

中国智慧农业技术发展现状、挑战与展望

曹冰雪¹, 赵春江^{2*}, 李瑾^{1*}, 范贝贝¹

(1. 北京市农林科学院信息技术研究中心, 北京 100097; 2. 国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100097)

摘要: 智慧农业是农业现代化的重要体现和未来农业发展的主要方向。该文在明确智慧农业内涵特征与核心架构的基础上, 聚焦传感器与感知系统、决策模型与算法、智慧化平台3大共性支撑技术, 以及智能育种、智慧农场、智能温室、智慧牧场、智慧渔场、农产品智慧供应链6类智慧农业典型应用场景, 分析了中国智慧农业关键技术与装备的研发应用现状。从科技创新、成果转化、支撑体系等方面, 提出了中国智慧农业发展面临的重大挑战。并展望了未来中国智慧农业的发展态势与推进路径, 以期为农业高质、高效、可持续发展提供路径指引。

关键词: 智慧农业; 传感器; 模型; 算法; 平台; 智慧农场

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202505242

中图分类号: S24; S-1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2025)-21-0001-10

曹冰雪, 赵春江, 李瑾, 等. 中国智慧农业技术发展现状、挑战与展望[J]. 农业工程学报, 2025, 41(21): 1-10. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202505242 <http://www.tcsae.org>

CAO Bingxue, ZHAO Chunjiang, LI Jin, et al. Current status, challenges and prospects of smart agriculture technology development in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2025, 41(21): 1-10. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202505242 <http://www.tcsae.org>

0 引言

智慧农业已成为全球现代农业发展的重要趋势, 各国都在加快智慧农业发展布局, 加深人工智能、大数据、云计算等技术在农业领域的应用。全球发达国家、地区及国际组织相继推出智慧农业发展计划, 如美国“面向2030年食品和农业的科学突破”, 欧盟“农业科技2030”, 日本“面向下一代的农林渔业技术创新”, 联合国粮食及农业组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)“农业机器人与自动化支持可持续作物生产”等, 均提出加快大数据、人工智能等现代信息技术在农业领域的应用。当前, 以美国为代表的大田智慧农业、以德国为代表的智能农机制造业、以荷兰为代表的智能温室生产, 以及以日本为代表的小型智能装备的研发与应用均取得巨大进步, 为智慧农业发展提供了良好范本。

在数字化、智慧化浪潮下, 中国高度重视智慧农业发展, 智慧农业已上升为中国农业发展的重要战略。习近平总书记强调“要用物联网、大数据等现代信息技术发展智慧农业”。2018—2025年连续8年中央一号文件就“智慧农业”作出重要部署。农业农村部统一印发了

《关于大力发展智慧农业的指导意见》《全国智慧农业行动计划(2024—2028年)》, 针对中国智慧农业技术创新推广、典型场景建设、产业健康发展等目标任务进行系统谋划。发展智慧农业是中国转变农业发展方式, 推动农业现代化发展的现实需求。当前, 中国农业发展仍面临资源、市场、生态等多种瓶颈, 迫切需要利用现代信息技术对农业生产的各种资源要素和生产过程进行精细化、智能化控制, 推动农业生产方式转变和产业结构升级, 全面提升农业生产效率效益。

在高位拉动与现实驱动下, 中国智慧农业发展取得显著进展, 对农业的支撑和提升作用日益凸显, 已成为驱动和引领农业现代化、加快建设农业强国的“先手棋”。本文从理论维度剖析智慧农业的内涵特点与核心架构, 从现实维度分析总结中国智慧农业关键技术与装备的研发应用现状, 以及面临的重大挑战, 并从战略维度展望未来中国智慧农业的发展路径, 以期为加速中国智慧农业发展、建设农业强国提供借鉴。

1 智慧农业总体框架

1.1 智慧农业内涵特征

目前, 学术界对智慧农业尚未形成较为统一的概念内涵, 已有研究主要从生产模式、技术集成体系、产业链、农业发展高级形态等视角进行界定(见表1)。综合已有研究, 本研究认为智慧农业是以信息和知识为核心, 通过现代信息技术、工业装备技术与现代农业生物技术等先进生产力要素深度融合而形成的数字化管理、智能化决策、自动化作业、精准化投入和网络化服务的现代农业产业高级形态, 是人类基于农业内在规律与环境条件, 运用现代科技对农业系统的运行管控在感知理解、分析判断、行动措施等方面能力的终极体现。基于

收稿日期: 2025-05-29 修订日期: 2025-09-04

基金项目: 中国工程院战略研究与咨询项目(2023-JB-06-07); 北京市乡村振兴专家咨询委员会“十五五”时期农业农村领域发展规划支撑课题(202502-1)

作者简介: 曹冰雪, 博士, 助理研究员, 研究方向为智慧农业。

Email: caobx@nercita.org.cn

*通信作者: 赵春江, 博士, 研究员, 中国工程院院士, 研究方向为农业农村信息化。Email: zhaocj@nercita.org.cn; 李瑾, 博士, 研究员, 研究方向为农业农村信息化政策。Email: lij@nercita.org.cn

智慧农业的概念界定, 本研究认为智慧农业的具体特征主要体现在以下5个方面: 一是以天、空、地一体化监测网络为基础, 实现信息感知实时化、数字化; 二是以人工智能模型算法为核心, 实现农业决策科学化、最优

化; 三是以智能农机装备为工具, 实现农业生产无人化、智能化; 四是以精密管控技术为手段, 实现要素投入精准化、集约化; 五是以大数据云平台为依托, 实现农业服务网络化、个性化。

表1 现有智慧农业内涵界定

Table 1 Definition of existing connotations of smart agriculture

内涵界定维度 Connotation definition dimension	代表性文献 Representative literature	主要论断 Main assertions
智慧农业生产模式	[1]	集互联网、云计算和物联网技术为一体, 依托各种传感节点和通信网络, 实现农业生产环境智能感知、预警、决策与专家在线指导的生产模式
	[2]	新一代信息技术与农业决策、生产、流通交易等深度融合的新型农业生产模式
现代信息技术集成体系	[3]	一种基于物联网技术的智慧生产物联网集成平台
	[4]	新一代 ICT (information and communications technology) 技术与农业现代化深度融合的集成技术体系
智慧农业产业链	[5]	利用现代信息技术, 通过“互联网+”农业企业、农业产业, 形成的智慧农业产业链条
	[6]	以物联网技术为支撑和手段的一种现代农业形态
现代农业发展高级形态	[7]	基于现代信息科技、智能科技, 立足科技与农业全产业链深度融合, 优化农业产业链和供应链, 具有信息收集传送及时化、决策智能化的农业发展形态
	[8]	现代信息技术装备与农业全过程深度融合, 通过广泛的信息采集、智能决策与自动控制, 实现以数据为核心要素的智能化、精准化、集约化农业形态

1.2 与相关概念的联系与区别

智慧农业的发展离不开精准农业、数字农业、智能农业, 本研究通过对相关概念进行辨析, 明确智慧农业与其他三类的联系与区别。精准农业是以“3S”技术, 即地理信息系统 (geographic information system, GIS)、全球定位系统 (global position system, GPS)、遥感技术 (remote sensing, RS) 为核心, 对农业生产进行定量决策、变量投入、定位实施的现代农业产业形态^[9-11]。数字农业是以数据资源为关键要素, 通过应用大数据、物联网、云计算等数字技术, 实现农业生产、流通、消费等环节数字化的新型农业产业形态^[12-14]。智能农业是按照工业发展理念, 以信息和知识为生产要素, 以无人化智能应用为核心, 实现农业生产全过程信息感知、定量决策、智能控制和工厂化生产的全新农业形态^[15]。

1.2.1 联系

通过对精准农业、数字农业、智能农业与智慧农业概念的解析, 可以看出上述四类概念存在紧密的联系。其中, 数字农业是农业数字化转型所呈现的重要产业形态, 是智慧农业的基础。精准农业、智能农业则分别是智慧农业在农业精细化生产与无人化工厂化生产领域的主要场景表现。上述四类农业产业形态均是依据不同历史时期面临的不同形势特点所作出的现代农业发展方式的客观选择, 代表了现代农业在不同时期的工程科技应用特征, 四者之间呈现相辅相成、相互促进的关系。

1.2.2 区别

数字农业、精准农业、智能农业与智慧农业之间存在明显差别。其中, 精准农业强调因农业空间信息变化而进行精细化投入管理, 其关键特征在于农事操作的定位、定量、定时化, 关键技术支撑在于“3S”技术; 数字农业强调对农业的数字化决策管理, 其关键特征在于农业全要素数字化表达, 关键技术支撑在于物联网感知、大数据、云计算等数字技术; 智能农业强调机器装备的智能化能力, 其关键特征在于农业机械装备智能化、生产工厂化, 关键技术支撑在于智能农机装备、机器人等; 智慧农业则强调人对农业系统的智慧化管控能力, 其关

键特征在于信息感知数字化、农业决策科学化与农机装备智能化, 关键技术支撑在于综合信息感知系统、农业模型算法、智慧化平台、智能农机装备与机器人等。

1.3 智慧农业核心架构

结合内涵剖析, 智慧农业的核心架构如图1所示。在基础要素方面, 主要体现为信息、知识等新生产要素与劳动力、资本、技术、土地等传统要素的融合; 在关键技术方面, 主要表现为现代信息技术、现代生物技术与工程装备技术的融合, 其共性支撑技术聚焦于农业传感器与感知系统、决策模型与算法、智慧化平台三大领域; 在场景应用方面, “产前”主要包含智能育种, “产中”主要包含智慧农场、智能温室、智慧牧场、智慧渔场等, “产后”主要包含农产品智能加工、智慧营销、区块链+质量溯源等, “产业链”层面主要包含农产品智慧仓储物流、农业产业大脑等。智慧农业通过加速农业要素资源的优化配置与集约利用, 推动农业高质量、高效率、高效益、可持续发展。

2 中国智慧农业关键技术与装备研发应用现状

2.1 智慧农业共性支撑技术研发

智慧农业的发展依赖于传感器与感知系统、决策模型与算法、智慧化平台等关键底层技术支撑。这些技术具有通用性, 能够服务于多种农业应用场景, 构成智慧农业的技术底座。

2.1.1 传感器与感知系统

传感器与感知系统是智慧农业的数据基石, 国内在该领域已取得一系列突破。一是农业传感器技术研发进展显著。在环境信息感知方面, 针对空气温湿度^[16]、光照强度^[17]、CO₂等气体浓度^[18]、土壤温湿度^[19]等关键环境指标, 已实现相关感知器件的深度研究与产品国产化替代。由国家农业信息化工程技术研究中心研制的土壤养分传感器“知土”已达到国际先进水平; 在动植物生命信息感知方面, 作物领域聚焦于表型^[20-21]、叶绿素^[22]、重金属胁迫^[23]等专用传感器研发, 植物柔性传感器成为近年研究热点^[24]。动物领域则持续推进智能耳标、可穿

戴设备的迭代升级，并在动物采食、运动等行为^[25]以及体温、体重等生态^[26-27]感知技术上成果显著；在农产品品质感知方面，国内相关研究起步较晚，但近年基于近红外光谱、高光谱技术的农产品内外部品质传感器研究进展迅速^[28-31]，电子鼻、电子舌等模拟人类感官的品质感知技术成果涌现^[32-34]；在农机感知方面，已有研究主要集中于农机工况^[35-36]与作业感知^[37]领域，集成多传感器的农机作业智能监测终端达到国际先进水平。二是自主国产农业卫星遥感技术体系已形成。资源 1-3 号卫星、高分系列遥感卫星、吉林一号等小卫星的成功发射为农

业大尺度遥感研究提供支撑。目前，国内农业卫星遥感技术研发主要集中于耕地等资源调查^[38]、农作物长势监测与估产^[39]、农业灾害监测^[40-41]等关键领域。三是农业无人机遥感技术达到国际领先。依托中国在全球多旋翼无人机技术的主导地位，农业无人机在“田块-农场”精细尺度遥感应用中开始发挥重要作用。已有研发重点集中在中小尺度的农作物估产与长势诊断^[42-43]、病虫害监测^[44]等领域。例如，大疆研发的农业遥感无人机搭载高分辨率可见光与多光谱相机，可高效识别田间作物长势、缺苗、杂草分布、倒伏等情况。

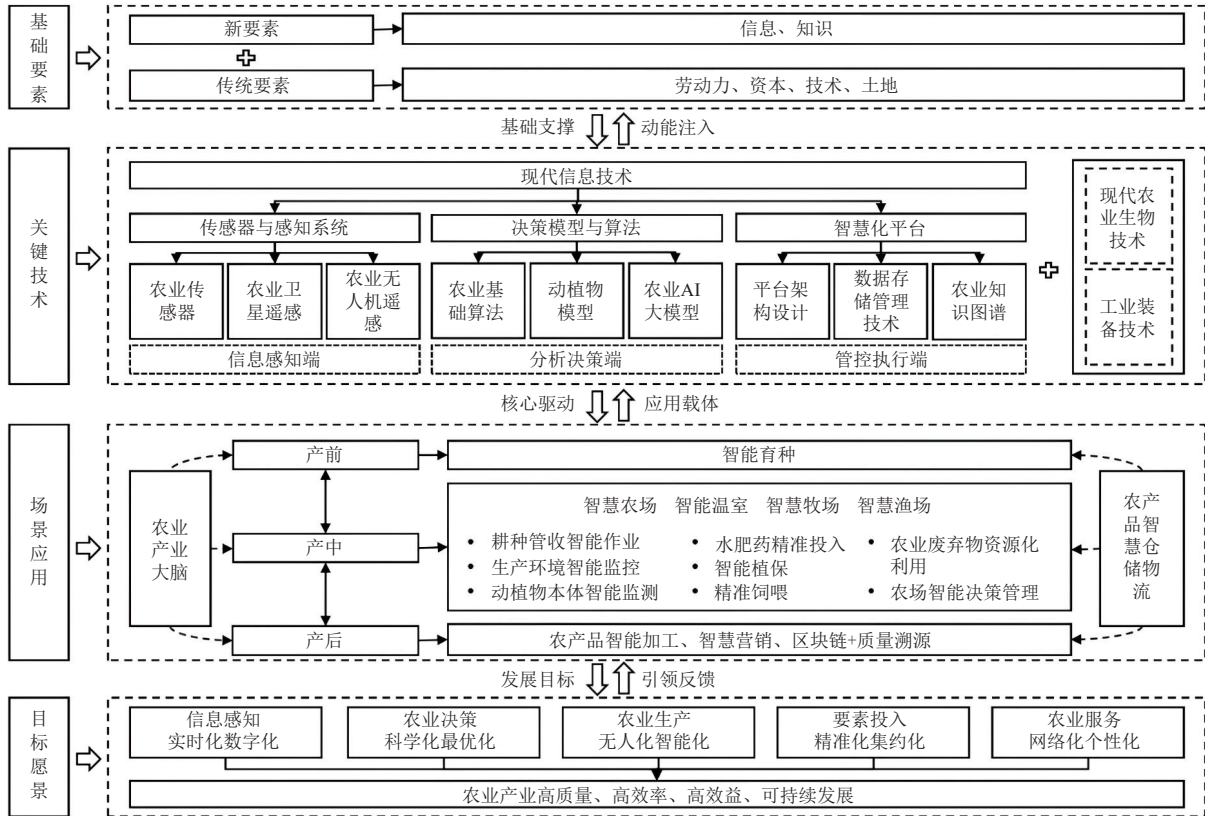


图 1 智慧农业核心架构
Fig.1 Core architecture of smart agriculture

2.1.2 决策模型与算法

决策模型与算法是智慧农业的核心大脑，国内针对模型算法的研究持续深化。一是农业基础算法优化不断深入。算法是发掘农业数据价值的关键，其研究重点主要集中于支持向量机、决策树等机器学习算法，卷积神经网络、循环神经网络、Transformer 等深度学习算法，以及遗传算法、粒子群算法、蚁群算法等进化算法的优化与融合。并基于算法创新开展了动植物基因组选择^[45-46]、土壤养分测定^[47]、农作物产量评估^[48]、农作物病虫害识别^[49-50]、动物声音识别^[51-52]、农机视觉导航^[53]等诸多研究，以有效提升农业评估识别的精度与效率。二是动植物模型向多因子系统耦合发展。其中，作物模型主要涵盖对作物生育期进程^[54]、干物质生产与分配^[55-56]、产量形成^[57-58]、品质形成^[59-60]等的模拟，并由仅关注作物生理形态的单一模型，逐步向包含作物、气候、土壤、水文、病虫害等多因子耦合的综合模型演变^[61-63]。动物模型则着力于建立遗传基因、性别、营养水平、环境条件

等参数与动物体重体尺、产仔数等生长繁育性状之间一般性规律关联的生长模型^[64-65]。三是农业人工智能（artificial intelligence, AI）大模型开发处于起步探索阶段。随着以 ChatGPT 为代表的生成式人工智能兴起，国内高校院所开始探索推动农业 AI 大模型的开源。例如，北京市农林科学院研发的“农科小智 2.0”，能够初步实现农业病虫害诊断、农技咨询问答、农产品市场行情、农产品电商智能客服等多种语义理解和交互服务。

2.1.3 智慧化平台

智慧化平台是智慧农业的关键载体，国内研究主要聚焦于平台架构设计、数据存储管理与知识集成应用等核心方向。一是平台架构设计持续深化。国内研究普遍遵循分层解耦理念，设计涵盖资源层、服务层、应用层和用户层的智慧农业平台架构，并明确各层核心功能与技术支撑。数字孪生平台架构成为重要研究方向。例如，郭大方等^[66]基于物理实体、虚拟模型、连接、孪生数据和服务五维模型，提出“云-雾-边-端”协同的数字孪生

平台架构及其运行机制。二是平台数据存储管理技术稳健发展。数据存储技术研究从早期侧重于 MySQL、Oracle 等关系型数据库, 向适应时空数据、流数据、非结构化数据需求的农业非关系型数据库, 分布式数据存储系统, 时序数据库, 图数据库演进^[67-68]。数据管理技术研究则聚焦农业元数据管理、数据仓库构建、主数据管理和数据血缘分析等技术领域^[69]。例如, 韩家琪等^[70]建立了以农作物估产为主题的空间多维数据仓库框架, 并阐述了农业异质数据的提取、转换、清洗与装载方法。三是基于知识图谱的平台知识集成应用研究成为热点。国内针对农业知识图谱本体建模、信息抽取、知识融合、知识加工等关键技术持续突破^[71], 并着重探索将知识图谱深度嵌入智慧农业平台架构、服务平台涉农信息检索^[72]、智能问答交互^[73]、个性化推荐服务^[74-75]以及专家诊断决策^[76-77], 驱使平台从数据管理向知识服务跃迁。

2.2 智慧农业场景应用

在现代信息技术支撑下, 国内智能育种、智慧农场、智能温室、智慧牧场、智慧渔场、农产品智慧供应链等智慧农业场景应用不断加速拓展深化, 为农业转型升级提供强大动能。

2.2.1 智能育种

人工智能与基因编辑等前沿科技的深度融合, 推动了育种范式向数字化智能化方向转型。例如, 国家玉米改良中心、华中农业大学等单位合作研发了基于机器学习的全基因组选择模型“CropGBM 工具箱”, 为作物基因组智能设计育种提供一站式解决方案。中国农业科学院与阿里巴巴达摩院联合研发的智慧育种平台, 融合了大算力、人工智能算法及高性能云架构, 实现海量多源育种数据的标准化管理与深度挖掘, 并利用大模型技术优化亲本选配与品种潜力预测, 数据处理能力居于国际前沿^[78]。国家农业信息化工程技术研究中心研发的“金种子”系列平台已形成差异化育种服务模式, 主要涵盖针对大规模商业育种需求的“企业平台”、适配中小型团队的“云平台”以及服务区试体系的“品种试验平台”, 育种服务范围已覆盖水稻、玉米、小麦、大豆、油菜、棉花及蔬菜等主要农作物。

2.2.2 智慧农场

国内智慧农场技术体系逐步完善, 并在多个地区开展试点示范, 初步实现“机器换人”。例如, 由国家农业信息化工程技术研究中心设计建设的吉林公主岭玉米智慧农场, 实现了玉米耕、种、管、收全程无人化作业, 亩均增产 2%, 节省人工成本 30% 以上; 在河北沧州、北京昌平等地建设的甘蓝、白萝卜、辣椒等露地蔬菜无人农场, 技术覆盖整地、起垄、移栽、施肥、施药、收获等 10 个环节, 整体作业轨迹精度控制在 2 cm 以内, 移栽和收获效率达到人工的 10 倍以上, 采收破损率小于 5%。华南农业大学研发团队在全国 15 个省建成 30 个无人农场, 其中广州大吉沙岛无人智慧农场已连续开展 8 季水稻(早中晚)和 3 季冬种蔬菜的无人化生产^[79]。中国科学院在内蒙古、安徽、河北、湖北等多个省份布局伏羲农场建设试点, 推动土地监测、数据采集、指挥中心、智能农机装备等功能模块的集成应用^[80]。

2.2.3 智能温室

中国设施农业智能化水平显著提升, 在温室环境智能调控设备、高效灌溉系统、水肥一体机等核心装备方面已基本实现国产化替代, 高端智能温室建设进程加快。例如, 由国家农业信息化工程技术研究中心研发的多源蓄热型装配式柔性日光温室, 通过配备“空气-水源-土壤”联合主动蓄放热系统和专用环境控制器等, 实现北方地区室内外温差超过 27 °C, 土地利用提升 10%、能耗降低 15%, 该技术体系已在北京设施农业中熟化应用。首农集团建成京津冀单体最大的智能连栋温室“翠湖智慧农业创新工场”, 智能温室面积达 21 万 m², 广泛集成应用温室环境智能控制、水肥药精准调控及番茄采收、喷雾、授粉机器人等智能化装备, 劳动生产率较传统设施提升 3 倍, 化学农药施用量减少 25%^[81], 显著提高了资源利用效率和作业精准度。

2.2.4 智慧牧场

中国畜禽养殖领域智能化技术应用取得显著进展, 智能环控、电子标识、精准饲喂等关键核心技术基本实现自主可控, 奶牛、生猪及家禽等产业智慧牧场建设处于领先地位。例如, 京东与吉林精气神公司合作建设的智慧猪场, 融合三维机器视觉、声纹识别、巡检与饲喂机器人等, 实现了环境调控、饲喂管理、健康诊断、粪污清理全流程智能化, 有效替代了传统人工养殖模式。伊利敕勒川智慧生态牧场集成了全混合日粮(total mixed ration, TMR)智能饲喂系统、牛群健康智能监测系统、粪污无害化处理系统及智能无人挤奶机器人, 基本达成了奶牛养殖全环节无人化智慧化运行。福建光阳蛋业股份有限公司则创新性构建了全球首个家禽深度学习模型, 并首创蛋鸡“1+3”养殖运营模式, 即 3 栋鸡舍配置 1 个饲养员加 3 台养鸡机器人, 人工效能提升 30%, 产蛋率提高 1.0%~1.5%, 机器人对死鸡、弱鸡/绝产鸡识别准确率分别达 99% 与 90%^[82]。

2.2.5 智慧渔场

中国智慧渔业发展虽在水环境传感器、鱼类生长调控模型及水产专用机器人等关键技术上存在短板, 但近年产业化应用进展迅速, 已布局建成一批智慧渔场。例如, 福建连江县已部署 11 个深远海智能化养殖平台, 总养殖水体近 18 万 m³, 年产量约 1 800 t、产值超 2 亿元。其中“乾动 1 号”平台, 搭载视频监控、水质监测、自动投喂与起捕装备, 仅需 2~3 名操作人员即可管理数万尾深海鱼, 大幅降低人力投入^[83]。江苏南通龙洋水产有限公司探索的水产工厂化智慧养殖模式, 通过系统配置水质在线监测、智能投喂与增氧控制、鱼病远程诊断等设备, 实现年养殖存池量提升 64%, 养殖周期缩短 22%, 人工效能提升 35%, 水循环利用率达 93%^[84]。

2.2.6 农产品智慧供应链

农产品智慧供应链建设作为一项复杂的系统工程, 整体尚处于初期探索阶段, 但在农产品采后处理、质量追溯及智慧储运等关键环节形成突破与应用示范。例如, 江西绿萌科技股份有限公司开发的基于机器视觉与高光谱技术的果蔬采后智能分选装备, 可实现对橙子、苹果、

猕猴桃等 50 余种果蔬品种的无损检测，技术指标达到国际领先水平，产品已销往 32 个国家和地区。山东潍坊“区块链+韭菜”项目通过构建区块链管理溯源平台，完整记录存储韭菜全产业链数据，赋予每批产品唯一区块链数字“身份证”，确保产品全程可追溯，并有效倒逼生产环节标准化绿色化转型，已实现试点基地水肥药综合施用量节省 10% 以上，劳动力成本降低 15%，头茬韭菜售价提升 50%。阿里农产品智慧产地仓则通过部署以 AI 算法为核心的“仓库大脑”与生鲜农产品智能分选设备，将农产品分选效率提升至人工作业的 124 倍，整体分拣储运效率较传统仓提高 10 倍^[85]。

3 中国智慧农业发展面临的挑战

尽管中国智慧农业发展已取得显著成效，但在关键技术攻关、成果转化及产业化、基础支撑体系等方面仍存在诸多问题。

3.1 关键技术“卡脖子”、技术集成性不足

1) 基础模型算法研究支撑不足。国内农业模型算法等基础研究起步较晚，过度依赖国外开源算法与软件，尚未形成有影响力的农业人工智能开源软件库。动植物生理生态模型算法的准确性和泛化能力不足，部分已构建的模型算法难以适应各种复杂的农业应用场景，导致对农业数据的高效处理和深度知识挖掘能力受限，整体处于技术“跟跑”阶段。

2) 高端专用传感器、机器人等国产化替代任务艰巨。目前，中国农业感知环节仍依赖传统人工或低端设备，农业表型信息获取设备整体处于技术追随地位，国产农业传感器稳定性和数据分辨率有待提升，高端专用传感器对外依存度仍达 80% 以上。农业智能控制与农业机器人关键技术及核心零部件主要依赖进口，在负载动力换挡、无级变速、视觉系统、柔性执行器件等领域研发薄弱，大型大马力高端智能农机装备、丘陵山区适用小型智能农机装备研发滞后。

3) 基于多学科的技术集成不够。由于农业固有的生物性、分散性、多样性与复杂性特点，在其数字化智能化发展中，对跨学科技术综合集成需求大。但国内现有智慧农业领域的科学研究对农学、计算机科学、农业工程、环境科学、生命科学、管理学等多学科知识融合不足；虽然技术的点上突破较多，但是围绕农业全产业链的技术集成研究难度大、创新成果少，缺乏可规模化推广的综合性智慧农业解决方案，导致智慧农业的整体技术优势未能充分发挥。

3.2 科技成果转化、产业化与场景熟化滞后

1) 科技成果落地转化难度大。国内高校及科研院所智慧农业领域的研究普遍以项目导向为主，相关科研活动缺乏产业需求的有效牵引，导致大量科研成果处于“高枝青果”状态，与实际应用脱节。且国内农业科技成果转化机制不健全，针对智慧农业相关产品中试、熟化的专业性平台支持不足，缺乏必要装备条件与技术服务，导致科研与推广、成果与市场之间的互动性不强、联动效果不足。

2) 数智产业链生态不健全。与发达国家相比，国内农业传感器、智能农机装备、农业软件与信息服务业等产业化布局起步较晚，产业链上下游协作不够紧密、企业整体竞争力较弱，关键部件与整机制造的工艺技术水平与国际先进存在差距。同时，高水平的农业科技成果推广服务平台和中介服务机构严重短缺，面向新型农业经营主体与小农户的信息技术产品推广、运维与服务体系尤为薄弱，不利于智慧农业技术成果的产业化应用。

3) 应用场景集成性和可持续性面临严峻挑战。智慧农业技术综合性强、门槛高，相关场景建设通常需要较长建设周期和重资本投入。当前国内已建成的应用场景多数处于“点状”示范阶段，场景的系统性、集成性不够。更为关键的是，吸引村集体经济组织、新型农业经营主体及社会资本等多元力量参与投资建设的长效盈利机制尚不清晰，普遍缺乏成熟的商业模式和运营经验积累，智慧农业“盆景”难以转变为“风景”。

3.3 政策、数据、人才等基础支撑体系不健全

1) 政策保障体系有待完善。数据是智慧农业发展的基础要素，但国内在涉农数据要素确权、流通与交易等方面的管理规范还不健全。同时，支撑人工智能等前沿技术与农业深度融合的专项政策体系未充分建立，针对人工智能伦理规范、国家安全及公平竞争等方面风险管控缺乏制度约束。财政投入机制也亟需优化，当前对智慧农业这一前瞻技术依赖型产业的资金支持强度不足，缺乏长周期、稳定性资金保障。

2) 数据资源基础薄弱且共享困难。中国涉农数据采集体系仍不健全，农村地区互联网普及率为 69.2%，与城镇差距达 15.7%^[86]，千兆光纤、5G 网络等信息基础设施尚未实现田间地头全覆盖，加之复杂农业环境中传感设备稳定性不足、天空地多源异构数据时空融合难度大等技术瓶颈，“数从何来”仍是根本挑战。同时，由于数据权属界定不清、安全标准缺位，政府、企业与农户之间跨主体数据共享机制缺失，“数据孤岛”现象严重，极大制约农业全链条数据整合应用。

3) 专业人才匮乏、农民数字素养不高。受互联网行业虹吸效应，以及农业领域人才引进机制不完善、人才培养体系不健全等影响，智慧农业专业人才基数小、流动性高，人才缺口严峻。同时，占农业经营主体主力的农民群体整体数字素养偏低，对新技术的认知接受慢，“不敢用、不善用”问题普遍存在，成为智慧农业技术落地应用的关键瓶颈。

4 中国智慧农业发展展望与路径

在中国推进农业高质高效、绿色低碳发展的目标导向下，智慧农业正迎来前所未有的战略发展机遇期。通过农业数据的深化应用和人工智能技术的加速融入，智慧农业将不仅追求操作的精准性，更致力于通过数据分析与智能决策实现高效、绿色、可持续生产。面向未来，中国智慧农业发展将聚焦五大战略方向：

1) 低成本高精度农业信息感知。重点突破复杂农业

环境下的微小型、高可靠、低功耗智能传感技术, 研发面向土壤特性、动植物生命信息、农产品品质以及农机作业状态的原创性感知装备, 构建覆盖广泛、易用稳定、成本适宜的信息感知体系。

2) 农业人工智能。聚焦智能识别、分析预测、自主控制等领域, 结合中国不同区域和不同类型农业特点, 加快农业人工智能模型算法、智能农机装备与农业机器人的自主研发, 打造基于 AI 算力与算法的“农业超级大脑”, 全面推动“数据换人”“机器换人”。

3) 农业低空经济。持续拓展基于无人机的低空农业应用, 推动无人机播种、施肥施药、作物与病虫害监测、物流运输、农田测绘、应急救援等多场景规模化落地, 培育农业低空经济新业态。

4) 小尺度智慧农业。立足“大国小农”的国情农情, 研发推广适配小农生产的智能农机装备, 健全面向小农户的农业信息服务和“订单式”智慧农业服务, 助力小农户跨越数字鸿沟, 共享智慧农业红利。

5) “零碳”智慧农业。围绕“双碳”目标, 推动绿色技术与智能技术装备深度融合, 依托物联网、大数据、人工智能等手段, 强化农业资源循环利用、污染监测治理、节能减排与生态修复, 降低农业能耗与碳排放, 增强农业碳汇能力, 建成智能高效、绿色循环的农业系统。

为抢抓机遇、破解瓶颈, 亟需整合政府、高校、科研机构、科技型企业、新型农业经营主体及农户等多方力量协同推进, 应将先进信息技术转化为农业先进生产力, 赋能农业高质量、可持续发展, 具体建议如下:

1) 发挥政府主导作用, 夯实智慧农业制度框架与“数字底座”。完善智慧农业发展制度保障, 建立适宜农业数据特点的标准体系, 构建农业数据产权、流通、治理等制度体系, 围绕权益保护、安全义务、监督管理等领域加强农业人工智能立法。持续加大政府对智慧农业发展的政策扶持力度, 推动设立智慧农业发展专项资金, 对智慧农业平台建设、场景打造、智能农机装备购置等给予财税政策优惠与购置补贴支持。以政策、项目为牵引, 加速补齐农业网络基础设施短板, 加快构建天空地一体化农业数据采集监测体系, 推动建设农业大数据“资源池”与产业“智慧大脑”。

2) 发挥高校、科研机构引领作用, 大力推动智慧农业关键技术研发与高端人才引进。以实现高水平科技自立自强为目标, 在国家层面统筹谋划智慧农业高能级创新平台建设, 推动设立智慧农业国家科技重大专项、重点研发计划, 重点突破低成本、微型化、集成化农业传感器技术, 高通量表型分析技术, 多模态生物特征识别技术; 深化人机交互、类脑计算、AI+基因计算等前沿研究, 迭代升级农业大数据算法模型, 加速农业人工智能“小模型+大模型”研发; 着重突破适应复杂农田环境的“一大一小”智能农机装备、农业智能无人机集群及农业机器人关键共性技术; 围绕供应链协同发展需求, 前瞻布局多温区智控储运、区块链溯源、供应链数字孪生等技术研究。同时, 加紧部署“新农科、新工科、新文科”建设, 设立一批智慧农业新院所、新专业, 推动多

学科深度交叉融合与知识集成, 强化既精通农业规律又掌握前沿智能技术的高端复合型人才引进与培养。

3) 发挥科技型企业引擎作用, 构建以市场为导向、可持续发展的智慧农业产业集群。立足产业集群发展理念, 聚焦农业智能装备制造、农业传感器与测控终端设计制造、农业软件与信息服务等新兴领域, 实施智慧农业产业集群培育工程, 着力推动国家级智慧农业产业园区建设, 引进培育一批具有全球竞争力的智慧农业科技型企业, 建成集中试熟化、仿真验证、技术服务、金融法律服务等于一体的配套服务体系, 推动智慧农业科技成果由“实验室”走上“生产线”, 加速智慧农业软硬件产品的标准化与产业化, 共同构建“创新链+产业链”双向融合的智慧农业产业生态体系。

4) 发挥新型农业经营主体与农户主力作用, 基于“场景+链式”思维加速智慧农业实践应用。依托现代农业产业园、农业龙头企业、农民合作社及农业社会化服务组织, 推动智慧农场、智能温室、智慧牧场、智慧渔场建设, 促进农业全程智能化生产; 推进农产品加工数智化转型升级, 强化农产品智能分级分选、无损检测及分拣运输等装备应用; 贯通从田间到餐桌的农产品智能冷链物流与区块链溯源体系, 实现农产品供应链智慧管理; 建立一站式智慧农业服务平台, 面向小农户推广小型适农智能装备与智慧生产托管服务, 促进小农户深度参与并共享“数字红利”。

[参 考 文 献]

- [1] 王天擎, 胡艳超. 基于中小型农企视角的智慧农业转型行为研究[J]. *当代经济*, 2020(1): 88-91.
- [2] 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 Haodong, HUO Peng, XIAO Rongmei, et al. The underlying logic, practical constraints and breakthrough path of the development of smart agriculture[J]. *Reform*, 2021(11): 95-103. (in Chinese with English abstract)
- [3] PREM PRAKASH J, ALI Y, DIMITRIOS G, et al. Internet of things platform for smart farming: Experiences and lessons learnt[J]. *Sensors*, 2016, 16(11): 1884.
- [4] 汪懋华. 助力乡村振兴 推进“智慧农业”创新发展[J]. *智慧农业*, 2019, 1(1): 1.
- [5] 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 Yalan, ZHANG Rong. 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)
- [6] 李道亮. 物联网与智慧农业[J]. *农业工程*, 2012, 2(1): 1-7.
LI Daoliang. Internet of things and wisdom agriculture[J]. *Agricultural Engineering*, 2012, 2(1): 1-7. (in Chinese with English abstract)
- [7] 赵敏娟. 智慧农业的经济学解释与突破路径[J]. *人民论坛·学术前沿*, 2020(24): 70-78.
ZHAO Minjuan. Economic explanation and breakthrough path of smart agriculture[J]. *Frontiers*, 2020(24): 70-78. (in Chinese with English abstract)
- [8] 刘长全. 关于智慧农业的理论思考: 发展模式、潜在问题与推进策略[J]. *经济纵横*, 2023(8): 63-70.
LIU Changquan. Theoretical thinking on smart agriculture: Development modes, potential problems and promotion measures[J]. *Economic Review Journal*, 2023(8): 63-70. (in Chinese with English abstract)

- [9] KIANI F, SEYYEDABBASI A. Wireless sensor network and internet of things in precision agriculture[J]. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 2018, 9(6): 99-103.
- [10] 赵春江, 薛绪掌, 王秀, 等. 精准农业技术体系的研究进展与展望[J]. *农业工程学报*, 2003, 19(4): 7-12.
ZHAO Chunjiang, XUE Xuzhang, WANG Xiu, et al. Advance and prospects of precision agriculture technology system[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2003, 19(4): 7-12. (in Chinese with English abstract)
- [11] 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 Yuanyuan, YOU Jiong, XING Zefeng, et al. Review of precision agriculture development situations in the main countries in the world and suggestions for China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(11): 315-324. (in Chinese with English abstract)
- [12] 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.
- [13] 汪旭晖, 赵博, 王新. 数字农业模式创新研究——基于网易味央猪的案例[J]. *农业经济问题*, 2020(8): 115-130.
WANG Xuhui, ZHAO Bo, WANG Xin. Digital agriculture mode innovation study: Based on the case of Netease Wei Yang Pig[J]. *Issues in Agricultural Economy*, 2020(8): 115-130. (in Chinese with English abstract)
- [14] 马述忠, 贺歌, 郭继文. 数字农业的福利效应——基于价值再创造与再分配视角的解构[J]. *农业经济问题*, 2022(5): 10-26.
MA Shuzhong, HE Ge, GUO Jiwen. The welfare effect of digital agriculture: Deconstruction from the perspective of value recreation and value redistribution[J]. *Issues in Agricultural Economy*, 2022(5): 10-26. (in Chinese with English abstract)
- [15] 《中国人工智能系列白皮书》编委会. 中国人工智能系列白皮书——智能农业[R]. 北京: 中国人工智能学会, 2016.
- [16] 罗焕芝, 王骥. 面向农业温室环境的 ICDO-RBFNN 多传感器数据融合算法[J]. *农业工程学报*, 2024, 40(21): 184-191.
LUO Huanzhi, WANG Ji. ICDO-RBFNN multi-sensor data fusion for agricultural greenhouse environment[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2024, 40(21): 184-191. (in Chinese with English abstract)
- [17] 王俊衡, 李莉, 穆永航, 等. 日光温室光照强度测量系统研究[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(S1): 194-200.
WANG Junheng, LI Li, MU Yonghang, et al. Measurement system of light intensity in solar greenhouse[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(S1): 194-200. (in Chinese with English abstract)
- [18] 张尉, 高星星, 方贤才, 等. 适用于农业环境的便携式激光 CO₂ 传感器设计[J]. *中国农机化学报*, 2017, 38(3): 73-76, 81.
ZHANG Wei, GAO Xingxing, FANG Xiancai, et al. Design of portable laser CO₂ sensor for agricultural environment[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2017, 38(3): 73-76,81. (in Chinese with English abstract)
- [19] XU Y, DUAN J L, JIANG R, et al. Study on the detection of soil water content based on the pulsed acoustic wave (PAW) method[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 15731-15743.
- [20] JIN S C, SUN X L, WU F F, et al. Lidar sheds new light on plant phenomics for plant breeding and management: Recent advances and future prospects[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2021, 171: 202-223.
- [21] TAO H Y, XU S, TIAN Y C, et al. Proximal and remote sensing in plant phenomics: 20 years of progress, challenges, and perspectives[J]. *Plant Communications*, 2022, 3(6): 100344.
- [22] 李佳盟, 王楠, 李震, 等. 基于特征波长优化的便携式作物叶绿素检测仪研究[J]. *农业机械学报*, 2023, 54(S2): 270-277.
LI Jiameng, WANG Nan, LI Zhen, et al. Development of handheld chlorophyll detector based on characteristic wavelengths optimization[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(S2): 270-277. (in Chinese with English abstract)
- [23] JIN M, LIU X N, WU L, et al. An improved assimilation method with stress factors incorporated in the WOFOST model for the efficient assessment of heavy metal stress levels in rice[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2015, 41: 118-129.
- [24] 渠纯纯, 孙文秀, 李臻, 等. 植物柔性传感器研究进展与展望[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(8): 32-43.
QU Chunchun, SUN Wenxiu, LI Zhen, et al. Research progress and prospects of the plant flexible sensors[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2023, 39(8): 32-43. (in Chinese with English abstract)
- [25] 张帆, 周梦婷, 熊本海, 等. 肉牛生理指标智能监测技术研究进展与展望[J]. *智慧农业 (中英文)*, 2024, 6(4): 1-17.
ZHANG Fan, ZHOU Mengting, XIONG Benhai, et al. Research advances and prospect of intelligent monitoring systems for the physiological indicators of beef cattle[J]. *Smart Agriculture*, 2024, 6(4): 1-17. (in Chinese with English abstract)
- [26] JIAO F, WANG K, SHUANG F, et al. A smartphone-based sensor with an uncooled infrared thermal camera for accurate temperature measurement of pig groups[J]. *Frontiers in Physics*, 2022, 10: 893131.
- [27] YU H P, LEE K, MOROTA G. Forecasting dynamic body weight of nonrestrained pigs from images using an RGB-D sensor camera[J]. *Translational Animal Science*, 2021, 5(1): txab006.
- [28] 谢有超, 彭黔荣, 杨敏, 等. 近红外光谱技术在蜂蜜检测中的应用[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(12): 334-341.
XIE Youchao, PENG Qianrong, YANG Min, et al. Application of near infrared technology in the determination of honey[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41(12): 334-341. (in Chinese with English abstract)
- [29] TIAN X, LI J B, YI S L, et al. Nondestructive determining the soluble solids content of citrus using near infrared transmittance technology combined with the variable selection algorithm[J]. *Artificial Intelligence in Agriculture*, 2020, 4: 48-57.
- [30] 许丽佳, 陈铭, 王玉超, 等. 高光谱成像的猕猴桃糖度无损检测方法[J]. *光谱学与光谱分析*, 2021, 41(7): 2188-2195.
XU Lijia, CHEN Ming, WANG Yuchao, et al. Study on non-destructive detection method of kiwifruit sugar content based on hyperspectral imaging technology[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2021, 41(7): 2188-2195. (in Chinese with English abstract)
- [31] FU X P, WANG M Y. Detection of early bruises on pears using fluorescence hyperspectral imaging technique[J]. *Food Analytical Methods*, 2022, 15: 115-123.
- [32] 武琳霞, 李玲, 习佳林, 等. 桃品质的无损检测技术研究进展[J]. *食品科学*, 2022, 43(15): 367-377.
WU Linxia, LI Ling, XI Jialin, et al. Progress in nondestructive detection techniques for peach quality[J]. *Food Science*, 2022, 43(15): 367-377. (in Chinese with English abstract)
- [33] LU L, HU Z Q, HU X Q, et al. Electronic tongue and electronic nose for food quality and safety[J]. *Food Research International*, 2022, 162: 112214
- [34] 刘泓, 郭玉杰, 陈永凯, 等. 基于电子舌检测快速判别不同物种畜禽骨蛋白肽[J]. *食品科学*, 2022, 43(4): 127-134.

- LIU Hong, GUO Yujie, CHEN Yongkai, et al. Rapid discrimination of bone peptides from different livestock and poultry species using electronic tongue[J]. *Food Science*, 2022, 43(4): 127-134. (in Chinese with English abstract)
- [35] 王培, 孟志军, 尹彦鑫, 等. 基于农机空间运行轨迹的作业状态自动识别试验[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(3): 56-61.
- WANG Pei, MENG Zhijun, YIN Yanxin, et al. Automatic recognition algorithm of field operation status based on spatial track of agricultural machinery and corresponding experiment[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2015, 31(3): 56-61. (in Chinese with English abstract)
- [36] 杨洋, 温兴, 马强龙, 等. 基于贝塞尔曲线的动态识别区农机避障路径实时规划[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(6): 34-43.
- YANG Yang, WEN Xing, MA Qianglong, et al. Real time planning of the obstacle avoidance path of agricultural machinery in dynamic recognition areas based on Bezier curve[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(6): 34-43. (in Chinese with English abstract)
- [37] LOU S Y, HE J, LU C Y. A tillage depth monitoring and control system for the independent adjustment of each subsoiling shovel[J]. *Actuators*, 2021, 10(10): 250.
- [38] 王井利, 高天娇, 李荣平, 等. 基于光学遥感和微波遥感的土壤水分反演模型研究[J]. *气象与环境学报*, 2023, 39(1): 73-82.
- WANG Jingli, GAO Tianjiao, LI Rongping, et al. Research on soil moisture retrieval model based on optical remote sensing and microwave remote sensing[J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2023, 39(1): 73-82. (in Chinese with English abstract)
- [39] JIAO X F, KOVACS J M, SHANG J L, et al. Object-oriented crop mapping and monitoring using multi-temporal polarimetric RADARSAT-2 data[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2014, 96: 38-46.
- [40] CHEN J, WANG L X, LI X D, et al. Spring drought monitoring in Hebei plain based on a modified apparent thermal inertia method[C]// Proceedings of SPIE 8006, MIPPR 2011: Remote Sensing Image Processing, Geographic Informations Systems, and Other Applications, Guilin, China, 2011: 800615.
- [41] LOU W P, JI Z W, SUN K, et al. Application of remote sensing and GIS for assessing of economic loss caused by frost damage to tea plantations[J]. *Precision Agriculture*, 2013, 14: 606-620.
- [42] 于海琳, 兰玉彬, 李京谦, 等. 基于无人机遥感数据和机器学习的向日葵 LAI 反演[J]. *农业机械学报*, 2025, 56(1): 356-365.
- YU Hailin, LAN Yubin, LI Jingqian, et al. Sunflower LAI inversion based on unmanned aerial vehicle remote sensing data and machine learning[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2025, 56(1): 356-365. (in Chinese with English abstract)
- [43] GUO Y H, XIAO Y, HAO F H, et al. Comparison of different machine learning algorithms for predicting maize grain yield using UAV-based hyperspectral images[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2023, 124: 103528.
- [44] 胡根生, 谢一帆, 鲍文霞, 等. 基于轻量型网络的无人机遥感图像中茶叶枯病检测方法[J]. *农业机械学报*, 2024, 55(4): 165-175.
- HU Gensheng, XIE Yifan, BAO Wenxia, et al. Lightweight network for tea leaf blight detection in UAV remote sensing images[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2024, 55(4): 165-175. (in Chinese with English abstract)
- [45] 李棉燕, 王立贤, 赵福平. 机器学习在动物基因组选择中的研究进展[J]. *中国农业科学*, 2023, 56(18): 3682-3692.
- LI Mianyan, WANG Lixian, ZHAO Fuping. Research progress on machine learning for genomic selection in animals[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2023, 56(18): 3682-3692. (in Chinese with English abstract)
- [46] 张兆旭, 管思彤, 林一鸣, 等. 机器学习方法在植物基因组信息预测中的研究现状[J]. *生命科学*, 2024, 36(3): 302-315.
- ZHANG Zhaoxu, GUAN Sitong, LIN Yiming, et al. Current research status of machine learning methods on predicting plant genomic information[J]. *Chinese Bulletin of Life Sciences*, 2024, 36(3): 302-315. (in Chinese with English abstract)
- [47] 马杰, 李名升, 封雪. 基于机器学习算法和受体模型联用的土壤重金属溯源解析[J]. *环境科学*, 2025, 46(8): 5229-5236.
- MA Jie, LI Mingsheng, FENG Xue. Source apportionment of heavy metals in soils based on machine learning algorithms and receptor model[J]. *Environmental Science*, 2025, 46(8): 5229-5236. (in Chinese with English abstract)
- [48] 樊杰杰, 邱春霞, 樊意广, 等. 基于连续小波变换和机器学习的小麦产量预测[J]. *光谱学与光谱分析*, 2024, 44(10): 2890-2899.
- FAN Jiejie, QIU Chunxia, FAN Yiguang, et al. Wheat yield prediction based on continuous wavelet transform and machine learning[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2024, 44(10): 2890-2899. (in Chinese with English abstract)
- [49] ZHANG M H, CHEN Y Z, ZHANG B, et al. Recognition of pest based on Faster RCNN[C]// Signal and Information Processing, Networking and Computers: Proceedings of the 6th International Conference on Signal and Information Processing, Networking and Computers (ICSINC), Guiyang, China, 2020: 62-69.
- [50] GUO Y, GAO J J, WANG X F, et al. Precious tree pest identification with improved instance segmentation model in real complex natural environments[J]. *Forests*, 2022, 13: 2048.
- [51] 苍岩, 罗顺元, 乔玉龙. 基于深度神经网络的猪声音分类[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(9): 195-204.
- CANG Yan, LUO Shunyan, QIAO Yulong. Classification of pig sounds based on deep neural network[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2020, 36(9): 195-204. (in Chinese with English abstract)
- [52] 杜晓冬, 滕光辉, 刘慕霖, 等. 基于轻量级卷积神经网络的种鸡发声识别方法[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(10): 271-276.
- DU Xiaodong, TENG Guanghui, LIU Mulin, et al. Recognition method of breeding birds' vocalization based on lightweight convolutional neural network[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(10): 271-276. (in Chinese with English abstract)
- [53] 张伟荣, 陈学庚, 齐江涛, 等. 基于深度学习和高斯过程回归的玉米冠下视觉导航路径提取方法[J]. *农业机械学报*, 2024, 55(7): 15-26.
- ZHANG Weirong, CHEN Xuegeng, QI Jiangtao, et al. Deep learning and Gaussian process regression based path extraction for visual navigation under canopy[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2024, 55(7): 15-26. (in Chinese with English abstract)
- [54] ZHU J, XUE C Y, ZHANG Y D. Simulation of pepper (*Capsicum annuum* L.) growth stages under different nitrogen fertiliser levels based on three models[J]. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 2024, 99: 187-197.
- [55] 刘福昊, 郭申伯, 王笛, 等. 设施番茄外观形态及物质累积分配模型构建与验证[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(21): 188-196.
- LIU Fuhao, GUO Shenbo, WANG Di, et al. Construction and verification of an external morphology, substance accumulation,

- and distribution model of tomatoes in greenhouses[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(21): 188-196. (in Chinese with English abstract)
- [56] 苏李君, 刘云鹤, 王全九. 基于有效积温的中国水稻生长模型的构建[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(1): 162-174. SU Lijun, LIU Yunhe, WANG Quanjiu. Rice growth model in China based on growing degree days[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2020, 36(1): 162-174. (in Chinese with English abstract)
- [57] 裴杰, 谭绍锋, 郭韩, 等. 结合 GWRFR 和作物物候信息的玉米产量早期预测[J]. *农业工程学报*, 2024, 40(1): 153-161. PEI Jie, TAN Shaofeng, GUO Han, et al. Early prediction of maize yield by integrating GWRFR and crop phenological information[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2024, 40(1): 153-161. (in Chinese with English abstract)
- [58] ZHOU X H, LIU Q Z, KATZIN D, et al. Boosting the prediction accuracy of process-based greenhouse climate-tomato production model by particle filtering and deep learning[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2023, 211: 107980.
- [59] 王森, 王雪姣, 吉春容, 等. CottonXL 模型模拟研究延迟型低温冷害对棉花纤维品质的影响[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(20): 171-177. WANG Sen, WANG Xuejiao, JI Chunrong, et al. Impact of delayed-type chilling damage on cotton fiber quality based on CottonXL[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2019, 35(20): 171-177. (in Chinese with English abstract)
- [60] QIN Y D, GONG A, LIU X G, et al. Testing a simulation model for the response of tomato fruit quality formation to temperature and light in solar greenhouses[J]. *Plants*, 2024, 13(12): 1662.
- [61] 张芳旭, 王军, 韩宇平, 等. 基于遗传算法的二维土壤水与作物生长耦合模拟模型构建和参数优化[J]. *农业机械学报*, 2024, 55(12): 392-403. ZHANG Fangxu, WANG Jun, HAN Yuping, et al. Developing and parameter optimization of two-dimensional soil water transport and crop growth coupling model based on genetic algorithm[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2024, 55(12): 392-403. (in Chinese with English abstract)
- [62] 张宇亮, 吴志勇, 何海. 基于水文-作物耦合模型和 CWAPI 指数的农业干旱评估[J]. *水利学报*, 2022, 53(10): 1168-1179, 1193. ZHANG Yuliang, WU Zhiyong, HE Hai. Agricultural drought assessment based on coupled hydrology-crop growth model and CWAPI[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2022, 53(10): 1168-1179, 1193. (in Chinese with English abstract)
- [63] LIU Z H, ZHAO L, PENG Y P, et al. Improving estimation of soil moisture content using a modified soil thermal inertia model[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12: 1719.
- [64] WANG R J, WANG X L, LIU B D, et al. Estimation of genetic parameters of early growth traits in Dumeng sheep[J]. *Animals*, 2024, 14(16): 2298.
- [65] 冯小芳, 蒋秋斐, 封元, 等. 不同动物模型对安格斯牛周岁生长性状遗传参数估计的比较分析[J]. *中国农业大学学报*, 2022, 27(9): 72-82. FENG Xiaofang, JIANG Qiufei, FENG Yuan, et al. Comparison analysis of genetic parameter estimation of Angus cattle's one-year-old growth traits by different animal models[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2022, 27(9): 72-82. (in Chinese with English abstract)
- [66] 郭大方, 杜岳峰, 栗晓宇, 等. 云-雾-边-端协同的农业装备数字孪生系统研究[J]. *农业机械学报*, 2023, 54(10): 133-141. GUO Dafang, DU Yuefeng, LI Xiaoyu, et al. Digital twin system for agricultural machinery with Cloud-Fog-Edge-Terminal architecture[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(10): 133-141. (in Chinese with English abstract)
- [67] 刘智臣. 一种基于物联网数据采集的农业大数据生产决策系统探究[J]. *南方农机*, 2022, 53(6): 35-38. LIU Zhichen. Research on agricultural big data production decision system based on data collection of internet of things[J]. *South Forum*, 2022, 53(6): 35-38. (in Chinese with English abstract)
- [68] ZHANG D D, ZHAO R X, XIAN G J, et al. A new model construction based on the knowledge graph for mining elite polyphenotype genes in crops[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2024, 15: 1361716.
- [69] 郭威, 吴华瑞, 朱华吉. 农业生产大数据治理: 关键技术、应用分析与发展方向[J]. *智慧农业 (中英文)*, 2025, 7(3): 17-34. GUO Wei, WU Huarui, ZHU Huaji, et al. Agricultural big data governance: Key technologies, applications analysis and future directions[J]. *Smart Agriculture*, 2025, 7(3): 17-34. (in Chinese with English abstract)
- [70] 韩家琪, 毛克彪, 夏浪, 等. 基于空间数据仓库的农业大数据研究[J]. *中国农业科技导报*, 2016, 18(5): 17-24. HAN Jiaqi, MAO Kebiao, XIA Lang, et al. Research on agricultural big data based on spatial data warehouse[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2016, 18(5): 17-24. (in Chinese with English abstract)
- [71] 侯琛, 牛培宇. 农业知识图谱技术研究现状与展望[J]. *农业机械学报*, 2024, 55(6): 1-17. HOU Chen, NIU Peiyu. Review of research status and prospects of agricultural knowledge graphs[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2024, 55(6): 1-17. (in Chinese with English abstract)
- [72] SUN X, WU H, HAO P, et al. Research on information integration method of agricultural products producing and managing based on knowledge graph[C]// *Computer and Computing Technologies in Agriculture XI: 11th IFIP WG 5.14 International Conference, CCTA 2017, Jilin, China, 2019*.
- [73] 杨硕, 李书琴. 多模态知识图谱增强葡萄种植问答的答案选择模型[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(14): 207-214. YANG Shuo, LI Shuqin. Enhancing answer selection model of grape planting using multimodal knowledge graph[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2023, 39(14): 207-214. (in Chinese with English abstract)
- [74] JIN Y C, LIU J Z, WANG X H, et al. Technology recommendations for an innovative agricultural robot design based on technology knowledge graphs[J]. *Processes*, 2021, 9(11): 1905.
- [75] ZOU Y D, PAN S H, YANG F, et al. Precise recommendation method of suitable planting areas of maize varieties based on knowledge graph[J]. *Agriculture*, 2023, 13: 526.
- [76] 于合龙, 沈金梦, 毕春光, 等. 基于知识图谱的水稻病虫害智能诊断系统[J]. *华南农业大学学报*, 2021, 42(5): 105-116. YU Helong, SHEN Jimeng, BI Chunguang, et al. Intelligent diagnostic system for rice diseases and pests based on knowledge graph[J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2021, 42(5): 105-116. (in Chinese with English abstract)
- [77] WANG H, SHEN W, ZHANG Y, et al. Diagnosis of dairy cow diseases by knowledge-driven deep learning based on the text reports of illness state[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2023, 205: 107564.
- [78] 海南省人民政府官网. 揭秘全国首个全流程智慧育种平台 [EB/OL]. (2024-3-20) [2025-8-15]. <https://en.hainan.gov.cn/hainan/5309/202403/76f6c541ae8c4eb19c7ede129f7d133c.shtml>

- [79] 21 世纪经济报道. “请人种田不如请计算机种田”, 广东智慧“无人农场”也有黑科技[EB/OL]. (2024-09-23) [2025-4-15]. <https://www.163.com/dy/article/JCP43SU605199NPP.html>
- [80] 央视新闻. 你听说过“伏羲农场”吗?这种小农场里可藏着大智慧[EB/OL]. (2024-11-04) [2025-4-15]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1814753735676736951&wfi=spider&for=pc>
- [81] 农业农村部官网. 北京智能温室里机器人种番茄, 实现国内首创[EB/OL]. (2024-11-5) [2025-8-15]. http://www.moa.gov.cn/xw/qg/202411/t20241105_6465686.htm
- [82] 农业农村部官网. 典型案例: 蛋鸡智慧养殖模式[EB/OL]. (2025-5-12) [2025-8-15]. https://www.moa.gov.cn/ztzl/zhnyzxd/dfsj/202505/t20250512_6473872.htm
- [83] 福州市人民政府官网. 连江“百台万吨”入选国家数据局案例[EB/OL]. (2024-9-2) [2025-8-16]. https://www.fuzhou.gov.cn/zgfzzt/qyryz/gyfz/202409/t20240902_4884990.htm
- [84] 农业农村部官网. 典型案例: 水产品工厂化循环水智慧养殖模式[EB/OL]. (2025-5-12) [2025-8-16]. https://www.moa.gov.cn/ztzl/zhnyzxd/dfsj/202505/t20250512_6473877.htm
- [85] 中国农村网. 阿里“产地仓”亮相[EB/OL]. (2025-8-8) [2025-8-16]. http://journal.cnews.net/ncpscck/2020n/d14q/nynccxh/932781_20200728023543.html
- [86] 中国互联网络信息中心. 第 56 次中国互联网络发展状况统计报告[R/OL]. (2025-7-21) [2025-4-18]. <https://www.cnnic.net.cn/n4/2025/0721/c88-11328.html>

Current status, challenges and prospects of smart agriculture technology development in China

CAO Bingxue¹, ZHAO Chunjiang^{2*}, LI Jin^{1*}, FAN Beibei¹

(1. Information Technology Research Center, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China; 2. National Engineering Research Center for Information Technology in Agricultur, Beijing 100097)

Abstract: Smart agriculture is a promising potential direction in modern agriculture worldwide. However, China's agriculture is still limited by multiple constraints at present, such as resources, markets, and the environment. Therefore, smart agriculture can be expected to take as a breakthrough point, in order to promote the agricultural transformation and modernization. In this study, a systematic analysis was made on the current status of the research and application of the key technologies and equipment in smart agriculture. The main challenges were clarified to prospect the development trend and promotion path of China's smart agriculture in the future. Specifically, 1) Smart agriculture serves as the modern advanced form to take the information and knowledge as the core elements. Smart agriculture aimed to realize the digital management, intelligent decision-making, automatic operation, precise input, and networked services, after the deep integration of advanced productive forces, such as modern information, industrial equipment, and agricultural biotechnology. 2) China's smart agriculture relied mainly on three common supports: sensor and perception systems, decision-making models and algorithms, as well as intelligent platforms. Remarkable progress was made in the R&D of sensor technologies, and the agricultural satellite remote sensing, as well as the agricultural unmanned aerial vehicle remote sensing. Agricultural basic algorithms were continuously optimized to couple the animal and plant models, gradually shifting towards a multi-factor system. The R&D of large agricultural artificial intelligence models was to facilitate the intelligent platform architecture. Data storage and management technologies were developed to integrate the application using knowledge graphs, indicating the hot spot. 3) The application scenarios of smart agriculture in China were constantly expanding under advanced technology. a) The frontier technologies, such as artificial intelligence and gene editing, were promoted to transform the breeding paradigm towards intelligence. b) The technical system of smart farms was gradually improved to initially achieve 'machine replacing people'. c) Smart facility agriculture has advanced significantly to produce the core equipment in the construction of a high-end intelligent greenhouse. d) The livestock and poultry breeding have achieved significant advances in smart technology. The smart farms for dairy, pork, and poultry were at the top worldwide. e) Smart fishery was limited to the sensors, growth models, and special robots. A number of smart fish farms were constructed to accelerate industrialization. f) Smart agricultural product supply chains were still in the initial stage. The partial breakthroughs and application demonstrations were also observed in post-harvest processing, quality traceability, and smart storage and transportation. 4) There were still many challenges in smart agriculture, in terms of the key technology R&D, technology transfer, and industrialization, and basic support systems. a) The basic model algorithms were insufficient to substitute for the high-end sensors and robots. b) The scientific and technological achievements were necessary to translate into practical applications. The chain ecosystem of the digital industry was also required to evaluate the integration and sustainability of application scenarios. c) The decision-making on the data resource was also required to strengthen the professional talents and farmers' digital literacy. 5) Looking to the future, five strategic directions were recommended in China's smart agriculture: the low-cost and high-precision agricultural information perception, agricultural artificial intelligence, agricultural low-altitude economy, small-scale smart agriculture, and 'zero-carbon' smart agriculture. The institutional framework and 'digital foundation' of smart agriculture should be consolidated to promote smart agriculture in China. Universities and research institutions should promote the R&D of key technologies for smart agriculture and the cultivation of high-end talents. Technology-based enterprises should construct a market-oriented and sustainable smart agriculture industrial cluster. Agricultural business entities and farmers also need to promote the practical application of 'scenario + chain' in smart agriculture.

Keywords: smart agriculture; sensors; models; algorithms; platforms; smart farms