作物学报 ACTA AGRONOMICA SINICA 2023, 49(10): 2738–2752 http://zwxb.chinacrops.org/
ISSN 0496-3490; CN 11-1809/S; CODEN TSHPA9 E-mail: zwxb301@caas.cn

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2023.22065

新育成超短生育期品系在双季稻双直播下的产量表现及农艺特性

潘想成[1,2] 杨国栋[1] 符迎迎[1] 王昕钰[1,3] 熊 渠[2] 徐 乐[1,4,*] 彭少兵[1,*]

[1] 华中农业大学作物遗传改良国家重点实验室 / 湖北洪山实验室 / 长江中游作物生理生态与耕作制度重点实验室 / 华中农业大学植物科学技术学院, 湖北武汉 430070; [2] 孝感市农科院, 湖北孝感 432000; [3] 广东省农业科学院水稻研究所 / 农业农村部华南优质稻遗传育种实验室(省部共建), 广东广州 510640; [4] 东北农业大学, 黑龙江哈尔滨 150030

摘 要: 为探究新育成超短生育期品系在双季稻双直播模式下的产量表现及关键的高产农艺特性, 本研究以超短生育期新品系 CPPC18 和 4 个对照品种(湘早籼 6 号、早籼 615、中早 39 和两优 152)为供试材料, 2021 年在湖北黄冈进行双季稻双直播的小区试验和生产示范, 测定冠层光照拦截、干物质积累、倒伏特性、产量和产量构成因子等农艺性状。试验结果表明, 超短生育期新品系在双季稻双直播模式下早晚兼用的单季生育期在 95 d 以内, 周年生育期为 180~183 d, 这比湘早籼 6 号早晚兼用增加 7~9 d, 而比早籼 615 早晚兼用和中早 39 与两优 152 早晚搭配分别缩短 4~8 d 和 16~22 d。在小区试验中, 超短生育期新品系 CPPC18 的周年产量相比其他品种增加 7.2%~14.6%, 达到 14.9 t hm^{-2}。超短生育期新品系较高的周年产量主要得益于其早季较强的早发特性和晚季较高的单位面积颖花数、结实率和收获指数。此外, 超短生育期新品系具有比其他品种更强的抗倒伏能力, 这主要得益于其较低的株高、重心高度和弯曲力矩。在生产示范中, 超短生育期新品系的周年产量同样表现出明显优势, 相比其他对照品种增产 12.7%~21.6%。综上所述, 超短生育期新品系 CPPC18 能够满足华中地区双季稻双直播高产稳产要求, 具有良好的推广前景。

关键词: 农艺特性; 双季稻双直播; 超短生育期; 生产示范; 产量

Yield performance and agronomic characteristics of a newly developed ultrashort-duration line in direct-seeded double-season rice system

PAN Xiang-Cheng[1,2], YANG Guo-Dong[1], FU Ying-Ying[1], WANG Xin-Yu[1,3], XIONG Qu[2], XU Le[1,4,*], and PENG Shao-Bing[1,*]

[1] National Key Laboratory of Crop Genetic Improvement / Hubei Hongshan Laboratory / MARA Key Laboratory of Crop Ecophysiology and Farming System in the Middle Reaches of the Yangtze River / College of Plant Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, Hubei, China; [2] Xiaogan Academy of Agricultural Sciences, Xiaogan432000, Hubei, China; [3] Rice Research Institute, Guangdong Academy of Agricultural Sciences / Key Laboratory of Genetics and Breeding of High Quality Rice in Southern China (Co-construction by Ministry and Province), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangzhou 510640, Guangdong, China; [4] College of Agriculture, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, Heilongjiang, China

Abstract: The objective of this study is to explore the yield performance and yield-related traits of a newly developed ultrashort-duration line in direct-seeded double-season rice system. An ultrashort-duration line named CPPC18, and four check cultivars (Xiangzaoxian 6, Zaoxian 615, Zhongzao 39, and Liangyou 152) were grown as the direct-seeded double-season rice in both plot-level and on-farm experiments in Hubei province in 2021. We measured canopy light interception, biomass accumulation, lodging characteristics, yield, and yield components. The result showed that the new line matured within 95 days in each season, and its annual growth duration was 180–183 days. This was 7–9 days longer than Xiangzaoxian 6, but 4–8 days and 16–22 days shorter than Zaoxian 615 and the combination of Zhongzao 39 (early season) and Liangyou 152 (late season), respectively. In

本研究由国家自然科学基金项目(31971845)和财政部和农业农村部国家现代农业产业技术体系建设专项(水稻, CARS-01-20)资助。
This study was supported by the National Science Foundation of China (31971845) and the China Agriculture Research System of MOF and MARA (Rice, CARS-01-20).

* 通信作者(Corresponding authors): 彭少兵, E-mail: speng@mail.hzau.edu.cn; 徐乐, E-mail: xule@neau.edu.cn
第一作者联系方式: E-mail: pxc18298400235@163.com

Received (收稿日期): 2022-12-14; Accepted (接受日期): 2023-04-17; Published online (网络出版日期): 2023-04-25.
URL: https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20230424.1546.012.html

This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

the plot-level experiment, the annual yield of CPPC18 reached 14.9 t hm^{-2} and increased by 7.2%–14.6% compared with other cultivars. Yield advantage of CPPC18 was mainly attributed to its early vigor in early season and higher spikelets per m^{-2}, grain filling percentage, and harvest index in late season. Besides, the lodging resistance of CPPC18 was stronger than other cultivars due to its lower plant height, the center of gravity height, and bending moment. Similarly, CPPC18 also had yield advantages over other cultivars in the on-farm experiment. The annual yield increased by 12.7%–21.6% over other cultivars. In conclusion, the newly developed ultrashort-duration line CPPC18 was suitable for direct-seeded, double-season rice system in central China for achieving high and stable yield.

Keywords: agronomic characteristics; direct seeding double-season rice; ultrashort-duration; on-farm experiment; yield

水稻是我国最重要的口粮作物, 有超过 65%的人口以稻米为主食。预计到 2030 年我国稻米需求将比 2017 年增加 4100 万吨[1]。因此, 保持水稻持续增产对于保障粮食安全至关重要。水稻总产的增加依赖于(1) 扩大耕地面积; (2) 提高单产水平; (3) 提高复种指数[2]。研究表明, 在当前耕地面积有限、单产水平增速放缓的背景下, 增加复种指数是提高水稻总产的重要途径[3]。

双季稻是提高复种指数的有效措施, 稳定双季稻生产意义重大。华中地区是我国重要的双季稻区, 该地区双季稻大多采用育秧移栽方式进行作物建成[4]。传统的移栽双季稻每年需要 2 次育秧、拔秧和插秧, 劳动力投入大、劳动强度高。随着我国经济发展和城镇化推进, 农村劳动力日益短缺, 水稻生产成本不断攀升, 传统移栽双季稻难以适应当前水稻生产新形势, 农民种植积极性大幅下降[5]。据统计, 相比于 1999 年, 2018 年我国双季稻种植面积下降约 37% (国家统计局 2022)。双季稻双直播是指早、晚季均采用直播方式完成作物建成的种植模式。相比于传统移栽双季稻, 采用双季稻双直播可以显著降低劳动力投入和劳动强度[6]。然而, 受温光资源限制, 华中地区水稻全年的安全生长期平均为 195~209 d[4]。由于双季稻双直播省去了 2 次秧田期, 这就要求双季稻双直播生产必须使用生育期为 95 d 左右的超短生育期品种, 以确保在大规模种植情况下农事操作时间充裕, 早晚季顺利接茬[7-8]。目前, 现有的双季早稻品种的生育期普遍为 110~120 d, 晚稻品种为 120~130 d。这些早晚稻品种并不能满足双季稻双直播模式对生育期的要求, 在生产中应用这些品种难以保证晚稻正常成熟, 难以获得高产[9]。因此, 高产超短生育期品种短缺严重限制了华中地区双季稻双直播的发展。

一般来说, 短生育期品种的产量潜力低于中、长生育期品种。这主要是由于生育期缩短导致水稻生长季内入射太阳辐射总量和冠层辐射拦截量减少, 而辐射拦截量的多少是决定水稻干物质积累和产量高低的关键[10]。但也有研究发现, 水稻在叶面积和分蘖生长速率、冠层辐射拦截和利用、叶片光合速率等生物量积累特性和产量表现方面都存在明显的基因型差异。在良好的管理水平下, 有 100 d 左右的短生育期品种在华中地区双季稻双直播模式中的周年产量能够达到 15 t hm^{-2} [7]。彭少兵[2]提出早发、苗期叶面积快速生长和高分蘖率是超短生育期水稻品种获得较高生物量和产量的重要性状。另一方面, 直播稻在实际生产中由于根系入土较浅、群体密度大, 倒伏风险远高于移栽稻[11]。前期研究表明, 适当提高短生育期水稻品种的株高, 缩短基部节间, 增强节间强度, 提高茎秆充实度, 可以协同提高短生育期水稻的生物量和抗倒伏能力[12-13]。除了品种特性, 耕地质量和栽培管理技术也会影响水稻产量潜力的发挥。进行小区试验结合生产示范能更好地反映品种的产量潜力和实际产量水平, 也是检验新品种能否应用于实际生产的重要环节[14]。

本课题组(华中农业大学作物生理生态与栽培研究中心)于 2014 年开始进行超短生育期品种选育, 目前已选育出一个表现优良的品系 CPPC18。该品系是以早籼 615 作父本, 湘早籼 6 号作母本杂交, 后经系谱法选育而成的常规稻品系, 株型集散适中, 抗倒伏能力较强, 2019—2020 年在双季稻双直播条件下的小区评比试验中早、晚季生育期分别为 91 d 和 92 d, 产量分别为 8.25 t hm^{-2} 和 8.13 t hm^{-2}, 比亲本增产分别为 6.9%~12.2%和 2.1%~21.0%。该品系其他重要性状表现如下: 株高 102.0~104.9 cm, 剑叶长 30.3~31.6 cm, 剑叶宽 1.8~1.9 cm, 穗长 20.4~20.8 cm, 每穗粒数 100~107 粒(数据未发表)。然而, 该超短生育期品系产量形成的关键农艺特性以及在大面积生产时的产量表现尚不清楚。因此, 本研究旨在(1) 探究双季稻双直播下超短生育期新品系产量表现和高产关键农艺性状; (2) 从生育期、产量和倒伏相关性状的角度评价超短生育期新品系能否满足华中地区双季稻双直播生产的要求; (3) 量化超短生育期品系在生产示范与小区试验间的产量差异并分析原因,

以期为超短生育期品种的选育及双季稻双直播栽培模式的发展提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 田间试验条件

在 2021 年, 田间小区试验和生产示范试验分别在湖北省黄冈市蕲春县赤东镇酒铺村(30°23'N, 115°43'E)和浠水县汪岗镇禾溢园家庭农场(30°61'N, 115°20'E)进行。禾溢园家庭农场长期进行大规模水稻生产, 自 2019 年起多年大面积种植双季稻双直播。试验田均为多年水稻田, 其中田间小区试验田为冬闲田, 而生产示范试验田的前茬为冬油菜作绿肥。供试田块的土壤基本理化性质见表 1。

1.2 试验设计

供试品种包括 1 个超短生育期新品系 CPPC18 和 4 个对照品种(湘早籼 6 号、早籼 615、中早 39 和两优 152)。其中, 湘早籼 6 号和早籼 615 是本课题组前期从我国已有双季稻品种中筛选出在长江中下游地区适合双季稻双直播模式的超短生育期品种, 同时也分别是超短生育期新品系 CPPC18 的母本和父本品种; 而中早 39 和两优 152 分别是当地移栽双季稻常用的早晚稻品种, 被当地农户用来进行双季稻双直播生产(表 2)。小区试验采用完全随机区组设计, 以 4 组早、晚季品种搭配(早晚兼用: CPPC18, 湘早籼 6 号和早籼 615; 早季+晚季: 中早 39+两优 152)为处理进行双季稻双直播种植, 设置 4 次重复, 小区面积 20 m^2, 早、晚季试验在相邻的田块种植。同样地, 生产示范试验的品种搭配处理与田间小区试验一致, 早季各品种种植 160 m^2, 晚季超短生育期新品系种植 1067 m^2, 对照品种种植 333 m^2, 早、晚季水稻品种均随机排列。

1.3 田间管理

试验均采用湿直播, 早、晚季播种量分别为 9 g m^{-2} 和 7 g m^{-2}。小区试验和生产示范的播种日期早季分别为 4 月 16 日和 4 月 14 日, 晚季分别为 7 月 22 日和 7 月 19 日。播种至三叶期保持田间湿润无水层; 三叶期灌浅水促进秧苗分蘖, 当茎蘖数达到计划穗数的 80%左右时排水晒田, 控制无效分蘖。

表 1 供试田块的土壤基本属性

Table 1 Initial soil characteristics of the field experiment

季节 Season	地点 Site	有机质 Soil organic matter (g kg^{-1})	全氮 Total N (%)	速效磷 Olsen P (mg kg^{-1})	速效钾 Available K (mg kg^{-1})	酸碱度 pH
早季 Early season	小区试验 Plot-level experiment	25.5	0.19	8.5	168.3	5.49
	生产示范 On-farm experiment	24.8	0.16	6.1	193.0	5.52
晚季 Late season	小区试验 Plot-level experiment	28.8	0.20	8.3	232.4	5.24
	生产示范 On-farm experiment	26.2	0.18	5.5	99.3	5.43

表 2 供试品种/系的基本信息

Table 2 Basic information of the tested genotypes in rice

品种/品系 Genotype	简写 Abbreviation	父母本 Parents	水稻类型 Varietal type	选育单位 Breeding institute
CPPC05-235-B-1-6-9	CPPC18	早籼 615/湘早籼 6 号 Zaoxian 615/Xiangzaoxian 6	常规籼稻 Conventional *indica* rice	本课题组选育 Our research group
湘早籼 6 号 Xiangzaoxian 6	XZX6	湘矮早 9 号/莲塘早 Xiangaizao 9/Liantangzao	常规籼稻 Conventional *indica* rice	沅江市农业科学研究所 Yuanjiang Institute of Agricultural Sciences
早籼 615 Zaoxian 615	ZX615	早籼 14/Y134 Zaoxian 14/Y134	常规籼稻 Conventional *indica* rice	安徽省农业科学院水稻研究所 Rice Research Institute, Anhui Academy of Agricultural Sciences
中早 39 Zhongzao 39	ZZ39	嘉育 253/中组 3 号 Jiayu 253/Zhongzu 3	常规籼稻 Conventional *indica* rice	中国水稻研究所 China National Rice Research Institute
两优 152 Liangyou 152	LY152	HD9802S/R152	杂交籼稻 Hybrid *indica* rice	湖北省种子集团有限公司, 武汉大学 Hubei Provincial Seed Group Co., Ltd, Wuhan University

供试品种信息(除课题组选育的一个新品系)来源于国家水稻数据中心。

The information of tested genotypes are from the website of China Rice Date Center (except the new ultrashort-duration line of selected by the research group).

各品种达到 80%左右计划穗数的时间差异在 1 周之内, 为了简化操作, 各品种同时进行排水晒田; 之后保持 3~5 cm 水层直至成熟收获的前 1 周。

小区试验中采用单质肥, 氮肥为尿素(含 N 46.4%), 磷肥为过磷酸钙(12% P_2O_5), 钾肥为氯化钾(60% K_2O)。早季总施氮量为 150 kg N hm^{-2}, 分别于播种前、分蘖期和幼穗分化期按 4∶3∶3 施入; 磷肥施用总量为 72 kg P_2O_5 hm^{-2}, 作基肥一次施入; 钾肥施用总量为 112 kg K_2O hm^{-2}, 等量施于播种前和幼穗分化期。晚季除施氮量降为 120 kg N hm^{-2} 外, 其余均与早季一致。在早稻幼穗分化期及晚稻分蘖期、幼穗分化期和抽穗期进行病虫害防治。在水稻播种后 2 d 内用直播稻除草剂全田喷雾, 在秧苗二叶一心至三叶一心期对前期残存的杂草进行二次灭杀, 后期对田间个别杂草采用人工拔出的方式进行补除。

生产示范的田间设计由华中农业大学科研团队负责, 全程由当地农户进行栽培管理, 关键农事操作由研究人员到场监管和记录。根据当地农民习惯进行施肥, 即早季基肥施用复合肥(N∶P_2O_5∶K_2O=17∶17∶17) 562 kg hm^{-2}, 分蘖期追施尿素(含 N 46.4%) 337.5 kg hm^{-2}, 幼穗分化期施复合肥 75 kg hm^{-2}; 晚季基肥与早季保持一致, 分蘖肥追施尿素(含 N 46.4%) 225 kg hm^{-2}。因此, 早晚季氮肥施用总量分别为 265 kg hm^{-2} 和 200 kg N hm^{-2}。早季未进行病虫害防治, 晚季幼穗分化期集中防治二化螟和稻纵卷叶螟虫。杂草防治仅在早季进行, 于水稻二叶一心至三叶一心期采用无人机喷施除草剂。

1.4 测定指标及方法

1.4.1 *气象数据采集及生育期记载*　　使用试验田附近小型自动农业气象站采集水稻全生育期内的气象资料, 包括逐日最高温度、最低温度、太阳辐射量和降雨量等气象指标。同时, 记录水稻分蘖中期、幼穗分化期、齐穗期和成熟期。

1.4.2 *作物生长分析*　　分别于水稻分蘖中期、幼穗分化期、齐穗期和成熟期, 每个小区取 0.5 m^2 水稻植株样品, 测定株高、茎蘖数和成熟期有效穗数, 使用叶面积仪(LI-3000, LI-COR Inc., 美国)测定绿叶面积。将植株样品放置在烘箱 75℃烘干至恒重后称重。最后计算分蘖成穗率、干物质积累与转运和作物生长速率。

1.4.3 *产量及产量构成因子*　　在成熟期, 每个小区取中央 5 m^2 植株收获, 晒干后称重, 折算成单产(14%含水量)。由成熟期 0.5 m^2 的植株样品测定各个产量构成因子(包括单位面积穗数, 每穗颖花数, 结实率和千粒重)。计算生物量和收获指数。具体测定方法参照 Xu 等[7]。

1.4.4 *冠层光能拦截率测定*　　根据播种后水稻冠层生长情况和天气状况, 每隔 5~15 d 选择晴天无云的上午 10:00—13:00, 利用植物冠层分析仪(AccPAR LP-80, Decagon Devices Inc, 美国)分别在冠层顶部 10~20 cm 和冠层底部距地面 5 cm 处测定入射光照辐射(IR)和透射光照辐射(TR)。冠层光照拦截率(LI)计算公式如下:

$$\mathrm{LI}\ (\%) = \frac{\mathrm{IR} - \mathrm{TR}}{\mathrm{IR}} \times 100$$

根据平均冠层光照拦截率和入射光照辐射量, 计算某生育阶段或全生育期的冠层光照拦截量。冠层光照拦截量与对应生育阶段的植株干物质积累量的比值即为作物光能利用效率(radiation use efficiency, RUE, g MJ^{-1}), 计算公式如下:

$$\mathrm{RUE} = \frac{\text{Total dry weight}}{\mathrm{LI}\% \times \text{Total incident radiation}}$$

1.4.5 *倒伏相关性状测定*　　在水稻齐穗后 15 d, 每个小区取 15 蔸代表性植株, 每蔸选择主茎用于测定倒伏相关的力学和形态指标。由于田间实际倒伏主要发生在水稻植株基部节间, 因此, 本研究选择自植株顶端向下的第 3 个伸长节间(N3)测定倒伏相关特性。根据李国辉等[16]和 Zhang 等[17]的研究方法, 测定株高、重心高度、节间长度、抗折力、节间直径和茎壁厚度, 计算弯曲力矩、折断弯矩、节间体积、单位长度节间干重和单位体积节间干重, 倒伏指数(%)=弯曲力矩/折断弯矩×100。

1.5 数据分析

使用 Microsoft Excel 2019 进行数据整理和计算, Statistix 9 软件进行统计与显著性分析, 使用 SigmaPlot 12.5 进行作图。

2 结果与分析

2.1 小区试验

2.1.1 *气象条件*　　如图 1 所示, 水稻生长季(早、晚两季)的日均温和日照辐射平均值分别为 25.3℃和 16.4 MJ m^{-2} d^{-1}。总体来看, 日均温和日照辐射在早、晚季间存在明显差异, 在早季, 随着生育进程的推进日均温和日照辐射逐渐增加, 而在晚季, 随生育

进程的推进逐渐下降。以齐穗期前后 5 d 的日均温作为抽穗扬花期温度，发现早季各品种的抽穗扬花期温度为 24.9~28.5℃，其中 CPPC18 最低，而中早 39 最高；在晚季各品种的抽穗扬花期温度差异较小，为 27.4~27.9℃。各品种抽穗扬花期均未遭遇高温。另外，与近十年的日均温和日照辐射相比，2021 年水稻生长季平均日均温和日照辐射分别低 0.1℃和 0.8 MJ m^{-2} d^{-1}，整体相近。

2.1.2 供试品种的生育期表现 在所有供试品种中，湘早籼 6 号在早、晚季的生育期均为最短，而中早 39 和两优 152 的生育期最长(表 3)。超短生育期品系 CPPC18 作早稻种植时生育期为 95 d，作晚稻种植时为 85 d。供试品种周年生育期的变异范围为 173~202 d，其中 CPPC18 为 180 d，比其母本品种湘早籼 6 号增加 7 d，而比父本品种早籼 615 缩短 8 d，相比生产对照中早 39 搭配两优 152 缩短 22 d。总体来看，早季的营养生长期和生殖生长期要比晚季长，而籽粒灌浆期比晚季短。

2.1.3 供试品种的产量及产量相关因子 在早季，中早 39 产量显著高于其他品种，其次为超短生育期新品系 CPPC18 和早籼 615，湘早籼 6 号产量最低(图 2)。超短生育期新品系在早季的日产量达到 79.8 kg hm^{-2} d^{-1}，这显著高于湘早籼 6 号，而与早籼 615 和中早 39 无显著差异(表 4)。中早 39 在早季

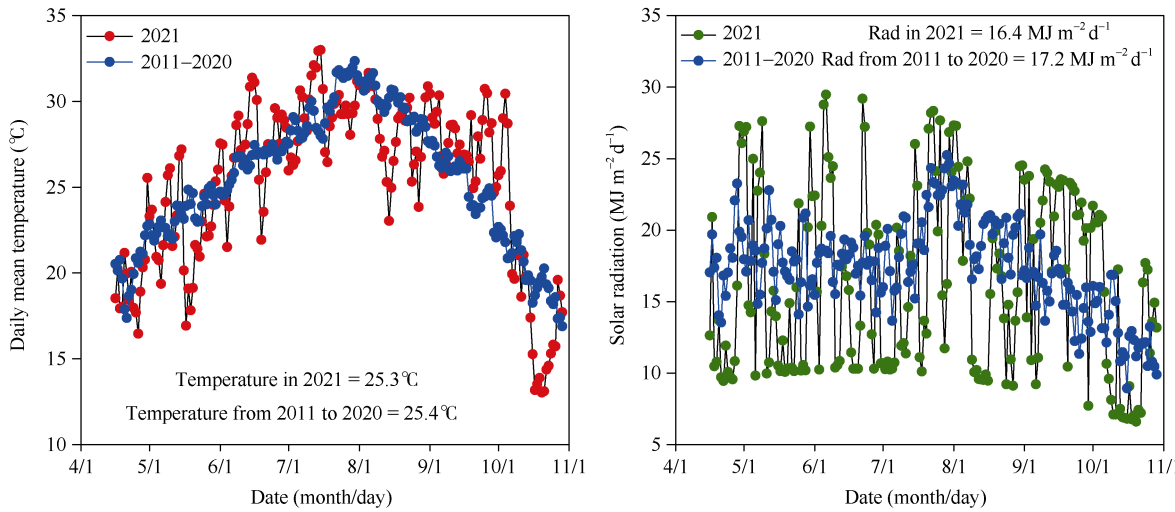


图 1 水稻生长季(早、晚两季)的日平均温度和日照辐射(小区试验)

Fig. 1 Daily mean temperature and solar radiation during growing season (early and late seasons) (plot-level experiment)

日均温和日照辐射数据来源于中国气象局国家气象信息中心。

Daily mean temperature and solar radiation during growing season are from the website of the National Meteorological Information Center of the China Meteorological Administration.

表 3 供试品种生育期表现(小区试验)

Table 3 Growth duration of tested genotypes in the early and late seasons (plot-level experiment) (d)

季节 Season	品种/品系 Genotype	营养生长期 Vegetative stage	生殖生长期 Reproductive stage	籽粒灌浆期 Ripening stage	全生育期 Total growth duration
早季	CPPC18	40	25	30	95
Early season	XZX6	42	21	26	89
	ZX615	43	24	30	97
	ZZ39	43	28	32	103
晚季	CPPC18	28	19	38	85
Late season	XZX6	31	19	34	84
	ZX615	28	22	41	91
	LY152	31	22	46	99

营养生长期是指从播种到幼穗分化期；生殖生长期是指从幼穗分化期到齐穗期；籽粒灌浆期是指从齐穗期到成熟期；全生育期是指从播种到成熟期; XZX6：湘早籼 6 号; ZX615：早籼 615; ZZ39：中早 39; LY152：两优 152。

Vegetative stage: from seed sowing to panicle initiation; Reproductive stage: from panicle initiation to heading; Ripening stage: from heading to maturity; Total growth duration: from seed sowing to maturity; XZX6: Xiangzaoxian 6; ZX615: Zaoxian 615; ZZ39: Zhongzao 39; LY152: Liangyou 152.

的产量优势主要得益于其更高的每穗颖花数、千粒重和成熟期生物量。CPPC18 与其父母本品种的单位面积颖花数和结实率均无显著差异。千粒重由高到低则依次为中早 39、早籼 615、CPPC18 和湘早籼 6 号。此外, CPPC18 在成熟期的生物量显著高于湘早籼 6 号, 而略低于早籼 615 和中早 39。在供试品种中, 早籼 615 的收获指数最高, 而其他 3 个品种无显著差异。

在晚季, CPPC18 的产量显著高于其他供试品种, 达到 7.3 t hm^{-2}。相比父母本品种湘早籼 6 号和早籼 615 以及两优 152, CPPC18 增产 12.3%~28.1%。日产量在品种间的差异与其产量的趋势基本相同。与早籼 615 和两优 152 相比, CPPC18 具有更高的单位面积穗数, 但每穗颖花数略低。CPPC18 在晚季的结实率要比早籼 615 和两优 152 高 24.4%~54.3%。千粒重在品种间的变异规律与早季保持一致。晚季生物量在品种间无显著差异, 而超短生育期品系 CPPC18 的收获指数显著高于其他品种。CPPC18 晚季获得高产主要得益于其较高的单位面积穗数、结实率和收获指数。相关分析的结果也证实, 早季产量在品种间的差异与生物量呈显著正相关关系而与收获指数无关; 但是品种间晚季产量的高低主要取决于收获指数(图 3)。

从周年产量的角度来看, 各品种的周年产量为 13.1~14.9 t hm^{-2}。其中, CPPC18 的周年产量最高, 比其他 3 个品种搭配处理增产 7.2%~14.6%。

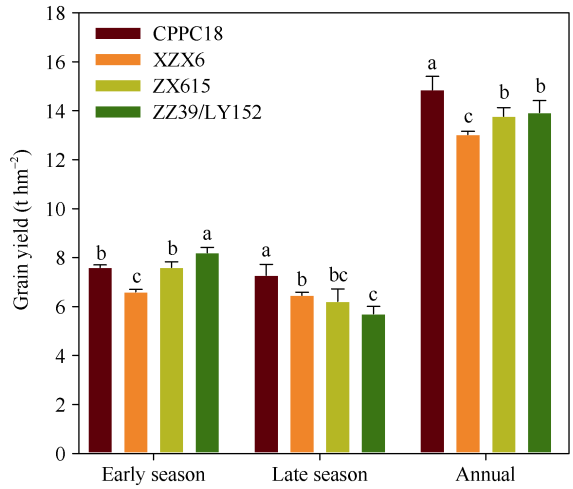


图 2　供试品种在早季、晚季和周年的产量表现(小区试验)

Fig. 2　Yield performance of tested genotypes (plot-level experiment)

数据是 4 个重复的平均值, 误差线表示标准误。XZX6: 湘早籼 6 号; ZX615: 早籼 615; ZZ39/LY152: 中早 39 与两优 152 早晚搭配。Date are means of four replications, and vertical bars represent the standard errors. XZX6: Xiangzaoxian 6; ZX615: Zaoxian 615; ZZ39/LY152: the combination of Zhongzao 39 (early season) and Liangyou 152 (late season).

表 4　供试品种的日产量、产量构成因子、生物量和收获指数(小区试验)

Table 4　Daily yield, yield components, aboveground biomass at maturity, and harvest index of tested genotypes (plot-level experiment)

季节 Season	品种/品系 Genotype	日产量 Daily yield (kg hm^{-2} d^{-1})	单位面积穗数 Panicles (m^{-2})	每穗颖花数 Spikelets panicle^{-1}	单位面积颖花数 Spikelets ($\times10^3$ m^{-2})	结实率 Grain filling (%)	千粒重 1000-grain weight (g)	生物量 Biomass (t hm^{-2})	收获指数 Harvest index (%)
早季	CPPC18	79.8 a	417 b	93.5 c	38.9 a	83.1 a	21.2 c	13.9 a	49.2 b
Early season	XZX6	73.8 b	471 a	88.0 d	41.4 a	79.5 a	19.2 d	12.8 b	49.6 b
	ZX615	78.0 a	360 c	117.3 b	42.2 a	82.6 a	23.0 b	14.3 a	56.1 a
	ZZ39	79.7 a	294 d	132.6 a	38.9 a	79.0 a	24.5 a	14.7 a	51.3 b
	平均 Mean	77.8 A	385 A	107.9 B	40.4 A	81.1 A	22.0 A	13.9 A	51.5 A
晚季	CPPC18	85.7 a	351 ab	114.2 ab	39.4 a	79.0 a	20.8 c	12.4 a	52.2 a
Late season	XZX6	77.0 b	398 a	95.3 b	37.7 a	78.9 a	19.8 d	12.9 a	45.4 b
	ZX615	68.3 c	304 b	129.4 a	39.2 a	63.5 b	22.1 b	12.4 a	44.0 b
	LY152	57.7 d	295 b	129.0 a	37.5 a	51.2 c	23.5 a	12.1 a	37.2 c
	平均 Mean	72.2 B	337 B	117.0 A	38.0 B	68.1 B	21.6 B	12.5 B	44.7 B

同一列中不同字母表示各处理间在 0.05 概率水平差异显著, 小写字母表示同一季节内各品种间的比较, 大写字母表示早、晚季间的比较。XZX6: 湘早籼 6 号; ZX615: 早籼 615; ZZ39: 中早 39; LY152: 两优 152。

Within a column, different letters are significantly different according to LSD at $P < 0.05$. Lowercase letters indicate comparisons among the five varieties within each season, uppercase letters indicate comparisons between two seasons. XZX6: Xiangzaoxian 6; ZX615: Zaoxian 615; ZZ39: Zhongzao 39; LY152: Liangyou 152.

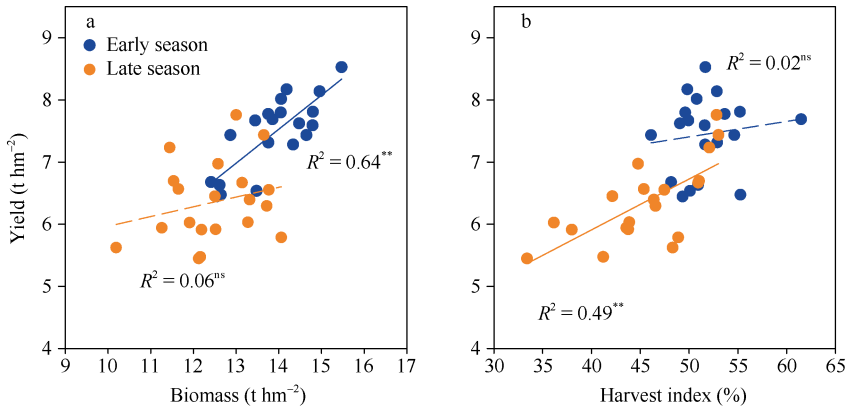


图 3 供试品种的籽粒产量与成熟期生物量(a)、收获指数(b)的相关关系(小区试验)

Fig. 3 Relationship of grain yield with biomass at maturity (a) and harvest index (b) of tested genotypes (plot-level experiment)

2.1.4 供试品种的生长特性

2.1.4.1 作物生长速率 各品种的作物生长速率差异主要体现在播种-幼穗分化期(表 5)。不同的是, 超短生育期新品系 CPPC18 在早季该时期的作物生长速率显著高于对照, 增幅为 19.6%~48.6%; 而在晚季 CPPC18 显著低于父母本品种湘早籼 6 号和早籼 615, 分别降低 28.1%和 25.6%。供试品种的全生育期作物生长速率在早、晚季间的差异不大, 但播种至幼穗分化期的作物生长速率晚季显著高于早季, 幼穗分化期至齐穗期和齐穗至成熟期则早季高于晚季。

2.1.4.2 光照拦截率及利用效率 各阶段的平均光照拦截率和光能利用效率在品种间的变异规律早、晚季有明显差异(图 4)。在早季, CPPC18 营养生长期和生殖生长期的光照拦截率与湘早籼 6 号相当, 但却显著高于早籼 615 和中早 39, 而灌浆结实期各品种的光照拦截率差异较小; 在晚季, 除生殖生长期 CPPC18 光照拦截率显著低于其他品种外, 营养生长期和灌浆结实期的光照拦截率在品种间均无显著差异。就光能利用效率而言, CPPC18 在早季营养生长期和灌浆结实期均表现出了比其他品种更高的光能利用效率, 但其生殖生长期的光能利用效率较低, 尽管差异在统计上不显著。与早季不同, CPPC18 在晚季生殖生长期的光能利用效率显著高于其他供试品种, 在灌浆结实期 CPPC18 的光能利用效率略高于两优 152, 与湘早籼 6 号和早籼 615 差异较小, 而在营养生长期 CPPC18 的光能利用效率显著低于湘早籼 6 号和两优 152, 与早籼 615 差异不显著。

表 5 供试品种不同生育阶段的作物生长速率(小区试验)

Table 5 Crop growth rate of tested genotypes during different growth stages in the early and late seasons (plot-level experiment)

季节 Season	品种/品系 Genotype	作物生长速率 Crop growth rate (g m^{-2} d^{-1})			
		播种–幼穗分化期 SS–PI	幼穗分化–齐穗期 PI–HD	齐穗–成熟期 HD–MA	全生育期 SS–MA
早季	CPPC18	5.5 a	22.6 b	20.2 a	14.6 a
Early season	XZX6	4.6 b	29.0 a	18.3 a	14.3 a
	ZX615	3.7 c	28.5 ab	19.4 a	14.7 a
	ZZ39	3.8 c	29.3 a	15.2 a	14.2 a
	平均 Mean	4.4 B	27.4 A	18.3 A	14.5 A
晚季	CPPC18	6.4 b	27.0 a	14.5 a	14.6 ab
Late season	XZX6	8.9 a	23.3 a	9.1 b	12.2 c
	ZX615	8.6 a	25.5 a	15.9 a	15.4 a
	LY152	5.9 b	24.2 a	13.2 ab	13.6 bc
	平均 Mean	7.5 A	25.0 B	13.2 B	14.0 A

同一列中不同字母表示各处理间在 0.05 概率水平差异显著, 小写字母表示同一季节内各品种间的比较, 大写字母表示早、晚季间的比较。XZX6: 湘早籼 6 号; ZX615: 早籼 615; ZZ39: 中早 39; LY152: 两优 152。

Within a column, different letters are significantly different according to LSD at $P < 0.05$. Lowercase letters indicate comparisons among the five varieties within each season, uppercase letters indicate comparisons between two seasons. XZX6: Xiangzaoxian 6; ZX615: Zaoxian 615; ZZ39: Zhongzao 39; LY152: Liangyou152. SS: seed sowing; PI: panicle initiation; HD: heading; MA: maturity.

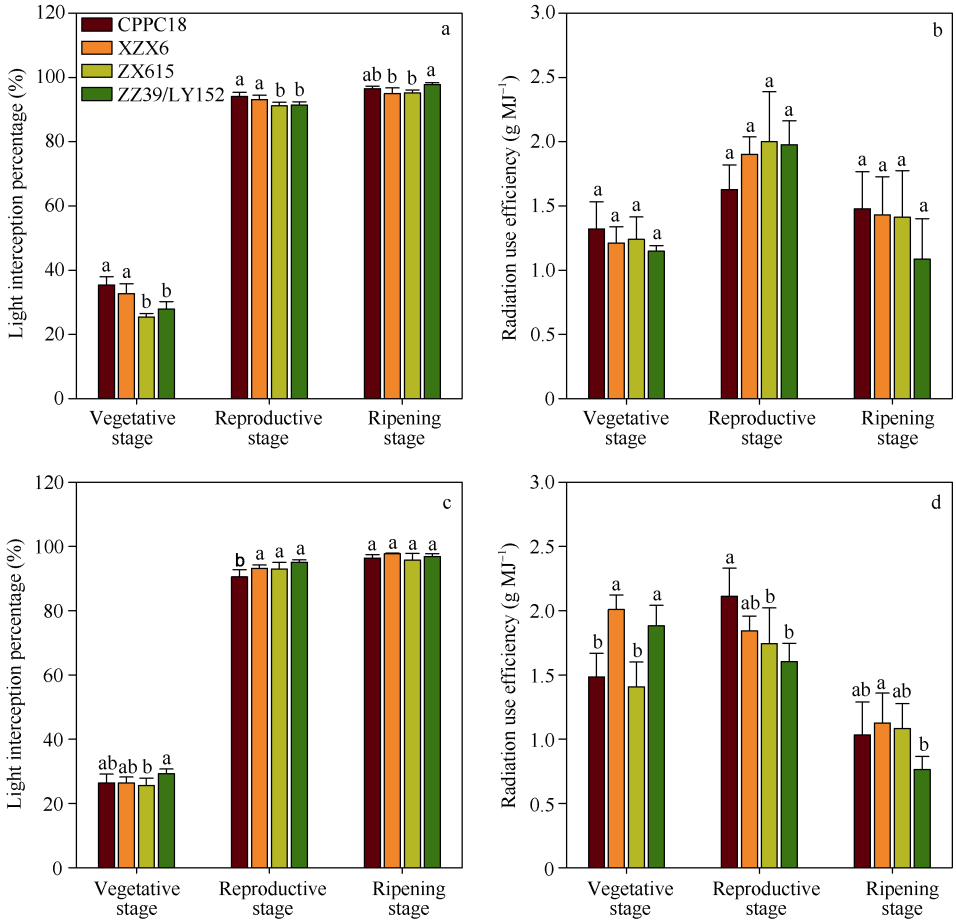


图 4　早、晚季供试品种不同生育阶段的平均光照拦截率(a, c)和光能利用效率(b, d) (小区试验)

Fig. 4　Light interception percentage (a, c) and radiation use efficiency (b, d) of tested genotypes during different growth periods in the early and late seasons (plot-level experiment)

数据是 4 个重复的平均值, 误差线表示标准误。XZX6: 湘早籼 6 号; ZX615: 早籼 615; ZZ39/LY152: 中早 39 与两优 152 早晚搭配。

Date are means of four replications, and vertical bars represent the standard errors. XZX6: Xiangzaoxian 6; ZX615: Zaoxian 615; ZZ39/LY152: the combination of Zhongzao 39 (early season) and Liangyou 152 (late season).

2.1.4.3　茎蘖数和叶面积指数　　早季除齐穗期叶面积指数外, 其他各时期的茎蘖数和叶面积指数在品种间的变异规律一致, 即超短生育期新品系 CPPC18 显著高于早籼 615 和中早 39, 与湘早籼 6 号无显著差异(表 6), 这表明超短生育期新品系在早季营养生长期具有更强的分蘖和叶面积生长能力。不同的是, 超短生育期新品系在晚季分蘖中期和幼穗分化期的茎蘖数以及分蘖中期和齐穗期的叶面积指数均与其他 3 个品种无显著差异, 而齐穗期的茎蘖数和幼穗分化期的叶面积指数甚至显著低于湘早籼 6 号。

2.1.5　倒伏相关特性　　超短生育期新品系 CPPC18 与其他品种相比在早、晚季均表现出更强的抗倒伏能力(图 5)。在早季, CPPC18 的倒伏指数显著低于湘早籼 6 号和早籼 615, 与中早 39 无显著差异。与早籼 615 相比, CPPC18 的株高、重心高度和弯曲

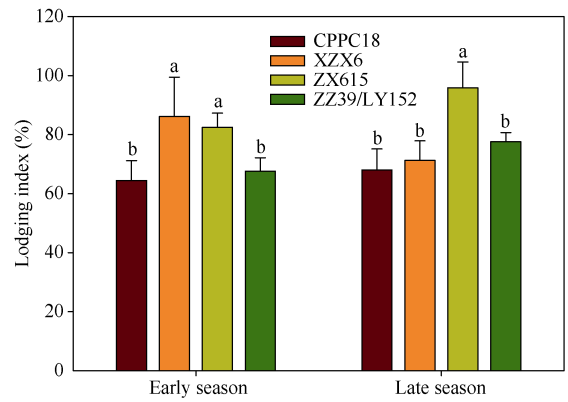


图 5　供试品种在早、晚季的倒伏指数(小区试验)

Fig. 5　Lodging index of tested genotypes in the early and late seasons (plot-level experiment)

数据是 4 个重复的平均值, 误差线表示标准误。XZX6: 湘早籼 6 号; ZX615: 早籼 615; ZZ39/LY152: 中早 39 与两优 152 早晚搭配。

Date are means of four replications, and vertical bars represent the standard errors. XZX6: Xiangzaoxian 6; ZX615: Zaoxian 615; ZZ39/LY152: the combination of Zhongzao 39 (early season) and Liangyou 152 (late season).

表 6 供试品种在分蘖中期和幼穗分化期的茎蘖数和叶面积指数(小区试验)

Table 6 Stem number, leaf area index at mid-tillering stage (MT), and panicle initiation stage (PI) of tested genotypes (plot-level experiment)

季节 Season	品种/品系 Genotype	茎蘖数 Stem number			叶面积指数 Leaf area index		
		MT	PI	HD	MT	PI	HD
早季	CPPC18	528 a	706 a	717 a	1.17 a	3.34 a	6.97 a
Early season	XZX6	583 a	747 a	786 a	1.03 a	3.17 a	6.87 ab
	ZX615	328 b	497 b	553 b	0.68 b	2.06 b	5.71 b
	ZZ39	347 b	534 b	556 b	0.70 b	2.28 b	6.75 ab
	平均 Mean	403 B	583 A	653 A	0.81 B	2.53 B	6.58 A
晚季	CPPC18	647 ab	626 ab	477 b	1.13 ab	3.12 b	5.65 bc
Late season	XZX6	769 a	712 a	535 a	1.06 ab	4.50 a	6.62 ab
	ZX615	562 b	543 b	390 c	0.97 b	2.57 b	5.04 c
	LY152	723 a	604 b	452 b	1.24 a	4.57 a	6.93 a
	平均 Mean	695 A	614 A	464 A	1.16 A	4.07 A	6.06 B

同一列中不同字母表示各处理间在 0.05 概率水平差异显著, 小写字母表示同一季节内各品种间的比较, 大写字母表示早、晚季间的比较。XZX6: 湘早籼 6 号; ZX615: 早籼 615; ZZ39: 中早 39; LY152: 两优 152。

Within a column, different letters are significantly different according to LSD at $P < 0.05$. Lowercase letters indicate comparisons among the five varieties within each season, uppercase letters indicate comparisons between two seasons. XZX6: Xiangzaoxian 6; ZX615: Zaoxian 615; ZZ39: Zhongzao 39; LY152: Liangyou 152. MT: mid-tillering; PI: panicle initiation; HD: heading.

力矩分别降低 15.2%、20.9%和 29.5% (表 7)。与湘早籼 6 号相比, CPPC18 的弯曲力矩和重心高度分别降低 13.4%和 4.4%, 而株高、抗折力和折断弯矩分别增加 3.3%、14.4%和 14.4%。这表明保持适当株高, 减小弯曲力矩并提高茎秆抗折力和折断弯矩是植株抗倒伏的关键。在晚季, CPPC18 的倒伏指数显著低于早籼 615, 略低于其他 2 个品种但统计上差异不显著, 这主要得益于 CPPC 较低的株高、重心高度和弯曲力矩以及较高的单位体积节间干重。

2.2 生产示范

2.2.1 气象条件 日均温和日照辐射在早、晚季间的变化规律与小区试验相同(图 6)。水稻生长季

表 7 供试品种在早、晚季的倒伏相关性状(小区试验)

Table 7 Lodging index and lodging-related traits of tested genotypes in the early and late seasons (plot-level experiment)

季节 Season	品种/品系 Genotype	PH (cm)	GH (cm)	ID (mm)	CWT (mm)	DLI (mg cm^{-1})	DVI (mg cm^{-3})	BR (g)	WP (g cm)	M (g cm)
早季	CPPC18	95.2 c	37.0 b	4.84 b	0.61 a	24.1 b	298.8 b	1196.5 b	960.7 c	1495.7 b
Early season	XZX6	92.2 d	38.7 b	4.78 b	0.64 a	24.2 b	290.9 b	1045.8 c	1109.9 b	1307.2 c
	ZX615	112.3 a	46.8 a	5.42 a	0.62 a	26.8 b	288.5 b	1319.3 b	1362.2 a	1649.2 b
	ZZ39	105.6 b	44.9 a	5.61 a	0.65 a	35.1 a	345.6 a	1698.7 a	1433.5 a	2123.4 a
	平均 Mean	101.3 B	42.1 B	5.16 A	0.63 A	27.5 A	306.0 B	1315.1 A	1216.6 A	1643.8 A
晚季	CPPC18	98.7 c	41.3 c	4.66 b	0.56 bc	26.5 a	367.2 a	962.7 b	812.3 b	1203.4 b
Late season	XZX6	94.5 d	42.3 c	4.45 b	0.54 c	24.9 a	372.2 a	894.6 b	797.5 b	1118.2 b
	ZX615	113.8 a	48.8 a	5.14 a	0.60 ab	26.6 a	309.9 b	993.6 b	1183.5 b	1242.1 b
	LY152	108.8 b	47.1 b	5.18 a	0.63 a	29.0 a	320.3 b	1391.8 a	1345.2 a	1739.8 a
	平均 Mean	104.0 A	44.9 A	4.86 B	0.58 B	26.7 A	342.4 A	1060.7 B	1034.6 B	1325.9 B

PH: 株高, GH: 重心高度, ID: 节间直径, CWT: 茎壁厚度, DLI: 单位长度节间干重, DVI: 单位体积节间干重, BR: 抗折力, WP: 弯曲力矩, M: 折断弯矩。同一列中不同字母表示各处理间在 0.05 概率水平差异显著, 小写字母表示同一季节内各品种间的比较, 大写字母表示早、晚季间的比较。XZX6: 湘早籼 6 号; ZX615: 早籼 615; ZZ39: 中早 39; LY152: 两优 152。

PH: plant height, GH: height of gravity, ID: diameter of N3, CWT: Culm wall thickness of N3, DLI: dry weight per unit length of N3 internode, DVI: dry weight per unit volume of N3 internode, BR: breaking resistance, WP: bending moment, M: breaking strength. Within a column, different letters are significantly different according to LSD at $P < 0.05$. Lowercase letters indicate comparisons among the five varieties within each season, uppercase letters indicate comparisons between two seasons. XZX6: Xiangzaoxian 6; ZX615: Zaoxian 615; ZZ39: Zhongzao 39; LY152: Liangyou 152.

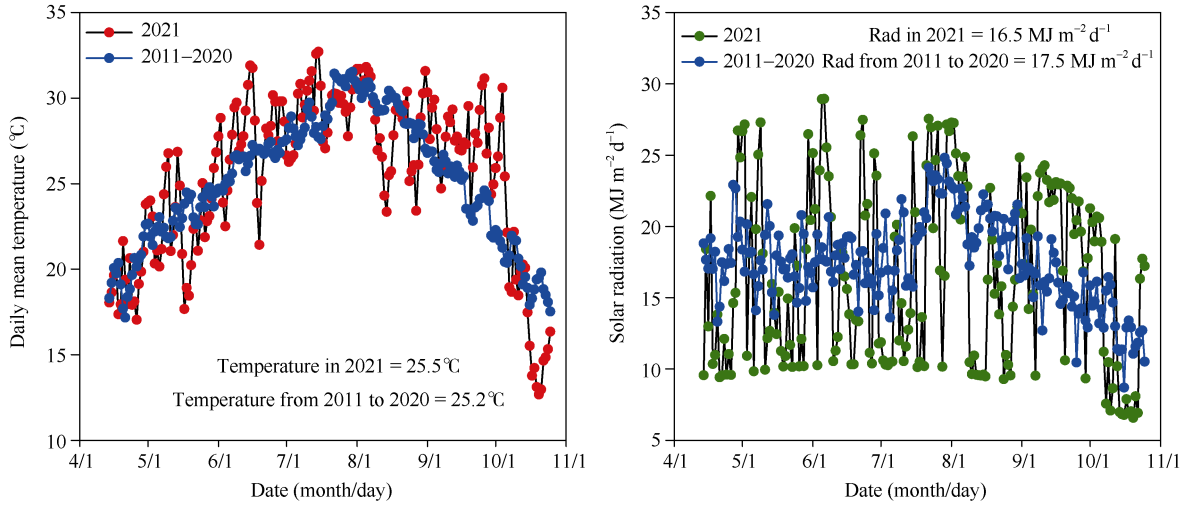


图 6　水稻生长季(早、晚两季)的日平均温度和日照辐射(生产示范)

Fig. 6　Daily mean temperature and solar radiation during both early and late seasons (on-farm experiment)

日均温和日照辐射数据来源于中国气象局国家气象信息中心。

Daily mean temperature and solar radiation during growing season are from the website of the National Meteorological Information Center of the China Meteorological Administration.

(早、晚两季)的平均日均温和日照辐射分别为 25.5℃和 16.5 MJ m^{-2} d^{-1}, 比 2011—2020 年平均值分别高 0.3℃和低 1 MJ m^{-2} d^{-1}, 整体相近。早季各品种的抽穗扬花期温度为 25.2~29.1℃, 其中湘早籼 6 号最低, 而中早 39 最高; 在晚季各品种的抽穗扬花期温度差异较小, 为 27.6~28.0℃。

2.2.2　*供试品种的生育期表现*　各品种在早、晚季的生育期与小区试验相似(表 8)。超短生育期新品系 CPPC18 在早、晚季的生育期分别为 94 d 和 89 d。不同品种搭配的周年生育期为 174~199 d, 其中超短生育期新品系为 183 d, 这比父母本品种湘早籼 6 号增加 9 d, 但是却比早籼 615 缩短 4 d, 相比生产对照中早 39 搭配两优 152 缩短 16 d。

2.2.3　*供试品种的产量表现*　生产示范中, 早季的产量在品种间差异较小, 早籼 615、中早 39 和 CPPC18 产量高于湘早籼 6 号; 在晚季, CPPC18 的产量显著高于其他品种(表 9)。在早季, 供试品种的单位面积穗数与每穗颖花数的变异规律相反, CPPC18 的单位面积穗数明显高于其他 3 个品种, 但每穗颖花数仅为 74, 最终单位面积颖花数显著低于中早 39, 而与其他 3 个品种无显著差异。结实率在品种间的变异与单位面积颖花数相反, 中早 39 的结实率显著低于 CPPC18。CPPC18 的成熟期生物量和收获指数与其他品种无显著差异。在晚季, CPPC18 的高产主

表 8　供试品种生育期表现(生产示范)

Table 8　Growth duration of tested genotypes in the early and late seasons (on-farm experiment) (d)

季节 Season	品种/品系 Genotype	营养生长期 Vegetative stage	生殖生长期 Reproductive stage	籽粒灌浆期 Ripening stage	全生育期 Total growth duration
早季	CPPC18	43	25	26	94
Early season	XZX6	46	20	23	89
	ZX615	45	24	29	98
	ZZ39	47	26	28	101
晚季	CPPC18	30	18	41	89
Late season	XZX6	29	19	37	85
	ZX615	32	19	38	89
	LY152	36	20	42	98

营养生长期是指从播种到幼穗分化期; 生殖生长期是指从幼穗分化期到齐穗期; 籽粒灌浆期是指从齐穗期到成熟期; 全生育期是指从播种到成熟期。XZX6: 湘早籼 6 号; ZX615: 早籼 615; ZZ39: 中早 39; LY152: 两优 152。

Vegetative stage: from seed sowing to panicle initiation; Reproductive stage: from panicle initiation to heading; Ripening stage: from heading to maturity; Total growth duration: from seed sowing to maturity. XZX6: Xiangzaoxian 6; ZX615: Zaoxian 615; ZZ39: Zhongzao 39; LY152: Liangyou 152.

表 9 供试品种的产量、日产量、产量构成因子、生物量和收获指数(生产示范)

Table 9 Yield, daily yield, yield components, above-ground biomass at maturity, and harvest index of tested genotypes in the early and late seasons (on-farm experiment)

季节 Season	品种/品系 Genotype	产量 Yield (t hm^{-2})	日产量 Daily yield (kg hm^{-2} d^{-1})	单位面积穗数 Panicles (m^{-2})	每穗颖花数 Spikelets panicle^{-1}	单位面积颖花数 Spikelets ($\times10^3$ m^{-2})	结实率 Grain filling (%)	千粒重 1000-grain weight (g)	生物量 Biomass (t hm^{-2})	收获指数 Harvest index (%)
早季	CPPC18	5.54 ab	58.9 a	475 a	74.2 c	34.7 b	74.7 ab	20.7 c	11.8 ab	45.5 a
Early season	XZX6	5.18 b	58.2 a	413 ab	76.0 c	31.4 b	78.6 a	19.0 d	9.9 b	47.3 a
	ZX615	6.49 a	66.2 a	386 ab	92.5 b	35.3 b	70.3 bc	22.6 b	12.5 a	44.9 a
	ZZ39	5.74 ab	56.9 a	305 b	132.9 a	40.3 a	62.7 c	24.4 a	13.3 a	46.3 a
	平均 Mean	5.74 A	60.0 B	395 A	93.9 A	35.4 A	71.6 A	21.7 B	11.9 A	46.0 B
晚季	CPPC18	7.36 a	82.7 a	339 ab	120.3 a	40.4 a	75.7 a	20.8 b	12.1 a	52.2 a
Late season	XZX6	5.43 b	63.8 b	386 a	80.6 b	31.0 b	81.9 a	21.2 b	10.5 ab	51.2 a
	ZX615	4.96 b	55.7 b	272 b	90.8 b	24.3 b	74.1 a	23.5 a	8.8 b	47.9 a
	LY152	5.71 b	58.3 b	299 b	96.7 b	28.2 b	71.2 a	23.9 a	9.8 b	48.6 a
	平均 Mean	5.87 A	65.1 A	324 B	97.1 A	31.0 B	75.7 A	22.3 A	10.3 B	50.0 A

同一列中不同字母表示各处理间的在 0.05 概率水平差异显著, 小写字母表示同一季节内各品种间的比较, 大写字母表示早、晚季间的比较。XZX6: 湘早籼 6 号; ZX615: 早籼 615; ZZ39: 中早 39; LY152: 两优 152。

Within a column, different letters are significantly different according to LSD at $P < 0.05$. Lowercase letters indicate comparisons among the five varieties within each season, uppercase letters indicate comparisons between two seasons. XZX6: Xiangzaoxian 6; ZX615: Zaoxian 615; ZZ39: Zhongzao 39; LY152: Liangyou 152.

要得益于其较高的日产量、单位面积穗数、每穗颖花数和生物量。生产示范中供试品种的千粒重变异规律与小区试验一致。总体来看, 不同品种的周年产量为 10.6~12.8 t hm^{-2}, 其中 CPPC18 产量最高, 比其他 3 个对照品种搭配增产 12.7%~21.6%。

2.2.4 *供试品种的群体特征* 超短生育期新品系 CPPC18 在早季齐穗期的茎蘖数和叶面积指数均显著高于其他 3 个品种, 而晚季茎蘖数和叶面积指数在各品种间无显著差异(表 10)。株高在品种间的变异规律早、晚季相同, 即超短生育期新品系和湘早籼 6 号的株高均在 100 cm 以内, 显著低于早籼 615 以及生产对照品种中早 39 和两优 152。与早季相比, 供试品种在晚季的茎蘖数和叶面积指数均显著降低。

表 10 供试品种的齐穗期茎蘖数、叶面积指数和成熟期株高

Table 10 Stem number and leaf area index at heading, and plant height at maturity of tested genotypes in the early and late seasons (on-farm experiment)

季节 Season	品种/品系 Genotype	茎蘖数 Stem number (m^{-2})	叶面积指数 LAI	株高 Plant height (cm)
早季	CPPC18	1003 a	8.82 a	90.3 b
Early season	XZX6	793 b	6.09 b	84.9 b
	ZX615	781 b	6.04 b	103.2 a
	ZZ39	791 b	5.66 b	100.6 a
	平均 Mean	842 A	6.65 A	94.7 A
晚季	CPPC18	523 a	5.96 a	95.3 b
Late season	XZX6	579 a	5.77 a	90.4 b
	ZX615	488 a	4.94 a	102.5 a
	LY152	493 a	5.05 a	102.9 a
	平均 Mean	521 B	5.43 B	97.8 A

同一列中不同字母表示各处理间在 0.05 概率水平差异显著, 小写字母表示同一季节内各品种间的比较, 大写字母表示早、晚季间的比较。XZX6: 湘早籼 6 号; ZX615: 早籼 615; ZZ39: 中早 39; LY152: 两优 152。

Within a column, different letters are significantly different according to LSD at $P < 0.05$. Lowercase letters indicate comparisons among the five varieties within each season, uppercase letters indicate comparisons between two seasons. XZX6: Xiangzaoxian 6; ZX615: Zaoxian 615; ZZ39: Zhongzao 39; LY152: Liangyou 152.

3　讨论

3.1　超短生育期新品系在小区试验中的生育期和产量表现

受温光资源限制, 在华中地区进行双季稻双直播生产季节矛盾突出, 需要选用超短生育期水稻逃避早季“倒春寒”和晚季“寒露风”的低温胁迫, 保障直播稻顺利成熟[18]。在本研究中, 超短生育期新品系 CPPC18 在双季稻双直播模式下早晚兼用的单季生育期在 95 d 以内, 周年生育期为 180 d 左右。CPPC18 的周年生育期比其早晚兼用的母本湘早籼 6 号增加 7~9 d 而比父本早籼 615 缩短 4~8 d, 相比当地生产上采用中早 39 搭配两优 152 缩短 16~22 d。艾治勇等[4]分析了长江中游地区近 50 年气象资料, 在温光资源相对较差的湖南、湖北和江西全年适合水稻生长的天数在 187~219 d 范围内。根据该地区全年水稻的安全生长天数, 只有生育期为 90~100 d 的水稻品种才能够规避灾害性天气, 满足双季稻双直播安全生产的要求。因此, 超短生育期新品系 CPPC18 能够满足在长江中下游地区实现双季稻双直播模式安全生产的要求。尽管本研究只有 1 年的数据, 但是在湖北省 2 个不同的县分别进行的小区试验和生产示范试验的结果一致。此外, 2 个试验点 2021 年水稻生长季的日均温和日照辐射均与近十年平均值相近(图 1 和图 6)。这些都保证了试验结果的可靠性和代表性。

作物生育期长短是评价水稻品种能否适合在特定稻作区进行作物轮作的重要判断指标。与目前广泛应用的中、长生育期水稻品种相比, 超短生育期品种具有在作物轮作系统中灵活性更高、水分利用效率高和可规避非生物胁迫等优点[19-20]。然而, 通常水稻生育期缩短会导致其产量降低[10]。但也有研究发现, 短生育期品种可以获得与中、长生育期品种相近的产量[6-7]。在本研究的小区试验中, 超短生育期品系 CPPC18 在早季的产量显著低于生产对照品种中早 39, 但其晚季产量显著高于其他所有供试品种, 单季产量在 7.5 t hm^{-2} 左右, 周年产量达到 14.9 t hm^{-2} (表 4)。这一产量水平与华中地区传统移栽双季稻的产量水平相当[21]。Xu 等[22]对比了双季稻双直播和传统移栽双季稻模式之间的产量表现, 发现超短生育期品种作直播稻种植的产量水平接近中等生育期的移栽稻品种产量。本研究中, 超短生育期新品系表现出较高的日产量水平, 早、晚季日产量分别达到 79.8 kg hm^{-2} d^{-1} 和 85.7 kg hm^{-2} d^{-1}。从产量构成来看, 与父本品种早籼 615 和生产对照品种相比, 超短生育期新品系具有更高的单位面积穗数和更低的每穗颖花数。早季 CPPC18 虽然总颖花数与中早 39 相当, 但千粒重显著低于中早 39。因此, 早季进一步提高产量需考虑提高每穗颖花数和千粒重以增加库容。在晚季, 超短生育期新品系更高的产量主要得益于其单位面积穗数和每穗颖花数的协同提高, 以及更高的结实率。早籼 615 和中早 39 由于晚季生育期较长, 抽穗灌浆期遭遇了低温胁迫, 导致灌浆成熟受阻, 结实率显著低于 CPPC18 和湘早籼 6 号。

3.2　超短生育期新品系产量形成的生理基础

水稻籽粒产量取决于成熟期生物量和收获指数。本研究中, 早季各短生育期水稻品种间的产量差异主要取决于成熟期生物量的高低, 而与收获指数相关性不高(图 3)。前人研究指出, 半矮杆水稻品种相比传统农家品种单产潜力增加主要是因为绿色革命中将收获指数提高到 50%左右, 而 50%的收获指数被认为已接近生物学限制[23-24]。本研究中早季各品种的收获指数均在 50%左右, 因而产量差异主要归因于生物量, 这与詹学武[25]结果一致。对于超短生育期水稻来说, 在每个水稻生长阶段保持高水平的作物生长速率对增加成熟期生物量和日产量都至关重要[26]。在早稻约 40 d 的营养生长期内, 超短生育期新品系 CPPC18 相比其他 3 个对照品种具备明显的早发优势, 其作物生长速率显著高于其他品种, 最终其全生育期内的作物生长速率略高于其他品种。这主要得益于 CPPC18 高的冠层光照拦截率(图 4-a)。从群体结构来看, 超短生育期新品系作早稻种植时营养生长期的茎蘖数和叶面积指数显著高于现有超短生育期品种早籼 615 和传统移栽稻品种中早 39, 更高的茎蘖数和叶面积指数有利于植株提早“封行”, 减少漏光损失, 进而提高了光照拦截率。在晚季, 虽然 CPPC18 在营养生长期的作物生长速率较低, 但是其在生殖生长期特别是灌浆期的作物生长速率要显著高于其他品种, 这有利于提高花后干物质的积累和收获指数(表 5), 进而获得高产。在生产示范中, CPPC18 同样在较高库容的条件下保障了高结实率和收获指数, 从而实现了高产。需要注意的是, 收获指数在早、晚季间的差异在小区试验和生产示范中不一致。小区试验中早季收获指数高于晚季, 主要是由于晚季 ZX615 和 LY152 发生倒伏,

结实率和收获指数下降，拉低了晚稻收获指数的平均值；生产示范试验中早季收获指数却低于晚季，这是由于生产示范试验中早季的库容略高于晚季，导致早季结实率低于晚季，收获指数也相应降低，但早晚季整体相差不大。

3.3 超短生育期新品系在生产示范中的表现

农民参与的生产示范是按照农民习惯进行作物栽培管理来检验品种在实际生产中表现的重要方法。本研究中生产示范与田间小区试验结果一致，超短生育期新品系在生产示范的周年产量相比其父母本品种和生产对照品种增产 12.7%~21.6%，有助于提高农民采用双季稻双直播种植的收益。然而，相比小区试验，超短生育期新品系生产示范中的早季产量降低了 2.04 t hm^{-2}，而晚季产量相同。其他供试品种在生产示范早、晚季的产量均显著低于小区试验的产量，这主要归因于单位面积颖花数和成熟期生物量的降低(表 4 和表 9)。一般认为农户田块的实际产量与小区水平的试验产量间的差异主要源于栽培管理和土壤肥力的不同[27]。在本研究中，生产示范早、晚季施氮量分别比小区试验多 115 kg N hm^{-2} 和 80 kg N hm^{-2}，存在施肥量过高的现象，且 50%~59%氮肥作为分蘖肥施入，氮肥的分配不太合理，但是 2 个试验间氮肥管理的差异并不影响本研究的基本结论。在生产示范试验中，分蘖期高氮肥施用量主要是因为当地土壤偏沙质，基础肥力低，保肥能力差，当地农民在实际生产中为获得更多穗数实现高产，一般会提高分蘖肥施用量。前期较高的施氮量不仅造成了氮素损失，更易形成群体郁闭的环境，增加病虫害和倒伏的风险[28]。在生产示范中，各供试品种作早稻种植时前期较多的无效分蘖导致植株相互遮荫，幼穗分化受影响，分蘖成穗率降低，每穗颖花数减少。因此，保持早期合适的群体建成和后期充足的氮供应是实现水稻高产的关键。今后的研究应在减少施氮量的条件下评价超短生育期新品系在双季稻双直播模式下大面积生产时的产量和农艺表现。同样，科学的病虫草害防治有利于保障直播稻高产。在生产示范中由于早晚季均未进行病害防治，导致后期纹枯病和稻瘟病较为严重。另外，与小区试验中“一封、二杀、三补”的控草策略相比，生产示范中仅在早季秧苗二叶一心至三叶一心期进行一次封杀，早季除草效果较差，晚季草害加重，杂草与水稻竞争养分和空间，抑制了水稻生长，不利于水稻高产。另一方面，作物所需养分主要来自于土壤，基础地力水平直接影响作物产量[29]。与小区试验田块相比，生产示范田块播种前的土壤有机质、全氮、速效磷和速效钾的平均含量分别低 6.1%、12.8%、31.0%和 27.1%，较低的土壤肥力也限制了供试品种产量潜力的发挥(表 1)。在生产示范试验中，由于前茬油菜作绿肥还田和油菜季施用的缓控施肥养分留存释放，增加了早季土壤的速效钾含量。尽管早稻秸秆还田在一定程度上会提高晚季土壤速效钾含量，但由于双季稻双直播早、晚稻的接茬时间仅有 5 d，在晚季土壤取样测定时还田秸秆的钾元素还未大量释放。因此，早季土壤的速效钾含量明显高于晚季。通过改良土壤，优化栽培管理措施，在保证水稻具有适宜穗数的基础上增加每穗粒数，增加生物量，提高茎蘖成穗率将有助于进一步提高超短生育期品种的产量潜力，进而推动华中地区双季稻双直播模式的发展。另外，优化早晚季品种搭配也可以提高双季稻双直播模式的周年产量，根据本研究结果，采用早季早籼 615 或者中早 39 搭配晚季 CPPC18 可以获得更高的周年产量。

3.4 超短生育期新品系的抗倒伏特性

直播稻群体较大，在灌浆后期常容易发生倒伏，是限制直播稻高产优质的重要因素。在本研究中，超短生育期新品系 CPPC18 在早、晚季的抗倒伏能力均要高于其他对照品种。从形态学特性来看，通常随着株高的增加，水稻抗倒伏能力下降[16]。CPPC18 具有较低的株高和重心高度，相应地其倒伏指数也较低。然而，超短生育期新品系虽然株高降低了但是并没有造成生物量的降低，在增强了抗倒伏能力的同时也提高了产量表现。另一方面，除了株高，重心高度、节间直径、茎壁厚度、单位长度节间干重和单位体积节间干重等也与水稻抗倒性密切相关[30]。大量研究表明，缩短基部节间，降低重心高度，提高茎壁厚度和茎秆充实度是提高水稻抗倒伏能力的结构基础[31-32]。从力学特性来看，CPPC18 主要得益于其较低的弯曲力矩因而在早、晚季倒伏指数均较低(表 7)。雷小龙等[33]研究发现，降低弯曲力矩、提高抗折力和折断弯矩是提高植株抗倒伏能力的关键。同时，Wang 等[34]也表示，进一步提高双季稻双直播模式的产量，应增强超短生育期水稻的抗折力。因此，超短生育期水稻品种应保持适当的株高，增强茎秆的抗折力，降低弯曲力矩从而有利于协同提高生物量和抗倒伏能力。除了受自身特性影响外，外部环境因素如急风、强降雨等也

会造成植株倒伏[35]。在小区试验中, 早季灌浆期未经历恶劣天气, 尽管不同品种间倒伏指数存在差异, 但田间基本没有发生倒伏; 而晚季齐穗后 7~13 d 遭遇大暴雨, 早籼 615 和两优 152 发生严重倒伏。总体来看, 超短生育期新品系 CPPC18 具有良好的抗倒性, 抵御恶劣天气的能力较强。

4　结论

超短生育期新品系在双季稻双直播模式下早晚兼用的单季生育期均在 95 d 以内, 周年生育期为 180 d, 这比其早晚兼用的父本品种早籼 615 缩短 8 d 而比母本品种湘早籼 6 号增加 7 d, 相比生产对照中早 39 与两优 152 早晚搭配缩短 22 d。同时, 超短生育期新品系的周年产量达到 14.9 t hm^{-2}, 比父母本品种和生产对照品种增产 7.2%~14.6%。超短生育期新品系的高产表现主要得益于在早季较强的早发特性和在晚季较高的单位面积颖花数、结实率和收获指数。相比于与父母本品种和生产对照品种, 超短生育期新品系的抗倒伏能力大幅提高, 在小区试验和生产示范的早晚季中均未发生倒伏。综上所述, 超短生育期新品系 CPPC18 能够满足在华中地区实现双季稻双直播模式的高产稳产要求。超短生育期水稻品种作为践行双季稻双直播模式的关键因素, 后期仍需进行产量潜力的遗传改良和配套栽培管理的研发集成, 以确保在大面积生产中高产稳产。

References

[1] Huang M, Zou Y. Integrating mechanization with agronomy and breeding to ensure food security in China. *Field Crops Res*, 2018, 224: 22–27.

[2] 彭少兵. 对转型时期水稻生产的战略思考. 中国科学: 生命科学, 2014, 44: 845–850.
Peng S B. Reflection on China's rice production strategies during the transition period. *Sci Sin*, 2014, 44: 845–850 (in Chinese with English abstract).

[3] Ray D K, Foley J A. Increasing global crop harvest frequency: recent trends and future directions. *Environ Res Lett*, 2013, 8, 044041.

[4] 艾治勇, 郭夏宇, 刘文祥, 马国辉, 青先国. 长江中游地区双季稻安全生产日期的变化. 作物学报, 2014, 40: 1320–1329.
Ai Z Y, Guo X Y, Liu W X, Ma G H, Qing X G. Changes of safe production dates of double-season rice in the middle reaches of the Yangtze River. *Acta Agron Sin*, 2014, 40: 1320–1329 (in Chinese with English abstract).

[5] Peng S B, Tang Q Y, Zou Y B. Current status and challenges of rice production in China. *Plant Prod Sci*, 2009, 12: 3–8.

[6] Yu, X, Wang, F, Xu, L, Chen Z F, Yuan S, Wang X Y, Huang J L, Peng S B. Optimization of nitrogen management in both early and late seasons of direct-seeded double-season rice with an ultrashort-duration variety in central China. *J Plant Growth Regul*, 2023, 42: 3173–3183.

[7] Xu L, Zhan X W, Yu T T, Nie L X, Huang J L, Cui K H, Wang F, Li Y, Peng S B. Yield performance of direct-seeded, double-season rice using varieties with short growth durations in central China. *Field Crops Res*, 2018, 227: 49–55.

[8] Wang X Y, Yang G D, Xu L, Xiang H S, Yang C, Wang F, Peng S B. Grain yield and nitrogen use efficiency of an ultrashort-duration variety grown under different nitrogen and seeding rates in direct-seeded and double-season rice in central China. *J Integr Agric*, 2023, 22: 1009–1020.

[9] Chen J N, Huang M, Cao F B, Yin X H, Zou Y B. Availability of existing early-season rice cultivars as resources for selecting high-yielding short-duration cultivars of machine-transplanted late-season rice. *Exp Agric*, 2019, 56: 218–226.

[10] Ying J F, Peng S B, He Q R, Yang H, Yang C D, Visperas R M, Cassman K G. Comparison of high-yield rice in tropical and subtropical environments I. Determinants of grain and dry matter yields. *Field Crops Res*, 1998, 57: 71–84.

[11] Farooq M, Siddique K H M, Rehman H, Aziz T, Lee D J, Wahid A. Rice direct seeding: Experiences, challenges and opportunities. *Soil Tillage Res*, 2011, 111: 87–98.

[12] Peng S B, Khush G S, Virk P, Tang Q Y, Zou Y B. Progress in ideotype breeding to increase rice yield potential. *Field Crops Res*, 2008, 108: 32–38.

[13] Zhang J, Li G H, Song Y P, Liu Z H, Yang C D, Tang S, Zheng C Y, Wang S H, Ding Y F. Lodging resistance characteristics of high-yielding rice populations. *Field Crops Res*, 2014, 161: 64–74.

[14] 周国峰. 超级稻新组合在洞庭湖区的生产适应性比较研究. 湖南农业大学硕士学位论文, 湖南长沙, 2007.
Zhou G F. Comparative Study on the Adaptability of New Combinations of Super Hybrid Rice. MS Thesis of Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan, China, 2007 (in Chinese with English abstract).

[15] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000. pp 1–638.
Lu R K. Soil Agro-Chemistrical Analysis. Beijing: China Science and Technology Press, 2000. pp 1–638 (in Chinese).

[16] 李国辉, 钟旭华, 田卡, 黄农荣, 潘俊峰, 何庭蕙. 施氮对水稻茎秆抗倒伏能力的影响及其形态和力学机理. 中国农业科学, 2013, 46: 1323–1334.
Li G H, Zhong X H, Tian K, Huang N R, Pan J F, He T H. Effect of nitrogen application on stem lodging resistance of rice and its morphological and mechanical mechanisms. *Sci Agric Sin*, 2013, 46: 1323–1334 (in Chinese with English abstract).

[17] Zhang W J, Wu L M, Ding Y F, Weng F, Wu X R, Li G H, Liu Z H, Tang S, Ding C Q, Wang S H. Top-dressing nitrogen fertilizer rate contributes to decrease culm physical strength by reducing structural carbohydrate content in *japonica* rice. *J Integr Agric*, 2016, 15: 992–1004.

[18] Xu L, Yuan S, Wang X Y, Chen Z F, Li X X, Cao J, Wang F, Huang J L, Peng S B. Comparison of yield performance between direct-seeded and transplanted double-season rice using ultrashort-duration varieties in central China. *Crop J*, 2022, 10: 515–523.

[19] Wonprasaid S, Khunthasuvon S, Sittisuang P, Fukai S. Performance of contrasting rice cultivars selected for rainfed lowland conditions in relation to soil fertility and water availability. *Field Crops Res*, 1996, 47: 267–275.

[20] Tuong T P, Bhuiyan SI. Increasing water-use efficiency in rice production: farm level perspectives. *Agric Water Manag*, 1999, 40: 117–122.

[21] Yuan S, Cassman K G, Huang J L, Peng S B, Grassini P. Can ratoon cropping improve resource use efficiencies and profitability of rice in central China? *Field Crops Res*, 2019, 234: 66–72.

[22] Xu L, Yuan S, Wang X Y, Yang G D, Pan X C, Yu X, Wang F, Huang J L, Peng S B. Productivity and global warming potential of direct seeding and transplanting in double–season rice of central China. *Food Energy Secur*, 2022, 12, e419.

[23] Peng S, Cassman K G, Virmani S S, Sheehy J, Khush G S. Yield potential trends of tropical rice since the release of IR8 and the challenge of increasing rice yield potential. *Crop Sci*, 1999, 39: 1552–1559.

[24] 彭碧琳, 胡香玉, 钟旭华, 田卡, 黄农荣, 潘俊峰, 梁开明, 刘彦卓, 傅友强. 华南双季直播稻品种筛选及其产量形成特征研究. 中国稻米, 2019, 25(5): 47–52.
Peng B L, Hu X Y, Zhong X H, Tian K, Huang N R, Pan J F, Liang K L, Liu Y Z, Fu Y Q. Selection and yield formation characteristics of double-cropping and direct seeding rice in south China. *China Rice*, 2019, 25(5): 47–52 (in Chinese with English abstract).

[25] 詹学武. 湖北地区双季稻直播种植模式研究. 华中农业大学硕士学位论文, 湖北武汉, 2016.
Zhan X W. Study on Agronomic Performance of Direct Seeding in Double-season Rice in Hubei Province. MS Thesis of Huazhong Agricultural University, Wuhan, Hubei, China, 2016 (in Chinese with English abstract).

[26] Wang W X, Du J, Zhou Y Z, Zeng Y J, Tan X M, Pan X H, Shi Q H, Wu Z M, Zeng Y H. Effects of different mechanical direct seeding methods on grain yield and lodging resistance of early *indica* rice in South China. *J Integr Agric*, 2021, 20: 1204–1215.

[27] 杨若珺. 湖南省水稻熟制变化与农民选择行为分析. 中国农业科学院硕士学位论文, 北京, 2013.
Yang R J. Analysis of farmer selection behaviors of rice cropping system in Hunan Province. MS Thesis of Graduate School of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing, China, 2013 (in Chinese with English abstract).

[28] 李勇, 杨林章, 殷广德. 太湖地区直播稻田氮素渗漏损失试验研究. 植物营养与肥料学报, 2010, 16: 99–104.
Li Y, Yang L Z, Yin G D. Experimental study on nitrogen leaching in a direct–seeding rice paddy of Taihu Lake Basin. *Plant Nutr Fert Sci*, 2010, 16: 99–104 (in Chinese with English abstract).

[29] 武红亮, 王士超, 闫志浩, 槐圣昌, 马常宝, 薛彦东, 徐明岗, 卢昌艾. 近 30 年我国典型水稻土肥力演变特征. 植物营养与肥料学报, 2018, 24: 1416–1424.
Wu H L, Wang S C, Yan Z H, Huai S C, Ma C B, Xue Y D, Xu M G, Lu C A. Evolution characteristics of fertility paddy soil in China in recent 30 years. *Plant Nutr Fert Sci*, 2018, 24: 1416–1424 (in Chinese with English abstract).

[30] 滕祥勇, 王金明, 李鹏志, 林秀云, 孙强. 水稻抗倒伏性的影响因素及评价方法研究进展. 福建农业学报, 2021, 36: 1245–1254.
Teng X Y, Wang J M, Li P Z, Lin X Y, Sun Q. Advances on studies relating to lodging resistance of rice plant. *Fujian J Agric Sci*, 2021, 36: 1245–1254 (in Chinese with English abstract).

[31] 陆展华, 王晓飞, 刘维, 卢东柏, 王石光, 薛曦, 何秀英. 优质稻粤农丝苗抗倒伏影响因素和遗传分析. 植物遗传资源学报, 2021, 22: 638–645.
Lu Z H, Wang X F, Liu W, Lu D B, Wang S G, Xue J, He X Y. Influencing factors and genetic analysis of lodging resistance of high-quality rice Yuenonog Simiao. *J Plant Genet Resour*, 2021, 22: 638–645 (in Chinese with English abstract).

[32] Zhang W J, Wu L M, Wu X R, Ding Y F, Li G H, Li J Y, Weng F, Liu Z H, Tang S, Ding C Q, Wang S H. Lodging resistance of *japonica* rice (*Oryza sativa* L.): morphological and anatomical traits due to top-dressing nitrogen application rates. *Rice*, 2016, 9: 31–41.

[33] 雷小龙, 刘利, 苟文, 马荣朝, 任万军. 种植方式对杂交籼稻植株抗倒伏特性的影响. 作物学报, 2013, 39: 1814–1825.
Lei X L, Liu L, Gou W, Ma R C, Ren W J. Effect of planting methods on culm lodging resistance of indica hybrid rice (*Oryza sativa* L.). *Acta Agron Sin*, 2013, 39: 1814–1825 (in Chinese with English abstract).

[34] Wang X Y, Xu L, Li X X, Yang G D, Wang F, Peng S B. Grain yield and lodging-related traits of ultrashort-duration varieties for direct-seeded, double-season rice in central China. *J Integr Agric*, 2021, 21: 2888–2899.

[35] 章清杞, 蔡来龙, 黄荣华, 程祖锌. 直播稻栽培技术研究进展. 亚热带农业研究, 2020, 16: 1–7.
Zhang Q Q, Cai L L, Huang R H, Cheng Z X. Research progress of direct seeding rice cultivation techniques. *Subtrop Agric Res*, 2020, 16: 1–7 (in Chinese with English abstract).