（例如大号字体、盲文和手语）；采用图画、音频（磁带或光盘）和电子格式；（2）提升残疾人在农业生产和整个农业粮食体系中的技能。

尤其是要帮助残疾青年变得独立和活跃。粮农组织开办了青年农民田间和生活学校，利用创新技术，解决残疾人教育机会不均等，面临社会歧视和缺乏经济机会的问题。对弱势儿童和年轻人进行农业教育，同时传授生活技能，这是一种简单而行之有效的方法。

资料来源：粮农组织，2022。^{2, 51}

农业自动化。土著人民和残疾人就是一个例子（见插文 22）。

农业自动化对性别问题的影响

农业自动化对性别问题的影响复杂多样，取决于采用自动化之前手工农业各项任务的劳动力性别比例，也取决于农业粮食体系以及家庭内部的性别分工，如资产的分配。在许多地方，农场上的性别界限相当严格。例如，在摩洛哥，种植藏红花几乎由男性包揽，而枯燥且极其耗费人力的藏红花加工则几乎完全由妇女承担。⁵² 因此，如果藏红花种植实现自动化，解放的劳动力大部分是男性，不仅如此，种植的自动化将增加藏红花的产量，进而增加对女性劳动力的需求，或许这对雇佣女工来说可能是

个好消息，但对家庭女性劳动力来说却意味着劳动负担的加重。

赞比亚的一个案例表明，男性和女性可以分担劳动密集型任务，如除草。土地整理采用拖拉机后，耕种面积增加了，但并没有给妇女或儿童带来不公平的额外负担。相反，所有家庭成员都能够享受更多的闲暇时间。³⁵ 来自东部和南部非洲的更多证据表明，在许多情况下，土地整理实现机械化后，男性和女性的劳动量都减少了，但对女性的好处尤为明显，因为除草之前是她们的主要任务，而除草的工作极其繁重累人。³⁸ 在肯尼亚西部，机动机械化让男性和女性都有了空余时间，可以投入精力关心子女的教育。⁵³ 这些例子表明，评估自动化对女性的影响，必需首先了解具体的性别角色，尤其

插文 23 妇女和青年参与自动化进程：案例提供的证据

第3章分享了几个案例，其重点是通过新技术向妇女和青年赋能，以下服务商就是成功的例子：

Igara Tea: 大约18%的用户是妇女，其中4%是一家之主。农场上65%的劳动力是青年，在茶叶加工行业，妇女和青年在劳动力中的占比超过一半。

TraSeable Solutions: 妇女和青年分别约占注册用户的40%和15%。

资料来源：Ceccarelli 等人，2022。⁵⁴

Tun Yat: 大约30%的用户是妇女，25-30%的用户是30岁以下的年轻人，这也是缅甸国内男性迁徙的结果，男性迁移到城市地区工作，留下女性在农村从事农业劳动。Tun Yat 关注农村妇女和青年的就业，积极增强农村地区妇女的权能。Tun Yat 雇用妇女和青年从事食品加工和食品安全工作，并担任拖拉机操作员和机械师。

重要的是，不要仅仅因为新技术可以实现男性劳动的自动化，就毫无根据地一概而论。妇女和青年采用农业自动化技术的其他成功案例见插文 23。

农业自动化有可能缩短妇女的工作时间，减轻她们的工作负担，同时提高生产力、收入和生活水平，但研究表明，由于女性实际上往往很难获得资金、投入品和相关服务（信息、技术推广、贷款和肥料），再加上社会习俗对女性的限制，女性在采用农业技术方面通常落后于男性。⁵⁵ 例如，加纳管理和公共行政学院的研究表明，加纳沿海地区78.6%的女性农民无法获得拖拉机服务。⁵⁶ 妇女由于文化水平较低和缺少适当的工具设备而与自动化技术失之交臂，也无法应聘农场的经营和管理岗位。基础设施落后，专门面向妇女的农业技术推广经费不足，也是造成这种局面的原因。⁵⁶

在农场上，采购农业自动化服务的商业交易通常是由男性负责。因此，是否采用自动化以及为此投入多少资源（特别是资金）往往是男性说了算。⁵⁶ 农业设备和工具的设计通常也是以男性体型等生理特征作为出发点，很少顾及女性的体型和生理需求。⁵⁷ 在孟加拉国，妇女几乎不使用水泵浇灌作物，因为这些水泵在技术上过于复杂，操作水泵需要很大的力气，如果想专门请工人来操作，人也没那么好找，而且即使找到了人，也没有办法有效监督。⁵⁸ 设计和提供对女性更友好的自动化技术的需求显而易见。事实上，最近的一份文献综述强调，在自动化技术未来的研发和政策制定中，需要确保自动化技术的设计、推广和采用充分考虑性别差异，以切实减轻妇女的工作负担，提高她们的福祉。⁵⁵

要实现社会的全面可持续发展，必须克服这些性别障碍，提高生产力、安全性和舒适性，

插文 24 坐在驾驶席上的妇女：通过拖拉机增强妇女权能

妇女拖拉机驾驶员培训项目旨在打破妇女参与农业自动化的障碍。长期以来，男性一直主导着农业自动化，培训项目的目标是可持续地推动妇女参与和管理加纳的农业机械操作。

项目启动后，自2018年以来，182名女性获得了拖拉机操作证书。很多妇女成功完成了培训，表明女性也完全胜任拖拉机的操作和维护。项目的校友成立了拖拉机女操作员协会，以加强

联系和相互支持。

女性参与自动化不仅有助于改变女性的意识，也有助于改变其他农业从业者、雇主和社会各界的意识。女性在新的工作岗位上发光发热，有助于家庭关系的稳定，在家庭关于资源分配和收入的重要问题上也有了发言权。因此该项目极大地促进了工作和家庭中的性别平等。

资料来源：德国国际合作机构，2020。⁵⁶

减少繁重的劳动。⁵⁷ 为了支持妇女采用技术，决策者和项目的地方执行机构还需要评估当地的环境是否有利于妇女，并促进开发、推广和提供兼顾性别问题的技术解决方案。充分考虑性别问题的技术既适合男性的身体特征，也适合女性的身体特征。⁵⁹ 政策、立法和投资应提升妇女的能力和自主权，促进两性平等享有关键生产资料的所有权和控制权。⁶⁰ 有针对性地制定战略和开展行动，解决妇女采用自动化技术在家庭、服务和政策各个层面所面临的障碍，可以产生积极的效果。例如，加纳的证据表明，在通常由男性把持的价值链节点专门面向妇女开展培训，对妇女和整个农业社区都有积极影响（见插文 24）。⁵⁶

一项研究分析了孟加拉国女性和男性参与新兴的收割机服务市场的差异，表明机械租赁服务极具潜力。⁵⁸ 妇女可以购置收割机并对外租赁或从事租赁业务管理工作，也可以作为用户租用收割机来收割作物，这带来了各种直接

和间接的好处。促进农技租赁服务的措施应关注妇女的参与，无论是作为租赁企业的业主还是租赁服务的用户。

让农村青年参与进来 — 机遇和挑战

青年农民往往是第一批接受农业创新的人，因此他们被视为是改变传统观念和实现农业转型的关键力量。⁵⁴ 农业自动化带来了不同于农业部门传统工作的新型工作，传统工作往往工作条件差，安全隐患多，报酬较低。而新型的工作涉及创新技术，需要掌握独特的技能以有效利用新技术，从而意味着更体面的工资和更安全的工作条件。

最近有一篇论文分析了各利益相关者方对非洲农业转型这一宏大主题的看法，总体而言，受访者都非常乐观，认为农业可以吸引年轻人，78–98%的受访者同意这一看法。与此同时，很大一部分受访者认为目前青年并没有充分参与政

策制定的过程(72–97%)，很大一部分人指出青年在农业方面缺乏可以效仿的榜样(48–79%)。还有一种看法认为，教育系统没有为青年进入就业市场做好充分准备，特别是在贝宁(70%)和肯尼亚(63%)，⁶¹ 高技能工作对大多数农村青年来说遥不可及，⁶² 因此，青年掌握必要的技能至关重要。政府的政策和投资应优先考虑青年，重视人力资本的开发和能力建设。⁵⁴ ■

农业粮食劳动力的未来

随着节省劳动力的自动化在农场上推广，劳动力队伍也在进化，不仅规模变小，技能水平也变得更高，与日益复杂的新技术相得益彰。高收入、中等收入和低收入国家共同面临一个主要问题，即未来的农业劳动力来源在哪里，以及如何推动转型，摆脱以低技能体力劳动为主的格局过渡到使用复杂高端技术的新局面，其中的新型数字技术可能会增加农场对高技能工人的需求，并推动农业工人的工资上涨。⁶³

有人担心作物采摘机器人将取代数百万农场工人，而他们找不到其他工作另谋出路，这种看法缺乏依据。总的来说，农业工作的自动化和农场劳动力的演变是一个渐进的过程，在不同地区、不同作物和不同农场操作上表现得并不一致。劳动密集型的操作和自动化难度与成本较低的操作，采用节省劳动力的新技术的动机最为强烈。随着时间的推移，各个地区的农业工人供给减少，这与收入上涨、生育率下降、教育水平提高和非农就业机会增加密切相关，但往往并非同步发生。因此，尽管农业劳动力减少不容否认，但这种情况在全球范围内表现得并不均衡。

自动化往往并不会迅速让大量工人同时失业，其对就业的影响更多是以渐进的方式表现出来。随着农场劳动力供应的减少，一些任务将实现自动化，而其他任务将继续耗费大量人力。乐观地看，市场信号将继续引导节约劳动力的技术的开发和采用，而随着自动化进程逐步推进，技能较低的工人可以从已经被自动化的任务中解放出来，去从事自动化难度更大的其他任务。对于如整地和耕地一类的工作，采用自动化意味着可以开辟大量新土地进行耕种，粮食生产的规模随之扩大，对从事其他工作（种植、除草、间苗和采摘）的工人的需求也会相应增加。

这并不是说这个过程会一帆风顺，采用或不采用节省劳动力的技术，会在某些时候和某些地方造成失业或劳动力短缺。如果突然发生突破性的事件，使农民很容易获得节省劳动力的技术，即使劳动力工资水平很低，他们也会有动力采用这些技术，这可能会导致过度的自动化。这种情况不太可能在高收入国家发生，因为在这些国家，农村劳动力短缺和工资上涨已经成为常态。在低收入和中等收入国家，特别是有大量廉价农村劳动力的国家，过度和过快的自动化可能对商业化农场上的工人产生不利影响，尤其是新技术的采用会让一些工人掌握的技能变得可有可无。³ 插文 20 提供了巴西的案例。尽管如此，自动化仍然可以改善小规模生产者的生计，因为自动化让家庭成员能够将更多的时间用于教育和非农就业机会，并提高效率、生产力和韧性。

另一种情况是自动化程度不足，特别是政府为了保护农业部门的就业，制定政策人为地为农业自动化设置障碍。在农业劳动力供应减

少和工资上涨的背景下,想当然地认为限制自动化可以保护农业就业和维持农业工人的收入,这很可能是错误的。原因有二:首先,限制自动化的政策降低了农场的竞争力,无法扩大生产规模来满足日益增长的国内外市场的需求。其次,要提高农业工人的工资和改善他们的工作条件,关键在于让农业工人的劳动与新技术相结合,提高他们的生产力。世界上大多数农场工人的家庭收入仍低于贫困线,如果不采用提高工人劳动生产率的技术,摆脱贫困的希望依然渺茫。限制采用节省劳动力(可提高工人劳动生产率)的技术会导致农场工人工资长期低迷。³

有鉴于此,农业劳动力供应减少是大势所趋,扩大粮食生产,同时继续建设教育体系培养面向未来的劳动力,这是全世界都面临的一项重大政策挑战。不仅是初级生产,农业粮食体系的其他阶段都需要正视这一挑战,包括农产品的加工和经销。如果培养不出掌握必要技能的工人去使用新技术,就很难满足全球日益增长的粮食需求,特别是在农业劳动力增长缓慢甚至下降的地方。■

结论

理解农场自动化的社会影响需要深入一步,看哪些农场任务实现了自动化,以及与其他任务的关系如何;还需要有外向的视角,看农业生产如何与农业粮食体系的上下游的各个节点以及整体经济的相互作用。无论何时,自动化都会影响农场上的一些具体作业,将劳动力从这些特定的任务中解放出来,分配给农场上其他劳动密集型的任务,以及农业食品链上下游和各经济部门的其他岗位。

人们倾向于认为自动化会造成失业和压低农业工人的工资,在某些情况下,的确可能是这种结果。然而过去的经验表明,创新和采用节省劳动力的技术往往是一个漫长的过程。创造出能模仿人类灵巧和娴熟地完成农业任务的机器并非易事。有许多例子表明,一项农场任务的自动化(例如使用拖拉机整地)增加了其他任务(例如播种、除草、间苗和采摘)对工人的需求。通过这种方式,自动化可以刺激农业就业,让农场扩大生产,以应对日益增长的国内和全球粮食需求。

有证据表明,在自动化的推动下,农业生产实现增产,会促进农业粮食体系其他节点的就业,包括上游的投入品供应和下游的物流、储存、加工与营销,此外还有助于激发创业,开发出新的业务。

开发和采用节省劳动力的农业技术如何影响就业和工资水平,在很大程度上取决于推动农场自动化的因素。市场信号会激励或抑制农场采用节省劳动力的技术,具体而言是工资相对于其他要素价格的变化。在技术供应侧,研发的突飞猛进将不断为农民提供适用于新任务的农业自动化解决方案,并且成本逐渐降低。最终的总体影响仍有待实证研究,同时也取决于农业在经济中的重要性,以及农业自动化可能引发的对经济各行各业的影响。

随着全球农业劳动力逐渐收缩,从提高全球粮食产量的角度来看,自动化是一件好事。与此同时,农业自动化加速发展,或政府不合时宜地先行制定促进自动化的政策,都可能导致对劳动力的需求突然发生变化,打破自动化与劳动力供应之间的联系,这可能导致在某些

地方和某些时期，在采用自动化的同时，失业率上升，工资停止增长或下降。在制定应对政策的时候，应避免在自动化的问题上操之过急而扭曲市场，应立即着手帮助农业工人掌握新型技能，适应技术含量更高的新岗位，这对年轻人和妇女尤其重要。对他们来说，技术、经济和社会文化的各种障碍让他们难以充分享受自动化的好处。商业化农场采用自动化技术，有可能淘汰小规模生产者，迫使他们退出农业

生产，因此必须保护小规模生产者的生计，确保他们不会掉队。

本章提出了可以促进农业自动化包容性的若干举措，使妇女、青年和小规模生产者更充分地参与自动化进程，政府的农业自动化政策在这方面大有可为，在确保自动化推动农业粮食体系转型的同时，实现自动化进程的包容性。第 5 章将深入讨论政府政策和立法的作用。■



泰国
分析作物叶片、叶面施肥
和授粉的机器人。
©PopTika/
Shutterstock.com



第 5 章

实现高效、可持续和包容性农业自动化的政策选择

要点

- 为负责任地采用自动化技术创造有利的大环境甚为关键, 这要求一系列政策工具彼此配合, 相辅相成, 包括制定恰当的法律和体制框架, 采取激励措施, 以及通过一般性服务支持基础设施建设、教育、培训、研究和私营部门的创新进程。
- 促进负责任的自动化投资应因地制宜, 需要考虑的因素包括网络连接和基础设施的状况、知识和技能的短板, 以及获取自动化技术的机会不平等。
- 制定解决环境可持续性问题 and 增强韧性的政策, 应认识到自动化和其他可持续性实践之间的潜在协同作用, 如景观规划和生态农业。
- 决策者应致力于建立透明的立法和监管框架, 提供不扭曲市场的一般性服务, 包括开展试点和测试, 研发以农民为中心和契合需求的技术; 以及开展培训, 帮助农业工人在农业其他部门和非农领域实现再就业。
- 农业生产者必须自行从众多技术中选择采用哪种技术, 政府的干预是为了确保农业自动

化进程的包容性, 例如, 面向各个利益相关方宣讲自动化知识可以进一步推动采用。

如之前几章所述, 农业自动化为农业粮食体系实现可持续和包容性的转型带来了许多机会, 但也带来了风险, 这需要私营部门、公共部门和第三部门的各个主体为了一致的目标共同努力, 相互配合, 为农业自动化创造一个有利的大环境, 以把握机遇并降低风险, 确保农业转型的可持续性和包容性。本章进一步借助为本报告编写的案例研究(见附件 1)和现有文献提供的经验教训, 对政策和法律工具进行梳理, 分析如何保障农业自动化进程的可持续性和包容性, 不让任何人掉队。农业自动化的总方针是技术变革必须以负责任的方式进行, 以建设高效、多产、包容、有韧性和可持续的农业粮食体系。负责任的技术变革作为一个进程, 需要预估技术对生产力、韧性和可持续性的影响, 同时关注边缘化和弱势群体, 包括妇女、青年和小规模生产者。这一进程必须让各个利益相关方参与进来, 回应他们的关切, 利用他们的想法和知识。¹ 农业自动化要做到负责任, 必须灵活地因地制宜, 以农民为中心、以现实需求为出发点, 尊重数据隐私和文化多样性, 保证参与性

和技术方案设计的包容性，并且需要做到公开透明。农业自动化必须认识到因地制宜的重要性，让当地的主体参与进来，并利用他们的适应性和创新能力，使自动化技术契合当地需求。■

实现负责任的农业自动化

同任何技术变革一样，农业自动化不可避免地会冲击农业粮食体系，在带来各种好处的同时，也会带来各种弊端，最终导致赢家和输家的分化。推动农业自动化，需要考虑阻碍或促进技术开发和采用的社会经济和政治进程。农业自动化以多种方式影响着农业粮食体系，涉及粮食安全和营养、韧性、减贫和农村就业，有可能破坏弱势群体的生计，加剧不平等。农业自动化会间接影响社区的整体福祉，其中可能包括对环境可持续性的影响，例如自然资源保护和生物多样性。考虑到这些影响，如何保证技术变革具有责任感，这应是政策辩论的重点，其核心问题是包容性和可持续性。

建设更具可持续性、包容性和韧性的农业粮食体系，相关行动必须让所有相关利益相关方参与进来，特别是小规模生产者和其他边缘化弱势群体，对他们来说，农业自动化技术通常遥不可及。^{1,2} 为了将负责任的技术变革理念落到实处，本章提出了一系列关于政策、体制、立法和投资的选项，涉及四大关键领域。这些选项共同构成了农业自动化的路线图，以确保农业自动化有助于实现高效、多产、可持续、有韧性和包容性的农业粮食体系。每一个选项都以本报告介绍的案例和现有文献的关键结论作为依据。这些选项有助于克服第2章至第4章中讨论的采用自动化面临的主要障碍。图8显

示，这些政策可以相互补充和相互促进，具体如下：

- ▶ **创造有利于大环境的一般性政策**，包括不直接与粮食和农业挂钩但却有助于农业自动化的政策，例如解决基础设施薄弱（如道路、能源和网络连接）的政策，以及金融政策和数据监管政策。
- ▶ **针对农业的政策、立法和投资**，直接与粮食和农业挂钩，把农业部门视为一个整体，包括开展农业研发、普及知识和为农业自动化筹措资金。
- ▶ **确保农业自动化有利于农业粮食体系的可持续性和韧性的政策**，鼓励农业生产者采用保护自然资源、支持环境可持续性和提高韧性的自动化技术。
- ▶ **确保农业自动化进程具有包容性并惠及所有人的政策**，作为对其他三类政策的补充，旨在确保每个人都能从农业自动化中受益，特别是妇女、小规模生产者和青年等边缘化群体，并确保自动化对收入和生计的潜在负面影响得到妥善解决。

一个非常重要的政策领域是一般性服务支持，即不直接与农业产出和投入品使用挂钩的政府支持（见**插文 25**）。一般性服务支持很关键，为从事农业和农业粮食体系业务创造了有利的大环境，而且不会扭曲激励机制，从而让农业生产者、投入品供应商、服务商以及其他利益相关方的经营能够欣欣向荣，并在自动化的问题上做出明智选择，积极创新。遗憾的是，全球粮食和农业支持总金额中只有六分之一（约1110 亿美元）属于一般性服务支持。³ 在低收入和一些中等偏下收入国家，农业仍然是经济、就业和生计的关键部门，也最需要一般性服务支持，然而这些国家的一般性服务支持往往水平最低。⁴ 在这些国家，为了给农业自动化

图 8 负责任地利用农业自动化的政策选择路线图



资料来源：粮农组织为本报告编制。

插文 25 不同类型的政府支持如何促进农业自动化

在 2013–2018 年间，全球范围内对粮食和农业的支持平均每年达到近 6300 亿美元，³ 其中绝大部分是着眼于帮助农业生产者个人，采取的形式有贸易和市场政策，也有对农产品或各种投入品的财政补贴，例如通过财政补贴维持某种农产品的价格，或者像一些国家那样对化肥进行补贴。这种支持可以通过多种途径影响自动化的商业价值，例如农业生产的产品构成可能会受到影响，因为在低收入和中等偏下收入国家，农业支持主要是针对淀粉类主食，而在高收入和中等偏上收入国家，农业支持主要针对乳制品和其他富含蛋白质的食物。农业生产的产品构成反过来将决定选择采用什么样的自动化技术，因为一种技术可能适合某些农产品，但不适合其他农产品。全球来看，大约三分之一的农业支持是对某个产品或某类产品实施价格补贴。

同样，对生产要素的支持也会影响自动化的采用，特别是有利于资本积累的激励措施。例如，对农业生产者的优惠贷款有利于资本密集型的自

动化技术。从自动化包容性的角度来看，大型生产者和小型生产者谁能享受这种支持是一个关键问题。在全球范围内，向农民个人提供的支持中约有十分之一用于生产要素。

与生产挂钩的支持扭曲了激励机制，无论是支持农产品价格还是生产要素都是如此，可能会适得其反，让一些生产者受益的同时，牺牲了其他生产者，而这并非政策的本意。虽然具体的支持措施可能也有利于包容性，但包容性往往并不是制定支持措施时需要遵循的指导原则。

一般性服务支持把粮食和农业作为整体目标，与农业生产、个别生产者或具体生产要素并没有直接联系，包括支持农业研发和知识传授，例如培训和技术援助；建设和维护基础设施，例如改善农村道路、灌溉系统、仓储设施和网络连接。这种支持对于自动化的采用很重要，同时又不会扭曲激励机制，也不会偏向某类生产者。

创造一个公平的竞争环境，很可能需要加强一般性服务支持，但这往往需要大量的社会发展资金。

在设计政策和规划投资时，政府还需要在不同有时甚至相互冲突的经济、环境和社会目标之间进行权衡。下文提出的政策、投资和其他公共措施是否适用取决于具体情境。政府不仅应考虑地方面临的挑战，还应考虑国家的能力和可以调动的资源（包括财政资源），从而确定行动的优先顺序，以便制定政策将其落到实处。

接下来的章节将分别对四类政策进行更详细的介绍，并提出政策和投资的建议。■

创造有利于大环境的一般性政策

全球范围内，对替代人力和提高农业作业精准度的技术的需求一直存在，这是前期机械化进程的主要动力，也是目前采用数字自动化和机器人技术的主要动力。通过影响农业发展的一般性政策、立法和投资，政府可以为农业生产者、服务商、物流运营商和制造商等相关利益相关方营造有利的环境。⁴ 例如，改善基础设施能促进农业发展和对农业的投资，使采用数字自动化技术的商业依据更为充分。政策和投资可以发挥关键作用，例如纠正市场失灵，

改善网络连接、电力供应、数据保护和服务供给（如金融、保险和教育），从而降低交易成本，提高经济的整体效率。以下是需要重点关注的领域。

改善交通基础设施

落后的基础设施让农业生产项目难以开展，采购投入品和进入农产品市场也很困难，交易成本因此大大增加，打击了投资农业自动化和其他技术的积极性。完善的交通运输基础设施有助于农民开拓利润更高的市场，降低机械、零备件、维修和燃料的交易成本，并促进（巡回式）农机服务市场的出现。⁵ 改善交通运输在普遍贫穷的撒哈拉以南非洲尤为重要（见第2章和第3章）。当然，其他农业自动化程度不高的低收入和中等收入国家也需要重视这个问题。

投资能源基础设施

没有能源，自动化技术就无法施展。大多数机械依赖化石燃料（也有一些是电动的），而数字自动化需要电力。在一些国家，即使电网已经延伸到农村地区，通常也只有乡镇才有电。哪怕是在高收入国家，田间地头往往也没有通电。因此，在许多低收入和中等收入国家，即使农村地区有电可用，通常也是借助独立于电网的分布式发电装置。改善电力供应的政策，例如鼓励用可再生能源离网发电，有助于农村发展制造业，并促进农业数字自动化和机械化，例如采用电力驱动的灌溉水泵、加工机械和保存设备。^{6,7} 政府需要重视利用可再生能源在价值链下游实现动力机械化。⁸ 地方投资可再生能源，至少可以在一定程度上缓冲能源危机，平滑燃料价格波动对农业利润的影响。

改善通信基础设施

改善通信基础设施对于采用数字和自动化技术尤为重要。网络连接不足是许多中低收入国家普遍存在的问题，在一些高收入国家也是如此。然而，互联网接入对于数字自动化必不可少，更新软件、通过云计算提高计算机存储容量，访问遥感数据和其他数据库都需要可靠的互联网接入。在世界各地的农村地区，互联网往往并不普及，而且费用昂贵，尤其是在低收入和中等收入国家。政策可以鼓励发展农村数字基础设施，例如向农村互联网提供商提供低息贷款，支持提供数据服务的通信合作社。在欧洲，私营企业、政府和社区各自牵头和联合开展了多项举措，实施各种解决方案，有效地改善了农村地区的互联网接入（见**插文 26** 斯洛文尼亚的案例）。这些例子表明，公共－私营－社区伙伴关系对改善农村网络连接和基础设施非常重要。⁹ 立法也能发挥作用，在芬兰等国家，使用互联网是受保护的法定权利。¹⁰

投资还应鼓励发展相关的配套基础设施，如建设公共数据库，提供天气信息和种植业与畜牧业的生产日历，数字公共产品联盟就是一个例子，联盟由多个利益相关方联合发起，粮农组织也是成员之一。联盟旨在促进发现、开发、使用和投资数字公共产品，供农业和其他各个部门使用。

完善信贷市场和汇率政策

信贷对于农业自动化和农业技术的投融资至关重要。小规模生产者往往申请不到贷款，特别是妇女，原因有很多，包括缺乏抵押品（如名下的土地），交易成本过高等等。¹² 利率过高往往让农民望而却步，不会去申请贷款购买机

插文 26 斯洛文尼亚科门市的免费宽带网络

在斯洛文尼亚，大约 50% 的人口（即近 100 万人）生活在农村地区，平均每平方公里 30 人。科门市位于斯洛文尼亚西部喀斯特地区，人口较少且持续减少。欧盟向科门发放了一笔资金，用于建设免费的宽带网络。公共和私营部门的合作伙伴抓住这一机遇，快速部署网络基础设施，弥合了当地的数字鸿沟，实现了互联网的高度普及。该项目高度重视保证长效性和优化运营成本，这是整个项目取得成功的关键。

科门市面积 103 平方公里，包括 35 个村庄，生活着近 1340 个家庭。当地地形崎岖不平，人口稀少，商业性的网络服务提供商认为在科门市

开展业务成本过高，不会有什么回报，没有商业可行性。所以市政府决定自行实施免费宽带网络项目，一个私营部门的合作伙伴向项目提供了支持。

项目工期极其紧迫，因此工程进展非常迅速。市政府与私营部门伙伴积极合作。施工许可证的问题在私营部门伙伴的帮助下得以解决，市政部门也因此迅速签发了必要的审批文件，保证了项目的如期完工。面向喀斯特地区所有居民开展的宣传和意识提升工作也颇有成效，与当地居民建立了良好的关系。项目建设期间，双方紧密合作，迅速提高了宽带互联网的渗透率。

资料来源：欧洲联盟委员会，2020。¹¹

械^{5, 12}和其他自动化技术。与种子、化肥和农药不同，自动化技术非常昂贵，往往需要很多年才能收回成本。亚洲很多国家的经验表明，利率政策会对自动化的格局产生重大影响。^{6, 13}汇率政策会影响机械、零备件和燃料的进口成本，从而也会影响自动化。^{5, 13}大多数自动化技术需要长期投资，因此保证较低的贷款利率和稳定的汇率至关重要。

制定透明的国家数据政策和立法

数字自动化技术可以收集大量种植业、畜牧业、水产养殖业和林业数据，其中可能包括属于私人的信息，从而引发农业生产者对隐私问题的担忧。不受隐私立法保护的数据可以成为一种有价值的商品，但需要用法律框架来界定谁可以使用数据并从中受益。关于数据保护、共享和隐私的透明立法是推动数字自动化

的关键因素，可以获得农民的信任。尤其需要设立关于数据所有权和控制权的明确规则，建议考虑“隐私设计”的理念，在技术解决方案的设计阶段就充分考虑数据保护的要求。

还需要支持数字化在农业领域以负责任和渐进的方式推进，包括建设和完善国家数据基础设施。互联互通（机器之间准确可靠的通信）对于数据共享至关重要，需要在技术上加以定义，并在法律上强制执行。关于互联互通的法定要求确立了数据交换的监管框架，同时也顾及隐私保护等问题。

另一个相关领域是实施数字化和自动化的机构能力和政治能力。低收入和中等收入国家的经验表明，实力雄厚的私营高科技企业往往期待建立这样的治理体系，但这可能带来负面后果，也就是所谓的数字殖民主义，^{14, 15}即大

企业把持权力和影响力，例如通过享有版权保护的软件从用户那里获取数据和攫取利润。大多数中低收入国家无法利用本国资源打造起有竞争力的数字产业，然而，各国和各区域有必要建立自身的数字治理能力，至少要有能力引导自动化技术，而不是反过来被自动化技术所左右。联合应对数据挑战也很重要，数字公共产品联盟就是一个典型的例子。联盟由众多合作伙伴组成，共同致力于推广数字公共产品。数字通信可以促进自动化技术信息的分享，提高公众对自动化技术潜力的认识。■

针对农业的政策、立法和投资

除了一般性政策、立法和投资之外，政策制定者需要专门针对农业部门，更为直接地支持农业自动化。政府可以利用一系列政策、立法、投资和其他干预措施，有的放矢地支持农业部门支持采用自动化技术，特别是小规模生产者。这包括出台关于土地权属的政策，投资能力建设，制定质量保证的法律，开展应用研究和提供专项资金。这些行动哪些应优先进行，很大程度上取决于具体情况，包括一个国家或区域的总体发展水平和农业的气候与地形特征。各国需要制定农业自动化战略，以指导更为具体的行动、政策和投资，在自动化缺失或仍处于初级阶段的领域，这是一项必不可少的工作。国家农业自动化战略应该以调研和实地考察为依据，吸取研究人员、农业生产者、服务商和制造商的经验。生产者之所以愿意采用的特定机械和数字设备，出发点肯定是他们自身的条件和需求，而这些在一个国家内部和国与国之间都不尽相同。在农业自动化程度仍然很低的非洲，各国政府认识到数字革命的种种优势，已经联合起来加速数字技术的采用（见**插图 27**）。

以下章节介绍了各国政府如何根据生产者的条件和需求，开展政策制定、投资和立法工作，充分挖掘自动化技术的潜力，让尽可能多的生产者认同自动化的商业价值。

增加获得自动化技术的机会，特别是对小规模生产者而言

如前所述，自动化和其他技术的成本可能很高昂，而信贷市场如何运作，对资金筹措有重要影响。农民可以用他们的积蓄购买机械，但如果积蓄不够，就要求助信贷。政府可以通过制定直接针对农业自动化的信贷政策来施加影响。申请贷款用于投资农业生产，这是为自动化筹措资金最常见的形式，但农民可能会因为无法提供抵押品或者利率过高而放弃申请。基于合同的证券、贷款担保计划、村民互相承担联代责任和发展租赁市场都是可行的选择。对于自动化设备的租赁，可以提供各种激励措施，例如，按农民自筹资金的一定比例提供配套经费，或者发放“聪明”补贴（即不扭曲市场的补贴）。²⁶ 一些亚洲国家通过这些工具帮助农民获得信贷。¹³ 其他推进自动化的做法包括开展价值链融资、发放集体信贷（如印度²⁷）、以及开发相应的储蓄和保险产品，特别是对于大型设备而言。²⁶ 除了农民和服务商之外，当地的制造商和维修店也可能需要贷款。^{5,22}

第3章的27个案例研究表明，如果农业生产者缺乏资金，尤其是小农户，服务商可以尝试利用其他商业模式实现盈利。在一些地方，自动化服务与信贷、保险或产销合同挂钩，例如签订包销协议，承诺以商定的价格购买不低于一定数量的初级农产品。这有助于降低生产者的风险，提高他们投资新技术的能力，并提高农产品的产量和质量。但是，小规模生产者在订立合同时往往处于劣势，如果缺乏关于订单农

插文 27 国家战略推动非洲农业采用数字工具

非洲联盟（非盟）和一些非洲国家政府正在加快努力，为有效利用数字工具实现农业粮食体系转型创造有利的大环境，最近又迈出了关键的一步。非盟委员会农村经济与农业司牵头制定了非盟数字化农业战略，这是包括农业在内的非洲数字化转型战略（2020–2030 年）的后续行动。¹⁶ 数字化农业战略尚待正式通过。战略鼓励非洲各国政府更好地利用数字创新的力量，提高农业和其他农村部门的绩效、包容性和可持续性，呼吁

非洲各国政府制定数字化农业战略，并利用数字化来加强机械化服务。

此外，由非洲国家元首和政府首脑创建的政府间机构“智能非洲”制定了非洲农业技术蓝图，¹⁷ 而几年前，粮农组织和国际电信联盟向各国政府提出了数字化农业战略指南。¹⁸ 在这些努力的基础上，非洲许多国家的农业部正在制定新政策，以更好地抓住数字化带来的机遇。

业和供应链金融的立法，这种商业模式可能会导致技术绑架，即要求农民必须使用某种服务，形成强加的依附关系和权力的失衡，造成意想不到的社会经济后果，农民、农产品的买方和服务商面对更为强大的市场主体别无选择，其行为模式和农艺实践往往会迎合对方的偏好。同时，这些解决方案将农民置于一个由他人掌控的封闭系统中。²⁵ 有组织的正规服务有助于降低生产风险，但也有可能限制农民的选择。需要制定立法，保护小规模生产者不会落入胁迫性合同的陷阱。

在土地权属这一政策领域，政府也可以有所作为，从而促进农业自动化的投融资。土地权如果得不到保障，农业生产者就没有积极性投资农业技术，也不会用心经营自己的农场，因为他们担心自己的一片苦心可能会为他人做嫁衣。土地权属不明也会影响农民获得贷款，因为他们不能用土地作抵押，尤其是当投资金额很高，需要多年才能收回时，这个问题更为突出，机动机械就是前车之鉴。强化土地权的保障有助于农民获得信贷，特别是对小规模生产者而言，并激励对农业机械的投资。例如，缅甸开展

了土地制度改革，大大提高了农民获得银行贷款购买农业机械的成功率。²³ 农民也可以贷款购买化肥和良种等农业投入品。这些投入品与机械和数字设备一起使用，会产生可观的协同作用，大幅度提高生产力和资源利用效率。为自动化筹资的信贷业务应该保持市场化运作，各市场主体应基于商业可行性自行决断。政府直接拨款资助农业自动化往往会引发相当严重的治理问题。^{26, 28}

贸易政策也会影响农业自动化技术的推广。高昂的进口关税和非关税贸易壁垒（冗长的海关手续和检疫要求）会影响自动化技术的引进。在亚洲，取消进口限制极大地促进了机械化；¹³ 而在非洲，许多国家已经免除了农业机械的进口关税，但仍有一些国家还在征收。^{12, 13} 在其他国家，机械本身基本上可以免税，但机械的零部件往往被课以高额关税，这破坏了机械化的可持续性。降低机械、数字设备和零部件的关税，以及优化海关通关手续，有助于降低自动化技术的交易成本，鼓励自动化技术的采用。各国政府应优先考虑，是否有可能对适合本国国情的机械设备免征关税和其他税收，这有助

于消除自动化面临的主要障碍，实现提高生产力、可持续性和韧性的国家发展目标。

积累知识和技能

制造商、机械和设备的产权人、操作员、机械师和农业生产者都需要掌握创建、管理、操作、维护和修理农业自动化设备的知识和技能。缺乏专业知识可能削弱自动化技术的商业回报，影响长期使用，然而，这些专业知识并没有得到很好的普及。⁵ 加纳的例子就很能说明问题，由于维护不善和缺乏训练有素的操作员和机械师，该国 86% 的拖拉机经常发生故障，长时间停工。¹⁹ 世界各地机械化进程的经验表明，政府采取措施普及和提高知识与技能至关重要。²⁰ 职业培训中心将理论和实践相结合，特别适合作为传授必要知识和技能的平台。还必须培养数字自动化的管理人员，澳大利亚专门为具有自主功能的机器用户制定了行为准则，其中特别规定了如何向管理人员发送警报，如何报告意外事件。²¹

数字素养低下，缺乏监督、维护和修理自动化设备的技能，这是全球采用数字自动化的另一个主要障碍，尤其是对小规模生产者而言（见第 3 章）。开发人力资本至关重要，为此需要制定能力建设的工作方案，其中包括进行必要的投资，普及数字技能。能力建设不仅应面向农业生产者，还应面向农业价值链中的其他主体，涵盖投入品、服务和价值链下游（如加工和贸易）的所有阶段，这对于农业工人从低技术含量岗位转移到高技术含量岗位极为重要，对于年轻人来说更是如此。我们往往期待年轻人发挥关键作用，推动家庭农业转型为自动化农业，因为他们比父母一代更开明，更容易接受农业自动化。因此，政府的政策和投资应当以农村的年轻工人作为目标。

投资应用研究和技术开发

自动化技术的进步在很大程度上是由私营部门的研发推动的。政府可以通过相关机构提供一般性服务支持私营部门的研发，也可以自行开展或资助关于技术、农艺和经济解决方案的研发工作，以实现因地制宜和可持续的自动化。研发工作应分析特定的精准农业解决方案对经营利润、环境可持续性（包括碳、水和能源足迹）和劳动安全的影响，还应分析妇女、青年和其他弱势群体的参与程度。另一个需要研究的领域是设施农业和受控环境下的各类生产模式，如垂直农业和温室农业，消费者和决策者往往对此心存疑虑。还必须开发和验证具体的农艺模型，以便更好地了解作物对特定精准农业技术的应答，如可变速率技术。政府可以支持全国性的研究和创新系统，包括私立或公立的创新项目，以改造和升级现有的机械和数字设备，随着农业系统的演变，不断适应生产者的需求。

需要研究如何将农业大数据和分析转化为公共产品，并向小规模生产者提供免费的咨询服务，同时还建议开展应用研究，探索自动化解决方案如何适应不同的区域、国家、农业生态条件、生产定位和农场类型（见**插文 28**）。在一个地方行之有效的方法并不见得一定适用于其他地方。为了鼓励开发契合农民需求的自主农业技术，研发框架应让农民参与进来，与科研人员一起设计和推广解决方案。英国创新部开展了一个名为“科技实践”的项目，由政府出资，并要求科研人员在项目中从始至终与最终用户合作，面向农民举办技术路演，收集农民的反馈后对技术进行完善。

最后一个研究领域是可能会出现的权力关系失衡，随着中低收入国家越来越依赖数字化

插文 28 因地制宜的数字自动化：来自 27 个案例研究的证据

本报告收集了 27 个案例研究，以展示如何使数字自动化适应不同的生产系统、国家和农场类型，契合当地的需求。例如，在种植业中，有证据表明，低收入国家正在开发小型自动化机械，例如乌干达的茶叶采摘机和印度与西非的自动化棉花采摘机（如第 3 章所述，棉花采摘是一种难以自动化的作业）。这些技术目前已经有中型和大型生产者在使用，而且随着生产者组织设立和运营机械租赁中心，其使用范围将进一步扩大。

在精准畜牧业中，挤奶机器人的商业和服务模式提供了宝贵的经验，有助于不同类型的农场

应用新技术。虽然挤奶机器人的使用主要集中在高收入国家的大中型农场，但也有众多适合小型室内农场的技术，一些中等收入国家的牧场已经安装了设备，对放养的奶牛进行监控。

最后，关于受控环境中的农业，温室种植在高收入和中等收入国家越来越普遍，这些国家的自动化已经达到一定水平，例如温室内的气候可以自动调节。这些解决方案开始在世界各国得到采用，例如墨西哥、智利和沙特阿拉伯。以温室为代表的受控农业为开发具有人工智能的机器人技术提供了重要机会。

资料来源：Ceccarelli 等人，2022。²⁵

和自动化技术，大型高科技企业和大型服务商追逐自身的商业利益，可能会对小规模生产者造成不利影响，主要体现为权力高度集中，土地和财富被重新分配，传统知识和技能泯灭，劳动力和就业受到冲击。

质量保证和制定安全标准

缺乏质量保证体系，不对机器、设备和零部件进行测试和认证，会影响各种农业自动化技术的采用，因为这会增加购买这些技术的不确定性和风险。¹³ 例如，在加纳，可以安装在拖拉机上的国产玉米脱粒机比进口机器便宜，但由于缺乏标准和认证制度，农民很难在购买前评估其质量，因此许多农民还是选择了外国品牌。⁵ 没有正规生产线的中小型制造商实际上不可能开展测试。此外，如果正式认证并不是当地市场的强制性要求，制造商也没有动力去开展测试和认证工作。然而，政府、企业和

民间机构都可以组织测试和认证，以有效缓解信息不对称，这样做并不会大幅提高机械的成本。开展公共检测和认证服务，可以对技术的性价比、有效性和用户友好性进行测评，会对技术的采用产生积极影响。同样，建立健全的标准制定机构，可以推动自动化设备的制造和贸易。²²

政策制定者需要制定一套平衡的法律法规，来确保农业自动化的安全性。监管规则应涵盖自动化的所有方面，包括积极面和消极面。监管规则的出台应基于广泛的磋商，实施之前和之后都应征求所有利益相关方的反馈意见。例如，尽管无人机对环境 and 人类安全有很大好处，英国政府仍出于安全考虑严格限制无人机用于施用农业投入品。英国的法律还要求对自主机器进行 100% 的现场人工监督，以确保机器不会引发事故。分析发现，这样的法律要求使自主机器对中小型生产者失去了经济效益，

只有对达到一定规模经济的大型农场才有性价比。²⁴ 如果政策制定的过程具有透明性和包容性，这样的研究结果有可能促进对政策进行修订。

为了保证安全，政府应该采用透明的监管框架，基本工作包括检查用户是否遵守规定，制定可以参照的标准，鼓励建立行业自律机制，例如农业生产者自愿缔结行业行为准则，实施满足食品安全、动物福利和环境保护的生产标准。标准可能有法律约束力，也可能没有法律约束力。在澳大利亚，已经形成了一套行为准则，用于指导自主机器在农业中的使用。²¹ 这让农民有信心采用自主设备，同时也让制造商有信心推广这些设备。该行为准则旨在实现机器自动化方法的标准化，涵盖若干内容，包括常规风险控制和应急预案、场地之间的车辆运输、维护和修理的要求、应急管理、以及相关法律规定和标准。英国正在为机器人制定类似的行为准则，包括用于农业的机器人。⁹

挖掘低成本农业自动化技术的潜力

由于缺少资金，或机器并不适合当地地形条件（如丘陵地带），或农场规模过小，或土地过于分散，采用大型机器往往不具有性价比，小型机器或许是一个可行的选择，可能为农民带来巨大的收益，特别是那些在相对偏远的地区经营小块土地的农民。小型机械和设备包括双轮拖拉机、动力耕作机、滚筒式播种机、旋转式点播机和动力除草机。²⁹ 证据表明，采用小型机械有充分的商业依据（见**插文 17**）。事实上，这些简单的技术可以显著减少繁重的劳动，节省时间和投入品，并通过及时开展作业提高生产力和增强韧性。小型机械也更环保，消耗的化石燃料很少或者完全不需要，很多小型机械可用于生态农业，如鱼稻共生系统和干

湿交替作业（农民应用节水技术减少稻田耗水量且不影响产量）。在一些地方，由于社会文化和传统习俗，妇女往往被排除在机械化之外，而小型机械的采用让妇女有更多的机会参与机械化。^{29, 30}

在大多数中低收入国家，呼叫中心、可变速率技术、非结构化补充业务数据和手机短信都已经得到应用，这些往往是小规模生产者最常用的解决方案，有时甚至是唯一的解决方案，特别是在撒哈拉以南非洲。农民可以通过购买服务套餐使用这些技术，并不需要高级的设备和娴熟的数字技能。这些技术成本低廉，而且几乎不需要维护。服务套餐通常包括多个项目（如提供市场行情、气候信息、天气预报和实时农场监控数据），并把众多市场主体联系在一起。这些技术已经高度普及，很有可能缩小数字鸿沟。与先进的数据技术相比，这些技术不需要大量能源和复杂的数据架构，对基础设施的要求也不高，即使基础设施出现故障也不会受太大的影响，因此极具性价比。然而这些解决方案必须因地制宜，并有能力向农民提供可靠的咨询服务和建议。²⁵ ■

确保农业自动化有利于农业粮食体系的可持续性和韧性的政策

本章讨论了如何通过一系列措施，克服农业自动化采用面临的障碍，并聚焦于小规模生产者的需求。本节的重点是确保农业自动化的采用有助于建设可持续和有韧性的农业粮食体系，为此可以采取哪些措施，避免进一步的环境退化。如上所述，机动机械化带来了许多好处，包括提高生产力、增强粮食安全、减少贫困、

增进健康和提高生活水平,然而这些好处往往以环境可持续性为代价,例如生物多样性丧失,土壤压实和侵蚀,水资源退化。如果能辅之以恰当的政策、立法和投资,以及使用数字自动化等更为先进的技术,这些负面的环境影响可以大大减少或完全避免。以下各章节探讨了需要关注的重点领域。

防止生物多样性丧失、土地退化和碳排放

机动机械化会导致农田扩张,侵占森林和草原,进而造成气候变化加剧和生物多样性丧失(见第3章)。土地使用规划和监控,至少在一定程度上,可以解决或避免这些负面影响。借助数字自动化技术,可以有针对性地对土地进行规划和监控,尤其是那些在减缓气候变化和保护生物多样性方面意义重大的土地。相关投资还应遵循世界粮食安全委员会认可的农业和农业粮食体系负责任投资原则。³¹

种植业、畜牧业和林业等农业生产系统实施可持续战略,可以减轻对气候的影响,促进生物多样性,并减轻对环境的负面影响。³² 在第3章介绍的27个案例研究中,Justdigg(见附件1)促进了非洲大规模的景观修复,例如将退化的牧场变成绿色肥沃的土地。Justdigg在景观修复的过程中,开展了雨水收集、放牧管理和树木修剪,并运用远程传感器监测树木生长和计算树木对碳的吸收量。³³ 在一些国家,政府通过土地使用规划和监测,最大限度地遏制农田扩张,效果显著,这种举措和做法应该得到鼓励,并在其他地方推广。在其他国家,政府干预造成了负面影响,例如鼓励发展大型农场和相应的土地投资,农田肆意扩张,农业景观失去多样性。任何仍在实施的此类政府干预都应该停止,其他地方也要引以为戒。

多种技术结合使用,可以有效减少温室气体排放,增加土壤的固碳量,使农业实现净负排放,同时保持高生产力。通过数字自动化、作物和微生物遗传学以及电气化之间的协同作用,预计在未来15年内,中耕作物农业的温室气体排放量可能会减少71%。据测算,在欧盟和美国,目前的中耕作物农业约占其温室气体总排放量的5%。自愿性和监管强制要求的生态系统服务市场正在兴起,可以推动转型进程持续取得进展,并引导政府和私营部门投资技术研发。³⁴

轻型机械可以减少土壤压实和侵蚀,而这往往是使用大型机动机械带来的后果。此外,生态农业实施作物轮作,可以将土壤侵蚀降低高达99%,使用松土机或直播机代替犁,可以尽量减少对土壤的干扰,实现免耕农业,保持永久土壤覆盖和植物物种多样化。³⁵ 这很可能是全球农业的未来发展方向,包括在低收入和中等收入国家。²² 有证据表明,将机械化与减少耕作相结合,可以兼顾生产力和土壤健康。³⁶ 然而,这种做法也面临一些挑战,为了克服这些挑战,必须开发因地制宜的解决方案。³⁷ 研究应用技术和农艺,有助于找到最适合当地农业生态条件的机械化解方案。例如,越来越多的研究涉及小型农场如何用无人机施用投入品,这项技术有许多优势:减少与农药的接触,进入过于潮湿和机器无法企及的田地作业,用于对直立作物施药施肥(避免机器运动损伤作物)。

推动对环境友好的自动化技术

规模适当的机械化理念,即机器应适应农场规模,而不是反其道而行之,³⁸ 有助于减少对环境的负面影响。例如,小型四轮或两轮拖拉机比大型拖拉机更擅长绕开农场的景观和

树木。现在处于实验阶段的小型集群机器人有可能产生环境效益，例如在提高产量的同时减少土壤压实。虽然目前正在开发的大多数农业机器人都不具备决策能力，但从长远来看，人工智能有可能让农业机器人对环境的可持续性做出贡献。例如，集成人工智能的集群机器人可以避开田间障碍，精确瞄准害虫和杂草，从而减少化学制剂的使用，保护生物多样性。

新技术的推广面临一个重大挑战：没有一定规模，其潜力就不可能充分发挥，难以持之以恒地减少对环境的负面影响和提高生产力（见第3章）。高昂的采购和运营成本是推广新技术的一个重要障碍，尤其是对小规模生产者而言，为了降低农民的经济负担，需要改进技术和创新商业模式。手机就是一个很好的例子，手机因为大规模普及降低了价格，并为智能手机的兴起铺平了道路，而智能手机越来越多地被用于精准农业。

农民本人最有资格选择适合当地农业生态条件的机械化解方案。各国政府必须创造一个有利的大环境，宣传可用的技术，并讲解如何利用这些技术实现多重目标，包括环境的可持续性。例如，粮农组织、尼泊尔农业基础设施发展与机械化促进中心和尼泊尔农业机械企业家协会联合编写了一份机械化目录，用浅显易懂的方式介绍尼泊尔市场上各种农业机械的信息，并重点推介有助于性别平等并适合小规模农业生产的机械。²⁹

一些国家已经通过立法，强制要求企业建立基于风险的尽职调查制度，以减轻农业供应链对环境和社会的不利影响。³⁹ 例如，欧盟委员会通过了一项提案，将着手制定关于企业可持续性尽职调查的指令，旨在通过全球价值链促进可持续和负责任的企业行为。企业必须发

现、防止、结束或减轻其活动对人权（如童工和工人剥削）和环境（如污染和生物多样性丧失）的不利影响。对于企业来说，这些新规则将带来法律确定性，创造一个公平的竞争环境。对消费者和投资者来说，新的规则将提供更大的透明度，有助于他们进行选择。⁴⁰

提高意识，改进宣传

总结 27 个案例研究，可以发现消费者对精准农业仍知之甚少，他们并不了解精准农业在生产力、环境可持续性和动物福利方面可以发挥的作用。事实上，尽管消费者很容易理解“低投入农业”一词及其与环境可持续性的关系，但“精准农业”尚未能引起他们的共鸣。问题的关键在于宣传。例如，一些国家不允许垂直农业生产出来的农产品使用有机产品的标签，消费者因此很难认识到垂直农业的好处。政策制定者应首先解决精确农业的立法和认证，以便清晰地向消费者宣传精准农业的优势，从而增强精准农业的商业价值以吸引投资（见第3章）。为了让精准农业充分发挥其在环境保护方面的作用，必须在农业粮食体系各个部门之间建立对话关系。²⁵ 数字通信技术可以在提高公众意识、传播信息和宣传精准农业方面发挥关键作用。■

确保农业自动化进程具有包容性并惠及所有人的政策

农业自动化面临一个主要挑战，即自动化在经营规模上更偏向大型农场，有可能对妇女、小规模生产者和青年等边缘化群体视而不见。现有的自动化技术往往价格高昂，并要求用户掌握相当高的技能，这有可能导致不平等的扩

大和数字鸿沟的加深。自动化可能造成失业的增加,让没有一技之长的工人被机器取代,这不仅会对包容性产生负面影响,还会扭曲民众对自动化的印象,否认自动化的各种好处。政策可以发挥关键作用,减轻或避免上述负面影响,确保自动化有助于农业转型并实现包容性。

通过技术和体制创新弥合技术鸿沟

新的技术进步,包括推动数字革命的各种技术,可以帮助自动化摆脱经营规模的束缚,从而更容易为所有人所用。小规模生产者采用小型机械,实现了许多农业操作的自动化(见第3章)。数字技术支持共享服务平台和共有产权,这些制度化的机制也有助于推动自动化技术的采用。⁴¹应当由农民自行选择最适合当地农业生态条件的自动化解决方案,政府的职责则是创造一个公平的竞争环境。政府可以改善农村基础设施,提供良好的法律框架,优化边境通关流程,提高服务商的知识和技能水平,包括开展商业技能培训,这些举措有助于自动化服务市场的形成。生产者协会和合作社等社会组织可以将农民组织起来,这有助于降低与小规模生产者做生意的交易成本。⁴²数字工具可以解决自动化服务市场面临的诸多挑战,并降低交易成本。政府可以建设数字连接基础设施,普及数字技能,增强数字平台上交易双方的互信,从而促进自动化工具的使用。⁴³

确保妇女从自动化中受益

自动化对妇女既有正面影响,也有负面影响,关注妇女的需求是避免负面影响的关键。²⁶妇女往往与自动化技术无缘,一部分原因是妇女的土地通常面积较小和更为分散,而且妇女很难进入市场,也很难获取信贷和技术推广服务(见第4章)。通过政策、立法和投

资,解决这些不利条件,有助于增加妇女获得自动化的机会,例如,改善妇女的土地权,帮助妇女获得信贷和技术推广服务。必须采用基于人权的监测方法,收集分类数据来衡量自动化对妇女的生计、权利和机会的影响。国家法律框架应明确要求从性别角度对监管政策的影响开展评估,并拨款实施有助于避免和减轻对妇女不利影响的措施。法律框架必须承认女性因其性别而面临特殊挑战,并采取措施应对这些挑战,包括拨付资金,通过信贷鼓励创业,提供培训(包括数字扫盲),以及帮助妇女进入农业生产资料市场和农产品销售市场。

社会习俗也会妨碍妇女采用机械化。要改变这种状况,可以尝试开展性别意识宣传运动,例如大力宣传女性作为成功农业经营者或服务商的事迹,支持以女性为主体的机械化合作社或协会。在这些合作社或协会中,妇女集体管理机器,并有机会接受技能培训和获得资金。需要开展进一步研究,以更好地了解如何改善妇女获得机械化的机会。自动化通常涉及高昂的前期成本,而女性创业者的企业往往规模较小,投资能力较弱,这对妇女的竞争力有严重影响。

由于社会地位较低,女性没有足够的话语权表达自己的需求。⁴⁴使用基于人权的监测方法,实施增强妇女权力的政策、立法和投资,可以帮助她们更好地表达自己的诉求。政府资助的研发可以重点关注对性别友好的机械化技术,使其设计符合妇女的需求。

关注农村青年,确保转型在数字时代顺利进行,且具有包容性

农业发展面临的一个主要挑战是大批农村青年离开农村,特别是那些受过高等教育的

农村青年，农业人口因此日益老龄化，农业和农业粮食体系的长期经营面临严峻挑战。农业自动化可以发挥关键作用，扭转这一趋势。农业自动化可以填补劳动力缺口，数字技术可以激发农村青年从事农业和粮食工作的兴趣，包括在农场务工，这会带来新的就业机会，而且工作条件更好，收入更高。⁴⁵

如前面几章所述，青年农民通常是第一批采用和操作自动化技术的人，部分原因是青年农民更容易获得信息技术和数字技术，如智能手机，因此他们在农业数字自动化中发挥着重要作用。²⁵ 他们在农业实践中积累了经验和知识，同时又掌握采用新技术所需的数字技能。⁴⁶ 政策应优先关注农业自动化进程中的农村青年，确保他们获得必要技能，胜任技术含量更高的新工作，目标应该是增强农村青年的能力，不仅是从事农业生产的能力，还有在整个农业粮食价值链各个环节从事技术性工作的能力。资金和政策支持、研究、开发和技术援助应伴随这一进程，以确保实现农业粮食体系的综合转型。公立教育事业可以发挥至关重要的作用，有助于实现平稳转型和公平获取新的就业机会，⁴⁷ 这一点尤为重要，因为农村青年退出农业生产很可能是一个持续的趋势，特别是在低收入和中等收入国家，但他们仍可以在农业粮食体系其他阶段另谋高就。

社区主导的农村发展倡议应让青年参与磋商、规划和决策。法律框架也可以发挥作用，例如，为地方发展创造有利的大环境，规定青年参与的最低名额，支持创建青年组织。

改善农业技术推广和农村咨询服务

由公共财政出资的农业技术推广服务一直发挥着重要作用，有助于确保农业自动化的包

容性。小规模生产者面临各种各样的挑战，其中，无法获得可靠和及时的咨询服务，是制约其生产力提升的一个主要因素。在世界各地，政府出资的农业技术推广服务是农业转型的一个基本要件，是农民获取信息的主要渠道。许多国家采取了多种多样的形式开展农业技术推广。鉴于缺少训练有素的推广员是大多数中低收入国家面临的主要问题，可以利用电子化推广开发和传播数字技术知识，以有效地补充传统推广模式的不足。电子化推广被广泛采用后，有可能催生新一代的推广服务，并开发出高度个性化的自动化解决方案。^{48, 49}

很多知识被闲置，收集这些知识，将其转化为农民喜闻乐见的形式，并通过新的媒介提供给农业生产者，这是一项迫切的任务。科学信息可以进行相应调整，从而向背景和特征迥异的生产者提供个性化的建议。本报告委托的两项技术研究总结了相关经验教训，表明数字工具有可能使技术推广和咨询服务发生革命性的变化，创新的沟通方式可以大幅度增加获得服务的机会，并帮助农民掌握相应技能，在没有他人协助的情况下也可以长期使用自动化技术。^{25, 33} 在许多地方，服务商也开展农业技术推广，例如乌干达的 Igara Tea，埃塞俄比亚、摩洛哥、塞内加尔和突尼斯的 SOWIT，以及缅甸的 Tun Yat。一些自动化解决方案本身就包括培训模块，帮助农业生产者学会如何使用服务和操作机器。物联网、录音录像、手机通话、地理信息系统、模拟建模和遥感，这些数字技术可以为有效的知识传播打开全新的局面，必须利用这些技术来填补现有的信息空白，并有效地指导农民。这也说明，除了政府资助的推广服务外，公共和私营部门的伙伴关系也发挥着重要作用，有助于农民在田间地头就能获得所需的技术支持。最后，数字工具还可以促进通过订单农业或供应链合同开展农业咨询业务。

防止对就业的负面影响

自动化可以对农村就业产生广泛的积极和消极影响（见第 4 章）。如果自动化是对市场力量的一种反应，例如由于结构转型导致的农村工资上涨；或者自动化取代的是无报酬的家庭劳动，很可能并不会造成失业，相反而是有助于填补劳动力缺口。另一方面，如果在自动化需求形成之前，政府大张旗鼓地人为地推动自动化，例如对进口机械进行补贴，很可能会造成失业和工作岗位流失，农村工资也可能下降或停止上涨。政策制定者应当谨慎，不能操之过急，在对自动化的需求形成之前就贸然地推动自动化。同时，政策制定者也不应该想当然地认为自动化会取代人类劳动力并造成失业，并以此为理由打压自动化的采用。

提供政策支持，通过一般性服务提供公共或集体产品，有助于为农业粮食体系及其他部门创造有利的大环境，这种方法最有可能实现平稳过渡，转型为高水平的自动化，而不会造成失业。这包括支持农业研发和知识转让服务（如培训和技术援助），以及建设和维护基础设施（如改善农村道路、灌溉系统、仓储基础设施和网络连接）。研发方面的巨大进步，尤其是在私营部门，使新的农场自动化解决方案的成本不断降低，农民也能负担得起。随着全球农业劳动力日益萎缩，这对于提高粮食产量来说是个好消息。

培养数字技能有助于实现包容性

农民和农业专业人士必须掌握管理农业自动化新系统的技能，并有机会在农业粮食体系中从事技术含量更高的新工作，这必须成为各国政府的工作重点。年轻人是变革的生力军，他们尤其需要掌握新技能。²⁵ 一些地方从在校

儿童抓起，因为他们可以帮助自己的父母学会数字技能。⁴¹ 农业学校不仅传授农艺和动物知识，也可以把数字技能纳入到课程之中。当今世界竞争日益激烈，获取信息对于生产者与时俱进的能力至关重要。此外，信息应该永远是一种公益产品提供信息服务则是政府的责任。有了恰当的技能 and 获取信息的途径，那些因为自动化而失业的人可以重新上阵，在农场上操作新技术，或者在农业粮食供应链的下游或上游另谋高就。与此同时，打零工的农业工人也可以掌握更好的技能，更容易找到非农就业机会，提高收入并实现收入的多元化。■

结论

农业自动化是实现可持续发展目标的关键。《2022 年粮食及农业状况》重点关注机械化和数字自动化，指出其在农业转型中极具潜力，可以提高农业粮食体系的效率、生产力、可持续性、包容性和韧性。报告分析了生产者在采用自动化技术时面临的各种制约因素，提供了关于政策、立法、干预措施和投资的指导意见，并充分考虑了不同的农业生产者（大规模与小规模、女性与男性、老人与年轻人）在不同农业生产部门（种植业、畜牧业、水产养殖业和林业）迥异的需求。

本报告还指出，农业自动化可能会导致经济、环境和社会目标之间发生冲突，如何权衡取决于具体情况。推广什么样的技术组合，什么样的政策、立法、干预和投资是恰当的，取决于经济发展水平、现有的体制、当地的农业经济条件、生产者的特点和决策者的目标。本章介绍的一系列政策和法律工具相互并不排斥。相反，这些政策和法律工具需要相辅相成，才能为负责任地采用农业自动化创造合适的条件。

在综合运用政策或法律工具以便有针对性地采取行动之前，政策制定者应注意当地在自动化采用问题上的特殊性，并了解当地面临哪些紧迫问题，如网络连接、不平等和贫困。

农民、服务商和制造商都可能出于经济动机考虑投资自动化技术，但他们的市场力量对比悬殊。重要的是，自动化技术工具琳琅满目，应由农民自行选择采用哪些技术，公共干预的主要作用是创造一个有利的大环境，让创新能够蓬勃发展，并通过措施让自动化进程尽可能具有包容性。在国内和国际上，众多利益相关方积极参与，分享自动化的知识，这是克服自动化采用障碍的有效方法。

本报告强调，旨在实现全面经济发展的公共投资和干预措施至关重要，有助于创建一个

有利的大环境。然而，不同国家的优先事项可能不尽相同，这取决于决策者的最终目标。在高收入国家，对劳动力稀缺的担忧正在推动自动化的采用，但是低收入和中等收入国家的政府可能更关心如何改善农村生计、整体粮食安全和营养。在中低收入国家，政府可以重点关注利用数字革命为弱势群体创造体面的就业机会，包括小规模生产者、妇女和青年，从而在实现可持续发展目标的过程中不让任何人掉队。这要求特别重视这些群体的具体需求，以实现包容性转型。

总之，如何利用农业自动化，为农业粮食体系的转型制定行动方案，以提高农业粮食体系的可持续性、生产力、包容性、效率和韧性，希望今年的《粮食及农业状况》能够推动有关各方就此开展对话和辩论。■

An aerial photograph of a vast green agricultural field in Ukraine. The field is divided into several large, circular irrigation zones by thin, light-colored lines. A prominent circular track or path runs through the center of the field. The overall scene is a top-down view of a well-maintained agricultural landscape.

乌克兰

圆形作物灌溉绿地鸟瞰图。

©Volodymyr Rozumii/
Shutterstock.com

附件

附件 1

案例研究摘要

100

附件 2

统计表

128

附件 1

案例研究摘要

27 个案例研究的基本研究方法

案例研究由瓦赫宁根大学及研究中心的团队和 Mariette McCampbell 搜集,旨在评估世界各地的农业自动化技术,并分析采用这些技术的障碍和动力。各个案例中的企业或组织已经开发或实施了一个或多个解决方案,且符合第 1 章中农业自动化的定义。案例研究是根据以下标准专门挑选的:(1)代表《粮食及农业状况》研究的所有区域(Ceccarelli 等人,2022)或代表“全球南方”(即东亚和东南亚、南亚、撒哈拉以南非洲、拉丁美洲及加勒比地区)(McCampbell,2022);(2)代表以下农业生产系统——种植业、畜牧业、水产养殖业和林业;(3)代表可以推广或已经推广的新型农业自动化解决方案;(4)代表大中小各类农业生产者。案例研究通过对关键人员进行访谈获得信息,辅之以二手国家数据渠道和可查文献中获得的各国农业、教育水平、自动化、政策

和立法信息。访谈采用的是在线形式,用英语或西班牙语进行,并录制了音频和视频,随后转换为书面文字进行分析。每个案例的访谈都聚焦于自动化解决方案的经济、环境和社会可持续性,以及采用该解决方案的障碍和动力。研究人员为访谈获得的数据编制了代码,以开展专题分析。

入选的 27 个案例研究可能并不能完全代表所有现有的自动化技术,但全面展示了农业自动化的全球趋势和发展动态。两份背景文件引用了案例研究的数据,其中 Ceccarelli 等人(2022)撰写的文件使用了 22 个案例,McCampbell(2022)撰写的文件使用了 10 个案例,两人都用到的案例为 5 个。

资料来源: McCampbell, 2022;¹ Ceccarelli 等人, 2022。²

案例研究摘要

ABACO



成立时间:

2013 年



当前用户数量:

未披露



运营地区:

欧洲(总部设在意大利)、
中亚和南美洲



目标部门:

种植业、林业、畜牧业

服务项目

提供实施精准农业的数字平台,收集和共享土地、农业和天气数据;也可用于实施有机农业;还可以供中央和地方政府管理辖区内的领土。

目标客户和用户

个体农民(小规模和大规模)、中央和地方政府。其他目标客户包括保险公司、土壤实验室和无人机操作员。

商业模式和财务可持续性

农民付费订阅不同级别的服务,政府通过合同采购服务,两者构成了营收的来源。服务项目可根据客户的需求量身定制,既有基础版的免费服务,也有因经营规模和其他参数而异的付费服务。

动力

生产者对精准农业技术的需求,遵守环境标准和法规的义务,面向小型生产者的免费使用期。

障碍

学会操作平台需要一定的时间,平台需要翻译成当地语言才能在其他国家推广,在一些国家(如非洲),除了智能手机普及率低和电信基础设施落后之外,如何克服语言的障碍将解决方案本地化也是一个难题。

政策的正反作用

案例研究没有发现阻碍技术采用的政策因素。有助于推动技术采用的政策包括欧盟的共同农业政策、绿色协议设定的政策目标和相应的补贴机制,以及关于农药使用的具体规定。



受访者:

Giovanna Roversi 和
Fabio Slaviero

AEROBOTICS



成立时间:

2014 年



当前用户数量:

300



运营地区:

澳大利亚、智利、秘鲁、葡萄牙、南非、西班牙和美国等 18 个国家



目标部门:

果树和坚果树种植

服务项目

使用传感器、无人机和卫星图像对病虫害进行早期检测; 提供具体地点的位置参数, 支持可变速率灌溉和施肥; 测量树木生长和状态, 测算产量, 制定收获计划。

目标客户和用户

18 个国家的大规模水果和坚果种植者, 以高收入国家为主; 以农民、果汁加工企业和零售商为客户的保险公司。

商业模式和财务可持续性

按照订阅的服务级别收费, 种植者按照公顷或英亩数每年或每月付费。可以根据客户的需求提供不同的服务套餐, 费用取决于客户所需的功能。对农作物保险公司采用另一种商业模式, 保险公司按公顷或英亩数付费, 以获得数据用于检查或审计。约 95% 的营收来自美国, 其中 40% 来自农作物保险市场。迄今为止, 获得的融资全部为私募股权投资。

动力

对可变速率施用农用化学品的需求, 以节约用量并减轻对环境的负面影响; 在美国, 农民接受技术创新和数字解决方案的积极性较高。

障碍

农民的认知不足。

政策的正反作用

美国关于无人机的法规很明确, 无人机的使用是被允许的。而在南非, 要合法合规地使用无人机, 成本极其高昂。



受访者:

Benjamin Meltzer

AGRINAPSIS



成立时间:

2020 年



当前用户数量:

不详



运营地区:

多民族玻利维亚国、哥斯达黎加、厄瓜多尔、危地马拉和墨西哥



目标部门:

全部

服务项目

提供一个专注于农业的社交媒体平台，帮助农民与专家和其他从业人员进行互动，获取知识和信息。用户对信息进行把关和评分，以确保信息的可信度和质量。农民在平台上可以开展电子商务，出售农产品，购买所需的投入品（如种子和化肥）。

目标客户和用户

主要是小农户，特别是妇女和青年，但所有农业从业者都可以从平台受益，包括学术人员、学生和农艺师。平台的电子商务功能只向农民开放，禁止大型农业企业使用。

商业模式和财务可持续性

平台是非营利性的，不收取服务费用，经费由美洲农业合作研究所资助。由于平台刚刚起步，目前还很难评估是否能长期运行下去。

动力

小规模生产者积累了大量经验，然而这些知识并没有被有效地共享。因此，Agrinapsis的目标是让这些知识在经过核实后能够被各国的农业生产者充分利用，实现知识的民主化，使其成为推动社会和环境变革的工具。Agrinapsis 是拉丁美洲首个专业性的农业社

交媒体平台，其推广得益于农民数字技能的提高，尤其是青年农民。妇女（尤其是老年妇女）在平台上聚集，众多意见领袖也发声支持，进一步提高了平台的影响力。

障碍

尽管各国和国际社会都在努力提高互联网的渗透率，偏远和农村地区仍然缺乏互联网接入。农村地区的数字文盲率仍然很高，尤其是老年人；需要充分考虑语言的需求，以保证包容性，例如，多民族玻利维亚国作为一个多民族国家，有八种官方语言。

政策的正反作用

政治上的不确定因素可能影响平台的长期经营，因为平台的经费来自美洲农业合作研究所，而该研究所由 34 个美洲国家组成。



受访者:

Santiago Velez

AQUACONNECT



成立时间:

2018 年



当前用户数量:

60000



运营地区:

印度



目标部门:

水产养殖(养虾)

服务项目

提供数字化水产养殖解决方案,用于监控和记录养殖场的状况,并将虾农与投入品供应商和农产品买家联系起来,支持虾农获得融资、保险和进入市场的渠道。Aquaconnect 还在农村地区设立了实体网点(AquaHUBs),以实现最后一公里的贯通,虾农可以在实体网点购买投入品,出售水产品,并请技术人员答疑解惑。

目标客户和用户

中小虾农。

商业模式和财务可持续性

农民可以免费使用Aquaconnect应用程序,包括电子集市和网店等功能。营收来自于向与农民有利益关系的各方收费,如银行、保险公司、加工企业和投入品供应商,每笔交易都需为中介业务和数据分析支付服务费。Aquaconnect进行了股权融资,以筹集资金扩大业务。其商业模式截止到目前是盈利的。

动力

生产力低下,市场联系低效,催生了对Aquaconnect的需求,该解决方案可以提高环

境可持续性,提升价值链的效率、可预测性和透明度。农民对数字技术的兴趣正在慢慢增加。设立实体网点推动了解决方案的采用,并可提供便利的技术支持。

障碍

农民缺乏操作数字技术的技能。物联网设备等先进技术成本较高,农民无力负担。农民可申请到的贷款金额有额度限制(每公顷土地不超过多少),筹集的资金不足以投资技术设备,甚至也不够开展水产养殖。水产养殖业的保险费率明显高于种植业。

政策的正反作用

印度政府已拨款 30 亿美元用于农业现代化,其中包括建设水产养殖业和渔业价值链。政策表明,政府有兴趣支持在价值链各个环节上实施新技术的初创企业,但是目前政府没有对水产养殖业进行补贴,也没有针对采用物联网工具的补贴。



受访者:

Sudhakar Velayutham

ATARRAYA



成立时间:

2019 年



当前用户数量:

不详



运营地区:

墨西哥和美国



目标部门:

水产养殖(养虾)

服务项目

用海运集装箱作为自动化控制的养虾场,即“虾箱”。虾箱使用传感器、机器学习、大数据、生物技术和机器人技术控制水产养殖的各项操作,包括喂食、调节水质和氧气含量。

目标客户和用户

大部分是养虾人,但也有想转行养虾的养禽人。想获得新鲜和稳定的海鲜供应的餐厅、大学、企业和消费者也是目标客户。一些餐厅已成为 Atarraya 的合作伙伴。

商业模式和财务可持续性

虾箱仍处于起步阶段,尚未实现盈利,之前依赖墨西哥政府的补贴维持运营,但目前私人投资者对这个项目的兴趣越来越大。商业模式仍未确定。由于养殖规模偏小,Atarraya 似乎并不青睐选择直接运营,而是倾向于采用订单农业的模式出租其解决方案。然而,要让订单农业这一模式对虾农有吸引力,必须做好技术转让工作。有一些中国客户表示有兴趣购买虾箱,但 Atarraya 还没有准备好跟进。

动力

世界范围内对虾的需求高涨,而大多数养虾场目前的生产方法对环境造成了破坏。现行做法往往造成巨大损失,导致疾病迅速传播和红树林被损毁,而红树林在世界各地发挥着极为重要的固碳作用。相比之下,Atarraya 的解决方案可以提高虾产量,而且具有可持续性和灵活性,例如无需靠近海洋。新生代农民极为重要,是该技术推广的希望所在,因为青年农民对实施新技术的态度更为开放。

障碍

老一代虾农仍抱有疑虑,再加上养虾场往往位于偏远地区,新的商业模式面临很大阻力。此外,道路基础设施差也是一个重要的障碍,因为解决方案的实施要求大量的物流运输。

政策的正反作用

政府拨款用于技术研发,在早期阶段起了很大的作用,但政府的资助即将终止。



受访者:

Daniel Russek

CATTLER



成立时间:

2019 年



当前用户数量:

不详



运营地区:

拉丁美洲及加勒比地区、
美国



目标部门:

畜牧业(牛肉)

服务项目

Cattler 在成立之初推出了两个相互独立的产品,分别是动物体重预测器和牛舍管理自动化,之后又开发了一个完全整合的自动化养牛场管理系统,利用传感器、卫星图像、电子标签和饲喂系统执行各项操作,包括自动饲喂、每日生长率预测、营养控制、健康扫描和疾病诊断。

目标客户和用户

服务对象主要为拥有 2000-40000 头牛的大中型肉牛养殖场,目前也已开始开发奶牛、犊牛和牧场放养业务。

商业模式和财务可持续性

Cattler 目前仍然通过销售两个独立产品获得营收,两个产品的功能可以通过移动应用或台式电脑上的软件访问。Cattler 日益重视全系统的自动化,为此开始转向免费+增值的模式:入门级的服务是免费的,但只提供最基本的功能;如果用户想让更多终端设备接入系统,或想使用更多的功能,则需要订购不同的套餐。Cattler 的用户人数不详,但据估计,在美国覆盖的牲畜为 9000 万头,在巴西为 2 亿头,在阿根廷为 5000 万头。

动力

该模式支持实现多项操作的自动化,因而能够降低成本。农民也越来越需要以更加一体化的方式进行这些作业,以提高效率。

障碍

与阿根廷相比,美国的采用率较低,受访者给出的理由是,阿根廷农民需要在国际市场上进行竞争,因此更需要与时俱进以保持竞争力。

政策的正反作用

农民比较容易申请到贷款,这是一个有利因素。政治上的不确定性构成了障碍,而在美国,保护性政策可能会让农民觉得没有必要采用新的解决方案。



受访者:

Ignacio Albornoz

COOPECAN



成立时间:

2008 年



当前用户数量:

1500



运营地区:

秘鲁



目标部门:

畜牧业（羊驼）

服务项目

包括咨询、牧场监控和动物可追溯性在内的数字服务，2020 年还推出了区块链功能，以提高和认证动物福利标准和羊驼纤维的质量，从而提高其价值。

目标客户和用户

主要是秘鲁高原的小规模饲养者，他们拥有 50-100 只羊驼，年收入为 1500-1800 美元。羊驼纤维价值链上关心产品来源的各方也是目标客户，例如经销商、供应商和消费者。

商业模式和财务可持续性

成立于 2008 年，在过去的十年中，其影响范围不断扩大，并开展了若干旨在改善工作条件、保障公平薪酬和保护动物福利的重要项目。依赖外部捐助者提供的资金维持运营，商业盈利并非其目标。

动力

羊驼纤维价值链各个环节对透明度和动物福利不断提出更高的要求，满足要求的产品商业价值更高。

障碍

偏远地区往往没有开通互联网，而且秘鲁也没有全国性的 IT 公司来支持这项业务。此外，养羊驼的农民日益老龄化，目前以妇女和老人为主。由于工作条件艰苦和地理位置偏远，农村的年轻人对养羊驼并不感兴趣。他们更倾向于去城市求学，然后找一份收入更高的工作。

政策的正反作用

政治上的不确定性导致政策频频变化，抑制了对该部门的支持力度。

受访者:

Dagoberto Fernandez

CROPIN



成立时间:

2010 年



当前用户数量:

225



运营地区:

全球（主要是印度和撒哈拉以南非洲）



目标部门:

种植业

服务项目

全方位的农场和农民管理软件平台，使用大数据分析、人工智能、物联网传感器和遥感等技术，提供价值链各个环节的分析，帮助管理者优化决策。

目标客户和用户

农业企业、种业公司、农业投入品公司、水果和蔬菜出口商、农产品交易商、银行、金融和小额贷款机构、作物保险公司、政府和发展机构。

商业模式和财务可持续性

客户分为企业和发展部门两大类。大部分营收来自企业业务（60–65%），包括从事智能农业、农业电商和供应链溯源的客户。Cropin 向政府、银行和发展机构提供本地大型农场和小农户的数据，以换取赠款，数据最终被客户用于评估小规模生产者的信誉，以便向农民提供银行贷款或保险。

动力

巨大的数据和信息鸿沟导致整个价值链信息不对称，因此迫切需要基于数据的软件。企业客户在农场开展自动化和机械化的服务，希望利用数据服务使每公顷的价值最大化，并实

现一直到农场的可追溯性。发展部门的客户则希望利用聚合数据模型和数据科学，通过基于数据的决策和政策建议引导农业发展。

障碍

数字设备缺乏，受教育水平低，数据连通性差，态度保守。

政策的正反作用

印度农业与农民福利部在印度农业数字生态系统下开发了重要的数字应用程序，以促进农民采用技术。印度国家电子农业市场是一个全国性的电商平台，旨在促进形成统一的全国农产品市场。2013 年印度推出了直接面向农民的中央惠农政策门户网站，汇集了全国各地的农业优惠措施，农民可以通过该门户网站申请政府补贴，用于采用现代农业机械。



受访者:

Arjun Goyal

EGISTIC



成立时间:

2018 年



当前用户数量:

近 1500 人



运营地区:

哈萨克斯坦



目标部门:

种植业

服务项目

监控和管理作物区域的综合解决方案, 使用遥感技术、高精度卫星导航、地理信息系统和机器学习。服务包括: 数据分析(产量预测、作物轮作历史)、田地卫星图像、数字咨询顾问、拖拉机和联合收割机的全球定位卫星监测系统、农业活动管理和农业化学土壤分析。

目标客户和用户

以大规模农业生产者为主, 但也包括食品经销商、农用化学品和化肥企业。平台的大多数注册用户年龄在 18-45 岁之间。

商业模式和财务可持续性

营收来自于订阅平台服务缴纳的年费。截至 2022 年, 平台在财务上可以自我维持。平台也吸引了外部投资。平台 2021 年获得最后一轮赠款。订阅的服务套餐包括各种技术支持, 例如网络研讨会、视频和用户指南。

动力

大规模农场主对自动化农场管理解决方案的需求日益增加, 这可以帮助他们节省农业机械的燃料, 提高农场的投资回报。

障碍

农村地区网络连接不畅。

政策的正反作用

Egistic 希望通过将其数据与政府数据进行集成, 以扩大服务规模, 但在当前的政策框架下, 没有专门适用于政府和私营部门合作的政策。



受访者:

Zhandos Kerimkulov

FOOD AUTONOMY



成立时间:

2018 年



当前用户数量:

2



运营地区:

匈牙利



目标部门:

垂直农业环境中的微型蔬菜、绿叶蔬菜、幼苗、美容植物

服务项目

提供各种作物生产技术、配方以及相应的垂直农业硬件和软件,此外还提供用于工业或科研的全尺寸远程控制模块化垂直农场解决方案。所有的技术既可以作为单项服务提供,也可以完全集成到垂直农场解决方案中。

目标客户和用户

从事育苗、研究和生产的大中小用户。

商业模式和财务可持续性

垂直农业业务所需资金目前主要来自公司的其他业务部门,即室内植物栽培照明业务部。科研农场业务获得了匈牙利政府的赠款。通过 FaaS 模式(农业即服务)代用户运营农场,通过 PaaS 模式(植物即服务)为客户提供所需的生产能力。

动力

对有机、可持续、高质量和价格合理的农产品的需求增加,对垂直农业的兴趣日益浓厚,减少能源和水的消耗,尝试在城市附近和干旱地区就地生产粮食的可行性。

障碍

前期投资成本很高。

政策的正反作用

匈牙利政府正在推动自动化和数据化农业作业。匈牙利政府虽然鼓励粮食生产的本地化,但并不直接支持垂直农业。此外,即使垂直农业在生产环境没有使用任何化学制剂,监管部门也没有将垂直农业认定为有机农业。



受访者:

Zoltan Sejpes

GARBAL



成立时间:

2017 年



当前用户数量:

超过 50 万



运营地区:

布基纳法索和马里
(很快会拓展到尼日尔)



目标部门:

畜牧业(放牧)、可耕作物

服务项目

通过一体化数字解决方案,向萨赫勒地区的小规模生产者和牧民提供高度个性化的信息和建议,包括合适的放牧场地、畜群迁移、天气状况、耕作方法和市场行情。该解决方案使用卫星和其他数据,并开设了购买饲料和销售牛奶与谷物的电子商务平台。

目标客户和用户

小规模农民、牧民、商人和牧场主,女性用户占 22-30%。

商业模式和财务可持续性

政府和私营部门的合作是基础,这有助于消除捐助者和资助者对在落后地区开发创新数字解决方案的疑虑。GARBAL 主要依靠捐助者和项目合作伙伴提供的资金。呼叫中心接听电话并根据通话时间收费,发送非结构化补充业务数据也会收取少量费用,这是营收的两个来源,营收会被重新投入到 GARBAL 的运营中。虽然有营收,目前还没有接近盈亏平衡。业务战略计划通过电子商务和数字金融创造新的收入来源。

动力

由于气候不断变化,局势动荡不安,农民和牧民的传统知识很难发挥作用,他们的生

计因此受到威胁。GARBAL 可以帮助他们通达市场,提高面对冲击的韧性和适应能力。政府和私营部门的合作极为关键,有助于推动最终用户采用解决方案。能力建设和移动电话的普及也起了推动作用,尽管大多数用户用的并不是智能手机。最后,与当地农民和牧民及其组织进行面对面的沟通至关重要,这有助于建立信任,扩大项目的覆盖面。

障碍

各国的需求不尽相同,因此必须根据每个国家的具体情况调整解决方案。一些国家政治动荡,局势紧张,是很大的挑战。而一些国家缺乏数字基础设施,如电力、互联网接入和智能手机,同样也是很大的挑战。其他挑战包括不具备基本的数字技能、对新技术的好处认知不足、数据质量不高以及缺乏数据管理。

政策的正反作用

地方政府机构的支持,如开放数据库,可以为咨询业务提供所需的内容。然而,一些国家的政治动荡和局势紧张阻碍了对新技术的投资。



受访者:

Catherine Le Come

GROBOMAC



成立时间:

2014 年



运营地区:

印度



当前用户数量:

不适用（解决方案仍处于测试阶段）



目标部门:

棉花

服务项目

提供可单人操作的电动半自动精准棉花采摘机，在不损坏作物的情况下，由具备计算机视觉和人工智能的高速机械臂采摘棉花，可以在多行种植系统中精确采摘分批开花的棉花。

目标客户和用户

首批用户应该是大中型棉花种植者，今后有可能把小农户纳入进来。长远来看，农业生产者协会、村民小组和农机租赁中心都有可能使用棉花采摘机。印度正在鼓励建立相应的服务组织，采用按次付费的模式，把采摘机提供给农场使用。采摘机在设计的时候，主要考虑了女性的生理特点，因为女性是印度棉花采摘的主要劳动力。

商业模式和财务可持续性

目前的运作主要由个人投资和赠款支持，尚未开展商业经营，未来的目标是直接向大中型种植企业销售棉花采摘机器人，更长远的目标是向个人和农机租赁中心销售。

动力

在棉花收获的旺季，劳动力短缺。

障碍

投资者尚未完全意识到这项技术的优势。此外，收回投资的周期可能会很长。

政策的正反作用

印度政府通过拨款鼓励农业创新创业，GRoboMac 收到了大约 30000 美元的拨款。印度南部的特伦甘纳邦在征集机器人服务解决方案，GRoboMac 为此提交了一份棉花采摘机器人的商业计划书。



受访者:

Manohar Sambandam

HARVEST CROO ROBOTICS



成立时间:

2013 年



当前用户数量:

不详



运营地区:

美国



目标部门:

草莓

服务项目

自主导航的采摘机器人在农场中采摘、检查、清洗和包装草莓。每个机器人有 16 支独立的“手臂”，可以同时为 16 行草莓自主作业。

目标客户和用户

草莓种植大户(>10 公顷)。

商业模式和财务可持续性

尚未商业化，资金来自私人投资者和金融机构，公共部门发挥的作用比较有限。考虑采用按次收费的商业模式，金额取决于采摘量。如果对草莓采摘机器人的需求很大，预计早期的投资者将享有优先使用权。

动力

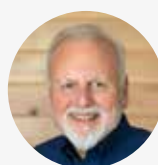
劳动力日益短缺，而且劳动力成本上升，在收获季节更是如此。因此，美国大约 70% 的草莓种植者投资了该公司。这项技术已经成功通过农场实地测试。

障碍

机器人所需的硬件和软件目前生产规模较小，需要扩大规模。

政策的正反作用

美国国家科学基金会提供了支持，但力度很有限，政策既没有充当强大的动力，也没有造成明显的障碍。



受访者:

Gary Wishnatzki

HORTIKEY



成立时间:

2015 年



当前用户数量:

未披露



运营地区:

荷兰



目标部门:

西红柿

服务项目

一个一体化的系统，包括配备摄像头的自动驾驶机器人和使用算法与人工智能的智能软件，开展日常测量，提供可靠的数据和作物测算，包括番茄的数量和成熟度，无需添加新的基础设施。数据分析的结果与气候气象数据相结合，用于预测未来 1-4 周番茄的收成，支持商业决策。

目标客户和用户

受控环境（如温室）中的大中型商业化番茄种植者。

商业模式和财务可持续性

营收来自于机器人的销售和订阅软件的月费。此外，也可签订服务合同，按月付费使用机器人和软件。目前的资金主要来自于股权融资。

动力

作物预测信息对种植者很有价值，番茄价格的变化要求对生产能力进行准确的测算，随着农场番茄种植面积扩大，需要更为专业化的信息。

障碍

一些番茄种植者对这项技术仍有疑虑，信心只能通过时间逐渐建立。

政策的正反作用

荷兰的知识和创新计划促进了对创新活动的投资。一些国家的法律禁止与其他国家共享数据，使这项技术难以推广到某些市场。



受访者:

Andreas Hofland

ICT4BXW



成立时间:

2018 年



当前用户数量:

超过 7000



运营地区:

卢旺达



目标部门:

香蕉

服务项目

提供关于香蕉生产的一系列咨询和信息服务,包括电子培训,在智能手机和非智能手机上均可使用,并结合纸质作物日历等非数字信息。收集农田的有关数据,重点是诊断和监测香蕉黄单胞菌枯萎病。种植香蕉的农民注册成为安卓应用程序用户后,可以访问相关服务并协助农业技术推广员和政府官员监测疾病。ICT4BXW 使用无人机绘制香蕉田的地图,收集品种信息和患病植株的信息。

目标客户和用户

小规模香蕉种植者、当地农技推广人员和卢旺达政府(主要是卢旺达农业与动物资源部的研究人员和技术人员)。

商业模式和财务可持续性

目前尚未盈利。服务是免费的,经费依赖德国联邦经济合作与发展部的捐款,因此不产生收入。未来,卢旺达农业部有可能投资该解决方案,并计划转向套餐服务。可能的商业模式有两种:(1)作为公益服务免费提供;(2)将这些工具纳入更大的数字生态系统,农民可支付少量费用使用这些工具,收入的一部分将用于维护 ICT4BXW 服务。ICT4BXW 与两家商业性企业 Arifu 和 VIAMO 有长期合作关系。

动力

香蕉是卢旺达保障粮食安全和收入安全的主要作物,而黄单胞菌枯萎病威胁着香蕉的生产,对相应诊断和控制的解决方案需求日益增加。此外,智能手机越来越普及,政府对在农业部门使用数字技术颇感兴趣,促进了新技术的采用。

障碍

智能手机的普及率仍然偏低,农民不掌握最基本的数字技能。

政策的正反作用

卢旺达政府正在实施有针对性的政策,促进农民采用智能手机和农业数字化技术。政府还频繁开展能力建设,提供关于数字技术开发和维护的培训。



受访者:

Julius Adewopo

IGARA TEA



成立时间:

1969 年 (2017 年开始投资数字解决方案)



运营地区:

乌干达



当前用户数量:

超过 7000



目标部门:

茶叶

服务项目

通过数字技术提供关于茶农、茶场边界、土地使用和植被的信息,跟踪、追溯和监测茶叶的生产,评估茶树健康状况,模拟生产能力,向资金出借人传递信息,制定个性化的建议,提供电子农技推广服务,帮助茶农申请信贷。未来计划用小型机械设备提高精确度,减少采茶工人的劳动强度。

目标客户和用户

小规模茶农。大约 18% 的用户是妇女和青年农民,占茶场劳动力的 65%。在茶叶加工环节,妇女和青年占劳动力的一半以上。银行和资金出借人也是目标客户。

商业模式和财务可持续性

最初由赠款资助,目前通过代茶农销售茶叶已开始产生营收。茶农是 Igara Tea 的股东,Igara Tea 负责收购茶农的茶叶,进行加工和销售。Igara Tea 提高了茶叶的附加值,作为茶农的代理在国内和国际市场上销售茶叶。数字化有助于优化采购工作,可以节省高达 70% 的账簿、笔和纸张等相关成本。收回对数字化硬件和软件的投资需要 1.5 年。当前,Igara Tea 在没有赠款的情况下,自行投资所需的硬件和软件。

动力

买家、农民和资金出借人要求更大的确定性、透明度和及时性。劳动力成本的增加也推动了采茶机的发展。

障碍

茶叶加工能力有限,阻碍了技术的推广。全球茶叶价格走低。农民没有资金购买机械。Igara Tea 正在考虑开发一个机械化共享方案。

政策的正反作用

乌干达政府决心推动技术解决方案的采用,以应对本国的发展挑战。然而,获得政府的财政支持仍然很困难。严重的官僚主义推高了成本。关于无人机使用没有明确的法规和政策。



受访者:

Hamulus Owoyesiga

IOCROPS



成立时间:

2018 年



当前用户数量:

超过 200



运营地区:

大韩民国



目标部门:

室内作物（如温室栽培西红柿和甜椒）

服务项目

自主作物管理解决方案，包括室内农场的气候监测、数据分析和决策平台、作物管理建议和预测、自动化培育和远程农场操作，可管理世界各地的农场，农场无需要专门的温室管理人员。

目标客户和用户

中大型温室种植者。据估计，大韩民国只有不到 10% 的温室为女性所有，只有不到 30% 为年轻人所有。

商业模式和财务可持续性

营收来自于销售传感器和基于网络的解决方案。ioCrops 还出租自动化温室，并负责所有温室的操作，包括气候调节、作物管理、劳动力安排和收获后的物流。ioCrops 的大部分资金来自于风投基金，政府也提供一些补贴，但金额有限。

动力

随着农场规模的扩大，对自动化解决方案的需求不断增加。温室种植的面积不断增加，使用温室的大规模生产者的数量也在增加。年轻一代对采用 IT 解决方案的态度更为开放。人工成本上升，劳动力供应减少。

障碍

一些农民对高科技解决方案仍有疑虑。另一个风险是这种技术可能淘汰小规模生产者。

政策的正反作用

大韩民国政府正大力投资高科技温室，包括培养温室操作人员，并允许 ioCrops 等公司开展实验。与此同时，政府也担心这种解决方案会损害小规模生产者的利益，因此也同时采取了措施维护传统的生产方式。



受访者:

JinHyung Cho

JUSTDIGGIT



成立时间:

2009 年



当前用户数量:

超过 70 万



运营地区:

肯尼亚和坦桑尼亚联合共和国



目标部门:

森林和草原

服务项目

提供数字和通信解决方案，包括短信息、手机应用程序、无人机、卫星图像和机器学习，促进非洲的大规模景观恢复，例如将肯尼亚马赛牧民退化的牧场变为绿色肥沃的土地。具体而言，这些解决方案可以向农民发送有关景观恢复的信息，监测树木生长和景观的长期变化，还可以计算相关的碳固存量。Justddigit 还帮助妇女销售本地草种和农作物。

目标客户和用户

自给自足的小农户和牧民。Justdiggit 还与培训讲师合作，通过他们向农民传授农林业和恢复土地绿化的知识，培训讲师一半是女性。

商业模式和财务可持续性

作为非营利组织，依靠各方的赠款和捐助。Justdiggit 与众多活跃在荷兰和非洲的媒体合作，以筹集资金和宣传新技术。Justdiggit 接受来自消费者个人、私营企业、大型机构、资助计划和家族基金会的捐赠。Justdiggit 发展稳健，在大约 7 年的时间里，员工人数从 4 人增加到 40 人。Justdiggit 希望减少对捐赠的依赖，实现技术的大规模推广。

动力

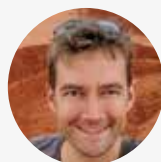
人们日益认识到气候在加速变化。该解决方案增加了作物产量和可用的水资源，对收入和生计产生了积极影响，并减少了土壤侵蚀和地表径流，有益于土壤保持肥力和水分。人们对基于自然和绿色的解决方案越来越感兴趣。

障碍

智能手机普及率很低，用户缺乏基本的数字技能，互联网接入有限，通常需要对培训讲师开展能力建设，提升他们的数字技能。

政策的正反作用

在肯尼亚，政府可以保持土地公有属性，也可以将土地分配给私人，并由私人进一步将其分割为小的地块，而土地的分割往往会引起猜疑。



受访者:

Sander de Haas

LELY**成立时间:**

1948 年

**当前用户数量:**

超过 25000

**运营地区:**

澳大利亚、欧洲和北美洲

**目标部门:**

乳业

服务项目

提供用于乳业的机器人和管理软件解决方案,由机器人定点挤奶、清扫粪便和饲喂奶牛。控制温室气体排放的牛舍管理解决方案和割草机器人也在开发之中。管理软件还采集农场运营方方面面的信息,例如动物健康和福利,并根据信息提供咨询服务。

目标客户和用户

大中型的奶牛场,但并非最大的奶牛场。

商业模式和财务可持续性

营收来自于销售解决方案和签订服务合同。Lely 还可提供融资租赁和经营租赁,推动更多的农民采用其解决方案。Lely 还申请到了荷兰和欧盟的赠款。Lely 的营收估计为 6.5 亿欧元,其中大部分会重新投入研究和创新。

动力

追求更为灵活的工作时间,希望减少繁重的体力劳动,劳动力短缺,遵守环境法规(例如要求奶牛场减排),对动物福利的关注,提供金融服务,提高能源效率和使用可再生能源。提供的解决方案集成到传统奶牛场中难度不大。

障碍

未提及。

政策的正反作用

一方面,政策上的有利因素包括涉及出台环境和动物福利的法规,提供财政补贴用于采用解决方案减少牛舍排放。另一方面,农民需要领到补贴后才会投资新技术,可能会拖延采用新技术的时间。制定保障动物自由活动和自然行为新法规正在商议之中,这意味着需要对目前的挤奶解决方案进行改造。

**受访者:**

Martijn Bruggeman

SEED INNOVATIONS



成立时间:

2019 年



当前用户数量:

1500



运营地区:

尼泊尔



目标部门:

种植业

服务项目

通过安卓应用程序 PlantSat 帮助农民利用卫星数据分析监控作物表现,例如识别水和养分的缺乏或过剩,并访问和交流农艺信息。一体化的服务包括:识别对农业生产的威胁,计算氮和植物水分,根据农场日历发送提醒,安排专家协助,提供天气信息,记录农场数据。通过提供简化的服务套餐,减少了对网络连接的需求,并降低了运营成本,例如可以离线输入数据,且无需大量的服务器空间存储数据。

目标客户和用户

基于卫星数据分析的咨询服务主要面向大中型农户,通用信息咨询服务主要面向需要了解市场行情的小农户。

商业模式和财务可持续性

解决方案目前对农民免费,未来计划面向保险公司开展数据业务,保险公司支付年费访问收集的数据,从而监控作物和农民的表现,以审查索赔的资格。大约 40% 的资金来自赠款。

动力

对网络连接的要求不高,解决方案成本低廉。

障碍

对新技术的疑虑。

政策的正反作用

尼泊尔政府对保费提供 75% 的补贴,支持低收入农民参保。此外,尼泊尔并没有制定严格的隐私保护、数据安全或知识产权的政策法规,因此这些因素不会妨碍采用。



受访者:

Suman Ghimire

SEETREE



成立时间:

2017 年



当前用户数量:

超过 3000



运营地区:

巴西、智利、希腊、墨西哥、
葡萄牙、南非、西班牙和美国
(数据分析、研究和开发在
以色列)



目标部门:

果树和坚果树种植

服务项目

通过数据智能平台提供数字解决方案, 监控树木健康, 优化水果生长, 管理库存和生产, 测算产量, 跟踪农业运营并衡量其影响。

目标客户和用户

主要是大规模种植者, 此外也面向水果合作社开展业务, 以便服务小规模种植者。

商业模式和财务可持续性

用户交纳年费, 通过网络应用程序或移动应用程序访问智能数据平台。这些服务可以帮助种植者精确使用资源, 进行库存管理, 更好地安排劳动时间。平台目前的年收入为 30-100 美元 / 公顷, 用户土地面积越大, 每公顷的费率就越低。

动力

拥有大量土地的大型种植者需要提高生产力和资源利用效率, 减少产量和市场价格波动带来的不确定性, 这方面的需求很大。对碳固存和碳交易的兴趣与日俱增。

障碍

种植者对数字技术仍怀有疑虑, 且缺乏数字知识和技能, 对解决方案在示范项目中产生的价值并没有完全领会。此外, 种植者希望 SeeTree 能提供一站式服务, 不仅通过数据化决策提供建议, 也可以帮助用户实施建议, 种植者还希望借助 SeeTree 平台与当地供应链的其他主体建立联系。在一些地区, 投入品供应商之间的市场联系并不紧密, 一些种植者也因此不会去寻求建议或实施建议, 耽误了解决方案的采用。

政策的正反作用

不适用。



受访者:

Israel Talpaz

SOWIT



成立时间:

2017 年



当前用户数量:

超过 17490



运营地区:

埃塞俄比亚、摩洛哥、塞内加尔和突尼斯



目标部门:

水果、谷物和油菜籽

服务项目

提供决策支持工具和信息分析，主要用于灌溉、施肥和产量估算。

目标客户和用户

大型农业企业和中小型农户。在摩洛哥，接受服务的农民 20% 以上是女性。SOWIT 的工作人员中也有很大一部分是女性（44%），所有员工都是青年。

商业模式和财务可持续性

按面积向用户收取年费，每公顷的价格从 10 美元到 70 美元不等，取决于所需决策支持工具的数量。用户可通过手机和联网的电脑访问多语种界面。SOWIT 成立后，通过股权融资和美国国际开发署等发展机构的赠款获得了资金，2021 年，赠款占收入的 25%。

动力

气候变化和其他因素影响了灌溉用水，优化用水的需求日益突出，因此需要一个系统来指导日常具体位置的灌溉肥料的成本也在上升，而该解决方案可以优化肥料的使用。越来越多的保险公司需要推出农民可负担的农作物保险产品。SOWIT 根据实际情况测算收益，可以替代基于农产品价格指数的保险产品。农民可以

根据预期产量为作物投保，预期产量与该农业气候区的平均产量相当。

障碍

在摩洛哥，技术进口面临壁垒，客户进行数字支付的渠道有限。

政策的正反作用

在摩洛哥，政府正在投资农业部门的创新，例如，鼓励年轻人开展农业创业，加强农业合作社的作用，以及为数字解决方案制定新的补贴。政府还特别发布了“2020-2030 绿色一代”战略，旨在将 200 万农民连接到数字平台，包括 SOWIT。另一方面，摩洛哥没有制定关于无人机使用的法规，这是该技术发展的一个障碍，SOWIT 因此转为使用卫星遥感。



受访者:

Hamza Rkha Chaham

TRASeABLE SOLUTIONS



成立时间:

2018 年



当前用户数量:

超过 2000



运营地区:

库克群岛、斐济、巴布亚新几内亚、萨摩亚、所罗门群岛、汤加和瓦努阿图



目标部门:

作物、金枪鱼和木材

服务项目

通过数字工具向农民提供有关农业行业以及其农场的信息，包括资源、库存、销售和费用。该解决方案还有助于建立市场联系。此外，TraSeable Solutions 还推出了一个专门用于金枪鱼的渔业解决方案，沿着价值链对金枪鱼进行标记和追踪，包括提供船员、运营费用、维护成本、金枪鱼渔获等信息，从而便于对船队进行管理。

目标客户和用户

用户大部分是小规模生产者，也有一些中型生产者，以及农民组织和农业综合企业（主要是出口商），妇女和青年分别约占用户的 40% 和 15%。客户主要包括对区域范围数据感兴趣的的发展机构。

商业模式和财务可持续性

农民可以免费下载使用解决方案，但农民组织、农业企业、渔业企业和加工企业需要按服务层级支付订阅费。公司也提供咨询服务，这是其收入的主要来源。公司也获得了一些赠款，用于维持经营。

动力

生产者对低成本和有效的数据收集越来越感兴趣，出口商更是如此。农民组织对能力建设和咨询服务的兴趣与日俱增。食品安全法规和可追溯性提出了合规的要求。新冠疫情提高了对数字解决方案的关注，加快了数字解决方案的采用。发展机构认为，TraSeable 有能力在区域内组织联络，开展数据收集，值得支持。

障碍

数据法规很严格，创建和管理数字解决方案的难度很大。农民不掌握基本的数字技能。

政策的正反作用

未提及。



受访者:

Kenneth Katafono

TROTRO TRACTOR



成立时间:

2016 年



当前用户数量:

75000



运营地区:

贝宁、加纳、尼日利亚、多哥、
赞比亚和津巴布韦



目标部门:

可耕作物

服务项目

通过数字租赁平台，在小规模生产者与农业机械设备和租赁服务商之间进行匹配。最近，一批无人机机主已经开始提供测绘和喷洒服务。所有机械都配备了 TROTRO Tractor 的物联网跟踪设备。

目标客户和用户

以小规模农户为主，也有中大型农户，从事订单农业的公司也逐渐成为用户。几乎 40% 的用户是女性，TROTRO Tractor 希望继续提高这一比例。

商业模式和财务可持续性

收入主要通过收取介绍费，每撮合一项农业机械承包服务，收取该笔交易金额的 10%。其他收入来自销售物联网全球卫星导航系统追踪装置，机械设备的产权人想通过 TROTRO Tractor 平台开展出租业务，必须购买该追踪装置。TROTRO Tractor 在其运营的所有国家都实现了盈利，唯一的例外是加纳，可能是因为那里只有大约 40% 的注册用户是固定用户。TROTRO Tractor 在一定程度上仍依赖赠款，主要用于拓展业务。

动力

大多数小农户无力购买拖拉机，他们如果要实现机械化，只能租用。TROTRO Tractor 平

台可以提供透明和可靠的服务，而这是传统的租赁市场几乎不可能做到的。越来越多的女性农民开始使用这项服务，因为在平台上她们不会受到基于传统观念的歧视。青年农民也更偏爱这个平台，因为他们往往更有活力，更愿意尝试新生事物。一些年轻人通过培训成为了机器操作员。新冠疫情加速了农业的数字化，促进了平台的采用。农民为了获得资金、信贷和保险，对准确的土地数据需求日益增长，这推动了无人机的使用。

障碍

燃料价格上涨，使得一些农民无力负担机械服务；操作员想购置机器，然后出租给农民，但没有资金，也申请不到贷款。落后的道路基础设施会阻碍机械的移动，很难跨地区开展服务。

政策的正反作用

政府向农民提供补贴和其他激励政策，用于生产主粮作物。政府正在投资基础设施和数字技术，并鼓励机械化。



受访者:

Kamal Yakub

TUN YAT

**成立时间:**

2017 年

**当前用户数量:**

超过 20000

**运营地区:**

缅甸

**目标部门:**

主要是大米、绿豆、芝麻、花生和玉米

服务项目

在缅甸三角洲和干旱地区提供机械化服务。Tun Yat 拥有自己的拖拉机车队,并在有机械出租的人和需要租用机械的农民之间充当介绍人。

目标客户和用户

主要是小规模生产者,但也有中等规模的农民。用户大约 30% 是女性,25-30% 是 30 岁以下的年轻人。

商业模式和财务可持续性

按面积或按小时数收取服务费。出租自营机械是利润最高的业务,而中介业务的利润相对较低。Tun Yat 还在东南亚承担一些研究项目,也能带来一些收入。

动力

农民无力购买农业机械,传统的机械租赁市场不够可靠,手机和智能手机的日益普及。

障碍

原料和燃料的价格上涨,平台用户一旦相互认识,有可能绕过 Tun Yat 直接交易,用户数字技能较低,网络连接欠佳,缺乏信任(例如面对移动支付),需要开展技术指导和能力建设。

政策的正反作用

缅甸政府很重视数字化,但当前政局不稳,阻碍了创新和投资。此外,与数字化和数据使用相关的现行政策侧重于网络安全和监控,这也可能会减缓机械化的采用速度。

**受访者:**

Hujjat Nadarajah

URBANAGROW



成立时间:

2019 年



当前用户数量:

不详



运营地区:

智利



目标部门:

绿叶蔬菜

服务项目

提供在高度受控环境下开展模块化垂直农业的解决方案，主要用于种植绿叶蔬菜，如莴苣和罗勒。农场使用 LED 灯和传感器控制温度和湿度，此外还通过水循环系统最大限度地减少水的消耗。产量可以根据客户的需求进行调整。

目标客户和用户

食品供应链末端的所有经营者，包括零售商、超市、餐厅和消费者，偶尔还有政府机构。他们希望生产新鲜的叶菜用于销售或供自己消费。

商业模式和财务可持续性

仍处于起步阶段，但很快就会商业化。UrbanaGrow 得到了国际合作者的支持，如德国弗劳恩霍夫应用研究促进协会。UrbanaGrow 计划销售受控环境下的模块化农场，提供作物生长所需的一切条件，可以根据每个客户需要的蔬菜类型和数量进行生产。

动力

对新鲜农产品的需求不断增加，尤其是在因气候条件而无法从事农业的偏远地区。对具有环境可持续性、高质量、安全和新鲜农产品的需求日益增长。5G 的日益普及将起到促进作用，因为该解决方案需要良好的网络连接。

障碍

一些农业生产者和消费者对设施农业仍持怀疑态度，也不了解气候变化和其他环境问题的紧迫性，从而认识不到这项业务的附加价值。

政策的正反作用

政府提高了农业环境标准，推动了新技术的采用。然而，关于农用化学品使用的法规并不明确，使竞争对手能够牺牲食品质量，以很低的成本生产食品。



受访者:

Maricruz Larrera 和
Eduardo Vásquez

ZLTO**成立时间:**

2013 年

**当前用户数量:**

13000

**运营地区:**

荷兰

**目标部门:**

园艺、畜牧(包括奶制品)和可耕作物

服务项目

提供数字化和数据管理的技术援助和咨询服务。ZLTO(南方农业和园艺组织)还与荷兰企业管理局合作,将农民与供应商联系起来,并支持有利于农民的创新进程。精准农业和畜牧业是其核心业务。

目标客户和用户

ZLTO 的会员,主要用于园艺、养猪、乳制品生产和种植可耕作物。

商业模式和财务可持续性

ZLTO 并不销售解决方案,因此这一条并不适用。

动力

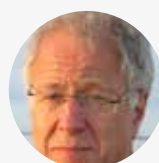
青年农民对信息和通信技术有很强的兴趣,并能娴熟地使用。劳动力供应是另一个因素,非熟练劳动力短缺,推动了机器人和自动化的采用,而大量高技能劳动力希望使用数字技术开展工作。

障碍

农民没有充分认识到投资机械和数字技术的好处。投资新设备,参加培训学习操作技能,这是否能带来财务回报存在不确定性。

政策的正反作用

没有发现与政策相关的障碍。为了推动采用,ZLTO 正在开展多个示范项目,内容包括精准农业、自动化和机器人技术。欧盟也在推动出台农业数据共享政策,并考虑将农业数据作为公共产品向公众开放。

**受访者:**Peter Paree (ZLTO) 和
Folkwin Polemen(荷兰企业管理局)

附件 2

统计表

表 A2.1 每 1000 公顷耕地拖拉机台数，最新年份数据

国家/地区	年份	拖拉机 (台)	可耕地 (千公顷)	每1000公顷耕地 拖拉机台数
世界				
非洲				
北非				
阿尔及利亚	2008	104 529	7 489	14.0
埃及*	2009	110 304	2 884	38.2
利比亚	2000	39 733	1 815	21.9
摩洛哥	1999	43 226	8 818	4.9
突尼斯*	2008	42 783	2 835	15.1
西撒哈拉	1975	11	2	5.5
撒哈拉以南非洲				
东非				
布隆迪	1992	170	930	0.2
吉布提	2006	6	1	4.6
厄立特里亚	2000	463	560	0.8
肯尼亚	2002	12 844	5 091	2.5
马达加斯加	2004	550	2 950	0.2
马拉维	1968	692	1 800	0.4
毛里求斯	1968	283	100	2.8
马约特岛	2003	14	7	1.9
莫桑比克	1970	4 193	2 785	1.5
卢旺达	2002	56	1 116	0.1
留尼汪岛	2005	2 941	35	84.0
塞舌尔	1974	30	1	30.0
索马里	2006	1 371	1 140	1.2
乌干达	1977	2 076	4 023	0.5
坦桑尼亚联合共和国	2002	21 207	8 600	2.5
赞比亚	1987	5 628	2 568	2.2
津巴布韦	1997	22 496	3 500	6.4
中非				
安哥拉	1971	8 108	2 900	2.8
喀麦隆	1991	508	5 950	0.1
中非共和国	1969	56	1 760	0.0
乍得	1965	27	2 897	0.0
刚果	1974	647	526	1.2
刚果民主共和国	1971	1 062	6 470	0.2
圣多美和普林西比	1971	117	1	117.0



表 A2.1 (续)

国家/地区	年份	拖拉机 (台)	可耕地 (千公顷)	每1000公顷耕地 拖拉机台数
南部非洲				
博茨瓦纳	2008	3 371	279	12.1
斯威士兰	2007	1 550	178	8.7
莱索托	1995	2 000	320	6.3
南非	2004	63 200	13 300	4.8
西非				
阿森松岛、圣赫勒拿岛和 特里斯坦-达库尼亚岛	1996	12	4	3.0
贝宁	1998	182	2 250	0.1
布基纳法索	1995	1 933	3 380	0.6
佛得角	2004	56	48	1.2
科特迪瓦	2001	8 981	2 800	3.2
冈比亚*	2009	100	428	0.2
加纳	2005	1 807	4 076	0.4
几内亚	2000	5 388	2 149	2.5
几内亚比绍	1996	19	270	0.1
马里	2007	1 300	5 808	0.2
毛里塔尼亚	2006	390	400	1.0
尼日尔*	2006	375	14 137	0.0
尼日利亚	2007	24 800	37 000	0.7
塞内加尔	2004	645	2 987	0.2
塞拉利昂	1997	81	484	0.2
多哥*	2008	159	2 340	0.1
美洲				
拉丁美洲及加勒比				
加勒比				
安提瓜和巴布达	1976	228	3	76.0
巴哈马	1996	98	6	16.3
巴巴多斯	1989	577	16	36.1
英属维尔京群岛	1987	3	3	1.0
古巴	2007	72 602	3 573	20.3
多米尼克	1968	54	7	7.7
多米尼加共和国*	2009	51	800	0.1
格林纳达	1999	12	1	12.0
瓜德罗普	2005	853	19	44.9
海地	1998	146	900	0.2
牙买加	1970	1 745	145	12.0
马提尼克岛	2005	873	10	87.3
蒙特塞拉特岛	1987	12	2	6.0
波多黎各	2007	3 255	37	88.2



表 A2.1 (续)

国家/地区	年份	拖拉机 (台)	可耕地 (千公顷)	每1000公顷耕地 拖拉机台数
圣基茨和尼维斯*	2009	26	4	6.5
圣卢西亚	2007	14	2	5.8
圣文森特和格林纳丁斯	2003	112	2	56.0
特立尼达和多巴哥	2004	5 129	26	197.3
美属维尔京群岛	2007	119	1	119.0
中美洲				
伯利兹	1985	940	43	21.9
哥斯达黎加	1973	5 432	283	19.2
萨尔瓦多	1971	2 642	488	5.4
危地马拉	1970	3 150	1 100	2.9
洪都拉斯	2000	5 200	1 068	4.9
墨西哥	2007	238 830	23 519	10.2
尼加拉瓜	1997	2 700	1 750	1.5
巴拿马	2000	8 066	548	14.7
南美洲				
阿根廷	2002	244 320	27 862	8.8
多民族玻利维亚国	2000	6 000	3 144	1.9
巴西	2006	788 053	48 914	16.1
智利	2007	53 915	1 262	42.7
哥伦比亚	1997	21 000	2 539	8.3
厄瓜多尔	2000	14 652	1 616	9.1
法属圭亚那	2005	317	12	26.4
圭亚那	1977	3 401	422	8.1
巴拉圭	2008	25 823	3 757	6.9
秘鲁	1995	13 191	3 740	3.5
苏里南*	2009	1 037	58	17.9
乌拉圭	2008	36 465	1 826	20.0
委内瑞拉(玻利瓦尔共和国)	1977	33 888	2 964	11.4
北美洲				
百慕大	1998	45	0	112.5
加拿大	2006	733 182	39 283	18.7
美国	2007	4 389 812	161 780	27.1
亚洲				
中亚				
哈萨克斯坦	2007	40 228	28 641	1.4
吉尔吉斯斯坦	2008	24 445	1 280	19.1
塔吉克斯坦	2008	15 951	741	21.5
土库曼斯坦	1993	52 304	1 586	33.0



表 A2.1 (续)

国家/地区	年份	拖拉机 (台)	可耕地 (千公顷)	每1000公顷耕地 拖拉机台数
东亚				
中国*	2000	13 688 736	119 666	114.4
中国香港特别行政区*	1996	4	6	0.7
中国大陆*	2009	21 024 788	121 385	173.2
朝鲜民主主义人民共和国	1984	67 500	2 285	29.5
日本	2005	1 910 724	4 360	438.2
蒙古	2008	3 232	1 197	2.7
大韩民国	2008	253 531	1 565	162.0
中国台湾省	2009	47 004	595	79.0
东南亚				
文莱达鲁萨兰国	1983	72	3	24.0
柬埔寨	2008	4 611	3 700	1.2
印度尼西亚	2002	4 097	20 081	0.2
老挝人民民主共和国	1981	664	780	0.9
马来西亚	1995	43 295	901	48.1
缅甸*	2009	160 506	10 794	14.9
菲律宾*	2002	1 528 053	4 935	309.6
泰国	2002	697 956	15 389	45.4
东帝汶	1997	90	127	0.7
越南	2000	162 746	6 200	26.2
南亚				
阿富汗	2009	223	7 793	0.0
孟加拉国	2006	3 000	7 880	0.4
不丹	2008	136	100	1.4
印度*	2003	2 812 200	159 799	17.6
伊朗伊斯兰共和国	2007	308 422	16 869	18.3
尼泊尔*	2008	37 872	2 220	17.1
巴基斯坦	2006	439 741	30 320	14.5
斯里兰卡	1982	13 976	857	16.3
西亚				
亚美尼亚*	2009	14 777	449	32.9
阿塞拜疆	2009	21 542	1 874	11.5
巴林*	2007	21	1	15.0
塞浦路斯	2003	11 717	112	104.6
格鲁吉亚*	2007	40 100	463	86.6
伊拉克	2001	72 775	4 300	16.9
以色列*	2009	21 591	304	71.0
约旦	2008	5 483	150	36.7



表 A2.1 (续)

国家/地区	年份	拖拉机 (台)	可耕地 (千公顷)	每1000公顷耕地 拖拉机台数
科威特	2008	109	11	9.6
黎巴嫩	1999	8 256	129	64.0
阿曼	2004	201	29	6.9
巴勒斯坦	2008	7 756	83	93.4
卡塔尔	2005	73	12	6.3
沙特阿拉伯	1998	9 792	3 637	2.7
阿拉伯叙利亚共和国	2008	109 890	4 699	23.4
土耳其*	2008	1 070 746	21 555	49.7
阿拉伯联合酋长国	2000	380	60	6.3
也门	2000	6 340	1 545	4.1
欧洲				
东欧				
白俄罗斯	2009	48 100	5 544	8.7
保加利亚	2008	53 100	3 088	17.2
捷克	2007	83 813	2 626	31.9
匈牙利*	2005	128 250	4 601	27.9
波兰	2009	1 577 290	12 066	130.7
摩尔多瓦共和国*	2009	35 984	1 817	19.8
罗马尼亚	2009	176 841	8 789	20.1
俄罗斯联邦	2009	329 980	121 649	2.7
斯洛伐克	2008	21 372	1 382	15.5
乌克兰*	2009	369 131	32 478	11.4
北欧				
丹麦	2005	113 402	2 332	48.6
爱沙尼亚	2006	33 744	559	60.4
芬兰	2005	175 232	2 237	78.4
冰岛	2009	11 432	124	92.2
爱尔兰	2005	174 800	1 184	147.6
拉脱维亚	2007	59 562	1 188	50.1
立陶宛*	2009	118 041	2 054	57.5
挪威	2005	132 673	862	153.9
瑞典	2005	159 590	2 687	59.4
大不列颠及北爱尔兰联合王国	1989	509 780	6 702	76.1
南欧				
阿尔巴尼亚*	2009	7 883	609	12.9
安道尔	2009	353	1	458.4
波斯尼亚和黑塞哥维那	1996	29 000	900	32.2
克罗地亚	2002	4 242	858	4.9
希腊	2006	259 613	2 584	100.5



表 A2.1 (续)

国家/地区	年份	拖拉机 (台)	可耕地 (千公顷)	每1000公顷耕地 拖拉机台数
意大利	2002	1 754 401	8 287	211.7
马耳他*	2002	2 012	9	223.6
北马其顿	2007	53 606	431	124.4
葡萄牙	2005	176 394	1 305	135.1
塞尔维亚	2008	5 844	2 661	2.2
斯洛文尼亚*	2005	108 461	176	616.3
西班牙*	2009	1 320 599	12 497	105.7
西欧				
奥地利*	2005	432 177	1 381	313.0
比利时	2005	95 010	843	112.7
法国	2005	1 176 425	18 378	64.0
德国*	2009	681 200	11 945	57.0
列支敦士登	1990	446	4	111.5
卢森堡*	2009	6 527	62	105.7
荷兰	2005	144 600	1 111	130.2
瑞士*	2009	163 600	406	403.0
大洋洲				
澳大利亚和新西兰				
澳大利亚	1974	332 560	14 778	22.5
新西兰	1986	81 441	2 585	31.5
美拉尼西亚				
斐济	2008	5 983	169	35.4
新喀里多尼亚	2002	1 941	7	285.4
巴布亚新几内亚	1997	1 160	197	5.9
所罗门群岛	1990	8	11	0.7
瓦努阿图	1971	35	15	2.3
密克罗尼西亚				
关岛*	2007	84	1	84.0
基里巴斯	1975	14	2	7.0
北马里亚纳群岛	2007	99	0	396.0
玻利尼西亚				
美属萨摩亚	2003	36	4	9.3
库克群岛	1998	165	2	82.5
法属波利尼西亚	1995	273	3	91.0
纽埃	1984	10	1	10.0
萨摩亚	2002	94	13	7.2
汤加	2004	243	15	16.2

注：表内收集数据包含三种类型的拖拉机（全轮式、履带式 and 铺轨式拖拉机）；星号（*）标注国家在 2000 年后还包含了第四种类型拖拉机（手扶拖拉机）的数据。

注释

术语表

1 Klerkx, L., Jakku, E. & Labarthe, P. 2019. A review of social science on digital agriculture, smart farming and agriculture 4.0: New contributions and a future research agenda. *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences*, 90–91: 100315. <https://doi.org/10.1016/j.njas.2019.100315>

2 Schroeder, K., Lampietti, J. & Elabed, G. 2021. *What's cooking: Digital transformation of the agrifood system*. Washington, DC, World Bank. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/35216>

3 Birner, R., Daum, T. & Pray, C. 2021. Who drives the digital revolution in agriculture? A review of supply-side trends, players and challenges. *Applied Economic Perspectives and Policy*, 43(4): 1260–1285. <https://doi.org/10.1002/aepp.13145>

4 Santos Valle, S. & Kienzie, J. 2020. *Agriculture 4.0 – Agricultural robotics and automated equipment for sustainable crop production*. Integrated Crop Management No. 24. Rome, FAO. www.fao.org/3/cb2186en/CB2186EN.pdf

5 FAO. 2016. *Sustainable agricultural mechanization*. Fact Sheet. Rome. www.fao.org/3/i6167e/i6167e.pdf

6 FAO & AUC (African Union Commission). 2018. *Sustainable agricultural mechanization: A framework for Africa*. Addis Ababa. www.fao.org/3/CA1136EN/ca1136en.pdf

7 FAO. 2021. *The State of Food and Agriculture 2021. Making agrifood systems more resilient to shocks and stresses*. Rome. <https://doi.org/10.4060/cb4476en>

8 Lowenberg-DeBoer, J. 2022. *Economics of adoption for digital automated technologies in agriculture*. Background paper for *The State of Food and Agriculture 2022*. FAO Agricultural Development Economics Working Paper 22-10. Rome, FAO.

9 Ceccarelli, T., Chauhan, A., Rambaldi, G., Kumar, I., Cappello, C., Janssen, S. & McCampbell, M. 2022. *Leveraging automation and digitalization for precision agriculture: Evidence from the case studies*. Background paper for *The State of Food and Agriculture 2022*. FAO Agricultural Development Economics Technical Study No. 24. Rome, FAO.

10 FAO. 2017. *Conservation agriculture*. Fact Sheet. Rome. www.fao.org/3/i7480en/i7480EN.pdf

11 ISPA (International Society of Precision Agriculture). 2021. Precision Ag Definition. In: *ISPA*. Monticello, IL, USA. Cited 20 December 2021. www.ispag.org/about/definition

12 Lowenberg-DeBoer, J., Huang, I.Y., Grigoriadis, V. & Blackmore, S. 2020. Economics of robots and automation in field crop production. *Precision Agriculture*, 21(2): 278–299. <https://doi.org/10.1007/s11119-019-09667-5>

13 Rose, D. 2022. *Agricultural automation: the past, present and future of adoption*. *The State of Food and Agriculture 2022*, background paper. Internal document.

14 McCampbell, M. 2022. *Agricultural digitalization and automation in low- and middle-income countries: Evidence from ten case studies*. Background paper for *The State of Food and Agriculture 2022*. FAO Agricultural Development Economics Technical Study No. 25. Rome, FAO.

第 1 章

1 ISPA. 2021. Precision Ag Definition. In: *ISPA*. Monticello, IL, USA. Cited 20 December 2021. www.ispag.org/about/definition

2 Mazoyer, M. & Roudart, L. 2006. *A history of world agriculture: From the Neolithic Age to the current crisis*. New York, NYU Press.

3 Pingali, P. 2007. Chapter 54 Agricultural mechanization: Adoption patterns and economic impact. In: R. Evenson & P. Pingali, eds. *Handbook of agricultural economics*, pp. 2779–2805. Amsterdam, Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S1574-0072\(06\)03054-4](https://doi.org/10.1016/S1574-0072(06)03054-4)

4 Hurt, R.D. 1982. *American farm tools: From hand power to steam power*. Sunflower University Press. Manhattan, KS, USA.

5 Daum, T., Huffman, W. & Birner, R. 2018. *How to create conducive institutions to enable agricultural mechanization: A comparative historical study from the United States and Germany*. Economics Working Paper. Ames, USA, Department of Economics, Iowa State University. https://lib.dr.iastate.edu/econ_workingpapers/47

6 Johnson, D.G. 2000. Population, food, and knowledge. *The American Economic Review*, 90(1): 1–14. www.jstor.org/stable/117278

7 Michaels, G., Rauch, F. & Redding, S.J. 2012. Urbanization and structural transformation. *The Quarterly Journal of Economics*, 127(2): 535–586. www.jstor.org/stable/23251993

- 8 Gollin, D., Parente, S. & Rogerson, R. 2002. The role of agriculture in development. *The American Economic Review*, 92(2): 160–164. www.jstor.org/stable/3083394
- 9 Lewis, W.A. 1954. Economic development with unlimited supplies of labour. *The Manchester School*, 22(2): 139–191. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9957.1954.tb00021.x>
- 10 USDA Economic Research Service. 2021. Agriculture and its related industries provide 10.3 percent of U.S. employment. In: USDA. Washington, DC. Cited 22 April 2022. www.ers.usda.gov/data-products/chart-gallery/gallery/chart-detail/?chartId=58282
- 11 Lowenberg-DeBoer, J. & Erickson, B. 2019. Setting the record straight on precision agriculture adoption. *Agronomy Journal*, 111(4): 1552–1569. <https://doi.org/10.2134/agronj2018.12.0779>
- 12 Kumar, P., Lorek, T., Olsson, T.C., Sackley, N., Schmalzer, S. & Laveaga, G.S. 2017. Roundtable: New Narratives of the Green Revolution. *Agricultural History*, 91(3): 397–422. https://www.academia.edu/36689104/Roundtable_New_Narratives_of_the_Green_Revolution_Agricultural_History_91_3_Summer_2017_pp_397_422
- 13 Shiva, V. 1991. *The violence of the green revolution: Third World agriculture, ecology and politics*. London, Zed Books.
- 14 FAO. 2016. *Sustainable agricultural mechanization*. Fact Sheet. Rome. www.fao.org/3/i6167e/i6167e.pdf
- 15 Santos Valle, S. & Kienzie, J. 2020. *Agriculture 4.0 – Agricultural robotics and automated equipment for sustainable crop production*. Integrated Crop Management No. 24. Rome, FAO. www.fao.org/3/cb2186en/CB2186EN.pdf
- 16 Gan, H. & Lee, W.S. 2018. Development of a navigation system for a smart farm. *IFAC-PapersOnLine*, 51(17): 1–4. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.051>
- 17 Lowenberg-DeBoer, J., Yuelu Huang, I., Grigoriadis, V. & Blackmore, S. 2020. Economics of robots and automation in field crop production. *Precision Agriculture*, 21(2): 278–299. <https://doi.org/10.1007/s11119-019-09667-5>
- 18 Trendov, N.M., Varas, S. & Zeng, M. 2019. *Digital technologies in agriculture and rural areas – Status report*. Rome, FAO. www.fao.org/3/ca4985en/CA4985EN.pdf
- 19 FAO. 2022. FAOSTAT: Employment Indicators: Agriculture. In: FAO. Rome. Cited 6 February 2022. www.fao.org/faostat/en/#data/OEA
- 20 Charlton, D., Hill, A.E. & Taylor, E.J. 2022. *Automation and social impacts: winners and losers*. Background paper for *The State of Food and Agriculture 2022*. FAO Agricultural Development Economics Working Paper 22-09. Rome, FAO.
- 21 Silva, J.V., Baudron, F., Reidsma, P. & Giller, K.E. 2019. Is labour a major determinant of yield gaps in sub-Saharan Africa? A study of cereal-based production systems in Southern Ethiopia. *Agricultural Systems*, 174: 39–51. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.04.009>
- 22 Baudron, F., Misiko, M., Getnet, B., Nazare, R., Sariah, J. & Kaumbutho, P. 2019. A farm-level assessment of labor and mechanization in Eastern and Southern Africa. *Agronomy for Sustainable Development*, 39(2): 17. <https://doi.org/10.1007/s13593-019-0563-5>
- 23 Diao, X., Cossar, F., Houssou, N. & Kolavalli, S. 2014. Mechanization in Ghana: Emerging demand, and the search for alternative supply models. *Food Policy*, 48: 168–181. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2014.05.013>
- 24 Fuglie, K., Gautam, M., Goyal, A. & Maloney, W.F. 2019. *Harvesting prosperity: Technology and productivity growth in agriculture*. Washington, DC, World Bank. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/32350>
- 25 Lowder, S.K., Sánchez, M.V. & Bertini, R. 2019. *Farms, family farms, farmland distribution and farm labour: What do we know today?* FAO Agricultural Development Economics Working Paper No. 19-08. Rome, FAO. www.fao.org/3/ca7036en/ca7036en.pdf
- 26 Takeshima, H. & Vos, R. 2022. *Agricultural mechanisation and child labour in developing countries*. Background Study. Rome, FAO. www.fao.org/3/cb8550en/cb8550en.pdf
- 27 Johnston, D., Stevano, S., Malapit, H.J., Hull, E. & Kadiyala, S. 2018. Review: Time use as an explanation for the agri-nutrition disconnect: Evidence from rural areas in low and middle-income countries. *Food Policy*, 76: 8–18. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2017.12.011>
- 28 Daum, T. & Birner, R. 2021. The forgotten agriculture-nutrition link: farm technologies and human energy requirements. *Food Security*. <https://doi.org/10.1007/s12571-021-01240-1>

- 29 Ogwuiké, P., Rodenburg, J., Diagne, A., Agboh-Noameshie, A.R. & Amovin-Assagba, E. 2014. Weed management in upland rice in sub-Saharan Africa: impact on labor and crop productivity. *Food Security*, 6(3): 327–337. <https://doi.org/10.1007/s12571-014-0351-7>
- 30 Castro, Á., Pereira, J.M., Amiama, C. & Bueno, J. 2015. Typologies of dairy farms with automatic milking system in northwest Spain and farmers' satisfaction. *Italian Journal of Animal Science*, 14(2): 3559. <https://doi.org/10.4081/ijas.2015.3559>
- 31 Hansen, B.G. & Stræte, E.P. 2020. Dairy farmers' job satisfaction and the influence of automatic milking systems. *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences*, 92(1): 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.njas.2020.100328>
- 32 Taylor, J.E. & Charlton, D. 2018. *The farm labor problem: A global perspective*. Amsterdam, Elsevier Academic Press.
- 33 Daum, T. & Kirui, O. 2021. Mechanization along the value chain. In: J. von Braun, A. Admassie, S. Hendriks, G. Tadesse & H. Baumüller, eds. *From potentials to reality: Transforming Africa's food production*. Peter Lang, Bern.
- 34 Maucorps, A., Münch, A., Brkanovic, S., Schuh, B., Dwyer, J., Vigani, M., Khafagy, A. et al. 2019. *Research for AGRI committee - The EU farming employment: current challenges and future prospects*. Study and Annex. In: *Think Tank – European Parliament*. Cited 17 February 2022. [www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/IPOL_STU\(2019\)629209](http://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/IPOL_STU(2019)629209)
- 35 National Farmers' Union. 2019. *The future of food 2040*. Stoneleigh, UK. www.nfuonline.com/archive?treeid=116020
- 36 Charlton, D., Taylor, J.E., Vougioukas, S. & Rutledge, Z. 2019. Can wages rise quickly enough to keep workers in the fields? *Choices*, 34(2): 1–7. www.choicesmagazine.org/choices-magazine/submitted-articles/can-wages-rise-quickly-enough-to-keep-workers-in-the-fields
- 37 Ali, I., Nagalingam, S. & Gurd, B. 2017. Building resilience in SMEs of perishable product supply chains: enablers, barriers and risks. *Production Planning & Control*, 28(15): 1236–1250. <https://doi.org/10.1080/09537287.2017.1362487>
- 38 Bourlakis, M., Maglaras, G., Aktas, E., Gallear, D. & Fotopoulos, C. 2014. Firm size and sustainable performance in food supply chains: Insights from Greek SMEs. *International Journal of Production Economics*, 152: 112–130. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.12.029>
- 39 Jones, K.E., Patel, N.G., Levy, M.A., Storeygard, A., Balk, D., Gittleman, J.L. & Daszak, P. 2008. Global trends in emerging infectious diseases. *Nature*, 451: 990–993. <https://doi.org/10.1038/nature06536>
- 40 CSAM (Centre for Sustainable Agricultural Mechanization) & ESCAP (Economic and Social Commission for Asia and the Pacific). 2020. *Mechanization solutions for improved livestock management and prevention & control of zoonotic diseases*. Beijing. www.un-csam.org/sites/default/files/2021-01/ENG.pdf
- 41 Ali, I. & Aboelmaged, M.G.S. 2021. Implementation of supply chain 4.0 in the food and beverage industry: perceived drivers and barriers. *International Journal of Productivity and Performance Management*.
- 42 Daum, T. 2021. Farm robots: ecological utopia or dystopia? *Trends in Ecology & Evolution*, 36(9): 774–777. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2021.06.002>
- 43 Streed, A., Tomlinson, B., Kantar, M. & Raghavan, B. 2021. How sustainable is the smart farm? Paper presented at LIMITS 2021, 14–15 June 2021. <https://computingwithinlimits.org/2021/papers/limits21-streed.pdf>
- 44 Schillings, J., Bennett, R. & Rose, D.C. 2021. Exploring the potential of precision livestock farming technologies to help address farm animal welfare. *Frontiers in Animal Science*, 2: 639678. <https://doi.org/10.3389/fanim.2021.639678>
- 45 Berckmans, D. 2014. Precision livestock farming technologies for welfare management in intensive livestock systems. *Scientific and Technical Review – OIE*, 33(1): 189–196.
- 46 Werkheiser, I. 2018. Precision livestock farming and farmers' duties to livestock. *Journal of Agricultural and Environmental Ethics*, 31: 181–195. <https://doi.org/10.1007/s10806-018-9720-0>
- 47 Bos, J.M., Bovenkerk, B., Feindt, P.H. & van Dam, Y.K. 2018. The quantified animal: Precision livestock farming and the ethical implications of objectification. *Food Ethics*, 2(1): 77–92. <https://doi.org/10.1007/s41055-018-00029-x>
- 48 Miles, C. 2019. The combine will tell the truth: On precision agriculture and algorithmic rationality. *Big Data & Society*, 6(1): 2053951719849444.
- 49 Duncan, E., Glaros, A., Ross, D.Z. & Nost, E. 2021. New but for whom? Discourses of innovation in precision agriculture. *Agriculture and Human Values*, 38: 1181–1199. <https://doi.org/10.1007/s10460-021-10244-8>

50 Wiseman, L., Sanderson, J., Zhang, A. & Jakku, E. 2019. Farmers and their data: An examination of farmers' reluctance to share their data through the lens of the laws impacting smart farming. *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences*, 90–91: 100301. <https://doi.org/10.1016/j.njas.2019.04.007>

51 Murray, U., Gebremedhin, Z., Brychkova, G. & Spillane, C. 2016. Smallholder farmers and climate smart agriculture: Technology and labor-productivity constraints amongst women smallholders in Malawi. *Gender, Technology and Development*, 20(2): 117–148. <https://doi.org/10.1177/0971852416640639>

52 UNCTAD (United Nations Conference on Trade and Development). 2020. *Teaching Material on Trade and Gender Linkages: The Gender Impact of Technological Upgrading in Agriculture*. New York, United Nations. <https://unctad.org/system/files/official-document/ditc2020d1.pdf>

53 FAO. 2019. *Youth employment: Youth agri-food policy assistance*. Rome. www.fao.org/3/ca3854en/ca3854en.pdf

54 Manyika, J., Chui, M., Miremadi, M., Bughin, J., George, K., Willmott, P. & Dewhurst, M. 2017. *A future that works: automation, employment, and productivity*. New York, McKinsey Global Institute. www.mckinsey.com/~media/mckinsey/featured%20insights/Digital%20Disruption/Harnessing%20automation%20for%20a%20future%20that%20works/MGI-A-future-that-works-Executive-summary.ashx

55 Autor, D.H. 2015. Why are there still so many jobs? The history and future of workplace automation. *Journal of Economic Perspectives*, 29(3): 3–30. www.aeaweb.org/articles?id=10.1257/jep.29.3.3

56 ILO (International Labour Organization). 2022. *Agriculture; plantations; other rural sectors*. In: *ILO*. Geneva. Cited 14 February 2022. www.ilo.org/global/industries-and-sectors/agriculture-plantations-other-rural-sectors/lang--en/index.htm

57 Christiaensen, L., Rutledge, Z. & Taylor, J.E. 2021. Viewpoint: The future of work in agri-food. *Food Policy*, 99: 101963.

58 Daum, T. & Birner, R. 2020. Agricultural mechanization in Africa: Myths, realities and an emerging research agenda. *Global Food Security*, 26: 100393. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2020.100393>

59 FAO & AUC. 2018. *Sustainable agricultural mechanization: A framework for Africa*. Addis Ababa. www.fao.org/3/CA1136EN/ca1136en.pdf

60 Clarke, C. 2017. Farmers in Myanmar are using 3D printing to improve farming production. In: *3D Printing Industry*. Cited 24 July 2022. <https://3dprintingindustry.com/?s=myanmar>

61 Fielke, S.J., Botha, N., Reid, J., Gray, D., Blackett, P., Park, N. & Williams, T. 2018. Lessons for co-innovation in agricultural innovation systems: a multiple case study analysis and a conceptual model. *The Journal of Agricultural Education and Extension*, 24(1): 9–27. <https://doi.org/10.1080/1389224X.2017.1394885>

62 McCampbell, M. 2022. *Agricultural digitalization and automation in low- and middle-income countries: Evidence from ten case studies*. Background paper for *The State of Food and Agriculture 2022*. FAO Agricultural Development Economics Technical Study No. 25. Rome, FAO.

63 Ceccarelli, T., Chauhan, A., Rambaldi, G., Kumar, I., Cappello, C., Janssen, S. & McCampbell, M. 2022. *Leveraging automation and digitalization for precision agriculture: Evidence from the case studies*. Background paper for *The State of Food and Agriculture 2022*. FAO Agricultural Development Economics Technical Study No. 24. Rome, FAO.

64 Daum, T. 2022. *Agricultural mechanization and sustainable agrifood system transformation in the Global South*. Background paper for *The State of Food and Agriculture 2022*. FAO Agricultural Development Economics Working Paper 22-11. Rome, FAO.

65 Lowenberg-DeBoer, J. 2022. *Economics of adoption for digital automated technologies in agriculture*. Background paper for *The State of Food and Agriculture 2022*. FAO Agricultural Development Economics Working Paper 22-10. Rome, FAO.

66 Rose, D. 2022. *Agricultural automation: the past, present and future of adoption*. *The State of Food and Agriculture 2022*, background paper. Internal document.

第 2 章

1 McCampbell, M. 2022. *Agricultural digitalization and automation in low- and middle-income countries: Evidence from ten case studies*. Background paper for *The State of Food and Agriculture 2022*. FAO Agricultural Development Economics Technical Study No. 25. Rome, FAO.

- 2 Ceccarelli, T., Chauhan, A., Rambaldi, G., Kumar, I., Cappello, C., Janssen, S. & McCampbell, M. 2022. *Leveraging automation and digitalization for precision agriculture: Evidence from the case studies*. Background paper for *The State of Food and Agriculture 2022*. FAO Agricultural Development Economics Technical Study No. 24. Rome, FAO.
- 3 White, W.J. 2001. An unsung hero: the farm tractor's contribution to twentieth-century United States economic growth. *The Journal of Economic History*, 61(2): 493–496. https://EconPapers.repec.org/RePEc:cup:jechis:v:61:y:2001:i:02:p:493-496_23
- 4 Binswanger, H. 1986. Agricultural mechanization: a comparative historical perspective. *The World Bank Research Observer*, 1(1): 27–56. <https://doi.org/10.1093/wbro/1.1.27>
- 5 Mrema, G., Soni, P. & Rolle, R.S. 2015. A Regional Strategy for Sustainable Agricultural Mechanization. Sustainable Mechanization across Agri-Food Chains in Asia and the Pacific region. RAP Publication No. 2014/24. Rome FAO. www.fao.org/documents/card/en/c/78c1b49f-b5c2-43b5-abdf-e63bb6955f4f
- 6 Diao, X., Takeshima, H. & Zhang, X. 2020. *An evolving paradigm of agricultural mechanization development: How much can Africa learn from Asia?* Washington, DC, IFPRI (International Food Policy Research Institute). <https://ebrary.ifpri.org/digital/collection/p15738coll2/id/134095>
- 7 Daum, T. & Birner, R. 2020. Agricultural mechanization in Africa: Myths, realities and an emerging research agenda. *Global Food Security*, 26: 100393. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2020.100393>
- 8 Kirui, O. 2019. *The agricultural mechanization in Africa: Micro-level analysis of state drivers and effects*. ZEF-Discussion Papers on Development Policy No. 272. University of Bonn. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3368103
- 9 FAO. 2021. FAOSTAT: Discontinued archives and data series: Machinery. In: FAO. Rome. Cited 1 December 2021. www.fao.org/faostat/en/#data/RM
- 10 ECLAC (Economic Commission for Latin America and the Caribbean), FAO & IICA (Inter-American Institute for Cooperation on Agriculture). 2017. *The outlook for agriculture and rural development in the Americas: A perspective on Latin America and the Caribbean 2017-2018*. San Jose, Costa Rica, IICA. www.fao.org/3/i8048en/i8048EN.pdf
- 11 Elverdin, P., Piñeiro, V. & Robles, M. 2018. *Agricultural mechanization in Latin America*. IFPRI-Discussion Papers No. 1740. Washington, DC, IFPRI.
- 12 Cramb, R. & Thepent, V. 2020. Evolution of agricultural mechanization in Thailand. In: X. Diao, H. Takeshima & X. Zhang, eds. *An evolving paradigm of agricultural mechanization development: How much can Africa learn from Asia?* pp. 165–201. Washington, DC, IFPRI. <https://ebrary.ifpri.org/utis/getfile/collection/p15738coll2/id/134091/filename/134311.pdf>
- 13 Justice, S. & Biggs, S. 2020. The spread of smaller engines and markets in machinery services in rural areas of South Asia. *Journal of Rural Studies*, 73: 10–20. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2019.11.013>
- 14 Belton, B., Win, M.T., Zhang, X. & Filipski, M. 2021. The rapid rise of agricultural mechanization in Myanmar. *Food Policy*, 101: 102095. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2021.102095>
- 15 FAO & AUC. 2018. *Sustainable agricultural mechanization: A framework for Africa*. Addis Ababa. www.fao.org/3/CA1136EN/call136en.pdf
- 16 Pingali, P. 2007. Chapter 54 Agricultural mechanization: Adoption patterns and economic impact. In: R. Evenson & P. Pingali, eds. *Handbook of agricultural economics*, pp. 2779–2805. Amsterdam, Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S1574-0072\(06\)03054-4](https://doi.org/10.1016/S1574-0072(06)03054-4)
- 17 World Bank. 2022. Living Standards Measurement Study - Integrated Surveys on Agriculture (LSMS-ISA). In: *The World Bank*. Washington, DC. Cited 5 January 2022. <https://www.worldbank.org/en/programs/lsmis/initiatives/lsmis-isa>
- 18 Abeyratne, F. & Takeshima, H. 2020. The evolution of agricultural mechanization in Sri Lanka. In: X. Diao, H. Takeshima & X. Zhang, eds. *An evolving paradigm of agricultural mechanization development: How much can Africa learn from Asia?* pp. 139–163. Washington, DC, IFPRI. https://doi.org/10.2499/9780896293809_04
- 19 Ahmed, M. & Takeshima, H. 2020. Evolution of agricultural mechanization in Bangladesh: The case of tractors for land preparation. In: X. Diao, H. Takeshima & X. Zhang, eds. *An evolving paradigm of agricultural mechanization development: How much can Africa learn from Asia?* pp. 235–261. Washington, DC, IFPRI. https://doi.org/10.2499/9780896293809_07

- 20 Win, M.T., Belton, B. & Zhang, X.** 2020. Myanmar's rapid agricultural mechanization: Demand and supply evidence. In: X. Diao, H. Takeshima & X. Zhang, eds. *An evolving paradigm of agricultural mechanization development: How much can Africa learn from Asia?* pp. 263–284. Washington, DC, IFPRI. https://doi.org/10.2499/9780896293809_08
- 21 Bhattarai, M., Singh, G., Takeshima, H. & Shekhawat, R.S.** 2020. Farm machinery use and the agricultural machinery industries in India. In: X. Diao, H. Takeshima & X. Zhang, eds. *An evolving paradigm of agricultural mechanization development: How much can Africa learn from Asia?* pp. 97–138. Washington, DC, IFPRI. <https://ebrary.ifpri.org/digital/collection/p15738coll2/id/134090>
- 22 Antle, J.M. & Ray, S.** 2020. *Sustainable agricultural development: An economic perspective*. Palgrave Studies in Agricultural Economics and Food Policy. Cham, Springer International Publishing. <http://link.springer.com/10.1007/978-3-030-34599-0>
- 23 Veimar da Silva, A., Michelle da Silva, C., Wagner, Soares Pessoa, W.R.L., Almeida Vaz, M., Matos de Oliveira, K. & Ribeiro dos Santos, F.S.** 2018. Agricultural mechanization in small rural properties in the State of Piauí, Brazil. *African Journal of Agricultural Research*, 13(33): 1698–1707. <https://academicjournals.org/journal/AJAR/article-full-text-pdf/7E9E9CA58112>
- 24 Mrema, G.C., Kahan, D.G. & Agyei-Holmes, A.** 2020. Agricultural mechanization in Tanzania. In: X. Diao, H. Takeshima & X. Zhang, eds. *An evolving paradigm of agricultural mechanization development: How much can Africa learn from Asia?* pp. 457–496. Washington, DC, IFPRI. https://doi.org/10.2499/9780896293809_14
- 25 Takeshima, H. & Lawal, A.** 2020. Evolution of agricultural mechanization in Nigeria. In: X. Diao, H. Takeshima & X. Zhang, eds. *An evolving paradigm of agricultural mechanization development: How much can Africa learn from Asia?* pp. 423–456. Washington, DC, IFPRI.
- 26 Herrero, M., Thornton, P.K., Mason-D'Croz, D., Palmer, J., Benton, T.G., Bodirsky, B.L., Bogard, J.R. et al.** 2020. Innovation can accelerate the transition towards a sustainable food system. *Nature Food*, 1: 266–272. <https://doi.org/10.1038/s43016-020-0074-1>
- 27 Ehlers, M.-H., Finger, R., El Benni, N., Gocht, A., Sørensen, C.A.G., Gusset, M., Pfeifer et al.** 2022. Scenarios for European agricultural policymaking in the era of digitalisation. *Agricultural Systems*, 196: 103318. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103318>
- 28 Fleming, A., Jakku, E., Lim-Camacho, L., Taylor, B. & Thorburn, P.** 2018. Is big data for big farming or for everyone? Perceptions in the Australian grains industry. *Agronomy for Sustainable Development*, 38: 24. <https://doi.org/10.1007/s13593-018-0501-y>
- 29 GSMA (Global System for Mobile Communications).** 2020. *The mobile economy 2020*. www.gsma.com/mobileeconomy/wp-content/uploads/2020/03/GSMA_MobileEconomy2020_Global.pdf
- 30 Onukwue, A.** 2022. Google's subsea cable for Africa is making its first landing in Togo. In: *Quartz Africa*. New York. Cited 24 July 2022. <https://qz.com/africa/2143897/googles-equiano-cable-is-making-its-first-landing-in-togo>
- 31 Steinke, J., Ortiz-Crespo, B., van Etten, J. & Müller, A.** 2022. Participatory design of digital innovation in agricultural research-for-development: insights from practice. *Agricultural Systems*, 195: 103313. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103313>
- 32 McCampbell, M.** 2021. *More than what meets the eye: Factors and processes that shape the design and use of digital agricultural advisory and decision support in Africa*. Wageningen University, Netherlands. <https://research.wur.nl/en/publications/388eb987-15f2-4fb0-b9c1-f0f6ff342e98>
- 33 Tsan, M., Totapally, S., Hailu, M. & Addom, B.** 2019. *The digitalisation of African agriculture report 2018-2019*. Wageningen, Netherlands. CTA (Technical Center for Agricultural and Rural Cooperation). www.cta.int/en/digitalisation-agriculture-africa
- 34 FAO & ITU (International Telecommunication Union).** 2022. *Status of digital agriculture in 47 sub-Saharan African countries*. Rome. www.fao.org/3/cb7943en/cb7943en.pdf
- 35 Trendov, N.M., Varas, S. & Zeng, M.** 2019. *Digital technologies in agriculture and rural areas – Status report*. Rome, FAO. www.fao.org/3/ca4985en/CA4985EN.pdf
- 36 Viet Nam News.** 2021. Hà Nội aims to develop smart agriculture. In: *Việt Nam News*. Ha Noi. Cited 1 May 2022. <https://vietnamnews.vn/economy/1082482/ha-noi-aims-to-develop-smart-agriculture.html>

- 37 Musoni, M.** 2020. Smart farming in Rwanda – How farmers can increase crop yields through an IoT-based irrigation system. In: *Digital Transformation Center*. Kigali. Cited 1 May 2022. <https://digicenter.rw/smart-farming-in-rwanda-with-an-iot-based-irrigation-system>
- 38 GSMA.** 2020. *Digital agriculture maps: 2020 state of the sector in low and middle-income countries*. London. www.gsma.com/r/wp-content/uploads/2020/09/GSMA-Agritech-Digital-Agriculture-Maps.pdf
- 39 FAO & CAAS (Chinese Academy of Agricultural Sciences).** 2021. *Carbon neutral tea production in China – Three pilot case studies*. Rome, FAO. www.fao.org/documents/card/en/c/cb4580en
- 40 Nyaga, J.M., Onyango, C.M., Wetterlind, J. & Söderström, M.** 2021. Precision agriculture research in sub-Saharan Africa countries: a systematic map. *Precision Agriculture*, 22: 1217–1236. <https://doi.org/10.1007/s11119-020-09780-w>
- 41 Onyango, C.M., Nyaga, J.M., Wetterlind, J., Söderström, M. & Piikki, K.** 2021. Precision agriculture for resource use efficiency in smallholder farming systems in sub-Saharan Africa: A systematic review. *Sustainability*, 13(3): 1158. <https://doi.org/10.3390/su13031158>
- 42 APNI (African Plant Nutrition Institute).** 2020. Proceedings for the 1st African Conference on Precision Agriculture, Benguéir, Morocco, 8–10 December 2020. In: *APNI*. www.apni.net/2021/03/18/new-publication-proceedings-for-1st-african-conference-on-precision-agriculture
- 43 Witt, C. & Dobermann, A.** 2002. A site-specific nutrient management approach for irrigated, lowland rice in Asia. *Better Crops International*, 16(1): 20–24. [http://www.ipni.net/publication/bci.nsf/0/870A90403A1BDBB585257BBA0065CC62/\\$FILE/Better%20Crops%20International%202002-1%20p20.pdf](http://www.ipni.net/publication/bci.nsf/0/870A90403A1BDBB585257BBA0065CC62/$FILE/Better%20Crops%20International%202002-1%20p20.pdf)
- 44 Agrocares.** 2022. Manage soil fertility: Informed fertilization decisions in the field. In: *Agrocares*. Cited 24 July 2022. www.agrocares.com/soilcares
- 45 Lowenberg-DeBoer, J. & Erickson, B.** 2019. Setting the record straight on precision agriculture adoption. *Agronomy Journal*, 111(4): 1552–1569. <https://doi.org/10.2134/agronj2018.12.0779>
- 46 Van Beek, C.** 2020. Adoption level is the most underestimated factor in fertiliser recommendations. In: *Agrocares*. Cited 24 July 2022. www.agrocares.com/wp-content/uploads/2020/10/whitepaper-christy-van-beek-1.pdf
- 47 GoMicro.** 2022. Phone QC. In: *GoMicro*. Singapore. Cited 1 May 2022. www.gomicro.co
- 48 Lowenberg-DeBoer, J.** 2022. *Economics of adoption for digital automated technologies in agriculture*. Background paper for *The State of Food and Agriculture 2022*. FAO Agricultural Development Economics Working Paper 22-10. Rome, FAO.
- 49 ITU.** 2020. *Measuring digital development: Facts and figures 2020*. Geneva, ITU. www.itu.int/en/ITU-D/Statistics/Documents/facts/FactsFigures2020.pdf
- 50 Hanton, J.P. & Leach, H.A.** 1974. *Electronic livestock identification system*. US Patent 4,262,632. <https://patentimages.storage.googleapis.com/6c/49/f1/e746f5f7bca33e/US4262632.pdf>
- 51 Brustein, J.** 2014. GPS as we know it happened because of Ronald Reagan. In: *Bloomberg News*. Cited 24 July 2022. www.bloomberg.com/news/articles/2014-12-04/gps-as-we-know-it-happened-because-of-ronald-reagan
- 52 Rip, M.R. & Hasik, J.M.** 2002. *The precision revolution: GPS and the future of aerial warfare*. Annapolis, MD, USA, Naval Institute Press.
- 53 Sheets, K.D.** 2018. The Japanese impact on global drone policy and law: Why a laggard United States and other nations should look to Japan in the context of drone usage. *Indiana Journal of Global Legal Studies*, 25(1): 513–537. www.repository.law.indiana.edu/ijgls/vol25/iss1/20
- 54 Mulla, D. & Khosla, R.** 2016. Historical evolution and recent advances in precision farming. In: R. Lal & B.A. Stewart, eds. *Soil-specific farming – Precision farming*. Boca Raton, FL, USA, CRC Press.
- 55 Lely.** 2022. Our history. In: *Lely*. Maassluis, Netherlands. Cited 1 March 2022. www.lely.com/gb/about-lely/our-company/history
- 56 Sharipov, D.R., Yakimov, O.A., Gainullina, M.K., Kashaeva, A.R. & Kamaldinov, I.N.** 2021. Development of automatic milking systems and their classification. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 659: 012080. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/659/1/012080>

57 Rural Retailer. 2002. Arro™ targets growing need for Steering Assist®. In: Rural Retailer. Cited 24 July 2022. www.ccimarketing.com/farmsupplier_com/pages/html1.asp

58 Reusch, S. 1997. Entwicklung eines reflexionsoptischen Sensors zur Erfassung der Stickstoffversorgung landwirtschaftlicher Kulturpflanzen [Development of a reflection optical sensor for capture of nitrogen nutrition of agricultural crops]. PhD dissertation. Arbeitskreis Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI [Research and teaching working group of the Max Eyth Society for Agricultural Engineering in the VDI].

59 Trimble. 2006. Trimble combines GPS guidance and rate control to automate agricultural spraying operations. In: Trimble. Cited 24 July 2022. <https://investor.trimble.com/news-releases/news-release-details/trimble-combines-gps-guidance-and-rate-control-automate>

60 Ag Leader. 2022. History timeline. In: Ag Leader. Cited 24 July 2022. www.agleader.com/our-history

61 Ecorobotix. 2022. A bit of history. In: Ecorobotix. Cited 1 March 2022. <https://ecorobotix.com/en/a-bit-of-history>

62 Naïo Technologies. 2022. Naïo Technologies, agricultural robotics pioneers. In: Naïo Technologies. Cited 1 March 2022. <http://www.naio-technologies.com/en/naio-technologies/#:~:text=Founded%20in%202011%2C%20Na%C3%AFo%20Technologies,use%20of%20chemical%20weed%20killers>

63 Claas. 2022. Product history. The combine harvester. In: Claas. Cited 1 March 2022. www.claas.co.uk/company/history/products/combines/lexion

64 Hands Free Hectare. 2018. Timeline. In: Hands Free Hectare. Cited 1 March 2022. www.handsfreehectare.com/timeline.html

65 Smart Ag. 2018. Smart Ag unveils autocart driverless tractor technology at 2018 Farm Progress Show. In: OEM Off-highway. Cited 1 March 2022. www.oemoffhighway.com/trends/gps-automation/news/21020794/smart-ag-unveils-autocart-driverless-tractor-technology-at-2018-farm-progress-show

66 John Deere. 2022. John Deere reveals fully autonomous tractor at CES 2022. In: John Deere. Cited 1 March 2022. www.deere.com/en/news/all-news/autonomous-tractor-reveal

67 Birner, R., Daum, T. & Pray, C. 2021. Who drives the digital revolution in agriculture? A review of supply-side trends, players

and challenges. *Applied Economic Perspectives and Policy*, 43(4): 1260–1285. <https://doi.org/10.1002/aepp.13145>

68 Knight, C.H. 2020. Review: Sensor techniques in ruminants: more than fitness trackers. *Animal*, 14: s187–s195. <https://doi.org/10.1017/S1751731119003276>

69 Eastwood, C.R. & Renwick, A. 2020. Innovation uncertainty impacts the adoption of smarter farming approaches. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4: 24. www.readcube.com/articles/10.3389%2Ffsufs.2020.00024

70 Hansen, B.G. 2015. Robotic milking-farmer experiences and adoption rate in Jæren, Norway. *Journal of Rural Studies*, 41: 109–117. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2015.08.004>

71 Steeneveld, W., Tauer, L.W., Hogeveen, H. & Oude Lansink, A.G.J.M. 2012. Comparing technical efficiency of farms with an automatic milking system and a conventional milking system. *Journal of Dairy Science*, 95(12): 7391–7398. <https://doi.org/10.3168/jds.2012-5482>

72 Drach, U., Halachmi, I., Pnini, T., Izhaki, I. & Degani, A. 2017. Automatic herding reduces labour and increases milking frequency in robotic milking. *Biosystems Engineering*, 155: 134–141.

73 Verified Market Research. 2020. Global milking robots market size by type, by herd size, by geographic scope and forecast. In: Verified Market Research. Cited 24 July 2022. www.verifiedmarketresearch.com/product/milking-robots-market

74 Markets and Markets. 2018. Milking robots market by offering (hardware, software, service), milking robots system type (single-stall unit, multi-stall unit, automated milking rotary), herd size (below 100, between 100 and 1,000 and above 1,000), geography - Global forecast to 2023. In: Markets and Markets. Cited 24 July 2022. www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/milking-robots-market-170643611.html

75 Rodenburg, J. 2017. Robotic milking: Technology, farm design, and effects on work flow. *Journal of Dairy Science*, 100(9): 7729–7738. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-11715>

76 Rose, D. 2022. *Agricultural automation: the past, present and future of adoption. The State of Food and Agriculture 2022, background paper.* Internal document.

77 Ordolff, D. 2001. Introduction of electronics into milking technology. *Computers and Electronics in Agriculture*, 30: 125–149.

- 78 Banhazi, T.M., Lehr, H., Black, J.L., Crabtree, H., Schofield, P., Tschärke, M. & Berckmans, D.** 2012. Precision Livestock Farming: An international review of scientific and commercial aspects. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 5(3): 1–9.
- 79 Lowenberg-DeBoer, J.** 2018. The economics of precision agriculture. In J. Stafford, ed. *Precision agriculture for sustainability*, pp. 461–494. London, Burleigh Dodds Science Publishing. <https://doi.org/10.1201/9781351114592>
- 80 Colaço, A.F. & Bramley, R.G.V.** 2018. Do crop sensors promote improved nitrogen management in grain crops? *Field Crops Research*, 218: 126–140. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.01.007>
- 81 Lachia, N., Pichon, L. & Tisseyre, B.** 2019. A collective framework to assess the adoption of precision agriculture in France: description and preliminary results after two years. In: J.V. Stafford, ed. *Precision agriculture '19*. pp. 851–857. https://doi.org/10.3920/978-90-8686-888-9_105
- 82 Lowenberg-DeBoer, J., Yuelu Huang, I., Grigoriadis, V. & Blackmore, S.** 2020. Economics of robots and automation in field crop production. *Precision Agriculture*, 21(2): 278–299. <https://doi.org/10.1007/s11119-019-09667-5>
- 83 Lowenberg-DeBoer, J., Behrendt, K., Ehlers, M.-H., Dillon, C., Gabriel, A., Huang, I.Y., Kumwenda, I. et al.** 2021. Lessons to be learned in adoption of autonomous equipment for field crops. *Applied Economic Perspectives and Policy*, 44(2): 848–864. <https://doi.org/10.1002/aep.13177>
- 84 Elias, M., Lowenberg-DeBoer, J., Behrendt, K. & Franklin, K.** (forthcoming). *Economically optimal farmer supervision of crop robots*.
- 85 Shockley, J., Dillon, C., Lowenberg-DeBoer, J. & Mark, T.** 2021. How will regulation influence commercial viability of autonomous equipment in US production agriculture? *Applied Economics Perspectives and Policy*, 44(2): 865–878. <https://doi.org/10.1002/aep.13178>
- 86 Santos Valle, S. & Kienzie, J.** 2020. *Agriculture 4.0 – Agricultural robotics and automated equipment for sustainable crop production*. Integrated Crop Management No. 24. Rome, FAO. www.fao.org/3/cb2186en/CB2186EN.pdf
- 87 Tarannum, N., Rhaman, Md.K., Khan, S.A. & Shakil, S.R.** 2015. A brief overview and systematic approach for using

agricultural robot in developing countries. *Journal of Modern Science and Technology*, 3(1): 88–101. <https://zantworldpress.com/wp-content/uploads/2019/12/Paper-8.pdf>

88 Reddy, N., Reddy, A.V., Pranavathya, S. & Kumar, J. 2016. A critical review on agricultural robots. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 7(4): 183–188. https://iaeme.com/MasterAdmin/Journal_uploads/IJMET/VOLUME_7_ISSUE_4/IJMET_07_04_018.pdf

89 Autor, D.H. 2015. Why are there still so many jobs? The history and future of workplace automation. *Journal of Economic Perspectives*, 29(3): 3–30. www.aeaweb.org/articles?id=10.1257/jep.29.3.3

90 Carvalho, F.K., Chechetto, R.G., Mota, A.A.B. & Antunias, U.R. 2020. Challenges of aircraft and drone spray applications. *Outlooks on Pest Management*, 31(2): 83–88. http://dx.doi.org/10.1564/v31_apr_07

91 Wang, C., Herbst, A., Zeng, A., Wongsuk, S., Qiao, B., Qi, P., Bonds, J. et al. 2021. Assessment of spray deposition, drift and mass balance from unmanned aerial vehicle sprayer using an artificial vineyard. *Science of The Total Environment*, 777: 146181. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146181>

92 Erickson, B. & Lowenberg-DeBoer, J. 2021. 2021 precision agriculture dealership survey confirms a data driven market for retailers. In: *CropLife*. Cited 24 July 2022. www.croplife.com/precision/2021-precision-agriculture-dealership-survey-confirms-a-data-driven-market-for-retailers/#slide=87709-87729-3

93 Kendall, H., Clark, B., Li, W., Jin, S., Jones, G.D., Chen, J., Taylor, J., Li, Z. & Frewer, Lynn, J. 2022. Precision agriculture technology adoption: a qualitative study of small-scale commercial “family farms” located in the North China Plain. *Precision Agriculture*, 23: 319–351. <https://doi.org/10.1007/s11119-021-09839-2>

94 Kumar, G., Engle, C. & Tucker, C. 2018. Factors driving aquaculture technology adoption. *Journal of the World Aquaculture Society*, 49(3): 447–476. <https://doi.org/10.1111/jwas.12514>

95 FAO. 2020. *The State of World Fisheries and Aquaculture 2020. Sustainability in action*. Rome, FAO. www.fao.org/documents/card/en/c/ca9229en

- 96 Føre, M., Frank, K., Norton, T., Svendsen, E., Alfredsen, J.A., Dempster, T., Eguiraun, H. *et al.* 2018. Precision fish farming: A new framework to improve production in aquaculture. *Biosystems Engineering*, 173: 176–193. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.10.014>
- 97 Shrimpbox. 2021. The Shrimpbox launch: The world's first robotic shrimp farm. In: *Atarraya*. Mexico City. Cited 24 July 2022. <https://atarraya.ai/assets/pdf/ShrimpboxENG.pdf>
- 98 Bergerman, M., Billingsley, J., Reid, J. & van Henten, E. 2016. *Robotics in agriculture and forestry*. SpringerLink. Cited 8 December 2021. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-32552-1_56
- 99 Nitoslowski, S.A., Wong-Stevens, K., Steenberg, J.W.N., Witherspoon, K., Nesbitt, L. & Konijnendijk van den Bosch, C.C. 2021. The digital forest: Mapping a decade of knowledge on technological applications for forest ecosystems. *Earth's Future*, 9(8): e2021EF002123. <https://doi.org/10.1029/2021EF002123>
- 100 Boitsov, A., Vagizov, M., Istomin, E., Aksenova, A. & Pavlov, V. 2021. Robotic systems in forestry. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 806: 012034.
- 101 Allott, J., O'Kelly, G. & Pendergraph, S. 2020. Data: The next wave in forestry productivity. In: *McKinsey & Company*. Cited 5 January 2022. www.mckinsey.com/industries/paper-forest-products-and-packaging/our-insights/data-the-next-wave-in-forestry-productivity
- 102 Hellström, T., Lärkeryd, P., Nordfjell, T. & Ringdahl, O. 2009. Autonomous forest vehicles: Historic, envisioned, and state-of-the-art. *International Journal of Forest Engineering*, 20(1): 31–38. <https://doi.org/10.1080/14942119.2009.10702573>
- 103 Visser, R. & Obi, O.F. 2021. Automation and robotics in forest harvesting operations: Identifying near-term opportunities. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 42(1): 13–24.
- 104 Parker, R., Bayne, K. & Clinton, P.W. 2016. Robotics in forestry. *New Zealand Journal of Forestry*, 60(4): 8–14.
- 105 Finer, M. & Mamani, N. 2020. MAAP #31: Power of free high-resolution satellite imagery from Norway Agreement. In: *Monitoring of the Amazon Andean Project*. Cited 24 June 2022. www.maaproject.org/2021/norway-agreement
- 106 Shamshiri, R., Kalantari, F., Ting, K.C., Thorp, K.R., Hameed, I.A., Weltzien, C., Ahmad, D. & Shad, Z.M. 2018. Advances in greenhouse automation and controlled environment agriculture: A transition to plant factories and urban agriculture. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 11: 1. <https://ijabe.org/index.php/ijabe/article/view/3210>
- 107 Mrema, G.C., Baker, D. & Kahan, D. 2008. *Agricultural mechanization in sub-Saharan Africa: time for a new look*. Agricultural Management, Marketing and Finance Occasional Paper No. 22. Rome, FAO. www.fao.org/3/i0219e/i0219e00.pdf
- 108 Berhane, G., Dereje, M., Minten, B. & Tamru, S. 2017. The rapid – but from a low base – uptake of agricultural mechanization in Ethiopia: Patterns, implications and challenges. ESSP Working Paper No. 105. Washington, DC, IFPRI and Addis Ababa, Ethiopia, EDRI. <http://ebrary.ifpri.org/cdm/ref/collection/p15738coll2/id/131146>
- 109 Kansanga, M., Andersen, P., Kpienbaareh, D., Mason-Renton, S., Atuoye, K., Sano, Y., Antabe, R. & Luginaah, I. 2019. Traditional agriculture in transition: examining the impacts of agricultural modernization on smallholder farming in Ghana under the new Green Revolution. *International Journal of Sustainable Development and World Ecology*, 26(1): 11–24.
- 110 Keller, T., Sandin, M., Colombi, T., Horn, R. & Or, D. 2019. Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning. *Soil and Tillage Research*, 194: 104293. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104293>
- 111 Wang, X., Yamauchi, F., Otsuka, K. & Huang, J. 2016. Wage growth, landholding, and mechanization in Chinese agriculture. *World Development*, 86: 30–45. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2016.05.002>
- 112 Yamauchi, F. 2016. Rising real wages, mechanization and growing advantage of large farms: Evidence from Indonesia. *Food Policy*, 58(5): 62–69.
- 113 Daum, T., Adegbola, Y.P., Kamau, G., Kergna, A.O., Daudu, C., Zossou, R.C., Crinot, G.F. *et al.* 2020. Perceived effects of farm tractors in four African countries, highlighted by participatory impact diagrams. *Agronomy for Sustainable Development*, 40: 47. <https://doi.org/10.1007/s13593-020-00651-2>
- 114 Kansanga, M.M., Mkandawire, P., Kuuire, V. & Luginaah, I. 2020. Agricultural mechanization, environmental degradation, and gendered livelihood implications in northern Ghana. *Land Degradation and Development*, 31(11): 1422–1440. <https://doi.org/10.1002/ldr.3490>

115 Torero, M. 2019. Robotics and AI in food security and innovation: Why they matter and how to harness their power. In: J. von Braun, M.S. Archer, G.M. Reichberg & M. Sánchez Sorondo, eds. *Robotics, AI, and humanity: Science, ethics, and policy*, pp. 99–107. Springer.

第 3 章

1 Pingali, P. 2007. Chapter 54 Agricultural mechanization: Adoption patterns and economic impact. In: R. Evenson & P. Pingali, eds. *Handbook of agricultural economics*, pp. 2779–2805. Amsterdam, Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S1574-0072\(06\)03054-4](https://doi.org/10.1016/S1574-0072(06)03054-4)

2 Bhattarai, M., Singh, G., Takeshima, H. & Shekhawat, R.S. 2020. Farm machinery use and the agricultural machinery industries in India. In: X. Diao, H. Takeshima & X. Zhang, eds. *An evolving paradigm of agricultural mechanization development: How much can Africa learn from Asia?* pp. 97–138. Washington, DC, IFPRI. <https://ebrary.ifpri.org/digital/collection/p15738coll2/id/134090>

3 Kirui, O. 2019. *The agricultural mechanization in Africa: Micro-level analysis of state drivers and effects*. ZEF-Discussion Papers on Development Policy No. 272. University of Bonn. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3368103

4 Berhane, G., Dereje, M., Minten, B. & Tamru, S. 2017. The rapid – but from a low base – uptake of agricultural mechanization in Ethiopia: Patterns, implications and challenges. ESSP Working Paper No. 105. Washington, DC, IFPRI and Addis Ababa, Ethiopia, EDRI. <http://ebrary.ifpri.org/cdm/ref/collection/p15738coll2/id/131146>

5 Houssou, N. & Chapoto, A. 2014. *The changing landscape of agriculture in Ghana: Drivers of farm mechanization and its impacts on cropland expansion and intensification*. IFPRI Discussion Paper No. 1392. Washington, DC, IFPRI. <https://ebrary.ifpri.org/utills/getfile/collection/p15738coll2/id/128706/filename/128917.pdf>

6 Adu-Baffour, F., Daum, T. & Birner, R. 2019. Can small farms benefit from big companies' initiatives to promote mechanization in Africa? A case study from Zambia. *Food Policy*, 84: 133–145. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2019.03.007>

7 Kansanga, M.M., Mkandawire, P., Kuire, V. & Luginaah, I. 2020. Agricultural mechanization, environmental degradation, and gendered livelihood implications in northern Ghana. *Land Degradation and Development*, 31(11): 1422–1440. <https://doi.org/10.1002/ldr.3490>

8 Ma, W., Renwick, A. & Grafton, Q. 2018. Farm machinery use, off-farm employment and farm performance in China. *Australian Journal of Agricultural and Resource Economics*, 62(2): 279–298. <https://doi.org/10.1111/1467-8489.12249>

9 Daum, T., Capezzzone, F. & Birner, R. 2021. Using smartphone app collected data to explore the link between mechanization and intra-household allocation of time in Zambia. *Agriculture and Human Values*, 38: 411–429. <https://doi.org/10.1007/s10460-020-10160-3>

10 Haggblade, S., Hazell, P. & Reardon, T. 2010. The rural non-farm economy: prospects for growth and poverty reduction. *World Development*, 38(10): 1429–1441. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2009.06.008>

11 Christiaensen, L., Demery, L. & Kuhl, J. 2011. The (evolving) role of agriculture in poverty reduction—An empirical perspective. *Journal of Development Economics*, 96(2): 239–254. <https://doi.org/10.1016/j.jdeveco.2010.10.006>

12 Salvatierra-Rojas, A., Nagle, M., Gummert, M., de Bruin, T. & Müller, T. 2017. Development of an inflatable solar dryer for improved postharvest handling of paddy rice in humid climates. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 10(3): 269–282. <https://ijabe.org/index.php/ijabe/article/view/2444>

13 Elbehri, A. & Sadiddin, A. 2016. Climate change adaptation solutions for the green sectors of selected zones in the MENA region. *Future of Food: Journal on Food, Agriculture and Society*, 4(3): 39–54. www.thefutureoffoodjournal.com/index.php/FOFJ/article/view/79

14 Jayne, T.S., Mather, D. & Mghenyi, E. 2010. Principal challenges confronting smallholder agriculture in sub-Saharan Africa. *World Development*, 38(10): 1384–1398. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2010.06.002>

15 Yahaya, R. (forthcoming). *Market analysis for agricultural mechanisation in Ethiopia*. Addis Ababa, CIMMYT.

16 FAO. 2022. *Technical support for sustainable agricultural mechanization of smallholder farms for enhancing agricultural productivity and production, and reducing drudgery of women and young farmers*. FAO Project No. TCP/NEP/3703. Rome. Internal document.

17 FAO. 2022. *Thinking about the future of food safety – A foresight report*. Rome. <https://doi.org/10.4060/cb8667en>

- 18 Daum, T., Seidel, A., Getnet, B. & Birner, R.** 2022. *Animal traction, two-wheel tractors, or four-wheel tractors? A best-fit approach to guide farm mechanization in Africa*. Hohenheim Working Papers on Social and Institutional Change in Agricultural Development. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4092687
- 19 Diao, X., Takeshima, H. & Zhang, X.** 2020. *An evolving paradigm of agricultural mechanization development: How much can Africa learn from Asia?* Washington, DC, IFPRI. <https://ebrary.ifpri.org/digital/collection/p15738coll2/id/134095>
- 20 Win, M.T., Belton, B. & Zhang, X.** 2020. Myanmar's rapid agricultural mechanization: Demand and supply evidence. In: X. Diao, H. Takeshima & X. Zhang, eds. *An evolving paradigm of agricultural mechanization development: How much can Africa learn from Asia?* pp. 263–284. Washington, DC, IFPRI. https://doi.org/10.2499/9780896293809_08
- 21 Baudron, F., Sims, B., Justice, S., Kahan, D.G., Rose, R., Mkomwa, S., Kaumbutho, P. et al.** 2015. Re-examining appropriate mechanization in Eastern and Southern Africa: two-wheel tractors, conservation agriculture, and private sector involvement. *Food Security*, 7: 889–904. <https://doi.org/10.1007/s12571-015-0476-3>
- 22 Kahan, D., Bymolt, R. & Zaal, F.** 2018. Thinking outside the plot: Insights on small-scale mechanisation from case studies in East Africa. *The Journal of Development Studies*, 54(11): 1939–1954. <https://doi.org/10.1080/00220388.2017.1329525>
- 23 Daum, T., Huffman, W. & Birner, R.** 2018. *How to create conducive institutions to enable agricultural mechanization: A comparative historical study from the United States and Germany*. Economics Working Paper. Ames, USA, Department of Economics, Iowa State University. https://lib.dr.iastate.edu/econ_workingpapers/47
- 24 FAO.** 2019. *Mechanization services in rural communities. Enhancing the resilience of smallholder farmers and creating job opportunities*. Rome. www.fao.org/3/ca7139en/ca7139en.pdf
- 25 Alwang, J., Sabry, S., Shideed, K., Swelam, A. & Halila, H.** 2018. Economic and food security benefits associated with raised-bed wheat production in Egypt. *Food Security: The Science, Sociology and Economics of Food Production and Access to Food*, 10(3): 589–601. https://EconPapers.repec.org/RePEc:spr:ssefpa:v:10:y:2018:i:3:d:10.1007_s12571-018-0794-3
- 26 Swelam, A.** 2016. *Raised-bed planting in Egypt: an affordable technology to rationalize water use and enhance water productivity*. Amman, ICARDA. <https://hdl.handle.net/20.500.11766/5900>
- 27 Sims, B. & Kienzie, J.** 2006. *Farm power and mechanization for small farms in sub-Saharan Africa*. Agricultural and Food Engineering Technical Report No. 3. Rome, FAO. www.fao.org/3/a0651e/a0651e.pdf
- 28 Flores Rojas, M.** 2018. *Gender sensitive labour saving technology. Drum seeder: saving time, effort and money. A case study from the Lao People's Democratic Republic*. Bangkok, FAO. www.fao.org/3/i9464en/i9464en.pdf
- 29 Lowenberg-DeBoer, J.** 2022. *Economics of adoption for digital automated technologies in agriculture*. Background paper for *The State of Food and Agriculture 2022*. FAO Agricultural Development Economics Working Paper 22-10. Rome, FAO.
- 30 McCampbell, M.** 2022. *Agricultural digitalization and automation in low- and middle-income countries: Evidence from ten case studies*. Background paper for *The State of Food and Agriculture 2022*. FAO Agricultural Development Economics Technical Study No. 25. Rome, FAO.
- 31 Ceccarelli, T., Chauhan, A., Rambaldi, G., Kumar, I., Cappello, C., Janssen, S. & McCampbell, M.** 2022. *Leveraging automation and digitalization for precision agriculture: Evidence from the case studies*. Background paper for *The State of Food and Agriculture 2022*. FAO Agricultural Development Economics Technical Study No. 24. Rome, FAO.
- 32 Eastwood, C.R. & Renwick, A.** 2020. Innovation uncertainty impacts the adoption of smarter farming approaches. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4: 24. www.readcube.com/articles/10.3389%2Ffsufs.2020.00024
- 33 Hansen, B.G.** 2015. Robotic milking-farmer experiences and adoption rate in Jæren, Norway. *Journal of Rural Studies*, 41: 109–117. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2015.08.004>
- 34 Steeneveld, W., Tauer, L.W., Hogeveen, H. & Oude Lansink, A.G.J.M.** 2012. Comparing technical efficiency of farms with an automatic milking system and a conventional milking system. *Journal of Dairy Science*, 95(12): 7391–7398. <https://doi.org/10.3168/jds.2012-5482>
- 35 Drach, U., Halachmi, I., Pnini, T., Izhaki, I. & Degani, A.** 2017. Automatic herding reduces labour and increases milking frequency in robotic milking. *Biosystems Engineering*, 155: 134–141.

- 36 Lowenberg-DeBoer, J. 1999. GPS based guidance systems for farmers. *Purdue Agricultural Economics Report*, pp. 8–9. Purdue University. <https://ag.purdue.edu/commercialag/home/paer-article/gps-based-guidance-systems-for-farmers>
- 37 IoF. 2020. *Internet of Food and Farm (IoF) 2020*. www.valoritalia.it/wp-content/uploads/2019/08/IOF2020-Booklet-UseCases-2019-vDEF.pdf
- 38 FAO & AUC. 2018. *Sustainable agricultural mechanization: A framework for Africa*. Addis Ababa. www.fao.org/3/CA1136EN/cal136en.pdf
- 39 de Brauw, A. & Bulte, E. 2021. *African Farmers, Value Chains and Agricultural Development: An Economic and Institutional Perspective*. Palgrave Studies in Agricultural Economics and Food Policy. Cham, Springer International Publishing. <https://link.springer.com/10.1007/978-3-030-88693-6>
- 40 Daum, T. & Birner, R. 2017. The neglected governance challenges of agricultural mechanisation in Africa – insights from Ghana. *Food Security*, 9(5): 959–979. <https://doi.org/10.1007/s12571-017-0716-9>
- 41 Cramb, R. & Thepent, V. 2020. Evolution of agricultural mechanization in Thailand. In: X. Diao, H. Takeshima & X. Zhang, eds. *An evolving paradigm of agricultural mechanization development: How much can Africa learn from Asia?* pp. 165–201. Washington, DC, IFPRI. <https://ebrary.ifpri.org/utills/getfile/collection/p15738coll2/id/134091/filename/134311.pdf>
- 42 Justice, S. & Biggs, S. 2020. The spread of smaller engines and markets in machinery services in rural areas of South Asia. *Journal of Rural Studies*, 73: 10–20. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2019.11.013>
- 43 Feder, G., Just, R.E. & Zilberman, D. 1985. Adoption of agricultural innovations in developing countries: A survey. *Economic Development and Cultural Change*, 33(2): 255–298. www.jstor.org/stable/1153228
- 44 Binswanger, H. & Donovan, G. 1987. *Agricultural mechanization: issues and options*. World Bank Policy Study. Washington, DC, World Bank.
- 45 Elverdin, P., Piñeiro, V. & Robles, M. 2018. *Agricultural mechanization in Latin America*. IFPRI Discussion Paper No. 1740. IFPRI.
- 46 Takeshima, H. 2016. *Market imperfections for tractor service provision in Nigeria: International perspectives and empirical evidence*. NSSP Working Paper No. 32. Washington, DC, IFPRI. <http://ebrary.ifpri.org/cdm/ref/collection/p15738coll2/id/130446>
- 47 Diao, X., Cossar, F., Houssou, N. & Kolavalli, S. 2014. Mechanization in Ghana: Emerging demand, and the search for alternative supply models. *Food Policy*, 48: 168–181. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2014.05.013>
- 48 Takeshima, H. & Lawal, A. 2020. Evolution of agricultural mechanization in Nigeria. In: X. Diao, H. Takeshima & X. Zhang, eds. *An evolving paradigm of agricultural mechanization development: How much can Africa learn from Asia?* pp. 423–456. Washington, DC, IFPRI.
- 49 Shockley, J., Dillon, C., Lowenberg-DeBoer, J. & Mark, T. 2021. How will regulation influence commercial viability of autonomous equipment in US production agriculture? *Applied Economics Perspectives and Policy*, 44(2): 865–878. <https://doi.org/10.1002/aep.13178>
- 50 Daum, T., Adegbola, Y.P., Kamau, G., Kergna, A.O., Daudu, C., Zossou, R.C., Crinot, G.F. et al. 2020. Perceived effects of farm tractors in four African countries, highlighted by participatory impact diagrams. *Agronomy for Sustainable Development*, 40: 47. <https://doi.org/10.1007/s13593-020-00651-2>
- 51 Daum, T. & Birner, R. 2020. Agricultural mechanization in Africa: Myths, realities and an emerging research agenda. *Global Food Security*, 26: 100393. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2020.100393>
- 52 Kansanga, M., Andersen, P., Kpienbaareh, D., Mason-Renton, S., Atuoye, K., Sano, Y., Antabe, R. & Luginaah, I. 2019. Traditional agriculture in transition: examining the impacts of agricultural modernization on smallholder farming in Ghana under the new Green Revolution. *International Journal of Sustainable Development and World Ecology*, 26(1): 11–24.
- 53 Keller, T., Sandin, M., Colombi, T., Horn, R. & Or, D. 2019. Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning. *Soil and Tillage Research*, 194: 104293. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104293>
- 54 Dahlin, A.S. & Rusinamhodzi, L. 2019. Yield and labor relations of sustainable intensification options for smallholder farmers in sub-Saharan Africa. A meta-analysis. *Agronomy for Sustainable Development*, 39: 32. <https://doi.org/10.1007/s13593-019-0575-1>

- 55 FAO.** 2021. *The State of Food and Agriculture 2021. Making agrifood systems more resilient to shocks and stresses*. Rome. <https://doi.org/10.4060/cb4476en>
- 56 Rose, D.** 2022. *Agricultural automation: the past, present and future of adoption. The State of Food and Agriculture 2022, background paper*. Internal document.
- 57 Labrière, N., Locatelli, B., Laumonier, Y., Freycon, V. & Bernoux, M.** 2015. Soil erosion in the humid tropics: A systematic quantitative review. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 203: 127–139. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.01.027>
- 58 Giller, K.E., Witter, E., Corbeels, M. & Titttonell, P.** 2009. Conservation agriculture and smallholder farming in Africa: The heretics' view. *Field Crops Research*, 114(1): 23–34. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.06.017>
- 59 CSAM.** 2022. Climate resilience practice. In: CSAM. Beijing. Cited 24 June 2022. www.un-csam.org/KI-climate
- 60 Winkler, B., Lemke, S., Ritter, J. & Lewandowski, I.** 2017. Integrated assessment of renewable energy potential: Approach and application in rural South Africa. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 24: 17–31. <https://doi.org/10.1016/j.eist.2016.10.002>
- 61 Lowenberg-DeBoer, J., Yuelu Huang, I., Grigoriadis, V. & Blackmore, S.** 2020. Economics of robots and automation in field crop production. *Precision Agriculture*, 21(2): 278–299. <https://doi.org/10.1007/s11119-019-09667-5>
- 62 Lowenberg-DeBoer, J.** 2019. Making Technology Pay on Your Farm. Future Farm Technology Expo. Birmingham, UK.
- 63 Shockley, J.M., Dillon, C.R. & Shearer, S.A.** 2019. An economic feasibility assessment of autonomous field machinery in grain crop production. *Precision Agriculture*, 20: 1068–1085. <https://doi.org/10.1007/s11119-019-09638-w>
- 64 Al-Amin, A.K.M.A., Lowenberg-DeBoer, J., Franklin, K. & Behrendt, K.** 2021. *Economic implications of field size for autonomous arable crop equipment*. Land, Farm and Agribusiness Management Department, Harper Adams University, Newport, UK.
- 65 Baudron, F., Nazare, R. & Matangi, D.** 2019. The role of mechanization in transformation of smallholder agriculture in Southern Africa: Experience from Zimbabwe. In: R. Sikora, E. Terry, P. Vlek & J. Chitja, eds. *Transforming agriculture in Southern Africa*, pp. 152–159. London, Routledge. www.taylorfrancis.com/chapters/oa-edit/10.4324/9780429401701-21/role-mechanization-transformation-smallholder-agriculture-southern-africa-fr%C3%A9d%C3%A9ric-baudron-raymond-nazare-dorcas-matangi
- 66 Justice, S., Flores Rojas, M. & Basnyat, M.** 2022. *Empowering women farmers – A mechanization catalogue for practitioners*. Rome, FAO. www.fao.org/3/cb8681en/cb8681en.pdf
- 67 APNI.** 2020. Proceedings for the 1st African Conference on Precision Agriculture, Benguerir, Morocco, 8–10 December 2020. In: APNI. www.apni.net/2021/03/18/new-publication-proceedings-for-1st-african-conference-on-precision-agriculture
- 68 Onyango, C.M., Nyaga, J.M., Wetterlind, J., Söderström, M. & Piikki, K.** 2021. Precision agriculture for resource use efficiency in smallholder farming systems in sub-Saharan Africa: A systematic review. *Sustainability*, 13(3): 1158. <https://doi.org/10.3390/su13031158>
- 69 Nyaga, J.M., Onyango, C.M., Wetterlind, J. & Söderström, M.** 2021. Precision agriculture research in sub-Saharan Africa countries: a systematic map. *Precision Agriculture*, 22: 1217–1236. <https://doi.org/10.1007/s11119-020-09780-w>
- 70 Pouya, M.B., Diebre, R., Rambaldi, G., Zomboudry, G., Barry, F., Sedogo, M. & Lompo, F.** 2020. *Analyse comparative de l'agriculture de précision incluant l'utilisation de la technologie drone et de l'agriculture classique en matière de production de riz et de revenu des agriculteurs au Burkina Faso*. Wageningen, Netherlands, CTA. <https://cgspace.cgiar.org/handle/10568/108460>
- 71 Annor-Frempong, F. & Akaba, S.** 2020. *Socio-economic impact and acceptance study of drone-applied pesticide on maize in Ghana*. Wageningen, Netherlands, CTA. <https://cgspace.cgiar.org/handle/10568/108594>
- 72 Niyitanga, F., Kazungu, J. & Mamy, I.M.** 2020. Willingness to pay and cost-benefit analyses for farmers acting on real-time, actionable UAS-based advice when growing wheat or potato in Gataraga sector, Musanze district, Rwanda. Wageningen, Netherlands, CTA. <https://cgspace.cgiar.org/handle/10568/108602>
- 73 Santos Valle, S. & Kienzie, J.** 2020. *Agriculture 4.0 – Agricultural robotics and automated equipment for sustainable crop production*. Integrated Crop Management No. 24. Rome, FAO. www.fao.org/3/cb2186en/CB2186EN.pdf

- 74 Yawson, G. & Frimpong-Wiafe, B.** 2018. The socio-economic benefits and impact study on the application of drones, sensor technology and intelligent systems in commercial scale agricultural establishments in Africa. *International Journal of Agriculture and Economic Development*, 6(2): 18–36. www.academia.edu/40998630/The_Socio-Economic_Benefits_and_Impact_Study_on_the_Application_of_Drones_Sensor_Technology_and_Intelligent_Systems_in_Commercial-Scale_Agricultural_Establishment_In_Africa
- 75 Ayamga, M., Tekinerdogan, B. & Kassahun, A.** 2021. Exploring the challenges posed by regulations for the use of drones in agriculture in the African context. *Land*, 10(2): 164. <https://doi.org/10.3390/land10020164>
- 76 Carvalho, F.K., Chechetto, R.G., Mota, A.A.B. & Antuniassi, U.R.** 2020. Challenges of aircraft and drone spray applications. *Outlooks on Pest Management*, 31(2): 83–88. http://dx.doi.org/10.1564/v31_apr_07
- 77 Sissoko, A.** 2020. Malian architect fights climate change with digital greenhouse. In: *Reuters*. Cited 23 June 2022. www.reuters.com/article/us-climate-change-mali-agriculture-idUSKBN20713N
- 78 Elsässer, R., Hänsel, G. & Feldt, T.** 2021. *Digitalizing the African livestock sector: Status quo and future trends for sustainable value chain development*. Bonn, Germany, GIZ. www.giz.de/de/downloads/giz2021_en_Digitalizing%20the%20African%20livestock%20sector.pdf
- 79 Okinda, B.** 2020. Pastoralists turn to apps to find grazing fields. In: *Nation*. Cited 1 June 2022. <https://nation.africa/kenya/healthy-nation/pastoralists-turn-to-apps-to-find-grazing-fields-12554>
- 80 Daum, T., Villalba, R., Anidi, O., Mayienga, S.M., Gupta, S. & Birner, R.** 2021. Uber for tractors? Opportunities and challenges of digital tools for tractor hire in India and Nigeria. *World Development*, 144: 105480. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2021.105480>
- 81 Tarannum, N., Rhaman, Md.K., Khan, S.A. & Shakil, S.R.** 2015. A brief overview and systematic approach for using agricultural robot in developing countries. *Journal of Modern Science and Technology*, 3(1): 88–101. <https://zantworldpress.com/wp-content/uploads/2019/12/Paper-8.pdf>
- 82 Reddy, N., Reddy, A.V., Pranavadithya, S. & Kumar, J.** 2016. A critical review on agricultural robots. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 7(4): 183–188. https://iaeme.com/MasterAdmin/Journal_uploads/IJMET/VOLUME_7_ISSUE_4/IJMET_07_04_018.pdf
- 83 Autor, D.H.** 2015. Why are there still so many jobs? The history and future of workplace automation. *Journal of Economic Perspectives*, 29(3): 3–30. www.aeaweb.org/articles?id=10.1257/jep.29.3.3
- 84 Aune, J.B., Coulibaly, A. & Giller, K.E.** 2017. Precision farming for increased land and labour productivity in semi-arid West Africa. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 37: 16. <https://doi.org/10.1007/s13593-017-0424-z>
- 85 Nouhoheflin, T., Coulibaly, J.Y., D'Alessandro, S., Aitchédji, C.C., Damisa, M., Baributsa, D. & Lowenberg-DeBoer, J.** 2017. Management lessons learned in supply chain development: the experience of PICS bags in West and Central Africa. *International Food and Agribusiness Management Review*, 20(3): 427–438. <https://doi.org/10.22434/IFAMR2016.0167>
- 86 Micle, D.E., Deiac, F., Olar, A., Drența, R.F., Florean, C., Coman, I.G. & Arion, F.H.** 2021. Research on innovative business plan. Smart cattle farming using artificial intelligent robotic process automation. *Agriculture*, 11(5): 430. <https://doi.org/10.3390/agriculture11050430>
- 87 Gorbunova, A.V., Kostin, V.E., Pashkevich, I.L., Rybanov, A.A., Savchits, A.V., Silaev, A.A., Silaeva, E.Y. & Judaev, Y.V.** 2020. Prospects and opportunities for the introduction of digital technologies into aquaculture governance system. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 422(1): 012125. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/422/1/012125>
- 88 Saha, S., Hasan Rajib, R. & Kabir, S.** 2018. IoT based automated fish farm aquaculture monitoring system. 2018 *International Conference on Innovations in Science, Engineering and Technology (ICISSET)*, pp. 201–206.
- 89 Neethirajan, S. & Kemp, B.** 2021. Digital livestock farming. *Sensing and Bio-Sensing Research*, 32: 100408. <https://doi.org/10.1016/j.sbsr.2021.100408>
- 90 FAO, IFAD (International Fund for Agricultural Development), UNICEF (United Nations Children's Fund), WFP (World Food Programme) & WHO (World Health Organization).** 2022. *The State of Food Security and Nutrition in the World 2022. Repurposing food and agricultural policies to make healthy diets more affordable*. Rome, FAO. <https://doi.org/10.4060/cc0639en>

第 4 章

- 1 **FAO.** 2021. *Engaging with small and medium agrifood enterprises to guide policy making. A qualitative research methodological guide.* Rome. www.fao.org/3/cb4179en/cb4179en.pdf
- 2 **FAO.** 2022. *Cross cutting theme on inclusivity. FAO Strategic Framework 2022–2025.* Rome. Internal document.
- 3 **Charlton, D., Hill, A.E. & Taylor, E.J.** 2022. *Automation and social impacts: winners and losers.* Background paper for *The State of Food and Agriculture 2022.* FAO Agricultural Development Economics Working Paper 22-09. Rome, FAO.
- 4 **Morton, J.F.** 2007. The impact of climate change on smallholder and subsistence agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(50): 19680–19685. www.pnas.org/doi/pdf/10.1073/pnas.0701855104
- 5 **Davidova, S., Fredriksson, L., Gorton, M., Mishev, P. & Petrovici, D.** 2012. Subsistence farming, incomes, and agricultural livelihoods in the new Member States of the European Union. *Environment and Planning C: Government and Policy*, 30(2): 209–227.
- 6 **Sibhatu, K.T., Krishna, V.V. & Qaim, M.** 2015. Production diversity and dietary diversity in smallholder farm households. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(34): 10657–10662. <https://doi.org/10.1073/pnas.1510982112>
- 7 **Sibhatu, K.T. & Qaim, M.** 2017. Rural food security, subsistence agriculture, and seasonality. *PLOS ONE*, 12(10): e0186406. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0186406>
- 8 **Frelat, R., Lopez-Ridaura, S., Giller, K.E., Herrero, M., Douxchamps, S., Djurfeldt, A.A., Erenstein, O. et al.** 2016. Drivers of household food availability in sub-Saharan Africa based on big data from small farms. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(2): 458–463. <https://doi.org/10.1073/pnas.1518384112>
- 9 **Hall, R., Scoones, I. & Tsikata, D.** 2017. Plantations, outgrowers and commercial farming in Africa: agricultural commercialisation and implications for agrarian change. *The Journal of Peasant Studies*, 44(3): 515–537. <https://doi.org/10.1080/03066150.2016.1263187>
- 10 **Barnett, T.** 1996. Subsistence agriculture. In: T. Barnett, E. Blas & A. Whiteside, eds. *AIDS Brief for sectoral planners and managers*, pp. 6–10. Geneva, WHO. <https://corpora.tika.apache.org/base/docs/govdocs1/153/153175.pdf>
- 11 **Mendoza, E.E., Rigor, A.C., Mordido, C.C. & Marajas, A.A.** 1982. *Grain quality deterioration in on-farm level of operations. Proceedings of 5th Annual Grains Postharvest Technology Workshop, Los Baños, 1982.* Manila, South East Asia Cooperative Postharvest Research and Development Programme.
- 12 **Proctor, D.L.** 1994. *Grain storage techniques: Evolution and trends in developing countries.* FAO Agricultural Service Bulletin No. 10. Rome, FAO.
- 13 **de la Peña, C.** 2013. Thinking through the tomato harvester. In: *Boom California*. Cited 25 July 2022. <https://boomcalifornia.org/2013/06/24/thinking-through-the-tomato-harvester>
- 14 **Gazzola, P., Grechi, D., Martinelli, I. & Pezzetti, R.** 2022. The innovation of the cashierless store: a preliminary analysis in Italy. *Sustainability*, 14(4): 2034. <https://doi.org/10.3390/su14042034>
- 15 **Rudd, J.** 2019. Checking out productivity in grocery stores. *Beyond the Numbers: Productivity*, 8(15). (U.S. Bureau of Labor Statistics, December 2019). www.bls.gov/opub/btn/volume-8/checking-out-productivity-in-grocery-stores.htm
- 16 **Reinartz, W., Wiegand, N. & Imschloss, M.** 2019. The impact of digital transformation on the retailing value chain. *International Journal of Research in Marketing*, 36(3): 350–366. <https://doi.org/10.1016/j.ijresmar.2018.12.002>
- 17 **Spruit, D. & Almenar, E.** 2021. First market study in e-commerce food packaging: Resources, performance, and trends. *Food Packaging and Shelf Life*, 29: 100698.
- 18 **Zhang, Y. & Huang, L.** 2015. China's e-commerce development path and mode innovation of agricultural product based on business model canvas method. *WHICEB 2015 Proceedings*, 9. <https://aisel.aisnet.org/cgi/viewcontent.cgi?article=1076&context=whiceb2015>
- 19 **Zeng, Y., Jia, F., Wan, L. & Guo, H.** 2017. E-commerce in agri-food sector: a systematic literature review. *International Food and Agribusiness Management Review*, 20(4): 439–460.
- 20 **Cai, Y., Lang, Y., Zheng, S. & Zhang, Y.** 2015. Research on the influence of e-commerce platform to agricultural logistics: An empirical analysis based on agricultural product marketing. *International Journal of Security and Its Applications*, 9(10): 287–296. http://article.nadiapub.com/IJSIA/vol9_no10/26.pdf

- 21 **FAO & ICRISAT (International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics).** 2022. *Digital agriculture in action: selected case studies from India*. Country Investment Highlights No. 17. Rome, FAO and ICRISAT. www.fao.org/3/cc0017en/cc0017en.pdf
- 22 **FAO & Zhejiang University.** 2021. *Rural e-commerce development: experience from China*. Digital Agriculture Report. Rome, FAO. www.fao.org/3/cb4960en/cb4960en.pdf
- 23 **FAO.** 2015. *Understanding decent rural employment*. Rome. www.fao.org/3/bc270e/bc270e.pdf
- 24 **Takeshima, H. & Vos, R.** 2022. *Agricultural mechanisation and child labour in developing countries*. Background Study. Rome, FAO. www.fao.org/3/cb8550en/cb8550en.pdf
- 25 **Deichmann, U., Goyal, A. & Mishra, D.** 2016. Will digital technologies transform agriculture in developing countries? Policy Research Working Paper No. 7669. Washington, DC, World Bank. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/24507>
- 26 **Nakasone, E. & Torero, M.** 2016. A text message away: ICTs as a tool to improve food security. *Agricultural Economics*, 47: 49–59. https://mpa.ub.uni-muenchen.de/75854/1/MPRA_paper_75854.pdf
- 27 **Sekabira, H. & Qaim, M.** 2017. Can mobile phones improve gender equality and nutrition? Panel data evidence from farm households in Uganda. *Food Policy*, 73: 95–103.
- 28 **Santos Valle, S. & Kienzie, J.** 2020. *Agriculture 4.0 – Agricultural robotics and automated equipment for sustainable crop production*. Integrated Crop Management No. 24. Rome, FAO. www.fao.org/3/cb2186en/CB2186EN.pdf
- 29 **Bonacich, E. & De Lara, J.D.** 2009. *Economic crisis and the logistics industry: Financial insecurity for warehouse workers in the inland empire*. IRLE Working Paper No. 2009–13. UCLA, Los Angeles, USA. <https://escholarship.org/uc/item/8rn2h9ch>
- 30 **Gittleman, M. & Monaco, K.** 2020. Truck-driving jobs: Are they headed for rapid elimination? *ILR Review*, 73(1): 3–24.
- 31 **England, P.** 2010. The gender revolution: Uneven and stalled. *Gender and Society*, 24(2): 149–166.
- 32 **Scott, A. & Davis-Sramek, B.** 2021. *Driving in a man's world: Intra-occupational gender segregation in the trucking industry*. Working Paper. www.researchgate.net/publication/349104605_Driving_in_a_Man%27s_World_Intra-occupational_Gender_Segregation_in_the_Trucking_Industry
- 33 **U.S. Bureau of Labor Statistics.** 2022. Labor force statistics from the current population survey. In: *U.S. Bureau of Labor Statistics*. Cited 18 March 2022. www.bls.gov/cps/cpsaat11.htm
- 34 **Rapsomanikis, G.** 2015. *The economic lives of smallholder farmers: An analysis based on household data from nine countries*. Rome, FAO. www.fao.org/3/i5251e/i5251e.pdf
- 35 **Adu-Baffour, F., Daum, T. & Birner, R.** 2019. Can small farms benefit from big companies' initiatives to promote mechanization in Africa? A case study from Zambia. *Food Policy*, 84: 133–145. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2019.03.007>
- 36 **Ogutu, S.O., Ochieng, D.O. & Qaim, M.** 2020. Supermarket contracts and smallholder farmers: Implications for income and multidimensional poverty. *Food Policy*, 95: 101940. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2020.101940>
- 37 **Chege, C.G.K., Andersson, C.I.M. & Qaim, M.** 2015. Impacts of supermarkets on farm household nutrition in Kenya. *World Development*, 72: 394–407. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2015.03.016>
- 38 **Baudron, F., Misiko, M., Getnet, B., Nazare, R., Sariah, J. & Kaumbutho, P.** 2019. A farm-level assessment of labor and mechanization in Eastern and Southern Africa. *Agronomy for Sustainable Development*, 39(2): 17. <https://doi.org/10.1007/s13593-019-0563-5>
- 39 **Guilhoto, J.J.M., Barros, A., Marjotta-Maistro, M. & Istake, M.** 2002. *Mechanization process of the sugar cane harvest and its direct and indirect impact over the employment in Brazil and in its 5 macro regions*. MPRA Paper No. 38070. https://mpa.ub.uni-muenchen.de/38070/1/MPRA_paper_38070.pdf
- 40 **Charlton, D. & Kostandini, G.** 2021. Can technology compensate for a labor shortage? Effects of 287(g) immigration policies on the U.S. dairy industry. *American Journal of Agricultural Economics*, 103(1): 70–89. <https://doi.org/10.1111/ajae.12125>
- 41 **Lowenberg-DeBoer, J., Yuelu Huang, I., Grigoriadis, V. & Blackmore, S.** 2020. Economics of robots and automation in field crop production. *Precision Agriculture*, 21(2): 278–299. <https://doi.org/10.1007/s11119-019-09667-5>
- 42 **Ortega, A.C., de Jesus, C.M. & Mouro, M. de C.** 2009. Mecanização e emprego na cafeicultura do Cerrado Mineiro [Mechanization and job in the coffee growing of the Cerrado Mineiro]. *Revista Da ABET*, 8(2). <https://periodicos.ufpb.br/ojs2/index.php/abet/article/view/15268/8674>

- 43 Posadas, B.C., Knight, P.R., Coker, R.Y., Coker, C.H., Langlois, S.A. & Fain, G. 2008. Socioeconomic impact of automation on horticulture production firms in the Northern Gulf of Mexico region. *HortTechnology*, 18(4): 697–704. <https://doi.org/10.21273/HORTTECH.18.4.697>
- 44 Charlton, D. & Taylor, J.E. 2020. Rural school access and the agricultural transformation. *Agricultural Economics*, 51(5): 641–654. <https://doi.org/10.1111/agec.12583>
- 45 Taylor, J.E. & Charlton, D. 2018. *The farm labor problem: A global perspective*. Amsterdam, Elsevier Academic Press.
- 46 Lachia, N., Pichon, L. & Tisseyre, B. 2019. A collective framework to assess the adoption of precision agriculture in France: description and preliminary results after two years. In: J.V. Stafford, ed. *Precision agriculture '19*. pp. 851–857. https://doi.org/10.3920/978-90-8686-888-9_105
- 47 Lowenberg-DeBoer, J. 2022. *Economics of adoption for digital automated technologies in agriculture*. Background paper for *The State of Food and Agriculture 2022*. FAO Agricultural Development Economics Working Paper 22-10. Rome, FAO.
- 48 Ma, M., Saitone, T.L., Volpe, R.J., Sexton, R.J. & Saksena, M. 2019. Market concentration, market shares, and retail food prices: Evidence from the U.S. Women, Infants, and Children Program. *Applied Economic Perspectives and Policy*, 41(3): 542–562. <https://doi.org/10.1093/aep/ppy016>
- 49 Torero, M. 2019. Robotics and AI in food security and innovation: Why they matter and how to harness their power. In: J. von Braun, M.S. Archer, G.M. Reichberg & M. Sánchez Sorondo, eds. *Robotics, AI, and humanity: Science, ethics, and policy*, pp. 99–107. Springer.
- 50 World Bank. 2020. *Poverty and shared prosperity 2020: Reversals of fortune*. Washington, DC, World Bank. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/34496>
- 51 FAO. 2022. *Inclusion of persons with disabilities in FAO's work: Information Note*. Rome. Internal document.
- 52 Filipski, M., Aboudrare, A., Lybbert, T.J. & Taylor, J.E. 2017. Spice price spikes: Simulating impacts of saffron price volatility in a gendered local economy-wide model. *World Development*, 91: 84–99. https://arefiles.ucdavis.edu/uploads/filer_public/e3/9d/e39d6c38-56a6-4f56-8831-8947ef0648e2/2017_filipski_et_al_wd_spice_price_spikes.pdf
- 53 Diiro, G.M., Fisher, M., Kassie, M., Muriithi, B.W. & Muricho, G. 2021. How does adoption of labor saving agricultural technologies affect intrahousehold resource allocations? The case of push-pull technology in Western Kenya. *Food Policy*, 102: 102114. <http://oar.icrisat.org/11845/1/Impact%20of%20Push%20Pull%20Technology%20on%20Intra-Household%20Labour%20Allocation%20in%20Kenya.pdf>
- 54 Ceccarelli, T., Chauhan, A., Rambaldi, G., Kumar, I., Cappello, C., Janssen, S. & McCampbell, M. 2022. *Leveraging automation and digitalization for precision agriculture: Evidence from the case studies*. Background paper for *The State of Food and Agriculture 2022*. FAO Agricultural Development Economics Technical Study No. 24. Rome, FAO.
- 55 Vemireddy, V. & Choudhary, A. 2021. A systematic review of labor-saving technologies: Implications for women in agriculture. *Global Food Security*, 29: 100541.
- 56 GIZ (German Agency for International Cooperation). 2020. *Gender-transformative change in practice: 6 case studies*. Agricultural Technical Vocational Education and Training for Women (ATVET4W). Pretoria. www.giz.de/en/downloads/giz2020_en_GTC%20in%20Practice_6%20Case%20Studies_Interactive.pdf
- 57 Majumder, J. & Shah, P. 2017. Mapping the role of women in Indian agriculture. *Annals of Anthropological Practice*, 41(2): 46–54. <https://doi.org/10.1111/napa.12112>
- 58 Theis, S., Sultana, N. & Krupnik, T.J. 2018. *Overcoming gender gaps in rural mechanization: Lessons from reaper-harvester service provision in Bangladesh*. GCAN Project Note 8. CSISA Research Note 9. Washington, DC, IFPRI. <http://ebrary.ifpri.org/cdm/ref/collection/p15738coll2/id/132358>
- 59 Flores Rojas, M. 2018. *Gender sensitive labour saving technology. Drum seeder: saving time, effort and money. A case study from the Lao People's Democratic Republic*. Bangkok, FAO. www.fao.org/3/i9464en/i9464en.pdf
- 60 FAO. 2019. *Fostering the uptake of labour-saving technologies: How to develop effective strategies to benefit rural women*. Rome. www.fao.org/3/CA2731EN/ca2731en.pdf
- 61 Daum, T., Adegbola, P.Y., Adegbola, C., Daudu, C., Issa, F., Kamau, G., Kergna, A.O. et al. 2022. Mechanization, digitalization, and rural youth - Stakeholder perceptions on three mega-topics for agricultural transformation in four African countries. *Global Food Security*, 32: 100616. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2022.100616>

62 Kim, J. 2019. Innovative technology in the agricultural sectors: Opportunities for green jobs or exacerbation of rural youth unemployment? *Proceedings of the Future of Work in Agriculture Conference*. Washington, DC. <https://farmlabor.ucdavis.edu/sites/g/files/dgvnsk5936/files/inline-files/Jeongha%20Kim%3B%20Ag%20Tech.pdf>

63 Khanna, M. 2021. Digital transformation of the agricultural sector: Pathways, drivers and policy implications. *Applied Economic Perspectives and Policy*, 43(4): 1221–1242. <https://doi.org/10.1002/aep.13103>

第 5 章

1 Rose, D.C., Lyon, J., de Boon, A., Hanheide, M. & Pearson, S. 2021. Responsible development of autonomous robotics in agriculture. *Nature Food*, 2: 306–309. <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00287-9>

2 Klerkx, L. & Rose, D. 2020. Dealing with the game-changing technologies of Agriculture 4.0: How do we manage diversity and responsibility in food system transition pathways? *Global Food Security*, 24: 100347. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2019.100347>

3 Ag-Incentives. 2022. *Ag-Incentives*. Cited 4 May 2022. <http://ag-incentives.org>

4 FAO, IFAD, UNICEF, WFP & WHO. 2022. *The State of Food Security and Nutrition in the World 2022. Repurposing food and agricultural policies to make healthy diets more affordable*. Rome, FAO. <https://doi.org/10.4060/cc0639en>

5 Daum, T. & Birner, R. 2017. The neglected governance challenges of agricultural mechanisation in Africa – insights from Ghana. *Food Security*, 9(5): 959–979. <https://doi.org/10.1007/s12571-017-0716-9>

6 Cramb, R. & Thepent, V. 2020. Evolution of agricultural mechanization in Thailand. In: X. Diao, H. Takeshima & X. Zhang, eds. *An evolving paradigm of agricultural mechanization development: How much can Africa learn from Asia?* pp. 165–201. Washington, DC, IFPRI. <https://ebrary.ifpri.org/utils/getfile/collection/p15738coll2/id/134091/filename/134311.pdf>

7 Justice, S. & Biggs, S. 2020. The spread of smaller engines and markets in machinery services in rural areas of South Asia. *Journal of Rural Studies*, 73: 10–20. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2019.11.013>

8 IFC (International Finance Corporation). 2019. *The market opportunity for Productive Use Leveraging Solar Energy (PULSE) in sub-Saharan Africa*. Washington, DC. www.lightingglobal.org/wp-content/uploads/2019/09/PULSE-Report.pdf

9 Rose, D. 2022. *Agricultural automation: the past, present and future of adoption. The State of Food and Agriculture 2022, background paper*. Internal document.

10 Ministry of Transport and Communications, Finland. 2011. *Communications Market Act*. www.finlex.fi/en/laki/kaannokset/2003/en20030393.pdf

11 European Commission. 2020. *Facing the challenges of broadband deployment in rural and remote areas: A handbook for project promoters and policy makers*. www.byanatsforum.se/wp-content/uploads/2020/05/Broadband-handbook-2020pdf.pdf

12 Van Loon, J., Woltering, L., Krupnik, T.J., Baudron, F., Boa, M. & Govaerts, B. 2020. Scaling agricultural mechanization services in smallholder farming systems: Case studies from sub-Saharan Africa, South Asia, and Latin America. *Agricultural Systems*, 180: 102792. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102792>

13 Diao, X., Takeshima, H. & Zhang, X. 2020. *An evolving paradigm of agricultural mechanization development: How much can Africa learn from Asia?* Washington, DC, IFPRI. <https://ebrary.ifpri.org/digital/collection/p15738coll2/id/134095>

14 Kwet, M. 2019. Digital colonialism is threatening the Global South. In: *Aljazeera*. Cited 25 July 2022. www.aljazeera.com/opinions/2019/3/13/digital-colonialism-is-threatening-the-global-south

15 Ávila Pinto, R. 2018. Digital sovereignty or digital colonialism. *International Journal on Human Rights*, 15(27): 15–27. <https://sur.conectas.org/en/digital-sovereignty-or-digital-colonialism>

16 African Union. 2020. *The digital transformation strategy for Africa (2020-2030)*. Addis Ababa. <https://au.int/sites/default/files/documents/38507-doc-dts-english.pdf>

17 Smart Africa. 2022. *AgriTech blueprint for Africa*. <https://smart.africa/board/login/uploads/71613-continental-agritech-blueprint-eng.pdf>

18 FAO & ITU. 2017. *E-agriculture strategy guide: A summary*. Bangkok. www.fao.org/3/i6909e/i6909e.pdf

19 Ströh de Martínez, C., Feddersen, M. & Speicher, A. 2016. *Food security in sub-Saharan Africa: A fresh look on agricultural mechanisation. How adapted financial solutions can make a difference*. Studies No. 91. Bonn, Germany, German Development Institute. www.die-gdi.de/uploads/media/Study_91.pdf

20 Bhattarai, M., Singh, G., Takeshima, H. & Shekhawat, R.S. 2020. Farm machinery use and the agricultural machinery industries in India. In: X. Diao, H. Takeshima & X. Zhang, eds. *An evolving paradigm of agricultural mechanization development: How much can Africa learn from Asia?* pp. 97–138. Washington, DC, IFPRI. <https://ebrary.ifpri.org/digital/collection/p15738coll2/id/134090>

21 FAO & AUC. 2018. *Sustainable agricultural mechanization: A framework for Africa*. Addis Ababa. www.fao.org/3/CA1136EN/ca1136en.pdf

22 Ceccarelli, T., Chauhan, A., Rambaldi, G., Kumar, I., Cappello, C., Janssen, S. & McCampbell, M. 2022. *Leveraging automation and digitalization for precision agriculture: Evidence from the case studies*. Background paper for *The State of Food and Agriculture 2022*. FAO Agricultural Development Economics Technical Study No. 24. Rome, FAO.

23 Win, M.T., Belton, B. & Zhang, X. 2020. Myanmar's rapid agricultural mechanization: Demand and supply evidence. In: X. Diao, H. Takeshima & X. Zhang, eds. *An evolving paradigm of agricultural mechanization development: How much can Africa learn from Asia?* pp. 263–284. Washington, DC, IFPRI. https://doi.org/10.2499/9780896293809_08

24 Meyer, R. 2011. *Subsidies as an instrument in agriculture finance: A review*. Washington, DC, World Bank. <https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/12696/707300ESW0P1120ies0as0an0Instrument.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

25 Houssou, N., Diao, X., Cossar, F., Kolavalli, S., Jimah, K. & Aboagye, P.O. 2013. Agricultural mechanization in Ghana: Is specialization in agricultural mechanization a viable business model? *American Journal of Agricultural Economics*, 95(5): 1237–1244 <https://doi.org/10.1093/ajae/aat026>

26 Daum, T., Huffman, W. & Birner, R. 2018. *How to create conducive institutions to enable agricultural mechanization: A comparative historical study from the United States and*

Germany. Economics Working Paper. Ames, USA, Department of Economics, Iowa State University. https://lib.dr.iastate.edu/econ_workingpapers/47

27 Grain Producers Australia (GPA), Tractor and Machinery Association (TMA) & Society of Precision Agriculture Australia (SPAA). 2021. *Code of practice. Agricultural Mobile Field Machinery with Autonomous Functions in Australia*. www.graincentral.com/wp-content/uploads/2021/08/Code-of-Practice.pdf

28 Lowenberg-DeBoer, J., Behrendt, K., Ehlers, M.-H., Dillon, C., Gabriel, A., Huang, I.Y., Kumwenda, I. et al. 2021. Lessons to be learned in adoption of autonomous equipment for field crops. *Applied Economic Perspectives and Policy*, 44(2): 848–864. <https://doi.org/10.1002/aep.13177>

29 Justice, S., Flores Rojas, M. & Basnyat, M. 2022. *Empowering women farmers – A mechanization catalogue for practitioners*. Rome, FAO. www.fao.org/3/cb8681en/cb8681en.pdf

30 Flores Rojas, M. 2018. *Gender sensitive labour saving technology. Drum seeder: saving time, effort and money. A case study from the Lao People's Democratic Republic*. Bangkok, FAO. www.fao.org/3/i9464en/i9464en.pdf

31 Committee on World Food Security (CFS). 2014. *Principles for responsible investment in agriculture and food systems*. Rome. www.fao.org/3/a-au866e.pdf

32 Alves, B.J.R., Madari, B.E. & Boddey, R.M. 2017. Integrated crop–livestock–forestry systems: prospects for a sustainable agricultural intensification. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 108: 1–4. <https://doi.org/10.1007/s10705-017-9851-0>

33 McCampbell, M. 2022. *Agricultural digitalization and automation in low- and middle-income countries: Evidence from ten case studies*. Background paper for *The State of Food and Agriculture 2022*. FAO Agricultural Development Economics Technical Study No. 25. Rome, FAO.

34 Northrup, D.L., Basso, B., Wang, M.Q., Morgan, C.L.S. & Benfey, P.N. 2021. Novel technologies for emission reduction complement conservation agriculture to achieve negative emissions from row–crop production. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(28): e2022666118.

35 FAO. 2020. Conservation agriculture. In: FAO. Rome. Cited 1 August 2022. www.fao.org/conservation-agriculture/en

- 36 Jaleta, M., Baudron, F., Krivokapic-Skoko, B. & Erenstein, O.** 2019. Agricultural mechanization and reduced tillage: antagonism or synergy? *International Journal of Agricultural Sustainability*, 17(3): 219–230. <https://doi.org/10.1080/14735903.2019.1613742>
- 37 Giller, K.E., Witter, E., Corbeels, M. & Titttonell, P.** 2009. Conservation agriculture and smallholder farming in Africa: The heretics' view. *Field Crops Research*, 114(1): 23–34. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.06.017>
- 38 Baudron, F., Nazare, R. & Matangi, D.** 2019. The role of mechanization in transformation of smallholder agriculture in Southern Africa: Experience from Zimbabwe. In: R. Sikora, E. Terry, P. Vlek & J. Chitja, eds. *Transforming agriculture in Southern Africa*, pp. 152–159. London, Routledge. www.taylorfrancis.com/chapters/oa-edit/10.4324/9780429401701-21/role-mechanization-transformation-smallholder-agriculture-southern-africa-fr%C3%A9d%C3%A9ric-baudron-raymond-nazare-dorcas-matangi
- 39 FAO.** 2022. Responsible business conduct (RBC) in agriculture. In: FAO. Rome. Cited 29 June 2022. www.fao.org/responsible-business-conduct-in-agriculture/en
- 40 European Commission.** 2022. *Just and sustainable economy: Commission lays down rules for companies to respect human rights and environment in global value chains*. Press Release. Brussels https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_22_1145
- 41 Torero, M.** 2019. Robotics and AI in food security and innovation: Why they matter and how to harness their power. In: J. von Braun, M.S. Archer, G.M. Reichberg & M. Sánchez Sorondo, eds. *Robotics, AI, and humanity: Science, ethics, and policy*, pp. 99–107. Springer.
- 42 Adu-Baffour, F., Daum, T. & Birner, R.** 2019. Can small farms benefit from big companies' initiatives to promote mechanization in Africa? A case study from Zambia. *Food Policy*, 84: 133–145. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2019.03.007>
- 43 Daum, T., Capezzone, F. & Birner, R.** 2021. Using smartphone app collected data to explore the link between mechanization and intra-household allocation of time in Zambia. *Agriculture and Human Values*, 38: 411–429. <https://doi.org/10.1007/s10460-020-10160-3>

- 44 Sims, B., Hilmi, M. & Kienzie, J.** 2016. *Agricultural mechanization. A key input for sub-Saharan African smallholders*. Integrated Crop Management No. 23. Rome, FAO. www.fao.org/3/i6044e/i6044e.pdf
- 45 Tsan, M., Totapally, S., Hailu, M. & Addom, B.** 2019. *The digitalisation of African agriculture report 2018-2019*. Wageningen, Netherlands. CTA. www.cta.int/en/digitalisation-agriculture-africa
- 46 Trendov, N.M., Varas, S. & Zeng, M.** 2019. *Digital technologies in agriculture and rural areas – Status report*. Rome, FAO. www.fao.org/3/ca4985en/CA4985EN.pdf
- 47 Charlton, D., Hill, A.E. & Taylor, E.J.** 2022. *Automation and social impacts: winners and losers. Background paper for The State of Food and Agriculture 2022*. FAO Agricultural Development Economics Working Paper 22-09. Rome, FAO.
- 48 Mapiye, O., Makombe, G., Molotsi, A., Dzama, K. & Mapiye, C.** 2021. Towards a revolutionized agricultural extension system for the sustainability of smallholder livestock production in developing countries: The potential role of ICTs. *Sustainability*, 13(11): 5868. <https://doi.org/10.3390/su13115868>
- 49 Bhattacharyya, T., Wani, S.P. & Tiwary, P.** 2021. Empowerment of stakeholders for scaling-up: digital technologies for agricultural extension. In: S.P. Wani, K.V. Raju & T. Bhattacharyya, eds. *Scaling-up solutions for farmers*, pp. 121–147. Cham, Springer International Publishing. https://link.springer.com/10.1007/978-3-030-77935-1_3

附件 1

- 1 McCampbell, M.** 2022. *Agricultural digitalization and automation in low- and middle-income countries: Evidence from ten case studies*. Background paper for *The State of Food and Agriculture 2022*. FAO Agricultural Development Economics Technical Study No. 25. Rome, FAO.
- 2 Ceccarelli, T., Chauhan, A., Rambaldi, G., Kumar, I., Cappello, C., Janssen, S. & McCampbell, M.** 2022. *Leveraging automation and digitalization for precision agriculture: Evidence from the case studies*. Background paper for *The State of Food and Agriculture 2022*. FAO Agricultural Development Economics Technical Study No. 24. Rome, FAO.



2022 粮食及农业状况

运用农业自动化 推动农业粮食体系转型

自二十世纪初以来，自动化便一直与全球农业相生相伴。机动机械化成效斐然——提高生产力，减轻繁重负担，提升劳动力配置效率，但同时也带来了一些不利的环境影响。近年来，数字农业自动化技术方兴未艾，一方面有望进一步提高生产力，增强韧性，另一方面也能兼顾以往机械化作业带来的环境可持续性挑战。

《2022 年粮食及农业状况》探究农业自动化的驱动因素，包括新兴的数字技术。本报告基于 27 个案例研究，分析了全球各类农业生产体系采纳数字自动化技术的商业逻辑。报告指出了阻碍此类技术得以包容性采纳的各种障碍，尤其是小规模生产者面临的障碍。主要障碍包括数字技能不高，缺少有利的基础设施，如通网和通电，此外还有资金限制。本出版物基于分析提出，相关政策要确保发展中区域的弱势群体能够从农业自动化进程中受益，且自动化进程要有利于建设可持续、有韧性的农业粮食体系。



ISBN 978-92-5-137029-2 ISSN 1020-7619



9 789251 370292
CB9479ZH/1/12.22