

曹真瑞, 湛立伟, 陈德睿, 等. 杂交水稻机械化制种中的种植技术研究进展[J]. 江苏农业学报, 2026, 42(5): 1073-1080.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2026.05.020

杂交水稻机械化制种中的种植技术研究进展

曹真瑞^{1,2}, 湛立伟³, 陈德睿¹, 冯延东¹, 陈惠哲¹, 张玉屏¹, 张义凯¹, 王亚梁¹,
王志刚¹, 徐逸文¹, 聂立孝², 向 镜¹

(1. 中国水稻研究所水稻生物育种全国重点实验室, 浙江 杭州 311400; 2. 海南大学南繁学院<三亚南繁研究院>, 海南 三亚 572000; 3. 浙江勿忘农种业股份有限公司, 浙江 杭州 311400)

摘要: 在杂交水稻制种过程中, 亲本的机械化种植技术是提升种子生产效率、降低生产成本的关键。本文系统分析了制约杂交水稻机械化制种种植环节的限制因素, 包括亲本播期差异大、父本相间种植模式复杂以及父本行数占比较低导致的机械作业空间受限。在此基础上, 总结了当前杂交水稻机械化制种中的种植技术研究进展, 包括机械化直播、机械化移栽、机械化种植与人工移栽相结合、机械化直播与移栽相结合等模式, 并对不同模式的优势与局限性进行了分析。未来应从选育适宜亲本、培育壮秧、研发专用装备、农机农艺一体化等方面开展研究。本文为杂交水稻制种机械化种植技术的提升与推广提供了理论依据。

关键词: 杂交水稻; 机械化; 种子; 种植

中图分类号: S511 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2026)05-1073-08

Research progress on planting technology in mechanized seed production of hybrid rice

CAO Zhenrui^{1,2}, ZHAN Liwei³, CHEN Derui¹, FENG Yandong¹, CHEN Huizhe¹, ZHANG Yuping¹,
ZHANG Yikai¹, WANG Yaliang¹, WANG Zhigang¹, XU Yiwen¹, NIE Lixiao², XIANG Jing¹

(1. State Key Laboratory of Rice Biology and Breeding, China National Rice Research Institute, Hangzhou 311400, China; 2. School of Breeding and Multiplication (Sanya Institute of Breeding and Multiplication), Hainan University, Sanya 572000, China; 3. Zhejiang Wuwangnong Seed Industry Co., Ltd., Hangzhou 311400, China)

Abstract: In hybrid rice seed production, mechanized planting technology for parental lines is the key to improving seed production efficiency and reducing production costs. This paper systematically analyzed the restrictive factors hindering the planting stage of mechanized hybrid rice seed production, including large differences in sowing dates of parental lines, complex inter-planting patterns of male parents, and limited mechanical operation space caused by the low row proportion of male parents. On

收稿日期: 2025-12-08

基金项目: 浙江省“三农九方”科技协作计划项目(2024SNJF011); 浙江省基础公益研究计划项目(LTGN24C130006); 浙江省农机研发制造推广应用一体化试点项目; 中国农业科学院科技创新项目; 现代农业产业技术体系建设专项(CARS-01-23)

作者简介: 曹真瑞(2000-), 男, 云南普洱人, 硕士研究生, 研究方向为水稻机械化高产栽培。(E-mail) 23220951310199@hainanu.edu.cn

通讯作者: 聂立孝, (E-mail) lxnie@hainanu.edu.cn; 向 镜, (E-mail) xiangjing@caas.cn

this basis, it summarized the research progress of planting technologies adopted in current mechanized hybrid rice seed production, covering mechanized direct seeding, mechanized transplanting, combined mechanized planting and manual transplanting, as well as integrated mechanized direct seeding and transplanting modes, and analyzed the advantages and limitations of each mode. Future research should be carried out in aspects such as breeding suitable parental lines, cultivating strong seedlings, developing special agricultural machinery equipment, and integrating agricultural machinery with agronomic practices. This study provides a theoretical

basis for the improvement and popularization of mechanized planting technologies in hybrid rice seed production.

Key words: hybrid rice; mechanization; seeds; cultivation

杂交水稻的遗传优势依赖于每年更新种子,但种子生产仍高度依赖人工操作,导致制种效率低、成本高,限制其进一步推广。作为杂交水稻技术的发源地,中国的杂交水稻种植面积占全国水稻总种植面积的一半以上^[1]。然而,受亲本花期相遇情况和异交结实率的影响,杂交水稻制种的单位面积产量难以显著提升。为满足大规模杂交水稻种植对种子的需求,只能扩大制种种植面积,因此2020–2023年制种面积快速增长^[2]。然而,杂交水稻种子生产工序复杂,涉及亲本的播种时间、播种方式、父本和母本行比、株行距等多个方面,现有农业机械难以完全满足这些多样化的需求。因此,杂交水稻制种仍以人工种植为主^[3]。随着劳动力短缺与用工成本持续上升^[4]不仅提高了制种生产成本,还导致杂交水稻种子价格上涨(图1C),进而削弱了农民的种植意愿,最终限制了杂交水稻的推广。

美国于1981年开展杂交水稻机械化制种,其亲本生育期相差较小,采用早直播方式,且农机专业化服务程度较高^[5]。日本也相继推进杂交水稻机械化制种研究^[6]。印度、菲律宾、越南等主要水稻种植国家机械化程度相对较低且起步较晚,杂交水稻机械化制种技术仍处于起步阶段^[7]。中国曾在20世纪90年代设想收集父本花粉,采用授粉机对母本喷洒授粉,由于水稻花粉离体后仅能存活5 min,存在花粉收集、贮藏与喷施困难等问题,该方法缺乏实用性,相关研究已停止^[8]。近年来,随着农业机械化的发展,国内涌现出多种杂交水稻机械化制种技术,本文聚焦于杂交水稻制种过程中种植环节的机械化问题,系统梳理当前机械化种植的技术路径、适

用范围与局限性,并提出影响杂交水稻机械化制种产量的关键因素,以期对杂交水稻机械化制种技术的改进提供理论依据。

1 杂交水稻机械化制种种植环节的限制因素

1.1 亲本播期差异大

杂交水稻亲本是指用于生产杂交水稻种子的两个水稻品种,其中提供花粉的为恢复系(父本),接受花粉的为不育系(母本)。亲本间的遗传差异及互补性是产生杂种优势的关键^[9-12]。然而,遗传差异导致亲本具有不同的生育期,为了确保花期相遇,需要根据亲本的生育期特性分开播种,这增加了育秧的次数和复杂性。

如表1所示,不同类型杂交水稻亲本的播期存在差异,跨度可达0~35 d^[13-19]。目前,确定亲本播期主要采用时差法、叶差法和温差法^[20]。时差法依据父本和母本播始历期(从播种到始穗的天数)的差值确定播期;叶差法则基于亲本总叶片数及其在不同生长发育阶段的出叶速度差异确定播期。然而,这两种方法易受天气因素影响,对播种期和秧龄存在一定限制^[21]。温差法根据亲本从播种到始穗的有效积温差确定播期,但该方法仅适用于感温型水稻品种^[20]。制种者需综合运用多种方法,根据具体的气温变化及水肥条件精确计算并适时调整亲本播期。不同播期会对亲本的全生育期及产量构成产生不同影响^[22-24],这要求制种者具备丰富经验,否则易错过最佳移栽时期。此外,制种者还需分别管理两个或多个批次的秧苗,进一步增加了劳动量和管理难度。

表1 不同类型杂交水稻制种亲本播期差异

Table 1 Sowing date differences of parental lines in different types of hybrid rice seed production

杂交水稻类型	品种名称	不育系		恢复系			亲本播期差(d)	参考文献
		品种名称	播期	品种名称	一期播期	二期播期		
籼型	百优中占	百香 A	6月9日	中香黄占	5月30日	6月6日	7	[13]
籼型	协禾优 1002	协禾 A	2月1日	广恢 1002	1月8日	1月18日	10	[14]
籼型	国香优 2115	国香 A	4月20–25日	雅恢 2115	3月17–20日	3月27–30日	10	[15]
粳型	丹梗优 4号	丹梗 4A	4月23日	丹恢 4号	4月23日	4月30日	7	[16]
粳型	嘉优 10号	嘉 57A	6月15日	嘉恢 10号	5月25日	6月1日	7	[17]
粳型	申优 28	申 21A	6月7日	申恢 26-28	5月15日	5月22日	7	[18]
籼粳型	秋优 23	秋丰 A	5月25日	R23	5月28日	6月3日	6	[19]

由于亲本播期存在差异,难以找到一个合适统一的时间点或生长状态,使父本和母本同时满足移栽要求并实现机械化同步移栽。因此,只能对父本和母本分别进行移栽,大大降低了作业效率。同时,父本移栽时还需预留母本移栽间距,进一步增加了移栽过程的复杂性。

1.2 父本种植方式难以适配机械化

在杂交水稻制种过程中,不育系因雄性不育特性无法正常结实,必须依赖恢复系授粉^[25-26]。因此,杂交种子生产的关键在于父本和母本花期相遇^[27]。为降低花期不遇的风险,生产中通常采用两期父本相间种植,以适配母本花期并提高结实率。两期父本的播期间隔约为7~10 d,需进行两次育秧。

父本主要有3种不同的种植方式^[28]。单行父本种植:父本与母本之间的行距较大,父本个体生长优势显著,每厢将两期父本相间种植于同一行。双行父本种植:两行之间行距较大,父本群体规模大,花粉量充足。假双行(“之”字形)父本种植:父本呈三角形栽插,两行间距较小,占地面积少,有利于增加母本行数,花粉密度略高于单行种植。其中,单行父本和假双行父本主要适用母本行数较少的行比配置,而双行父本则适用于母本行数较多的行比配置。在实际制种过程中,需要根据亲本行比、恢复系花粉量大小和花粉传播范围,综合确定父本的种植方式。

在父本机械化移栽设备领域,邱国学等^[29]和王永维等^[30]等研发了杂交稻父本专用的插秧机,该设备能够实现两期父本的交替种植,形成假双行分布。此外,张雷^[31]设计了一种手扶式插秧机,同样能够完成两期父本的交替移栽。尽管这些研究和发明满足了设计要求,在一定程度上提升了制种效率,但这些设备作为专用机械,其研发和制造成本较高,难以推广应用于杂交水稻制种生产实践中。

1.3 父本行数较少的行比模式难以机械化种植

杂交水稻制种过程中,亲本通常按照一定比例相间种植^[15],这种方式有助于保障花粉传播的及时性与精准性,最大程度提高花粉利用率,从而提升不育系的结实率。不同亲本行比的选择对杂交水稻制种的机械化进程具有显著影响。在父本占比低的行比配置下,父本行数少且分布较为零散,难以适配现有的机插设备。同时,母本的厢面十分狭窄,通常仅有数米,过窄的作业空间严重限制了农机操作。并

且受限于父本种植布局及两期父本相间种植的要求,亲本同步机械化作业仍难以实现^[32]。父本占比高的行比配置虽能实现机械化种植,但父本花粉传播距离有限,导致距父本较远的不育系结实率偏低,进而制约群体产量。虽有无人机辅助授粉^[33],但设备成本和技术要求较高,且无人机旋翼产生的向下气流迫使花粉下沉,影响授粉效率,难以大规模推广^[34-35]。

2 杂交水稻机械化制种种植环节的研究进展

2.1 机械化直播

杂交水稻制种直播技术可简化育秧和移栽过程,从而降低劳动力成本和提升作业效率^[36]。杂交水稻制种可根据亲本布局分为亲本分厢直播和亲本混合直播两种模式。其中,分厢直播是指按预设行比将亲本种子直接分厢播种于制种田的种植方式。美国、德国等国的现代化农业公司已将该模式应用于杂交水稻全程机械化制种,具体技术环节包括机械旱直播、航空植保施药、小型直升机辅助授粉、父母本机械分收和种子机械干燥等^[7]。然而,该模式需要亲本播种至始穗天数相近,且不育系抽穗时基本无包颈现象,这在一定程度上限制了水稻杂交组合的选配和杂种优势的发挥^[5,37]。同时,全程机械化运作需要配套大型机械设备,难以适应中国复杂多变的农业生产条件^[38]。

亲本混合直播是指将父本与母本种子按特定比例混合后,利用农业机械直接播种于制种田的制种方式。该方式成熟后存在父母本种子混杂收获的问题,目前已有几种方法用于杂交种 F_1 与恢复系种子的机械分离。第一种是物理方法,依据杂交种 F_1 与恢复系种子的粒型^[39-41]和颖壳颜色^[42]差异进行区分。第二种是化学方法,利用恢复系与不育系对除草剂的敏感性差异,选择性杀死恢复系^[43-44]。第三种是基于恢复系雌性不育特性^[45-47],使其无法结实,从而实现杂交水稻机械化混播制种。亲本机械化混合直播制种要求父本和母本的播始历期相近,且父本和母本在生育期内对温光、土壤、肥料和水分的反应一致,以确保花期相遇^[48]。此外,父本和母本对赤霉素的敏感性需保持一致,以保证父母本群体的开花习性相互协调^[49]。在采用化学分离方法或雌性不育系方法时,还需解决恢复系自身留种的

问题。目前,已报道的能够区分双亲并适用于杂交水稻混合直播的特异性资源仍然有限,且缺乏配套的机械分选设备和亲本组合的选育研究,因此机械化混播混收技术尚未实现大面积应用。

2.2 机械化移栽与人工移栽相结合

研究表明,母本机插作业效率可达人工栽插的5~6倍,显著减轻人工负担^[37]。刘驰等^[50]将机械化插秧与无人机植保、辅助授粉等技术相结合应用于杂交水稻制种,实现了制种主要环节的机械化。该方法省工、省力、省时,使母本有效穗数和总颖花数分别增加了12.29%~17.09%和19.11%~28.51%,产量提升了14.01%~16.94%,制种成本降低了10.52%,每1 hm²收入增加11 600元,实现了杂交水稻制种的轻简化种植。轻简化制种减少了人工种植等环节的劳动力投入,降低了劳动强度,尤其在季节性劳动力紧缺的情况下,能够有效缓解用工难题。此外,机械化作业速度快、效率高,能够适应大规模制种需求^[37]。

2.3 机械化移栽

杂交水稻制种机械化种植可显著提升种植效率、降低劳动强度,同时节省时间和成本^[51]。其中,亲本同步机械化移栽技术能够实现父本和母本同时移栽,大幅提高移栽效率,尤其适用于大规模基地生产。任万军等^[52]研发了一种父本和母本同机插秧方法,该方法基于现有插秧机进行亲本行比设置,将父本安排在边缘2行,其余秧厢种植母本,按照预设路线实现父本和母本同步机插,种植效率提高了61.80%,劳动力节省了69.00%。此外,熊玮等^[53]发明了一种独轮乘坐式插秧机,可同时移栽2行父本钵体苗和10行母本毯状苗,确保父本抽穗历期完整覆盖母本花期,产量较人工种植提高7.89%。值得注意的是,亲本同步机械化移栽要求父本和母本同时达到适宜的机插秧龄,因此不适用于父本和母本播期相差较大的制种组合。

由于杂交水稻制种面积较小^[54-55],导致农机企业缺乏动力研发专业化机械设备。因此,种植户只能使用常规水稻生产所用的机械化种植设备。然而,这些设备难以精准满足杂交水稻亲本多样化的种植密度要求。此外,种植户在借鉴常规机插的经验时,往往忽略了机插制种模式下亲本生长发育特性及其对栽培措施响应,这可能导致亲本花期偏移,结实率降低,最终影响制种产量^[56-57]。

2.4 机械化直播和移栽相结合

在杂交水稻制种过程中,部分亲本组合间存在播期差异较大的情况^[15,17-18],导致亲本秧苗难以同时达到最佳移栽的秧龄,因而无法实现同步直播或移栽。因此,对于这类播期差异较大的亲本组合,可采用直播和移栽相结合的方式。

周中林等^[58]发明了一种沟插垄播式杂交水稻制种机的开沟装置,该装置可实现父本沟底机插和母本垄台直播的复合种植模式,并同步实施父本浅水、母本湿润的水管理。通过优化开沟装置的参数,其漏播率和倒伏率低于2.00%,满足杂交水稻制种的农艺要求。高照玉^[59]发明了一种父本机抛秧、母本机直播的同步机械化种植播种机,父本直立率高于95.00%,母本每穴粒数合格率、漏穴率和穴距合格率分别为92.61%、0.34%和93.14%。刘顺财^[60]研发了一种可调节亲本行比的父母本同步插秧直播机,其不仅能够同步实现父本秧苗栽插和母本种子的精准播种,还能根据不同的制种组合和田块条件快速调整亲本行比,显著提升了机具的通用性和作业灵活性。王在满等^[61]发明了一种亲本同步播种插秧机,中间两行进行父本栽插,两侧进行母本播种,适用于播期差异较大的亲本。然而,这些研究需要对移栽农机进行专业改装,且对田块的平整度和机械操作精度要求较高,并且未深入探究不同种植方式对父母本群体建成的影响。

3 影响杂交水稻机械化制种产量的关键因素

3.1 机插秧苗质量

亲本育秧是杂交制种机械化种植的重要环节,健壮的秧苗是实现高产、稳产和优质的基础。在母本育秧方面,刘付仁等^[62]、徐向阳等^[63]应用印刷播种技术,实现了精准精量播种,节约了用种量,降低了生产成本。该技术适用于中苗移栽,有利于保障父本和母本花期相遇,维持秧苗平衡生长,显著提升秧苗素质。同时,机插秧后缓苗期缩短,有利于早发分蘖,使花期更稳定,最终提高异交结实率,增加制种产量。袁露等^[64]研究发现,在基质中添加食用菌渣可使母本秧块根系盘结力适中,漏秧率降至5.00%以下,每穴苗数均匀度提高3.70%~6.00%,从而有效提升母本机械移栽时的机插质量。在父本育秧方面,黄泽智等^[65]等应用软盘抛秧两段育秧技

术,减少了传统人工插秧的工时与劳动强度,减轻了旱育秧苗移栽时的损伤,该技术使秧苗具有更多低节位分蘖和有效穗。综上所述,在杂交水稻制种中,采用适宜的亲本育秧技术能够节约成本,提高秧苗素质和机插质量,为构建母本高产群体和父本高花粉量群体奠定基础。

3.2 种植密度

在杂交水稻制种田中,不育系占比最大且种植集中,其种植密度对制种产量和效率具有显著影响。He 等^[66]的研究结果表明,随着不育系种植密度的增加,有效穗数和产量均有所提升,但每穗粒数却呈下降趋势,最佳种植密度为 $1 \text{ hm}^2 2.5 \times 10^5$ 穴和 $1 \text{ hm}^2 2.85 \times 10^5$ 穴,最佳父本:母本行比为 8:1。商文奇等^[67]研究发现,在低密度种植条件下,茎蘖数不足导致分蘖期延长、无效分蘖增多,进而使母本花期延长且开花分散,产量低于高密度种植条件。然而,在高密度种植条件下,田间通透性较差,容易引发纹枯病和稻瘟病,导致植株发育不良、穗形变小、母本颖花数减少,并且倒伏风险增加。研究指出,母本有效穗数为 $1 \text{ hm}^2 3.00 \times 10^6 \sim 3.30 \times 10^6$ 穗,制种产量较高。程灿等^[68]研究发现,适当缩小母本行株距可通过增加有效穗数、提高恢复系花粉利用率提升制种产量,其中机械化制种的最佳父本:母本行比为 2:7 或 2:8,株行距为 $25 \text{ cm} \times 13 \text{ cm}$ 。合理的母本种植密度对制种产量至关重要:适宜的种植密度能够提升有效穗数和花粉利用率;而过高或过低的种植密度则会制约产量。

3.3 亲本行数占比

在杂交水稻制种过程中,恢复系与不育系的种植行数比例直接影响花粉供给量和授粉效率,进而影响制种产量。程灿等^[68]研究发现,在杂交粳稻申优 26 的机械化制种中,父本:母本行比为 2:7 或 2:8 时产量最高。而采用 3:12 的行比(父本厢宽 1.1 m)更有利于父本的机械化插秧和收割,可进一步节约成本、提高制种效率,从而提升整体制种效益。刘付仁等^[69]采用亲本全机械化种植模式(父本:母本行比 6:40),相较于传统人工种植模式(父本:母本行比 1:10),亲本全机械化种植模式的父本有效穗数和总颖花数分别显著增加 15.50% 和 15.02%,母本总颖花数提升 5.60%,最终增产 19.10%。He 等^[66]的研究结果表明,随着父本行数占比降低,结实率和种子产量呈下降趋势,可能是因

为恢复系的花粉无法传播到距离较远的不育系。综上所述,在杂交水稻机械化制种中,亲本行比是影响产量、机械化操作及种植效率的关键因素,合理设置亲本行比既能满足机械化作业需求,又能保障花粉传播并构建高产群体,对提升制种效益至关重要。

4 展望

大量研究结果表明,亲本生育期差异较大的各类杂交水稻组合均可实现机械化制种^[69-70]。基于中国杂交水稻的特点,研究机械化制种植技术、研发专用农机装备、推动农机与农艺融合,完全能够满足多类型亲本机械化种植的需求。针对当前杂交水稻制种机械化种植存在的问题,未来可从以下 4 个方面进行优化。

4.1 选育适宜机械化制种的亲本组合

适合机械化制种的杂交水稻组合应具备以下特征:父本和母本播期差异小、授粉态势好、耐高温能力强、光温反应钝感、对赤霉素敏感^[7]。播期差异小有利于父母本统一播种和管理,实现花期高度同步,无需人工调整花期,显著降低人工成本和劳动强度。授粉态势良好表现为父本花粉量充足且母本柱头活力高,有助于提高花粉扩散效率和异交结实率。耐高温能力强的品种能够在高温环境下维持花粉活力和授粉时期的稳定性^[71]。光温钝感品种生育期稳定,其播期差异受环境影响较小,有利于确保机械化生产如期完成。赤霉素能够调节株高和抽穗整齐度^[72],可有效解决花期不协调的问题,还能帮助母本的穗子顺利抽出,从而提高异交结实率。

4.2 培育适于机插的壮秧

为实现杂交水稻亲本的大规模机械化种植,需依托水稻集中育秧模式,开展父母本机插壮苗培育。以工厂化育秧为核心,集成应用叠盘出苗和精量条播技术。工厂化育秧实现从种子处理到育秧的全程机械化操作,为亲本秧苗生长提供最佳条件。叠盘出苗技术将播种后的秧盘叠放,具有良好的保温保湿效果,能有效应对出苗过程中的极端天气,提高出苗率。同时,该技术使秧苗生长均匀、整齐度高^[73-74]。精量条播技术可显著减少用种量,提高秧苗整齐度,使机插后植株生长均匀,花期集中,有利于构建健康高产群体。同时,该技术可增强根系盘结力,降低机插漏秧率,提升机插均匀度^[75]。

4.3 研发制种配套专用农机装备

在杂交水稻制种过程中,尚缺乏专用的种植机械设备。目前,中国种业领域的农机企业存在规模较小、装备功能有限、结构性能不佳、自动化控制水平较低等问题^[76]。与常规大田农机(如播种机、收获机等)相比,种业专用机械设备的研发技术要求更高,但市场容量相对较小,相关研发与生产仍处于初级阶段。农机企业需加大研发力度,开发针对杂交水稻制种的专用插秧机,或对现有常规插秧机进行改造,以实现父本和母本的单独机插或直播。对于亲本播期差异较小的组合,可实现同步直播或机插。对于亲本播期差异较大的组合,可采用直播与机插相结合的方式。所开发的设备应具备灵活调节行距、株距及亲本行比的功能,从而既能满足不同父母本对株行距的特定要求,又能适应多种行比配置,从而提高制种效率和质量。

4.4 深化农艺和农机融合

杂交水稻制种技术规范精细复杂,涵盖亲本播期差、行比、田间种植密度以及花期调控等技术要点。将先进种植技术与农业机械相结合,可有效提高制种效率,降低劳动强度,节省人工成本。在实现机械化种植的同时,优化亲本栽培密度与行比,配合科学的肥水管理与花期调控措施,有助于构建母本密植健康群体和父本大穗健壮高花粉量群体,促使父本和母本花期相遇,最终提高制种产量。

参考文献:

- [1] ZHANG L, PENG Y G, WEI X L, et al. Small RNAs as important regulators for the hybrid vigour of super-hybrid rice[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2014, 65(20):5989-6002.
- [2] 中国水稻研究所. 2024年中国水稻产业发展报告[M]. 北京:中国农业科学技术出版社, 2024:203-206.
- [3] HE Y B, YAN L, GE C N, et al. *PINOID* is required for formation of the stigma and style in rice[J]. *Plant Physiology*, 2019, 180(2):926-936.
- [4] QUAN X H, DOLUSCHITZ R. Factors influencing the adoption of agricultural machinery by Chinese maize farmers[J]. *Agriculture*, 2021, 11:1090.
- [5] 李青茂. 杂交水稻在美国实行机械化制种的要求和前景[J]. *杂交水稻*, 1990(2):45-47.
- [6] MARUYAMA K, KATO H, ARAKI H. Mechanized production of F₁ seeds in rice by mixed planting[J]. *Japan Agricultural Research Quarterly*, 1991, 24(4):243-252.
- [7] 唐文帮,陈晓军,张桂莲,等. 杂交水稻机械化制种现状与技术突破[J]. *中国稻米*, 2022, 28(5):20-27.
- [8] 汤楚宙,王慧敏,李明,等. 杂交水稻制种机械授粉研究现状及发展对策[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(4):1-7.
- [9] 袁隆平. 杂交水稻学[M]. 北京:中国农业出版社, 2002.
- [10] GU Z L, GONG J Y, ZHU Z, et al. Structure and function of rice hybrid genomes reveal genetic basis and optimal performance of heterosis[J]. *Nature Genetics*, 2023, 55:1745-1756.
- [11] BOTET R, KEURENTJES J J B. The role of transcriptional regulation in hybrid vigor[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2020, 11:410.
- [12] BIRCHLER J A. Hybrid vigour characterized[J]. *Nature*, 2016, 537:620-621.
- [13] 刘功朋,李晨,曾翔,等. 优质抗病杂交稻组合百优中占的选育及高产制种技术[J]. *中国种业*, 2024(8):134-136.
- [14] 钟日生,柳武革,刘伯全,等. 优质杂交晚粳新组合协禾优1002的选育及高产制种技术[J]. *中国种业*, 2024(8):116-118, 121.
- [15] 李守国,王登杰,褚旭东,等. 优质杂交中粳新组合国香优2115高产制种技术[J]. *杂交水稻*, 2024, 39(5):76-78.
- [16] 孙振东. 杂交粳稻组合丹梗优4号高产制种技术[J]. *北方水稻*, 2020, 50(6):68-69.
- [17] 张呈祥,刘洋,陆金根,等. 三系杂交粳稻新组合嘉优10号亲本特征特性及高产制种技术[J]. *农业科技通讯*, 2023(9):192-193, 208.
- [18] 张美英. 杂交粳稻申优28高产制种和栽培技术分析[J]. *安徽农学通报*, 2024, 30(7):14-18.
- [19] 顾明飞,高美凤,曹月琴,等. 杂交粳稻“秋优23”全程机械化高产制种技术[J]. *上海农业科技*, 2022(3):42-44.
- [20] 曾雪华,刘行军,曾欣,等. 杂交水稻制种花期相遇与气象条件的探讨[J]. *中国农业信息*, 2015(16):100-102.
- [21] 张定琪,陈再华,何小保,等. 杂交水稻制种亲本播期差综合指标法[J]. *气象*, 1992, 18(7):51-53.
- [22] 袁国良,况浩池,曾正明,等. 不同播期对杂交稻组合K优8615亲本制种性状的影响[J]. *安徽农业科学*, 2008, 36(12):4898-4899.
- [23] 康洪灿,李国生,王锦艳,等. 播种期对水稻两用核不育系育性转化和自交结实率的影响[J]. *中国稻米*, 2025, 31(1):100-105.
- [24] 陈英,李健芹,朱安俊. 杂粳亲本分期播种生育特性观察试验初报[J]. *上海农业科技*, 2018(6):34-35.
- [25] LIAO C C, YAN W, CHEN Z F, et al. Innovation and development of the third-generation hybrid rice technology[J]. *The Crop Journal*, 2021, 9(3):693-701.
- [26] QI X T, ZHANG C S, ZHU J J, et al. Genome editing enables next-generation hybrid seed production technology[J]. *Molecular Plant*, 2020, 13(9):1262-1269.
- [27] GABALLAH M, HAMAD H, BAMAGOOS A, et al. Flowering synchronization in hybrid rice parental lines at different sowing dates[J]. *Sustainability*, 2021, 13(6):3229.
- [28] 陈勇. 杂交水稻制种父本机插秧与施肥方法对其群体生长发育的影响[D]. 长沙:湖南农业大学, 2017.
- [29] 邱国学,邬小胜,熊旺和,等. 一种杂交水稻制种父本专用插秧

- 机;201721550064.4[P]. 2018-06-12.
- [30] 王永维,唐燕海,王 俊,等. 一种杂交水稻制种父本专用插秧机;201420217731.7[P]. 2014-10-01.
- [31] 张 雷. 交替移栽大小秧苗的父本制种插秧机研制[D]. 杭州:浙江理工大学,2015.
- [32] 陈家权,胡 丹,罗尚均. 杂交水稻制种产业面临的困境及解决途径的思考[J]. 中国种业,2012(12):80-81.
- [33] 翁晓星,徐锦大,赵 晋,等. 多旋翼无人机辅助籼粳杂交稻制种授粉研究[J]. 中国农机化学报,2022,43(9):24-29.
- [34] 王健伟. 无人机风场下的水稻花粉运动规律的研究[D]. 广州:华南农业大学,2016.
- [35] 李继宇,周志艳,兰玉彬,等. 旋翼式无人机授粉作业冠层风场分布规律[J]. 农业工程学报,2015,31(3):77-86.
- [36] 王云智,韩才斌,李龙先,等. 水稻直播技术的现状和进展[J]. 农业与技术,2018,38(15):121-122.
- [37] 董华林,武晓智,费震江,等. 杂交水稻轻简化机械化制种技术概述[J]. 农村经济与科技,2013(11):31-33.
- [38] 张海清,刘爱民. 杂交水稻全程机械化制种技术研究[C]//中国作物学会作物种子专业委员会 2017 年学术年会. 泰安,2017.
- [39] 周杰强,张桂莲,邓化冰,等. 水稻小粒不育系新组合卓两优 141 混播制种优势分析[J]. 作物学报,2022,48(2):320-331.
- [40] HUANG K, WANG Y X, LI Y J, et al. Modulation of histone acetylation enables fully mechanized hybrid rice breeding[J]. Nature Plants,2024,10(6):954-970.
- [41] YING J Z, QIN Y B, ZHANG F Y, et al. A weak allele of *TGW5* enables greater seed propagation and efficient size-based seed sorting for hybrid rice production [J]. Plant Communications, 2024,5(4):100811.
- [42] TAN Y N, LIU L, XU K, et al. The effects of mixed direct seeding of parental lines with different hull colors on the seed production of hybrid rice [J]. Plant Production Science, 2021,24(2):216-223.
- [43] 张德文. 杂交水稻混播制种技术研究[D]. 合肥:安徽农业大学,2007.
- [44] ZHANG D W, NI J L, WANG W L, et al. Mechanized seed production of xinhunyou No.6 through mixed seeding of parents' seeds[J]. Agricultural Science & Technology, 2015,16(12):2656-2663.
- [45] LI H X, YOU C J, YOSHIKAWA M, et al. A spontaneous thermo-sensitive female sterility mutation in rice enables fully mechanized hybrid breeding[J]. Cell Research,2022,32:931-945.
- [46] WANG X, YUAN S T, WANG C J, et al. Construction of a female sterility maintaining system based on a novel mutation of the *MEL2* gene[J]. Rice,2024,17:12.
- [47] LI W, GUO X Q, WU W B, et al. Construction of a novel female sterility system for hybrid rice [J]. Frontiers in Plant Science, 2022,12:815401.
- [48] 汤国华,谢红军,余应弘. 杂交水稻机械化制种研究的现状、问题与对策[J]. 湖南农业科学,2012(3):133-136.
- [49] 黄 萍. 杂交水稻繁殖三系中赤霉素的应用研究[J]. 安徽农业科学,2014,42(20):6567-6568,6596.
- [50] 刘 驰,刘伟定,张月雄,等. 广西桂北杂交水稻机械化制种技术应用效果研究[J]. 杂交水稻,2024,39(6):72-76.
- [51] 朱德峰,陈惠哲,徐一成. 我国水稻种植机械化的发展前景与对策[J]. 北方水稻,2007(5):13-18.
- [52] 任万军,陶有凤,秦 琴,等. 一种杂交稻父母本同机同体机插制种方法;202010646864.6[P]. 2020-10-02.
- [53] 熊 玮,朱德泉,朱德文,等. 杂交水稻制种父母本同栽插秧机设计与试验[J]. 浙江农业学报,2016,28(4):699-706.
- [54] 徐春春,闻军清,纪 龙,等. 中国水稻种业发展现状、问题与展望[J]. 中国稻米,2022,28(5):74-78.
- [55] 邓 伟,张新明. 中国水稻种业发展历程研究[J]. 中国种业,2022(11):1-10.
- [56] 秦 琴,陶有凤,黄帮超,等. 杂交水稻机插制种的亲本穗茎生长与花期特性[J]. 作物学报,2022,48(4):988-1004.
- [57] 黄帮超,陶有凤,秦 琴,等. 机插杂交稻制种异交结实特性研究[J]. 中国农业科学,2023,56(20):3960-3974.
- [58] 周中林,戴逸群,邱旺聪,等. 沟插垄播式杂交稻制种机开沟装置的设计与试验[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版),2022,48(3):355-362.
- [59] 高照玉. 杂交水稻制种父母本同步抛秧播种机的设计与试验[D]. 南昌:江西农业大学,2024.
- [60] 刘顺财. 杂交水稻制种父母本同步插秧直播机研究[D]. 广州:华南农业大学,2021.
- [61] 王在满,罗锡文,胡均万,等. 一种用于杂交水稻制种的同步播种插秧机及同步播种插秧方法;201721550064.4[P]. 2018-06-12.
- [62] 刘付仁,张 青,钟其全,等. 杂交水稻制种精准印刷播种育苗技术应用示范[J]. 中国种业,2021(3):106-108.
- [63] 徐向阳,朱孔志,丁世峰,等. 基于印刷播种的杂交水稻机插秧制种技术[J]. 大麦与谷类科学,2023,40(6):33-38.
- [64] 袁 露,王 明,张海清,等. 育秧基质对杂交水稻制种母本秧苗素质及机插质量的影响[J]. 作物研究,2016,30(4):364-369.
- [65] 黄泽智,陈世建,张振华,等. 软盘抛寄两段育秧技术在杂交水稻制种上的应用[J]. 作物杂志,2007(3):79-80.
- [66] HE L X, LUO H W, DUAN M Y, et al. Mechanized hybrid rice seed production;planting density,the flight height of an unmanned aerial vehicle, fertilizer application, and the row-ratio of parents [J]. Agronomy-Basel,2022,12(7):1572.
- [67] 商文奇,王艳华,邵国军,等. 不同密度与行比对杂交粳稻制种产量的影响[J]. 辽宁农业科学,2014(1):1-5.
- [68] 程 灿,徐跃明,周继华,等. 不同父母本行比对杂交粳稻申优 26 制种产量的影响[J]. 杂交水稻,2020,35(5):38-40.
- [69] 刘付仁,刘爱民,贺长青,等. 杂交水稻全程机械化制种关键技术示范[J]. 杂交水稻,2017,32(1):34-36.
- [70] 何 勇,向薇薇,李柏桥,等. 杂交水稻制种全程机械化技术研究及示范[J]. 四川农业与农机,2023(4):41-43,72.
- [71] FENG B H, ZHANG C X, CHEN T T, et al. Salicylic acid rever-

- ses pollen abortion of rice caused by heat stress [J]. *BMC Plant Biology*, 2018, 18:245.
- [72] ANSARI A, WANG C L, WANG J, et al. Engineered dwarf male-sterile rice: a promising genetic tool for facilitating recurrent selection in rice [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2017, 8:2132.
- [73] 朱德峰, 王岳钧, 陈惠哲, 等. 水稻机插叠盘出苗育秧模式 [J]. *中国稻米*, 2018, 24(3):7-9.
- [74] 陈惠哲, 向 镜, 王岳钧, 等. 水稻叠盘出苗育秧的种子出苗特性及秧苗机插效果 [J]. *核农学报*, 2020, 34(12):2823-2830.
- [75] 王亚梁, 朱德峰, 向 镜, 等. 杂交稻精量条播育秧机插漏秧率与均匀度分析 [J]. *中国稻米*, 2020, 26(3):66-68.
- [76] 武小燕, 王 磊. 我国杂交水稻制种机械化栽植探讨 [J]. *现代农业科技*, 2013(24):76, 78.

(责任编辑:成纾寒)