



耐迟收水稻品种的筛选及其在淹水降镉中的应用

曾晓珊¹, 汤国华¹, 谢红军¹, 朱明东¹, 敖和军², 陈博^{1,2}, 李方婷^{1,2}, 郝明³, 肖燕¹, 符慧荣¹, 张健⁴✉, 余应弘¹✉

¹湖南省农业科学院水稻研究所/农业部长江中下游籼稻遗传育种重点实验室, 长沙 410125; ²湖南农业大学, 长沙 410128; ³怀化职业技术学院, 湖南怀化 418099; ⁴中国水稻研究所/水稻生物学国家重点实验室, 杭州 311400

摘要:【目的】随着水稻生产模式机械化、规模化程度的加深, 中、晚稻在成熟后, 常因天气、收割机械配置、晒场矛盾等引起的不能及时收割问题日益突显, 由此造成的产量损失及米质下降也逐渐得到生产者的重视。稻米中镉的积累及其转移至食物链所引起的食品安全问题已成为育种家、生产者的首要关注问题。淹水灌溉可有效降低稻米中镉的含量。推广种植生育期内能耐持续淹水灌溉的耐迟收(post-maturation sustainability, PMS)水稻品种, 可同时解决稻米镉低积累、延时机收的问题。建立科学有效的水稻 PMS 性状评价体系, 并应用该体系开展 PMS 水稻品种的筛选, 为缓解水稻生产上延时收割后产量安全、稻米镉积累安全等生产问题奠定基础。【方法】2018 年, 在孕穗-黄熟期淹水灌溉条件下, 对来自全国的 244 个品种成熟后植株的倒伏、种子休眠、籽粒落粒等性状进行调查, 通过田间观察、数据调查, 结合显著性分析, 对 PMS 性状鉴定时间及鉴定值进行鉴定, 并对延迟收获后的稻谷碾磨品质、稻米外观品质及糊化温度、胶稠度、直链淀粉含量进行检测。2019 年, 利用 PMS 性状鉴定时间及鉴定值, 对湖南省推广种植的 132 个水稻品种进行评价, 筛选 PMS 水稻品种。通过设计孕穗-黄熟期干-湿交替水分管理对照, 进行千粒重比较; 应用 PMS 水稻品种开展千亩示范, 进行产量及降镉效果检测。【结果】PMS 性状评价体系具体为: 倒伏的调查时间为成熟后第 14 天, 鉴定值为稻秆与垂直倾斜角度小于 45°; 落粒性的调查时间为成熟后第 7 天, 鉴定值为小于 5.0%; 穗发芽率调查时间为成熟后第 0 天, 鉴定值为小于 10.0%。2018—2019 年共筛选到 21 个 PMS 水稻品种。淹水灌溉与干-湿交替灌溉处理间的千粒重差异不显著; 千亩示范田中, 处理间产量无明显差异; 移栽后在孕穗-黄熟期进行淹水管理, 稻米镉含量均低于 0.20 mg·kg⁻¹, 并显著低于干-湿交替灌溉管理。【结论】根据 PMS 性状评价体系, 筛选获得的 PMS 水稻品种可经受长期淹水灌溉, 成熟后延迟收获时间对产量、米质无明显影响。应用 PMS 水稻品种, 在孕穗-黄熟期结合淹水灌溉, 可实现镉中、轻度污染稻田安全生产。

关键词: 水稻; 耐迟收; 淹水灌溉; 安全生产

Selection of PMS Rice Varieties and Application in Flooding Irrigation for Cadmium Reduction

ZENG XiaoShan¹, TANG GuoHua¹, XIE HongJun¹, ZHU MingDong¹, AO HeJun², CHEN Bo^{1,2}, LI FangTing^{1,2}, HAO Ming³, XIAO Yan¹, FU HuiRong¹, ZHANG Jian⁴✉, YU YingHong¹✉

¹Hunan Rice Research Institute, Hunan Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Indica Rice Genetics and Breeding in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River Valley, Ministry of Agriculture, Changsha 410125; ²Hunan Agriculture University, Changsha 410128; ³Huaihua Polytechnic College, Huaihua 418099, Hunan; ⁴China National Rice Research Institute/State Key Lab of Rice Biology, Hangzhou 311400

收稿日期: 2021-01-07; 接受日期: 2021-03-08

基金项目: 湖南省农业农村厅财政专项、湖南省农业科技创新资金(2020CX06-01)

联系方式: 曾晓珊, E-mail: zengxiaoshan2@163.com. 通信作者余应弘, E-mail: yyh30678@163.com. 通信作者张健, E-mail: zhangjian@caas.cn

Abstract: 【Objective】 With the extension of mechanization and large-scale rice production mode, late harvest of rice grains brought by improper weather, conflicts in using mechanics and drying facilities usually gives rise to severe yield loss and quality deterioration, which has been deeply concerned by the farmers and greatly challenged the middle and late rice production in China. On the other hand, cadmium accumulation in rice grains has become a top food safety issue for breeders and producers. Flooding irrigation can effectively reduce cadmium content in rice. This research aims to select PMS (post-maturation sustainability) and low cadmium accumulation rice varieties by continuous flooding irrigation treatment. We expect to establish an effective evaluation system for PMS, select and utilize rice varieties with both PMS and low cadmium accumulation for production and research.

【Method】 Continual flooding irrigation were carried out in the experimental field during booting stage to yellow ripening stage in 2018. The mature plant lodging, seed dormancy and grain shattering of the 244 materials from China were evaluated through field observation and data investigation after ripening. The appraisal time and value of PMS rice varieties were defined using significant analysis. The 1000-grain weight, milling quality, appearance quality, gelatinization temperature, gel consistency and amylose content were tested for PMS rice. In 2019, 132 rice varieties promoting in Hunan were evaluated and identified using the appraisal time and value of post-harvest lodging. 1000-grain-weight were investigated between flooding and dry-wet alternate irrigation. The yield and effect of cadmium accumulation reduction of PMS rice varieties were tested in demonstration paddy field. **【Result】** The threshold for PMS was optimized as follows: lodging resistance is defined as the angle between rice stalk and vertical inclination $<45^\circ$ at the 14th day after maturity; rice shattering $<5.0\%$ at 7 days after maturity; and spike germination rate $<10.0\%$ at the same day of maturity. 21 PMS rice varieties were obtained in 2019. No significant difference existed in 1000-grain weight between flooding and dry-wet alternate irrigation, and also in yield in demonstration paddy field. The cadmium content of brown rice in flooding irrigation was lower than $0.20 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, which is significantly lower than that of dry-wet alternate irrigation management. **【Conclusion】** PMS rice varieties can withstand long-term flooding irrigation. There is no significant effect on yield and quality in delayed harvest after maturity. Application of PMS rice varieties in mild and moderate-level cadmium contaminated paddy, safety production can be realized in combination with flooding irrigation.

Key words: rice; PMS; flooding irrigation; safety production

0 引言

【研究意义】在水稻生产中,土壤镉(Cd)污染引起的稻米镉超标标准积累,以及水稻在成熟后因天气、收割机械配置、晒场矛盾等引起的不能及时收割等问题威胁着中国口粮安全生产^[1-2]。近年来,随着VIP (low Cd-accumulating rice variety, V; flooding, I; soil pH adjustment, P) 技术^[3]的应用推广,人们认识到持续淹水灌溉是实现水稻降镉安全生产的有效措施^[4-5]。在持续淹水灌溉条件下,通过建立科学、有效的耐迟收(post-maturation sustainability, PMS)水稻品种鉴定评价体系,筛选并在镉中轻度污染稻田推广种植PMS水稻品种,对中国粮食生产具有重要的科学和产业价值。**【前人研究进展】**稻米中积累的镉转移至食物链后,会对人体、骨骼、呼吸系统造成危害^[6-7]。自20世纪中期起,科学家通过多种途径来降低稻米中镉的积累,以实现稻米的安全生产^[4,8]。但在全球土壤镉浓度平均值为 $0.36 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的背景下,减少人为采矿、大气中燃烧排放物的沉积以及含镉肥料的使用等措施能显著降低进入土壤中镉的总量^[1,9-11],却不能有效降低稻米中镉的积累。诸多研

究结果表明,稻米镉含量的有效降低可通过淹水灌溉等措施实现^[4,8]。淹水灌溉的水稻土中可交换态Cd含量较低,晶形氧化铁对Cd专性吸附并生成不溶性化合物,CdS、碳酸钙对Cd的吸持,土壤pH升高进而增强有机质上官能团对Cd的吸附等因素,使得进入水稻体内的Cd总量降低^[6-7,12-14]。淹水处理对镉吸收累积的抑制效果与淹水灌溉时间呈正相关:分蘖盛期开始淹水3个星期处理较灌浆期开始淹水3个星期,糙米镉含量可降低56.0% ($P<0.05$);全程淹水处理的糙米镉含量最低^[12,15]。但是,生产上全程淹水栽培引起的不能及时进行机械收割等问题,限制了“淹水降镉”技术的推广。适时延长收获时间,推广种植成熟后表现良好、能延时机收的水稻品种可有效解决这一问题。**【本研究切入点】**迄今为止,水稻成熟后的最迟延收时间未有公开报道。通过PMS水稻品种的鉴定与应用,来实现镉污染稻田的安全生产,国内外亦尚无相关报道。根据前人研究结果,可通过水稻成熟后,谷粒穗萌及碾磨、外观和营养品质等参数的变化^[16-18]来确定最迟延收时间。同时,随着现代水稻生产机械化程度加深,延收后水稻茎秆倒伏、落粒性与机收方式的决策也密切相关^[19-21]。**【拟解决的关键问题】**本

研究在孕穗-黄熟期淹水灌溉条件下, 对大样本水稻品种成熟后进行分期调查、分析, 对 PMS 植株倒伏性、种子休眠性、籽粒落粒性进行合理鉴定, 确定最迟延收时间, 建立水稻 PMS 性状评价体系, 筛选 PMS 水稻品种。对不同延期收获的稻谷米质相关参数进行分析检测, 评价延迟收获对稻谷品质的影响; 对筛选到的 PMS 品种进行大田试验示范, 验证 PMS 水稻品种在镉中轻度污染稻田淹水种植降镉的效果。

1 材料与方法

1.1 试验品种

2018 年从全国的“双新”参展品种中选择适合湖南省种植的 244 个品种, 2019 年从湖南省的相关单位征集推广面积超过 3.4 万 hm^2 的 132 个品种。按生育期分成 4 个熟组, 即中稻迟熟组、一季晚稻组、晚稻迟熟组、晚稻中熟组。2018 年分别于 5 月 22 日、5 月 28 日、6 月 7 日、6 月 12 日播种, 2019 年分别于 5 月 18 日、5 月 28 日、6 月 12 日、6 月 18 日播种。

1.2 试验地点

2018 年的试验地点为湖南省农业科学院高桥基地, 土壤 pH 为 5.46, 总镉含量为 $0.17\text{—}0.39\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。2019 年湖南省湘阴县农业科学研究所试验基地, 土壤 pH 为 5.89, 总镉含量为 $0.83\text{—}0.91\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

1.3 试验设计

2018 年, 采用孕穗-黄熟期淹水灌溉, 田面保持水深 5—10 cm。4 个熟组按随机区组排列, 熟组内品种间随机排列, 3 次重复; 2019 年, 设 2 种水分管理, 在孕穗-黄熟期采用淹水处理, 以干-湿交替水分管理(自然落干后再灌溉)为对照, 3 次重复。

移栽前做好田埂并覆膜。划行移栽, 移栽规格均为 $20\text{ cm}\times 20\text{ cm}$, 小区间留走道 40 cm, 每个品种插 10 穴 \times 10 穴。基肥复合肥(N:P₂O₅:K₂O=15:15:15) $180\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、含磷 15%钙镁磷肥 $480\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; 分蘖期施尿素 $150\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、氯化钾 $120\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; 幼穗分化期施复合肥(N:P₂O₅:K₂O=15:15:15) $120\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、尿素 $75\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、氯化钾 $120\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; 抽穗扬花期施尿素 $30\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、氯化钾 $75\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

1.4 样品采集

每个品种 90%以上籽粒成熟时记为成熟期, 分别于成熟后第 0、7、14 和 21 天, 除去四周 3 行后, 随机选取 10 株(穴)主茎的稻穗进行相关性状调查。

1.5 性状调查与样品检测

倒伏性: 在非边行, 选取茎秆与地面垂直线偏离

最大的 10 株(穴), 利用角度尺测量角度。2 次重复, 计算平均值。

落粒性: 主穗自稻秆上摘下后, 置于 1.5 m 高处, 自然坠落于垫有 5 mm 厚铁板上, 连续操作 3 次。计算落粒数占总粒数(包括实粒数、空瘪粒数和落粒数)的百分比; 共调查 10 个主穗, 计算平均值。

休眠性: 主穗自稻秆上摘下后, 卷纸保湿于 30℃ 恒温箱中发芽, 4 d 后调查发芽数占总粒数的百分比; 共调查 10 个主穗, 计算平均值。

米质检测: 淹水处理中, 对成熟后第 21 天不倒伏的品种, 根据《NYT83-2017 米质测定方法》, 检测稻谷碾磨品质、稻米外观品质及糊化温度、胶稠度、直链淀粉含量、粗蛋白质含量。

稻米镉含量检测: 利用钢研纳克 NX-100F 型食品重金属检测仪进行检测糙米镉含量。

1.6 数据处理

采用 Excel2016、SAS9.0 进行数据整理和显著性分析。

2 结果

2.1 田间倒伏

2018 年, 根据《GB/T 19557.7-2004 植物新品种特异性、一致性和稳定性测试指南 水稻》倒伏的分级标准, 在成熟期后不同收获时期调查 244 个品种倒伏情况, 不同级别范围内水稻品种频率如图 1 所示: 成熟后, 随收获时间延长, 倒伏角度增大的品种数逐渐增多; 在成熟后第 14 天, 倒伏角度为小于 45°、45°—60°、大于 60°的品种数分别为 102、133 和 9 个, 品种频率分别为 41.80%、54.51%和 3.69%, 呈正态分布。成熟后第 14 天, 13.93%供试品种的稻穗出现枯断现象, 且随收获期延长不断增多; 至成熟后第 21 天, 31.97%供试品种的茎秆能持续保持秆青籽黄。根据田间观察结果, 倒伏角度为 45°—60°稻秆的群体散开或披散, 稻穗与稻秆易重叠在一起; 而倒伏角度大于 60°稻秆的穗部均已触地。生产上, 对倒伏小于 45°的稻秆, 可根据角度, 因地制宜地采取顺割、逆割、侧割^[22-23]等不同水稻机收方式; 而 45°—60°的稻秆, 因稻穗与稻秆重叠, 易加重病虫害发生且不利于机械收割时分禾处理, 造成产量损失与成本增加; 大于 60°或倒伏严重的稻秆则不能强行作业, 宜采取人工采收的方式^[23]。因此, 将倒伏性状的鉴定值确定为小于 45°, 调查时间确定为成熟后第 14 天。

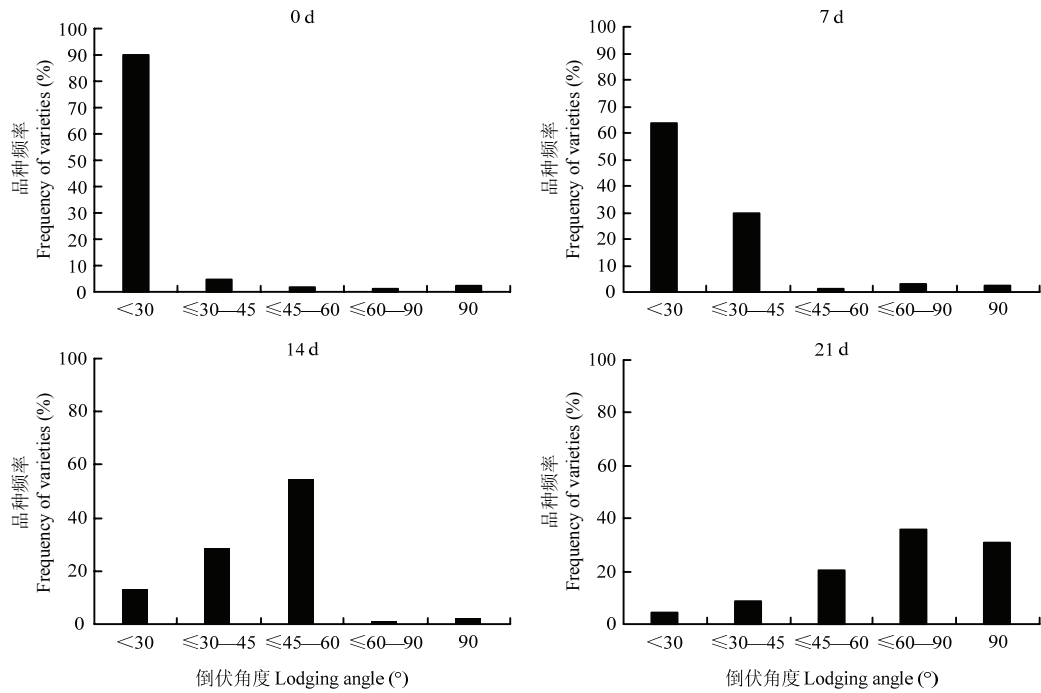


图 1 成熟后不同收获时间不同倒伏角度品种频率

Fig. 1 Varieties frequency of lodging angle at different harvest-time after maturity

2.2 落粒性调查

自成熟期到成熟后第 21 天,未发现有极端落粒性强的品种。落粒性检测结果表明,不同熟组的落粒率随收获期延长变化并不一致(表 1),中稻迟熟组的落粒率随收获期延长递增,成熟后第 14 天显著高于第 0 天;一季晚稻、晚稻迟熟、晚稻中熟组的落粒率随收获期延长则先增后降,显著高于成熟第 0 天的时间分别出现在成熟后第 7、14 和 7 天;成熟后第 0 天的

平均落粒率极显著低于成熟后第 7、14 和 21 天,而成熟后第 7、14 和 21 天间没有显著差异。因此,将 PMS 落粒性状的调查时间确定为成熟后第 7 天。

分析成熟后第 7 天的落粒率,结果显示,244 个品种落粒率为 0.47%—41.18%,平均为 7.90%;根据《GB/T 19557.7-2004 植物新品种特异性、一致性和稳定性测试指南 水稻》落粒性的分级标准,落粒率小于 1%、1%—5%、5%—25%、25%—50%、大于 50%的

表 1 2018 年不同收获时间落粒率比较

Table 1 Grain percentage of several harvest-time in 2018

组别 Group	成熟后天数 Days after mature (d)			
	0	7	14	21
中稻迟熟 Late-maturing middle-season (%)	5.75cA	6.68bcB	7.88abA	8.46aA
一季晚稻 Single-cropping late rice (%)	4.83bB	7.95aA	7.29aB	7.34aB
晚稻迟熟 Late-maturing late rice (%)	5.36bA	6.74abB	7.33aAB	6.31abC
晚稻中熟 Middle-maturing late rice (%)	5.42bA	7.14aB	7.51aA	7.35aB
平均 Mean (%)	5.34b	7.13a	7.50 a	7.37 a

不同小写字母表示同一熟组不同成熟后天数间差异达显著水平($P<0.05$),不同大写字母表示同一成熟后天数不同熟组间差异达显著水平($P<0.05$)。下同

Different lowercase letters in same line indicate significant differences in days after mature of the same ripening group ($P<0.05$), and different uppercase letters in same column indicate significant differences in ripening group in the same days after mature ripe ($P<0.05$). The same as below

水稻品种数量分别为 16、97、122、9 和 0 个。将落粒率数据进行反正弦转换，品种分布频率（图 2）符合正态分布，中值为 13.50%，95%置信区间临界值为 5.95%。根据《水稻种质资源数据质量标准》，落粒率小于 5%的品种共 113 个，可为 PMS 品种筛选提供足够数量的候选品种。因此，将 PMS 落粒性状的鉴定值确定为小于 5.0%。

2.3 休眠性

至成熟后 21 d，共观测到 50 个品种表现穗萌，占 20.49%；其中，中稻迟熟/一季晚稻组穗萌品种比例为 21.80%，晚稻迟/中熟组穗萌品种比例为 9.30%。因田间穗萌易受外界环境影响，穗萌率年度间重复性差。利用卷纸发芽法调查耐休眠性，将穗发芽率作为鉴定品种穗萌的指标。因天气原因，共收集 227 个品种进行穗发芽率鉴定（表 2），结果表明，穗发芽率随收获期延长而增加，且不同熟组的品种成熟后第 0 天的穗发芽率均极显著低于第 7、14 和 21 天，而成熟后第 7、14 和 21 天间差异不显著。穗发芽率在品种间存在

极显著差异，但未发现极端休眠性好的品种。水稻种子成熟 7 d 后，其休眠性极易被高温、光照等外因打破，进而干扰检测结果^[24-25]，因此，将穗发芽率调查时间确定在成熟后第 0 天。

成熟后第 0 天，227 个品种的平均穗发芽率为 0.08%—95.63%，品种间差异显著；穗发芽率数据经反正弦转换后，品种分布频率符合正态分布（图 3），中值为 10.02%，95%置信区间临界值为 13.07%。因此，将 PMS 休眠性状的鉴定值确定为<10.0%。

2.4 稻米品质

根据《NT/T 83-2017 米质测定方法》，检测分析 244 个品种不同收割时间的稻谷碾磨品质、稻米外观品质及糊化温度、胶稠度、直链淀粉含量、粗蛋白质含量（表 3）。结果表明，随收获期延长，稻谷碾磨品质逐渐下降：糙米率在成熟后第 2 天显著下降；整精米率与精米率在成熟后第 7 天开始下降。稻米外观品质中，长宽比与透明度在不同取样时间的样品间无显著差异；垩白度与垩白粒率在成熟后第 7 天则显著增加。

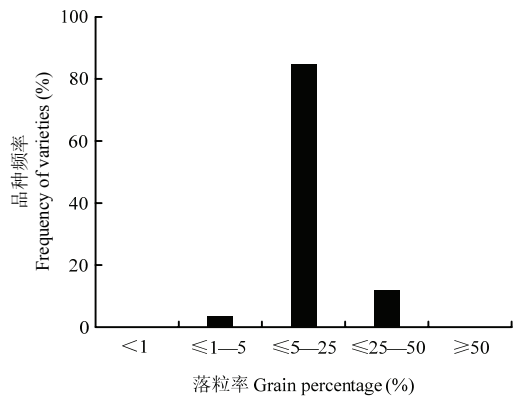


图 2 2018 年不同落粒率级别品种频率
Fig. 2 Varieties frequency of grain percentage in 2018

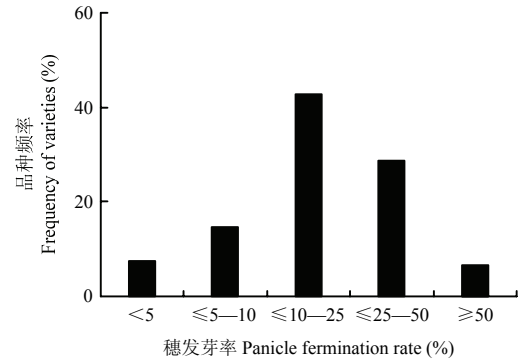


图 3 2018 年 227 个品种穗发芽率品种频率
Fig. 3 Varieties number of 227 isolates panicle germination rate in 2018

表 2 2018 年不同收获时间穗发芽率比较
Table 2 Panicle germination rate of several harvest-time in 2018

组别 Group	成熟后天数 Days after mature (d)			
	0	7	14	21
中稻迟熟 Late-maturing middle-season (%)	19.95bB	32.11aB	33.15aA	35.40aA
一季晚稻 Single-cropping late rice (%)	21.10bB	32.82aA	32.02aB	30.41aD
晚稻迟熟 Late-maturing late rice (%)	21.17bB	33.07aA	30.85aC	31.55aC
晚稻中熟 Middle-maturing late rice (%)	22.15bA	30.11aC	31.82aB	32.44aB
平均 Mean (%)	21.09b	32.03a	31.96a	32.45a

表 3 2018 年淹水处理 244 个品种米质表现

Table 3 Quality performance under continuous flooding of 244 rice isolates in 2018

成熟后天数 Days after mature (d)	糙米率 Brown rice rate (%)	精米率 Milled rice rate (%)	整精米率 Head rice rate (%)	长宽比 Length-width ratio	垩白度 Chalkiness (%)	透明度 Transparency	垩白粒率 Chalky grain rate (%)	碱消值 Alkali value	胶稠度 Gel consistency (mm)	直链淀粉含量 Amylase content (%)
0	79.80a	69.91a	53.73a	3.50a	0.78b	1.52a	6.17b	6.15a	74.02a	16.65a
7	79.75a	69.35b	47.37b	3.47a	1.03a	1.45a	7.90a	6.06a	73.07ab	16.57a
14	79.76a	69.26b	47.93b	3.48a	1.16a	1.59a	8.91a	6.06a	71.91bc	16.56a
21	79.43b	68.96b	46.42b	3.47a	1.13a	1.52a	9.04a	6.07a	71.35c	16.63a

随收获期延长，糊化温度与直链淀粉含量均未有显著变化；且成熟后收割样品的碱消值均在 6 级以上；胶稠度在成熟 14 d 后显著降低，但不同取样时间的样品平均胶稠度均超过 71 mm。

2.5 千粒重

千粒重是构成产量的重要因子。2019 年，考察不

同灌溉管理处理下不同收获时期样品的千粒重（表 4），结果表明，在淹水、干-湿交替灌溉处理中，同一收割时间不同熟组间的差异均达极显著水平；2 种处理间差异未达到显著水平；随收获期延长，千粒重略有增加，但同一熟组不同收获时期样品间差异未达显著水平。

表 4 2019 年不同灌溉管理不同收获时期千粒重比较

Table 4 1000-grain weight of several harvest-time and irrigation management in 2019

组别 Group	干-湿交替 Dry-wet (d)				淹水 Flooding (d)			
	0	7	14	21	0	7	14	21
中稻迟熟 Late-maturing middle-season (g)	25.38A	25.02B	25.20A	25.60A	24.66B	24.61B	25.20B	24.85B
一季晚稻 Single-cropping late rice (g)	23.27B	23.56C	23.80C	23.79B	23.32C	23.59C	23.59C	22.84C
晚稻迟熟 Late-maturing late rice (g)	22.53C	21.95D	21.54D	21.78C	22.33D	22.07D	21.63D	21.69D
晚稻中熟 Middle-maturing late rice (g)	25.37A	25.46A	24.78B	25.44A	25.80A	26.61A	25.63A	26.41A
平均 Mean (g)	24.34	24.32	24.33	24.98	24.25	24.29	24.56	24.56

2.6 PMS 水稻品种的筛选

应用 PMS 性状鉴定标准，2018 年初步筛选到 5 个 PMS 水稻品种；2019 年对征集到的 132 个水稻品种进行筛选：至成熟后第 14 天，观察到倾斜角度小于 45°的品种共 77 个；成熟后第 7 天调查落粒性状，筛选到落粒率小于 5.0%的品种共 82 个；成熟后第 0 天调查 PMS 性状，筛选到穗发芽率小于 10.0%的品种共 23 个。综合 3 个性状，共筛选到 21 个 PMS 水稻品种（表 5）。其中，玖两优黄华占、桃优香占、农香 42 及板仓粳糯为 2018、2019 年共同鉴定到的 PMS 品种；至成熟后 21 d 内，桃优香占、农香 42 及板仓粳糯的稻秆倒伏角度均小于 30°；PMS 品种的籽粒后期落色好，无枯穗现象。

2.7 PMS 水稻品种应用

2019 年在株洲攸县，利用 2018 年筛选到的 3 个 PMS 水稻品种桃优香占（60.33 hm²）、玖两优黄华占

（4.20 hm²）、农香 42（8.80 hm²）开展应用研究，其中，淹水处理区自移栽后在孕穗-黄熟期进行淹水管理。其间，水稻长势良好，无明显病虫害危害，无倒伏。成熟后第 10 天对 2 个 PMS 品种桃优香占、玖两优黄华占进行测产和降镉效果鉴定。随机选取田块，3 个重复，机收测产的结果表明，不同品种在不同淹水管理条件下，产量增减表现不一致；但同一品种在淹水灌溉稻田与干-湿交替灌溉稻田产量无显著差异（表 6）。

对宁乡市双江口镇、攸县新市镇、湘潭市青山桥镇 3 个示范点，采取随机取样的方式，检测稻米镉含量。结果表明，移栽后在孕穗-黄熟期进行淹水管理，稻米镉含量均符合《GB2762-2017 食品安全国家标准-食品中污染物限量》指标，且远低于干-湿交替灌溉管理（表 7）。种植 PMS 水稻品种，结合适时淹水的降镉技术，可实现镉中轻度污染区安全生产。

表 5 2019 年 PMS 水稻品种信息
Table 5 PMS rice varieties in 2019

组别 Group	品种 Variety	最大倾斜度 Max gradient (°)	穗发芽 Pre-harvest sprouting (%)	落粒率 Grain percentage (%)
中稻迟熟 Late-maturing middle-season	两优 1316 Liangyou 1316	≤30—45	9.89	0.58
	隆两优 1308 Longliangyou 1308	≤30—45	3.56	0.91
	隆两优 1813 Longliangyou 1813	<30	6.06	0.69
	隆两优 1988 Longliangyou 1988	≤30—45	9.11	3.08
	Y 两优 800 Yliangyou 800	≤30—45	9.11	0.44
	甬优 4949 Yongyou 4949	<30	5.93	0.69
	韵两优 332 Yunliangyou 332	≤30—45	9.02	0.63
	Y 两优 372 Yliangyou 372	≤30—45	9.75	0.04
一季晚稻 Single-cropping late rice	C 两优 258 C liangyou 258	≤30—45	4.99	5.24
	C 两优 755 Cliangyou755	≤30—45	3.37	0.25
	金两优华占 Jingliangyouhuazhan	≤30—45	9.15	2.28
	晶两优 641 Jingliangyou 641	≤30—45	7.15	1.19
	隆两优 1212 Longliangyou 1212	≤30—45	9.43	2.17
	甬优 1538 Yongyou 1583	<30	5.11	0.71
	甬优 4149 Yongyou 4149	<30	8.25	0.04
	黄华占 Huanghuazhan	≤30—45	7.41	0.27
晚稻迟熟 Late-maturing late rice	玖两优 1212 Jiuliangyou 1212	≤30—45	9.13	2.94
晚稻中熟 Middle-maturing late rice	玖两优黄华占 Jiuliangyouhuanghuazhan	≤30—45	6.96	4.17
	桃优香占 Taoyouxiangzhan	<30	3.06	3.55
	农香 42 Nongxiang 42	<30	7.51	4.30
	板仓粳糯 Bancanggengnuo	<30	3.09	0.00

表 6 2019 年 PMS 水稻品种机收测产
Table 6 Yield of PMS rice varieties by mechanical harvest in 2019

品种 Variety	灌溉管理 Irrigation management	实测面积 Area (m ²)	实收毛谷重量 Grain weight (kg)	实测含水量 Water content (%)	折合产量 Yield (t·hm ⁻²)
桃优香占 Taoyouxiangzhan	干-湿交替 Dry-wet	479.78	364.10	22.77	6.78
	淹水 Flooding	572.70	472.60	24.57	7.20 NS
玖两优黄华占 Jiuliangyouhuanghuazhan	干-湿交替 Dry-wet	579.80	506.80	22.23	7.76
	淹水 Flooding	470.29	409.10	24.83	7.56NS

NS: 同一品种的淹水与干-湿交替之间的差异未达显著水平 ($P<0.05$)
NS: Indicated the difference of cadmium content between flood and dry-wet management was not significant level ($P<0.05$)

3 讨论

3.1 PMS 水稻品种性状鉴定时间与参数确定

本研究在 2018 年 244 个水稻品种性状调查与分析的基础上,初步构建了 PMS 水稻品种评价体系,所涉及的性状鉴定时间与参数在 2019 年进一步获得了验证(数据未列)。通过分析 2018、2019 年均参

加鉴定的 4 个品种,发现 PMS 性状在品种间存在极显著差异,但同一品种在年度间重复性好,说明本研究所建立的 PMS 特性具有稳定的遗传基础。生产上,稻秆倒伏可能受到气温、病虫害、施肥水平、秧苗素质等多个因素影响。本评价体系中,仅采用淹水处理作为倒伏的筛选压,其他因素的相关研究有待进一步细化并完善。

表 7 2019 年 PMS 水稻品种示范点稻米镉含量
Table 7 Cadmium content of PMS rice varieties in demonstration paddy field in 2019

地点 Site	土壤 pH Soil pH	土壤镉含量 Soil cadmium content (mg·kg ⁻¹)	播种期 Seeding time (M/D)	品种 Variety	灌溉管理 Irrigation management	
					淹水 Flooding	干-湿交替 Dry-wet
双江口镇 Shuangjiangkou	5.3—6.9	0.21—0.46	06/04	桃优香占 Taoyouxiangzhan	0.05*	0.33
				玖两优黄华占 Jiuliangyouhuanghuazhan	0.01**	0.26
				农香 42 Nongxiang42	0.09*	0.79
新市镇 Xinshi	5.0—5.2	0.35—0.41	06/20	桃优香占 Taoyouxiangzhan	0.06*	0.49
				玖两优黄华占 Jiuliangyouhuanghuazhan	0.03**	0.49
				农香 42 Nongxiang42	0.05*	0.35
青山桥镇 Qingshanqiao	5.0—6.6	0.40—0.62	06/10	桃优香占 Taoyouxiangzhan	<0.01**	0.34
				玖两优黄华占 Jiuliangyouhuanghuazhan	<0.01**	0.33
				农香 42 Nongxiang42	<0.01**	0.44

*表示同一行数据淹水管理与干-湿交替之间的镉含量差异达显著水平 ($P<0.05$), **表示达极显著水平 ($P<0.01$)
*indicated the difference of cadmium content between flood and dry-wet management was significant level ($P<0.05$), and ** was extremely significant level ($P<0.01$)

2018 年参加鉴定的 244 个品种中, 仅鉴定到倾斜角度大于等于 45°品种 19 份, 占 7.79%; 倒伏品种偏少的原因可能是试验基地自 8 月中旬到 10 月下旬, 气温较常年高, 降雨偏少, 病虫害发生少。值得注意的是, 2019 年, 成熟后第 0 天有 9 个品种倒伏角度大于等于 60°, 其中, 有 3 个仅出现在干-湿水分管理中。这可能与淹水处理下水稻倒 3、4 节茎秆机械组织强度、韧性以及长度的增加有关^[26-27]。彭世彰等^[28]从力学角度对蓄水-控灌处理下水稻茎秆抗倒伏能力增强的原因进行了分析: 相较干-湿交替灌溉, 淹水处理下稻秆的茎秆系数最小, 节间充实度高出 135.3%, 壁厚高出 0.35 mm, 表现出更为优越的力学性能。但也有研究者认为, 干-湿交替处理有利于水稻植株重心高度降低, 第 1 节 (N1)、第 2 节 (N2) 节间长度缩短, 单位节间干重增加, 从而提高节间抗折力, 抗倒伏能力较淹水灌溉处理强^[29]。本研究中, 淹水灌溉处理采取只进水不出水的方式, 在充分利用自然降水的基础上, 保持水层 5 cm 左右, 水稻茎秆倒伏能力增强的原因可能与蓄水-控灌处理类似, 进一步的机理研究有待深入探讨。

落粒性强弱对延迟收获时产生的损失因品种不同而异。在机械作业过程中, 易落粒型品种损失率一般为 8%—10%, 易导致丰产不丰收; 难落粒型品种因难于脱落, 易与谷草混杂而造成产量损失, 损失率为 4%—5%; 中等或中等偏强落粒型机收损失率约 3%^[20]。本研究中, 将落粒性状鉴定值确定为 5%, 属

于低落粒率范围, 对于机械收割, 是将损失率降至最低的选择。

穗萌是种子休眠特性丧失或减弱, 获得萌发能力的生理过程^[30-34]: 休眠性强、休眠期长的水稻品种不易发生穗萌; 没有休眠特性, 或休眠性弱、休眠期短的水稻品种易发生穗上发芽^[35-37]。前人研究表明, 易穗萌的水稻种子遇到高温高湿天气时, 穗萌程度加剧; 抗穗萌水稻品种在连续阴雨高温天气时也会发生一定程度的穗萌^[32]。种子休眠和萌发, 存在复杂的相互关系, 涉及植物激素、光照、温度、氮素及种皮在种子休眠形成及解除中发挥的重要作用^[32-36,38]。根据气象资料, 2019 年水稻中、晚稻成熟期期间的总降雨量仅为 69.1 mm, 相较 2018 年少 65.9 mm; 平均温度低于 20℃的时间推迟了 7 d; 而持续无雨天数长达 20 d, 比 2018 年多出 9 d; 这些可能是 2019 年观测到田间穗萌品种比 2018 年少的原因。而中稻和一季晚稻组品种成熟期间高于 25℃的天数多于晚稻迟熟和中熟组, 其穗萌比例相应较高的原因则体现了温度对穗萌的影响^[32,39-40]。由于群体遗传结构、研究方法的不同以及外界环境的影响, 加之控制水稻种子休眠性 QTL 本身的遗传复杂性, 使得穗萌方面的研究存在许多问题: 不仅对水稻种子休眠性和穗萌的基因数量仍存在争议^[24,34,36,41-47], 还缺少对穗萌鉴定的有效标准。本研究通过调查取样成熟后第 0 天稻谷的休眠性, 来反映穗发芽的难易程度; 更好的鉴定方法及标准有待进一步研究。

产量方面, 2018 年仅对千粒重进行了分析, 其他影响产量的因素如有效穗数、每穗粒数等未进行调查; 但 2019 年 PMS 水稻品种示范田测产的结果说明, 淹水处理、延迟收获能实现水稻产量的安全生产。病虫害防治方面, 本研究与示范过程中, 均发现延迟收获的稻秆极易遭受稻飞虱啃噬。这可能是因为延收后的稻秆依旧保持正常生理活性, 并成为稻飞虱仅有取食对象有关。水稻延收后对稻飞虱生活、迁移习性是否有影响, 还待进一步研究。

3.2 淹水降镉效果

污染水中有 0.012%—0.067% 的镉积累到稻米中^[48]。淹水灌溉能显著降低进入植株体内的有效态镉^[6-7,13-14], 并抑制镉吸收基因表达, 进而降低水稻对镉的吸收和积累^[49]。本研究通过 2019 年千亩示范, 在镉中轻度污染稻田种植出符合《GB2762-2017 食品安全国家标准-食品中污染物限量》指标稻谷, 实现了安全生产, 验证了前人的研究结果; 但在镉重度污染稻田, 是否也能获得相同效果, 仍需进一步研究。同时, 根据前人报道, 镉离子常通过“蹭车”的方式伴随着其他重金属离子(如砷、锰等)进行跨膜运输^[50-55]。淹水灌溉后, 稻米中其他重金属离子含量是否超标、如何协调稻米重金属离子含量的平衡等问题, 本研究均未涉及; 相应研究, 仍有待进一步开展。

种植 PMS 水稻品种, 结合淹水法种植, 可实现稻米降镉; 但在水资源不足的季节或降水不丰的稻区, PMS 水稻品种的降镉效果将面临挑战。因此, 精确把握淹水时期, 对保证生产安全、保持降镉效果至关重要。本研究在前人研究的基础上, 将淹水处理时间确定为孕穗-黄熟期, 并开展大样本水稻品种筛选; 生产上, 可根据不同品种的生长发育规律、因地制宜地确定具体淹水时期。

4 结论

水稻应在成熟后 7 d 内及时收割, 且不宜迟于成熟后 14 d。水稻品种 PMS 性状评价体系为: 孕穗-黄熟期淹水灌溉, 成熟后第 14 天稻秆与垂直倾斜角度小于 45°、成熟后第 7 天落粒率小于 5.0%、成熟后第 0 天穗发芽率小于 10.0%, 同时满足 3 个指标的水稻品种鉴定为 PMS 水稻品种。2018—2019 年, 共筛选 PMS 水稻品种 21 个。2019—2020 年应用耐 PMS 性水稻品种, 移栽后在孕穗-黄熟期进行淹水管理, 千亩示范田中稻米镉含量均符合《GB2762-2017 食品安全国家标准-食品中污染物限量》指标。在中、轻度镉污染稻田

推广种植 PMS 水稻品种, 结合淹水法, 可实现水稻的安全生产。

致谢: 中国农业科学院作物科学研究所万建民院士对文章进行了指导, 在此表示感谢。

参考文献 References

- [1] KUBIER A, WILKIN R T, PICHLER T. Cadmium in soils and groundwater: A review. *Applied Geochemistry*, 2019, 108: 1-16.
- [2] 马艳杰. 水稻机械收割存在的问题与建议. *现代农业*, 2018, 7: 36-37.
MA Y J. The problems and suggestion existing in rice harvest machinery. *Modern Agriculture*, 2018, 7: 36-37. (in Chinese)
- [3] 沈欣, 朱奇宏, 朱捍华, 许超, 何演兵, 黄道友. 农艺调控措施对水稻镉积累的影响及其机理研究. *农业环境科学学报*, 2015, 34(8): 1449-1454.
SHEN X, ZHU Q H, ZHU H H, XU C, HE Y B, HUANG D Y. Effects of agronomic measures on accumulation of Cd in rice. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(8): 1449-1454. (in Chinese)
- [4] HU Y N, CHENG H F, TAO S. The challenges and solutions for cadmium-contaminated rice in China: A critical review. *Environment International*, 2016(92/93): 515-532.
- [5] SUN L M, ZHENG M M, LIU H Y, PENG S B, HUANG J L, CUI K H, NIE L X. Water management practices affect arsenic and cadmium accumulation in rice grains. *The Scientific World Journal*, 2014(2014): 1-6.
- [6] YAMAGATA N, SHIGEMATSU I. Cadmium pollution in perspective. *Koshu Eisei in Kenkyu Hokoku*, 1970, 19(1): 1-27.
- [7] MASUI M, KANAMARU N, TAKESAKO H, TAKESAKO H, MIYAKODA H, NANBA I, TAKAHASHI H. Annual surveys on correlation between the degree of cadmium contamination of paddy field rice grain and the number of dry-paddyfield days in the cadmium contaminated area in Tama region of Tokyo. *Bulletin of Tokyo-To Agricultural Experiment Station*, 1971, 5: 1-5.
- [8] LI H, LUO N, LI Y W, CAI Q Y, LI H Y, MO C H, WONG M H. Cadmium in rice: Transport mechanisms, influencing factors, and minimizing measures. *Environmental Pollution*, 2017, 224(5): 622-630.
- [9] WANG P, CHEN H, KOPITKE P M, ZHAO F J. Cadmium contamination in agricultural soils of China and the impact on food safety. *Environmental Pollution*, 2019, 249:1038-1048.
- [10] HORIGUCHI H, TERANISHI H, NIIYA K, AOSHIMA K, KASUYA M. Hypoproduction of erythropoietin contributes to anemia

- in chronic cadmium intoxication: Clinical study on Itai-itai disease in Japan. *Archives of Toxicology*, 1994, 68(10): 632-636.
- [11] WANG M, CHEN W, PENG C. Risk assessment of Cd polluted paddy soils in the industrial and township areas in Hunan, Southern China. *Chemosphere*, 2016, 144: 346-351.
- [12] ARAO T, ISHIKAWA S, MURAKAMI M, ABE K, MAEJIMA Y, MAKINO T. Heavy metal contamination of agricultural soil and countermeasures in Japan. *Paddy and Water Environment*, 2010, 8(3): 247-257.
- [13] OGAWA B. Studies on the actual situation of cadmium pollution to paddy rice in Akita prefecture and its control. *Bulletin of the Akita Agricultural Experiment Station*, 1994, 35: 1-64.
- [14] OTAKE T. Absorption of cadmium by rice plants and its control in cadmium-contaminated paddy soils. *Special Bulletin of the Yamagata Prefectural Agricultural Experiment Station*, 1992, 20: 1-77.
- [15] 刘昭兵, 纪雄辉, 官迪, 谢运河, 朱坚, 彭建伟. 镉胁迫条件下淹水时间对水稻吸收累积镉的影响. *生态与农村环境学报*, 2017, 33(12): 1125-1131.
- LIU S B, JI X H, GUAN D, XIE Y H, ZHU J, PENG J W. Effects of timing and duration of waterlogging on Cd absorption and accumulation by rice under cadmium stress. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2017, 33(12): 1125-1131. (in Chinese)
- [16] ALI A, KARIM M A, MAJID A, HASSAA G, ALI L, ALI S S, 廖伏明. 不同收获时期对稻米品质的影响. *杂交水稻*, 1994, 2: 30-31.
- ALI A, KARIM M A, MAJID A, HASSAA G, ALI L, ALI S S, LIAO F M. Grain quality of rice harvested at differed maturities. *Hybrid Rice*, 1994, 2: 30-31. (in Chinese)
- [17] 苗得雨, 魏玉光, 贺海生. 不同收获时期和收获方式对水稻碾米品质和产量的影响. *北方水稻*, 2007, 4: 25-27.
- MIAO D Y, WEI Y G, HE H S. Effect of harvesting time and pattern on milling quality and yield rice. *North Rice*, 2007, 4: 25-27. (in Chinese)
- [18] 顾帅娣, 于艳杰, 万波, 杭民仁, 许建华. 崇明区不同收获时期水稻种子发芽率比较试验初报. *上海农业科技*, 2020, 2: 28-29.
- GU S T, YU Y J, WAN B, HANG M R, XU J H. Rice seed germination rate comparison test of different harvest period in Chongming area. *Shanghai Agricultural Science and Technology*, 2020, 2: 28-29. (in Chinese)
- [19] 王桂民, 易中懿, 陈聪, 曹光乔. 收获时期对稻麦轮作水稻机收损失构成的影响. *农业工程学报*, 2016, 32(2): 36-42.
- WANG G M, YI Z Y, CHEN C, CAO G Q. Effect of harvesting date on loss component characteristic of rice mechanical harvested in rice and wheat rotation area. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(2): 36-42. (in Chinese)
- [20] 康洪灿, 李国生, 钊兴宽, 王锦艳. 水稻生产全程机械化对品种的要求. *中国稻米*, 2015, 21(4): 191-192.
- KANG H C, LI G S, CHUAN X K, WANG J Y. Variety selection in rice production with full mechanization. *China Rice*, 2015, 21(4): 191-192. (in Chinese)
- [21] 曾勇军, 吕伟生, 石庆华, 谭雪明, 潘晓华, 黄山, 商庆银. 水稻机收减损技术研究. *作物杂志*, 2014, 6: 131-134.
- ZENG Y J, LÜ W S, SHI Q H, TAN X M, PAN X H, HUANG S, SHANG Q Y. Study on mechanical harvesting technique for loss reducing of rice. *Crops*, 2014, 6: 131-134. (in Chinese)
- [22] 冷雪. 久保田水稻收割机的使用与调整. *农民致富之友*, 2015, 13: 128.
- LENG X. The use and adjustment of Kubota rice harvester. *Nongmin Zhifu Zhiyou*, 2015, 13: 128. (in Chinese)
- [23] 谭丁勇. 水稻收割机操作要点. *湖南农机*, 2014, 10: 100.
- TAN D Y. Rice harvester operation point. *Hunan Agricultural Machine*, 2014, 10: 100. (in Chinese)
- [24] 江玲, 张文伟, 翟虎渠, 万建民. 水稻种子休眠性基因座的定位和分析. *中国农业科学*, 2005, 38(4): 650-656.
- JIANG L, ZHANG W W, ZHAI H Q, WAN J M. Mapping and analysis of quantitative trait loci controlling seed dormancy in rice. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(4): 650-656. (in Chinese)
- [25] 唐九友, 江玲, 王春明, 刘世家, 陈亮明, 翟虎渠, 吉村醇, 万建民. 水稻种子休眠性 QTL 定位及其对干热处理的响应. *中国农业科学*, 2004, 37(12): 1791-1796.
- TANG J Y, JIANG L, WANG C M, LIU S J, CHEN L M, ZHAI H Q, YOSHIMURA A, WAN J M. Analysis of QTL for seed dormancy and their response to dry heat treatment in rice (*Oryza sativa* L.). *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(12): 1791-1796. (in Chinese)
- [26] 张忠旭, 陈温福. 水稻抗倒伏能力与茎秆物理性状的关系及其对产量的影响. *沈阳农业大学学报*, 1999, 30(2): 81-85.
- ZHANG Z X, CHEN W F. Effect of lodging resistance on yield and its relationship with stalk physical characteristics. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 1999, 30(2): 81-85. (in Chinese)
- [27] 王文霞, 周燕芝, 曾勇军, 吴自明, 谭雪明, 潘晓华, 石庆华, 曾研华. 不同机直播方式对南方优质晚籼稻产量及抗倒伏特性的影响. *中国水稻科学*, 2020, 34(1): 46-56.
- WANG W X, ZHOU Y Z, ZENG Y J, WU Z M, TAN X M, PAN X H, SHI Q H, ZENG Y H. Effects of different mechanical direct seeding patterns on yield and lodging resistance of high-quality late *indica* rice in south China. *Chinese Journal of Rice Science*, 2020, 34(1): 46-56. (in Chinese)

- [28] 彭世彰, 张正良, 庞桂斌. 控制灌溉条件下寒区水稻茎秆抗倒伏力学评价及成因分析. 农业工程学报, 2009, 25(1): 6-10.
- PENG S Z, ZHANG Z L, PANG G B. Mechanical evaluation and cause analysis of rice-stem lodging resistance under controlled irrigation in cold region. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(1): 6-10. (in Chinese)
- [29] 郭相平, 黄双双, 王振昌, 王甫, 陈斌. 不同灌溉模式对水稻抗倒伏能力影响的试验研究. 灌溉排水学报, 2017, 36(5): 1-5.
- GUO X P, HUANG S S, WANG Z C, WANG F, CHEN B. Impact of different irrigation methods on resistance of rice against bending and breaking. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(5): 1-5. (in Chinese)
- [30] 陈兵先, 刘军. 水稻穗萌及调控的研究进展. 种子, 2017, 36(2): 49-55.
- CHEN B X, LIU J. Research progress of rice vivipary and its regulation. Seed, 2017, 36(2): 49-55. (in Chinese)
- [31] 宋松泉, 龙春林, 殷寿华, 兰芹英. 种子的脱水行为及其分子机制. 云南植物研究, 2003, 25(4): 465-479.
- SONG S Q, LONG C L, YIN S H, LAN Q Y. Desiccation behavior of seeds and their molecular mechanisms. Acta Botanica Yunnanica, 2003, 25(4): 465-479. (in Chinese)
- [32] CHEN M, XIE S, OUYANG Y, YAO J. Rice PcG gene *OsEMF2b* controls seed dormancy and seedling growth by regulating the expression of *OsVPI*. Plant Science, 2017, 260: 80-89.
- [33] CHEN B X, PENG Y X, GAO J D, ZHANG Q, LIU Q J, FU H, LIU J. Coumarin-induced delay of rice seed germination is mediated by suppression of abscisic acid catabolism and reactive oxygen species production. Frontiers in Plant Science, 2019, 10: 828.
- [34] SUGIMOTO K, TAKEUCHI Y, EBANA K, MIYAO A, HIROCHIKA H, HARA N, ISHIYAMA K, KOBAYASHI M, BAN Y, HATTORI T, YANO M. Molecular cloning of *Sdr4*, a regulator involved in seed dormancy and domestication of rice. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2010, 107(13): 5792-5797.
- [35] WANG M, LI W, FANG C, XU F, LIU Y, WANG Z, YANG R, ZHANG M, LIU S, LU S, LIN T, TANG J, WANG Y, WANG H, LIN H, ZHU B, CHEN M, KONG F, LIU B, ZENG D, JACKSON S A, CHU C, TIAN Z. Parallel selection on dormancy gene during domestication of crops from multiple families. Nature Genetics, 2018, 50(10): 1435-1441.
- [36] HORI K, SUGIMOTO K, NONOUE Y, ONO N, MATSUBARA K, YAMANOUE U, ABE A, TAKEUCHI Y, YANO M. Detection of quantitative trait loci controlling pre-harvest sprouting resistance by using backcrossed populations of japonica rice cultivars. Theoretical and Applied Genetics, 2010, 120(8): 1547-1557.
- [37] WAN J, NAKAZAKI T, KAWAURA K, IKEHASHI H. Identification of marker loci for seed dormancy in rice (*Oryza sativa* L.). Crop Science, 1997, 37: 1759-1763.
- [38] SHI H, SHEN X, LIU R L, XUE C, WEI N, DENG X W, ZHONG S W. The red light receptor phytochrome B directly enhances substrate-E3 Ligase interactions to attenuate ethylene responses. Developmental Cell, 2016, 39(5): 597-610.
- [39] ROBERTS E H. Dormancy in rice seed: III. The influence of temperature, moisture, and gaseous environment. Journal of Experimental Botany, 1962, 13(1): 75-94.
- [40] FINCH-SAVAGE W E, LEUBNER-METZGER G. Seed dormancy and the control of germination. New Phytologist, 2006, 171(3): 501-523.
- [41] 韦飞严, 田继微, 孟祥伦, 武小金. 水稻穗萌抗性 with *OsVPI* 基因启动子序列及其表达水平的关系. 杂交水稻, 2015, 6: 59-63.
- WEI F Y, TIAN J W, MENG X L, WU X J. Relation of pre-harvest sprouting resistance in rice to the promoter sequence and expression of gene *OsVPI*. Hybrid Rice, 2015, 6: 59-63. (in Chinese)
- [42] MARTÍNEZ-BERDEJA A, STITZER M C, TAYLOR M A, OKADA M, EZCURRA E, RUNCIE D E, SCHMITT J. Functional variants of *DOG1* control seed chilling responses and variation in seasonal life-history strategies in *Arabidopsis thaliana*. Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA, 2020, 117(5): 2526-2534.
- [43] CAI H, MORISHIMA H. QTL clusters reflect character associations in wild and cultivated rice. Theoretical and Applied Genetics, 2002, 104(8): 1217-1228.
- [44] GU X Y, KIANIAN S F, FOLEY M E. Multiple loci and epistasis control genetic variation for seed dormancy in weedy rice (*Oryza sativa* L.). Genetics, 2004, 166(3): 1503-1516.
- [45] DONG Y, TSUZUKI E, KAMIUNTEN H, TERAOKA H, LIN D Z, MATSUO M, ZHENG Y F. Identification of quantitative trait loci associated with pre-harvest sprouting resistance in rice (*Oryza sativa* L.). Field Crop Research, 2003, 81(2/3): 133-139.
- [46] CAI H W, MORISHIMA H. Genomic regions affecting seed shattering and seed dormancy in rice. Theoretical and Applied Genetics, 2000, 100(6): 840-846.
- [47] JIANG L, LIU S, HOU M Y, TANG J Y, CHEN L M, ZHAI H Q, WAN J M. Analysis of QTLs for seed low temperature germinability and anoxia germinability in rice (*Oryza sativa* L.). Field Crop Research, 2006, 98(1): 68-75.
- [48] 李玉清, 周雪梅, 姜国辉, 苏瑛, 于东洋. 含镉水灌溉对水稻产量

- 和品质的影响. 灌溉排水学报, 2012, 31(4): 120-123.
- LI Y Q, ZHOU X M, JIANG G H, SU Y, YU D Y. Influence of irrigation with different concentrations of cadmium solution on rice yield and quality. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2012, 31(4): 120-123. (in Chinese)
- [49] 陈江民, 杨永杰, 黄奇娜, 胡培松, 唐绍清, 吴立群, 王建龙, 邵国胜. 持续淹水对水稻镉吸收的影响及其调控机理. 中国农业科学, 2017, 50(17): 3300-3310.
- CHEN J M, YANG Y J, HUANG Q N, HU P S, TANG S Q, WU L Q, WANG J L, SHAO G S. Effects of continuous flooding on cadmium absorption and its regulation mechanisms in rice. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(17): 3300-3310. (in Chinese)
- [50] 刘仲齐, 张长波, 黄永春. 水稻各器官镉阻控功能的研究进展. 农业环境科学学报, 2019, 38(4): 721-727.
- LIU Z Q, ZHANG C B, HUANG Y C. Research advance on the functions of rice organs in cadmium inhibition: A review. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(4): 721-727. (in Chinese)
- [51] ADIL M F, SEHAR S, CHEN G, CHEN Z H, JILANI G, CHAUDHRY A N, SHAMSI I H. Cadmium-zinc cross-talk delineates toxicity tolerance in rice via differential genes expression and physiological/ultrastructural adjustments. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 190(110076): 1-12.
- [52] TIAN S, LIANG S, QIAO K, WANG F, ZHANG Y, CHAI T. Co-expression of multiple heavy metal transporters changes the translocation, accumulation, and potential oxidative stress of Cd and Zn in rice (*Oryza sativa*). *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 380(120853): 1-8.
- [53] TREESUBSUNTORN C, THIRAVETYAN P. Calcium acetate-induced reduction of cadmium accumulation in *Oryza sativa*: Expression of auto-inhibited calcium-ATPase and cadmium transporters. *Plant Biology*, 2019, 1: 862-872.
- [54] XU D, YANG Q, CUI M, ZHANG Q. The novel transcriptional factor HP1BP3 negatively regulates *Hsp70* transcription in *Crassostrea hongkongensis*. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 1401-1404.
- [55] MARESCA V, LETTIERI G, SORBO S, PISCOPO M, BASILE A. Biological responses to cadmium stress in liverwort *Conocephalum conicum* (Marchantiales). *International Journal of Molecular Sciences*, 2020, 21(18): 6485.

(责任编辑 李莉)