

我国农业生产的发展方向：从机械化到智慧化

罗锡文^{1,2*}, 廖娟^{1,2}, 臧英^{1,2}, 区颖刚^{1,2}, 汪沛^{1,2}

(1. 华南农业大学工程学院, 广州 510642; 2. 华南农业大学南方农业机械与装备关键技术教育部重点实验室, 广州 510642)

摘要: “谁来种地, 怎样种地”是中国和全世界农业生产面临的共同问题。改革开放以来, 我国农业生产的机械化水平已显著提高; 而农业生产智慧化是今后社会发展的必然趋势, 将以智能装备为基础, 以数据和知识为核心要素, 使现代科学技术与农业深度融合, 实现农业生产全过程的数字化感知、智能化决策、精准化作业和智慧化管理, 进一步大幅提高劳动生产率、土地产出率和资源利用率。本文以水稻生产为例介绍了我国农业生产的发展现状, 分析了我国农业生产向智慧化生产转变的必要性, 总结了我国农业生产向智慧化发展面临的机遇与挑战, 据此提出了我国农业生产的发展方向和发展路线。为促进我国农业生产方式从机械化向智慧化转变, 本文提出了加强农机装备研发和创新体系建设、加强农机推广体系建设、加强农机社会化服务体系建设、加快智慧农业示范区建设等对策建议。

关键词: 农业生产; 水稻生产; 农业机械化; 信息技术; 智能农机; 农业生产智慧化

中图分类号: S220 **文献标识码:** A

Developing from Mechanized to Smart Agricultural Production in China

Luo Xiwen^{1,2*}, Liao Juan^{1,2}, Zang Ying^{1,2}, Ou Yinggang^{1,2}, Wang Pei^{1,2}

(1. College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2. Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machinery and Equipment (South China Agricultural University), Ministry of Education, Guangzhou 510642, China)

Abstract: The mode transformation of agricultural production is a common concern for China and worldwide. Currently, the level of mechanization has been significantly promoted for the agriculture sector in China and smart production becomes an inevitable trend for modern agriculture. Smart agriculture regards data, knowledge, and intelligent equipment as the core elements and integrates modern science and technology with agriculture to realize digital perception, intelligent decision-making, precise operation, and smart management in the entire process of agricultural production, thereby greatly improving labor productivity, resource utilization rate, and land output rate. This article presents the current status of agricultural production in China using rice production as an example, and analyzes the necessity, opportunities, challenges, directions, and route for the intelligent transformation of China's agriculture. Furthermore, we propose policy suggestions to promote the intelligent development of China's agricultural production, including (1) strengthening the research and innovation system for agricultural machinery, (2) improving the agricultural machinery promotion system, (3) optimizing the socialized service system for agricultural machinery, and (4) accelerating the construction of smart agriculture demonstration zones.

Keywords: agricultural production; rice production; agricultural mechanization; information technology; intelligent agricultural machinery; smart agricultural production

收稿日期: 2021-11-23; **修回日期:** 2021-12-24

通讯作者: *罗锡文, 华南农业大学工程学院教授, 中国工程院院士, 研究方向为农业工程; E-mail: xwluo@scau.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“至 2050 年中国现代农业生产方式与生产体系发展战略研究”(2018-ZD-07)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

一、前言

农业是人类的衣食之源和生存之本，农业生产直接关系到人类的生存、发展和社会稳定。农业生产的发展大致可分为4个阶段：一是农业社会时期，以人力和畜力作业为主的传统农业生产时代，称为农业 1.0；二是工业社会时期，以机械化作业为主的机械化农业生产时代，称为农业 2.0；三是信息化社会时期，以自动化作业为主的自动化农业生产时代，称为农业 3.0；四是智慧社会时期，以无人化作业为特征的智慧化农业生产时代，称为农业 4.0。实现食物安全供给是我国农业生产和发展的首要任务。到 2050 年，我国对大米和小麦的需求仍将持续增长，肉、蛋、奶等农畜产品的需求也将大幅增长。具体来看，水产品 and 奶制品的需求量将是目前的 3 倍以上，水果、畜产品、饲料用粮、食用油和纤维的需求量将是目前的 1.5~1.6 倍，食糖、蔬菜的需求量将分别增长 100%、75% [1]。目前，由于食物需求的增长以及食物消费结构的改变，对农业生产提出了更高的要求，为保障我国粮食安全，需进一步发挥科技进步的支撑作用并加快推进农业生产方式的转变。

改革开放以来，我国农业生产机械化水平有了显著提升，为促进我国农业劳动生产率、土地产出率、资源利用率的提高和保障食物安全作出了重要贡献。当前，随着科技革命和产业变革的加速发展，传统的农业生产方式已经无法适应现代社会发展的需求，“谁来种地，怎样种地”是中国和全世界农业领域面临的共同问题。智慧农业生产以智能农机装备为基础，以数据和知识为核心要素，将现代先进技术与农业深度融合，可大幅提高劳动生产率、土地产出率和资源利用率，是实现农业生产过程中的数字化感知、精准化作业、智能化决策和智慧化管理的先进农业生产方式，也是社会发展的必然趋势。

本文以水稻生产为例（主要包括耕整、种植、田间管理、收获和干燥 5 个环节），介绍我国农业生产的发展现状，分析我国农业生产向智慧化生产转变的社会需求、面临的机遇与挑战，提出今后的发展方向与发展路线，并提出我国农业生产向智慧化方向转变的对策建议。

二、我国农业生产的发展现状

随着蒸汽机的发明，人类进入了工业社会，农业生产也进入了机械化时代。我国农业生产进入机械化时代的时间略晚，改革开放四十多年来，我国农业生产已逐步向机械化转变。为深入了解我国农业生产的现状，将以水稻生产为切入点进行分析。

（一）耕整

当前，铧式犁、旋耕机、深松机和激光平地机等耕整机械逐渐代替了人力和畜力耕整。激光平地技术已得到较广泛应用，可有效节水 30%~50%，土地利用率提高约 9%，在大幅提高土地精细平地作业效率的同时，使产量增加 20%~30%，取得了良好的经济效益 [2]。水田耕整的一般要求是“寸水不过田”，即水田田面高差不超过 3.3 cm，这对于人力和畜力作业来说很难实现，而我国相关科研单位研制的激光平地机已成功实现这一要求 [3~5]。另外，水准仪、全站仪、地面激光扫描仪和无人机载激光扫描仪的使用可以快速采集农田平整度信息，如基于全球导航卫星系统（GNSS）的农田三维地形实时采集系统可以在平整作业过程中，快速精准获取田面的平整度信息 [6]。

目前，我国耕整机械创新能力不强，80% 以上的关键核心技术来源于国外，重大装备关键核心技术对国外技术的依存度高达 90% 以上，产品配套比例偏低。另外，大中型耕整地机械少，小型耕整地机械多；复合耕整地机械少，单一功能耕整地机械多；高品质耕整地机械少，中低品质耕整地机械多。为此，需加强耕整机械自主创新，优化调整耕整机械配套比例，研发具备整体结构大型化、联合整地以及通过液压系统调整机具参数、可改变作业状态的装备与技术。

（二）种植

水稻种植机械化是水稻生产机械化的重要方面，目前常规稻的机械化栽插技术与装备已较为完善。机械直播是一种轻简高效的栽培方式，与人工移栽方式相比可节省人工约 95% 以上，与机械移栽相比可节省人工约 70% 以上 [7]，同时直播稻具有分蘖节位低、不伤根和没有返青期等优势，显著

提高了生产效率，提高了水稻产量，稻米品质较优。当前，普遍使用的“三同步”水稻精量直播技术在直播机作业时，先在田面开出蓄水沟，并同时在这两条蓄水沟的垄面上开出播种沟，排种器以穴播方式将稻种均匀地播在播种沟中，实现了行距可选、穴距可调和播量可控。该项技术已在全国 26 个省(市)和国外 6 个国家得到推广应用，取得了显著的社会效益和经济效益。当前我国水稻种植环节的智能机械化水平仍然较低，作物和区域发展不平衡、不充分问题仍然比较突出，需加强研究适用于南方丘陵地区和蔬菜等经济作物的智能化种植机械。

(三) 田间管理

田间管理主要是对水、肥、药的管理。目前，滴灌和微喷灌系统、同步播种施肥机、变量施肥机、地面和航空喷雾系统等田间管理机械和技术已在农业生产中普遍推广和应用，显著提高了水、肥、药的利用率，节约了资源，减少了环境污染。在精准灌溉方面，在土壤中埋置传感器以精确获取土壤中的含水量，根据作物不同生长期的需水规律，实现了精准灌溉和水、肥、药一体化灌溉 [8,9]。在精准施肥方面，采用自动配肥施肥机，可实现多种肥料的实时在线配比 [10]；变量施肥系统可满足实际生产需要，将浅层和深层排肥量的最大误差降低，相比传统施肥方式，可减少施肥量约 12% [11]。在精准施药方面，喷雾压力和喷雾流量可调等先进技术已广泛应用于地面施药机械和航空植保机械 [12]。

由于我国农作物种类繁多，种植方式各有不同，现有的灌溉系统、施肥与施药机械难以适应不同地区、不同作物施肥和施药的需求，需研究可以实现全面（作物和区域）智能灌溉、施肥和施药作业的机械与技术。

(四) 收获

水稻收获机代替了人工收获方式，部分收获机已开始安装产量、含水率、流量、损失率和含杂率传感器，提高了智能化水平。目前，我国已研制开发出实用化的大型智能化粮食收割机，并通过自动化、智能化控制等先进技术，打破了国外的技术垄断和市场垄断，可用于收获水稻、小麦、大豆等粮食作物，如多功能谷物智能联合收获机 [13]。基于 GNSS 开发的远程精准服务系统，可以实现收获机

故障远程实时诊断和维修指导。

目前，我国水稻收获机械的智能化程度还不高，作业效果不理想，针对马铃薯、茶叶、花生、蔬菜等作物的机械化收获水平还较低甚至是空白。需针对我国农作物种植模式，自主研发适用于不同作物和不同地区的收获机械，实现规模化和标准化生产，提高收获机械的智能化水平。

(五) 干燥

稻谷烘干是水稻生产全程机械化的最后一个关键环节，是保证稻谷贮藏品质的必要技术手段。目前，热风干燥、真空干燥、微波干燥、热泵干燥和远红外干燥，以及两种干燥技术结合的技术，如热风微波干燥、微波真空干燥、热泵远红外干燥等是我国主要的稻谷干燥技术。受技术、成本、场地等因素限制，热风干燥是目前国内应用最为广泛的稻谷干燥技术。稻谷干燥系统可将稻谷含水率从 28.4% 降至 13.6%，系统工作效率为 14.13 t/h，成本为 15.16 元 / t [14]；稻谷变温热风干燥系统将传统的恒温 47 °C 干燥改为以 5 °C 和 10 °C 为变温幅度的变温干燥工艺，干燥后稻谷颗粒的爆腰指数分别降低了 20% 和 10%，整精米率分别提高了 12.6% 和 7.7%，达到安全贮藏含水率（14.5%）所需的时间分别节约了 30 min 和 60 min [15]，显著提升了稻谷的品质。

随着我国农业现代化的大力推进，稻谷机械烘干技术应实现更加低碳、智能、高效，为确保粮食颗粒归仓发挥更大作用。

三、农业生产向智慧化方向转变的社会需求

(一) 提高劳动生产率的需要

1952 年，我国的总人口为 5.75 亿，其中农业劳动力人口为 1.73 亿，即 1 个农业劳动力的劳动产出可以满足 3.32 个人的实际粮食需要；2019 年，我国总人口数为 14 亿，农业劳动力人口为 1.94 亿，1 个农业劳动力的劳动产出可以满足 7.2 个人的实际粮食需要 [16]；到 2050 年，我国的总人口约为 13.65 亿，但农业劳动力人口占比将低于 10% [1]。2003—2019 年，我国农作物综合机械化率每提高 1 个百分点，城市化率会提高 0.53 个百分点，而农业劳动力在社会总劳动力中的占比则降低 0.64 个百

分点 [17], 这表明农业机械化可大幅度提高劳动生产率, 实现以更少的农业劳动力养活更多的人口。到 2050 年, 我国 1 个农业劳动力需要养活至少 10 个人, 为此, 需要进一步发展农业机械化, 实现智慧农业生产, 提高劳动生产率。

(二) 提高土地产出率的需要

1949 年, 我国水稻、小麦和玉米三大粮食作物的单产分别为 1892.29 kg/hm^2 、 642.10 kg/hm^2 和 961.66 kg/hm^2 ; 随着农业机械化技术和良种良法等先进农业科学技术的采用, 2020 年, 三大作物的单产分别提高至 7043.22 kg/hm^2 、 5742.09 kg/hm^2 和 6317.74 kg/hm^2 , 分别是 1949 年的 3.7 倍、8.9 倍和 6.6 倍。当前, 我国人均耕地面积仅为 $0.86 \text{ hm}^2/\text{人}$ [18], 且随着工业化和城镇化的发展, 我国农业用地将更为紧张, 因此, 通过智慧农业生产提高土地产出率是实现用有限的耕地养活众多的人口的根本途径之一。

(三) 提高资源利用率的需要

1991—2020 年, 通过采用精准灌溉技术, 我国灌溉水有效利用系数从 0.358 提高至 0.56; 通过采用精准施肥技术, 节约肥料约 15%~40% [19]; 通过采用精准施药技术, 节约农药约 40%~60% [20,21]。2020 年, 我国水稻、玉米和小麦三大粮食作物的化肥、农药和农田灌溉用水利用率分别为 40.2%、40.6%、55.9% [22], 而欧洲和美国等发达国家和地区在小麦、玉米等粮食作物生产过程中的化肥、农药、农田灌溉用水的利用率为 50%~65%。总体来看, 我国农业生产的资源有效利用率不高, 与发达国家还存在一定的差距。为此, 需深入大面积推广精准农业生产技术, 提高水、肥、药等农业资源的有效利用率。

(四) 农业绿色化发展的需要

农业是全球主要的温室气体排放源之一, 全球农业领域每年 CO_2 排放量占总温室气体排放量的 21%~25% [23]。据预测, 如不采取减排措施, 2050 年, 农业领域 CO_2 排放量将会再增加 30% [24], 严重影响全球碳减排目标的实现。1978 年以来, 我国农业碳排放量以 5% 的年均速度持续增长 [25], 我国农业温室气体排放量约占全国温室气体总量的

17% [26]。农业绿色化发展是实现我国碳达峰、碳中和目标的重要内容。关于农业绿色生产, 一是要求农机装备生产过程绿色化, 即在制造和生产农机装备的过程中不产生或少产生污染; 二是要求农机装备使用过程的绿色化, 即农业机械在使用过程中尽量减少燃料消耗和尾气排放, 降低对土壤的压实和破坏; 三是要求农机装备实现绿色化作业, 即采用农机装备进行精准施肥、精准施药和精准灌溉作业, 提高水、肥、药等资源的有效利用率, 减少生产成本并降低对环境的污染 [27]。

四、我国农业生产向智慧化发展面临的机遇与挑战

(一) 我国农业生产向智慧化发展面临的机遇

1. 乡村振兴战略的实施

乡村振兴是党的“十九大”提出的重大战略部署, 我国确立了推进农业农村优先发展, 促进农业农村现代化发展的重要方针, 并取得了历史性成就。乡村振兴战略实施以来, 我国农业农村现代化发展取得了突破性进展, 农业基础设施明显改善, 高产稳产的高标准农田建设成效显著, 脱贫攻坚取得决定性成就, 产业扶贫政策覆盖率达到 98%。我国农民人均收入增速连续 10 年高于城镇居民, 2020 年我国农民人均可支配收入达到 1.71 万元 [28]。乡村振兴战略的实施改善了农业基础设施建设, 提高了农民收入, 使农民有能力购买农业机械, 为农业生产朝智慧化生产转变提供了支撑。

2. 财政支农政策的完善

当前, 我国财政支农政策不断完善, 财政支农结构不断改善, 财政支农力度不断加大, 将有力助推农业智慧化生产, 为农业生产方式转变奠定坚实的经济基础。据统计, 我国财政支农总额由 1952 年的 2.69 亿元增长到 2020 年的 23 903.62 亿元 [29,30]。

3. 机械制造领域的不断发展

我国机械制造领域的不断发展为农机装备智能化提供了物质基础。我国实施制造强国战略以来成效显著, 主要表现在: 突破了一批关键核心技术和产品, 技术攻关能力和创新能力显著增强; 突破了一批重点领域核心环节瓶颈短板问题, 基础研发能力和创新能力稳步提升; 智能化制造加快推进, 涌现出一批智能制造新模式和新产业, 信息技术与制

造业深度融合，使制造业加速向网络化、数字化和智能化方向发展。我国机械制造技术的进步为我国农机装备制造向智能化方向发展提供了支撑。

4. 信息技术赋能

信息化与农业的深度融合是农业生产方式从机械化向智慧化方向发展的关键之一 [31]。农业机械信息化指将物联网、第五代移动通信技术、传感技术、云计算、人工智能等现代信息技术与农业生产方式相融合，使农业机械运行更安全、更可靠、更高效。相比传统农业机械，信息化农业机械在保证作业质量的同时，可提高作业效率约 50%~60% [32]。以信息技术为基础，在农机装备上配备智能化系统，为研制具有精准播种、施肥、施药、除草和收获功能的智能农机装备，发展智慧农业提供了有力支撑。

（二）我国农业生产向智慧化发展面临的挑战

1. 智慧农业生产基础设施落后

目前，我国大部分地区发展智慧农业生产的基础设施较为落后，部分农村地区网络基础设施建设滞后，农村宽带和光纤设施覆盖率远远不能满足智慧农业发展的需要。智慧农业生产装备成本较高，而我国农民的实际收入较低，难以购置开展智慧农业生产所需的机械设备，限制了智慧农业生产装备的推广应用。

2. 智慧农业信息化水平较低

信息技术是智慧农业生产方式发展的核心要素之一。目前，我国多数农业生产地区信息化水平较低，主要体现在以下方面：一是我国智慧农业信息数据标准化程度低、准确性不高、覆盖面不足；二是缺乏农业信息数据共享机制，归属于不同部门的信息数据无法共享；三是我国农业信息平台较少，针对农业生产建立的信息应用网站、数据分析平台规模较小、信息准确度较低，农业类信息平台数据分析的精准性和时效性不高。以上问题导致我国农业信息数据对我国智慧农业生产的支撑作用低，致使我国智慧农业生产难以推进。

3. 智慧农业人才匮乏

智慧农业生产集成了农业科学化生产技术、信息化技术以及智能农机装备技术等，需要大量既掌握农业知识又了解现代化信息技术的高素质技术人员、运维人员和系统管理人员进行智慧农业系统的

使用、维护和管理，以充分发挥智慧农业生产的效能。但目前，我国农业从业人员受教育程度普遍偏低，尤其是在偏远的农村地区，农民文化水平整体较低，对于农业机械化、互联网技术等新兴事物的接受能力与应用能力不强，不利于我国智慧农业的发展与推广应用。

五、我国农业生产的发展方向与发展路线

（一）我国农业生产的发展方向

我国农业生产将朝着智慧化方向发展，即在传统农业生产方式的基础上，将物联网、卫星定位、传感技术和智能控制等信息技术应用于传统的农机装备，从而实现农业生产过程的数字化感知、智能化决策、精准化作业和智慧化管理。

1. 数字化感知

农业传感技术和物联网技术是数字化感知的核心技术。发展重点是研发可靠性和稳定性高、成本低，适用于各种农业生产环境的高精度传感器；开发集多种参数感知于一体的多用途小型化传感器，如微机电系统（MEMS）、微电子机械、仿生及生物传感器等新型传感器。

广泛采用自主研发的农业无线传感器网络，提高农情数据信息的实时性和可靠性是数字化感知的发展方向之一。加快实现农机装备传感器的智能化和信息检测及数据分析，实现土壤-作物-机器-环境传感器协调下的智能决策与精准作业；利用 MEMS 技术，研制新一代农机装备传感器，在实现农机传感器小型化的同时提高检测精度和稳定性；加快发展新型仿生和生物传感器，以适用于不同的农机应用场景；加快推进基于机器视觉、实时全球定位系统（RTK-GNSS）、惯性技术融合的传感器在农业中的应用，提高大田无人化作业和畜牧水产智慧养殖的自动化水平，推动形成新型的种植模式和养殖模式。

2. 智能化决策

智慧农业基于农业生产的时空特性，可为农业生产过程提供智能化决策，在适宜的时间、适宜的地点以适宜的方式投入适宜的生产资料，通过合理利用农业生产资料，降低农业生产成本，获得最佳的经济、社会和环境效益。例如，根据水稻的生长情况和土壤中的水分及养分情况，依据水稻不同生

长阶段的水分和养分需求，为水稻生长提供智能化决策。随着遥感技术、地理信息系统、全球定位系统等技术的不断发展，农情信息快速采集技术不断成熟。今后智能化决策系统的发展方向应以相关技术的开发和应用为技术支撑，以数据为驱动，采用知识和数据相结合的决策模型，将精准农业决策与智能计算方法有效关联，基于数据库、因果关系和时间序列，对农业生产进行评判和预测，为农业生产提供智能化决策。

3. 精准化作业

以粮食作物、园艺作物和经济作物耕、种、管、收的高效智慧生产为重点，根据北方旱作、南方水田和丘陵山区等不同区域的高效生产需求，研制精准耕整、精准种植、精准施肥、精准施药、精准灌溉和精准收获等智能作业装备，形成面向智慧化农业生产的精准化作业方案。围绕新一代人工智能技术发展趋势以及智慧农业生产的需求，开展远程增强现实（AR）操控作业系统、中大型农业机器人自主作业系统以及微小型农业机器人集群与协同作业系统的研发；开展通信及安全控制、高精度靶向识别及路径规划、人机物交互系统（HCPS）、高速高精度驱动及末端作业机构研究。开展畜禽养殖环

境构建及调控、动物个体及群体识别与感知、智能饲喂系统研发；开发动物生长及养殖环境自动巡检机器人和粪污高效处理系统。

4. 智慧化管理

通过信息技术提高农业机械的智能管理水平，包括远程调度、机具监控、故障预警和远程维修指导等。①在远程调度方面，利用GNSS技术等，远程实时获取农业机械的作业位置和作业轨迹，并根据生产需求，按最短转移路径原则进行农机调度，提高农机效率。②在机具监控方面，利用各种传感器技术，在农机作业时实时采集关键部件作业参数，并发送至农机生产企业和农机管理部门。③在故障预警和远程维修指导方面，根据实时获取的机具状态和作业质量信息，为农机生产企业和农机管理部门判断机具作业状态提供支撑。例如，在机具发生故障时，可以远程指导驾驶员进行维修；对于一些驾驶员无法排除的故障，则通知距离故障农机最近的农机维修人员前去维修。

（二）我国农业生产发展路线

我国农业生产发展路线如图1所示。总体目标为：到2025年，我国主要农作物生产基本实现全

| 时间 | 2025年 | 2035年 | 2050年 |
|------|---|---|--|
| 总体目标 | 主要农作物生产基本实现全程生产机械化 | 农业生产实现全面机械化，并向智能化方向发展 | 农业生产实现智能化，并向智慧化方向发展 |
| 阶段目标 | 实现主要农作物产前、产中、产后全程机械化；显著提升农机装备质量水平和原始创新能力 | 实现作物、产业、区域全面机械化；研究信息传感与识别技术和农业生产精准调控方法，构建农业信息化与生物质资源化技术体系，构建满足现代农业发展需求的智能化生产体系 | 形成满足现代农业生产的农机装备技术体系和智能制造生产线、构建满足智慧农业生产需求的精准作业平台和管理系统，实现农业生产机械化、智能化和信息化深度整合 |
| 重点任务 | 补短板，提高薄弱环节的农业机械化水平： 1. 植物生产中的种植和收获 2. 动物养殖中的环境调控、智能饲喂和粪污处理 3. 丘陵山区的农业机械化 | 1. 农业生产全面机械化： (1) “作物”的全面化 (2) “产业”的全面化 (3) “区域”的全面化 2. 农机装备“强智能” (1) 智能农机装备传感器 (2) 农机导航 (3) 精准作业 (4) 农机运维管理智能化 | 1. “互联网+”农机 2. 智能农机 3. 农业机器人 4. 智慧农业 |

图1 我国农业生产发展路线图

程机械化；到2035年，我国农业生产实现全面机械化，并向智能化方向发展；到2050年，农业生产实现智能化，并向智慧化方向发展。

六、对策建议

（一）加强农机装备研发和创新体系建设

一是要加强各级农机装备创新平台建设。对已建立的各级农机装备创新平台要进一步明确定位，强化责任，提高产出。同时，根据现代农业建设需要，新增“动物-环境-设施”等一批重点实验室和工程中心。二是要加强“产学研”融合创新。国家和有关部门要进一步出台相关政策，支持农机装备企业加大科技创新力度，使农机装备企业逐步成为我国农机装备技术创新的主体。三是要创新科研项目立项和管理机制。要切实改变过去科研立项时小而散、立项后各干各的局面。

（二）加强农机推广体系建设

一是加强农机推广队伍建设。加强农机推广体系建设，因地制宜建设乡镇农机服务站，建立农机推广人员培训机制。二是切实解决好农机推广的经费问题。按照《中华人民共和国农业技术推广法》，各级人民政府应将农机推广经费纳入本级财政预算中，并按国家规定给予补贴，设立鼓励农机企业创新新技术和新机具的推广机制和推广经费。三是加强农机推广体系管理和创新。省级农机推广机构应根据国家农机发展规划和各省农机发展需求，制定发展规划和年度重点工作，明确目标，落实措施。

（三）加强农机社会化服务体系

一是加强政府的引导作用。各省、市、县农业主管部门应根据本地的资源禀赋，制定本地区农机社会化服务体系建设和相关政策。二是加强政策支持。对农机社会化服务组织购买农机给予更多的购机补贴和贷款；对农机社会化服务组织的机库、机棚等基础设施建设给予用地和贷款等支持；对农机社会化服务建设所需的启动经费、事后补助和保险等提供支持；对农机社会化服务人员的学历提升、人才培训和队伍建设等提供支持。三是指导

和推动农机社会化服务组织管理和创新。规划与建设区域性农业生产性服务平台，建立健全规章制度，加强农机社会化服务组织与各类新型经营主体的联合与合作，创新服务模式，加强农机社会化服务信息平台建设。

（四）加快智慧农业示范区建设

一是探索建立多元主体共建模式。加快智慧农业示范区创建，加快编制智慧农业示范区创建规划，确定国家级、省市级布局方案。二是加强智慧农业关键技术研发。重点攻克农业专用传感器，加强农业虚拟现实、人工智能和区块链等新技术研发；实施农机装备智能化改造升级工程；构建智慧农业大数据平台，强化个性化、智能化、精准化的生产管理。三是建立健全示范区管理运营机制。创新示范区管理体制和投资、建设、运营方式，通过政府购买服务、贷款贴息、政府和社会资本合作以及风险基金等方式，鼓励更多金融和社会资本投入示范区建设。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: November 23, 2021; **Revised date:** December 24, 2021
Corresponding author: Luo Xiwen is a professor from the College of Engineering, South China Agricultural University and a member of Chinese Academy of Engineering. His major research field is agricultural engineering. E-mail: xwluo@scau.edu.cn
Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Research on China’s Agricultural Development Strategy 2050” (2018-ZD-07)

参考文献

- [1] 中国科学院农业领域战略研究组. 中国至2050年农业科技发展路线图 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.
Strategy Study Group of Agriculture of Chinese Academy of Sciences. China’s agricultural science and technology development roadmap to 2050 [M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [2] 孙锡庚, 张建设. 激光平地技术 [J]. 中国农业信息快讯, 2001 (5): 40.
Sun X G, Zhang J S. Laser leveling technology [J]. China’s Agricultural Information News, 2001 (5): 40.
- [3] 刘刚, 司永胜, 林建涵, 等. 激光平地控制器的开发与农田试验分析 [C]. 广州: 2005年中国农业工程学会学术年会, 2005.
Liu G, Si Y S, Lin J H, et al. Development and experiment analysis of the controller for laser leveling system [C]. Guangzhou: 2005 Annual Conference of Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005.

- [4] 胡炼, 杜攀, 罗锡文, 等. 悬挂式多轮支撑旱地激光平地机设计与试验 [J]. 农业机械学报, 2019, 50(8): 15–21.
Hu L, Du P, Luo X W, et al. Design and experiment on multi-wheel support laser land leveler hanging on tractor [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(8): 15–21.
- [5] 孟志军, 付卫强, 武广伟, 等. 激光接收器自动升降式平地机的研制与试验分析 [J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2015, 36(4): 418–424.
Meng Z J, Fu W Q, Wu G W, et al. Development and evaluation of laser land leveling machine with automatic lifting laser receiver [J]. Journal of Jiangsu University(Natural Science Edition), 2015, 36(4): 418–424.
- [6] 胡炼, 唐灵茂, 罗锡文, 等. 一种农田三维地形实时测量装置和方法: CN110174682B [P/OL]. (2021-03-26)[2021-12-18]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=SCPD&dbname=SCPD2021&filename=CN110174682B&uniplatform=NZKPT&v=Af-dpDcjFep5muV2LfrjLC4NHHZKn80KbZ9KS15KWOD8dbA9BfBICdgxj6oEieXp>.
Hu L, Tang L M, Luo X W, et al. A real-time measuring device and method for farmland three-dimensional terrain: CN110174682B [P/OL]. (2021-03-26)[2021-12-18]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=SCPD&dbname=SCPD2021&filename=CN110174682B&uniplatform=NZKPT&v=Af-dpDcjFep5muV2LfrjLC4NHHZKn80KbZ9KS15KWOD8dbA9BfBICdgxj6oEieXp>.
- [7] 罗锡文. 水稻机械化精量穴直播技术要点 [J]. 温州农业科技, 2019 (1): 26.
Luo X W. Key points of precision hole direct seeding technique for rice mechanization [J]. Wenzhou Agricultural Science and Technology, 2019 (1): 26.
- [8] 王炜. 精准自动化灌溉系统设计及应用探讨 [J]. 陕西水利, 2020 (4): 77–79.
Wang W. Design and application of precise automatic irrigation system [J]. Shaanxi Water Resources, 2020 (4): 77–79.
- [9] 徐刚, 陈立平, 张瑞瑞, 等. 基于精准灌溉的农业物联网应用研究 [J]. 计算机研究与发展, 2010, 47(S2): 333–337.
Xu G, Chen L P, Zhang R R, et al. Application research of agricultural Internet of things based on precision irrigation [J]. Journal of Computer Research and Development, 2010, 47(S2): 333–337.
- [10] 伟利国, 张小超, 苑严伟, 等. 2F-6-BP1型变量配肥施肥机的研制与试验 [J]. 农业工程学报, 2012, 28(7): 14–18.
Wei L G, Zhang X C, Yuan Y W, et al. Design and experiment of 2F-6-BP1 variable rate assorted fertilizer applicator [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(7): 14–18.
- [11] 安晓飞, 付卫强, 王培, 等. 小麦种行肥行精准拟合变量施肥控制系统研究 [J]. 农业机械学报, 2019, 50(S1): 96–101.
An X F, Fu W Q, Wang P, et al. Development of variable rate fertilization control system based on matching fertilizer line and seed line of wheat [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(S1): 96–101.
- [12] 乔白羽, 何雄奎, 王志翀, 等. 基于LiDAR扫描的高地隙宽幅喷雾机变量施药系统研制 [J]. 农业工程学报, 2020, 36(14): 89–95.
Qiao B Y, He X K, Wang Z C, et al. Development of variable-rate spraying system for high clearance wide boom sprayer based on LiDAR scanning [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(14): 89–95.
- [13] 苏天生, 韩增德, 崔俊伟, 等. 谷物联合收割机清选装置研究现状及发展趋势 [J]. 农机化研究, 2016 (2): 6–11.
Su T S, Han Z D, Cui J W, et al. Research status and development trend of cleaning unit of cereal combine harvesters [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016 (2): 6–11.
- [14] 罗乔军. 稻谷热泵干燥系统设计与能效评价研究 [D]. 广州: 华南农业大学(博士学位论文), 2017.
Luo Q J. Design of rice drying system with heat pump and energy efficiency evaluation [D]. Guangzhou: South China Agricultural University(Doctorial dissertation), 2017.
- [15] 郑先哲, 刘辉, 沈柳杨, 等. 基于玻璃化转变的稻谷变温热风干燥工艺研究 [J]. 农业机械学报, 2020, 51(1): 331–340.
Zheng X Z, Liu H, Shen L Y, et al. Hot-air drying technology of changing temperature for paddy rice based on glass transition theory [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(1): 331–340.
- [16] 国家统计局. 全国人口统计[EB/OL]. (2021-10-20)[2021-12-18]. <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01>.
National Bureau of Statistics. National population statistics [EB/OL]. (2021-10-20)[2021-12-18]. <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01>.
- [17] 罗锡文. 农业机械化学生产学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2019.
Luo X W. Agricultural mechanization production [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2019.
- [18] 戈大专, 龙花楼, 杨忍. 中国耕地利用转型格局及驱动因素研究——基于人均耕地面积视角 [J]. 资源科学, 2018, 40(2): 273–283.
Ge D Z, Long H L, Yang R. The pattern and mechanism of farmland transition in China from the perspective of per capita farmland area [J]. Resources Science, 2018, 40(2): 273–283.
- [19] 自由路. 高效施肥技术研究的现状与展望 [J]. 中国农业科学, 2018, 51(11): 2116–2125.
Bai Y L. The situation and prospect of research on efficient fertilization [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(11): 2116–2125.
- [20] 罗锡文, 廖娟, 臧英, 等. 提高农业机械化水平促进农业可持续发展 [J]. 农业工程学报, 2016, 32(1): 1–11.
Luo X W, Liao J, Zang Y, et al. Improving agricultural mechanization level to promote agricultural sustainable development [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(1): 1–11.
- [21] 何雄奎. 植保精准施药技术装备 [J]. 农业工程技术, 2017, 37(30): 22–26.
He X K. Plant protection precision pesticide application technology equipment [J]. Agricultural Engineering Technology, 2017, 37(30): 22–26.
- [22] 中国农业科学院, 中国农业绿色发展研究会. 中国农业绿色发展报告2020 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2021.
Chinese Academy of Agricultural Sciences, China Agricultural Green Development Research Society. China agriculture green development report 2020 [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2021.
- [23] 林而达. 气候变化与农业可持续发展 [M]. 北京: 北京出版社, 2001.
Lin E D. Climate change and sustainable agricultural development [M]. Beijing: Beijing Publishing House, 2001.
- [24] 李波, 张俊飏, 李海鹏. 中国农业碳排放时空特征及影响因素分

- 解 [J]. 中国人口·资源与环境, 2011, 21(8): 80–86.
- Li B, Zhang J B, Li H P. Research on spatial-temporal characteristics and affecting factors decomposition of agricultural carbon emission in China [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2011, 21(8): 80–86.
- [25] Tubiello F N, Salvatore M, Córdor Golec R D, et al. Agriculture, forestry and other land use emissions by sources and removals by sinks: 1990—2011 analysis [EB/OL]. (2014-03-18)[2021-12-18]. <https://www.fao.org/3/i3671e/i3671e.pdf>.
- [26] 冉光和, 王建洪, 王定祥. 我国现代农业生产的碳排放变动趋势研究 [J]. *农业经济问题*, 2011, 32(2): 32–38.
- Ran G H, Wang J H, Wang D X. Study on the changing tendency and counter-measures of carbon emission produced by agricultural production in China [J]. *Issues in Agricultural Economy*, 2011, 32(2): 32–38.
- [27] Burns R T, Spajić R, Kralik D, et al. Overview of United States and European Union manure management and application regulations [C]. Chongqing: Animal Environment and Welfare: Proceedings of International, 2015.
- [28] 央视网. “十三五”农业农村发展取得历史性成就 [EB/OL]. (2020-10-28)[2021-10-17]. <https://news.cctv.com/2020/10/28/ARTIcnv5FrBtGDEYqNAIh0mR201028.shtml?spm=C94212.P4YnMod9m2uD.ENPMkWvfnaiv37>.
- CCTV Net. Historic achievements were made in agriculture and rural development during the 13th Five-Year Plan Period [EB/OL]. (2020-10-28)[2021-10-17]. <https://news.cctv.com/2020/10/28/ARTIcnv5FrBtGDEYqNAIh0mR201028.shtml?spm=C94212.P4YnMod9m2uD.ENPMkWvfnaiv37>.
- [29] 刘宏杰. 中国财政支农支出对第一产业增加值的影响研究: 1952—2006 [J]. *华南农业大学学报(社会科学版)*, 2008, 7(3): 41–48.
- Liu H J. An analysis on the economic effect of government expenditure for supporting agriculture on the value added of the primary industry: 1952—2006 [J]. *Journal of South China Agricultural University(Social Science Edition)*, 2008, 7(3): 41–48.
- [30] 国家统计局. 国家财政主要支出项目 [EB/OL]. (2021-10-20)[2021-12-20]. <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01>.
- National Bureau of Statistics. Major expenditure items of state finance [EB/OL]. (2021-10-20)[2021-12-20]. <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01>.
- [31] 赵春江. 把信息化融进农机发展的各个环节 [J]. *中国农村科技*, 2019 (6): 6.
- Zhao C J. Integrate informatization into each link of agricultural machinery development [J]. *China Rural Science & Technology*, 2019 (6): 6.
- [32] 杨航, 黄振叠, 陈康. 浅谈农机信息化的现状与展望 [J]. *现代农机*, 2020 (2): 7–8.
- Yang H, Huang Z D, Kang C. The present situation and prospect of agricultural machinery informatization [J]. *Agricultural Mechanization and Modernization*, 2020 (2): 7–8.