

· 专论与综述 ·

丘陵山地水稻机械化技术研究现状与展望

赵春江，马晨，李瑾^{*}，王小萌

(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: 作为丘陵山地种植历史最久、种植面积最广、产量最高的农作物, 水稻耕种收综合机械化水平的提升对于推进整个丘陵山地农业机械化全程全面高质量发展意义重大。该文以丘陵山地水稻机械化关键技术为“切口”, 在梳理国内丘陵山地的特征与丘陵山地水稻机械化发展现状的基础上, 围绕水稻耕、种、收等主要环节的生产机械化开展技术前沿与态势分析, 剖析国内外水稻机械化技术装备研发差距, 提出不同环节下国内丘陵山地水稻机械化发展面临的挑战, 并展望未来丘陵山地水稻机械化发展态势, 以期为推动水稻全程全域生产机械化水平提升、补齐丘陵山地农机化发展短板、建设现代农业强国提供新思路、新方向。研究表明: 1) 2022 年国内丘陵山地水稻耕种收综合机械化率为 80.8%, 并且在不同的环节间、地区间发展不平衡不充分; 2) 与先进国家相比, 国内的水稻耕种收机械研发与应用起步较晚、基础不牢、产品的综合性能不高, 特别是针对丘陵山地的轻量、高效、高稳定性的水稻耕种收机械相对匮乏, 发动机高功率低排放设计制造技术、刀具抗损降耗优化设计技术、车架轻量化设计技术等关键技术仍有待进一步攻克; 3) 轻量化、智能化、绿色化等是未来国内丘陵山地水稻生产作业装备发展方向与趋势。

关键词: 丘陵山地; 水稻机械化; 关键技术; 主要挑战; 未来趋势

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202411006

中图分类号: S-1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2025)-01-0001-11

赵春江, 马晨, 李瑾, 等. 丘陵山地水稻机械化技术研究现状与展望[J]. 农业工程学报, 2025, 41(1): 1-11. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202411006 <http://www.tcsae.org>

ZHAO Chunjiang, MA Chen, LI Jin, et al. Research status and prospects of mechanization technology for rice in hilly and mountainous areas[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2025, 41(1): 1-11. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202411006 <http://www.tcsae.org>

0 引言

受耕地条件、耕作制度、社会经济发展等多重因素影响, 与中国东北、新疆等平原地区农业生产的高度机械化、智能化、无人化程度相比, 国内丘陵山地农业机械化程度较低, 部分地势复杂的地区依然存在有机难用、无好机用现象, 部分农业生产环节的农机装备仅仅实现了对畜力的替代, 人力劳动作业强度依然较大、作业条件依然艰苦, 严重影响了农业农村现代化整体进程。近年来, 政府也高度重视丘陵山地农机化发展, 2004 年 6 月国家出台《中华人民共和国农业机械化促进法》, 首次明确提出要“加强丘陵山区农机化发展”; 农业农村部、工业和信息化部、国家发展改革委、财政部等相关部委也相继颁布《丘陵山区农田宜机化改造工作指引》《“十四五”全国农业机械化发展规划》《关于在若干省份开展“一大一小”农机装备研发制造推广应用先导

区建设的通知》等系列政策, 重点探索丘陵山地适用小型机械研发制造、熟化定型、推广应用三位一体的新机制、新模式, 着力解决丘陵山地农业机械化滞后问题。同时还相继建设了丘陵山地农业装备技术重点实验室、东南丘陵山地农业装备重点实验室、丘陵山区耕作机械重点实验室、农业环境工程与智能化装备重点实验室等国家重点实验室, 培育了雷沃、沃得、中联重工等国产农机品牌, 支持丘陵山地农业机械化发展。但总体而言, 国内自主研发制造的农机装备以大型、高速农机装备为主, 主要面向大规模、集约化生产的平原地区, 不适宜田块细碎、泥泞、陡坡的丘陵山地, 如何破解国内丘陵山地农业机械化问题是当前政府关心的焦点、热点问题。

水稻是国内丘陵山地种植历史最久、种植面积最广、产量最高的农作物, 选择丘陵山地水稻机械化技术与装备开展研究具有较高的普适性、典型性、可推广性。水稻的耕种收机械化技术在平原地区已经得到了广泛应用, 并积累了丰富的经验, 能够为丘陵山地水稻机械化技术与装备的研究提供较好的对比参照与借鉴。鉴于农作物耕种收综合机械化率是衡量农业机械化发展水平的主要指标^[1], 本文围绕丘陵山地水稻耕、播、收三个主要环节开展深入研究, 以丘陵山地水稻机械化关键技术为“切口”, 在梳理丘陵山地的特征与丘陵山地水稻机械化发展现状的基础上, 围绕水稻耕整、种植、收获等主要生产环节的机械化开展技术前沿与态势分析, 剖析国内外水稻机械化技术装备研发差距, 分析不同生产环节的丘陵山地水稻机械化发展面临的挑战, 并展望未来丘陵山

收稿日期: 2024-11-01 修订日期: 2024-12-20

基金项目: 中国工程院战略研究与咨询项目 (2023-JB-06-07); 国家社科基金重大项目 (22-ZD084); 2024 年“天府粮仓”数字农业川渝联合创新重点实验室-火花计划开放课题 (TFSZHH7002); 中国工程科技发展战略重庆研究院咨询项目 (2024-CQ-XZ-11); 北京市社会科学基金青年项目 (23SRC013); 国家社科基金青年项目 (20CJL019)

作者简介: 赵春江, 博士, 研究员, 中国工程院院士, 研究方向为农业人工智能与知识服务。Email: zhaocj@nercita.org.cn

*通信作者: 李瑾, 博士, 研究员, 研究方向为农业农村信息化。

Email: lij@nercita.org.cn

地水稻机械化发展态势，以期为推动水稻全程全域生产机械化水平提升、补齐丘陵山地农机化发展短板、建设现代农业强国提供新思路、新方向。

1 国内丘陵山地水稻机械化发展现状分析

1.1 国内丘陵山地的战略地位与耕地特征

国内丘陵山地面积占国土面积的比例超过 60%^[2]，具体省份包括广东（60.96%）、湖北（61.03%）、湖南（61.25%）、江西（68.25%）、浙江（69.09%）、广西（72.93%）、福建（78.58%）、四川（90.55%）、重庆（90.93%）、云南（92.20%）、贵州（95.66%）^[3]。丘陵山地是国内重要的粮食、油料、蔗糖、烟叶、蔬菜瓜果、麻类作物等生产基地，以全国耕地 33.55% 的面积，生产了占全国总产量 40% 的水稻、30% 的玉米、80% 的马铃薯、60% 的蔬菜和 90% 的茶叶，在国家多元化食物供给保障体系中有着举足轻重的地位，对保障国家粮食安全意义重大。但是，与平原地区相比，丘陵山地耕地土壤以红壤为主，质地黏重、酸性强、易板结、养分差，对农机的防水性、防腐性、抗阻性、防下陷、灵敏性等性能要求较高，同时，丘陵山地地块坡度大、石砾多、细碎凌乱、坡多台多埂多、形状不规则，农田大多数是鸡窝地、巴掌田、大长田，机械化耕作条件较差，导致农机上山难、下田难，客观上制约了当地农业机械化的发展。

1.2 国内丘陵山地水稻机械化发展现状

依据统计年鉴数据计算，2022 年国内丘陵山地水稻耕种收综合机械化率达 80.8%，水稻耕种收综合机械化率居丘陵山地其他农产品之首（表 1）。但是，与全国水稻耕种收综合机械化率（86.6%）相比还存在一定差距，并且不同环节间、不同地域间水稻生产机械化水平悬殊。从环节来看，2022 年丘陵山地水稻耕、收机械化率分别为 97.8%、92.7%，而机播率不足 50%，种植环节机械化水平较低。从地域来看，浙江、湖北等地的水稻耕种收综合机械化率较高，分别达 90.1%、88.0%，而云南、贵州等西南地区水稻耕种收综合机械化较低，仅为 44.7%、62.7%，丘陵山地水稻机械化发展严重不平衡、不充分^[4]。

表 1 2022 年丘陵山地水稻耕种收综合机械化率

Table 1 Comprehensive mechanization rate of rice cultivation and harvesting in hilly and mountainous areas in 2022

区域 Region	机耕率 Machine-plowed rate/%	机播率 Machine-sown rate/%	机收率 Mechanical harvesting rate/%	综合机械化率 Comprehensive mechanization rate/%
浙江	100.0	66.9	100.0	90.1
福建	99.0	43.7	92.4	80.4
江西	99.1	49.0	98.0	83.7
湖北	99.0	63.0	98.2	88.0
湖南	98.6	45.8	92.4	80.9
广东	99.0	36.3	96.1	79.3
广西	98.8	49.4	97.7	83.6
重庆	97.7	30.5	84.4	73.5
四川	98.8	55.2	92.7	83.9
贵州	96.9	1.6	78.1	62.7
云南	71.3	9.7	44.2	44.7
丘陵山地	97.8	46.1	92.7	80.8
全国	98.7	61.6	95.5	86.6

2 丘陵山地水稻耕整机械化技术研发现状

鉴于丘陵山地地块小、石砾多、坡度陡、养份差等自然条件，现阶段国内外丘陵山地水稻耕整地环节的机械化主要通过微耕机、旋耕机等中小型农机装备完成^[5-6]。

2.1 国外丘陵山地水稻耕整机械化技术研发现状

旋耕机、微耕机在国外的研发与应用可以追溯到 20 世纪 40 年代^[7]，1947 年日本久保田开发生产了世界上第一台耕田机，此后，伴随着全球农业机械化的不断进步，国外丘陵山地水稻耕整地技术装备逐渐形成了较强的技术积累和创新能力，微耕机、旋耕机系列农机技术装备也逐步熟化，不断推出系列创新性微耕机、旋耕机装备和技术，以满足市场变化趋势和用户升级需求。

目前国外微耕机的研发制造主要朝着更加轻便耐用、更加节能环保两个方向发展，如 POMEROY^[8] 发明了微耕机的可拆卸模块，将整机分解为多个独立的功能模块，每个模块都可以独立拆卸和更换，便于用户根据实际需求进行选择和组合，有助于灵活满足不同作业环节、不同作物类型对农机的个性化需求；日本 RYOBI 公司生产的 ACV-1 500 型号微耕机，以电力为驱动，搭载了最新开发的高性能马达，最大耕深可达 280 mm，最大工作幅宽可达 360 mm，不仅能够满足丘陵山地耕整地的动力需求，还能够实现无尾气排放和低噪音污染，有助于减少农业生产过程中的碳排放。

对于旋耕机而言，国外学者主要围绕旋耕机的自动导航性能、提升旋转刀片硬度、提高作业强度等方面进行开发研究。如 YUN 等^[9] 学者，开发了基于立体视觉的脊线跟踪方法，能够帮助自走式旋耕机在凹凸不平的耕地和强紫外线照射的作业环境下自主稳定行走；DILAY 等^[10] 基于 Diamond Jet 高速氧燃料（DJ-HVOF）技术，在硼合金 30MnB5 钢基材的旋耕机刀片上涂覆 WC10Co4Cr 陶瓷粉末，有效提高了刀片硬度，磨损量为原来的 1/6，不仅延长了旋耕机的使用寿命，还降低了摩擦力，有效提高了旋耕机在丘陵山地的作业效率；针对刀片的旋转角度，SAIMBH 等^[11] 使用计算机图形学方法对旋耕机叶片进行改进和开发，以提高旋耕机在湿地的作业能力和工作效率；FARZAD 等^[12] 针对丘陵山地粗糙、颠簸的复杂作业环境，基于红外传感器开发了一种实时测量系统，该系统能够精准识别土壤表面粗糙程度，并及时监测和调整旋耕机的土壤保护罩角度以满足实时作业强度，通过该系统可实现土壤保护罩 0°~80° 的自由调整，并将系统响应时间降为 0.26 s，有效保障了旋耕机的作业强度和平衡运行能力。此外，HIRASAWA 等^[13] 建立了可估算耕地土壤堆高的旋耕模型，旨在从旋耕机宽度、刀片性状与排列等维度评价旋耕机的整体性能。

2.2 国内丘陵山地水稻耕整机械化技术研发现状

国内的微耕机、旋耕机研发始于 20 世纪 90 年代，姚若松^[14] 受“屎壳郎推屎爬”的启发，发明了国内首台微型前置式、双向犁、单履带、多功能耕作机，开启了国内丘陵山地耕作机的自主研发道路。截至目前，国内已经拥有包括鑫源、威马、中联重科、星光、沃得等众多具备自主研发能力的农机企业，开发并熟化了柴油、

汽油、电动等多种动力方式系列微耕机、履带式旋耕机产品(表2)。其中,微耕机以其体积小、质量轻、操作简便、通过型好、爬坡能力强的特点,被广泛应用于重庆、云南、四川、贵州等西南高原单双季稻作区;

旋耕机以其结构紧凑、自重轻、防塌陷、转弯半径小等优点,被广泛应用于湖南、江西、湖北等华中单双季稻作区^[15-16],联合推动了国内丘陵山地水稻生产耕整地环节机械化发展。

表2 丘陵山地典型微耕机与履带式旋耕机产品及主要参数

Table 2 Typical micro tiller and tracked rotary tiller products and main parameters in hilly and mountainous areas

类型 Type	厂家 Manufacturer	核心产品型号 Core product model	产品参数 Product parameters	主要销往地区 Mainly sold to regions	市场占有率 Market share rate/%
微耕机	重庆鑫源	1WGQZ4.2-100B-1	工作幅宽 1 000 mm; 作业生产率 $\geq 0.04 \text{ hm}^2/(\text{h}\cdot\text{m})$; 扶把调整幅度(垂直方向) 180°	重庆、湖南、四川、广东、广西、湖北、浙江等	5.89
	重庆宗申	1WGQZ4.5-100	工作幅宽 1 000 mm; 作业生产率 $\geq 0.04 \text{ hm}^2/(\text{h}\cdot\text{m})$; 扶把调整幅度(垂直方向) 180°	重庆、湖南、广西、四川、云南等	4.61
	重庆耀虎	1WG4.0-100FQ-ZC	耕宽 100 mm, 耕深 1 000 mm, 作业生产率 $\geq 0.04 \text{ hm}^2/(\text{h}\cdot\text{m})$; 扶把调整幅度(水平/垂直方向) 180°	重庆、四川、湖南、广西、广东等	3.43
	重庆威马	1WG4.0-100FQ-ZC	可折叠扶手, 方便直立存放; 耕宽 400 mm; 耕深 80 mm	重庆、浙江、湖南、四川、广西、湖北等	3.35
	重庆旺耕	1WGCZ4.1-115(G4)	工作幅宽 1 150 mm; 作业生产率 $\geq 0.04 \text{ hm}^2/(\text{h}\cdot\text{m})$; 扶把调整幅度(垂直方向) 90°	重庆、四川、湖南、湖北、广西、江西等	2.70
履带式 旋耕机	中联重机	1GLZ-230M	工作幅宽 2 300 mm; 耕深旱田 80~100 mm, 水田 100~160 mm; 轨距 1 200 mm; 接地面积 1.28 m ²	江西、湖南、浙江、广西等	43.03
	江苏沃得	1GZL-220D 1GZL-220F	作业宽幅 220 cm; 耕深 12 cm; 轨距 1 200 mm; 离地间隙 370 mm	江西、湖南、湖北、福建等	34.71
	湖州丰源	1GZL230B(G4) 1GZL230C(G4)	作业宽幅 230 cm; 轨距 1 209 mm	湖南、江西、浙江等	6.82
	泰州常发	1GZL-220A(G4)	作业宽幅 230 cm; 轨距 1 250 mm; 离地间隙 320 mm	湖南、江西、湖北等	4.03
	星光农机	1GZL-230C 1GZL-230A(G4)	作业宽幅 220 cm; 耕深 ≥ 10 cm; 轨距 1 150 mm	江西、湖南等	3.05

2.2.1 国内丘陵山地微耕机技术研发现状

在丘陵山地,微耕机的推广与使用有效解决了“馒头山、鸡窝地、巴掌田”中大型农业机械难以通达、不能使用的问题,对推进丘陵山地水稻机械化发展起到了举足轻重的作用。但是,传统微耕机也普遍存在噪音大、作业效率低、作业质量不稳定、作业操作者劳动强度高、存在安全隐患等问题。为攻克以上难题,国内学者围绕微耕机手柄减震、隔振技术、内燃式微耕机替代技术、微耕机旋耕刀扭矩与功耗降低技术、微耕机辅助深度控制技术、微耕机模块化、智能化控制技术等核心关键技术开展了系列研究(如表3所示)。针对微耕机噪音大、劳动强度高等问题,YIN等^[17]和LIU等^[18]通过研发可降低振动强度的手柄、在发动机与车架之间安装隔振器等装置的方法,降低微耕机的振动强度;GAO等^[19]和

威马农机股份有限公司^[20]等通过研发基于电网供电类型和基于蓄电池供电类型的微耕机,改变传统内燃式微耕机噪音大、笨重的属性,为微耕机操作人员创造更加静音、便捷的作业条件。针对微耕机作业效率低、作业质量差等问题,LI等^[21]聚焦微耕机的核心部件旋耕刀,基于光滑粒子伽辽金(smoothed particle galerkin, SPG)方法对耕作过程中微耕机与土壤相互作用机制的模拟,研究了不同耕作条件下微耕机旋耕刀扭矩与功耗,优化设计了微耕机旋耕刀扭矩与功耗降低技术;KANG等^[22]研发设计了由检测器、控制器、执行器和显示界面组成的微耕机辅助深度控制系统,用于实时显示耕深和控制微耕机阻力杆的往复运动,有效提升了微耕机耕深的一致性,有效提升了微耕机作业质量。

表3 国内丘陵山地水稻微耕机技术研究进展

Table 3 Research progress of rice micro tiller technology in hilly and mountainous areas of China

技术 Technology	机构 Institution	年份 Year	特征 Features
微耕机手柄减震、隔振技术	中国农业大学 ^[17]	2019	基于对微耕机耕作状态下手柄振动数据的时域和频域分析,构建三维数字模型,设计出可以降低振动强度的手柄,改善操作人员的工作强度
	河南农业大学 ^[18]	2022	基于对微耕机振动源的识别,通过替换发动机与车架橡胶螺栓、在发动机与车架之间安装隔振器等综合方法,优化隔离了发动机振动对微耕机的影响。
内燃式微耕机替代技术	南京农业大学 ^[19]	2012	基于三相交流异步电机,研发了基于电网供电类的电动微耕机,该微耕机质量为 110 kg, 功率为 4 kW, 可实现耕深 16 cm, 耕幅 90 cm, 耕作效率 1 500 m ² /h。
	重庆威马农机股份有限公司 ^[20]	2023	重庆威马农机股份有限公司于 2023 年上市了蓄电池供电类微耕机 WMFT516, 该微耕机整机质量 25.8 kg, 续航时间 30 min, 可实现耕深 ≥ 80 mm, 耕宽 400 mm
微耕机旋耕刀扭矩与功耗降低技术	四川大学 ^[21]	2022	基于光滑粒子伽辽金(SPG)方法对耕作过程中微耕机与土壤相互作用机制的模拟,研究了不同耕作条件下微耕机旋耕刀扭矩与功耗,并通过遗传算法对其进行双目标优化
微耕机辅助深度控制技术	西南大学 ^[22]	2014	研发设计了由检测器、控制器、执行器和显示界面组成的微耕机辅助深度控制系统,用于实时显示耕深和控制微耕机阻力杆的往复运动,有效提升了微耕机耕深的一致性(将变异系数由 11.59% 降低到 5.82%),提升了微耕机作业质量,并降低了操作人员的劳动强度(将劳动强度指数由 20 降低到 18)
微耕机模块化、智能化控制技术	上海理工大学 ^[23]	2024	研发设计了以 Arduino 为控制系统的模块化智能农业作业车,具有精密的机械结构和智能的控制系统,通过作业车设计,将喷洒、松土、播种、收割等多个作业单元联系成一体,达到一机多用的效果,并具备适应性强、操作简便、维护费用低等特性

为了减少微耕机对操作人员的伤害,除了减轻微耕机的自身质量、降低微耕机的振动强度之外,王宇涵等^[23]还探索了微耕机的智能化控制技术,研发设计了以Arduino为控制系统的模块化智能作业车,并验证了其稳定性和自动化程度。

2.2.2 国内丘陵山地旋耕机技术研发现状

旋耕机种类繁多,按照不同的工作原理和结构设计有不同的分类方式,其中,履带式旋耕机具有强大的地面接触力和驱动力,具有能爬坡、防塌陷、通过性好等性能,既适应水田泥泞、湿滑的作业环境,也适应丘陵山地的复杂地形,在国内丘陵山地水稻田耕整环节得到了广泛推广与应用。国内的履带式旋耕机的研发始于21世纪初,湖南中天龙舟农机有限公司经过8年的研发,自主创新制造了“龙舟履带自走式旋耕机”^[24],开创了国内履带式旋耕机自主研发先河。传统的旋耕机存在功能单一、农药和尘土对操作人员危害大、作业质量不高、研发周期长、资金投入大等研发瓶颈,为克服这些难题,包括中国农业大学等在内的高校与农机研发科研围绕基于虚拟样机技术的旋耕机研发设计技术、模块化多功能通用底盘技术、远程操纵技术、旋转刀片减扭降耗技术、

旋耕机减黏增脱技术等核心关键技术开展了系列研究(如表4所示)。针对旋耕机设计制造的研发周期长、资金投入大等研发瓶颈,WU等^[25]提出了基于虚拟样机技术的旋耕机研发设计技术,通过该技术可缩短旋耕机的研发周期、及时发现并改进问题,有效节省了研发成本。针对履带式旋耕机功能单一的问题,周汉林等^[26]、陈斌等^[27]研发了履带式旋耕机的多功能底盘技术和多模块换装技术,优化了传统履带式旋耕机的单一功能,实现了一机多用,有效减少了农机的闲置浪费。针对旋耕机在工作过程中扬起的农药和尘土对操作人员影响问题,张俊杰等^[28]研发了1GZDY-120履带自走式遥控旋耕机,可远程控制旋耕机行走快慢、转向、旋耕机升降、旋转刀轴停转等动作,有效降低了操作人员劳动强度。针对旋耕机作业质量不高的问题,肖茂华等^[29]聚焦旋耕机的核心关键部件之一——旋耕刀,研发设计了旋耕机自激振动旋转刀片,实现旋耕作业减扭降耗,提高了旋耕机的工作质量;LIU等^[30]研发了一种基于土壤表面粗糙程度动态特性的旋耕机智能振动脱茬系统,通过该系统旋耕机可根据实时土壤表面粗糙程度做出相应脱离响应,有效提高了旋耕机的脱茬性能。

表4 国内丘陵山地水稻旋耕机技术研究进展

Table 4 Research progress on rotary tiller technology for rice cultivation in hilly and mountainous areas of China

技术 Technology	机构 Institution	年份 Year	内容 Contents
基于虚拟样机技术的旋耕机研发设计技术	江西省农业科学院 ^[25]	2022	基于深度学习网络的履带自走式旋耕机驱动系统的构建并开展系统仿真试验,提出基于深度学习相关算法、自编码网络、卷积神经网络的履带自走式旋耕机的结构设计方法,通过对虚拟样机的动态仿真开展主要零部件的受力分析和关键零部件的有限元分析,旨在缩短设计周期,节省设计成本,提升设计的合理性
模块化、多功能通用底盘技术	广东省现代农业装备研究所 ^[26]	2021	研发了一款丘陵山地履带式多功能底盘,该底盘由底盘机架、液压驱动系统、橡胶履带、支重轮、导向轮等零部件组成,能够实现车架的纵向和横向自动调平,以及旋耕、除草、喷药、运输等多个农机的集成,综合提高了履带式旋耕机的爬坡性、自适应性、一机多用性能
	湖南农业大学 ^[27]	2021	基于多模块互换技术,在单一履带动力平台的基础上,优化了传统履带式旋耕机的单一功能,形成了履带式动力底盘模块+旋耕机模块、收割机模块、车型模块的形式,实现了旋耕、收割、运输等多种功能的集成,实现大宗农业机械装备在基于动力平台上的条件下一机多用,有助于减少农业机械的闲置浪费、提高农用资源的利用率
远程操纵技术	河北省农业机械化研究所 ^[28]	2022	研发1GZDY-120履带自走式遥控旋耕机,其集机械技术、电子集成控制技术和液压控制技术于一体,通过发射器发送指令,接收器接收指令传输至液压元件或电子元件,控制机具行走快慢、转向、旋耕机升降、旋转刀轴停转等动作。该远程控制履带式旋耕机已经通过测试试验,测得最小转弯半径小、平均接地压力大,抓地能力强,旋耕深度适宜且稳定性好
旋转刀片减扭降耗技术	南京农业大学 ^[29]	2022	基于DEM-MBD技术,建立土壤-旋耕刀相互作用仿真模型,分析5种刀轴转速下国标旋耕刀与自激振动旋耕刀所受三向阻力与扭矩变化规律,研发设计了旋耕机自激振动旋转刀片,旨在实现旋耕作业减扭降耗
旋耕机减黏增脱技术	华中农业大学 ^[30]	2023	基于水田旋耕机减黏增脱的实际需求,研发了一种基于土壤表面粗糙程度动态特性的旋耕机智能振动脱茬系统,通过该系统旋耕机可根据实时土壤表面粗糙程度做出相应脱离响应,有效提高了旋耕机的作业质量和脱茬性能

3 丘陵山地水稻种植机械化技术研发现状

3.1 国外丘陵山地水稻种植机械化技术研发现状

国外水稻插秧机的研究始于19世纪末,日本于1898年申请了世界第一个水稻插秧机专利^[31-32],意大利于1915年就开始研究拔秧苗的水稻插秧机^[33]。一个多世纪的发展,日本、韩国、印度、意大利等学者围绕结构设计、电动/液压控制技术、自动化导航技术、智能控制技术、数据采集与分析技术等水稻插秧机核心关键技术开展了系统研究,YOSHISADA等^[34]围绕自行走水稻插秧机的快速转弯控制策略和田头翻转算法设计开展了深入研究,提出了水稻插秧机的岬角转弯路径生成算法,有效提高了水稻插秧机的通过性,提高了其自主工作效率;SIDDIQUE^[35]等针对插秧机液压系统存在的可

持续性差等问题,基于商业仿真软件AMESim开发了水稻插秧机液压仿真系统,旨在升级水稻插秧机的控制装置、延长机器使用寿命;YOSHISADA等^[36]研发了以GPS和IMU引导的、能够自动转向的水稻插秧机。

目前国外先进国家中,意大利主要采取直播的方式进行水稻种植,日本和韩国主要以插秧的播种方式为主,其中,以日本的水稻插秧机更为先进、应用更为广泛、更值得借鉴。经过了几代技术革新,近年来日本的水稻插秧机装备技术逐步向更加节省育苗成本、更加功能集成、更加减少劳动力以及更加轻量化、无人化等技术方向发展。如日本三菱公司开发了纸膜水稻插秧机,有助于阻挡阳光抑制杂草的生长,保温土壤,控制水分蒸发,保障秧苗的快速生长,纸膜采用可降解材料制成,50 d左右就可以自动降解成氮肥还田,目前这种纸膜插

秧机已经在日本石川县得到了广泛应用,实现了水稻种植的生态化、可持续化发展。又如日本洋马农机研发的AP4手扶式插秧机,外观小巧仅151 kg,主要动力源为一台小型汽油发动机,可实现一个人一天之内插秧20 000 m²,适用于丘陵山地的小型地块,有效提高了水稻种植效率。

3.2 国内丘陵山地水稻种植机械化技术研发现状

国内水稻插秧机的研制始于20世纪50年代,1956年华东农业科学研究所研制出畜力4行梳齿分秧滚动式插秧机“华东号插秧机”,是世界上第一台成型的水稻插秧机,开创了国内水稻插秧机生产的先河^[37]。近年来,伴随着研发制造技术的不断发展,国内水稻种植环节机械的自主研发能力不断增强,不但实现了水稻插秧机的自主研发,还创新研发了具有自主知识产权的水稻直播机,逐步形成了以江苏、浙江为主的水稻种植机械产业集群,培育出久富、星莱和、沃得、常发、福马、中联农机、富来威等适宜于丘陵“湿田烂地”的水稻种植机械品牌和产品,推动国产机国内销售市场份额不断提升,带动丘陵山地水稻种植机械化发展。如华南农业大学罗锡文院士团队自主研发的水稻直播机^[38],能够同步完成开沟、起垄、穴播,节省了传统水稻种植的育秧、插秧环节,推动实现智能导航、自动控制、精准定量播种,是传统人工插秧速度的100多倍,产量可达1.05 kg/m²。江苏常发农业装备股份有限公司自主研发生产的2ZS-4HT型号水稻插秧机,采用660 mm大直径车轮实现了在湿烂田地较好的通过性,平衡板采用高性能金属材料确保整机平衡,保障插秧机能够在丘陵山地凹凸不平的

田块中实现插秧深度一致。伴随着国内水稻插秧机自主研发能力的不断提升,国产品牌的市场占有率也逐步提升,以高速插秧机为例,2021年国内高速插秧机国产品牌占比增长至55%,日系品牌占比下降至45%^[39]。

依据不同的工作原理和应用场景,水稻种植机械可以被分为水稻插秧机与水稻直播机两大类。

3.2.1 国内丘陵山地水稻插秧技术研发现状

水稻插秧机是将培育好的秧苗定植在水田中的种植机械。该机械由秧箱、分插秧系统、送秧系统、机架、行走装置、承载浮体以及动力驱动装置等核心零部件构成,具有技术成熟以及秧苗行距株距整齐、抗倒伏能力强等优势。针对国内丘陵山地对水稻插秧机适应复杂地形、高效稳定作业、多功能化与自动化、轻便灵活与耐用性等方面的需求,浙江大学、华南农业大学、浙江理工大学等相关科研院所以及农业农村部东南丘陵山地农业装备重点实验室等国家重点实验室的科研人员,围绕水稻插秧机的车架轻量化设计技术、宽窄行插枝技术、多功能集成技术、自动控制技术等核心关键技术开展了深入研究(表5),如WU等^[44]利用深度学习网络和机器视觉开展骑乘式插秧机视觉/惯性组合导航研究,旨在实现水稻插秧机的自动导航;张娜娜等^[45]以有限元分析结果为依据,建立了车架优化设计模型,提出车架轻量化设计方案,以适宜丘陵山地湿软田块机械化需求;孙良等^[46]提出一种具有局部平面轨迹特性的空间轨迹不等速行星轮系机构,并开展基于取秧口和机构回转中心位置约束下的宽窄行分插机构综合研究,旨在实现插秧机系统取秧过程侧向零偏移量、侧向零偏转角的平面轨迹。

表5 国内丘陵山地水稻插秧机技术研究进展

Table 5 Research progress on rice transplanter technology in hilly and mountainous areas of China

技术 Technology	机构 Institution	年份 Year	特征 Features
变量施肥等插秧机集成技术	华南农业大学等 ^[40]	2023	集成水稻插秧与施肥功能,设计了自动控制的固体颗粒肥料变量施肥装置,以单片机STM32为控制核心,构建施肥量在线检测及智能调控系统,实现变量施肥作业
智能插秧机设计技术	沈阳航空航天大学等 ^[41]	2024	基于智能化需求分析、技术要求与设计原则、物联网技术、硬件设计与优化、软件开发与优化等,提出智能插秧机创新策略
	安徽农业大学工学院 ^[42]	2019	提高了秧苗行中心线提取算法的实时性和精度,采用基于分区域特征点聚类的秧苗行中心线提取方法,为确定插秧机的相对位置提供依据,推动实现水稻插秧机自动导航
自动导航相关技术	华南农业大学等 ^[43]	2019	以井关PZ-60型水稻插秧机为平台开展电动方向盘插秧机转向控制系统设计技术研究,采用电动方向盘作为转向执行机构,提出电动方向盘转向系统具有较好的动态响应和控制稳定性,适用于插秧机作业的自动转向控制,满足插秧机自动导航作业要求
	浙江大学 ^[44]	2024	对骑乘式插秧机进行视觉/惯性组合导航,利用深度学习网络和机器视觉提取稻田引导路线
车架轻量化设计	浙江理工大学等 ^[45]	2012	以有限元分析结果为依据建立车架优化设计模型,结构改进后车架质量降幅达16.77%
再生稻分插机构设计技术	浙江理工大学等 ^[46]	2024	提出空间轨迹不等速行星轮系机构,开展基于取秧口和机构回转中心位置约束的宽窄行分插机构综合研究,实现取秧过程侧向零偏移、偏转角

3.2.2 国内丘陵山地水稻直播技术研发现状

水稻直播机是直接向水田播种水稻种子的机械,由种箱、播种器、输种管、开沟等装置构成,具有简化插秧育苗等种植工序、缩短水稻生育期等优势。国内丘陵山地水稻直播机的研发始于20世纪70年代,第一台丘陵山地水稻直播机由湖南益阳农机所根据东风-2S水稻插秧机改装而成,可适用于泥脚深度35 cm的湖区、山丘地区^[47]。针对平稳行驶、精准播种等丘陵山地水稻生产现实需求,相关科研团队围绕水稻直播机精量穴直播相关核心技术开展了系列研究,推动国内水稻直播机逐步向精量化、无人化、生态化方向发展(如表6所示)。

如张明华等^[49]针对压茬效果较差、仿形系统不完善等问题,对水稻精量穴直播机仿形与滑板机构进行优化,优化后水稻精量穴直播机的纯作业效率为0.67 hm²/h,穴距合格率达100%,穴粒数合格率达95%;武涛等^[54]针对南方水田结构复杂多变、水稻直播机受不确定性干扰较大等问题,提出一种基于滚动时域的车辆运动状态估计方法,以提高水稻直播机运行中的抗干扰能力和路径跟踪控制精度;程思明等^[57]提出南方山改田水稻机械旱直播机覆生物降解地膜技术,集成旋耕、施肥、起垄、播种、浇水、覆膜、覆土、镇实等功能于一体,有助于实现水稻种植的生态友好、省工降本、高产高效。

表 6 国内丘陵山地水稻直播机技术研究进展

Table 6 Research Progress on Rice Livestreaming Machine Technology in Hilly and Mountainous Areas of China

技术 Technology	机构 Institution	年份 Year	特征 Features
水稻直播机整机设计	中国农业机械化科学研究院等 ^[48]	2012	开展水稻直播机设计与试验, 设计的水稻直播机可一次完成整平、播种、施肥和覆盖等工序, 播种均匀性变异系数 24.5%, 各行排种量一致性变异系数 3.2%, 种子破损率 0.2%
水稻直播机滑板机构优化设计	华南农业大学 ^[49]	2017	对水稻精量穴直播机仿形与滑板机构进行优化, 优化后水稻精量穴直播机的纯作业效率为 $0.67 \text{ hm}^2/\text{h}$, 穴距合格率为 100%, 穴粒数合格率为 95%, 空穴率为 0, 播种后田面高差小于 3 cm; 平均首次故障前作业量为 $30.4 \text{ hm}^2/\text{m}$, 有效度为 98.2%, 各项性能指标和可靠性指标均达到了相关国家标准
精准排种	华中农业大学等 ^[50]	2024	针对水稻直播机滑板在扰动饱和水田环境中黏附重和阻力大的问题, 提出一种水稻直播机仿生滑板, 开展水田土槽试验, 研究其在水田土壤环境下的减阻效果, 为水田触土部件减黏降阻技术开发提供了新思路
自动驾驶	上海交通大学等 ^[51]	2016, 2020	基于直播机的稻种适应性、作业速度、播量调节等开展均匀分种、定量排种试验, 研制了气力集排式、气吹集排式直播机分种装置, 提高了直播机播种的均匀性和稳定性, 通过减少排种器数量和使用气力输送种子, 降低了伤种率
小型化、轻量化、智能化设计	上海交通大学等 ^[52]	2018	提出不平整泥泞水田环境中的水稻直播机自动驾驶控制方法
小型化、轻量化、智能化设计	四川省农业机械化研究设计院等 ^[53]	2022	开展基于滚动时域的无人水稻直播机运动状态估计研究, 提出一种基于滚动时域的车辆运动状态估计方法 (MHE), 将状态估计问题转化为固定时域的优化问题并充分考虑约束条件, 从而实现对带约束非线性模型状态的估计
种植膜覆膜相关技术	辽宁省农业机械化研究所 ^[54]	2021	设计了一种锂电池驱动的四行电动遥控水稻直播机, 实现通过雷达测量机组位移控制水稻播种, 减小了轮子打滑造成的播种误差, 通过三轮独立电机驱动, 减小了机组田间转弯半径, 电池续航里程超过 2 h, 整体机组重量轻、移动方便、转向精准、漏播率小、播种精准, 适合在丘陵山区条田中水稻生产使用
建德市农业技术推广中心; 浙江大学等 ^[55]	建德市农业技术推广中心; 浙江大学等 ^[56]	2024	提出南方山改田水稻机械旱直播机覆生物降解地膜技术, 集成旋耕、施肥、起垄、播种、浇水、覆膜、覆土、镇实等功能, 有助于实现水稻种植的生态友好、省工降本、高产高效

4 丘陵山地水稻收获机械化技术研发现状

4.1 国外丘陵山地水稻收获机械化技术研发现状

水稻收割机是世界传统四大农机 (轮式拖拉机、小麦收割机、玉米收割机、水稻收割机) 之一, 日本、韩国、美国等农机强国的水稻机收率已经超过 99%^[58], 主要有约翰迪尔 (John Deere)、凯斯纽荷兰 (CNH Industrial)、久保田 (Kubota)、克拉斯 (Claas)、井关 (ISEKI) 等水稻收割机主要生产企业, 有力地推动了全球水稻收获环节的机械化率。但是约翰迪尔 (John Deere)、凯斯纽荷兰 (CNH Industrial)、克拉斯 (Claas) 等欧美企业生产的收割机多为用于旱田的谷物、玉米、小麦联合收割机, 割台收割宽度达 5 m 以上、喂入量可达 2.5 kg/s, 适用于大地块、大规模的水稻收割, 不适宜于丘陵山地。久保田 (Kubota)、洋马 (YANMAR)、井关 (ISEKI) 等日本小型水稻收割机械, 以其娇小的机型、可靠的质量、优良的性能受到国内丘陵山区和印度、泰国等亚洲水稻生产国家的青睐。洋马针对印度、巴基斯坦等南亚地区田块形状不规则、土地承载能力相对较强等耕地特点, 以及农田轮作、农作物利用率高且精细等农作特色, 推出了 AG 系列的半喂入式水稻收割机, 可满足南亚地区便捷、耐用、节工、稻梗二次回收利用的生产需求; 久保田针对印度、柬埔寨等东南亚地区田地泥泞易打滑、土地承载能力差、水稻饱满易倒伏等农业生产特色, 研发出 DC 系列全喂入式水稻收割机, 该机器不带粮仓、机身小巧且割台设计灵活, 非常适合东南亚地区承载能力弱、易打滑的山地水稻收割。总体而言, 水稻收割机的核心技术和产品已经相当成熟。

针对亚洲水稻产区的复杂水田环境、普遍的轮作制度以及农民的低经济收入等现实困境, 日本、孟加拉、伊朗、印度和巴基斯坦等国的学者们开展了系列创新研究和探讨 (如表 7 所示)。如 YANG 等^[59]针对水田的复杂环境, 建立了实时高精度稻田图像分割模型, 旨在

保障智能水稻收割机的安全可靠和精准作业; RAHIMI 等^[60]针对丘陵山地坡多、埂多、石砾多、收割机在作业过程中图像获取困难等问题, 开展图像去模糊改善水稻联合收割机的谷物监测技术研究, 提出了一种图像去模糊算法, 旨在防止水稻收割机在收割的过程中由于连续振动而阻碍谷物监测图像获取; SCHALCH 等^[61]围绕孟加拉国对水稻收割机作业效率提升需求, 在传统机床等刀片制造工艺的基础上, 提出冲裁、成型等刀片制造工艺, 简化刀片形状的复杂性, 旨在提高水稻收割机的生产效率、稳定性; GOLAM 等^[62]基于本国石油等传统能源的匮乏, 提出一种太阳能水稻收割机设计方案, 采用太阳能储能元件取代传统柴油水稻收割机发动机, 推动水稻收割机的新能源化发展。

4.2 国内丘陵山地水稻收获机械化技术研发现状

国内水稻收获机械的研制始于 20 世纪 60 年代^[63], 上海市收割机会战组、江苏收割机联合设计组、湖北联合设计组等单位针对丘陵山地水田等耕地特征自主研发了半喂入式、全喂入式等适宜丘陵山地水稻收获的水稻收割机。经过 60 余年的发展, 已逐步培育出沃得、雷沃、泰州常发、中联重机、星光等系列水稻收割机企业和品牌, 并逐步替代日本久保田、洋马、井关等国外水稻收割机, 占据国内市场主要份额。针对丘陵山地地块狭小、梯田坡地较多、套种轮作普遍的特点, 国内也自主研发了多款结构简单、通过性较好的微型自走式水稻收获机, 其中, 以微型半喂入式履带水稻收割机对丘陵山地的适应性最强, 如重庆鑫源自主研发的 4 LZ-0.6 L 半喂入履带式水稻收割机, 质量只有 350 kg, 最小离地间隙仅 20 cm, 喂入量达 0.6 kg/s, 满足丘陵山地地块狭小、坡度大、节工省力的需求。

国内丘陵山地不但作业环境复杂, 而且水稻种植普遍密度大、行距小、稻穗低垂, 因此, 稳定性、灵活性以及高割茬精度、高脱粒能力是国内丘陵山地水稻收获机械研发的重点、难点和热点, 具体研究进展如表 8 所示。

表7 国外水稻收割机技术研究进展

Table 7 Research progress on rice harvester technology abroad

技术 Technology	机构 Institution	年份 Year	内容 Contents
自动驾驶相关技术	日本京都大学 ^[59]	2020	针对丘陵山地水田的复杂环境开展障碍物检测和识别研究, 将“瘦身”方法应用于图像级联网络 (ICNet), 建立了实时高精度的稻田图像分割模型, 旨在精准确定收获和未收获区域之间的航线路径, 保障智能水稻收割机的安全和精准作业
作业监测相关技术	伊朗桂兰大学 ^[60]	2023	针对丘陵山地坡多、埂多、石砾多、收割机在作业过程中图像获取困难等问题, 开展图像去模糊改善水稻联合收割机的谷物监测技术研究, 提出一种图像去模糊算法, 旨在防止水稻收割机在收割的过程中由于连续振动而阻碍谷物监测图像获取
收割机刀片等核心零部件	美国佐治亚理工学院 ^[61]	2023	围绕孟加拉国对水稻收割机作业效率提升需求, 开展收割机刀片相关研究, 在传统机床等刀片制造工艺的基础上, 提出冲裁、成型等刀片制造工艺, 简化刀片形状的复杂性, 提高生产效率和产品质量
新能源动力系统	孟加拉吉大港工程技术大学 ^[62]	2024	针对孟加拉国石油等传统能源有限的自然资源条件开展太阳能水稻收割机设计研究, 提出采用太阳能储能元件取代传统柴油水稻收割机发动机的新设计理念

表8 国内丘陵山地水稻收割机技术研究进展

Table 8 Research progress on rice harvester technology in hilly and mountainous areas of China

技术 Technology	机构 Institutions	年份 Years	内容 Contents
自动驾驶稳定性与灵活性相关技术	华南农业大学等 ^[64]	2019	对丘陵地区收割机底盘机架做有限元分析, 得到底盘的固有频率、振型和受力分析, 通过 Simulation 模块进行模态分析, 利用模态分析技术得到工作装置的各阶模态频率、模态特性和受力分析, 研究底盘机架模态振型与振动之间关系, 验证所设计的底盘机架合理性
	南京农业大学 ^[65]	2024	研发了一种用于无人收割机的实时水稻穗密度检测方法, 利用深度学习技术在水稻无人收割场景中进行实时稻穗检测和密度评估, 旨在提高收割机的农作物状态感知能力, 实现自动调速
精准化割茬作业技术	江苏大学 ^[66]	2024	研制了一种轻型水稻杂质含量和破碎率检测系统, 结构简单可靠, 可连续采集高质量的谷物图像, 改进后的网络对于破碎颗粒和杂质的分割精度可分别提高 6.13% 和 9.19%
	南京农业大学 ^[67]	2024	提出一种基于 RGB-D 图像的无人水稻收割机收割宽度测量方法, 可以适应复杂的收割场景, 具有更高的鲁棒性、更低的测量误差, 并且切割宽度计算与收割机偏航角无关
	一拖 (黑龙江) 东方红工业园有限公司 ^[68]	2017	针对微型水稻收割机切割器、拨禾轮等切割模块, 以及脱粒模块进行优化改进, 以适应淮河以南丘陵地势地形
	江苏大学 ^[69]	2020	开展导条对切向纵流水稻联合收获机脱粒产量和清收损失分布的影响研究, 应用离散元模拟, 分析了导条在脱粒输出分布上的分布位置, 以脱粒率的标准差作为评价准则, 得到了分配装置的最优结构参数
脱粒作业能力提升技术	江苏大学 ^[70]	2022	开展脱粒间隙技术研究, 建立了刚性短秸秆和柔性长秸秆模型, 通过脱粒模拟分析稻草上的平均压缩力, 提出同心脱粒间隙脱粒产物中除谷物以外的物质 (MOG) 的质量分数比非同心间隙降低 4.3%, 稻草的破损程度也较低, 为提升水稻收割机的脱粒和清洗能力提供理论依据
	华南农业大学 ^[71]	2023	设计了一种再生稻气力输送装置, 详细分析了混合腔收缩段截面高度、长度对气流场以及再生稻籽粒运动的影响, 以风机转速、填充系数和水平螺旋输送器转速作为试验因素, 旨在减少再生稻收获机输送器的堆积与阻塞
自动清扫装置设计技术	马斯奇奥 (青岛) 农机制造有限公司等 ^[72]	2022	设计一种自动清扫发动机侧罩的装置, 装置由电机带动侧罩圆盘转动, 由集成 Codesys 程序的控制器控制, 每隔 10 s 圆盘自动转 2.5 s, 由静止的刮臂将旋转的圆盘上的杂物刮下, 从而实现自动清洁

在稳定性和灵活性方面, 华南农业大学的王斌斌等^[64]基于收割机底盘机架模态振型与振动之间关系研究, 提出一种能够避免外部激励共振的底盘机架, 有助于提高收割机行走的牢固性和可靠性; 南京农业大学的 SUN 等^[65]研发了一种用于无人收割机的实时水稻穗密度检测方法, 提出了一种基于 YOLOv5n 的改进水稻穗检测模型 (RP-YOLO), 有助于实现收割机作业速度的实时调整, 提高收割机的自主性和适应性。在割茬精准度方面, 江苏大学的 WU 等^[66]针对稻谷杂质含量和破碎率开发了一种轻量级检测系统, 可连续采集高质量的谷物图像, 使破碎颗粒和杂质的分割精度分别提高 6.13%、9.19%, 有助于帮助驾驶员及时调整联合收获机的工作参数, 减少收获过程中的杂质和破碎籽粒, 提高收获质量; 南京农业大学的 SUN 等^[67]提出一种基于 RGB-D 图像的无人水稻收割机收割宽度测量方法, 可以适应丘陵山地复杂的收割场景, 具有更高的鲁棒性、更低的测量误差。在脱粒能力方面, 江苏大学的 CHAI 等^[69]应用离散元模拟, 分析了导条在脱粒输出分布上的分布位置, 以脱粒率的标准差作为评价准则, 得到了分配装置的最优结构参数; 江苏大学的 LIU 等^[70]采用离散元法 (DEM) 建立刚性短柔性长稻草模型, 分析同心和非同心脱粒间隙对水稻秸秆损伤的影响, 为提升水稻收割机的脱粒和清洗能力提供理论依据; 华南农业大学的刘伟健等^[71]采用 DEM-CFD 耦合的方法, 设计了一种再生稻气力输送装置, 旨

在减少再生稻收获机输送器的堆积与阻塞。

5 国内外发展差距与技术挑战

作为典型的丘陵山地国家, 日本、韩国、意大利等国家高度重视本国农业机械化相关政策的支持、科技研发的投入, 以及科研机构、制造企业、专业合作社之间的密切合作, 推动本国农机技术的自主创新与发展与农业机械化水平的整体提升。如早在 1971 年, 韩国就在全国范围内实施了“新村运动”, 扶持农户兴建桥梁、整治农地、修筑农田道路等, 改地宜机, 为本国农业机械化的发展创造了良好的环境基础; 日本投入了大量的资金、人力等资源推进农机科学的研究和实验验证, 设立了包括“农业·食品产业技术研究机构 (NARO)” 等在内的农业技术创新机构, 围绕传统农机开展了技术更新与新机型研发, 并密切关注市场需求, 与农机制造商、农机合作社等积极开展合作与共享, 加速技术创新、避免重复研发。目前日本已经进入以小型、轻便、容易操作、舒适性好、自动化程度高为特征的农业机械化发展阶段^[73], 并逐步向智能化方向发展。

与日、韩、意等国家相比, 国内的水稻耕种收机械研发与应用起步较晚、基础不牢、产品的综合性能不高, 特别是针对丘陵山地的轻量、高效、高稳定性的水稻耕种收机械相对匮乏, 发动机高功率低排放设计制造技术、刀具抗损降耗优化设计技术、车架轻量化设计技术、坡

地自适应技术、车身调平技术、机具智能化控制技术等共性核心技术仍有待进一步攻克。具体到耕种收不同生产环节，国内丘陵山地水稻机械化装备研发制造还存在如下现实困境。一是在耕整地环节，现有国内自主研发生产的用于丘陵山地的微耕机和旋耕机在体积上、便捷性能上已经满足丘陵山地耕整地的基本需求，但是与国外先进机型相比，国产微耕机和自走式旋耕机的自重普遍较大、动力普遍不足、人性化设计相对缺乏，农机操作人员的劳动强度依然繁重、作业条件依然艰苦，尚未达到综合机械化发展阶段，微耕机减震减阻技术、微耕机深度调节自动控制技术、自走式旋耕机多功能通用底盘技术、旋耕机减粘增脱优化设计技术等核心关键技术仍有待深化。二是在种植环节，虽然国内对于水稻

种植机械的研发起步较早，但是与国外先进产品相比，国产丘陵山地水稻种植机械通过性、作业稳定性、精准性、高效性还有待提升，宽窄行分插秧系统优化设计技术、施肥等多功能集成技术、自动控制技术、减黏降阻控制技术、直播机精量播种技术、直播机种膜覆膜自动化控制技术等核心关键技术科技研发仍有待深化提升。三是在收获环节，国内当前批量生产、国内市场畅销的水稻收获机械主要是针对大规模田块、大喂入量的全喂入式联合收获机型，适宜丘陵山地水稻收获的半喂入式水稻收获机械品种不多、综合性能不好、返修率较高，行驶适应性优化提升技术、割茬精度优化提升技术、脱粒能力优化提升技术等核心关键技术科技研发仍有待提升（表9）。

表 9 厥待提升的丘陵山地水稻机械化关键技术

Table 9 Key technologies for mechanization of rice in hilly and mountainous areas that urgently need improvement

项目 Items	关键技术 Key technology
共性技术	发动机高功率低排放设计制造技术、刀具抗损降耗优化设计技术、车架轻量化设计技术、坡地自适应技术、车身调平技术、智能化控制技术
耕种环节	微耕机减震减阻技术、微耕机深度调节自动控制技术、自走式旋耕机多功能通用底盘技术、旋耕机减粘增脱优化设计技术
种植环节	宽窄行分插秧系统优化设计技术、施肥等多功能集成技术、自动控制技术、减黏降阻控制技术、直播机精量播种技术、直播机种膜覆膜自动化控制技术
收获环节	行驶适应性优化提升技术、割茬精度优化提升技术、脱粒能力优化提升技术

此外，国内丘陵山地专用农机制造企业普遍自主创新能力弱、生产规模小、市场覆盖面小、产值不高，农机制造企业与科研机构合作与共享不足，丘陵山地农机社会化服务能力普遍薄弱，与国外先进技术也存在较大差距。

6 未来发展趋势

1) 在保证作业性能、安全可靠性能等综合指标的前提下逐步向轻量化、微型化方向发展。对车架等应力较大、应力集中的部位进行结构优化、配置优化和结构创新，推动计算机辅助工程仿真（computer aided engineering, CAE）等先进技术在水稻耕种收机械研发与设计环节的应用，深化多连接结构的一体化设计，减少焊接等加工工序，减少机械应力集中，去除冗余结构；深化高强钢、超高强钢等合金新材料及先进成形技术在水稻耕种收机械及核心零部件制造中的应用，提升旋耕刀、割刀等核心部件的硬度同时，减轻机械整体结构的质量，实现水稻耕种收机械在丘陵坡地湿田中的通过性和灵活性的提高、降低作业过程中的能耗与废气排放、提高机械的可操作性。

2) 不断优化设计提升发动机的功率密度和耐用性。突破国产农机发动机效能低、耐用性差的发展瓶颈，聚焦燃烧室结构、喷油系统、点火系统等发动机燃烧系统开展优化创新，借鉴日本多点喷油技术、高压共轨喷油技术等先进技术，实现喷油系统的高精度控制；优化燃烧室的形状、尺寸和流道结构，实现燃料与空气的均匀混合；深化提升发动机传感器的采集精度，实现发动机喷油量和点火时间的精确控制；将数字虚拟模型等先进算法与技术应用于发动机设计，深化提升发动机研发制造工艺的精细化程度，以满足水稻耕种收机械对丘陵山地的复杂地形和恶劣作业环境的动力输出需求。

3) 推动丘陵山地水稻生产数字智能化发展。加强适

宜于丘陵山地复杂地形地势的传感器、芯片、算法、模型的技术攻关，深化多传感器融合技术、自动导航技术与动力底盘机械的有机融合，不断提高丘陵山地水稻机械化装备在复杂作业环境中的作业能力、作业效率、作业质量；深化北斗导航、大数据、智能感知、机器视觉、深度学习等数字技术在丘陵山地水稻生产作业装备研发制造中的应用，推动实现水稻生产作业装备的高端智能化升级；根据丘陵山地水稻生产需求，探索构建集数字化感知、智能化决策、精准化作业、智慧化管理于一体的无人/少人农场作业场景^[74]，有效提高丘陵山地水稻生产作业效率和耕地利用率，为解决主体老龄化及耕地冬季撂荒问题提供支撑。

4) 推动丘陵山地水稻生产作业装备绿色低碳化发展。对标“双碳”目标，攻克高能量长时效蓄电池技术、低转速大扭矩电动机^[75]等核心关键技术，制定相关制造与安全的行业标准、国家标准、技术规范，加强绿色新能源、混合动力水稻耕种收农机装备的研发制造，并加强相关上下游产业链及相关充电设备的配套衔接。加强无膜铸造、一体化压铸成型、数控加工、激光加工、3D 打印等^[76]绿色制造技术在丘陵山地水稻农机装备设计制造过程中的应用，开展节材设计、生态设计等绿色产品设计工艺的应用，推动丘陵山地水稻耕种收机械轻简化发展的同时减少传统制造工艺中的能源消耗和环境污染。

[参 考 文 献]

- [1] 孙筱. “十五五”我国农作物耕种收综合机械化率发展指标预测[J]. 农机科技推广, 2024(8): 9-11.
- [2] 罗锡文. 对发展丘陵山区农业机械化的思考[J]. 农机科技推广, 2011(2): 17-20.
- [3] 国家统计局. 中国统计年鉴[R]. 北京: 中国统计出版社, 2023.
- [4] 农业农村部. 湖北主要农作物生产全程机械化走在全国前列[EB/OL]. (2024-03-04)[2024-10-10]. http://www.moa.gov.cn/xw/qg/202403/t20240304_6450624.htm.

- [5] 孙德明, 朱晓岩, 亓文正, 等. 履带耕整机械水田市场需求及技术性分析[J]. 农业机械, 2021(2): 85-86, 91.
- [6] 中华人民共和国工业和信息化部. JB/T 10266-2013: 微型耕耘机[S]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
- [7] 姜皓雄. 日本“久保田”水田中耕机[J]. 粮油加工与食品机械, 1973(3): 7.
- [8] POMEROY D C. Micro-tiller module releasibly engaged with hand drill, has first tine and second tine that are extended further along input shaft axis than transverse to input shaft axis: US 2017/0339817 A1[P]. 2017-11-30.
- [9] YUN C, KIM H J, JEON C W, et al. Stereovision-based ridge-furrow detection and tracking for auto-guided cultivator[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 191(12): 1-8.
- [10] DILAY Y, GNEY B. Microstructure and wear properties of WC-10Co-4Cr coating to cultivator blades by DJ-HVOF[J]. Emerging Materials Research, 2021, 10(6): 278-288.
- [11] SAIMBHI V S, WADHWA D S, GREWAL P S. Development of a rotary tiller blade using three-dimensional computer graphics[J]. Biosystems Engineering, 2004, 89(1): 47-58.
- [12] FARZAD M, REZA M M, JALAL K. Control of variable rate system of a rotary tiller based on real-time measurement of soil surface roughness[J]. Soil & Tillage Research, 2022, 215(1): 1-8.
- [13] HIRASAWA K, KATAOKA T, KUBO T. Prediction and evaluation for leveling performance in rotary tiller[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2013, 46(18): 315-320.
- [14] 姚若松. 发明“屎克郎耕作机”[J]. 福建农机, 1994(2): 27.
- [15] 数说农机. 5大履带自走式旋耕机 2024年补贴销量与价格 [EB/OL]. (2024-04-22)[2024-10-10]. <http://www.nongji1958.com/index.php/node/71244>.
- [16] 数说农机. 10大微耕机品牌出炉[EB/OL]. (2024-03-05)[2024-10-10]<https://baijiahao.baidu.com/s?id=1792694803184655652&wfr=spider&for=pc>.
- [17] YIN Y Y, XIONG H, BAI H Q. Micro tiller vibration test and vibration reduction design of the handle[C]// 2019 ASABE Annual International Meeting, Boston, Massachusetts, 2019.
- [18] LIU X C, WANG Y X, ZHANG X L, et al. Handheld micro tiller time-frequency characteristic and vibration isolation measures[J]. Journal of Vibroengineering, 2022, 24(5): 824-835.
- [19] GAO H S, ZHU S H, SHI J H, et al. Development of electric micro-farmingmachine for greenhouse[J]. Mechanical Design, 2012, 29(11): 83-86.
- [20] 威马农机股份有限公司. 电动微耕机[EB/OL]. (2023-01-01)[2024-10-10]. WMFT516https://cn.weimapower.com/PC/product_show.aspx?id=173&cid=260.
- [21] LI X Y, ZHU L X, GONG S. Soil-cutting simulation and dual-objective optimization on tillage process parameters of micro-tiller by smoothed particle Galerkin modeling and genetic algorithm[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 198(7): 172-178.
- [22] KANG J, HE P, NIE Y, et al. Design of auxiliary depth-control system for micro-tiller[J]. Engineering in Agriculture, Environment and Food, 2015, 8(2): 101-105.
- [23] 王宇涵, 王浩, 李飞扬, 等. 模块化智能农业作业车的设计[J]. 应用科技, 2024, 51 (5): 284-291.
WANG Yuhan, WANG Hao, LI Feiyang, et al. Design of modular intelligent agricultural operation vehicle[J]. Applied Technology, 2024, 51 (5): 284-291. (in Chinese with English abstract)
- [24] 宣海涛, 陈玉虎. 小履带自走式旋耕机及配套机具在黏土地中使用情况分析与发展建议[J]. 农业开发与装备, 2020 (1): 77, 80.
- [25] WU L F, WU Y Q. Simulation of transmission system of crawler self-propelled rotary tiller based on deep learning[J]. Computational Intelligence and Neuroscience, 2022, 12: 40-41.
- [26] 周汉林, 刘华, 陈中武, 等. 丘陵山地履带式多功能底盘的设计[J]. 现代农业装备, 2021, 42(5): 56-59.
ZHOU Hanlin, LIU Hua, CHEN Zhongwu, et al. Development of tracked multifunctional chassis in hilly and mountainous regions[J]. Modern Agricultural Equipment, 2021, 42 (5): 56-59. (in Chinesse with English abstract)
- [27] 陈斌, 刘奇, 邹鑫, 等. 基于多模块换装的农用履带动力平台设计[J]. 农业工程与装备, 2021, 48(3): 1-4, 18.
CHEN Bin, LIU Qi, ZOU Xin, et al. Design of agricultural track power platform based on multi- module disassembly and assembly[J]. Agricultural Engineering and Equipment, 2021, 48 (3): 1-4,18.(in Chinesse with English abstract)
- [28] 张俊杰, 张西群, 马力, 等. 1GZDY-120 履带自走式遥控旋耕机的设计与试验[J]. 安徽农业科学, 2022, 50(20): 193-196.
ZHANG Junjie, ZHANG Xiqun, MA Li, et al. Design and experiment of 1GZDY-120 crawler self-propelled remote control rotary tiller[J]. Anhui Agricultural Science, 2022, 50 (20): 193-196.(in Chinesse with English abstract)
- [29] 肖茂华, 钮约, 汪开鑫, 等. 自激振动旋耕刀设计与减扭降耗性能分析[J]. 农业机械学报, 2022, 53(11): 52-63.
XIAO Maohua, NIU Yue, WANG Kaixin, et al. Design of self-excited vibration rotary tiller and analysis of its performance in reducing torsion and consumption[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53 (11): 52-63.(in Chinesse with English abstract)
- [30] LIU G Y, ZHENG K, XIA J F, et al. Research on an intelligent vibration detachment system for rotary tiller based on soil surface roughness dynamic characteristics[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 224: 109214.
- [31] 颜春雷. 丘陵地区水稻插秧机的应用现状分析[J]. 世界热带农业信息, 2023(10): 59-61.
- [32] 包春江, 李宝筏. 日本水稻插秧机的研究进展[J]. 农业机械学报, 2004, 35(1): 162-166.
BAO Chunjiang, LI Baofa. Research development of rice transplanter in Japan[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(1): 162-166.(in Chinesse with English abstract)
- [33] 阳晖. 日本水稻插秧机技术发展历程 [J]. 湖南农机, 2013(10): 33.
- [34] YOSHISADA N, KATSUHIKO T, KENTARO N, et al. A global positioning system guided automated rice transplanter[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2013, 46(18): 41-46.
- [35] SIDDIQUE A A M, KIM W, KIM Y, et al. Effects of temperatures and viscosity of the hydraulic oils on the proportional valve for a rice transplanter based on PID control algorithm[J]. Agriculture, 2020, 10(3): 73.
- [36] YOSHISADA N, HIDEFUMI S, KATSUHIKO T, et al. An autonomous rice transplanter guided by global positioning system and inertial measurement unit[J]. Journal of Field Robotics, 2009, 26(6-7): 537-548.
- [37] 新华社. 华东农业科学研究所的科学家正进一步面向生产实际[J]. 科学通报, 1953(5): 100-101.
- [38] 央视三农. 村里来了“钢铁侠”: 水稻农机三剑客[EB/OL]. (2023-01-07)[2024-10-10]. https://mp.weixin.qq.com/s?__biz=MjM5NTExMTYwMQ==&mid=2649599232&idx=1&sn=4673b5dd4a80dfc8b9a0b4453b0e690c&chksm=bee47ade8993f3c8b5c449294ca2d3faf89cce64fedc3fcfb067f74f35b31b43e53a64895bb4&scene=27.
- [39] 2023年中国插秧机行业发展现状分析及投资策略咨询报告

- [EB/OL].(2023-01-10)[2024-10-10]. https://www.sohu.com/a/627501192_120934988.
- [40] 马旭, 赵旭, 刘赛赛, 等. 水稻高速插秧机固体颗粒肥料变量施肥装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(9): 99-110.
MA Xu, ZHAO Xu, LIU Saisai, et al. Design and experiment of solid particle fertilizer variable rate fertilization device for high-speed rice transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54 (9): 99-110.(in Chinese with English abstract)
- [41] 张佳, 李一波, 周凡, 等. 基于物联网技术的智能农机装备研发创新策略研究——以插秧机为例[J]. 中国农机装备, 2024(8): 41-43.
ZHANG Jia, LI Yibo, ZHOU Fan, et al. Study on innovation strategy for research and development of intelligent agricultural machinery and equipment based on internet of things technology: a case study of rice transplanting machinery[J]. China Agricultural Equipment, 2024(8): 41-43.(in Chinese with English abstract)
- [42] 廖娟, 汪鶴, 尹俊楠, 等. 基于分区域特征点聚类的秧苗行中心线提取[J]. 农业机械学报, 2019, 50(11): 34-41.
LIAO Juan, WANG Yao, YIN Junnan, et al. Detection of seedling row centerlines based on sub-regional feature points clustering[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50 (11): 34-41.(in Chinese with English abstract)
- [43] 何杰, 朱金光, 罗锡文, 等. 电动方向盘插秧机转向控制系统设计[J]. 农业工程学报, 2019, 35(6): 10-17.
HE Jie, ZHU Jingguang, LUO Xiwen, et al. Design of steering control system for rice transplanter equipped with steering wheel-like motor[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(6): 10-17.(in Chinese with English abstract).
- [44] WU W T, ZHANG Z Q, ZHANG X Y, et al. Application of visual inertia fusion technology in rice transplanter operation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 221:108990.
- [45] 张娜娜, 赵匀, 刘宏新. 高速水稻插秧机车架的轻量化设计[J]. 农业工程学报, 2012, 28(3): 55-59.
ZHANG Nana, ZHAO Yun, LIU Hongxin. Light design of frame for self-propelled chassis rice transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28 (3): 55-59. (in Chinese with English abstract)
- [46] 孙良, 姜凯雯, 周斌, 等. 取秧侧向零偏移的空间轨迹再生稻分插机构设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(2): 101-108.
SUN Liang, JIANG Kaiwen, ZHOU Bin, et al. Design and experiment of regenerated rice on space trajectory transplantation mechanism with zero lateral offset[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55 (2): 101-108. (in Chinese with English abstract)
- [47] 张德文. 我国水稻直播机械的发展[J]. 现代化农业, 1991(11): 5-7.
- [48] 梁宝忠, 赵永亮, 赵金英, 等. 水稻直播机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2012, 43(S1): 63-66.
LIANG Baozhong, ZHAO Yongliang, ZHAO Jinying, et al. Design and test of rice direct seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43 (S1): 63-66.(in Chinese with English abstract)
- [49] 张明华, 罗锡文, 王在满, 等. 水稻精量穴直播机仿形与滑板机构的优化设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(6): 18-26.
ZHANG Minghua, LUO Xiwen, WANG Zaiman, et al. Optimization design and experiment of profiling and slide board mechanism of precision rice hill-drop drilling machine[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(6): 18-26.(in Chinese with English abstract)
- [50] 张国忠, 丁凯权, 李正博, 等. 基于泥鳅体表的水稻直播机仿生滑板设计与试验[J]. 吉林大学学报(工学版), 2024, 54(5): 1482-1492.
ZHANG Guozhong, DING Kaiquan, LI Zhengbo, et al. Design and experiment of biomimetic sliding plate for rice direct seeding machine based on loach body surface[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2024, 54 (5): 1482-1492.(in Chinese with English abstract)
- [51] 戴亿政, 罗锡文, 王在满, 等. 气力集排式水稻分种器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(24): 36-42.
DAI Yizheng, LUO Xiwen, WANG Zaiman, et al. Design and experiment of rice pneumatic centralized seed distributor[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(24): 36-42. (in Chinese with English abstract)
- [52] 戴亿政, 罗锡文, 张明华, 等. 气吹集排式水稻旱直播机关键部件设计与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(10): 1-8.
DAI Yizheng, LUO Xiwen, ZHANG Minghua, et al. Design and experiments of the key components for centralized pneumatic rice dry direct seeding machine[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(10): 1-8.(in Chinese with English abstract)
- [53] 张雁, 李彦明, 刘翔鹏, 等. 水田环境下水稻直播机自动驾驶控制方法[J]. 农业机械学报, 2018, 49(11): 15-22.
ZHANG Yan, LI Yanming, LIU Xiangpeng, et al. An automatic drive control technique for rice drill seeder in uneven paddy rice[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49 (11): 15-22.(in Chinese with English abstract)
- [54] 武涛, 李彦明, 徐长赓, 等. 基于滚动时域的无人水稻直播机运动状态估计[J]. 农业机械学报, 2022, 53(10): 36-43.
WU Tao, LI Yanming, XU Changgeng, et al. Motion state estimation for rice seeding machine based on moving horizon estimation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53 (10): 36-43.(in Chinese with English abstract)
- [55] 周小波, 刘征明, 吴志强, 等. 小型智能水稻直播机研究与设计[J]. 四川农业与农机, 2021(5): 49-51.
- [56] 高占文, 张旭, 金青子. 水稻种膜覆膜直播机的设计与试验[J]. 农机化研究, 2024, 46(10): 97-101.
GAO Zhanwen, ZHANG Xu, JIN Qingzi. Design and experiment of rice seed film mulching direct seeding machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2024, 46 (10): 97-101.(in Chinese with English abstract)
- [57] 程思明, 赵福建, 邵美红, 等. 南方山改田水稻机械旱直播机覆生物降解地膜技术研究[J]. 数字农业与智能农机, 2024(5): 24-27.
- [58] 杨印生, 陈旭. 日本农业机械化经验分析[J]. 现代日本经济, 2018, 37(2): 77-86.
YANG Yinsheng, CHEN Xu. Japanese experience in agricultural mechanization[J]. Contemporary Economy of Japan, 2018, 37(2): 77-86.(in Chinese with English abstract)
- [59] YANG L, MICHIHISA I, TOMOYA S, et al. Implementation of deep-learning algorithm for obstacle detection and collision

- avoidance for robotic harvester[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 174:105499.
- [60] RAHIMI A F, MOLLAZADE K. Image deblurring to improve the grain monitoring in a rice combine harvester[J]. Smart Agricultural Technology, 2023, 4:100219.
- [61] SCHALCH W, COLTON J. Analysis of manufacturing methods and die design for rice transplanter claws and combine harvester blades in bangladesh[J]. Machines, 2023, 11(2): 219.
- [62] GOLAM R, SUJAN P, JOYPROKASH C. Illuminating the path to sustainable rice harvesting: A solar-based paddy harvester[J]. Energy Strategy Reviews, 2024, 53: 101389.
- [63] 南方各省市区推广的部分水稻收割机[J]. 农业机械资料, 1977(4): 20-21.
- [64] 王斌斌, 陈镖, 钟朝懿, 等. 丘陵地区水稻收割机底盘机架模态分析[J]. 现代农业装备, 2019, 40(2): 37-42.
WANG Binbin, CHEN Biao, ZHONG Chaogui, et al. Modal analysis of the chassis frame on rice harvester in hilly area[J]. Modern Agricultural Equipment, 2019, 40(2): 37-42. (in Chinese with English abstract)
- [65] SUN J W, ZHOU J, HE Y Q, et al. Detection of rice panicle density for unmanned harvesters via RP-YOLO[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 226: 109371.
- [66] WU Z P, CHEN J, MA Z, et al. Development of a lightweight online detection system for impurity content and broken rate in rice for combine harvesters[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 218:108689.
- [67] SUN J W, ZHOU J, WANG Y D, et al. A cutting width measurement method for the unmanned rice harvester based on RGB-D images[J]. Measurement, 2024, 224(1):113777.
- [68] 杨波, 王清泉. 微型水稻收割机设计与关键部件研究[J]. 黑龙江科技信息, 2017(12): 84.
- [69] CHAI X Y, ZHOU Y, XU L Z, et al. Effect of guide strips on the distribution of threshed outputs and cleaning losses for a tangential-longitudinal flow rice combine harvester[J]. Biosystems Engineering, 2020, 198(10): 223-234.
- [70] LIU Y B, LI Y M, ZHANG T, et al. Effect of concentric and non-concentric threshing gaps on damage of rice straw during threshing for combine harvester[J]. Biosystems Engineering, 2022, 219(6): 1-10.
- [71] 刘伟健, 罗锡文, 曾山, 等. 再生稻收获机输送系统水稻籽粒运动数值模拟及试验[J]. 农业工程技术, 2023, 43(32): 134.
- [72] 孙庆卫, 张圣杰, 韩玉刚. 水稻收割机发动机侧罩自动清扫装置设计[J]. 现代农机, 2022, (2): 66-67.
- [73] 农业机械杂志社. 日本农机考察辑要 2023-2024[M]. 北京: 中国农业机械化科学研究院, 2024.
- [74] 罗锡文, 胡炼, 何杰, 等. 中国大田无人农场关键技术研究与建设实践[J]. 农业工程学报, 2024, 40 (1): 1-16.
LUO Xiwen, HU Lian, HE Jie, et al. Key technologies and practice of unmanned farm in China[J] Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40 (1): 1-16.(in Chinese with English abstract)
- [75] 董涛. 新能源农机发展浅析[J]. 农机市场, 2024(4): 40-41.
- [76] 马志刚. 绿色制造技术在机械制造中的应用研究[J]. 造纸装备及材料, 2024, 53 (8): 90-92.

Research status and prospects of mechanization technology for rice in hilly and mountainous areas

ZHAO Chunjiang , MA Chen , LI Jin[※] , WANG Xiaomeng

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

Abstract: As the crop with the longest planting history, widest planting area, and highest yield in hilly and mountainous areas, the improvement of the comprehensive mechanization level of rice cultivation and harvesting is of great significance for promoting the comprehensive and high-quality development of agricultural mechanization throughout the entire hilly and mountainous area. This study takes the key technology of rice mechanization in hilly and mountainous areas as the incision, and based on the characteristics of hilly and mountainous areas in China and the current development status of rice mechanization in hilly and mountainous areas, conducts a technological frontier and trend analysis around the production mechanization of rice tillage, planting, harvesting and other main links, analyzes the gap in research and development of rice mechanization technology and equipment at home and abroad, explores the challenges faced by the development of rice mechanization in hilly and mountainous areas in China under different links, and looks forward to the future development trend of rice mechanization in hilly and mountainous areas, in order to provide new ideas and directions for promoting the overall mechanization level of rice production, filling the gaps in the development of agricultural mechanization in hilly and mountainous areas, and building up China's strength in agriculture. This study proposes that, the comprehensive mechanization rate of rice cultivation and harvesting in hilly and mountainous areas of China in 2022 is 80.8%, and the development is unbalanced and insufficient among different links and regions; Compared with advanced countries, the research and application of rice cultivation and harvesting machinery in China started relatively late, with a weak foundation and low comprehensive performance of products. Especially, there is a relative shortage of lightweight, efficient, and highly stable rice cultivation and harvesting machinery for hilly and mountainous areas. Key technologies such as engine high-power low emission design and manufacturing technology, tool wear resistance and consumption reduction optimization design technology, and frame lightweight design technology still need to be further overcome; Lightweight, intelligent, and green technologies are the future directions and trends for the development of rice production equipment in hilly and mountainous areas of China.

Keywords: hilly and mountainous areas; rice mechanization; key technologies; main challenges; future trends