



长江下游稻区不同类型双季晚粳稻产量与生育特性差异

殷敏, 刘少文, 褚光, 徐春梅, 王丹英, 章秀福, 陈松

(中国水稻研究所, 杭州 311400)

摘要:【目的】明确不同类型粳稻在长江下游作双季晚稻种植的产量和生育特性, 为筛选适宜长江下游双季晚粳品种提供理论依据。【方法】2017—2018年在浙江省杭州市中国水稻研究所实验农场, 以高产晚粳品种(IR)为对照, 并选择大面积应用的常规粳稻(IJR)、杂交粳稻(HJR)和籼粳杂交稻(IJHR)品种, 研究比较晚季温光条件下常规粳稻、杂交粳稻、籼粳杂交稻和晚粳稻在产量、生育期以及温光资源配置上的差异。【结果】(1) 籼粳杂交稻产量(8.3—10.0 t·hm⁻²)显著高于其他晚稻类型, 分别增产2.9%—29.3%(晚粳稻), 30.9%—35.3%(常规粳稻)和13.4%—14.0%(杂交粳稻); 常规粳稻产量最低, 较晚粳稻分别减产24.0%(2017年)和1.2%(2018年); 而杂交粳稻与晚粳稻产量差异随年份不同而不同。与晚粳稻相比, 籼粳杂交稻有效穗少、穗型大、库容高、千粒重和结实率相似; 而常规/杂交粳稻则表现为有效穗近似, 千粒重大, 穗型小。全生育期总体上表现为籼粳杂交稻>杂交粳稻>常规粳稻>晚粳稻。与晚粳稻相比, 籼粳杂交稻水稻营养生长期变化较小; 穗发育期略有缩短(1—6 d), 而灌浆期显著延长(12—22 d); 全生育期温光资源积累量显著提高, 其中主要贡献来自灌浆期的延长。(2) 利用主成分分析(PCA), 将供试双季晚稻产量构成与生育特性降维为主成分一(穗粒型因子, 37.7%)和主成分二(生育期因子, 24.7%)。结果表明籼粳杂交稻为少穗多粒、长灌浆期; 晚粳稻为穗粒兼顾、短灌浆期; 常规和杂交粳稻的品种特征无显著差异, 均为多穗少粒、长灌浆期。(3) 相关分析表明, 双季晚粳稻产量与每穗粒数($R^2=0.607$, $P<0.001$)、库容($R^2=0.779$, $P<0.001$)和灌浆期($R^2=0.505$, $P<0.001$)呈极显著正相关关系。此外, 与双季晚粳稻相比, 双季晚粳稻产量对环境变化较敏感, 品种间、年度间变异系数较大, 这就需要品种的属地化和因种栽培。【结论】双季晚稻“籼改粳”最主要的优势在于延长灌浆期, 从而提高全生育期温光资源积累量。与其他类型水稻相比, 籼粳杂交稻产量高, 表现为大穗型、高库容及长灌浆期, 更适宜于长江下游双季晚稻种植。选用籼粳杂交稻, 对于提高双季晚稻产量和温光资源利用率、保证双季稻生产安全性具有十分重要的意义。

关键词: 双季晚稻; 产量; 生育特性; 晚粳稻; 常规粳稻; 杂交粳稻; 籼粳杂交稻

Differences in Yield and Growth Traits of Different Japonica Varieties in the Double Cropping Late Season in the Lower Reaches of the Yangtze River

YIN Min, LIU ShaoWen, CHU Guang, XU ChunMei, WANG DanYing, ZHANG XiuFu, CHEN Song

(China National Rice Research Institute, Hangzhou 311400)

Abstract: 【Objective】The aim of the study was to evaluate the yield and growth traits of different types of japonica rice in the late season in the lower reaches of the Yangtze River, so as to provide a theoretical basis for selecting the proper varieties in the double cropping late season in this area. 【Method】Field experiment was carried out at the China National Rice Research Institute

收稿日期: 2019-08-05; 接受日期: 2019-10-08

基金项目: 国家重点研发项目(2016YFD0300507、2016YFD0300208-02)

联系方式: 殷敏, E-mail: 1603811077@qq.com. 通信作者陈松, E-mail: chensong02@caas.cn

in Hangzhou, Zhejiang province from 2017 to 2018, with four rice types, including the late indica rice (IR) as a control, inbred japonica (IJR), hybrid japonica (HJR) and indica/japonica hybrid rice (IJHR). 【Result】 (1) The yield of IJHR ($8.3\text{--}10.0\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$) was significantly higher than that of other rice types, increasing by 2.9%–29.3%, 30.9%–35.3%, and 13.4%–14.0% than IR, IJR, and HJR, respectively; The average yield of IJR was the lowest, which was 24.0% (2017) and 1.2% (2018) lower than control (IR), while the yield difference between HJR and IR was varied within years. The IJHR had higher spikelets per panicle and greater sink, and similar panicles per unit area, grain weight, and grain setting as compared to IR. In contrast, the IJR/HJR had higher grain weight and lower spikelets per panicle than IR. The growth duration was ranked in the order of IJHR>HJR>IJR>IR. Compared with IR, the japonica rice (IJR, HJR, and IJHR) had similar vegetative stage (about 56–59 d), slightly reduced reproductive stage (1–6 d), and prolonged the grain filling stage (12–22 d), which leading to an improved accumulation of temperature and solar radiation of the growth duration. (2) The yield component and phenological traits were dimensional reduced by principal component analysis (PCA) as principal component one (panicle size factor, 37.7%) and the principal component two (the growth factor, 24.7%), of which the IJHR was classified as variety with few panicles, large grains, and long grain filling stage, and the IR was medium panicles numbers and size, and short grain filling stage. There was no difference between IJR and HJR based on PCA, being multiple panicles, small panicle size, and long grain filling stage. (3) Correlation analysis showed that the yields of late japonica rice were significantly positively correlated with spikelets per panicle ($R^2=0.607$, $P<0.001$), sink size ($R^2=0.779$, $P<0.001$) and grain filling stage ($R^2=0.505$, $P<0.001$). Compared with the late indica rice, the yield of the double cropping late japonica rice was obvious sensitive to the change of environment, which was characterized by large coefficient of variation between varieties and years. Therefore, it was necessary to localize the variety and cultivate it by species. 【Conclusion】 Applying japonica variety in the late season would prolong the grain filling stage, and increase the temperature and solar radiation accumulation for the late-season rice as compared with IR. The IJHR with large panicle size, high sink size and long grain filling stage maintained the great yield superiors and being suitable for growing the late season in the lower reaches of the Yangtze River, which would help to improve the yield, temperature and light resources utilization and safety of the late-season rice.

Key words: double cropping late rice; yield; growth traits; late indica rice; inbred japonica rice; hybrid japonica rice; indica/japonica hybrid rice

0 引言

【研究意义】水稻是我国三大粮食作物之一,在我国有 60%以上居民以稻米为主食^[1]。近年来,随着生活水平不断提高,居民消费结构升级,人们对外观好、口感佳的优质稻米需求不断增加,尤其以粳米的供需矛盾更为突出^[2]。目前我国粳稻种植面积约 900 万 hm^2 , 主要分布在北方、江淮华北、长江中下游以及云贵高原等四大区域^[3]。其中,北方粳稻约占粳稻总面积的 52%, 江淮华北、长江中下游以及云贵高原分别占 1%、40%和 7%^[4–5]。然而北方粳稻区均为单季种植区, 长江中下游地区则是典型的单双混种区域^[5], 双季稻面积达 742.8 万 hm^2 , 占稻谷总种植面积的 49.2%^[4]。若能将传统的双季晚粳改为晚粳, 从而增加粳稻种植面积, 提高粳稻产量, 对缓解粳稻供需矛盾意义重大。【前人研究进展】长江下游稻区地处亚热带季风区, 年降水量 1 000—1 800 mm, 降水充沛, 且雨热同期^[6]。 $\geq 10^\circ\text{C}$ 的年积温 5 300 度·日线以北的浙北苏南农业气候区在 20 世纪中期曾出现过早籼稻-晚粳稻+油菜、绿肥的种植制度^[7]。但随着

品种的更新, 尤其是对高产的追求, 这种模式逐渐被淘汰。随着气候变暖, 长江中下游晚季辐射和积温逐渐增加, 双季晚稻安全齐穗的天数有延长的趋势, 为晚熟品种尤其是高产粳稻品种提供了温光保障^[8–9]。因此, 近年来粳稻种植面积不断增加, 如上海市大面积推广品种已更替为粳稻, 湖北、浙江、安徽等地亦出现粳进籼退的局面^[5]。长江中下游是双季晚稻的主产区, 但在近几十年的研究中双季晚稻大多集中在晚籼稻品种上, 对晚粳稻品种关注较少。与籼稻相比, 粳稻更能适应花期高温^[10–11]以及灌浆后期的低温环境^[12–13], YOSHIDA^[14]研究发现, 粳稻的适宜灌浆温度为 20—25℃。生产上, 现有的籼稻收获期一般在 10 月中下旬, 而粳稻的收获往往能延迟到 11 月中上旬^[15]。以杭州 2016—2018 为例, 10 月中旬至 11 月中上旬的平均温度 17℃, 累积日照时数 124 h, 累积日照辐射 398 $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$, 其中累积日照时数和日照辐射约占传统晚籼稻温光资源的 16%和 19% (中国气象数据网, <http://data.cma.cn>)。因此, 通过双季晚稻“籼改粳”, 能够充分利用冗余的大田种植期, 从而提高温光资源利用率。【本研究切入点】现有的晚稻

育种仍以晚籼稻为主，稳产高效的晚粳稻育种严重滞后。针对现有晚季温光资源特性，筛选适宜的双季晚粳稻品种，对长江中下游地区稻米产业的提质增效有指导作用。【拟解决的关键问题】本研究以2017—2018 年大田试验为基础，筛选代表性的不同类型粳稻品种（常规粳稻、杂交粳稻和籼粳杂交稻），以晚籼品种为对照，比较不同类型双季晚稻大田产量表现与生育特性差异，产量构成及其温光分布差异，解析双季晚粳稻品种高产相关特征，为筛选适宜长江中下游双季晚粳品种提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点

试验于 2017—2018 年在浙江省杭州市中国水稻研究所实验农场（120°W，30°N）进行，该地区属亚热带季风区，年平均气温 18℃，年降雨量 1 700 mm 左右，日照时数在 1 500—1 800 h。试验前作为冬闲田，碱解氮 134.07 mg·kg⁻¹，有效磷 30.39 mg·kg⁻¹，速效钾 137.65 mg·kg⁻¹，有机质含量 33.83 g·kg⁻¹，阳离子交换量 13.98 mg·kg⁻²，pH 5.53。

1.2 试验设计与供试品种

试验以生产上大规模种植的不同类型粳稻品种为处理，设置晚籼稻（对照）、常规粳稻、杂交粳稻和籼粳杂交稻等 4 种处理，采用单因素随机区组设计，设置 3 个区组重复，具体品种信息见表 1。

试验采用常规育秧，移栽种植，2017—2018 年分别于 6 月 25 日、6 月 26 日播种，7 月 14 日、7 月 19 日移栽，栽插行株距为 25 cm×16.7 cm。施氮量 202.5 kg·hm⁻²；氮磷钾配比=1：0.5：1（N：P₂O₅：K₂O，质量比）。氮肥为尿素（N 46%），磷肥为过磷酸钙（P₂O₅ 12%），钾肥为氯化钾（K₂O 60%）。

氮肥运筹按基：蘖：穗肥（50%：30%：20%）分 3 次施入；磷肥一次性施入作基肥，钾肥按基：穗肥（50%：50%）2 次施入。田间栽培管理同高产栽培管理，及时控制和防治病虫害。

1.3 样品采集与测定分析

1.3.1 主要生育期记载 观察并记录水稻幼穗分化期（剥开主茎见分化中 2—3 cm 左右的白色幼穗）、齐穗期（田间 80%以上分蘖抽穗）和成熟期（90%以上穗变黄）。

1.3.2 测产及其构成 成熟期中心测产区实收连续均匀分布的 100 穴水稻，脱粒、除杂、晒干后，测定籽粒重量，并利用谷物水分测量仪（PM-8188-A，北京和信昌吉科技发展有限公司）测定籽粒含水量。同时于中心测产区选取长势相近的植株 20 穴调查有效穗数；并按平均穗数取长势相近的水稻 6 穴，测定总穗数，并脱粒。水选法（自来水）分离实粒，烘干（80℃）后风选法（SXJ-80A 型种子清选净度仪，中国水稻研究所稻作技术中心，0.7 m 高处风力 8 m·s⁻¹）分离半饱粒（瘪粒）和空粒。利用自动种子考种分析仪及千粒重仪（万深 SC-G，杭州万深检测科技有限公司）分别测定实粒、半饱粒和空粒粒重（每个样品不少于 3 次亚重复，每次测定不少于 500 粒，亚重复 CV%小于 2%），计算每穗粒数和结实率；实粒分样于 80℃烘干至恒重（约 72 h），计算千粒重。

1.3.3 主要气候参数 最低/高温度、平均温度、日照时数、降雨量等从国家气象信息中心下载（<http://data.cma.cn>，中国地面气候资料日值数据集 V3.0）。日照辐射（RS）根据 Hargreaves&Samani 模型计算^[16]，2017—2018 年晚季（6—11 月）气候资源变化如图 1 所示。

表 1 2017—2018 年试验品种信息
Table 1 Varieties information from 2017 to 2018

年份 Year	品种类型 Cultivar type			
	IR	IJR	HJR	IJHR
2017—2018	黄华占 Huanghuazhan	嘉 58 Jia 58	常优 5 号 Changyou 5	春优 84 Chunyou 84（2017）
	天优华占 Tianyouhuazhan	嘉禾 218 Jiahe 218	嘉优 5 号 Jiayou 5	春优 927 Chunyou 927（2018）
	C 两优华占 C Liangyouhuazhan	南粳 46 Nangeng 46		甬优 1540 Yongyou 1540
		南粳 9108 Nangeng 9108		甬优 538 Yongyou 538
		秀水 134 Xiushui 134		

IR：晚籼稻；IJR：常规粳稻；HJR：杂交粳稻；IJHR：籼粳杂交稻
IR: Indica rice; IJR: Inbred japonica rice; HJR: Hybrid japonica rice; IJHR: Indica/japonica hybrid rice

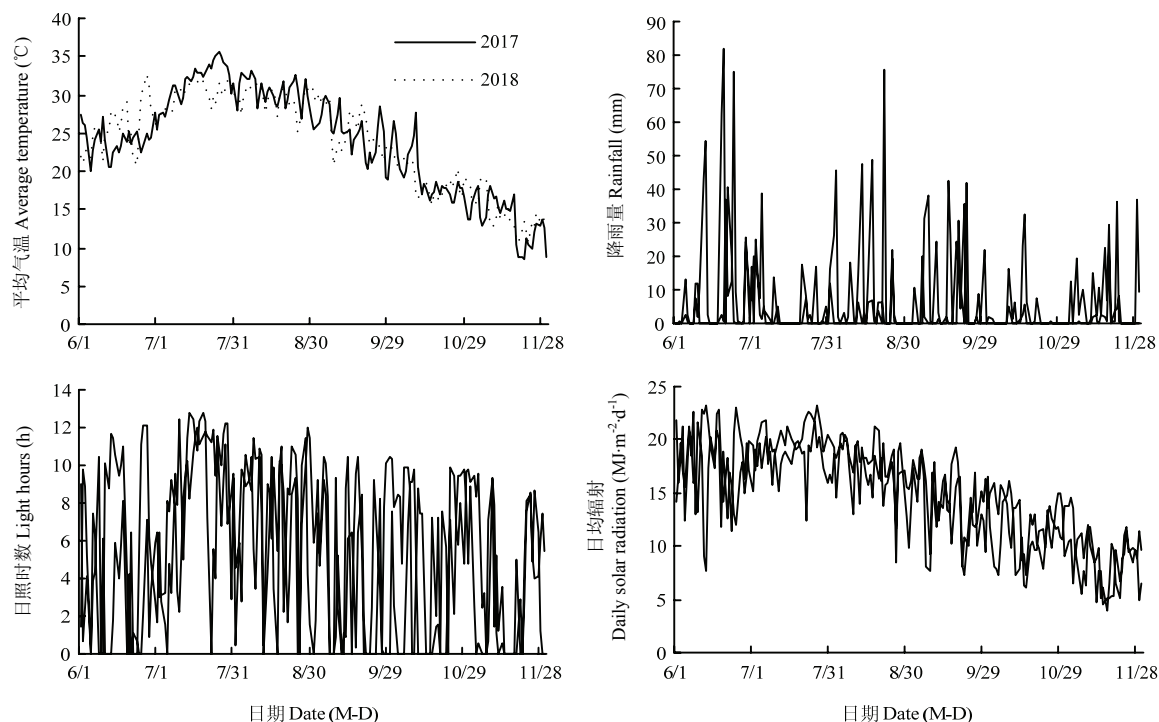


图1 2017—2018 年晚季气候资源变化

Fig. 1 Changes in the climate resources in the late season from 2017 to 2018

$$RS = 0.16 \times [Ra \times (1 + 2.7 \times 10^{-5} \times Alt) \times (T_{\max} - T_{\min})^{0.5}]$$

式中, RS 为日照辐射 ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); Ra 为大气顶层太阳辐射 ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$), 由地理位置参数和日倾角参数计算得到; Alt 为海拔 (m); T_{\max} 为日最高温度 ($^{\circ}\text{C}$); T_{\min} 为日最低温度 ($^{\circ}\text{C}$)。

不同生育阶段累积有效积温 (EAT)、日照时数 (LH) 和日照辐射 (Rs) 计算公式如下:

$$f(x) = \sum_{i=n}^m x_i$$

式中, $f(x)$ 为某生育期温光资源累积值 (EAT、LH 和 Rs); x_i 为第 i 日日均温光资源值 (如日均有效积温, $\geq 10^{\circ}\text{C}$; 或日照时数; 或日均日照辐射值); n 和 m 为某生育阶段起始和终止日期。

1.4 数据整理与分析

数据采用 Microsoft Excel 2003 输入和整理。利用 SAS 9.4 分析不同处理 ANOVA, 通过 Duncan 法 ($P=0.05$) 进行品种类型 (年份) 的单 (双) 因素检验, 用 R 语言 (R 3.6.0) 分析包 (FactoMineR、factoextra、corrplot 和 ggplot2) 对不同类型晚稻品种进行主成分分析, 并通过 Microsoft Excel 2003 对产量、产量构成以及生育期相关参数进行相关性分析。

2 结果

2.1 产量

从表 2 中可以看出, 不同类型双季晚稻产量表现因选择品种和年份不同而有所差异。2 年平均产量依次为粳粳杂交稻 ($9.16 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)、杂交粳稻 ($8.05 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)、晚粳稻 ($7.91 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) 和常规粳稻 ($6.90 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$); 品种及其年际间变幅分别为 10.49%、10.05%、6.31% 和 15.05%。不同品种类型间以粳粳杂交稻的产量最高, 除其 2017 年与晚粳稻无显著差异外, 均显著高于其他类型晚稻, 分别增产 13.4%—35.3% (2017 年, 不含晚粳稻) 和 14.0%—30.9% (2018 年); 杂交粳稻的产量虽低于粳粳杂交稻, 但比常规粳稻高 14.8%—19.3% (2017 和 2018 年); 杂交粳稻与晚粳稻产量差异因年份不同而有所差异, 2017 年较晚粳稻显著降低 9.3%, 而 2018 年显著增加 13.4%; 常规粳稻的平均产量最低, 较晚粳稻减产 1.2%—24.0%, 但产量因品种和年份不同变幅较大, 如 2018 年, 嘉 58、南粳 46、秀水 134, 产量在 $8.0 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 以上, 要显著高于当年的晚粳稻, 这说明双季常规粳稻仍存在巨大的产量潜力。

表 2 2017—2018 年不同类型晚稻产量差异
Table 2 Differences in yields of different types of late rice from 2017 to 2018 (t·hm⁻²)

类型 Type	品种 Variety	2017	2018
IR	黄华占 Huanghuazhan	7.9±0.4c	7.5±0.2gh
	天优华占 Tianyouhuazhan	7.6±0.2cd	7.8±0.2fg
	C 两优华占 C Liangyouhuazhan	8.9±0.2a	7.9±0.3efg
IJR	嘉 58 Jia 58	5.9±0.1fg	8.5±0.2cd
	嘉禾 218 Jiahe 218	6.1±0.3f	6.1±0.1i
	南粳 46 Nangeng 46	5.6±0.1g	8.3±0.3de
	南粳 9108 Nangeng 9108	6.6±0.1e	7.2±0.1h
	秀水 134 Xiushui 134	6.6±0.3e	8.0±0.1ef
HJR	常优 5 号 Changyou 5	7.4±0.3d	8.7±0.2c
	嘉优 5 号 Jiayou 5	7.3±0.1d	8.8±0.3c
IJHR	春优 84 Chunyou 84	8.3±0.2b	—
	春优 927 Chunyou 927	—	10.6±0.4a
	甬优 1540 Yongyou 1540	8.4±0.2b	9.9±0.4b
	甬优 538 Yongyou 538	8.3±0.3b	9.5±0.2b
平均值 Average	IR	8.1±0.6a	7.7±0.3c
	IJR	6.2±0.4c	7.6±0.9c
	HJR	7.4±0.2b	8.8±0.3b
	IJHR	8.3±0.2a	10.0±0.5a
ANOVA			
品种类型 Type (T)		65.60**	
年份 Year (Y)		62.52**	
T×Y		13.95**	

不同小写字母代表同一年份不同晚稻类型间显著性差异 ($P<0.05$, Duncan), **表示 $P<0.01$; *表示 $0.01\leq P<0.05$; ns 表示 $P\geq 0.05$ 。下同
Different lowercase letters represent significant differences between different types of late rice in the same year ($P<0.05$, Duncan), ** means $P<0.01$; * means $0.01\leq P<0.05$; ns means $P\geq 0.05$. The same as below

2.2 产量构成

不同类型晚稻品种的产量结构差异与年份存在显著互作(表 3)。不同类型晚稻品种有效穗数存在差异, 总体而言依次为籼稻>杂交粳稻>常规粳稻>籼粳杂交稻(2018 年常规粳稻>籼稻); 其中籼粳杂交稻显著低于籼稻, 2017—2018 年分别降低 26.1%和 28.8%; 常规粳稻和杂交粳稻与晚籼稻间差异不显著(2017 年常规粳稻除外)。每穗粒数则为籼粳杂交稻>籼稻>杂交粳稻>常规粳稻; 籼粳杂交稻每穗粒数最高(平均 289.5), 分别比常规粳稻、杂交粳稻和晚籼稻高 127.3%、90.6%和 64.9%; 与晚籼稻相比, 常规粳稻和杂交粳稻分别降低 26.6%—28.4%和 8.4%—18.9%。不同类型品种库容差异与每穗粒数类似, 并表现为籼粳杂交稻(平均 $63.6\times 10^3\cdot\text{m}^{-2}$)显著高于其他类型晚稻, 其次为籼稻(平均 $53.1\times 10^3\cdot\text{m}^{-2}$), 常

规粳稻最低(平均 $36.9\times 10^3\cdot\text{m}^{-2}$)。结实率变幅在 60.7%—77.2%, 总体而言常规粳稻(75.0%—77.2%)要略高于杂交粳稻, 并显著高于籼稻和籼粳杂交稻; 2017 年籼粳杂交稻略高于籼稻, 2018 年略低。千粒重上, 籼稻和籼粳杂交稻无显著差异(22.5—23.0 g), 但均显著低于粳稻(常规粳稻平均 26.4 g, 杂交粳稻平均 27.7 g)。综上, 与晚籼稻相比, 籼粳杂交稻有效穗少、穗型大、库容高、千粒重和结实率相似; 而常规/杂交粳稻则表现为有效穗多、千粒重大、穗型小。

2.3 生育期

水稻生育期在品种和年份间存在显著差异, 且除营养生长期外, 品种和年份间互作效应不显著(表 4)。全生育期总体上表现为籼粳杂交稻>杂交粳稻>常规粳稻>籼稻; 与籼稻相比, 籼粳杂交稻、杂交粳稻和常规粳稻分别显著延长 14—18、11—15 和

表 3 2017—2018 年不同类型晚稻产量构成差异

Table 3 Differences in yield components of different types of late rice from 2017 to 2018

年份	类型	有效穗数	每穗粒数	结实率	千粒重	库容
Year	Type	(panicles/m ²)	Grains per panicle	Grain setting (%)	1000-grain weight (g)	Sink (×10 ³ ·m ⁻²)
2017	IR	303.8±16.7a	169.4±23.3b	60.7±10.6b	22.5±1.2b	51.2±5.4b
	IJR	269.5±30.8b	121.4±18.2c	77.2±5.1a	26.9±1.6a	32.7±6.3d
	HJR	282.6±30.6ab	137.4±7.8c	72.1±8.2a	27.5±2.5a	38.7±2.4c
	IJHR	224.4±15.0c	263.0±32.5a	63.7±6.6b	22.9±1.3b	58.6±4.2a
2018	IR	306.3±39.7a	181.7±29.1b	67.0±5.7b	23.0±0.8c	55.0±6.9b
	IJR	310.3±20.4a	133.3±15.5c	75.0±5.8a	26.0±1.3b	41.2±3.4d
	HJR	299.2±15.4a	166.4±8.1b	65.7±8.3b	27.9±2.3a	49.7±0.9c
	IJHR	218.2±14.6b	316.0±32.8a	65.2±7.0b	22.9±0.9c	68.6±3.4a
ANOVA						
品种类型 Type (T)		41.65**	195.52**	15.97**	49.54**	126.37**
年份 Year (Y)		5.15*	23.52**	0.02ns	0.00ns	52.96**
T×Y		4.10**	3.54*	2.36ns	1.11ns	1.82ns

表 4 不同类型晚稻 2017–2018 年生育期差异

Table 4 Differences in growth period of different types of late rice from 2017 to 2018 (d)

年份	类型	营养生长期	穗发育期	灌浆期	全生育期
Year	Type	Vegetative stage	Reproductive stage	Grain filling stage	Growth period
2017	IR	58a	24a	35c	117c
	IJR	58a	21a	47b	126b
	HJR	58a	22a	48b	128ab
	IJHR	58a	23a	50a	131a
2018	IR	58a	25a	42b	125c
	IJR	57b	22ab	58a	136b
	HJR	59a	19b	62a	140ab
	IJHR	56b	24a	64a	143a
ANOVA					
品种类型 Type (T)		12.81**	4.93**	64.32**	41.02**
年份 Years (Y)		11.18**	0.00ns	115.18**	94.65**
T×Y		12.81**	1.18ns	2.16ns	0.80ns

营养生长期：播种期至幼穗分化期；穗发育期：幼穗分化期至齐穗期；灌浆期：齐穗期至成熟期。下同
The vegetative stage refers to a period from sowing to the initiation of panicle primordial; The reproductive stage, from panicle primordial initiation to heading; and the grain filling stage, from heading to maturity. The same as below

9—11 d。进一步从主要生育阶段来看，营养生长期在不同类型晚稻品种间略有差异（56—59 d）；穗发育期籼稻最长，分别为 24 d（2017 年）和 25 d（2018 年），略高或显著高于其他类型品种，而常规粳稻、杂交粳稻和籼粳杂交稻间无显著差异（除 2018 年籼粳杂交稻显著高于杂交粳稻外）；灌浆期常规粳稻、杂交粳稻和籼粳杂交稻显著高于籼稻，分别延长 12—16 d、13—20 d 和 15—22 d。综上，与晚籼稻相比，

晚粳稻营养生长期变化较小；穗发育期略有缩短，而灌浆期均显著延长。

2.4 温光资源利用

籼稻和粳稻由于生育进程不同，对温光资源的利用也表现出较大差异（表 5）。随着生育期的延长，全生育期内累积有效积温（日平均气温≥10℃）、日照时数和太阳辐射表现出籼粳杂交稻>杂交粳稻>常规粳稻>籼稻的趋势，如籼粳杂交稻全生育期累计

有效积温、日照时数和太阳辐射分别为 2 139.0℃、799.2 h 和 2 083.2 MJ·m⁻²，较籼稻显著高 4.6%、10.1% 和 8.3%。由于籼稻和粳稻营养生长期差异不大，生育期内温光资源利用大小基本相当，平均累积有效积温、日照时数和太阳辐射分别为 1 164.3℃、438.9 h 和 1 075.6 MJ·m⁻²，粳稻略低于籼稻；穗发育期籼稻累积有效积温、日照时数和太阳辐射与粳稻无显著差异（杂交粳稻除外，如 2018 年累积有效积温、日照时数

和太阳辐射分别为 334.1℃、117.9 h 和 299.3 MJ·m⁻²，较籼稻显著低 23.0%、16.3%和 22.6%）；灌浆期籼稻和粳稻间的温光资源大小差异显著，粳型水稻累积有效积温、日照时数和太阳辐射分别为 522.9—627.9℃、185.7—287.5 h 和 580.6—745.3 MJ·m⁻²，较籼稻显著增加 28.8%—31.4%、40.4%—54.6%和 32.8%—40.4%。粳稻全生育期温光资源积累量显著提高，其中主要贡献来自灌浆期的延长。

表 5 2017—2018 年不同类型晚稻不同生育阶段温光资源配置差异

Table 5 Differences in the allocation of temperature and light resources among different growth stages of different types of late rice from 2017 to 2018

年份 Year	类型 Type	营养生长期 Vegetative stage			穗发育期 Reproductive stage			灌浆期 Grain filling stage			全生育期 Growth period		
		EAT (℃)	LH (h)	Rs (MJ·m ⁻²)	EAT (℃)	LH (h)	Rs (MJ·m ⁻²)	EAT (℃)	LH (h)	Rs (MJ·m ⁻²)	EAT (℃)	LH (h)	Rs (MJ·m ⁻²)
2017	IR	1187.7b	449.5a	1097.8a	433.5a	126.6a	360.3a	419.3b	88.8d	426.2c	2040.5c	664.9c	1872.2c
	IJR	1187.7a	449.5a	1097.8b	380.1a	110.5ab	312.7a	532.4a	168.5c	580.6b	2100.2b	728.5b	1979.1b
	HJR	1187.7b	449.5a	1097.8a	402.6a	107.3b	327.4a	522.9a	185.7b	589.8ab	2113.2ab	742.5ab	2003.0ab
	IJHR	1187.7b	449.5a	1097.8a	412.9a	113.7ab	338.4a	530.6a	198.7a	613.6a	2131.2a	762.0a	2037.7a
2018	IR	1157.0a	432.3a	1066.3a	434.1a	140.9a	386.6a	456.5b	225.7b	540.6b	2047.6b	786.8b	1973.3c
	IJR	1130.3b	425.7b	1045.1b	387.8a	128.5ab	340.3ab	595.4a	273.1a	703.5a	2113.5a	815.1a	2068.6b
	HJR	1176.1a	437.1a	1081.5a	334.1b	117.9b	299.3b	627.9a	288.3a	745.3a	2138.1a	831.2a	2105.8ab
	IJHR	1118.8b	422.8b	1035.9b	418.4a	138.3a	368.9a	609.7a	287.5a	744.1a	2146.8a	836.5a	2128.7a

ANOVA

品种类型 Type (T)	12.81**	12.81**	12.81**	4.85**	5.67**	5.01**	29.40**	69.42**	56.94**	40.14**	36.39**	40.32**
年份 Year (Y)	151.25**	547.95**	222.51**	1.07ns	21.78**	1.40ns	33.19**	529.12**	116.76**	5.31*	306.87**	76.48**
T×Y	12.81**	12.81**	12.81**	1.51ns	0.60ns	1.08ns	1.13ns	4.80**	0.43ns	0.25ns	3.81*	0.10ns

EAT: 有效积温; LH: 日照时数; Rs: 太阳辐射

EAT: Effective accumulated temperature; LH: Light hours; Rs: Solar radiation data at the earth's surface

2.5 不同类型品种主要农艺性状主成分分析

4 种不同双季晚稻类型品种主要农艺性状（有效穗数、每穗粒数、结实率、千粒重、成熟期库容、营养生长期、生殖生长期、灌浆期、全生育期）主成分分析（表 6、图 2—3）表明，晚稻品种间的差异主要集中在前 4 个主成分，累计方差贡献率达 84.0%；其中主成分 1 特征值 3.4，方差贡献率达 37.7%，主要包括每穗粒数和库容；主成分 2 特征值 2.2，方差贡献率 24.7%，主要包括灌浆期和全生育期；主成分 3 特征值 1.0，方差贡献率 11.2%，主要为营养生长期；主成分 4 特征值 0.9，方差贡献率为 10.4%，主要为生殖生长期。由此可见，主成分 1 主要由穗粒因子构成，主

成分 2、3 和 4 主要由生育期因子构成。

不同类型品种主成分一和主成分二因子载荷如图 3 所示。籼粳杂交稻中每穗粒数因子和库容因子贡献度最高，其次为灌浆期因子和全生育期因子；常规粳稻和杂交粳稻近似重叠，品种特征无显著差异，且有效穗数因子、结实率因子、千粒重因子、灌浆期因子和全生育期因子贡献度较高；有效穗数因子、每穗粒数因子和库容因子在籼稻不同品种中贡献度不一，且灌浆期因子对籼稻贡献度极低。由此可见，籼粳杂交稻表现为少穗多粒、灌浆期长；常规粳稻和杂交粳稻均表现为多穗少粒、灌浆期长；籼稻则为穗粒兼顾、灌浆期短。

表 6 晚稻主要农艺性状特征值及贡献率

Table 6 Eigenvectors and contribution rate of main agronomic traits of late rice

主成分 Principal component	特征值 Eigenvalues	贡献率 Contribution rate (%)	累积贡献率 Cumulative contribution rate (%)
1	3.4	37.7	37.7
2	2.2	24.7	62.4
3	1.0	11.2	73.6
4	0.9	10.4	84.0
5	0.7	8.3	92.2
6	0.6	6.6	98.8
7	0.1	1.1	99.9
8	0.0	0.1	100.0
9	0.0	0.0	100.0

2.6 不同类型品种产量与主要农艺性状间的相关性分析

对籼稻和粳稻 2017—2018 年产量与主要农艺性状（有效穗数、每穗粒数、结实率、千粒重、库容和灌浆期）进行相关性分析（图 4）。结果表明，晚粳

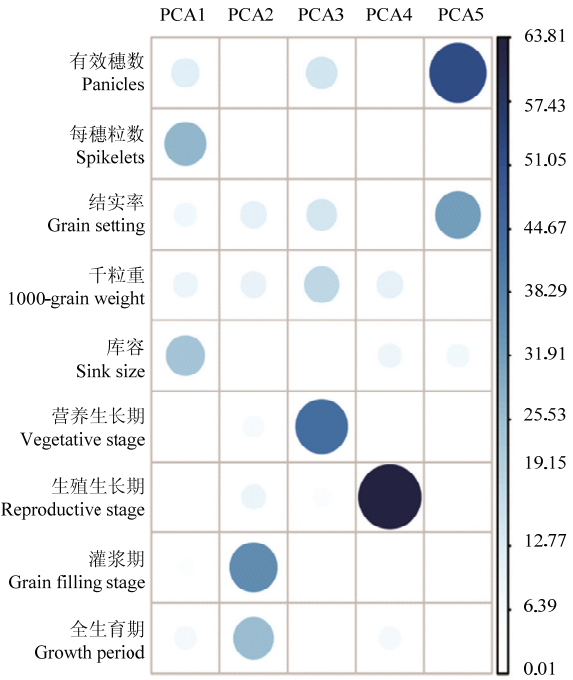


图 2 主成分因子载荷图
Fig. 2 Principal component factors distribution

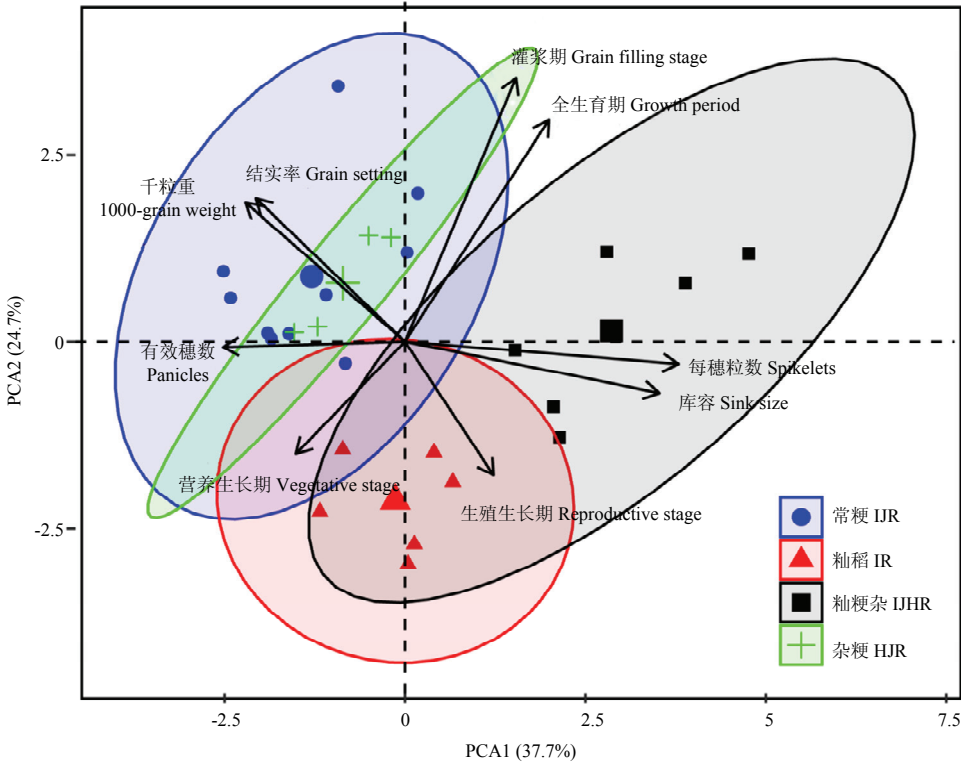
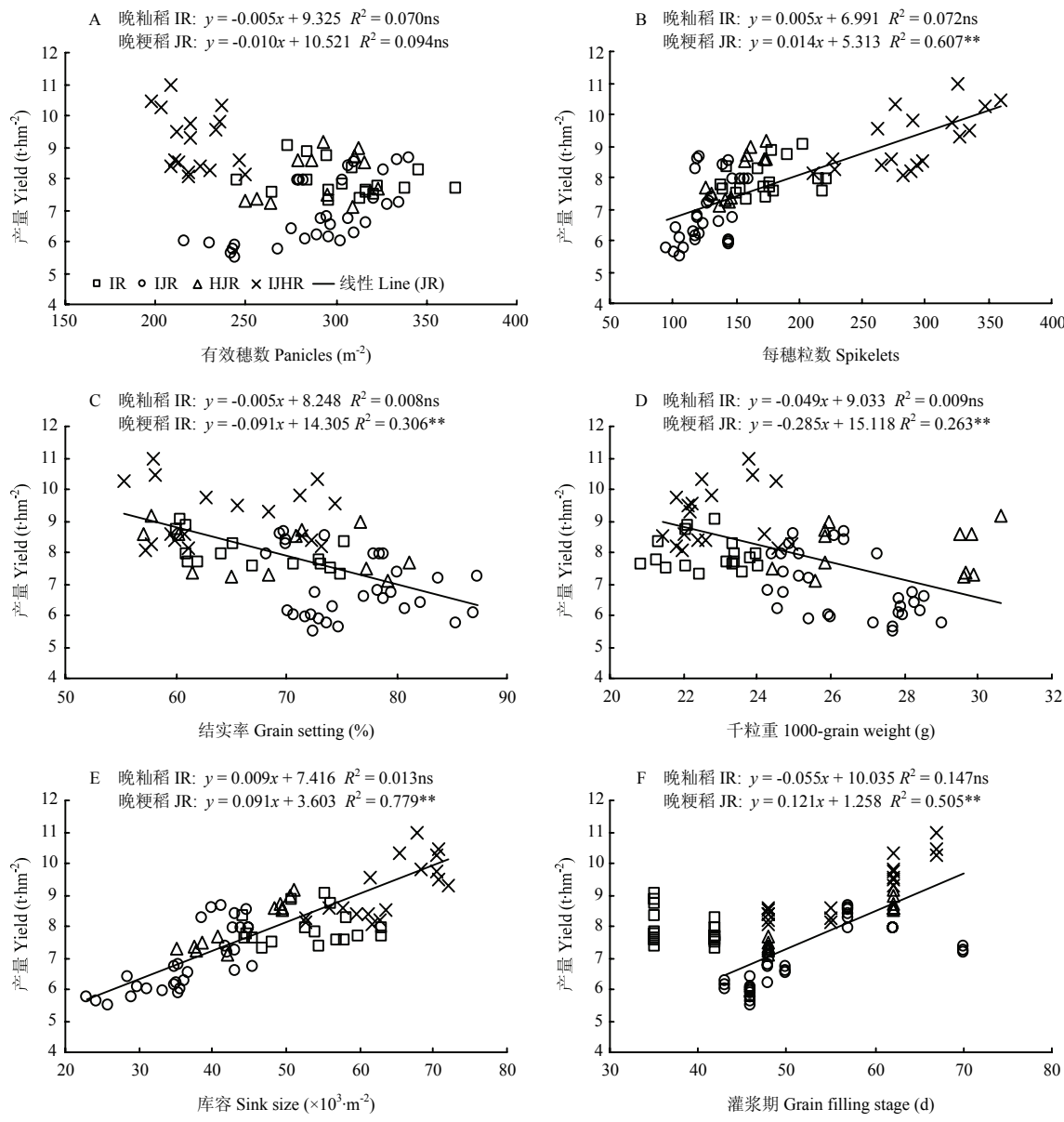


图 3 不同类型品种主成分一与主成分二因子载荷图
Fig. 3 Distribution of principal component one and principal component two of different types of varieties



产量与有效穗数 (A)、每穗粒数 (B)、结实率 (C)、千粒重 (D)、库容 (E)、灌浆期 (F) 相关系数显著性检验 ($P < 0.05$, Person), **表示 $P < 0.01$; *表示 $0.01 \leq P < 0.05$; ns 表示 $P \geq 0.05$
Significance test of correlation coefficients between yield and panicles (A), spikelets (B), grain setting (C), 1000-grain weight (D), sink size (E), and grain filling stage (F) ($P < 0.05$, Pearson), ** means $P < 0.01$; * means $0.01 \leq P < 0.05$; ns means $P \geq 0.05$

图 4 不同类型品种产量与主要农艺性状间的关系

Fig. 4 Relationship between yield and main agronomic traits of different types of cultivars

稻(常规粳稻、杂交粳稻和籼粳杂交稻)产量与有效穗数相关性不显著,与结实率($r = -0.55$)和千粒重($r = -0.51$)显著负相关,与每穗粒数、库容和灌浆期极显著正相关,相关系数分别为 0.78、0.88 和 0.71;而晚籼稻产量与主要农艺性状间相关性均不显著,其原因可能是供试晚籼稻品种较少,且品种间差异较小。

3 讨论

3.1 双季晚粳稻产量表现

本研究对长江下游稻区现有大面积推广的不同粳稻品种在双季晚稻的田间产量表现进行评估和比较。结果表明,以籼粳杂交稻产量最高(8.3—10.0 t·hm⁻²,平均 9.2 t·hm⁻²);相较于其他晚稻类型,分别增产 2.9%

—35.3% (2017 年) 和 14.0%—30.9% (2018 年), 常规粳稻产量最低 (平均 $6.9 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$), 较晚粳稻分别减产 24.0% (2017 年) 和 1.2% (2018 年); 而杂交粳稻平均产量 $8.1 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 2017 年较晚粳稻产量降低 9.3%, 2018 年增加 13.4%。作为近年育种的突破性成果, 以甬优系列为代表的籼粳杂交稻不断创造水稻单产记录^[17-19]。彭瑞祥等^[20]在研究江西双季晚稻类型时发现, 籼粳杂交稻的产量可以达到 $9.6 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 比其他粳稻品种增产 37.1%。陈波等^[15]在 2013—2014 年研究不同晚稻品种对不同纬度的响应时亦发现, 同一纬度籼粳杂交稻的产量比其他类型水稻增产 13.5%。以上发现与本试验相比, 种植密度和氮肥施用量均不相同, 且陈波等^[15]试验处理中籼稻和粳稻施氮量也有所差异, 但试验结果均表明籼粳杂交稻在双季晚稻中应用具有显著的产量优势。由于粳稻在双季晚稻上应用目前尚处于研究探索阶段, 有关双季晚粳稻的最适种植密度、施氮量及其配套的高产栽培体系还未形成。据报道, 常规晚粳稻秀水 134 适宜施氮量和种植密度分别为 $210 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 23 万穴/ hm^2 ^[21]; 而籼粳杂交稻甬优 1540 的种植密度以 24 万穴/ hm^2 最为适宜^[22]。本试验设置统一的种植密度 (24 万穴/ hm^2) 和施氮量 ($202 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), 目的是在兼顾籼稻和不同类型粳稻高产栽培的同时, 便于试验实施和结果分析。如何充分利用不同类型粳稻品种的产量潜力, 形成配套的高产栽培技术体系尚需后续进一步研究。

本研究发现, 籼粳杂交稻的穗型显著大于其他类型品种 (每穗平均粒数达到 289.5, 表 3), 平均产量相应提高 15.8% (晚粳稻)、32.8% (常规粳稻) 和 13.7% (杂交粳稻)。大量研究表明, 大穗型粳稻品种较中等穗型品种增产 5.9%—16.1%^[23-26]。杨建昌等^[27]认为, 扩大产量库容是水稻高产的关键, 而水稻产量库容的增加关键在于每穗粒数的增加。这也印证了籼粳杂交稻大穗、大库容是其产量显著高于其他类型水稻的根本原因。

3.2 双季晚粳稻的环境敏感性

本研究中还发现, 晚粳稻平均产量 $7.9 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 年际间 CV% 值仅为 3.4%, 低于常规粳稻、杂交粳稻和籼粳杂交稻, 说明晚粳稻产量稳定程度最高。但晚粳稻与其他类型水稻的产量差异却因年份不同而有所差异。其中 2017 年晚粳稻产量与籼粳杂交稻无显著差异, 但显著高于杂交粳稻 10.2%; 而 2018 年粳稻产量较籼粳杂交稻和杂交粳稻显著低 22.6% 和 11.8% (表 2)。彭瑞祥等^[20]研究发现, 晚季籼稻与籼粳杂交稻

产量相当, 陈波等^[15]研究认为, 晚季籼稻产量要显著低于籼粳杂交稻。而鉴于晚粳稻的稳产性, 这一结果可能的解释是粳稻品种对于晚季的温光变化更为敏感。本研究中常规晚粳稻平均产量 ($6.9 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) 最低, 品种间 CV% 仅有 0.02%—5.18%, 但年际间 CV% 却达到 15.0%。同样, 陈波等^[15]研究中, 不同地点间杂交籼稻的 CV% 仅 0.84%—3.94%, 而常规粳稻则为 7.03%—10.12%。由此可见, 相对于晚籼稻而言, 粳稻品种可能对晚季环境的变化尤其是年际与区域间温光资源的变化更为敏感。

与晚籼稻相比, 晚粳稻灌浆期显著延长。前人研究表明, 晚稻生育后期易受低温冷害的影响, 结实率和粒重降低^[28]。一般以抽穗开花期 5 d 平均温度 $<22^\circ\text{C}$ (晚籼稻) 或者 $<20^\circ\text{C}$ (晚粳稻) 作为晚稻受低温冷害标准^[29]。本研究中 2017 年和 2018 年该冷害起始日分别为 10 月 11 日和 10 月 2 日 (晚籼稻)、10 月 10—12 日 (晚粳稻); 而晚粳齐穗期分别在 9 月 15—17 日, 晚粳在 9 月 11—13 日, 表明不同类型品种均能安全齐穗, 且籼稻和粳稻低温冷害分别主要集中在灌浆中后期 (齐穗后 15 d 至成熟期) 和灌浆后期 (齐穗后 30 d 至成熟期)。曾研华等^[30]研究表明, 花后不同时段低温处理对籽粒灌浆影响表现为前期 $>$ 中期 $>$ 后期; 不同时段低温处理下籽粒最终粒重双季粳稻无显著差异, 但对晚籼稻 (中浙优 1 号), 灌浆中期和后期低温处理粒重分别降低 1.0% 和 0.7%。由此可见, 低温冷害可能会降低籼稻最终粒重, 对粳稻影响可能并不大。

本研究中, 与 2018 年相比, 2017 年晚粳稻 (常规粳稻和籼粳杂交稻) 齐穗前 20 d 和齐穗后 15 d 日照时数分别降低 21.8%—29.1% 和 17.0%—28.0%; 且齐穗前 20 d 的日照辐射下降 4.3%—6.5%。穗分化前后光照条件与粳稻产量关系紧密^[31], 穗分化期日照条件不仅会使粳稻颖花退化, 影响穗粒结构^[32], 还会影响水稻生长速率 (CGR)^[33], 而水稻齐穗前后的 CGR 是影响粳稻干物质转运和最终产量形成的重要因子^[34]。因此, 我们推测适宜齐穗前后日照条件的变化, 可能是影响晚粳稻产量的关键因子。

3.3 双季晚粳稻的生育特性及其温光优势

双季晚稻“籼改粳”最主要的变化在于灌浆期的延长 (表 4), 从而显著提高全生育期温光资源积累量 (表 5)。在调节“库源”矛盾中, 延长灌浆期有助于缓解一般大穗粳稻品种库容大但“源”不足的缺陷, 从而提高籽粒充实度和结实率^[23-24]。龚金龙^[35]

提出在保持水稻群体库容足够大的基础上,可通过提早抽穗或延长灌浆结实时间以提高水稻单产。孟天瑶^[36]、韦还和等^[37]亦发现,杂交稻在穗粒数增加的情况下,通过延长灌浆期,提高灌浆量,从而实现产量的进一步提高。本研究中,粳型晚稻灌浆期比晚籼稻显著延长,使其有效积温、日照时数和太阳辐射分别增加 24.7%—37.5%、21.0%—123.8%和 30.1%—44.0%;而籼粳杂交稻在高库容(平均 $63.6 \times 10^3 \cdot \text{m}^{-2}$)的情况下,灌浆期较籼稻延长 15—22 d;相关分析表明(图 4),粳型晚稻产量与灌浆期均呈极显著正相关($r = 0.71$, $P < 0.0001$)。因此,我们认为在双季晚稻中应用籼粳杂交稻,能够兼顾品种的大穗优势和晚季粳稻的长灌浆期优势,从而实现温光资源的充分利用与库源协调,进而提高双季晚稻的产量。

3.4 适宜双季晚粳稻品种特性分析

随着对水稻增产潜力和其生理特性的不断研究,水稻理想株型育种以及籼粳亚种间杂交育种的不断深入和创新,大穗型/重穗型品种已成为高产、超高产水稻品种特性^[38]。大幅度扩大产量库容是水稻高产的前提,朱庆森等^[39]对品种演进过程中籼稻库容的特征进行分析认为,随着产量提高,品种库容特征表现为有效穗小幅降低,而每穗粒数大幅度增加的趋势。本试验观察到,与晚籼稻相比,籼粳杂交稻有效穗数略有降低,但每穗粒数大幅度提高,因此在一定穗数的基础上,通过大/重穗,扩大库容,是实现双季晚稻高产稳产的重要途径。除了库容外,双季晚粳稻最主要的生理特征在于灌浆期延长,高效且充分利用这部分温光资源是实现晚粳稻高产的关键。MENG 等^[40]研究发现籼粳杂交稻的“源”强表现为灌浆期更高的叶面积指数、叶片光合速率;更大、更长、更深的根系系统;此外,籼粳杂交稻在养分吸收的优势(总氮、磷、钾)亦对产量具有促进作用^[41]。鉴于此,我们认为籼粳杂交稻不仅兼顾“库大”和“源强”的优势,又保持粳稻耐低温、灌浆期长的特征,可以作为筛选与培育双季高产晚粳稻的模式品种。

主成分分析表明,常规粳稻和杂交粳稻品种特征无明显差异,多为灌浆期长(47—62 d)、有效穗多($269.5—310.3$ 穗/ m^2)、千粒重大($26.0—27.9$ g)和结实率高($65.7\%—77.2\%$),其千粒重和结实率分别显著高于籼粳杂交稻 13.7%—22.2%和 13.1%—21.2%(2018 年杂交粳稻除外)。与大穗型籼粳杂交稻相比,中穗型常规粳稻弱势粒最大灌浆速率、平均灌浆速率和最终粒重更高^[42]。MOHAPATRA 等^[43]认为水稻籽粒

灌浆充实度高低主要取决于穗上弱势粒。因此,我们认为常规粳稻灌浆程度可能更高。水稻产量潜力高低除受库容大小限制外,还与籽粒灌浆充实度有关^[44]。本研究也发现,2018 年嘉 58、南粳 46 等产量达到 $8 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 以上。由此可见,常规粳稻亦具较大的增产潜力,在保持现有的高结实率和粒重条件下,足穗增粒、增加库容,对于粳稻品种筛选和高产栽培具有重要意义。

本研究中,籼粳杂交稻库容大、产量高,但粒重低且结实率不高。张盼^[45]指出,“库”相对过大会严重限制杂交粳稻品质的提高。因此,建立不同类型双季晚粳稻的适宜库容和达到产量与品质相统一还有待进一步研究探索。

4 结 论

双季晚稻“籼改粳”最主要的优势在于延长灌浆期,从而提高全生育期温光资源积累量。与其他类型水稻相比,籼粳杂交稻产量高,表现为大穗型、高库容及长灌浆期,更适宜于长江下游双季晚稻种植。选用籼粳杂交稻,对于提高双季晚稻产量和温光资源利用率、保证双季稻生产安全性具有十分重要的意义。

References

- [1] 朱德峰, 张玉屏, 陈惠哲, 向镜, 张义凯. 中国水稻高产栽培技术创新与实践. 中国农业科学, 2015, 48(17): 3404-3414.
ZHU D F, ZHANG Y P, CHEN H Z, XIANG J, ZHANG Y K. Innovation and practice of high-yield rice cultivation technology in China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(17): 3404-3414. (in Chinese)
- [2] 方福平, 程式华. 水稻科技与产业发展. 农学学报, 2018, 8(1): 92-98.
FANG F P, CHENG S H. The development of rice science, technology and industry in China. *Journal of Agriculture*, 2018, 8(1): 92-98. (in Chinese)
- [3] 曹黎明, 程灿, 周继华, 储黄伟, 牛付安, 袁勤. 上海杂交粳稻产业发展与展望. 中国种业, 2018(9): 19-22.
CAO L M, CHENG C, ZHOU J H, CHU H W, NIU F A, YUAN Q. Development and prospect of japonica hybrid rice industry in Shanghai. *China Seed Industry*, 2018(9): 19-22. (in Chinese)
- [4] 中稻宣. 2015 年全国及各省(市、区)粮食及水稻播种面积和产量. 中国稻米, 2017, 23(6): 110.
ZHONG Dao Xuan. National and provincial (city, district) grain and rice planting area and production in 2015. *China Rice*, 2017, 23(6): 110. (in Chinese)

- [5] 陈波, 周年兵, 郭保卫, 黄大山, 陈忠平, 花劲, 霍中洋, 张洪程. 南方稻区“籼改粳”研究进展. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2017, 38(1): 67-72, 88.
- CHEN B, ZHOU N B, GUO B W, HUANG D S, CHEN Z P, HUA J, HUO Z Y, ZHANG H C. Progress of “indica rice to japonica rice” in southern China. *Journal of Yangzhou University(Agricultural and Life Science Edition)*, 2017, 38(1): 67-72, 88. (in Chinese)
- [6] 张文竹. 长江中下游不同气候区民居类型及绿色营建经验研究[D]. 陕西: 西安建筑科技大学, 2014.
- ZHANG W Z. Study on the house type and green construction experience in different climate zones of Yangtze River's middle and lower reaches[D]. Shaanxi: Xi'an University of Architecture and Technology, 2014. (in Chinese)
- [7] 赵小道, 詹黎耕, 俞翠轩. 浙江省农业志. 北京: 中华书局, 2004: 609-611.
- ZHAO X D, ZHAN L G, YU C X. *Agricultural Chronicle of Zhejiang Province*. Beijing: Zhonghua Book Company, 2004: 609-611. (in Chinese)
- [8] 谢远玉, 黄淑娥, 田俊, 王钰, 叶清. 长江中下游热量资源时空演变特征及其对双季稻种植的影响. 应用生态学报, 2016, 27(9), 2950-2958.
- XIE Y Y, HUANG S E, TIAN J, WANG Y, YE Q. Spatial-temporal characteristics of thermal resources and its influence on the growth of double cropping rice in the middle and lower reaches of the Yangtze River, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(9), 2950-2958. (in Chinese)
- [9] 吕伟生, 曾勇军, 石庆华, 潘晓华, 黄山, 商庆银, 谭雪明, 李木英, 胡水秀, 曾研华. 近 30 年江西双季稻安全生产期及温光资源变化. 中国水稻科学, 2016, 30(3): 323-334.
- LÜ W S, ZENG Y J, SHI Q H, PAN X H, HUANG S, SHANG Q Y, TAN X M, LI M Y, HU S X, ZENG Y H. Changes in safe production dates and heat-light resources of double cropping rice in Jiangxi province in recent 30 years. *Chinese Journal of Rice Science*, 2016, 30(3): 323-334. (in Chinese)
- [10] PRASAD P V V, BOOTE K J, ALLEN L H, SHEEHY J E, THOMAS J M G. Species, ecotype and cultivar differences in spikelet fertility and harvest index of rice in response to high temperature stress. *Field Crops Research*, 2005, 95(2/3): 398-411.
- [11] 曹云英, 段骅, 杨立年, 王志琴, 周少川, 杨建昌. 减数分裂期高温胁迫对耐热性不同水稻品种产量的影响及其生理原因. 作物学报, 2008, 34(12): 2134-2142.
- CAO Y Y, DUAN H, YANG L N, WANG Z Q, ZHOU S C, YANG J C. Effect of heat-stress during meiosis on grain yield of rice cultivars differing in heat-tolerance and its physiological mechanism. *Acta Agronomica Sinica*, 2008, 34(12): 2134-2142. (in Chinese)
- [12] 王静, 张成军, 陈国祥, 王萍, 施大伟, 吕川根. 低温对灌浆期水稻剑叶光合色素和类囊体膜脂肪酸的影响. 中国水稻科学, 2006, 20(2): 177-182.
- WANG J, ZHANG C J, CHEN G X, WANG P, SHI D W, LÜ C G. Effect of low temperature on photosynthetic pigments and thylakoid membrane fatty acid in flag leaves of rice at the milky stage. *Chinese Journal of Rice Science*, 2006, 20(2): 177-182. (in Chinese)
- [13] 李霞, 戴传超, 程睿, 陈婷, 焦德茂. 不同生育期水稻耐冷性的鉴定及耐冷性差异的生理机制. 作物学报, 2006, 32(1): 76-83.
- LI X, DAI C C, CHENG R, CHEN T, JIAO D M. Identification for cold tolerance at different growth stages in rice (*Oryza sativa* L.) and physiological mechanism of differential cold tolerance. *Acta Agronomica Sinica*, 2006, 32(1): 76-83. (in Chinese)
- [14] YOSHIDA S. *Fundamentals of Rice Crop Science*. International Rice Research Institute (IRRI), Los Banos, Philippines, 1981: 69-84.
- [15] 陈波, 周年兵, 郭保卫, 舒鹏, 张洪程, 霍中洋, 程飞虎, 花劲, 黄大山, 陈忠平, 陈恒, 刘云发, 廖世亮. 江西双季晚稻不同纬度产量、生育期及温光资源利用的差异. 中国农业科学, 2017, 50(8): 1403-1415.
- CHEN B, ZHOU N B, GUO B W, SHU P, ZHANG H C, HUO Z Y, CHENG F H, HUA J, HUANG D S, CHEN Z P, CHEN H, LIU Y F, LIAO S L. Differences of double-cropping late rice in yield, growth stage and utilization of temperature and illumination in different latitudes of Jiangxi province. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(8), 1403-1415. (in Chinese)
- [16] BALL R A, PURCELL L C, CAREY S K. Evaluation of solar radiation prediction models in north America. *Agronomy Journal*, 2004, 96(2): 391.
- [17] 杨超, 张洪树. 甬优系列不同组合在江苏省淮北地区试种表现初报. 安徽农学通报, 2017, 23(24): 18-20, 48.
- YANG C, ZHANG H S. Preliminary report on the trial performance of different combinations of Yongyou series in Huaibei area of Jiangsu province. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2017, 23(24), 18-20, 48. (in Chinese)
- [18] 刘雪芬, 林杏, 赵成东, 刘小玲. 甬优 538 在浙江文成的种植表现及其高产栽培技术. 杂交水稻, 2019, 34(1): 49-50.
- LIU X F, LIN X, ZHAO C D, LIU X L. Planting performance and high-yielding cultivation techniques of Yongyou 538 at Wencheng, Zhejiang. *Hybrid Rice*, 2019, 34(1): 49-50. (in Chinese)
- [19] 柯海平, 熊之羲. 杂交粳稻甬优 4949 在大别山区的种植表现及栽培技术. 湖北农业科学, 2017, 56(22): 4256-4257, 4359.

- KE H P, XIONG Z X. Performance and high-yield cultural techniques of japonica hybrid rice Yongyou 949 in Dabie mountain area. *Hubei Agricultural Sciences*, 2017, 56(22): 4256-4257, 4359. (in Chinese)
- [20] 彭瑞祥, 罗本裕, 赖仁友, 黄润华, 夏紫高. 南方双季稻区晚粳稻品种生产力试验报告. 农业与技术, 2016, 36(15): 49-50, 60.
- PENG R X, LUO B Y, LAI R Y, HUANG R H, XIA Z G. Test report on productivity of late japonica varieties in southern double-cropping area. *Agriculture and Technology*, 2016, 36(15): 49-50, 60. (in Chinese)
- [21] 陈晓阳, 蒋梅巧, 钱秋平, 于海富. 施氮水平和栽插密度对晚粳稻秀水 134 生长及产量的影响. 福建稻麦科技, 2010, 28(1): 8-10.
- CHEN X Y, JIANG M Q, QIAN Q P, YU H F. Effects of nitrogen and plant density on the yield of rice cultivar Xiushui 134. *Fujian Science and Technology of Rice and Wheat*, 2010, 28(1): 8-10. (in Chinese)
- [22] 毛小伟, 占才水. 连作籼粳杂交晚稻甬优 1540 示范效果及高产栽培技术. 基层农技推广, 2018, 6(2): 117-118.
- MAO X W, ZHAN C S. Demonstration effect and high-yield cultivation techniques of indica-japonica late rice Youyou 1540. *Primary Agricultural Technology Extension*, 2018, 6(2): 117-118. (in Chinese)
- [23] 陈春, 赖上坤, 王磊, 陈卫军. 大穗优质粳稻新品种泗稻 16 号的选育与应用. 江西农业学报, 2019, 31(3): 30-34.
- CHEN C, LAI S K, WANG L, CHEN W J. Breeding and application of big-panicle and good-quality japonica rice new variety "Sidao 16". *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2019, 31(3): 30-34. (in Chinese)
- [24] 顾俊荣, 韩立宇, 董明辉, 陈培峰, 乔中英. 不同穗型粳稻干物质运转与颖花形成及籽粒灌浆结实的差异研究. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2017, 38(4): 68-73, 88.
- GU J R, HAN L Y, DONG M H, CHEN P F, QIAO Z Y. Studies on the difference of dry matter accumulation and transportation, spikelets formation and the grain filling of japonica rice varieties with different panicle types. *Journal of Yangzhou University (Agricultural and Life Science Edition)*, 2017, 38(4): 68-73, 88. (in Chinese)
- [25] 黄山, 何虎, 张卫星, 王志刚, 章秀福, 廖西元, 潘晓华. 不同粳稻品种在江西不同生态区的农学表现. 江西农业大学学报, 2013, 35(1): 25-32.
- HUANG S, HE H, ZHANG W X, WANG Z G, ZHANG X F, LIAO X Y, PAN X H. Agronomic performance of different japonica rice varieties in different eco-regions in Jiangxi province. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2013, 35(1): 25-32. (in Chinese)
- [26] 龚金龙, 胡雅杰, 龙厚元, 常勇, 李杰, 张洪程, 马荣荣, 王晓燕, 戴其根, 霍中洋, 许轲, 魏海燕, 邓张泽, 明庆龙. 大穗型杂交粳稻产量构成因素协同特征及穗部性状. 中国农业科学, 2012, 45(11): 2147-2158.
- GONG J L, HU Y J, LONG H Y, CHANG Y, LI J, ZHANG H C, MA R R, WANG X Y, DAI Q G, HUO Z Y, XU K, WEI H Y, DENG Z Z, MING Q L. Study on collaborating characteristics of grain yield components and panicle traits of large panicle hybrid japonica rice. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(11): 2147-2158. (in Chinese)
- [27] 杨建昌, 杜永, 吴长付, 刘立军, 王志琴, 朱庆森. 超高产粳型水稻生长发育特性的研究. 中国农业科学, 2006, 39(7): 1336-1345.
- YANG J C, DU Y, WU C F, LIU L J, WANG Z Q, ZHU Q S. Growth and development characteristics of super-high-yielding mid-season japonica rice. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(7): 1336-1345. (in Chinese)
- [28] 耿立清, 王嘉宇, 陈温福. 孕穗—灌浆期低温对水稻穗部性状的影响. 华北农学报, 2009, 24(3): 107-111.
- GENG L Q, WANG J Y, CHEN W F. Effect of low temperature on panicle characters of rice during booting and grain filling period. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2009, 24(3): 107-111. (in Chinese)
- [29] 查光天. 秋季低温与连作晚稻的冷害. 浙江农业科学, 1981(4): 165-169.
- ZHA G T. Low temperature in autumn and cold damage of late rice. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 1981(4): 165-169. (in Chinese)
- [30] 曾研华, 张玉屏, 潘晓华, 朱德峰, 向镜, 陈惠哲, 张义凯. 花后低温对水稻籽粒灌浆与内源激素含量的影响. 作物学报, 2016, 42(10): 1551-1559.
- ZENG Y H, ZHANG Y P, PAN X H, ZHU D F, XIANG J, CHEN H Z, ZHANG Y K. Effect of low temperature after flowering on grain filling and plant hormones contents in rice. *Acta Agronomica Sinica*, 2016, 42(10): 1551-1559. (in Chinese)
- [31] 李亚寒. 气候变化对中国水稻生产与效率的影响研究--基于籼稻、粳稻的比较分析[D]. 南京: 南京农业大学, 2014.
- LI Y H. The research of impacts of climate change on Chinese rice production and efficiency--based an comparative analysis of indica rice and japonica rice[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- [32] YAO Y, YAMAMOTO Y, YOSHIDA T, NITTA Y, MIYAZAKI A. Response of differentiated and degenerated spikelets to top-dressing, shading and day/night temperature treatments in rice cultivars with large panicles. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2000, 46(3): 631-641.
- [33] 刘奇华, 周学标, 杨连群, 李天, 张建军. 生育前期遮光对水稻灌浆期剑叶生理特性及籽粒生长的影响. 应用生态学报, 2009, 20(9): 2135-2141.
- LIU Q H, ZHOU X B, YANG L Q, LI T, ZHANG J J. Effects of early

- growth stage shading on rice flag leaf physiological characters and grain growth at grain-filling stage. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(9): 2135-2141. (in Chinese)
- [34] 马莲菊, 李雪梅, 王艳. 源库处理对两种不同穗型水稻品种籽粒灌浆的影响. 沈阳师范大学学报(自然科学版), 2006, 24(4): 470-473.
- MA L J, LI X M, WANG Y. Affection on grain filling of rice varieties of different panicle types by cutting leaves and panicles. *Journal of Shenyang Normal University(Nature Science Edition)*, 2006, 24(4): 470-473. (in Chinese)
- [35] 龚金龙. 粳、粳超级稻生产力及其形成的生态生理特征[D]. 扬州: 扬州大学, 2014.
- GONG J L. Studies on productivity between indica and japonica super rice and their forming ecological and physiological characteristics[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2014. (in Chinese)
- [36] 孟天瑶. 甬优中熟粳杂交稻高产形成相关形态生理特征[D]. 扬州: 扬州大学, 2018.
- MENG T Y. Studies on physio-morphological traits underlying high-yielding of medium-maturity types of Yongyou japonica/indica hybrids[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2018. (in Chinese)
- [37] 韦还和, 孟天瑶, 李超, 张洪程, 史天宇, 马荣荣, 王晓燕, 杨筠文, 戴其根, 霍中洋, 许轲, 魏海燕, 郭保卫. 粳粳交超级稻甬优 538 的穗部特征及籽粒灌浆特性. 作物学报, 2015, 41(12): 1858-1869.
- WEI H H, MENG T Y, LI C, ZHANG H C, SHI T Y, MA R R, WANG X Y, YANG J W, DAI Q G, HUO Z Y, XU K, WEI H Y, GUO B W. Panicle traits and grain-filling characteristics of japonica/indica hybrid super rice Yongyou 538. *Acta Agronomica Sinica*, 2015, 41(12): 1858-1869. (in Chinese)
- [38] YANG J C, DU Y, WU C F, LIU L J, WANG Z Q, ZHU Q S. Growth and development characteristics of super-high-yielding mid-season japonica rice. *Frontiers of Agriculture in China*, 2007, 2: 166-174.
- [39] 朱庆森, 张祖建, 杨建昌, 曹显祖, 郎有忠, 王增春. 亚种间杂交稻产量源库特征. 中国农业科学, 1997, 30(3): 52-59.
- ZHU Q S, ZHANG Z J, YANG J C, CAO X Z, LANG Y Z, WANG Z C. Source-sink characteristics related to the yield in interspecific hybrid rice. *Scientia Agricultura Sinica*, 1997, 30(3): 52-59. (in Chinese)
- [40] MENG T Y, WEI H H, LI X Y, DAI Q G, HUO Z Y. A better root morpho-physiology after heading contributing to yield superiority of japonica/indica hybrid rice. *Field Crops Research*, 2018, 228: 135-146.
- [41] WEI H H, MENG T Y, LI C, XU K, HUO Z Y, WEI H Y, GUO B W, ZHANG H C, DAI Q G. Comparisons of grain yield and nutrient accumulation and translocation in high-yielding japonica/indica hybrids, indica hybrids, and japonica conventional varieties. *Field Crops Research*, 2017, 204: 101-109.
- [42] 朱宽宇, 展明飞, 陈静, 王志琴, 杨建昌, 赵步洪. 不同氮肥水平下结实期灌溉方式对水稻弱势粒灌浆及产量的影响. 中国水稻科学, 2018, 32(2): 155-168.
- ZHU K Y, ZHAN M F, CHEN J, WANG Z Q, YANG J C, ZHAO B H. Effects of irrigation regimes during grain filling under different nitrogen rates on inferior spikelets grain-filling and grain yield of rice. *Chinese Journal of Rice Science*, 2018, 32(2): 155-168. (in Chinese)
- [43] MOHAPATRA P K, PATEL R, SAHU S K. Time of flowering affects grain quality and spikelet partitioning within the rice panicle. *Australian Journal of Plant Physiology*, 1993, 20(2): 231-241.
- [44] KATO T, SHINMURA D, TANIGUCHI A. Activities of enzymes for sucrose-starch conversion in developing endosperm of rice and their association with grain filling in extra-heavy panicle types. *Plant Production Science*, 2007, 10(4): 442-450.
- [45] 张盼. 杂交粳稻籽粒灌浆特性与产量和品质的关系[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2016.
- ZHANG P. The influence of chemical agents on rice growth and development[D]. Shenyang: Shenyang agricultural University, 2016. (in Chinese)

(责任编辑 杨鑫浩)