

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2022.02045

水稻小粒不育系新组合卓两优 141 混播制种优势分析

周杰强¹ 张桂莲^{1,2} 邓化冰^{1,2} 明兴权¹ 雷斌¹ 李凡¹
唐文帮^{1,2,*}

¹ 湖南农业大学农学院, 湖南长沙 410128; ² 湖南农业大学水稻油菜抗病育种湖南省重点实验室, 湖南长沙 410128

摘要: 传统的杂交水稻制种方式落后、效益低、成本高的问题, 制约了杂交稻推广应用。利用小粒型不育系可实现杂交水稻混播、混收、机械分离等全程机械化制种, 降低杂交稻制种成本, 提高制种效率。本研究以小粒型不育系卓 201S、大粒恢复系 R141 和新组合卓两优 141 为材料, 对其适合机械化制种的农艺性状、异交特性、混播制种及大面积制种实践进行了研究。结果表明, 与 C815S 相比, 卓 201S 株高较矮, 穗长较长且直立, 包颈粒率、穗萌率、黑粉病、开颖率均低于 C815S, 对“九二〇”较敏感, 且较难落粒, 具有较好的农艺性状。而 R141 株高较高, 花粉数量大, 花期长, 且对环境温度较钝感, 两者均具有良好的异交特性。卓 201S 谷粒厚 1.71 mm, 千粒重 14.00 g, R141 谷粒厚 2.23 mm, 千粒重 28.20 g, 两者籽粒大小差异显著, 通过特定的狭长形筛孔筛子, 实现了杂种 F₁ 与父本种子的高效分离, 杂交种子含父本率为 0, 杂种损失率为 2.31%, 种子纯度在生产上达标, 可实现机械化制种; 与传统制种模式相比, 混播制种可使父本基本苗减少 85%, 母本容量增加 20%, 制种产量增加 21.37%, 制种综合效益增加 31.4%。父母本较好的农艺性状、异交特性, 且粒型大小差异明显, 是小粒型不育系新组合卓两优 141 机械混播制种的优势, 可实现杂交水稻全程机械化制种, 因此具有广阔的应用前景。

关键词: 水稻; 小粒型不育系; 卓两优 141; 混播制种技术; 优势

Advantages of small grain male sterile lines in seed production for a new combination Zhuoliangyou 141 through the mixed-sowing manner

ZHOU Jie-Qiang¹, ZHANG Gui-Lian^{1,2}, DENG Hua-Bing^{1,2}, MING Xing-Quan¹, LEI Bin¹, LI Fan¹, and TANG Wen-Bang^{1,2,*}

¹ College of Agronomy, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, Hunan, China; ² Hunan Provincial Key Laboratory of Rice and Rapeseed Breeding for Disease Resistance, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, Hunan, China

Abstract: Traditional hybrid breeding is backward, low benefit, and high cost, which restricts the promotion and application in hybrid rice. However, Small Grain TMS lines are easy to be mechanically separated after mixed-sowing and mixed-harvesting. Their application will promote the realization of complete Mechanization of Hybrid Rice Seed Production, leading to the reduction of cost and the improvement of seed production efficiency. In this study, we investigated the agronomic characteristics and outcrossing rates suitable for Mechanization of Hybrid Rice Seed Production, using the Small Grain male sterile line Zhuo 201S, Large Grain restorer line R141, and their combination Zhuoliangyou 141 as materials for mixed-sowing and large-scale seed production practice. The results demonstrated that compared with the control TMS C815S, Zhuo 201S plants were shorter, exhibiting longer and more erect ear, fewer glume opening, lower percentage of panicle enclosure and germination on ears. Moreover, Zhuo 201S plants were resistant to smut disease but sensitive to “920” treatment and had weak seed-shattering characteristic. However, R141 plants were tall and insensitive to environmental temperature with large amount of pollen and a long florescence. Both Zhuo

本研究由国家重点研发计划项目(2017YFD0100303), 湖南省科技重大专项(2018NK1020)和湖南省重点研发计划项目(2017NK2013)资助。This study was supported by the National Key Research and Development Program of China (2017YFD0100303), the Major Scientific and Technological Special of Hunan Province (2018NK1020), and the Key Research and Development Program of Hunan Province (2017NK2013).

* 通信作者(Corresponding author): 唐文帮, E-mail: tangwenbang@163.com

第一作者联系方式: E-mail: crackzjq@163.com

Received (收稿日期): 2020-07-02; Accepted (接受日期): 2021-06-16; Published online (网络出版日期): 2021-07-21.

URL: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20210721.1336.004.html>

201S and R141 had good outcrossing characteristics. The grain thickness of Zhuo 201S and R141 was 1.71 mm and 2.23 mm, respectively. The 1000-grain weight of Zhuo 201S and R141 was 14.00 g and 28.20 g, respectively. Due to the significant difference in grain sizes, the hybrid F_1 seeds could be easily separated with the male parent seeds through a special sieve with narrow and long apertures. The percentage of male parent seeds mixed in hybrid seeds was 0 while the hybrid seed loss rate was 2.31%, suggesting that the seed purity met the standards for Mechanization of Hybrid Rice Seed Production. Compared with the traditional seed production mode, the basic seedling of male parent was reduced by 85%, the capacity of female parent was increased by 20%, the seed production yield was increased by 21.37%, and the comprehensive benefit of seed production was increased by 31.4%. Zhuoliangyou 141 was endowed with the advantages suitable for mechanized production by mix-sowing, with excellently agronomic traits and outcrossing properties along with huge difference in grain size from its parents. Therefore, the whole process of Zhuoliangyou 141 mechanized seed production had a broad application prospect.

Keywords: rice; small grain sterile line; Zhuoliangyou 141; mixed sowing seed production; advantage

水稻是我国的主要粮食作物之一, 全球约有一半以上的人口以水稻为主食^[1-2]。随着人口的快速增长, 可用耕地面积持续减少, 粮食安全问题日趋严重。据联合国粮农组织数据预测, 到 2025 年全球水稻产量需要达到 8 亿吨才能满足世界人口增长的需要^[3]。与常规稻相比, 杂交水稻在产量、资源利用效率等方面具有明显优势^[4]。杂交水稻的推广与应用极大地提高了水稻单产, 为保障我国粮食安全做出了重大贡献。目前杂交水稻制种仍然是劳动密集型产业, 由于传统杂交水稻制种模式程序复杂、劳动力稀缺导致杂交种生产成本高, 影响了优良杂交稻品种的推广应用^[5-6]。随着社会发展, 我国的水稻种植模式已经逐步走向轻简化、规模化、机械化, 新的种植模式用种量大幅增加, 高用种成本已经成为限制杂交水稻推广的主要因素之一^[7], 机械化制种是降低杂交稻种子价格的关键技术之一。因此, 培育适合机械化制种的杂交稻新组合、探究机械化制种新技术, 对降低杂交稻种子生产成本, 稳定杂交稻种植面积, 保障国家粮食安全具有重要意义。

水稻粒型性状遗传力高、受环境影响小、能够稳定遗传。利用粒型差异较大的小粒型不育系与大粒型恢复系种子进行混播制种, 成熟期混收后利用机械分选机分选获得高纯度的杂交种子是实现水稻机械化制种的一种思路^[8]。1996 年, 吕直文等^[9]发现杂交组合 II 优 86 的千粒重约为 23 g, 而父本千粒重在 35 g 以上, 父本粒形与杂交种存在较大差异, 利用机械筛选可将杂交种与父本种子区分。许二波等^[10]将由隐性基因控制的小粒型不育系与大粒恢复系进行配组, 得到的杂交种籽粒大小与父本具有明显差异, 采用一定规格孔径的筛子可进行机械筛选分离, 从而获得高纯度杂交种子。余应弘等^[11]育成的一个水稻光温敏小粒不育系千粒重在 11 g 左右, 利用一定大小的圆孔筛筛选多次, 可以将小粒种子单独筛

选出来, 且分离后种子纯度符合国家水稻良种纯度指标。综上所述, 利用水稻粒型差异实现杂交水稻制种机械化是一条切实可行的途径。

结合前人研究结果发现适合机械化制种的杂交稻组合的首要特征, 是要求父母本种子粒型差异要显著, 否则筛选机无法准确高效分选父本种子与杂交种。笔者所在课题组根据水稻种子粒型粒长>粒宽>粒厚的特点, 发现用 2 mm × 20 mm 的筛片分选种子能达到理想分选效果, 父母本种子必须具有合适的粒厚差异。因此课题组以粒厚为切入点, 结合粒长粒宽选育了一系列小粒型不育系。此外, 为配合机械化生产管理, 小粒不育系作为母本, 还须具有抽穗整齐, 穗型直立, 包颈程度低, 对赤霉素敏感, 柱头外露率高, 柱头活力强等适合机械化制种的性状。而父本应选用显性或不完全显性大粒型恢复系, 父本的粒厚要显著大于小粒不育系, 同时父本要具有抗倒性较好, 分蘖力强; 花时集中, 花粉量大, 花期长; 对赤霉素敏感; 生长发育对光温钝感等特性。基于以上设想, 笔者课题组定向培育出了水稻小粒不育系卓 201S 和与之形成互补并适合机械化制种的恢复系 R141, 选配出的适应机械化混播制种的新组合卓两优 141 (附图 1) 通过国家审定 (国审稻 20196103) 并大面积推广, 卓两优 141 于 2017—2018 年参加国家区试 (附表 1), 区试平均 9643.9 kg hm⁻², 比对照增产 4.38%, 增产点比例 93.30%, 稻瘟病综合指数 3.9 级, 穗瘟损失率最高级 7 级; 抽穗期耐热性 5 级。米质综合评级为部标优质 2 级, 是一个具有推广前景、适应机械化制种的杂交稻品种。

目前, 利用粒型差异较大的小粒型不育系与大粒型恢复系进行混播机械制种模式的研究尚未有应用于大规模生产的报道。本研究以水稻小粒型不育系卓 201S 与大粒恢复系 R141 配制的新组合卓两优 141 为材料, 对其父母本适合机械化制种农艺性状、

异交特性、混播制种技术及大面积制种实践进行了研究,旨在为杂交水稻机械化混播制种技术提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验材料为不育系:卓 201S、C815S;恢复系:R141、华占;杂交组合:卓两优 141。

1.2 试验方案

1.2.1 小面积不同制种模式试验 2019 年在湖南省长沙市望城县茶亭镇湖南希望种业科技股份有限公司科研基地进行,试验田地势平坦,土壤理化性状较好,土壤肥力中等。试验设置混播制种与传统制种 2 种制种模式。传统制种模式,母本卓 201S 于 5 月 23 日播种,父本 R141 于 4 月 30 日与 5 月 4 日分两期播种,父母本均在五叶一心期进行移栽,叶差 5.1,母本株行距为 20 cm × 20 cm,父本株行距为 20 cm × 27 cm,父母本比例为 2 : 10,每小区总长度 10 m,3 次重复,成熟期父母本分开收割。混播制种模式采用母本直播,父本抛秧方式,母本卓 201S 于 5 月 29 日播芽谷,播种量为 22.50 kg hm⁻²,父本 R141 于 5 月 4 日将芽谷播入抛秧盘(规格为 58 cm × 28 cm × 2 cm),播种量 60 g 每盘。于 5 月 29 日当秧苗生长为 5.5 叶期人工抛秧入制种田中,抛秧密度为 6750 株 hm⁻²,每小区 667 cm²,3 次重复,成熟期父母本混合收割,收后利用分选机进行机械分选。田间除草按直播田方式进行,田间肥水管理同一般杂交水稻制种。

1.2.2 大面积混播混收制种试验 2018 年在海南省东方市莺歌海制种基地采用母本直播,父本抛秧制种方式,母本于 1 月 28 日播种芽谷,父本于 1 月 3 日采用抛秧盘育秧,将芽谷播入抛秧盘(规格为 58 cm × 28 cm × 2 cm),播种量 60 g 每盘,于 1 月 28 日当秧苗生长到 5.5 叶期人工抛秧入制种田中,抛秧密度为 6750 株 hm⁻²,制种面积为 16.8 hm²;2019 年在湖南长沙县江背制种基地,采用母本直播,父本抛秧制种方式,母本于 5 月 29 日播种芽谷,父本于 5 月 1 日将芽谷播入抛秧盘(规格为 58 cm × 28 cm × 2 cm),播种量 60 g 盘⁻¹,于 5 月 29 日当秧苗生长为 5.5 叶期人工抛秧入制种田中,抛秧密度为 6750 株 hm⁻²,制种面积为 4.07 hm²;2019 年湖南怀化靖县制种基地采用母本直播,父本抛秧制种方式,母本于 6 月 1 日播种芽谷,父本于 5 月 5 日将芽谷播入抛秧

盘(规格为 58 cm × 28 cm × 2 cm),播种量 60 g 每盘,于 6 月 1 日当秧苗生长为 5.5 叶期人工抛秧入制种田中,抛秧密度为 6750 株 hm⁻²,制种面积为 20.27 hm²。成熟期均采用机械混收父母本种子,收后利用分选机进行父母本种子机械分选。大田准备时用激光平地拖拉机平地,田间肥水管理同一般制种田,除草按直播田方式进行。

1.2.3 亲本异交特性相关研究试验 于 2017 年在湖南省长沙市望城县茶亭镇湖南希望种业科技股份有限公司科研基地进行,试验田地势平坦,土壤理化性状较好,土壤肥力中等。母本卓 201S 和 C815S 于 5 月 25 日与 5 月 30 日分两期播种,父本 R141 和华占于 5 月 10 日和 5 月 17 日分两期播种。父母本均四叶一心期移栽,双苗移栽,田间管理同正常杂交水稻制种。

1.2.4 恢复系花粉量与气温相关性研究试验 于 2019 年在三亚、长沙两地进行。在三亚试验地点,R141 于 2018 年 12 月 1 日和 2019 年 1 月 10 日进行两期播种,华占于 2018 年 12 月 21 日和 2019 年 1 月 30 日进行两期播种,以保证其两期次播种盛花期一致,四叶一心期移栽,双苗移栽,株行距 20 cm × 27 cm,正常田间管理。在长沙试验地点,R141 于 5 月 13 日播种、华占于 5 月 29 日播种,以保证其盛花期一致,四叶一心期移栽,双苗移栽,株行距 20 cm × 27 cm,常规田间管理。

1.3 测定项目

1.3.1 父本抽穗动态、花期花时动态及花粉密度的观察 在试验小区中,父本从见穗期喷施“九二〇”后,每天 17:30 对 10 穴逐日记载抽穗数,计算始穗至完穗(抽穗 100%)的历期。另选择 10 穴,每天 18:00 逐日记载其开花数,计算出始花至终花的历期。父本盛花期连续 3 d,每天分别选择 10 个主穗,从 8:00 至 17:00,采用剪颖标记法,每 30 min 记载 1 次颖花增开数,当时开花数。在喷施完“九二〇”2 d 后开始,在每个制种模式相同位置设置与母本穗层同高的长、宽均为 15 cm 的 T 型支架,每天在 8:00 前放上涂抹过甘油的载玻片,13:00 将载玻片取出,在显微镜下观察记数,计算花粉密度,连续测定 7 d。每平方米花粉密度公式:视野平均花粉数量/视野面积 × 10⁶。

1.3.2 母本抽穗动态、花期花时动态的观察 在试验小区中,母本选择一个生长良好,较整齐的群体,从见穗期喷施“九二〇”后,每天 17:30 对 10 穴逐日记载抽穗数,计算始穗至完穗(抽穗 100%)的历期。另选择 10 穴,每天 18:00 逐日记载其开花数,计

算出始花至终花的历期。从母本始花起连续 4 d, 每天分别选择 10 个主穗, 从 8:00 至 17:00, 采用剪颖标记法, 每 30 min 记载 1 次颖花增开数, 当时开花数。

1.3.3 母本柱头外露率、柱头活力与柱头大小测定

在母本盛花末期选取代表性穗子 30 个, 调查柱头单露、双露情况。在开过花的同一天下午, 选取抽穗进程相同、大小一致、顶端开较少花的主穗, 剪去穗子上已开过的颖花, 套袋防外来花粉的干扰。次日下午, 剪除未开花和开花后柱头未外露的颖花, 处理完后封好袋口, 确保所有花的都是当天所开。自开花当天起, 每天上午用花粉量充足的父本授粉。各不育系每天授粉 3 个袋子, 连续授粉 12 d。待所有授粉完成后, 依次收获第 1~12 天授粉的杂交穗子, 调查其结实率, 并以结实率的平均值大小表示该不育系的柱头活力。用显微测量法测量柱头的长和宽。柱头面积=柱头长(Altitude, A) \times 柱头宽(Extent, E), 柱头体积= $\pi A(E/2)^2$ 。

1.3.4 考种与测产 于成熟期每个处理收获 5 株进行考种, 考察有效穗数、每穗总粒数、实粒数、结实率、千粒重, 计算理论产量; 成熟期每小区收割

晒干后测定实际产量。

2 结果与分析

2.1 父本 R141 异交特性分析

从表 1 可看出, 与对照华占相比, 父本 R141 株高、穗长与每穗粒数分别比华占多 6.30 cm、4.40 cm、47.10 粒; 单穗花期和单株花期分别比华占长 2 d 和 4 d; 开花时间集中, 且花粉密度大于华占。这表明父本 R141 株高增加, 穗长变长, 有利于形成较好的授粉态势, 同时每穗颖花数比华占增加 15% 以上, 盛花期花粉数量远大于华占, 且花期更长, 有利于与配组母本花期相遇, 保证制种产量。

从图 1 可知, 与正常温度(日平均温度为 27.5 $^{\circ}$ C)相比, R141 在三亚 3 月 10 日较低温度与长沙 8 月 20 日高温条件下, 花粉量分别为 29.50 万粒 m^{-2} 、30.70 万粒 m^{-2} , 分别减少 14.99%、11.53%, 而华占花粉量分别为 18.10 万粒 m^{-2} 、23.80 万粒 m^{-2} , 分别减少 33.7%、12.82%, 降低幅度大于 R141, 在一定程度上说明 R141 对环境温度相对不敏感, 对环境的总体适应性更好, 能保证制种的安全性。

表 1 父本 R141 异交特性

Table 1 Outcrossing characteristics of male parent R141

材料 Material	株高 PLH (cm)	穗长 PAH (cm)	单株穗数 PPP	每穗粒数 TGPP	单穗花期 FPPA (d)	单株花期 FPPL (d)	始花时间 ST	盛花时间 FLT	花粉密度 PD ($\times 10^4 m^{-2}$)
R141	115.7 \pm 2.4 a	28.30 \pm 1.8 a	9.2 \pm 0.8 b	209.4 \pm 10.4 a	6.0 \pm 0.7 a	10.0 \pm 1.1 a	10:50	11:05	108.0 \pm 8.9 a
华占 Huazhan	109.4 \pm 2.1 b	23.90 \pm 1.2 b	10.6 \pm 0.7 a	162.3 \pm 8.7 b	4.0 \pm 0.5 b	6.0 \pm 0.6 b	10:15	11:40	80.2 \pm 7.3 b

同一列数据后不同字母表示不同品种间在 0.05 水平差异显著。

Values within a column followed by different variety are significantly different at $P < 0.05$ between treatments. PLH: plant height; PAH: panicle height; PPP: panicle per plant; TGPP: total grains per panicle; FPPA: flowering period per panicle; FPPL: flowering period per plant; ST: starting time; FLT: full flowering time; PD: pollen density.

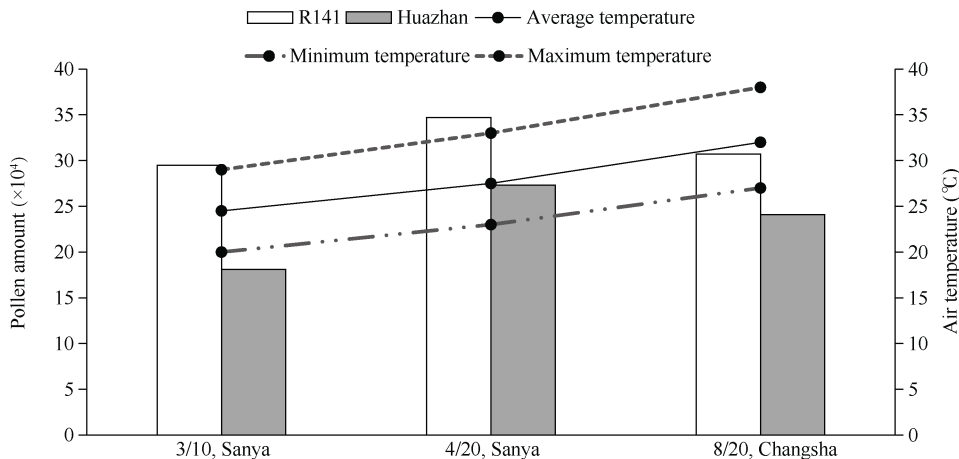


图 1 恢复系花粉量与气温之间的关系

Fig. 1 Relationship between pollen quantity and temperature in restorer lines

2.2 母本卓 201S 异交特性分析

2.2.1 穗期与花期动态 由图 2 可知, 卓 201S 见穗后前 3 d 新增抽穗率较低, 为总穗量 23.60%。8 月 14 日至 8 月 16 日是抽穗高峰期, 占总穗量的 65.30%。8 月 18 日基本齐穗, 群体见穗至齐穗历期为 8 d。由此可看出, 卓 201S 抽穗到达盛期速度快, 从盛穗期至完穗期(100%抽穗)仅需 5 d。在见穗后第 2 天, 即 8 月 12 日开始开花, 进入开花期, 8 月 22 日开花终止, 全花期约为 11 d。见穗后 5 d 内开花量只

占总开花量的 15.40%左右, 第 6 天起进入开花盛期, 持续 4~5 d, 开花量占总开花量的 71.00%, 此后 3 d 为末花期, 占总开花量的 13.60%, 可见卓 201S 的花期比较集中。

2.2.2 花时动态观察 从图 3 可看出, 卓 201S 花时早, 早上 8:00 开始开花, 10:00 出现开花高峰, 午前开花率高, 占一天总开花数的 70.10%。13:00—15:00 仍然陆续开花, 15:00 后开花数明显减少, 至 17:00 仍然有零星颖花开花。

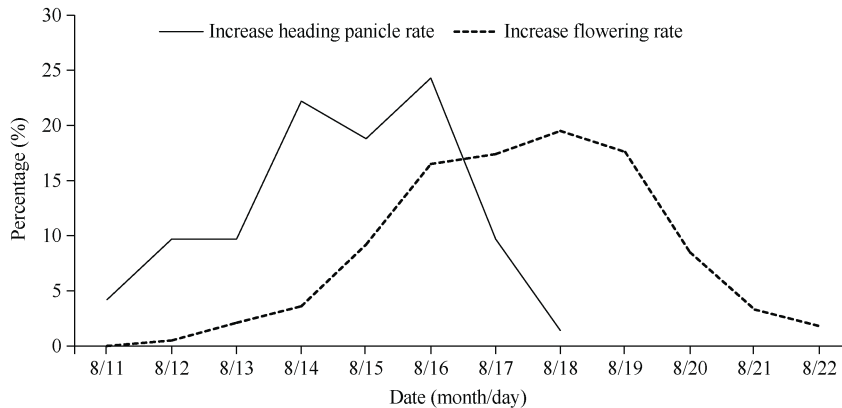


图 2 卓 201S 抽穗开花动态

Fig. 2 Dynamic variations of Zhuo 201S at heading and flowering stages

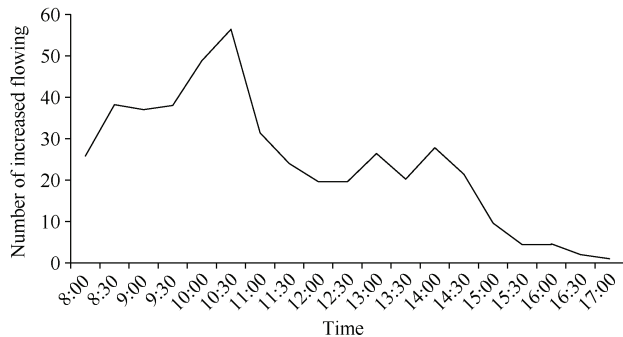


图 3 卓 201S 花时动态

Fig. 3 Dynamic variations of Zhuo 201S at different flowering time

2.2.3 柱头性状表现 由表 2 可知, 卓 201S 柱头的长、宽、面积、体积分别为 1.21 mm、0.40 mm、0.49 mm²、0.15 mm³, 而 C815S (CK) 柱头长、宽、面积、体积分别为 1.25 mm、0.46 mm、0.57 mm²、0.20 mm³, 卓 201S 的柱头略小于 C815S (CK) 的柱头; 从柱头外露率看, 卓 201S 柱头外露率为 87.64%, 其中单边外露率 34.08%, 双边外露率 53.56%。C815S (CK) 的柱头外露率为 85.00%, 单边外露率 29.06%, 双边外露率 55.40%, 卓 201S 的柱头总外露率高于 C815S。由表 3 可见, 卓 201S 开花当天的柱头活力

最高, 为 73.10%, 随着开花天数的增加, 其柱头活力逐渐降低, 开花前 5 d 的降低幅度不大, 第 5 天柱头活力还高达 39.80%, 第 6 天柱头活力急剧降低, 仅为 12.00%。随后几天柱头活力下降幅度不大, 开花后第 12 天仍保留一定的活力值, 为 5.30%。C815S (CK) 柱头活力最高为 68.60%, 开花第 7 天柱头活力仅有 3.70%, 第 8 天后柱头活力完全丧失。卓 201S 的柱头活力系数为 2.2, C815S 的柱头活力系数为 1.5。由此可知, 卓 201S 柱头活力高于 C815S, 且持续时间长。

2.3 父本 R141 与母本卓 201S 的农艺性状与籽粒性状

从表 4 可知, 与 C815S 相比, 卓 201S 株高较矮, 穗长较长且直立, 包颈粒率、穗萌率、黑粉病、开颖率均低于 C815S, 较难落粒; 与华占相比, R141 株高较高, 穗长较长, 对“九二〇”较敏感。这表明卓 201S 与 R141 具有适合机械化制种的农艺性状。从表 5 可知, 与华占相比, 父本 R141 的籽粒稍长, 粒较厚, 千粒重达 28.20 g; 母本卓 201S 籽粒厚度、千粒重小于对照 C815S, 父母本籽粒大小差异显著, 有利于机械分选。

表 2 卓 201S 的柱头大小和柱头外露率

Table 2 Stigma size and exsertion rate of Zhuo 201S

材料 Material	长度 Length (mm)	宽度 Width (mm)	面积 Area (mm ²)	体积 Volume (mm ³)	双边外露率 Bilateral exposure rate (%)	单边外露率 Unilateral exposure rate (%)	总外露率 Total exposure rate (%)
卓 201S Zhuo 201S	1.21±0.12 b	0.40±0.01 b	0.49±0.03 b	0.15±0.01 b	53.56±1.33 a	34.08±1.03 a	87.64±1.96 a
C815S (CK)	1.25±0.08 a	0.46±0.02 a	0.57±0.02 a	0.20±0.01 a	55.40±1.46 b	29.60±0.87 b	85.00±1.24 b

同一列数据后不同字母表示不同品种间在 0.05 水平差异显著。

Values within a column are significantly different at $P < 0.05$ between different varieties.

表 3 卓 201S 柱头活力

Table 3 Stigma vigour of Zhuo 201S (%)

材料 Material	8 月 11 日 Aug. 11	8 月 12 日 Aug. 12	8 月 13 日 Aug. 13	8 月 14 日 Aug. 14	8 月 15 日 Aug. 15	8 月 16 日 Aug. 16	8 月 17 日 Aug. 17	8 月 18 日 Aug. 18	活力系数 VC
卓 201S Zhuo 201S	73.1±1.7 a	60.1±1.3 a	52.7±0.8 a	47.0±0.4 a	39.8±0.4 a	12.0±0.4 a	10.0±0.4 a	8.8±0.4 a	2.2±0.1 a
C815S (CK)	68.6±1.9 b	48.9±1.1 b	30.0±0.6 b	21.0±0.6 b	11.2±0.4 b	7.9±0.4 b	3.7±0.4 b	0 b	1.5±0.1 b

同一列数据后不同字母表示不同品种间在 0.05 水平差异显著。

Values within a column followed by different variety are significantly different at $P < 0.05$ between treatments. VC: vitality coefficient.

表 4 R141 与卓 201S 的农艺性状

Table 4 Agronomic traits of R141 and Zhuo 201S

材料 Material	株高 PLH (cm)	穗长 PL (cm)	穗形 PT	包颈粒率 RWG (%)	经济系数 EC
卓 201S Zhuo 201S	60.5±1.9 a	27.6±0.6 a	直立 Erect	5.1±0.5 b	48.7±0.1 a
C815S	68.3±2.1 b	24.2±0.4 b	弯曲 Bend	15.7±0.8 a	40.6±0.2 b
R141	115.7±2.4 a	28.3±0.8 a	弯曲 Bend	—	44.9±0.2 b
华占 Huazhan	109.4±2.1 b	23.9±0.2 b	弯曲 Bend	—	47.2±0.3 a

材料 Material	“九二〇”敏感性 GAS	穗萌率 ESR (%)	黑粉病 SD	开颖率 GOR (%)	落粒性 SS
卓 201S Zhuo 201S	22.4±1.6 a	0.1±0 b	0 b	0.2±0.1 b	较难落粒 Not easy shattering
C815S	19.7±1.2 b	12.9±1.1 a	23.9±2.2 a	2.7±0.1 a	易落粒 Easy shattering
R141	35.6±2.4 a	—	—	—	—
华占 Huazhan	28.7±1.9 b	—	—	—	—

同一列数据后不同字母表示不同品种间在 0.05 水平差异显著。—: 无数据。

Values within a column followed by different variety are significantly different at $P < 0.05$ between treatments. PLH: plant height; PL: panicle length; PT: panicle type; RWG: rate of wrapped grains; EC: economic coefficient; GAS: GA sensitivity; ESR: ear sprouting rate; SD: smut disease; GOR: glume opening rate; SS: seed shattering; —: null.

表 5 R141 与卓 201S 籽粒形态性状

Table 5 Grain traits of R141 and Zhuo 201S

品系 Line	材料 Material	粒长 Grain length (mm)	粒厚 Grain width (mm)	长宽比 Length-width ratio	千粒重 1000-grain weight (g)
恢复系 Restorer line	R141	6.61±0.13 a	2.23±0.03 a	3.04±0.04 b	28.22±0.62 a
	华占 Huazhan	6.54±0.21 a	2.01±0.04 b	3.42±0.03 a	23.64±0.43 b
不育系 Sterile line	卓 201S Zhuo 201S	5.82±0.11 a	1.71±0.04 b	3.32±0.03 a	14.01±0.33 b
	C815S	5.63±0.16 a	1.96±0.02 a	2.95±0.03 b	23.42±0.56 a

同一列数据后不同字母表示不同品种间在 0.05 水平差异显著。

Values within a column followed by different variety are significantly different at $P < 0.05$ between treatments.

2.4 不同制种模式父母本基本苗与父本花粉密度的比较

从图 4 可知, 混播制种模式, 母本卓 201S 的基本苗为 58,629.3 株 hm^{-2} , 比传统制种方式增加母本量 76.68%, 而父本 R141 的基本苗为 6750 株, 比传统制种方式减少父本量 85%。因此, 与传统制种方式相比, 混播制种由于父本用量的减少, 有利于增加母本的基本苗, 从而增加制种产量。从图 5 可知, 传统制种模式父本花粉密度在 8 月 20 日达到峰值, 为 108 万粒 m^{-2} , 而混播制种模式中父本花粉密度在 8 月 22 日才达到峰值, 为 36 万粒 m^{-2} , 不到传统制种模式峰值的 1/2。传统制种模式的花粉密度极显著高于轻简化制种模式 ($P=9.72E-4$), 两者在 8 月 23 日(第 7 天)仍然有很高的花粉密度(>50%峰值), 说明父本 R141 的花期较长, 在 7 d 之后仍然能够产生一定量的花粉, 有利于父母本花期相遇, 提高杂交种结实率。此外传统制种模式采用两期父本, 花粉

密度的变化较大, 而轻简化制种模式的父本花粉密度呈平稳上升趋势到达峰值。混播制种模式中, 虽然群体花粉密度偏低, 但与传统制种模式结实率差异并不显著, 这可能是由于混播制种模式利用父本抛秧的方式, 将父本相对均匀种植在母本群体中, 促使父本花粉能够均匀散布, 提升花粉利用率。

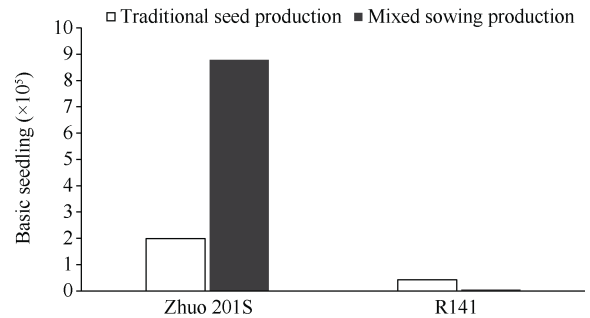


图 4 不同制种模式下卓 201S 与 R141 的基本苗
Fig. 4 Basic seedlings of Zhuo 201S and R141 under different seed production modes

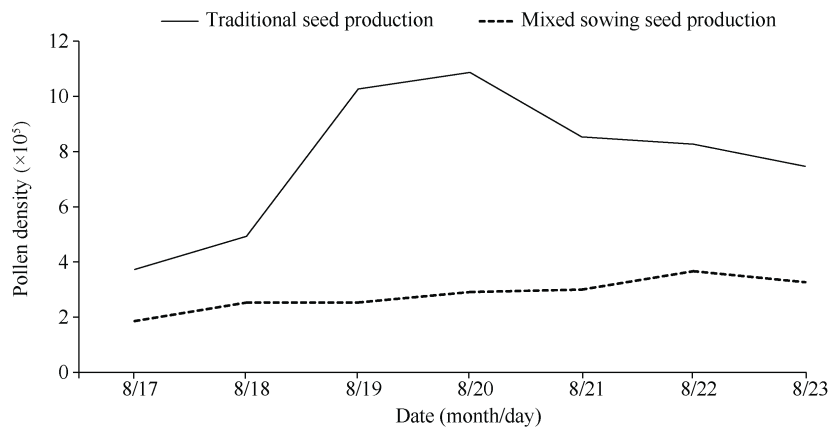


图 5 不同制种模式下 R141 花粉密度变化动态
Fig. 5 Dynamic variations of pollen density of R141 under different seed production modes

2.5 不同制种模式产量及产量构成因素比较

由表 6 可知, 混播制种, 实际产量上, 混播制种方式下制种产量达 5785.5 kg hm^{-2} , 较传统制种模式制种产量 4603.5 kg hm^{-2} 提高了 25.7%。混播制种产量提高原因, 主要是减少了父本基本苗, 增加了母本基本苗数, 使其群体有效穗增加, 从而提高产量。

2.6 不同制种模式制种效益的比较

从表 7 可知, 与传统制种模式相比, 母本容量比传统制种增加 20.00%, 制种产量增加 21.37%, 综合比较机械化制种与传统制种的效益, 机械化制种通过节省人工与提升产量的方式增加制种综合效益 31.40%, 极大地降低了杂交稻制种成本。

2.7 卓两优 141 大面积机械混播制种实践

自 2016 年开始, 笔者所在课题组利用小粒型不育系卓 201S 与配套父本 R141, 在湖南长沙、湖南怀化和海南三亚进行轻简机械化混播制种实践。采用父本抛秧, 母本直播, 机械混收的方式进行大规模制种实践(图 6)。根据 2 个亲本不同的播始历期, 父本提前采用软盘育秧来调控花期相遇, 母本芽谷直播同期父本进行抛秧, 父本密度为 6750 穴 hm^{-2} , 近 2 年卓两优 141 大面积制种平均产量保持在 3450 kg hm^{-2} 以上(表 8)。针对大粒恢复系与小粒不育系粒型的显著差异, 以粒厚为限制因子, 设计了特定的狭长形筛孔筛子, 实现了杂种 F_1 与父本种子的高效分离。通过对混收种子机械分选, 卓两优 141 组

合种子含父本率为 0%，杂种损失率为 2.31%，种子纯度在生产上达标^[12]，该制种方式经过多年实践证明，目前已经实现了大面积产业化，在保证制种产量的同时，大幅度减少劳动力成本。

3 讨论

随着社会的发展，传统精耕细作的水稻耕作模式

逐步向轻简化、规模化、机械化耕作方式转变，耕作模式的变化导致用种量的增加。杂交水稻制种程序复杂、生产效率低、劳动力成本上升导致杂交水稻制种成本高。传统劳动力密集型杂交水稻制种模式已经无法适应当下我国水稻制种轻简、高效的需求，机械化制种是解决这一矛盾并促进杂交水稻发展的关键技术之一。目前杂交水稻机械化制种仍处

表 6 不同制种模式产量性状比较

Table 6 Comparison of yield characters of different seed production modes

制种模式 SPM	单株有效穗 EPP	有效穗 EP (m ²)	每穗总粒数 TGP	结实率 SSR (%)	千粒重 GW (g)	理论产量 TY (kg hm ⁻²)	实际产量 AY (kg hm ⁻²)
混播制种 MSP	7.33±1.17 b	409.30±1.33 a	149.10±10.21 b	51.60±78 b	14.50±06 a	6843.00±12.45 a	5785.50±04.03 a
传统制种 TSP	13.47±1.49 a	272.60±3.12 b	168.50±12.36 a	53.90±25 a	14.50±08 a	5383.50±96.23 b	4603.50±79.65 b

同一列数据后不同字母表示不同品种间在 0.05 水平差异显著。

Values within a column followed by different variety are significantly different at $P < 0.05$ between treatments. SPM: seed production mode; MSP: mixed sowing seed production; TSP: traditional seed production; EPP: effective panicle per plant; EP: effective panicle; TGP: total grains per panicle; SSR: seed setting rate; GW: 1000-grain weight; TY: theoretical yield; AY: actual yield.

表 7 机械化混播制种与传统制种收益比较

Table 7 Comparison of benefit between mechanized mixed sowing seed production (MSP) and traditional seed production (TSP)

制种模式 SPM	种植方式 PM	辅助授粉 APM	收割方式 HM	母本容量 MC	异交率 AOR (%)	平均产量 AY (kg hm ⁻²)	综合效益 CBOSP (Yuan hm ⁻²)	增益 TAB
传统制种 TSP	移栽 Transplanting	需要 Yes	父母本分收 Parents separate harvesting		74.40±3.21 a	3382.50±96.33 b	67,650	—
机械化制 种 MSP	父母本机械混合直播 Parent-mixed direct seeding	无需 No	机械混收 Mechanical harvesting	增加 20.00% Increased by 20.00%	70.30±2.98 b	4105.50±106.76 a	82,110	1464 Yuan hm ⁻²
增加效益 TAB	4500 Yuan hm ⁻²	1500 Yuan hm ⁻²	1500 Yuan hm ⁻²	14,460 Yuan				31.40%

同一列数据后不同字母表示不同品种间在 0.05 水平差异显著。

Values within a column followed by different variety are significantly different at $P < 0.05$ between treatments. SPM: seed production methods; PM: planting methods; APM: auxiliary pollination methods; HM: harvesting methods; MC: maternal capacity; AOR: average outcrossing rate; AY: average yield; CBOSP: comprehensive benefits of seed production; TAB: total added benefit.

表 8 卓两优 141 混播制种实践

Table 8 Practice of mixed sowing seed production in Zhuoliangyou 141

年份 Year	地点 Place	有效穗 EP	每穗总粒数 SNPP	结实率 SSR (%)	千粒重 GW (g)	理论产量 TY (kg hm ⁻²)	实际产量 AY (kg hm ⁻²)
2018	三亚 Sanya	5492.2±252.3	152.4±10.5	70.6±6.5	13.9±0.6	5473.5±304.1	5073.3±268.4
2019	长沙 Changsha	5217.8±289.4	152.4±9.4	55.3±5.8	14.1±0.4	4133.7±248.4	3574.1±200.5
2019	怀化 Huaihua	4257.0±205.3	155.4±11.4	72.3±6.2	13.8±0.6	4398.1±268.3	3658.1±197.4

EP: effective panicle; SNPP: spikelet number per panicle; SSR: seed setting rate; GW: 1000-grain weight; TY: theoretical yield; AY: actual yield.



图 6 机械混播制种实践

Fig. 6 Practice of mechanized mixed sowing seed production

A: 卓两优 141 混播制种苗期田间照片; B: 卓两优 141 混播制种分蘖期田间照片; C: 卓两优 141 混播制种成熟期田间照片; D: 卓 201S 与恢复系 R141 粒型比较, 红色箭头所示为 R141 种子, 卓 201S 千粒重为 14.10 g, 粒厚 1.71 mm; 父本 R141 的千粒重为 27.80 g, 粒厚 2.32 mm; E: 分选机器所用的狭长形筛孔筛子(2 mm × 20 mm); F: 分选后的卓两优 141 杂交种(左)和恢复系 R141 (右)种子。

A: field picture of seedling stage of hybrid seed production for Zhuoliangyou 141 with mixed and direct seeding way; B: field picture at booting stage of hybrid seed production for Zhuoliangyou 141 with mixed and direct seeding way; C: field picture at full heading stage of hybrid seed production for Zhuoliangyou 141 with mixed and direct seeding way; D: field picture at mature stage of hybrid seed production for Zhuoliangyou 141 with mixed and direct seeding way; E: comparison of grain types between Zhuo 201S and the restorer line R141, the grains with red arrow shows R141 seed, the 1000-grain weight of Zhuo 201S is 14.10 g, the grain thickness of Zhuo 201S is 1.71 mm, the 1000-grain weight of R141 is 27.80 g, the grain thickness of R141 is 2.32 mm; E: the long and narrow mesh sieve used in sorting machine; F: seeds of hybrid rice Zhuoliangyou 141 (left) and restorer line R141 (right) after sorting.

于探索阶段, 各种方式均存在一定不足, 部分方法仍然停留在理论阶段。花粉活性如何安全经济保存是父母本分片集中种植, 进行机械采粉授粉实现制种机械化方式^[13]的一大难题; 美国应用大行比分植法^[14]实现杂交水稻机械化制种的案例无法完全应用在我国, 但经国内专家改良, 目前在特定环境下能初步实现杂交水稻机械化制种, 但距离全面推广需对机械化栽培方式进一步探索, 以及适应机械化制种的亲本组合的培育, 还需要配套产业的跟进; 依靠除草剂敏感(耐受)基因通过生化途径实现混播机械化制种的技术^[15-19]也存在农药残留与致死不完全等因素, 导致无法在生产上使用; 利用雌性不育的杂交稻机械化制种技术^[21-23]将分子生物技术与传统育种方法相结合, 是运用转基因技术生产非转基因种子的一种全新制种方法, 不过在该方法中雌性不育恢复系的繁殖过程涉及到转基因植株, 相关政策尚未制定, 目前同样存在一定的缺陷; 利用父本与杂交 F_1 种子粒色的明显差异, 采用特殊的光学仪器将父本与 F_1 种子区分的方法^[24-26], 往往存在筛选率低、父本去除不净等问题。

本研究表明, 利用小粒型不育系进行杂交水稻机械化混播制种有其他方法无法实现的优点。(1) 父母本具有适合机械化操作的农艺性状与异交特性;(2) 通过改变父本的种植方式, 使父本均匀散布在田间, 在保证结实率不受影响的同时大量缩减父本数量, 与传统制种模式相比, 母本容量比传统制种增加 20%, 制种产量增加 21.37%; (3) 利用大粒恢复系与小粒不育系粒厚差异, 设计特定的狭长形筛孔筛子, 实现了杂种 F_1 与父本种子的高效分离, 杂交种子含父本率为 0, 杂种损失率为 2.31%, 种子纯度在生产上达标, 可实现机械化制种, 降低杂交稻制种成本, 增加制种效益;(4) 小粒型不育系繁殖系数高, 可减少用种量, 降低用种成本。(5) 利用混播法进行杂交水稻机械化制种可以不受田块大小的限制, 适应我国制种区域复杂的地形, 有利于推广应用。因此, 通过小粒型不育系实现杂交水稻机械化混播制种是一种较为理想的制种方式, 具有广阔的应用前景。

4 结论

与 C815S 相比, 卓 201S 株高较矮, 穗长较长

且直立, 包颈粒率、穗萌率、黑粉病、开颖率均低于 C815S, 对“九二〇”较敏感, 且较难落粒, 具有较好的农艺性状。卓 201S 花期集中, 日开花高峰为 9:30—11:00, 午前花占 70.10%, 开花历期长, 柱头活力强, 持续时间达 12 d, 柱头外露率 87.64%; 而 R141 株高较高, 花粉数量大, 花期长, 且对环境温度较钝感, 两者均具有良好的异交特性。卓 201S 谷粒厚 1.71 mm, 千粒重 14.00 g, R141 谷粒厚 2.23 mm, 千粒重 28.20 g, 两者籽粒大小差异显著, 有利于机械分选。与传统制种模式相比, 混播制种母本容量增加 20%, 父本基本苗减少 85%, 制种产量增加 21.37%, 制种综合效益增加 31.40%。这表明小粒型不育系新组合卓两优 141 机械混播制种优势明显, 可实现杂交水稻全程机械化制种, 具有广阔的应用前景。

References

- [1] Khush G S. What it will take to feed 5.0 billion rice consumers in 2030. *Plant Mol Biol*, 2005, 59: 1–6.
- [2] 袁隆平. 发展杂交水稻保障粮食安全. 科学新闻, 2014, (12): 32–33.
Yuan L P. Develop hybrid rice to ensure food security. *Sci News*, 2014, (12): 32–33 (in Chinese with English abstract).
- [3] 彭少兵. 转型时期杂交水稻的困境与出路. 作物学报, 2016, 42: 313–319.
Peng S B. Dilemma and way-out of hybrid rice during the transition period in China. *Acta Agron Sin*, 2016, 42: 313–319 (in Chinese with English abstract).
- [4] 李晏军. 中国杂交水稻技术发展研究(1964–2010). 南京农业大学博士学位论文, 江苏南京, 2010.
Li Y J. Study on the Development of Hybrid Rice Technology in China (1964–2010). PhD Dissertation of Nanjing Agricultural University, Nanjing, Jiangsu, China, 2010 (in Chinese with English abstract).
- [5] 许二波. 水稻小粒突变的基因定位及育种利用研究. 中国农业科学院硕士学位论文, 北京, 2015.
Xu E B. Study on Gene Location and Breeding Utilization of Rice Small Grain Mutation. MS Thesis of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing, China, 2015 (in Chinese with English abstract).
- [6] 石萌萌. 杂交水稻发展推广面临新考验. 科技导报, 2014, 32(27): 9.
Shi M M. The new challenges of development and extension of hybrid rice. *Sci Technol Rev*, 2014, 32(27): 9 (in Chinese with English abstract).
- [7] 刘延斌, 杨远柱, 刘建丰, 符辰建, 秦鹏, 胡小淳. 杂交水稻亲本混播机械化制种研究进展. 作物研究, 2012, 26(1): 85–87.
Liu Y B, Yang Y Z, Liu J F, Fu C J, Qin P, Hu X C. Research progress of mechanization production of hybrid rice seed through parents' seeds mixed plant. *Crop Res*, 2012, 26(1): 85–87 (in Chinese with English abstract).
- [8] 唐文帮, 张桂莲, 邓化冰. 杂交水稻机械化制种的技术探索与实践. 中国水稻科学, 2020, 34: 95–103.
Tang W B, Zhang G L, Deng H B. Technology exploration and practice of hybrid rice mechanized seed production. *Chin J Rice Sci*, 2020, 34: 95–103 (in Chinese with English abstract).
- [9] 吕直文, 郑济万, 卿明敬, 黄成文. 杂交水稻理想型机械化制种组合 II 优 86. 杂交水稻, 1996, 9(5): 12–13.
Lyu Z W, Zheng J W, Qing M J, Huang C W. II You 86, a suitable hybrid rice for hybrid seed production mechanization. *Hybrid Rice*, 1996, 9(5): 12–13 (in Chinese with English abstract).
- [10] 许二波, 王跃星, 倪深, 陈红旗, 朱旭东. 水稻隐性小粒基因在杂交稻种子机械分选上的应用研究. 中国稻米, 2015, 21(3): 8–11.
Xu E B, Wang Y X, Ni S, Chen H Q, Zhu X D. Application of small grain recessive gene in the mechanical sorting of hybrid rice seeds. *China Rice*, 2015, 21(3): 8–11 (in Chinese with English abstract).
- [11] 余应弘. 小粒矮秆水稻在杂交水稻工程化制种中的应用基础研究. 湖南农业大学博士学位论文, 湖南长沙, 2010.
Yu Y H. Basic Research on the Application of Small Grain Dwarf Rice in Hybrid Rice Engineering Seed Production. PhD Dissertation of Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan, China, 2010 (in Chinese with English abstract).
- [12] 明兴权. 水稻小粒型两用核不育系卓 201S 应用研究. 湖南农业大学硕士学位论文, 湖南长沙, 2018.
Ming X Q. Study on the Application of Small Grain CMS Lines Zhuo 201S. MS Thesis of Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan, China, 2008 (in Chinese with English abstract).
- [13] 彭正明, 周逢明. 母本机械直播技术在杂交水稻集约化制种上的应用初探. 杂交水稻, 2000, 15(6): 27–32.
Peng Z M, Zhou F M. Application of the mechanized direct seeding technique in hybrid rice seed production. *Hybrid Rice*, 2000, 15(6): 27–32 (in Chinese with English abstract).
- [14] 李青茂. 杂交水稻在美国实行机械化制种的要求和前景. 杂交水稻, 1990, (2): 45–47.
Li Q M. The requirement for mechanization of hybrid rice seed production in USA and its prospects. *Hybrid Rice*, 1990, (2): 45–47 (in Chinese with English abstract).
- [15] 傅亚萍, 朱正歌, 肖晗, 胡国成, 斯华敏, 于永红, 孙宗修. 抗除草剂基因导入培矮 64S 实现杂交水稻制种机械化的初步研究. 中国水稻科学, 2010, 15: 97–100.
Fu Y P, Zhu Z G, Xiao H, Hu G C, Si H M, Yu Y H, Sun Z X. Primary study on mechanization of seed production of hybrid rice by inducing *Bar* gene to Pei'ai 64S. *Chin J Rice Sci*, 2010, 15: 97–100 (in Chinese with English abstract).
- [16] 张德文, 杨前进, 王士梅, 汪婉琳, 朱启升. 混制 1 号机械化混播制种生产技术. 中国农学通报, 2008, 24(10): 66–69.
Zhang D W, Yang Q J, Wang S M, Wang W L, Zhu Q S. The production technology of seeds by mechanize of Hunzhi No. 1. *Chin Agric Sci Bull*, 2008, 24(10): 66–69 (in Chinese with English abstract).
- [17] 颜昌伟. 一种利用叶绿体转基因技术的机械化杂交稻制种方

- 法: 20091004373. 2010-12-09.
- Yan C W. A mechanized hybrid rice seed production method using chloroplast transgenic technology: 20091004373. [2010-12-09]. <https://d.wanfangdata.com.cn/patent/ChJQYXR-lbnROZXdTmJyMTAxMDkSEENOMjAwOTEwMDQzNzM-1LjEaCGplYnl0cHBq>. (in Chinese)
- [18] 朱启升. 杂交水稻混播制种技术研究进展. 作物研究, 2004, 18(4): 204-207.
- Zhu Q S. Research progress on hybrid rice seed breeding by mixed planted. *Crop Res*, 2004, 18(4): 204-207 (in Chinese with English abstract).
- [19] 张集文. 水稻苯达松敏感突变研究进展. 中国水稻科学, 2010, 24: 551-558.
- Zhang J W. Progress on the study of the Bentazon sensitive mutants in rice. *Chin J Rice Sci*, 2010, 24: 551-558 (in Chinese with English abstract).
- [20] 朱祯. 转基因水稻研发进展. 中国农业科技导报, 2010, 12(2): 9-16.
- Zhu Z. Research progress and development of transgenic rice. *J Agric Sci Technol*, 2010, 12(2): 9-16 (in Chinese with English abstract).
- [21] 高荣村, 路金根, 范国华, 徐美玲, 李金军. 一份水稻雌性全不育隐性突变体的基本特性. 浙江农业科学, 2007, (5): 529-530.
- Gao R C, Lu J G, Fan G H, Xu M L, Li J J. Basic characteristics of a recessive male and female sterile mutant of rice. *J Zhejiang Agric Sci*, 2007, (5): 529-530 (in Chinese with English abstract).
- [22] Chang Z Y, Chen Z F, Wang N, Xie G, Lu J W, Yan W, Zhou J L, Tang X Y, Deng X W. Construction of a male sterility system for hybrid rice breeding and seed production using a nuclear male sterility gene. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2016, 113: 14145-14150.
- [23] Xia Y M, Tang N, Hu Y Y, Li D, Li S C, Bu X L, Yu M L, Qi S W, Yang Y S, Zhu H J, Cao C Y, Li P, Yuan L P, Cao M L. A method for mechanized hybrid rice seed production using female sterile rice. *Rice*, 2019, 12: 39.
- [24] 吴春珠, 程祖辛, 赵明富, 郑建华, 杨聚宝. 水稻雄性不育系博白 A 的抽穗期遗传分析. 安徽农学通报, 2005, 11(6): 55-57.
- Wu C Z, Cheng Z X, Zhao M F, Zheng J H, Yang J B. Genetic analysis of heading stage of rice male sterile line Bobai A. *Anhui Agric Sci Bull*, 2005, 11(6): 55-57 (in Chinese with English abstract).
- [25] 何立斌, 曹立勇, 钱前, 程式华. 稻壳颜色标记在杂交水稻制种中的应用初探. 浙江农业学报, 2001, 13: 357-360.
- He L B, Cao L Y, Qian Q, Cheng S H. The prospects of hybrid rice seed production by using rice chaff colour marker. *Acta Agric Zhejiangensis*, 2001, 13: 357-360 (in Chinese with English abstract).
- [26] 许可, 袁定阳, 谭炎宁, 段美娟. 适于混播制种的水稻隐性红颖资源 RG-1 的发现及其特征特性研究. 杂交水稻, 2018, 33(4): 17-21.
- Xu K, Yuan D Y, Tan Y N, Duan M J. Discovery and characteristic investigation of a recessive red-glume germplasm RG-1 with applied potential in mixed sowing of hybrid rice seed production. *Hybrid rice*, 2018, 33(4): 17-21 (in Chinese with English abstract).



附图 1 卓两优 141 田间图片

Fig. S1 Field picture of Zhuoliangyou 141

附表 1 卓两优 141 参加 2017–2018 年国家区试表现

Table S1 Performance of Zhuoliangyou 141 in 2017 and 2018 national regional test

品种 Variety	产量 Yield (kg hm ⁻²)	生育期 GP (d)	有效穗 EP	株高 PLH (cm)	穗长 PL (cm)	每穗总粒数 SNPP	结实率 SSR (%)	千粒重 GW (g)	稻米品质 Rice quality
卓两优 141 Zhuoliangyou 141	9531	138.0	247.5	118.5	26.0	241.5	78.4	23.3	优质二级 The second class stand of fine quality rice
丰两优 4 号 Fengliangyou 4	9132	135.6	220.5	126.0	25.2	192.1	83.9	27.9	优质三级 The third class stand of fine quality rice

GP: growth period; PLH: plant height; PL: panicle length; SNPP: spikelet number per panicle; SSR: seed setting rate; GW: 1000-grain weight.