

引用本文格式 买合木江·巴吐尔, 毛吾兰, 刘佳, 等. 农业机械智能化技术发展现状[J]. 农业工程, 2025, 15(6): 1-7. DOI: 10.19998/j.cnki.2095-1795.202506301. BATUER Maihemujiang, MAO Wulan, LIU Jia, et al. Development status of agricultural machinery intelligence technology[J]. Agricultural Engineering, 2025, 15(6): 1-7.

农业机械智能化技术发展现状

买合木江·巴吐尔, 毛吾兰, 刘佳, 朱占江, 马文强, 杨莉玲

(新疆维吾尔自治区农业科学院农业装备研究所, 新疆 乌鲁木齐 830091)

摘要: 农业机械智能化技术是现代农业发展的重要推动力。随着信息技术的快速发展, 智能农业机械通过集成物联网、大数据、人工智能等先进技术, 实现农业作业的自动化、精准化和智能化, 显著提升农业生产效率, 降低资源消耗, 并改善农民的劳动环境。详细分析农业机械智能化技术所涵盖的智能感知、导航与定位、控制、数据处理与分析、决策支持、通信及能源等关键技术, 并通过国内外实际应用案例展示了智能化技术在农业中的广泛应用。尽管我国在智能农业机械领域取得了显著成就, 但在技术稳定性、经济成本、复合型人才短缺、农民接受度与教育培训等方面问题仍制约着其进一步推广。

关键词: 农业机械; 智能化技术; 人工智能; 农业机器人

中图分类号: S232.4 文献标识码: A 文章编号: 2095-1795(2025)06-0001-07

DOI: 10.19998/j.cnki.2095-1795.202506301

Development status of agricultural machinery intelligence technology

BATUER Maihemujiang, MAO Wulan, LIU Jia, ZHU Zhanjiang, MA Wenqiang, YANG Liling

(Institute of Agricultural Mechanization, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi Xinjiang 830091, China)

Abstract: Agricultural machinery intelligence technology is a significant driving force for development of modern agriculture. With rapid development of information technology, intelligent agricultural machinery integrates advanced technologies such as internet of things, big data, and artificial intelligence to achieve automation, precision, and intelligence in agricultural operations, which has significantly improved agricultural production efficiency, reduced resource consumption, and enhanced labor environment of farmers. Key technologies including intelligent perception, navigation and positioning, control, data processing and analysis, decision support, communication, and energy were analyzed in detail, and extensive application of intelligence technologies in agriculture was demonstrated through practical application cases in domestic and foreign countries. Despite remarkable achievements in field of intelligence agricultural machinery in China, issues such as technological stability, economic cost, shortage of composite talents, farmers' acceptance, and education training still limit its further promotion.

Keywords: agricultural machinery, intelligence technology, artificial intelligence, agriculture robots

0 引言

农业作为人类文明的根基, 自古以来一直是社会发展和经济增长的关键支柱。从最初依赖人力和畜力的手工耕作, 到现代机械化作业的广泛应用, 农业机械化一直是推动农业发展的核心力量^[1]。随着信息技术的快速发展, 尤其是计算机技术、电子控制技术和

人工智能等高新技术的深度融合, 智能农业机械应运而生, 成为现代农业转型的重要驱动力^[2]。精准作业、智慧管理和全过程数字化感知, 集成物联网、大数据、人工智能等先进技术, 显著提升农业生产效率, 降低资源消耗, 并改善农民的劳动环境^[3]。在粮食消费不断增长和土地资源日益紧张的背景下, 提高农业生产效率和资源利用率变得尤为关键^[4]。

收稿日期: 2024-11-04 修回日期: 2025-01-19

基金项目: 新疆农业科学院公益性基本科研业务费项目(KY2022019); 新疆少数民族科技人才特殊培养计划科研项目(2022D03034)

作者简介: 买合木江·巴吐尔, 高级工程师, 主要从事新疆特色林果生产加工技术与装备研究

E-mail: 331089983@qq.com

杨莉玲, 通信作者, 博士, 研究员, 主要从事新疆特色林果生产加工技术与装备研究

E-mail: 411450712@qq.com

在线投稿
www.d1ae.com

我国在智能农业机械领域已取得了显著成就，无人驾驶技术、智能监控系统、精准施肥与灌溉设备等在农业生产实践中得到广泛应用^[5]。然而，成本问题、技术可靠性、维护与支持等方面的挑战依然存在，制约智能农业机械的进一步发展。为了克服这些挑战，需要加大对智能农业机械研发的投入，完善相关政策与法规，提高农民对新技术的接受度和使用意愿。本研究深入剖析智能化技术在农业机械领域的应用现状，梳理关键技术环节，分析实际应用案例，并探讨所面临的挑战与未来发展趋势。通过对现有文献资料与实践案例的系统分析，为农业机械智能化技术的持续进步提供全面的视角，并为后续的研究与应用提供有益的参考与借鉴。

1 农业机械智能化技术概述

农业机械智能化技术是指将人工智能、物联网、大数据和云计算等现代信息技术应用于农业机械中，使其具备感知、决策和自动操作的能力。随着信息技术的发展，农业机械智能化技术也在不断进步，从最初的简单自动化设备逐步向高度智能化的方向转变。通过集成现代信息技术，实现农业作业的自动化、精准化和智能化。这些技术的应用不仅提高农业生产效率、降低生产成本，还减少资源浪费、改善农民的劳动环境，并推动农业的可持续发展^[6]。

2 关键技术

农业机械智能化关键技术涵盖智能感知、导航与定位、控制、数据处理与分析、决策支持、通信及能源等多个方面，如图 1 所示。智能感知技术通过传感器和机器视觉等手段实时获取农田和农业机械信息。导航与定位技术利用卫星导航和室内定位系统实现农业机械的精准作业路径规划与自动驾驶。控制技术借助智能控制算法和电液控制等精准调节农业机械作业参数。数据处理与分析技术运用大数据和云计算挖掘

农业数据价值，为决策提供依据。决策支持技术融合人工智能、机器学习和专家系统，为农业生产提供智能化建议。通信技术依靠物联网和 5G 技术实现农业机械的互联互通与远程控制。能源技术则发展新能源农业机械和节能技术，推动农业机械向绿色高效方向发展。

2.1 智能感知技术

智能感知技术主要通过传感器来实现对作业环境、作业对象和自身工作状态等参数的感知能力。智能感知技术中应用的传感器有数百种之多。如捕捉图像信息的 CMOS 图像传感器，检测环境明暗变化的环境光传感器，导航确定方向的地磁传感器，获取大气信息预测天气的可见和红外光电传感器，监测温度变化的温度传感器，非接触测温的红外传感器，测量实物尺寸和机械位移的位移传感器，监测压力变化的压力传感器，测量距离的超声波传感器，测量物体的运动速度、距离、方向的雷达传感器，测量液位变化的液位传感器，测量和控制绝对压力的真空度传感器，以及测量酸性溶液 pH 值的铂电极酸度传感器等，它们能够将物理世界中的信号转换为数字信息，进而实现智能化的感知、分析和决策^[7-8]。

2.2 导航与定位技术

全球导航卫星系统（GNSS）是农业机械导航的核心技术，包括北斗卫星导航系统（BDS）和全球定位系统（GPS）。通过多频三星接收机和多星座接收模块，结合 BDS 和 GPS 数据，可获得更多的卫星定位数据和更稳定的信噪比，从而提高定位精度。此外，为了实现农业机械自动驾驶过程中的精细作业采用差分 GNSS 技术，该技术通过将位置已知基准站测量的伪距修正值或相位信息发送到移动站来提高精度，可实现分米级甚至厘米级的定位数据。

其他导航与定位技术还有视觉识别导航技术，通过先进的摄像头和计算机算法相结合，模拟人眼功能进行导航。组合导航技术利用多传感器融合，除了 GNSS 和视觉识别，还结合惯性导航系统（INS）、激

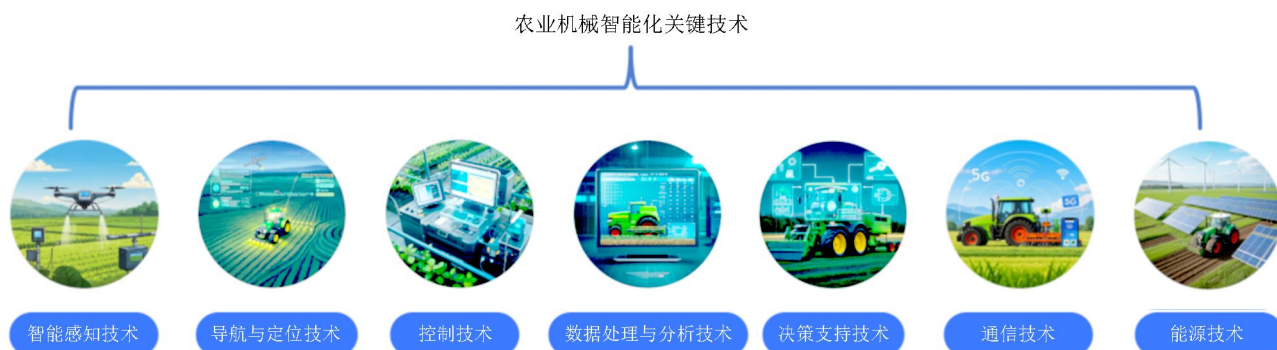


Fig. 1 Key technologies of agricultural machinery intelligence

光雷达、声呐及红外线等多传感器数据融合算法, 提高定位的准确性和可靠性。地磁导航利用地球磁力原理, 控制机械设备完成导航任务。激光导航通过对外发射光束, 并与机械设备产生相应的联系, 进而控制农业机械完成导航任务; 先将具有发射功能的装置埋入田地内, 并与机械设备进行相应的联系, 以此控制农业机械完成导航工作^[9-12]。

2.3 控制技术

控制技术通过模糊控制、神经网络控制、电液控制等技术实时监测农业环境和农业机械状态信息, 自动调整农业机械的作业参数及对农业机械液压系统作业部件的精确控制, 实现精准作业。如智能播种机可根据土壤湿度、种子特性等因素, 自动调整播种深度和间距, 提高播种质量; 收获机割台高度的自动调节, 可适应不同高度的作物, 提高收获效率和质量等^[13]。

2.4 数据处理与分析技术

农业机械在作业过程中会产生大量的数据, 包括传感器采集的作业和环境参数等数据。利用大数据技术对这些数据进行存储、管理和分析, 为农业生产决策提供支持。利用云计算技术将农业机械数据上传至云端, 利用云计算的强大计算能力进行数据处理和分析, 可实现对农业生产过程的实时监控和远程管理。同时, 云计算还支持多用户共享数据和资源, 提高农业生产的协同性和效率^[14]。

2.5 决策支持技术

决策支持技术是指通过人工智能与机器学习对大量农业数据的学习和分析, 建立作物生长模型、病虫害预测模型, 构建专家系统、集成农业知识和经验等, 为农业生产提供智能化的决策支持。像气象数据、作物生长数据等有效的数据将帮助预测种植、施肥、灌溉、病虫害的发生概率和时间等, 提前制定个性化防治措施^[15]。

2.6 通信技术

通信技术实现农业机械之间、农业机械与农场管理系统的互联互通。通过物联网技术, 农业机械可将自身的状态信息和作业数据实时传输到农场管理系统, 同时接收系统的指令和任务调度, 提高农业生产的协同性和智能化水平。5G技术的高速率、低延迟特性为农业机械的远程控制和实时数据传输提供有力支持。5G技术可实现对农业机械人的远程操控, 让操作人员在远离农田时也能精准控制机器人完成作业任务^[16]。

2.7 能源技术

电能、太阳能、氢能等新能源农业机械逐渐兴起, 这些新能源农业机械具有零排放、低噪声等优点, 可减少对环境的污染。通过传感器和控制器实时监测农业机械的能源消耗情况, 优化能源分配, 提高能源利

用效率, 根据不同的作业工况自动调整动力输出, 确保农业机械在最佳状态下运行^[17]。

3 智能化技术应用案例

3.1 国内应用案例

3.1.1 小麦种植全程无人作业

南京农业大学智慧农业研究院的智慧麦作技术涵盖从播种到收获的全过程。通过麦田信息立体化感知、麦作处方数字化设计、田间作业精确化控制及农艺措施智能化实施, 以北斗导航技术支持下的小麦无人播种与收获技术、无人机支持下的小麦精确施肥喷药技术和物联网支持下的小麦智慧灌溉技术为核心, 构建集信息智能感知、定量决策、智能控制、精确投入和特色服务等功能于一体的综合集成智能技术, 有效推动小麦生产管理从粗放到精确、从有人到无人的生产方式转变, 示范点小麦产量达到 8 250~9 000 kg/hm², 效益增加 1 500 元/hm² 左右^[18]。

北京市农业机械试验鉴定推广站集成新一代物联网、大数据、无人驾驶等现代农业信息技术, 应用智能拖拉机、植保无人机、智能水肥一体化设备和智能收获机等农业智能装备为核心的智能系统, 实现了小麦种植全程无人作业^[19]。无人机播种效率显著高于传统机械播种方式, 无人机播种 1 hm² 仅需 45~75 min, 是传统机械播种的 10 多倍。

综上所述, 小麦种植全程无人作业技术涵盖北斗导航技术支持下从播种、施肥、喷药到收获, 以及物联网支持下的小麦智慧灌溉技术的全过程, 技术处于国际领先水平, 具有广阔的应用前景。

3.1.2 水稻无人农场

水稻无人农场是智慧农业发展的一个重要方向, 其关键技术和实践应用已经在多个地区得到推广和实施。中联智慧农业股份有限公司建立水稻全程智慧种植模式, 覆盖从耕种到收获储存的各个环节, 实现对水稻生产过程的全面监控和管理, 提高农业生产效率和质量, 可减少农事用工 30%~40%, 节水 30%, 减少化肥和农药投入, 同时每年增加碳汇量约 30 t/hm²^[20]。水稻无人农场通过集成和应用先进的信息技术和自动化设备, 有效解决传统农业劳动力短缺问题, 同时提高农业生产效率和可持续性。

3.1.3 无人农场

智慧农业是现代农业的发展方向, 无人农场是实现智慧农业的重要途径。华南农业大学对大田无人农场的关键技术进行了深入研究, 包括无人农场作业环境、作业对象和作业机械装备信息的数字化感知技术, 土地整治、耕整、种植、播种、田间管理和收获方案的智能化决策技术, 农业机械自动导航和农业机械精

准作业的精准化作业技术,农作物生长、农业机械运维和农场经营管理的智慧化管理技术。2019年创建了全国首个无人农场,实现5大功能,包括耕种管收生产环节全覆盖、机库田间转移作业全自动、自动避障异况停车保安全、作物生产过程实时全监控和智能决策精准作业全无人。该项目取得了显著的经济、社会和生态效益,2021年广东省广州市增城区水稻无人农场种植的优质丝苗米19香产量达到 $9\,934.35\text{ kg/hm}^2$,比当地的平均产量高32%;2023年湖南省益阳市千山红镇再生稻无人农场两季产量达到 $17\,988\text{ kg/hm}^2$ 。截至2023年11月,在国内15个省启动了30个无人农场的建设,包括水稻、小麦、玉米和花生4种作物,实践结果证明了无人农场和智慧农业发展的巨大潜力^[21-22]。

无人农场作为一种新兴的农业生产模式,其发展需要综合考虑技术、经济、社会等多方面因素。随着技术进步和成本降低,无人农场有望在未来农业生产中发挥更大的作用。

3.1.4 新能源智能农业机械

新能源智能农业机械是指采用非传统农业机械用燃料或新型动力装置,结合先进技术的农业机械,包括混合动力电动农业机械、纯电动农业机械、燃料电池电动农业机械等。

江苏悦达智能农业装备有限公司成功研制黄海金马YI254ET型电动拖拉机,动力来源是磷酸铁锂电池,采用双电机的工作模式,以满足不同机具的作业速度需求。中国科学院智能农业机械装备工程实验室研发出鸿鹄T150型超级拖拉机,输出功率可达147 kW,并且支持快速充电和更换电池。国家重点研发计划项目“智能电动拖拉机开发”(2016YFD0701000)项目组研发了SF系列两款电动拖拉机,均可以持续作业6 h,显著提高了整机续航能力和实用性。山东超星智能科技有限公司推出具有无人作业和协同作业等智能化功能的锂电池无人驾驶拖拉机。北京中科原动力科技有限公司发布全球首个“Vt-open农业机械绿色化、智能化技术开源战略”,表明新能源智能农业机械的技术正在向开放和共享方向发展^[23-25]。

新能源在农业机械应用中存在的主要问题包括电池成本高、充电基础设施不完善、功率需求失配、农业机械类型多样及缺乏科学评定指标等。新能源智能农业机械具有结构紧凑、控制灵活、低碳高效等优点,是农业机械发展的重要方向。未来新能源将在发展战略中占据更重要的地位,推动农业机械核心技术的发展。

3.2 国外应用案例

3.2.1 智能灌溉系统

智能灌溉系统采用先进的传感器技术,能够实时监测土壤的湿度、温度及作物的生长状态等关键参数。

这些传感器分布在农田的不同位置,采集的数据传输到中央控制系统;同时,中央控制系统还会接收当地的降雨量、蒸发量、风速等气象数据。中央控制系统运用大数据分析和机器学习算法,对收集的海量数据进行深度挖掘和分析,对历史数据进行学习和模式识别,从而能预测作物在不同生长阶段的需水量,并自动调整灌溉计划和灌溉量。如干旱时系统会增加灌溉频率和需水量,在降雨充沛时减少或暂停灌溉,以避免水资源的浪费。此外,管理人员通过手机或电脑随时随地查看农田的所有信息,并能进行远程操作^[26-27]。

作为农业大省的乌克兰赫尔松州引入一种基于卫星监测的低成本智能灌溉系统,旨在提高水资源利用效率和作物产量。通过对照组和试验组分别对冬油菜、冬小麦、玉米和向日葵4种作物进行智能灌溉试验。结果显示,智能灌溉系统显著提高了水分利用效率,小麦产量平均提高4.09%、玉米产量平均提高8.32%、向日葵产量平均提高9.80%和油菜产量平均提高5.82%;该系统在玉米生产上效果最好,能够使农户的收入增加40~185美元/hm²^[28]。

3.2.2 精准播种与施肥

加拿大阿尔伯塔省和魁北克省的部分农场开展了土壤网格取样、田间制图、喷头自动控制等技术的实践应用,研究与试验表明,精准施氮肥、变量灌溉等变量作业技术在不降低作物产量的前提下,可有效节省水肥投入。圭尔夫大学对144名受访者进行精准农业技术使用情况的调查,结果显示,自动驾驶技术应用最为广泛,约87%的耕地面积采用该技术。此外,使用变量施肥、卫星影像处方图、变量喷洒等技术的耕地面积比例分别为28%、16%和10%。

精准播种与施肥技术借助GPS导航和自动化控制机械,能够均匀控制播种的间距和深度。在播种作业中,系统会根据土壤类型和肥力差异,自动调整播种密度,确保每一粒种子都能在最佳生长环境中生长。在施肥作业中,施肥机械会根据农田不同区域的土壤养分含量,包括氮、磷、钾等主要养分及微量元素等数据,结合作物的生长模型和需肥规律,精准地将肥料施用到作物根部附近。这种精准施肥方式不仅提高肥料利用率,减少肥料流失和浪费,还能有效降低因过量施肥导致的环境污染问题^[29-30]。

3.2.3 智能除草与采收机械

Ecorobotix机器人除草机是一款自主机器,能够有效除草,满足所有环境要求。其质量130 kg,可在阳光下连续工作12 h,使用轻量级GPS追踪器和多个传感器,通过复杂摄像头确定目标,微注射技术可减少90%的除草剂使用量,比传统耕作方法节省成本30%,每天可耕作高达3 hm²。

荷兰 AvL Motion 公司研发的 AVL S9000 型白芦笋选择性收获机器人，质量达 4 500 kg，最高速度 3.6 km/h，平均收获时间仅 1.3 s/株。机器人利用光学视觉技术精准检测出土笋芽，并配备基于回转链循环的多末端执行器，可同时对垄上多个白芦笋进行入土、切割、柔性夹持及出土集箱操作。

美国 Harvest CROO Robotics 草莓采摘机器人有效缓解了草莓采摘中劳动力短缺的困境，同时提升采摘效率与质量。每台 Harvest CROO 机器人配备 16 个独立运作的采摘单元，每个单元每秒能采摘 5 颗草莓，相当于 30 名工人的工作量。凭借先进的视觉系统和机器学习算法，机器人可精准识别成熟草莓，2019 年的数据显示其采摘成功率超过 50%，保障了草莓的采摘品质，减少浪费。此外，机器人还配有 Web 和移动应用，种植者可实时监控和控制采摘过程，随时查看采摘进度、系统状态及农场对比分析等信息，实现精准化管理。其模块化且可扩展的设计可根据农场需求进行定制和拓展。机器人适用于现有草莓田，无需种植者改变种植方式，降低技术应用难度，提高接受度。导航技术借鉴无人驾驶汽车经验，保障田间自主运行的可靠性。未来，草莓采摘机器人将成为草莓产业的关键工具，充分彰显了农业自动化技术的巨大潜力^[31]。

Rubion 草莓采摘机器人是由比利时 Belrobotics 公司推出的全自主草莓采摘机器人，能够自主导航，通过深度学习和机器视觉算法准确检测成熟草莓，均匀分布压力，防止损坏脆弱的草莓。其还能对草莓进行称质量、分类和预测未来收获，帮助农民优化操作。

Energid 柑橘收获机器人可减少传统手工采摘的风险，如工人受伤、梯子坠落或树木损坏。因其高生产率、成本效益和安全性，在柑橘行业越来越受欢迎。

飞行自主机器人园丁（FAR）是一套通过电缆连接到地面轮式模块的互联系统。模块作为无人机的能量源，沿着果树种植移动，无人机使用人工智能和机器视觉识别个别水果，评估其成熟度。系统不仅能收获树上水果，还能执行修剪等任务^[32]。

4 问题和挑战

尽管我国的农业机械智能化技术在提高农业生产效率、资源利用效率和环境保护方面取得显著进展，但在实际应用中仍面临诸多问题和挑战。主要集中在技术稳定性、经济成本、复合型人才、农民接受度与教育培训等方面。

首先，智能化农业机械设备的稳定性不足，直接影响农业生产中的体验感和应用效果。智能感知技术中的传感器在复杂多变的农田环境中容易受到干扰，导致数据采集不准确和不稳定，导航与定位技术

在信号遮挡或干扰的情况下，可能会出现定位偏差，影响农业机械的精准作业。控制技术在面对复杂的农田地形和作物生长条件时，可能无法实现预期的精准调节，导致作业质量下降。这些问题不仅影响智能农业机械的性能，还增加维护和调试的成本，降低用户的使用意愿。

其次，智能农业机械的投资成本较高，一台具备自动驾驶功能的智能拖拉机价格比传统拖拉机价格高数倍；智能农业机械维护和运营成本也较高，需要专业的技术人员进行定期维护和故障排除，增加农户的使用成本。即使有政府补贴，消费者自行承担的部分对于农户仍是一笔不小的负担，高昂的经济成本限制了智能农业机械的推广和应用。

再次，基层缺少既懂农业又懂数字技术的复合型人才。目前这类人才严重短缺，设备操作和维护存在一定困难，农户普遍缺乏相关的技术培训，对智能农业机械的操作和维护知识不足，导致设备的使用效率和寿命降低。

最后，用户缺乏智能农业机械相关的知识和技能，导致接受度和使用意愿较低，普遍对新技术持谨慎态度。因此，培养和引进复合型人才是推动智能农业机械发展的关键。

5 结束语

农业机械智能化技术作为现代农业发展的关键驱动力，正在深刻改变着农业生产的方式和效率。本研究对农业机械智能化技术的现状、关键技术、应用案例及面临的挑战进行全面综述，旨在为该领域的进一步发展提供参考和借鉴。

从现状来看，我国在智能农业机械领域已取得显著成就，无人驾驶技术、智能监控系统、精准施肥与灌溉设备等在农业生产实践中得到广泛应用，显著提升了农业生产效率和资源利用率。然而，技术稳定性、经济成本、复合型人才、农民接受度与教育培训等方面仍存在问题，制约智能农业机械的进一步推广和应用。

关键技术方面，智能感知、导航与定位、控制、数据处理与分析、决策支持、通信及能源技术等不断进步，为农业机械智能化提供坚实的技术支撑。这些技术的融合与创新，使农业机械具备更强的感知、决策和自动操作能力，推动农业机械自动化、精准化和智能化发展。

在应用案例中，国内的小麦种植全程无人作业、水稻无人农场、无人农场及新能源智能农业机械等实践，展示智能化技术在农业生产中的巨大潜力和实际效益。国外的智能灌溉系统、精准播种与施肥、收获自动化及农业机器人的应用等案例，为我国农业机械

智能化发展提供宝贵的经验和借鉴。

面对存在的问题和挑战,需要采取多方面的措施加以解决。一是加大对智能农业机械研发的投入,提高技术稳定性和可靠性;二是完善相关政策与法规,降低经济成本,提高农户对新技术的接受度和使用意愿;三是加强复合型人才培养和引进,提高基层对智能化农业机械的操作和维护能力;四是加强农户的教育培训,提高其对新技术的认知和应用水平。

综上所述,农业机械智能化技术的发展前景广阔,但也任重道远。随着技术的不断进步和问题的逐步解决,农业机械智能化技术将在未来的农业生产中发挥更重要的作用,为实现农业现代化和保障国家粮食安全作出更大的贡献。

参考文献

- [1] 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 Chunjiang. Current situations and prospects of smart agriculture [J]. Journal of South China Agricultural University, 2021, 42(6): 1-7.
- [2] 王亚茹. 农业机械与信息技术融合现状及发展方向[J]. 农业工程技术, 2024, 44(14): 22-23.
- [3] 杨立富. 农业机械设备的智能化技术发展现状与方向[J]. 农业工程技术, 2023, 43(17): 60-61.
- [4] 周晓时, 李俊鹏, 吴清华. 人工智能发展对农业生产率的影响: 基于跨国面板数据的实证分析[J]. 华中农业大学学报(社会科学版), 2021(5): 158-167, 199.
ZHOU Xiaoshi, LI Junpeng, WU Qinghua. The impact of artificial intelligence development on agricultural productivity: empirical evidence from cross-country panel data[J]. Journal of Huazhong Agricultural University (Social Science Edition), 2021(5): 158-167, 199.
- [5] 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): 11-16.
LUO Xiwen, LIAO Juan, HU Lian, 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): 11-16.
- [6] 赵春江. 智慧农业发展现状及战略目标研究[J]. 智慧农业, 2019, 1(1): 1-7.
ZHAO Chunjiang. State-of-the-art and recommended developmental strategic objectives of smart agriculture[J]. Smart Agriculture, 2019, 1(1): 1-7.
- [7] 华明圆, 宋健, 王晓平, 等. 农机装备物联网技术研究现状与展望[J]. 江苏农业科学, 2024, 52(1): 17-27.
- [8] 陈思衡, 赵超越, 郝宏堡, 等. 农业物联网技术应用及创新发展的途径探讨[J]. 现代化农业, 2024(11): 91-93.
- [9] 王红鹏. 农业机械自动导航技术[J]. 山东农机化, 2023(6): 45-47.
- [10] 冯玉兵. 农业机械自动导航技术研究进展[J]. 南方农机, 2023, 54(15): 173-175.
- [11] 李虎, 许宁, 宋裕民, 等. 农业机械自动导航技术研究综述[J]. 农业装备与车辆工程, 2023, 61(3): 49-52.
LI Hu, XU Ning, SONG Yumin, et al. A review on automatic navigation technology of agricultural machinery[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2023, 61(3): 49-52.
- [12] 李荣萍. 农业机械自动导航技术研究进展[J]. 南方农机, 2023, 54(4): 165-167.
- [13] 王瑞荣. 智慧农业视域下的农业机械智能技术[J]. 农业工程技术, 2024, 44(5): 45-46.
- [14] 刘振宇, 张绍龙. 物联网在农业气象服务中的数据采集与分析研究[J]. 中国宽带, 2024, 20(1): 106-108.
- [15] 刘成良, 贡亮, 苑进, 等. 农业机器人关键技术研究现状与发展趋势[J]. 农业机械学报, 2022, 53(7): 1-22, 55.
LIU Chengliang, GONG Liang, YUAN Jin, et al. Current status and development trends of agricultural robots[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(7): 1-22, 55.
- [16] 宋鹏. 基于人工智能算法的农业机械自动化控制方法研究[J]. 南方农机, 2024, 55(8): 63-65.
- [17] 陈香彤. 新能源汽车与智能农业机械的融合应用研究[J]. 河北农机, 2024(19): 46-48.
- [18] 李丽颖, 许天颖. 智慧麦作技术让田间管理精准高效[EB/OL]. (2023-06-08). <https://www.farmer.com.cn/2023/06/08/99930248.html>.
- [19] 小麦种植全程无人作业技术集成示范[J]. 农机科技推广, 2023(12): 7-9, 12.
- [20] 罗锡文, 胡炼, 何杰, 等. 中国大田无人农场关键技术研究与实践[J]. 农业工程学报, 2024, 40(1): 1-16.
LUO Xiwen, HU Lian, HE Jie, et al. Key technology research and practice of unmanned farm in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(1): 1-16.
- [21] 韩海波. 中联重科持续赋能智能农机制造[J]. 农机市场, 2024(1): 40.
- [22] 尹彦鑫, 孟志军, 赵春江, 等. 大田无人农场关键技术研究现状与展望[J]. 智慧农业(中英文), 2022, 4(4): 1-25.
YIN Yanxin, MENG Zhijun, ZHAO Chunjiang, et al. State-of-the-art and prospect of research on key technical for unmanned farms of field corp[J]. Smart Agriculture, 2022, 4(4): 1-25.
- [23] 刘孟楠, 雷生辉, 赵静慧, 等. 电动拖拉机发展历程与研究现状综述[J]. 农业机械学报, 2022, 53(S1): 348-364.
LIU Mengnan, LEI Shenghui, ZHAO Jinghui, et al. Review of development process and research status of electric tractors[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(S1): 348-364.
- [24] 徐立友, 张俊江, 闫祥海, 等. 农业装备电动化技术研究综述[J]. 农业机械学报, 2023, 54(9): 1-12.
XU Liyou, ZHANG Junjiang, YAN Xianghai, et al. Review of research for agricultural equipment electrification technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(9): 1-12.
- [25] 白学峰, 常江雪, 滕兆丽, 等. 我国智能农业拖拉机关键技术研究进展[J]. 智能化农业装备学报(中英文), 2022, 3(2): 10-21.
BAI Xuefeng, CHANG Jiangxue, TENG Zhaoli, et al. Research pro-

- gress on key technologies of intelligent agricultural tractors in China [J]. *Journal of Intelligent Agricultural Equipment*, 2022, 3(2): 10-21.
- [26] ANAGHA C S, PAWAR P M, TAMIZHARASAN P S. Cost-effective IoT-based intelligent irrigation system[J]. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 2023, 14(S1): 263-274.
- [27] WANG B. Design and implementation of agricultural water conservancy intelligent irrigation system based on Internet of Things[C]// *Proceedings of the 4th International Conference on Telecommunications, Optics and Computer Science (TOCS 2023)*. Washington: SPIE Press, 2024.
- [28] BAZALUK O, HAVRYSH V, NITSENKO V, et al. Low-cost smart farm irrigation systems in Kherson Province: feasibility study[J]. *Agronomy-basel*, 2022, 12(5): 1013.
- [29] KHAN N, BABAR M A. Innovations in precision agriculture and smart farming: emerging technologies driving agricultural transformation[J]. *Innovation and Emerging Technologies*, 2024, 11: 2430004.
- [30] 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*, 2021, 37(11): 315-324.
- [31] DROUKAS L, DOULGERI Z, TSAKIRIDIS N L, et al. A survey of robotic harvesting systems and enabling technologies[J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2023, 107(2): 21.
- [32] RUDOY D, OLSHEVSKAYA A, ODABASHYAN M, et al. Implementation of robotic technologies in agriculture[J]. *BIO Web of Conferences*, 2024, 113: 05023.