第42卷 第3期 华中农业大学学报 Vol.42 No.3
2023年 5月 Journal of Huazhong Agricultural University May 2023,10～17

何可,吴昊,曾杨梅.“双碳”目标下的智慧农业发展[J].华中农业大学学报,2023,42(3):10-17.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2023.03.002

“双碳”目标下的智慧农业发展

何可[1,2],吴昊[2,3],曾杨梅[4]

1.中国人民大学农业与农村发展学院,北京 100872;2.华中农业大学农业绿色低碳发展实验室,武汉 430070;
3.华中农业大学经济管理学院,武汉 430070;4.湖北工业大学经济与管理学院,武汉 430068

摘要 智慧农业为推动农业减排增汇、助力“双碳”目标实现提供了新思路。本文在明晰“双碳”目标下智慧农业内涵特征的基础上,分析了智慧农业发展面临的问题和挑战,进而提出了对策建议。“双碳”目标下的智慧农业发展,应在理念上强调以智慧化引领低碳化、以低碳化带动智慧化,在科技上注重低碳取向的创新和应用,在制度上重视政府与市场双轮驱动。中国智慧农业发展尚处于初级阶段,在技术设备、规模经营、人才储备、政策支持等方面存在短板和瓶颈。因此,未来应强化农业技术创新研发,推动农业适度规模经营,完善人才培养体系,构建“政府有为,市场有效”的智慧农业发展机制。

关键词 碳达峰;碳中和;智慧农业;现代信息技术;低碳发展

中图分类号 F323.22;F303.4 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2023)03-0010-08

智慧农业既是建设数字中国、实施乡村振兴战略的重要内容,亦是实现农业绿色低碳转型的“助推器”。早在1999年,原国家发展计划委员会就出台政策支持北京开展精准农业技术研究试验示范基地建设。进入21世纪后,中国对智慧农业建设的重视程度与日俱增,《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》明确要求,加快发展智慧农业,推进农业生产经营和管理服务数字化改造;《“十四五”全国农业农村信息化发展规划》提出了至2025年“智慧农业发展迈上新台阶”的发展目标,并要求大力发展智慧种业、智慧农田、智慧种植、智慧畜牧、智慧渔业、智能农机、智慧农垦;2023年中央一号文件要求,加快农业农村大数据应用,推进智慧农业发展。毋庸置疑,伴随数字经济与农业发展融合程度的不断加深,智慧农业已成为中国式农业现代化进程中的重要战略内容[1]。

尽管中国智慧农业发展已经取得了初步成效,但依然面临着关键核心技术创新能力不强、技术研发推广成本过高、复合型人才不足等难题[2-3],导致智慧农业的发展进程较为缓慢。从农业信息化水平来看,2020年全国农业生产信息化水平仅为22.5%;分区域看,中部地区为30.8%,东部地区为25.7%,西部地区为19.6%;分行业看,畜禽养殖信息化水平为30.2%,设施栽培、大田种植、水产养殖的信息化水平分别为23.5%、18.5%和15.7%(http://www.agri.cn/V20/ztzl_1/sznync/ltbg/202112/P020211220311961420836.pdf)。与此同时,伴随全球气候变化的不断加剧以及碳达峰目标时间的日益临近,各行各业需要共同发力以全面实现降碳减排。其中,农业作为不可忽视的碳排放源,在实现“双碳”目标过程中理应发挥重要作用。然而,当前中国仍然维持着高碳型农业生产方式,这带来了大量碳排放问题。根据金书秦等[4]的研究,中国农业碳排放呈上升趋势,从1961年的2.49亿t上升到2018年的8.70亿t。经济合作与发展组织(OECD)与联合国粮食及农业组织(FAO)于2022年联合发布的《2022—2031年全球农业展望》预测,未来10年农业直接温室气体排放量将增加6%。可见,转变高碳型农业生产方式已迫在眉睫。作为现代化的农业生产模式,智慧农业无疑将成为推动农业降碳减排的根本出路。在这类农业生产模式中,农业生产主体能够通过使用数字技术手段推动精细化生产,在提升农业生产效率的同时降低碳排放,由此助力“双

收稿日期:2023-02-19
基金项目:国家自然科学基金项目(71703051;72103055);武汉市知识创新专项“曙光计划”项目(2022020801020227);影子科技-华中农大健康食品产业研究院项目(IRIFH202223)
何可,E-mail:hekework@gmail.com
通信作者:吴昊,E-mail:18487376776@163.com

碳”目标的实现。那么，如何实现农业智慧化、低碳化的协同已成为亟待解决的问题。基于此，本文在阐述智慧农业内涵特征的基础上，分析“双碳”目标下我国智慧农业发展面临的问题，进一步提出切实可行的对策建议，挖掘智慧农业促进减排增汇的潜力，以期为我国智慧农业发展助力“双碳”目标的实现提供参考和借鉴。

1　“双碳”目标下智慧农业的内涵与特征要求

1.1　智慧农业的内涵

“智慧”一词出自《墨子·尚贤》，是指快速地正确认识、判断和发明、创造事物的能力。智慧农业的概念是在“精准农业”的基础上逐渐形成的，指立足农业发展的整体性，将互联网、物联网、云计算、大数据、人工智能等现代信息技术与农业深度融合，从而实现农业数据实时采集、农业生态环境实时监测、农业生产要素精准投入、农业生产过程定量决策与智能调控等功能的新型农业生产模式[5-6]。得益于数字经济的发展，自动驾驶、机器学习、机器人、图像识别等人工智能核心技术向农业领域的渗透率不断提高，部分新型职业农民开始使用智能APP进行作物长势监测、租赁农机、耕地播种、病虫害识别诊断、产量预测等生产活动①。

在“双碳”目标的导向下，农业走绿色低碳发展新路势在必行，这要求智慧农业发展在实现智慧化的同时兼顾低碳化[7]。特别是面对“2030碳达峰”目标的紧迫局面，中国智慧农业在技术设备研发推广、生产经营改造、生产管理服务等方面却尚未实现智慧化、低碳化发展。因此，“双碳”目标下的智慧农业内涵，已不再局限于提高农业生产效率、农业管理水平、节约利用资源，还涉及降低农业碳排放、增加农业碳汇。

1.2　“双碳”目标下智慧农业的特征要求

毋庸置疑，为促进农业高质量、可持续发展，农业生产不仅要注重效率、产出，更要重视生态。智慧农业生产模式将现代信息技术与农业发展有机结合起来，既能够推动农业精细化、科学化、高效化生产，又可降低碳排放、保护生态环境，具有实现经济效益的“关键智慧”和实现生态效益的“绿色智慧”，以更好地助力“双碳”目标的实现。鉴于此，“双碳”目标下智慧农业的发展应以智慧化与低碳化相结合的发展理念为指导，既要把数字技术融入到农业发展过程中，又要依托低碳发展大势推动智慧农业发展，形成互促互进的发展模式；应促进低碳取向的数字技术研发推广，实现农业资源的合理配置和低碳、高效利用，确保在提高智慧农业生产效率的同时降低农业碳排放；应构建政府发挥主导作用、市场有效配置资源的发展格局，为智慧农业发展提供制度支撑。

1）理念上，以智慧化引领低碳化，以低碳化带动智慧化。面对百年未有之大变局与新冠疫情交织叠加的现实，智慧化和低碳化成为全球经济复苏的新动能，现代信息技术正加速与各行各业融合[8]，农业概莫能外。“双碳”目标下智慧的农业发展，需以智慧化引领低碳化，以低碳化带动智慧化。就前者而言，通过现代信息技术与农业全要素、全产业链、全价值链融合，在实现农业生产效率和农业用能效能双提升的同时，缓解传统农业技术设施对气候变化影响的“锁定效应”。就后者而言，借助数字产业节能降碳的大势，改变过去互联网、物联网、云计算、大数据、人工智能等现代信息技术在农业领域单一应用、小范围应用的局面，转为全面协同应用，推动智慧农业纵深发展。

2）科技上，注重低碳取向的创新和应用。科学技术是促进农业绿色低碳转型的核心要素。推进现代信息技术在智慧农业生产的全面融合应用，不仅要考虑利用数字技术提高效率、增加产出的基本要求，还需综合考虑“双碳”目标要求、资源环境约束和作物生长特性，充分利用数字科技并集成人的智慧参与农业生产全过程的决策和管控[9]，使智慧农业在实现经济效益的同时发挥出减排增汇的功能。一方面，将低碳化和智慧化两大目标相结合，全面推进智慧农业科技革命，加强数字技术与降碳技术的创新研发和融合应用，推动农业发展质量变革、效率变革、动力变革。另一方面，统筹智慧农业基础设施集约部署，强化信息化基础设施的共建共享，加快高耗能老旧农业设施设备低碳改造和升级，推动农业生产全过程的决策和管控实现高度数字化和精准化。

3）制度上，重视政府和市场双轮驱动。智慧农业的发展是一项具有复杂性、长期性的重点工程。尽管中国智慧农业顶层设计日趋完善，但由于各地农业经济发展水平、现代信息技术研发水平和应用情况均存在较大差异，即使拥有智慧农业发展制度

① 资料来源：《聚变：中国农业人工智能白皮书（2022年6月）》

上的“大框架”，倘若缺乏细分的行动方案以及市场力量的参与，也难以同步推进各地发展智慧农业的“小行动”。因此，需要政府和市场共同发力。这意味着，“双碳”目标下的智慧农业发展，一方面，需要在更好发挥政府顶层设计和制度保障“风向标”作用的同时，将低碳化发展目标纳入具有指导性、针对性的智慧农业发展战略规划之中，并引导各地政府部门因地制宜制定实施相应的地方发展规划；另一方面，需要充分发挥市场合理配置资源的决定性作用，积极把智慧农业纳入碳交易市场，凭借市场力量助力实现减排增汇。

2 “双碳”目标下智慧农业发展面临的问题

2.1 智慧农业技术和设备创新能力不强，且尚未完全兼顾“双碳”目标

1)智慧农业技术和设备的创新研发能力不强。从智慧农业数字技术来看，相较于发达国家，中国智慧农业的数字技术水平整体上处于发展的初级阶段，除了农机北斗导航、垂直植物工厂等部分技术达到或接近国际领先水平之外，支持农业生产实现智慧化、数字化决策和控制的核心算法、作物生长建模等关键技术仍处于“跟跑”阶段[10]，把物联网、人工智能等数字技术融入农业生产的创新和研发较为滞后。尤其在大田农业生产领域，农业数字化管控平台、软件的开发落后于美国、法国、德国等先进国家，与环境、作物、风险管理相关的算法体系，与农业气象、土壤肥力、病虫害相关的农作物生长建模的创新研发缓慢，难以实现作物生长各环节的算法分析、精准决策、定量投入、自动化作业和管护。从智慧农业数字设备来看，除了大疆植保无人机等部分硬件设施外，高端农业传感器的发展基础较为薄弱，自主研发的农业传感器数量不到全球已研发数量的10%[5]，且传感器的稳定性、精确性相较于国外先进水平仍有差距。同时，具有智能计算能力的高光谱成像仪、植株营养素分析仪等监测设备精度不高[11]，农业生产中还未能很好地实现作物长势精确监测和精准施肥。

2)智慧农业技术应用率不高且未完全兼顾“双碳”目标。由于卫星遥感、地面遥感和农田物联网等数据难以实现整合，数字技术在农业生产中的综合应用率不高。2019年，中国大田种植中采取测土配方施肥、病虫害监测预警系统、水肥一体化、航空喷洒施药技术的经营主体比例分别为36.1%、35.3%、30.6%和13.6%[12]。与此同时，由于无人驾驶、导航技术、机器人技术等数字技术的应用尚未普及，人工智能技术在动植物育种、动植物健康、农业废弃物资源化等方面的应用成熟度相对较低①，发展智慧农业所需数字技术还有较大的应用空间。从数字技术的具体应用来看，中国智慧农业数字技术的应用还不具备兼容性和普适性，技术应用存在难以适应差异化环境的难题。此外，降碳技术和数字技术的深度融合亟待推进，在推广应用数字技术以提升农业生产效率的同时，尚未完全兼顾“双碳”目标，农业生产在实现资源环境实时监测、生产要素精准投入等方面仍面临巨大挑战，有效减少农业碳排放任重而道远。

2.2 智慧农业发展的规模经营基础薄弱

1)耕地细碎化问题较为严重。中国大多数地区土地资源呈块状式分布，耕地细碎化问题严峻。第3次全国农业普查数据显示，全国户均经营规模仅有0.52 hm^2。同时，由于信息不对称、恋土情结等问题，土地规模经营进展缓慢，截至2021年底，全国土地流转率仅为25.3%②。这些问题均不利于“双碳”目标下的智慧农业发展：一是难以产生规模效应。耕地细碎化既使得耕地的规模和形状不利于农机作业，增加了能耗引起的碳排放，也阻碍了农业生产经营主体之间实现设施、设备的共享，增加了资源浪费导致的碳排放；二是影响了农业管理水平的提升。耕地细碎化使得农田的空间分布复杂，既难以实现对农田环境、作物生长、资源消耗、碳排放、碳汇等数据的实时监测和分析，也难以实现对水、肥、药等要素的精准控制和管理。

2)小农经营方式长期存在。第3次全国农业普查数据显示，中国小农户数量占农业经营户的98%以上。小农经营方式难以形成规模效应，不利于推广低碳技术、设备和管理措施，也不利于开展碳交易项目。同时，小农经营方式在应对气候变化方面具有脆弱性，不利于提高粮食系统的气候韧性。因此，要实现“双碳”目标下的智慧农业发展，需要转变农业经营方式，推动服务规模经营，构建资源节约、环

① 资料来源：《聚变：中国农业人工智能白皮书(2022年6月)》。

② 数据来源：《中国农村政策与改革统计年报(2021年)》。

境友好、低碳导向的气候智能型农业系统。然而，当前服务规模经营主体存在单体规模偏小、融资较为困难、文化素质不高、整体实力不强等问题[13]，加之利益联结机制不完善，小农户即使通过生产托管等服务规模经营实现了低碳化、智慧化生产，也难以保证收入增加[14]。

2.3　智慧农业发展所需的科技人才储备不足

1)科技人才供给不足。“双碳”目标下的智慧农业发展，要求通过现代信息技术改造农业产业的生产、经营和服务体系，以推动农业兼顾低碳化、智慧化的双重目标。只有拥有足够数量和质量的农业科技人才，才能推动现代信息技术与农机农艺融合应用，拓展农业大数据应用场景，研发应用减排增汇型农业技术，探索建立碳汇产品价值实现机制。然而，当前，人才供给不足不仅制约了智慧农业的发展水平和创新能力，也影响了智慧农业对“双碳”目标的贡献度。总量方面，中国农业信息化人才资源仅占信息技术人才总数的0.9%。其中，省、市级农业信息化人才队伍占0.8%，而县、乡镇农业信息化人才仅占0.1%[15]。结构方面，智慧农业科技人才大多数集中在经济较为发达的地区，偏远农村地区较少。造成上述现状的主要原因在于：一是农林类高校在智慧农业的人才培养方面存在理论与实践相分离的现象。高达36.82%的农林类大学生从未亲身参与过农事工作[16]，加之当前智慧农业与碳中和的交叉学科建设力度不够，农林类高校人才从事兼具低碳化、智慧化农业工作的意愿不强[16-17]。二是非正规教育不足。从农民培训来看，现有针对智慧农业、低碳农业的培训相对较少，且多数培训未能覆盖所有可能的受训者。从开展方式来看，当前大多是村委会线下组织的小范围培训，线上培训占比较少。此外，现有培训缺乏系统性和多样性，培训内容多数停留在概念层面，受训者获得的智慧农业技术知识和实践技能较为有限。

2)本土人才的挖掘潜力不足。“双碳”目标下的智慧农业发展，要求通过数字赋能乡村政务服务和基层社会治理，加强农业减排增汇数字化核算能力，高效监管农业“双碳”战略在基层实施进程。只有提高本土人才的数字素养和低碳素养，才能增强他们对“双碳”目标下的智慧农业的科学认知和实践能力。然而，当前，本土人才的挖掘潜力不足不仅制约了智慧农业在基层的推广应用，也影响了智慧农业对“双碳”目标的支撑作用。一是农村人口老龄化趋势导致难以挖掘本土人才。中国人口老龄化率城乡差异明显，2020年农村人口老龄化率①为17.72%，比城市高出6.61个百分点。相较于年轻劳动力，老年劳动力虽拥有丰富的农业生产经验，但是其知识体系较为落后，数字素养、低碳素养不高[18]，对“双碳”目标下的智慧农业发展缺乏科学认知。二是农村劳动力受教育水平普遍较低，使智慧农业大面积推广受阻。2021年中国农村户主劳动力为高中文化程度的占比仅为11.7%，为大学专科及以上的占比仅为2.0%②。正因如此，许多农村劳动力对智慧农业、低碳农业的接受能力和学习能力有限。以规模养猪户这一新型农业经营主体为例，笔者团队的调查发现，规模养猪户对智慧农业、低碳农业的认知程度不高，仅有13.10%的规模养猪户较为了解智慧农业，18.76%较为了解低碳农业。

2.4　智慧农业发展的政府和市场驱动力量不足

1)智慧农业发展顶层设计尚未完全兼顾低碳化发展目标。从全国层面来看，国家已颁布《数字乡村发展战略纲要》《“十四五”全国农业农村信息化发展规划》《数字乡村发展行动计划(2022—2025年)》等政策文件，聚焦于推动农业农村大数据体系建设，增强智慧农业科技创新能力，促进现代信息技术与农业产业的深度融合等内容，但却对低碳化发展目标的重视不足。即使部分规划如《“十四五”全国农业农村信息化发展规划》中提到“聚焦生物育种、耕地质量、智慧农业、农业机械设备、农业绿色投入品等关键领域，加快研发与创新一批关键核心技术及产品”，但仍没有专门强调推动农业智慧化与低碳化协调发展。从地区层面来看，各地区因生产经营方式不同，农业智慧化与低碳化协同发展缺少针对性的指导和支持。目前，仅有河北、黑龙江、山东、重庆等省(直辖市)颁布了地区智慧农业发展相关规划。例如，河北省农业农村厅印发了《河北省智慧农业示范建设专项行动计划(2020—2025年)》，明确了完成智慧种植、智慧畜牧、智慧渔业等6项重点任务，实施智慧农业大数据、智慧农业创新、智慧农业示范等6项工程；黑龙江省人民政府颁布了《“数字龙江”发展规划(2019—2025年)》，旨在推进信息技术与农业生产深度融合，提高智能化技术研发水平；山东省人民政

① 数据来源：国家统计局《第七次全国人口普查主要数据结果新闻发布会答记者问》

② 数据来源：《2022中国农村统计年鉴》

府出台了《数字山东发展规划(2018—2022年)》,提出建设一批智慧农业园区和示范基地;重庆市人民政府办公厅颁布了《重庆市智慧农业发展实施方案(试行)》,意在研发推广高效的智慧农业技术,建设智慧农业生产示范基地。然而,在已颁布的地区智慧农业相关发展规划中,基本没有提及农业智慧化与低碳化相结合的目标和要求。

2)推动智慧农业发展的市场力量不足。理论上,“双碳”目标能为智慧农业的成本降低提供新的契机和动力。一方面,双碳目标要求加快建立碳交易市场体系,这将有利于智慧农业技术设备的研发应用获得更多的市场回报。另一方面,“双碳”目标要求加强绿色金融体系建设,扩大绿色信贷规模,这将有利于智慧农业项目建设、科技人才培养等多项环节获得更多的资金支持和风险分担。然而,当前推动智慧农业发展的市场力量不足。一是智慧农业与碳交易市场的融合程度不高。当前的农业碳交易项目主要集中于农村沼气项目、林业碳汇项目、生态茶园项目等,尚未有专门针对智慧农业的碳交易项目。湖北省于2020年出台的《关于开展“碳汇+”交易助推构建稳定脱贫长效机制试点工作的实施意见》尽管提出了测土配方减碳项目,但尚未落地。二是智慧农业发展的企业参与度不高。尽管阿里巴巴、腾讯、华为等互联网企业已涉足智慧农业,中粮、北大荒、新希望等少数传统农业企业也在智慧农业领域中“崭露头角”,然而,大量涉农企业在智慧农业生产管理、技术研发推广、科技人才培育等方面的支持贡献力度远远不够。

3 “双碳”目标下智慧农业发展的对策建议

3.1 强化农业技术创新研发,促进农业技术推广应用

1)加强智慧农业的技术创新研发力度。一是加大智慧农业数字技术研发力度。围绕农业信息采集系统、智能农机装备、动植物生长调控模型与算法等短板技术领域,结合“双碳”目标,积极开展“人工智能+农业”“互联网+农业”等农业技术创新研究,研发一批拥有自主产权且兼具低碳化和智慧化的农业数字技术。例如,利用人工智能和互联网技术,研发农业碳排放、碳汇监测和预测系统,实现农业碳排放、碳汇的精准测算和动态管理。二是重点突破远程传感技术等技术瓶颈。农业传感技术不仅能够实现实时监测、传输农田生态环境数据,还能够精确地记录化肥、农药的使用时间、频次和使用量等数据[6],有助于帮助农业生产者在农用化学品精准投入方面做出科学决策,降低农用化学品过量投入引发的碳排放。例如,进一步研发卫星遥感、无人机遥感、地面传感器等多源数据融合技术,提高农业碳排放、碳汇等生态环境数据的时空分辨率和精度。

2)强化兼具低碳化和智慧化农业技术的推广应用。一是深化智慧农业数字技术推广应用。持续建设智慧农业数字技术创新应用示范基地,将作物生长培育、极端天气应对、病虫害防治、农药化肥精准化投入等列为重点应用场景,推动成效高的技术成果应用于智慧农业生产实际。同时,加强北斗导航系统在智能农机自动导航、驾驶等领域的应用;加强卫星遥感技术在农业资源勘察、农业气象、自然灾害等方面的应用;加强人工智能技术在智慧牧场、智慧农场和智慧渔场中的应用。这些技术不仅可以提高农业生产效率,还可以节能降耗和减少温室气体排放,有利于实现“双碳”目标。二是搭建农林类高等院校和职业院校、科研机构、涉农企业与农户的联通互动机制。对标国家智慧农业发展要求和农户实际技术需求,增强农林类高等院校和职业院校、科研机构、涉农企业等与农户的智慧农业技术指导、培训。在具体形式上,在鼓励智慧农业人才进入田间进行“一对一”技术指导的同时,利用好抖音、ChatGPT等网络平台和人工智能工具,以线上和线下相结合的方式推动智慧农业技术精准落地。并且,建立有效的评估和反馈机制,定期监测和分析智慧农业技术推广应用的效果和问题,及时调整和优化推广策略和方法。这种机制不仅可以促进智慧农业技术的传播和应用,还可以培养农户的低碳意识、提高农户的数字化能力。

3.2 推动农村土地适度规模经营,提升农业社会化服务效能

1)推动农业适度规模经营与数字化转型相结合,提高农业生产效率和碳减排效率。一是引导承包地经营权有序流转。一方面,继续根据不同地区的自然经济条件、农村劳动力转移情况,鼓励当地农户依法、自愿、灵活采取转包、出租、互换、入股等方式流转承包地,实现农民内部集中连片生产而形成规模经济,进而提高农业生产效率和碳减排效率;另一方面,创新承包地流转方式,可采取“倒包返租”的方式,即村委会按照企业对土地质量的需求向农户

租赁土地，并筹集资金以修整撂荒地、改善农田耕作条件，而后返租给企业，让企业“拎包入田”。二是推动新型农业经营主体高质量发展。重点培育家庭农场、农民合作社等新型农业经营主体，着重鼓励新型农业经营主体利用物联网、大数据、人工智能等现代信息技术，实现农田管理、农机作业等环节的智能化、精准化、高效化，减少化肥、农药、能源等投入品过量使用导致的碳排放。同时，支持新型农业经营主体之间、新型农业经营主体与小农户之间开展联合经营，进一步推广“基地＋家庭农场＋农户”“基地＋合作社＋农户”等模式，实现农业生产活动和碳排放、碳汇信息的智能采集和共享，建立数字化的农业碳排放、碳汇管理体系，提高碳减排和碳汇核算能力。

2)发挥农业社会化服务示范带动作用，夯实智慧农业发展的服务规模经营基础。鼓励和引导社会机构参与面向“双碳”目标下的智慧农业社会化服务，加强农业服务主体之间的联合合作，提高农业社会化服务质量；在此基础上，引导新型农业服务主体积极参与智慧种业、智慧农田、智慧种植、智慧畜牧、智慧渔业、智能农机、智慧农垦，通过农技推广、代耕代种、联耕联种、土地托管等方式，将兼具低碳化和智慧化的新技术、新装备、新模式导入小农户的农业生产之中。例如，通过社会化服务提供无人机精准施肥和喷药，不仅节约了人力和物力成本，还减少了化肥和农药的使用量及其引发的碳排放。此外，还应利用数字技术监测和评估农业社会化服务的碳减排和碳汇效果，提高农业社会化服务的公信力和透明度。

3.3　完善人才培养体系，提供智慧农业发展智力支撑

1)实施智慧农业人才培养计划。一是紧密结合“双碳”目标，在农林类高校开展智慧农业与碳中和的交叉学科建设，增设相关实践课程，打造体现低碳化和智慧化的农业试验基地；同时，政府部门可通过提供专项资金、补贴等方式，鼓励农林类高校人才从事智慧农业发展的相关工作。二是加强涉农企业、农业科研机构与农林类高校之间的交流合作，为农林类高校学生提供数字技术设备研发、应用的岗位实习机会，以产教融合的方式联合培养复合型智慧农业人才。三是创新农民培训方式，因地制宜、因人制宜采取远程专家授课、网络微课程、田间实践讲解等方式，提高农民对低碳农业、智慧农业的认知，特别针对农业碳排放和碳汇核算、交易规则和碳资产开发等领域，并依据不同地域、作物、规模等因素开展系统培训。例如，在水稻种植区域，可重点培训智能水肥一体化系统、无人机喷洒等技术，实现精准灌溉、施肥、防治；在畜牧业区域，可重点培训智能养殖系统、生物质能源利用等技术，实现动物健康监测、粪便处理、沼气发电。

2)充分挖掘本土智慧农业人才。一是开展智慧农业人才造福家乡计划，通过多方宣传、实施政策性补贴等方式，激励外流的高素质技术人才、农林类高校毕业生人才返乡从事智慧农业工作。同时，建立智慧农业人才库和信息平台，加强人才需求与供给的对接和服务。二是挖掘本土知农爱农且有专业技能的乡贤人才，开展智慧气象、智能灌溉、精准施肥等领域的技能培养计划，培育一批“懂低碳、懂计算机、有技术、善经营”的新农人，并建立智慧农业创新平台，鼓励乡贤人才参与智慧农业项目的设计、实施、碳减排效果评估等，培养他们的创新能力和创业精神。三是发挥乡村“精英”、优秀党员的带头作用，鼓励他们积极参与智慧农业发展，传播新思想、掌握新技术、使用新设备，发挥示范效应，并加强他们的低碳意识和行动力，引导他们在生产、生活、消费等方面实现低碳化，推广低碳文化和生态文明理念。

3.4　构建“政府有为，市场有效”的智慧农业发展机制

1)制定智慧农业发展规划，统筹低碳化目标和智慧化目标。在制定智慧农业发展顶层设计时，应该充分考虑智慧农业与“双碳”目标的有机结合和协同共进，既让“双碳”目标助力智慧农业发展，也使数字经济赋能农业低碳发展。一是国家层面需要尽快出台智慧农业发展中长期规划，加强对低碳农业发展和智慧农业发展的宏观战略统筹。同时，既要将低碳化目标任务全面融入智慧农业发展规划，又要在低碳农业发展规划中充分体现智慧化发展的理念。二是各地要充分认识智慧农业发展在转变农业发展方式、助力农业碳达峰碳中和等方面的重要作用，在国家规划的基础上，依据地方特色，出台地方性的中长期规划和行动方案，统筹有序推动智慧农业发展。

2)发挥市场机制在智慧农业低碳发展中的作用。应积极探索建立适合智慧农业特点的碳交易机制和标准体系，将智慧农业纳入碳市场体系，为其提供更多的市场激励和政策支持。一是建立智慧农业

碳排放、碳汇核算体系。由于农业温室气体来源广泛且分散,碳排放量核算复杂,因此需要研究并完善更为科学的智慧农业减排、增汇方法学,使得智慧农业生产中减排量、碳汇量的监测、核算和评估更加标准和规范。同时,辅以大数据分析和人工智能算法,预测和评估农业系统的碳排放和碳汇量,为碳交易提供可靠的数据支撑。二是探索实施智慧农业碳交易试点项目。按照试点先行、循序渐进原则,选取碳排、碳汇资源较为丰富的地区开展碳交易试点项目,因地制宜、分清主次确定好畜牧业、种植业等控排范围,逐步开发农田碳汇、化肥农药减碳、测土配方施肥减碳等交易产品。同时,鼓励当地控排企业积极投资开发并参与智慧农业碳交易项目,通过抵消机制购买智慧农业碳减排量或碳汇量,带动农民增收的同时推动实现智慧农业发展。三是进一步为企业参与智慧农业低碳发展提供市场激励。可通过建立标准化认证、品牌推广、价格溢价、市场准入等方式,提高涉农企业的收益预期和竞争优势。

参考文献 References

[1] 温涛,陈一明.数字经济与农业农村经济融合发展:实践模式、现实障碍与突破路径[J].农业经济问题,2020(7):118-129. WEN T,CHEN Y M.Research on the digital economy and agriculture and rural economy integration:practice pattern,realistic obstacles and breakthrough paths[J].Issues in agricultural economy,2020(7):118-129 (in Chinese).

[2] 韩旭东,刘闯,刘合光.农业全链条数字化助推乡村产业转型的理论逻辑与实践路径[J].改革,2023(3):121-132.HAN X D, LIU C,LIU H G.The theoretical logic and practical path of the digitalization of the whole agricultural chain to promote the transformation of rural industries[J].Reform,2023(3):121-132 (in Chinese with English abstract).

[3] 宁甜甜.新发展阶段我国智慧农业:机遇、挑战与优化路径[J].科学管理研究,2022,40(2):131-138.NING T T.China's smart agriculture in the new development stage:opportunities,challenges and optimization path [J]. Scientific management research, 2022,40(2):131-138 (in Chinese with English abstract).

[4] 金书秦,林煜,牛坤玉.以低碳带动农业绿色转型:中国农业碳排放特征及其减排路径[J].改革,2021(5):29-37.JIN S Q, LIN Y, NIU K Y. Driving green transformation of agriculture with low carbon:characteristics of agricultural carbon emissions in China and its emission reduction path[J].Reform,2021(5): 29-37 (in Chinese with English abstract).

[5] 宋洪远.智慧农业发展的状况、面临的问题及对策建议[J].人民论坛·学术前沿,2020(24):62-69.SONG H Y.The status and problems of smart agriculture development and responses [J]. Frontiers,2020(24):62-69 (in Chinese with English abstract).

[6] 李建军,白鹏飞.我国智慧农业创新实践的现实挑战与应对策略[J].科学管理研究,2023(2):127-134. LI J J, BAI P F. Realistic challenges and countermeasures of China's smart agriculture innovation practice [J]. Scientific management research, 2023(2):127-134(in Chinese with English abstract).

[7] 于法稳.基于绿色发展理念的智慧农业实现路径[J].人民论坛·学术前沿,2020(24):79-89.YU F W.Realization path of smart agriculture based on green development concept[J].Frontiers,2020(24):79-89 (in Chinese with English abstract).

[8] HE K,LI F L,WANG H,et al.A low-carbon future for China's tech industry[J].Science,2022,377(6614):1498-1499.

[9] 陈媛媛,游炯,幸泽峰,等.世界主要国家精准农业发展概况及对中国的发展建议[J].农业工程学报,2021,37(11):315-324. CHEN Y Y,YOU J,XING Z F,et al.Review of precision agriculture development situations in the main countries in the world and suggestions for China[J].Transactions of the CSAE,2021, 37(11):315-324 (in Chinese with English abstract).

[10] 殷浩栋,霍鹏,肖荣美,等.智慧农业发展的底层逻辑、现实约束与突破路径[J].改革,2021(11):95-103.YIN H D,HUO P, XIAO R M,et al.The underlying logic,realistic constraints and breakthrough path of the development of smart agriculture[J]. Reform,2021(11):95-103 (in Chinese with English abstract).

[11] 胡亚兰,张荣.我国智慧农业的运营模式、问题与战略对策[J].经济体制改革,2017(4):70-76.HU Y L,ZHANG R.The operation mode,problems and countermeasures of the wisdom agriculture in China[J].Reform of economic system,2017(4):70-76 (in Chinese with English abstract).

[12] 曹冰雪,李瑾,冯献,等.我国智慧农业的发展现状、路径与对策建议[J].农业现代化研究,2021,42(5)785-794.CAO B X,LI J, FENG X, et al. Development status, path, and countermeasures of smart agriculture in China[J]. Research of agricultural modernization,2021,42(5):785-794(in Chinese with English abstract).

[13] 金文成,靳少泽.加快建设农业强国:现实基础、国际经验与路径选择[J].中国农村经济,2023(1):18-32.JIN W C,JIN S Z. Accelerating China's transformation into an agricultural powerhouse:present basis,international experiences and path selection [J].Chinese rural economy,2023(1):18-32 (in Chinese with English abstract).

[14] 何可,宋洪远,张俊飚.以生产托管为抓手推动农业绿色低碳发展[N].农民日报,2021-10-16(03).HE K, SONG H Y, ZHANG J B.Promote green and low-carbon development of agriculture with production hosting[N].Farmers' Daily,2021-10-16(03)(in Chinese).

[15] 马晓河,胡拥军."互联网+"推动农村经济高质量发展的总体框架与政策设计[J].宏观经济研究,2020(7):5-16.MA X H, HU Y J.The overall framework and policy design of "Internet plus" to promote the high-quality development of rural economy [J].Macroeconomics,2020(7):5-16 (in Chinese with English abstract).

[16] 何可，王安邦，张俊飚．新时代中国农业教育发展的对策[J]．世界农业，2021(8)：87-96．HE K，WANG A B，ZHANG J B．Countermeasures for the development of agricultural education in China in the new era[J]．World agriculture，2021(8)：87-96 (in Chinese)．

[17] 农业部农村经济体制与经营管理司课题组，张红宇．农业供给侧结构性改革背景下的新农人发展调查[J]．中国农村经济，2016(4)：2-11．Department of Rural Economic System and Business Management，Ministry of Agriculture，ZHANG H Y．Survey on the development of new farmers in the context of agricultural supply-side structural reform[J]．Chinese rural economy，2016(4)：2-11 (in Chinese)．

[18] 刘守英，王一鸽．从乡土中国到城乡中国：中国转型的乡村变迁视角[J]．管理世界，2018，34(10)：128-146．LIU S Y，WANG Y G．From rural China to urban and rural China：from the perspective of rural change in China's transformation[J]．Management world，2018，34(10)：128-146 (in Chinese with English abstract)．

Development of smart agriculture with goals of carbon peaking and carbon neutrality

HE Ke[1,2]，WU Hao[2,3]，ZENG Yangmei[4]

1.*College of Agriculture and Rural Development*，*Renmin University of China*，*Beijing* 100872，*China*；
2.*Laboratory of Green Agriculture and Low-Carbon Development*，*Huazhong Agricultural University*，*Wuhan* 430070，*China*；
3.*College of Economics and Management*，*Huazhong Agricultural University*，*Wuhan* 430070，*China*；
4.*School of Hubei University of Technology Economics and Management*，*Wuhan* 430068，*China*

Abstract　Smart agriculture offers new insights for reducing emissions and increasing carbon sinks in agriculture，and contributes to the carbon peaking and carbon neutrality．Based on clarifying the connotation and characteristics of smart agriculture under the goals of carbon peaking and carbon neutrality，this article analyzes the problems and challenges faced by the development of smart agriculture，and proposes countermeasures and suggestions．The results showed that the development of smart agriculture under the goals of carbon peaking and carbon neutrality should emphasize the philosophy of leading low-carbon with intelligence and driving intelligence with low-carbon．The science and technology should focus on the low-carbon oriented innovation and application．Attentions should be paid to the double-wheel drive of government and market in terms of system．The development of smart agriculture in China is still at its initial stage．There are shortcomings and bottlenecks in data resources，technical equipment，production capacity，talent reserve，policy support，and other aspects．Therefore，we should establish a carbon data system for agriculture，strengthen the innovation and R & D in agricultural technology，improve the training system of talent，promote the moderate scale operation of agriculture，construct a low-carbon development mechanism for smart agriculture with "government doing something，market being effective" in the future．

Keywords　carbon peaking；carbon neutralization；smart agriculture；modern information technology；low-carbon development

（责任编辑：张志钰）