

农业现代化研究

RESEARCH OF AGRICULTURAL MODERNIZATION

引用格式：

崔凯, 冯献. 面向农业 4.0 的智能农机装备应用逻辑、实践场景与推广建议 [J]. 农业现代化研究, 2022, 43(5).

Cui K, Feng X. The application logic, practice scenarios, and promotion suggestions of intelligent agricultural machinery equipment towards Agriculture 4.0[J]. Research of Agricultural Modernization, 2022, 43.

DOI: 10.13872/j.1000-0275.2022.0054



面向农业 4.0 的智能农机装备应用逻辑、实践场景与推广建议

崔凯¹, 冯献²

(1. 中国社会科学院农村发展研究所, 北京 100732; 2. 北京市农林科学院信息技术研究中心, 北京 100097)

摘要：农机转型升级是农业形态变革的重要标志，数字革命背景下，智能农机装备引领传统农业向智慧农业过渡，走向农业 4.0。聚焦农业技术和产业竞争前沿，从发展经济学视角解释智能农机装备的应用逻辑，并将国内外实践纳入智能农机装备应用的具体场景中。研究表明，智能农机装备的应用逻辑内嵌于破除规模约束、兼容技术进步、多元要素替代、承载产业融合等功能的实现中，其应用场景集中在自动导航、投入控制、数据采集、无人作业等领域，体现出技术层、数据层和应用层的多维综合，并呈现场景交互性。智能农机装备的发展趋势是面向应用创新，兼顾用户需求、技术进步和功能优化等，以奠定未来农业智能化的坚实基础。因此，加快智能农机装备推广，要结合需求分类推进，强化高端制造业支撑，优化资金支持与补贴方式，完善行业配套服务，支持创新体系建设和安排试点示范等，尽快发挥中国智能农机装备应用潜力，推动农业生产智能化，面向广大农户释放技术红利。

关键词：农业 4.0；智慧农业；智能农机装备；无人作业；应用创新；推广

中图分类号：S23-01

文献标识码：A

文章编号：1000-0275 (2022) 00-0000-00

The application logic, practice scenarios, and promotion suggestions of intelligent agricultural machinery equipment towards Agriculture 4.0

CUI Kai¹, FENG Xian²

(1. Rural Development Institute, Chinese Academy of Social Sciences, Beijing 100732, China; 2. Information Technology Research Center, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097)

Abstract : The transformation and upgrading of agricultural machinery is an important symbol of the transformation of agricultural forms. Under the background of digital revolution, intelligent agricultural machinery equipment leads the transition from traditional agriculture to intelligent agriculture and moves towards agriculture 4.0. This paper focuses on the forefront of agricultural technology and industrial competition, explains the application logic of intelligent agricultural machinery equipment from the perspective of development economics, and integrates domestic and foreign practices into the scenario-oriented characteristics of intelligent agricultural machinery equipment application. Results show that the application logic of intelligent agricultural machinery equipment is embedded in breaking the scale constraints, incorporating technological progress, substituting among multiple elements, and bearing industrial integration. Its application scenario focuses on the automatic navigation, input control, data acquisition, unattended operation, and other fields. In addition, it also reflects the multi-dimensional synthesis of technology layer, data layer, and application layer, presenting the scene interaction. The development trend of intelligent agricultural machinery equipment is oriented towards the application innovation, technological progress, and functional optimization, then laying a solid foundation for future intelligent agriculture. Therefore, to speed up the promotion of intelligent agricultural machinery equipment, this paper suggests, based on market demand, to strengthen the high-end manufacturing support, to optimize capital support and subsidy, to improve the industry supporting services, to support the construction of innovation system, and to arrange pilot demonstration. In addition, it is also critical to give a full play to the application potential of China's intelligent agricultural machinery and equipment as soon as possible, to promote

基金项目：国家社会科学基金青年项目 (20CTQ006)。

作者简介：崔凯 (1986—)，男，河北保定人，博士，副研究员，主要研究方向为农业现代化、农村信息化、数字乡村，E-mail: cuikai@cass.org.cn。

收稿日期：2022-04-21；**接受日期：**2022-07-15

Foundation item: National Social Science Foundation of China (20CTQ006).

Corresponding Author: CUI Kai, E-mail: cuikai@cass.org.cn.

Received 21 April, 2022; **Accepted** 15 July, 2022

intelligent agricultural production and to release technological dividends for farmers.

Key words : agricultural 4.0; smart agriculture; intelligent agricultural machinery equipment; unmanned operation; application innovation; promotion

农机装备是引领农业变革的重要引擎, 伴随数字技术与智能制造等在农业中应用, 智能农机装备将物联网、大数据、人工智能等引入农业生产过程, 使作业场景与数字环境密切关联, 实现土壤监测、水肥控制、农业遥感、无人作业、自动驾驶、智能控制等^[1-2], 为优化农业系统提供方案。作为先进农业生产工具的代表, 智能农机装备引领全面机械化、自主化和无人化作业, 加快数字技术对农业的改造, 推动数据要素驱动下的农业生产力变革^[3], 为加快实现农业农村现代化提供全面支撑。

国外相关研究前沿聚焦于数字技术引领下的农业变革形态, 特别是数字农业技术与农业生产系统、价值链和粮食系统的联系^[4], 在对农业机械化的数字化转型保持关注的同时, 对有关国家物联网、无人机等在农业的应用效果进行了分析和评估^[5-6]。国内智能农机装备总体尚处于试验示范阶段, 相关研究大多从技术流程、实践类型等视角来聚焦智能农机装备, 涉及农业遥感、智能控制技术、装备技术等^[7-8], 亦或针对某类智能农机的发展现状分析, 如农业机器人、无人机等^[9-10]。从既有研究的理论逻辑和实践聚焦来看, 国内研究尚缺乏立足农业未来形态, 对智能农机装备应用涉及的理论基础、国内外实践和具体场景的系统归纳, 这就限制了对国内农机智能化转型未来趋势的理解和把握, 也不利于结合农业变革需求进行战略谋划。

本文将国内外实践与中国未来发展路径进行统筹考虑, 拓展现有研究范围, 面向农业 4.0 和智慧农业形态, 立足发展经济学视角, 从理论上明确智能农机装备应用的逻辑。基于国内外政策和实践, 从现实层面对智能农机装备的应用场景进行聚焦。在研判智能农机装备未来技术发展和应用趋势基础上, 提出加快智能装备推广应用的对策建议, 从而将理论分析与对策研究进行整合, 来回应农业变革以及农机升级的现实需求。

1 农业 4.0 与智能农机装备应用

1.1 从农业 4.0 到智慧农业

从实现手段看, 农业 1.0 是以体力、畜力等劳动作业为主的农业, 农业 2.0 是以机械化、设施化作业为主的农业, 农业 3.0 是以自动化、信息化为主的农业, 农业 4.0 是数字农业革命的产物^[11-12], 它以现代信息技术与先进农机装备应用为特征^[13],

采用精准农业 (PA)、遥感 (RS)、机器学习 (ML)、人工智能 (AI)、大数据、物联网 (IOT) 等前沿技术^[14], 为农业生产经营提供由遥感器、无线传感器网络 (WSN)、虚拟化系统、云计算和最终用户应用程序等组成的综合系统^[15], 以减少投入 (水, 化肥, 农药等), 应对气候变化和增加农民利润, 从而实现更高效生产的农业形态^[16]。

农业 4.0 催生以信息和知识为核心要素的智慧农业^[17]。智慧农业源于精准农业实践^[12], 是集成互联网、物联网、大数据、云计算和人工智能等现代信息技术与智能农机装备, 融合农业生产者的知识和经验, 实现对农业的信息感知、数据分析、智能调控、科学管理、精准决策和定制服务等新型农业生产经营管理方式。以智能农机装备为载体, 使智慧农业模式广泛体现在土壤监测、水肥一体化投入、无人机器作业、智能温室控制、决策服务等领域, 成为农业 4.0 的基本形态^[18]。

1.2 智能农机装备应用的逻辑理路

在农业 1.0 到农业 4.0 的历次变革中, 农机装备历经从机械化到自动化再到智能化的阶段性升级过程。智能农机装备基于遥感、导航、现代通信、物联网、人工智能等前沿信息技术在农业领域的应用, 集合数据的采集、分析、控制和决策等作业流程, 具有数字化、自动化和智能化特征。较之传统农机具, 智能农机装备产品形态丰富, 包括智能精准播种机、自动控制系统、自动驾驶机、无人植保机、农业机器人等, 全面发挥农情感知、数据分析、自主决策等功能, 覆盖农业生产全过程, 实现提升农业生产效率, 应对农业生产风险, 节约投入成本等目标。智能农机装备应用推广的基本逻辑, 体现在规模经营的实现手段, 技术进步的路径选择、要素替代的多种形式、产业融合的有效载体等方面。

1.2.1 突破经营规模限制 舒尔茨认为农业生产要素间配置关系存在“假不可分性”^[19], 大型拖拉机和大规模农场的组合并不必然提高效率, 追求要素投入回报率提升, 需要视耕作规模来增加适用性农机供给。农机装备向多样化和智能化转型, 能够为不同规模的农业经营提供手段, 如基于导航系统的中大型农机跨区连片作业, 通过数据采集实现农场精细化作业, 在智能温室中进行自动化作业等。特别是在地块分散的小规模经营模式下, 借助激光平地机等提高土地平整精度, 可降低不同属性地块间

的流转和交易成本，提高农机服务效率。传统农机局限于固定的作业功能和服务模式，智能农机装备借助决策系统^[20]，能够匹配不同土地规模开展生产任务，将农业产出落实到具体地块和作业场景中，全方位改进农业生产效率。

1.2.2 保持技术进步的弹性空间 由于各国人地关系与资源禀赋差异，农业技术进步呈现出有偏性特征，速水和拉坦比较各国农业现代化程度，指出北美国家寻求节约劳动力的机械化发展道路，而亚洲国家以节约土地的生物技术革命为主导。事实上，在产出效益目标导向下，两类技术进步在各国农业增长中相互交织。作为农业技术创新前沿，智能农机装备是技术集成的产物，在追求农机技术进步对于节约劳动力要求的同时，能够以更加精准化的实现形式，与现代农业生产要素有机结合。如智能设施系统由专业管理人才控制，在农业数据和模型支持下，根据作物生长条件和土壤条件进行水肥投入设定，实现精准定量投入和产出控制，来维持资本、物质、土地和劳动力等要素投入间的比例平衡关系。因此，智能农机装备带来的技术进步路径并不单一，而是能够兼容有偏或者中性的实现方式，优化农业投入产出结构^[21]。

1.2.3 提供要素替代的新进路 要素替代是优化资源配置，提高产出的必然过程。智能农机装备对于农业发展的重要意义在于能够推进多种形式的要素替代来实现要素整合与重构，带来要素配置层面的改善。一是劳动替代，这是智能农机应用最直接的表现，除自动驾驶应用于大田耕种收以外，借助农业机器人还可以进行采摘、除草、喷药和修剪等精细化作业，满足复杂作业需求，进一步释放农业劳动力。二是工具替代，依托前沿数字技术，尤其农业大数据、云计算和人工智能等集成应用，将数据要素与农业作业工具紧密结合，引入数据感知、采集、分析和决策的系列流程，推动生产工具的持续更新和迭代，为农业增长提供可持续方案^[20]。

1.2.4 成为产业融合的应用载体 现代信息技术、智能制造技术与农业深度融合，改进传统农业生产方式和组织形态，例如传统农机和专家系统相结合，加载物联网架构、大数据平台等的集成应用，为农业智慧转型和生产工具升级奠定制造业基础，催生体现工农融合理念和前沿技术特征的智能农机装备。智能农机装备将现代工艺引入农业生产，围绕服务于农业生产经营的目标，通过现代工业手段解决数据收集、处理等多个维度同时作业的高成本问题，改造相对封闭的传统生产方式，为实现工业反

哺提供了新方式，成为工业化、信息化引领农业发展的重要切入点。

2 国内外智能农机装备应用的实践探索

2.1 智能农机装备正成为各国农机未来发展重点

随着各国农业现代推进，传统农机正被一系列智能设备和农业机器人所替代^[16]，塑造智慧农业范式，这符合智能农机装备应用的基本逻辑。世界范围内，发达国家大力支持智能农机装备在农业中的应用，以智能农机装备为代表的农业生产方式正在蓬勃兴起，国际农机巨头等市场主体也都将智能化转型作为农机变革的重要方向，加快农机装备在全球的应用和推广。中国积极出台相应政策加快全国和地方层面的布局，在无人机、自动驾驶系统的推广方面取得初步进展，农机智能化水平逐步提升。

2.1.1 世界农业强国和跨国企业引领农机智能化 发达国家和地区已经充分认识到智能农机装备在提高农业生产率，提高农产品品质、节省劳动力投入等方面的作用，通过重大战略规划来支持智能农机技术发展。美国农业部发布的 2020—2025 年科技蓝图中^[22]，人工智能、自动化和遥感等技术被列为未来农业科技行动计划的重点。利用人工智能和机器学习进行数据分析和预测，研发农业机器人、作物和土壤监测装置等。同时自动化和遥感技术推动农场管理方式转变，提高农业生产率。欧盟高度重视数字技术在农业中的应用，认为未来欧洲农业的发展方向是现代信息技术与先进农机装备应用为特征的农业 4.0^[12]。欧盟在《2023—2027 年共同农业政策》临时协议中明确提出结合农业知识信息系统 (AKIS)，支持和促进数字农业、精准农业等创新项目发展。日本农林水产省专门针对智慧农业设置财政预算，并在 2019 年实施智慧农业示范工程，加快机器人、人工智能和物联网等在农业中的应用。

农机企业等市场主体在推广智能农机和智慧农业系统建设中发挥着重要作用，如约翰迪尔、爱科集团、克拉斯等知名跨国企业在中国范围内进行广泛布局，加快农机智能化升级和示范（表 1），不断发掘智能农机装备在亚非国家的推广应用潜力，改造传统农业生产方式。

2.1.2 中国积极发展智能农机装备 面向世界农业科技和现代化前沿，近年来中央和地方政府积极谋划，在涉农类政策中列入与智能农机装备有关的针对性措施。全国层面，2021 年中央一号文件明确“提高农机装备自主研制能力，支持高端智能、丘陵山区农机装备研发制造”。2021 年 11 月国务院印发的

表 1 世界领先农机企业智能化的探索
Table 1 Intelligent exploration of the world's leading agricultural machinery enterprises

代表企业	总部	发展规模	重点方向	典型实践
约翰迪尔 (JOHN DEERE)	美国	全球 69600 多名员工, 生产农机覆盖 2.3 亿英亩土地, 销往 100 多个国家。	聚焦客户需求, 引导企业提供智能互联的机器和应用程序, 如计算机视觉应用程序、智能目标检测系统等。	在巴西, 用户通过约翰迪尔运营中心共享操作和农艺数据, 让农民看到从耕种收整个作物周期, 帮助改善投入和智能管理。
凯斯纽荷兰工业 (CNH INDUSTRIAL)	美国	全球 64016 名员工, 12780 项专利, 67 座工厂, 57 个研发中心, 业务涉及约 180 个国家。	实施数字化农业战略, 聚焦精准农业技术, 包括农机导航和控制, 农业遥感监测, 机器人和自动化 (自动化技术使农田生产能力提高 20%) 等。	开展自动拖拉机试点项目, 将自动驾驶技术、传感器、机器控制等进行系统组合实现田间感知, 并根据土壤类型、气象条件等提供解决方案。
爱科集团 (AGCO)	美国	全球约 21400 名员工, 在美国、法国、德国、意大利等都有重要的生产基地, 在大约 140 个国家销售产品。	提供基于连通性、自动化和数字化的智能解决方案, 如导航自动驾驶、农田数据收集、产量测绘和基于遥感的管理系统等, 帮助农民基于数据做出个人决策。	在全球推出整体性精准农业解决方案 Fuse®, 将远程信息处理、自动导向、数据管理等技术和产品纳入。涵盖生产商、经销商、服务商、培训体系等主体。
克拉斯 (CLAAS)	德国	全球 11957 名员工, 覆盖 19 个国家和 35 个地区	将数字化、自主化、可替代驱动和智慧农业作为未来最重要的四个技术领域, 与荷兰 AgXeed 企业合作开发农业机器人等项目。	在法国, 克拉斯农机结合智能手机、软件和无人驾驶来工作。极端天气下, 克拉斯基于卫星数据的监测系统, 传送关于土壤条件和植被发展的实时信息, 让农民知道何时需要施肥或灌溉。
久保田 (KUBOTA)	日本	全球 41605 名员工, 业务覆盖 120 多个国家。拖拉机生产全球累计 480 万台以上, 小型挖掘机销售台数连续 19 年世界第一。	将提高粮食生产能力与安全性作为事业发展支柱之一, 主要在大米、小麦、果树等农作物的生产过程中, 开发自动化与无人化农业机械, 并提供 AI 自动管理系统。	与荷兰初创企业 Aurea 开展果树栽培系统自动化实验。Aurea 将无人机和传感器获得的数据与人工智能相结合, 提供果园收成预测和绘制土壤图等服务, 同时与久保田果园用农业机械结合。

资料来源:作者根据《2020 Sustainability Report》(JOHN DEERE),《2020 Sustainability Report》(CNH INDUSTRIAL),《2020 Annual Report》(AGCO),《2021 Annual Report》(CLAAS),《KUBOTA Report 2021》等报告整理。

《“十四五”推进农业农村现代化规划》中,提到“加强大中型、智能化、复合型农业机械研发应用”和“加大对智能、高端、安全农机装备的支持力度”等。有关部委也相继部署,在《农机装备发展行动方案(2016—2025)》《数字乡村发展行动计划(2022—2025年)》《“十四五”全国农业农村科技发展规划》《“十四五”全国农业机械化发展规划》等文件中,共同聚焦智能农机装备研发,以及农机智能技术创

新等。就地区层面来看,吉林、山东、河南、江苏、浙江等地围绕农业农村现代化出台的“十四五”规划中,均涉及到发展智能农机装备、加快农机装备智能化改造等内容(表2)。

2020年中国小麦耕种收综合机械化率稳定在95%以上,水稻、玉米耕种收综合机械化率分别超85%和90%。根据农业农村部统计,截至2019年,中国农机装备产业企业总数超过8000家,规模以

表 2 各地政策中对智能农机装备发展的支持内容

Table 2 Local policies to support the development of intelligent agricultural machinery equipment

地区	文件	相关内容
吉林	《吉林省“十四五”推进农业农村现代化规划》	推进北斗导航、5G、大数据等在农机装备和农机作业上的应用。支持智能农机装备研发,推动发展高端自走式联合收获机、高端秸秆打捆包装机、秸秆膨化机等新型高效农业装备。
山东	《山东省“十四五”推进农业农村现代化规划》	谋划布局建设现代农业山东省实验室,创建小麦、玉米、马铃薯、盐碱地综合利用、智能农机装备等技术创新中心。
河南	《河南省“十四五”乡村振兴和农业农村现代化规划》	加强财政、金融等政策支持,鼓励加工企业增加装备改造和技改投入,对设备进行绿色化、信息化、智能化改造,提高产品质量和市场竞争能力。
江苏	《江苏省“十四五”全面推进乡村振兴加快农业农村现代化规划》	增强农业产业配套支撑能力,实施农业生产全程全面机械化、农机装备智能化绿色化提升“两项行动”
浙江	《浙江省农业农村现代化“十四五”规划》	加大对丘陵山区、水稻机插、畜牧水产养殖业、设施种植业等薄弱环节农机具及智能装备研发及推广力度,
湖北	《湖北省推进农业农村现代化“十四五”规划》	在“藏粮于技”、畜禽良种培育、农业绿色发展、智慧农业与智能农机装备等领域攻克一批“卡脖子”技术,引领农业高质量发展和乡村全面振兴。
湖南	《湖南省“十四五”农业农村现代化规划》	加快智慧智能农机研发制造,构建以湖南智能农机创新研发中心为主体,双峰县、汉寿县和郴州市苏仙区三个农机生产制造基地
广东	《广东省推进农业农村现代化“十四五”规划》	建设农业人工智能装备研究中心,打造10个粤港澳大湾区无人农场。建设5G智慧农业试验区、科创园。

资料来源:作者根据相关规划内容整理。

上企业超过 1 700 家，农机装备制造基本涵盖各个门类，能够生产 14 大类 50 个小类 4 000 多种农机产品。作为农机装备制造大国，中国农机研发规模世界第一，专利申请量世界第二，近年来农机装备智能化水平显著提升，植保无人飞机保有量加速增长（图 1）。200 马力级以上拖拉机、60 行大型播种施肥机、水稻精量直播机、高含水率玉米收获机、精量植保机械等重大装备基本实现自主化。基于北斗、5G 的无人驾驶农机、无人植保机、无人插秧机、无人联合收割机等智能农机的示范应用正加快推进。

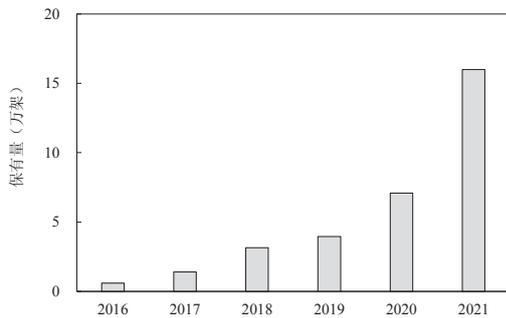


图 1 历年植保无人机保有量

Fig. 1 Number of UAV for plant protection in these years

2.2 国内外智能农机装备应用的场景聚焦

基于典型国家和地区实践，综合前沿研究成果，当前智慧农业主要技术包括遥感、物联网、农情监测、决策支持和人工智能等^[23-25]。这些技术匹配相应需求解决方案，形成应用层面的智能农机装备作业场景，涉及信息的采集、分析、控制和决策等流程，

涵盖不同作业环节（图 2），并因智慧农业技术广泛渗透而呈现交互性。本文立足国内外实践，综合农机类型、作业环节和技术特征等方面，对智能农机装备在自动导航、投入控制、数据采集、无人作业等领域的实践场景进行总结。

2.2.1 耕种收自动导航作业 自动导航系统能够提升农机作业质量和效率，美国等发达国家自 20 世纪 80 年代中期就开展了农业机械自动导航技术的研究^[26]。国内外大型农机公司相继开发自动导航产品，并应用于拖拉机、联合收获机和喷雾机等农机上，如美国约翰迪尔的 Green Star TM 3 和凯斯纽荷兰工业的 AFS Guide TM 等，中国司南导航的 AG300 北斗/GNSS 和联适导航的 AF300 北斗/GNSS 等。配备自动导航系统的农机无需农民监控，通过远程辅助指导进行路径自主识别，还可以与遥感、数据感知、人工智能等技术一并使用，用于精细耕播、规模种植和联合收割等。

中国农机自动导航研究和应用起步较晚但发展迅速，目前与世界领先水平差距并不大，在农机自动导航定位技术、导航控制技术和导航作业系统集成技术等方面取得创新^[27]，创制了可自动导航和远程调度的播种机、旋耕机、喷雾机和收获机等，适用于旱地和水田作物的耕种收等环节。华南农业大学的研究表明，中国水田作业机械自动导航系统居国际领先水平。采用自动导航的农机可提高作物产量 2%~3%，还可以 24 小时不间断作业，显著降低生产成本和提高土地利用率^[26]。在新疆，基于中国自行研制的北斗卫星导航系统，拖拉机可根据设计

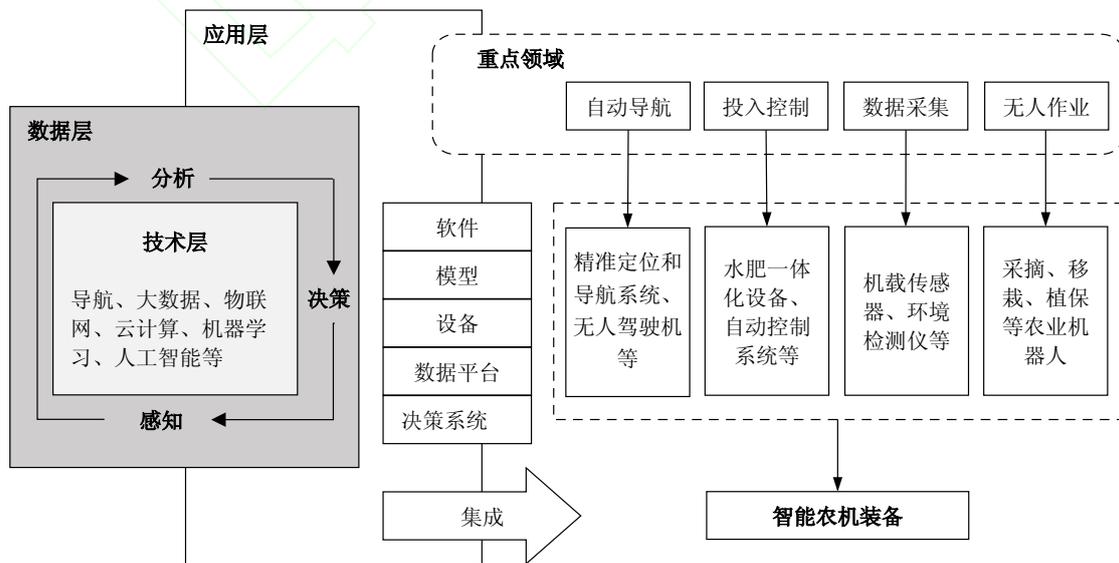


图 2 智能农机装备应用示意

Fig. 2 Schematic diagram of intelligent agricultural machinery equipment application

路径在作业过程中实现自动驾驶,实现精量播种、深松深耕作业监测等,2020年已有超1万台农机装备使用北斗导航系统服务,棉花等作物的机采率得到显著提升。

2.2.2 水肥药投入智能控制 在作业过程中通过调节压力或流量大小等智能控制手段,无需人工即可按目标施肥施药量进行作业,实现水、肥、农药等投入的高精准性和高靶向性。部分发达国家如瑞士EcoRobotix公司开发的田间除草装备,可以准确识别杂草并进行除草剂喷洒,使农药施用量降低20倍。爱尔兰MagGrow开发的农药喷洒装备使用永久性稀土磁体产生电磁荷,可解决农药漂移问题,减少65%~75%的农药施用量^[17]。澳大利亚昆士兰科技大学研发的Agbot II机器人可针对不同类别的杂草自动选择机械剪除或化学施药的方式来清除^[1],避免化学品的盲目施用,极大提高农资投入效率。

中国在水肥药智能控制的农机装备关键技术紧跟国际前沿,部分技术迭代成熟实现应用,具备高效施肥、水肥一体化、节水灌溉等功能的智能农机装备正加快集成研发,施肥播种机、精量喷药植保机等田间管理装备逐步实现智能化升级^[28]。如水肥一体化技术与传感器控制技术相结合,打造同步播种施肥机、变量施肥机、地面和航空喷雾系统等智能灌溉与施肥系统,显著提高了水、肥、药的利用率,在农业生产特别是设施农业中得到推广和应用,大幅提升农业的集约化、高效化水平。根据国家农业信息化工程技术研究中心的全国调查数据,设施栽培中应用水肥一体化、精准施药和生产环境智能化控制技术的经营主体占比均超过1/3^[29]。

2.2.3 数据采集和决策服务 将农业活动信息转化为特定形式的数据,以海量数据为基础优化作物生长模型,为农业生产经营提供评估和决策。智能农机装备进行精准作业的前提,是实现对土壤条件、水分养分、作物长势、病虫害等各类农情信息的快速感知和获取。农业传感器与深度学习、人工智能等技术相结合,汇集播种、收获、销售等环节中产生的数据,解决人工采集数据的高成本问题,其应用范围涵盖温室智能控制、农业机械收耕、病虫害识别、农产品溯源等领域,发展潜力巨大。未来5~10年,研发准确、精密、便携的传感器和生物传感器将是各国农业传感器创新发展的重点领域。美国、德国和日本等国家在农业传感器领域处于领先地位,几乎垄断了感知元器件、环境传感器、动植物生命信息传感器等相关产品^[17]。这些国家在农业传感器领域的专利申请、转让、生产销售等方面已形成较为

成熟的产业模式。

国内一般性环境类农业传感器(水、光、温、气等)可基本实现国内生产,但智能化程度还不高,高质量传感元器件以进口为主^[30]。当前高校和科研院所所在农业数据采集、分析利用和决策支持等领域的水平逐年提升,如国家农业信息化工程技术研究中心研发出土壤耕深监测系统,可准确测定深松深度和面积,中国农业大学开发可准确获取土壤水分和土壤压实状况的车载式传感器,吉林大学研发出温室环境信息智能传感器,可实时监测温室大棚内的环境信息^[31]。农业决策服务方面,华南农业大学成功研究出可测定田面水层深度和水田土壤含水量的无线传感器,为水稻生产自动灌溉提供支持^[26]。

2.2.4 机器人作业和无人农场 机器人作业在枯燥任务、恶劣环境和危险任务领域具有独特优势,得益于智能传感器、深度学习和人机协作能力的进步,农业机器人能够在没有直接人工干预的情况下自主执行不同重复的农业任务(从整地到收割)^[20],例如在山区或偏远地区,小型田间机器人和无人机可实现作物测绘、田间监测、遥感和杂草检测等,来监测和评估作物生长状况。有研究表明,使用机器人进行杂草控制和精确喷洒,除草剂使用量仅为地毯式喷洒的5%~10%^[21]。当前围绕果蔬采摘、嫁接、灌溉、施肥和喷药等环节,以及养殖业中饲喂、屠宰、挤奶、清粪和捕捞等工序,工业化国家已经或正在实现机器人作业^[32]。美国、日本、荷兰和以色列等国家正积极研发温室机器人,主要用于番茄、彩椒、黄瓜和芦笋等作物的采摘,预计到2024年全球将有70万~100万台农业机器人在田间工作^[13],无人农场作业模式将在各地涌现。

农业机器人具有广泛适用性,在发展中国家的应用潜力巨大。特别是在亚洲国家,基于特色小型农机具和农机服务业的发展,使用传感器和智能装置,将传统农业设备转换和组装为无人作业系统,可低成本有效实现农机装备智能化^[16]。中国农业机器人研究起步于20世纪90年代^[13],目前无人植保机、割草机器人、小型农业移动平台、嫁接机器人、移栽机器人等在部分地区得到应用,集成农业机器人的无人农场在广东、山东和江苏等地开始试点建设,部分试点的作物产量高于所在地区平均产量^[27],应用推广潜力巨大。

3 智能农机装备的发展和趋势研判

从发展进程看,农机制造是最能体现农业发展水平的技术应用领域之一,预计2035年基本实现

农业农村现代化时,农作物耕种收综合机械化率达 85% 以上,主要农作物的全程机械化程度达到中等发达国家的平均水平^[33]。就农机智能化转型趋势看,多数前沿智慧农业技术仍在试验示范阶段,智能农机装备核心零部件还落后于美国、德国和日本等发达国家^[17],中国迈入农业 4.0 阶段仍需要一个长期的历史过程。根据罗锡文等^[2]预计,到 2035 年,农业生产向智能化方向发展,到 2050 年,农业生产实现智能化。

结合现实需求,中国农业劳动投入与产出存在结构失衡,农业劳动力投入已不具备成本上的比较优势,农业劳动生产率远低于发达国家,同时化肥、农药等化学品的投入强度远超国际公认的安全上限,更高于世界和中等偏上收入国家的平均水平^[34]。智能农机装备的应用,为解决劳动力低效重复投入、化学品粗放使用、水土资源利用效率低下等问题提

供解决途径,其前景非常广阔。

立足政策指引,加快智能农机装备的技术创新、应用示范和作业管理等,是“十四五”时期农业机械化智能化的重要任务。“十三五”以来国家重点研发计划持续支持智能农机装备领域,对智能农机研发、购置和应用推广的补贴力度不断加大,将推动智能农机装备在耕种收等不同作业环节,以及设施园艺、畜禽水产养殖、农产品初加工等不同行业的应用。

综上,智能农机装备的发展应以解决农业现代化面临的关键问题为导向,把握信息技术进步和制造业变革的契机,深入挖掘农业生产经营的用户需求,在引领农业变革的同时,通过应用创新来提升发展空间(图 3),对智能农机装备的应用趋势作出如下研判。

一是更加契合用户需求。农机装备更新换代的

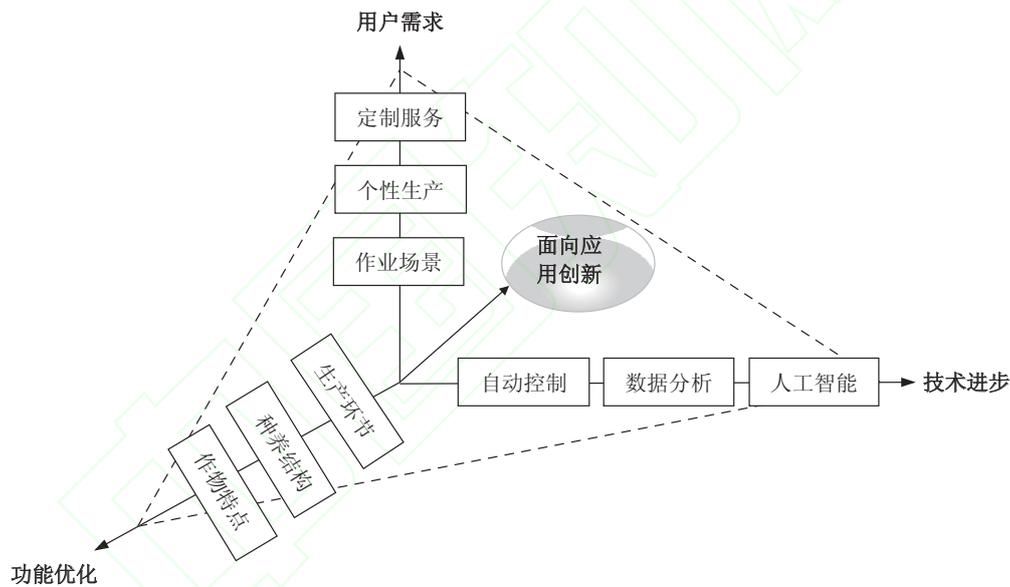


图 3 智能农机装备发展趋势导图

Fig. 3 Graph of intelligent agricultural machinery equipment development trend

速度不断加快,要求智能农机制造系统对各种生产条件变化的适应能力不断提高。针对农业生产、管理和服务的特定应用场景,未来智能农机装备将更加突出农业生产者个性化需求,基于定制化、模块化生产、研发和设计平台,通过用户体验等方式,发现用户的现实与潜在需求,实现关键零部件标准化、系列化和通用化,优化农机设备制造工艺和创新能力。

二是实践场景更加丰富。随着精细耕整地、精量播种、育苗嫁接、肥水一体化等高效生产配套装备智能化水平的提升,以及环境调控、远程管理、生理信息检测、个性饲喂等技术不断突破,能够适

应耕种、收获、加工等不同环节的各类智能农机装备将不断涌现,广泛应用于大田作物、经济作物、设施园艺、畜禽水产养殖和农产品加工等。

三是制造工艺不断升级。现代制造工业助力农机企业对于自动化、智能化装备的研发生产,特别是随着工业机器人、数控机床、自动装配检测等大量应用于实际生产,生产制造和管理系统的智能化程度大大提升,为农业装备智能化提供制造基础。产学研协作推进先试先行,提升核心工艺的自主研发和装备集成水平,不断缩小与发达国家间的差距。

四是与人工智能深度融合。人工智能是未来科技最前沿,在农业中的应用前景非常广阔。基于机

器学习模型和深度学习算法,分析所采集的各类数据,能够使作物生长信息感知与调控更为精准,优化预测分析和决策模型。加载语言识别、机器视觉、专家系统等各类人工智能技术的农业机器,将在田间除草、施肥施药、采摘收割等领域加快示范。

五是多元功能加快集成。为更好地适应各类复杂农业作业环境,智能农机装备数量和种类将不断丰富,实现各类农机功能的系统整合是关键。在多目标和任务驱动下,多样化和集成化的设计方法成为研发生产的必然选择,由多元组件构成的特色智能农机装备,将逐步具备全程化、自主化和协同化的作业能力,拓展机器人、无人系统的应用范围。

4 加快智能农机装备推广应用的对策建议

顺应农业现代化未来趋势,把握涉农政策红利和现实关切,探索智能农机装备高效化、产业化、市场化和服务化的应用推广路径,要结合技术需求和作业场景,提升智能农机装备的适农性,优化补贴方式和行业配套服务,建设创新体系和安排试点示范,全面发挥智能农机装备在促进农业高质高效方面的积极作用。

4.1 结合技术需求分类推进

按照循序渐进,分环节、分场景、分阶段进行分类推进的思路,统筹农林牧渔部门及种养加等环节的技术需求,制定农机装备智能化技术路线图,对于物联网、生物传感器、人工智能和机器人等世界前沿技术领域,抓紧攻克和完善相关技术和工艺标准。针对特色、高附加值农业和特色农产品优势区,加大适用性智能农机装备的技术研发力度,尽快满足全程全面机械化需求,提升智能农机具的作业质效。

4.2 提升智能农机装备适用性

结合地形地貌特征和具体作业场景,研发和推广与作物和农艺相适应的智能农机装备。如针对大田作物生产,推广大马力自动驾驶拖拉机及配套智能播种、施肥和深松机等。在设施环境中,优先研发中试针对蔬果育苗、移栽、植保和采摘等环节的智能机器人。丘陵山区主要推广多功能耕整地机、无人精量播种、开沟施肥、对靶喷药、旋耕除草等中小型适配农机装备。重视绿色低碳生产工艺的引入和应用,积极推广清洁、环保类智能装备。

4.3 优化资金支持与补贴方式

将智能农机装备以及配套设备纳入农机购置补贴,鼓励各地结合实际和农业特色,制定智能农机装备技术和产品购置名录,建立购置补贴标准。针

对家庭农场、农民专业合作社、农机服务公司等不同类型的生产经营主体,采取差异化补贴方式。积极引导企业、科研院所、金融机构和社会组织等共同参与,探索租赁补贴、互助补贴、服务补贴等多种补贴手段,加快智能农机具在小农户中的应用。

4.4 完善农机行业配套服务

支持农机企业培养和引进农机装备研发和专业人才,通过自主研发、自建供应链、生产外包、组装集成等不同方式,研制适用于不同地区实际的农机产品,加快产品迭代升级速度。完善生产标准、检测鉴定、供应体系等方面的农机产业配套服务,打造更多国产农机品牌,提升国产农机的市场影响力。鼓励社会化服务主体增加对智能农机操作、智能终端使用等方面的培训,提高农民的现代技术素养,将更多小农户纳入到智能化的农业作业流程中。

4.5 支持农机装备创新体系和试点建设

优先考虑在国家级各类涉农园区和示范区,组建智能农机装备产学研联盟,统筹农业企业、加工制造企业、科研院校、投融资平台等资源,深化协作推进产学研用,加快智能农机具的创制和推广。鼓励有条件地区依托数字乡村试点、农业农村信息化示范等项目,建设智能农机装备创新和推广中心,开展不同类型的农机智能装备集成应用示范,因地制宜探索中小型智能农机协同作业、大型智能农机自主作业等实践,推进无人农场、智慧农场、智能农业工厂等建设,打造一批具有复制推广价值的无人作业模式,拓展智慧农业应用场景。

参考文献:

- [1] 陈学庚,温浩军,张伟荣,等.农业机械与信息技术融合发展现状与方向[J].智慧农业,2020,2(4):1-16.
Chen X G, Wen H J, Zhang W R, et al. Advances and progress of agricultural machinery and sensing technology fusion[J]. Smart Agriculture, 2020, 2(4): 1-16.
- [2] 罗锡文,廖娟,臧英,等.我国农业生产的发展方向:从机械化到智慧化[J].中国工程科学,2022,24(1):46-54.
X W, Liao J, Zang Y, et al. Developing from mechanized to smart agricultural production in China[J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(1): 46-54.
- [3] 赵春江,李瑾,冯献,等.“互联网+”现代农业国内外应用现状与发展趋势[J].中国工程科学,2018,20(2):50-56.
Zhao C J, Li J, Feng X, et al. Application status and trend of “Internet Plus” modern agriculture in China and abroad[J]. Strategic Study of CAE, 2018, 20(2): 50-56.
- [4] Klerkx L, Jakku E, Labarthe P. A review of social science on digital agriculture, smart farming and agriculture 4.0: New contributions and a future research agenda[EB/OL]. NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences, 2019, 90/91, 100315, <https://doi.org/10.1016/j.njas.2019.100315>.

- [5] Elijah O, Rahman T A, Orikumhi I, et al. An overview of internet of things (IOT) and data analytics in agriculture: Benefits and challenges[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2018, 5(5): 3758-3773.
- [6] Radoglou-Grammatikis P, Sarigiannidis P, Lagkas T, et al. A compilation of UAV applications for precision agriculture[EB/OL]. *Computer Networks*, 2020, 172, 107148. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2020.107148>
- [7] 刘成良, 林洪振, 李彦明, 等. 农业装备智能控制技术研究现状与发展趋势分析[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(1): 1-18.
Liu C L, Lin H Z, Li Y M, et al. Analysis on status and development trend of intelligent control technology for agricultural equipment[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(1): 1-18.
- [8] 韩佳伟, 朱文颖, 张博, 等. 装备与信息协同促进现代智慧农业发展研究[J]. *中国工程科学*, 2022, 24(1): 55-63.
Han J W, Zhu W Y, Zhang B, et al. Equipment and information collaboration to promote development of modern smart agriculture[J]. *Strategic Study of CAE*, 2022, 24(1): 55-63.
- [9] 王儒敬, 孙丙宇. 农业机器人的发展现状及展望[J]. *中国科学院院刊*, 2015, 30(6): 803-809.
Wang R J, Sun B Y. Development status and expectation of agricultural robot[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2015, 30(6): 803-809.
- [10] 陈鹏飞. 无人机在农业中的应用现状与展望[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2018, 44(4): 399-406.
Chen P F. Applications and trends of unmanned aerial vehicle in agriculture[J]. *Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences)*, 2018, 44(4): 399-406.
- [11] Ozdogan B, Gacar A, Aktas H. Digital agriculture practices in the context of agriculture 4.0[J]. *Journal of Economics, Finance and Accounting*, 2017, 4(2): 184-191.
- [12] Bertoglio R, Corbo C, Renga F M, et al. The digital agricultural revolution: A bibliometric analysis literature review[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 134762-134782.
- [13] 赵春江. 农业机器人展望[J]. *中国农村科技*, 2019(5): 20-21.
Zhao C J. Prospect of agricultural robot[J]. *China Rural Science & Technology*, 2019(5): 20-21.
- [14] 李道亮, 杨昊. 农业物联网技术研究进展与发展趋势分析[J]. *农业机械学报*, 2018, 49(1): 1-20.
Li D L, Yang H. State-of-the-art review for internet of things in agriculture[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(1): 1-20.
- [15] Raj M, Gupta S, Chamola V, et al. A survey on the role of internet of things for adopting and promoting agriculture 4.0[J]. *Journal of Network and Computer Applications*, 2021, 187: 1-29.
- [16] Valle S, Kienzle J. Agriculture 4.0 agricultural robotics and automated equipment for sustainable crop production[EB/OL]. 2020, www.fao.org/3/cb2186en/CB2186EN.pdf.
- [17] 赵春江. 智慧农业的发展现状与未来展望[J]. *华南农业大学学报*, 2021, 42(6): 1-7.
Zhao C J. Current situations and prospects of smart agriculture[J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2021, 42(6): 1-7.
- [18] Janc K, Czapiewski K, Wojcik M. In the starting blocks for smart agriculture: The internet as a source of knowledge in transitional agriculture[EB/OL]. *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences*, 2019, 90/91: 100309. <https://doi.org/10.1016/j.njas.2019.100309>.
- [19] 西奥多·W·舒尔茨. 改造传统农业[M]. 梁小民, 译. 北京, 商务印书馆, 1987: 92-94.
Schultz T W. *Transforming Traditional Agriculture*[M]. Yale University Press, New Haven, 1964.
- [20] Bechar A, Vigneault C. Agricultural robots for field operations: Concepts and components[J]. *Biosystems Engineering*, 2016, 149: 94-111.
- [21] Shamshiri R, Weltzien C, Hameed I, et al. Research and development in agricultural robotics: A perspective of digital farming[J]. *International Journal of Agricultural & Biological Engineering*, 2018, 11: 1-14.
- [22] United States Department of Agriculture. USDA Science Blueprint[R/OL]. <http://agri.ckceest.cn/file1/M00/01/CD/Csgk0Tr59uiAY5DNACm3QkYmaDw388.pdf>.
- [23] Mitra A, Vangipuram S, Bapatla K, et al. Everything you wanted to know about smart agriculture[EB/OL]. 2022, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2201.04754>.
- [24] 何远灵, 邢泽炳, 侯华铭, 等. 智能化农业机械装备的发展现状及展望(英文)[J]. *中国农业科技导报*, 2019, 21(6): 8-19.
He Y L, Xing Z B, Hou H M, et al. Development status and prospect of intelligent agricultural machinery equipment[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2019, 21(6): 8-19.
- [25] 陈雪, 毛世平, 马红坤. 耦合视角下生产性服务业与智慧农业发展的研究——基于美国的经验与启示[J]. *农业现代化研究*, 2021, 42(4): 610-618.
Chen X, Mao S P, Ma H K. The development of production services and smart agriculture from the perspective of coupling: Experiences and implications from the case of the United States[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2021, 42(4): 610-618.
- [26] 罗锡文. 无人农场是数字农业的实现途径之一[J]. *大数据时代*, 2021(10): 13-19.
Luo X W. Unmanned farm is one of the ways to realize digital agriculture[J]. *Digital Frontier*, 2021(10): 13-19.
- [27] 罗锡文, 廖娟, 胡炼, 等. 我国智能农机的研究进展与无人农场的实践[J]. *华南农业大学学报*, 2021, 42(6): 8-17, 5.
Luo X W, Liao J, Hu L, et al. Research progress of intelligent agricultural machinery and practice of unmanned farm in China[J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2021, 42(6): 8-17, 5.
- [28] 吴海华, 胡小鹿, 方宪法, 等. 智能农机装备技术创新进展及发展重点研究[J]. *现代农业装备*, 2020, 41(3): 2-10.
Wu H H, Hu X L, Fang X F, et al. Research on the progress and future development of technological innovation of intelligent agricultural machinery[J]. *Modern Agricultural Equipment*, 2020, 41(3): 2-10.
- [29] 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.
- [30] 颜瑞, 王震, 李言浩, 等. 中国农业智能传感器的应用、问题

- 与发展 [J]. 农业大数据学报, 2021, 3(2): 3-15.
- Yan R, Wang Z, Li Y H, et al. The application, problems and development of china's agricultural smart sensors[J]. Journal of Agricultural Big Data, 2021, 3(2): 3-15.
- [31] 王嘉宁, 牛新涛, 徐子明, 等. 基于无线传感器网络的温室 CO₂ 浓度监控系统 [J]. 农业机械学报, 2017, 48(7): 280-285, 367.
- Wang J N, Niu X T, Xu Z M, et al. Monitoring system for CO₂ concentration in greenhouse based on wireless sensor network[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7): 280-285, 367.
- [32] Rodenburg J. Robotic milking: Technology, farm design, and effects on work flow[J]. Journal of Dairy Science, 2017, 100: 7729-7738.
- [33] 魏后凯, 崔凯. 建设农业强国的中国道路: 基本逻辑、进程研判与战略支撑 [J]. 中国农村经济, 2022(1): 2-23.
- Wei H K, Cui K. The Chinese road of building an agricultural powerhouse: Basic logic, process judgment and strategic support[J]. Chinese Rural Economy, 2022(1): 2-23.
- [34] 魏后凯, 崔凯. 面向 2035 年的中国农业现代化战略 [J]. 中国经济学人, 2021, 16(1): 18-41.
- Wei H K, Cui K. China's agricultural modernization strategy towards 2035[J]. China Economist, 2021, 16(1): 18-41.

(责任编辑: 童成立)