

刘坤伦, 刘光明, 陈越, 等. 江苏省杂草稻和栽培稻稻米品质差异特征[J]. 江苏农业学报, 2025, 41(2): 221-230.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2025.02.002

江苏省杂草稻和栽培稻稻米品质差异特征

刘坤伦, 刘光明, 陈越, 咸云宇, 王维领, 霍中洋, 赵灿

(江苏省作物遗传生理重点实验室/江苏省作物栽培生理重点实验室/扬州大学农学院/江苏省粮食作物现代产业技术协同创新中心, 江苏扬州 225009)

摘要: 杂草稻(*Oryza sativa f. spontanea*)和栽培稻(*Oryza sativa* L.)同属于稻属,但是前者对后者的危害越来越大,杂草稻已经成为全球稻田三大恶性杂草之一。然而,关于杂草稻与栽培稻稻米品质差异特性的研究较少。为此,我们以采自江苏省的16份杂草稻和12份栽培稻为试验材料,比较杂草稻与栽培稻稻米品质的差异性,测定了加工品质、外观品质、营养品质、蒸煮食味品质、质构特性和糊化特性。结果表明,与常规籼稻、常规粳稻和杂交稻相比,杂草稻直链淀粉含量分别显著提高52.5%、84.3%、42.0% ($P < 0.05$),蛋白质含量分别显著提高57.5%、38.8%、76.3% ($P < 0.05$),食味值分别显著降低59.5%、58.5%、50.5% ($P < 0.05$)。杂草稻米饭质构特性变异幅度较大,且硬度和弹性较大。除峰值时间和成糊温度的变异系数较小外,杂草稻米粉其他糊化特性指标的变异系数较大,为21.25%~60.10%。相关性分析结果表明,食味值与整精米率、粒长、长宽比、峰值黏度、崩解值呈显著或极显著正相关,与垩白粒率、垩白度、直链淀粉含量、蛋白质含量、硬度、弹性、黏度、均衡值、消减值呈显著或极显著负相关。硬度与崩解值呈极显著负相关,而与消减值呈极显著正相关。可见,江苏省杂草稻稻米品质性状变异丰富,食味品质较差,但营养品质较高,拥有较大的潜在利用价值,可为蛋白质含量高的优质水稻种质资源的培育提供理论依据。

关键词: 杂草稻;栽培稻;稻米品质;质构特性;糊化特性

中图分类号: S511 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2025)02-0221-10

Differential characteristics of rice grain quality between weedy rice and cultivated rice in Jiangsu province

LIU Kunlun, LIU Guangming, CHEN Yue, XIAN Yunyu, WANG Weiling, HUO Zhongyang, ZHAO Can
(*Jiangsu Key Laboratory of Crop Genetics and Physiology/Jiangsu Key Laboratory of Crop Cultivation and Physiology/Agricultural College of Yangzhou University/Jiangsu Co-Innovation Center for Modern Production Technology of Grain Crops, Yangzhou 225009, China*)

Abstract: Weedy rice (*Oryza sativa f. spontanea*) and cultivated rice (*Oryza sativa* L.) belong to the genus *Oryza*, but the former is more and more harmful to the latter, and has become one of the three malignant weeds in rice fields around the world. However, there are few studies on the quality differences between weedy rice and cultivated rice. Therefore, we

收稿日期: 2024-01-15

基金项目: 江苏省碳达峰碳中和科技创新专项(BE2022424);江苏省农业科技自主创新基金项目[CX(24)2008, CX(22)1001];江苏省重点研发计划项目(BE2020319, BE2021336, BE2019377);国家水稻产业技术体系项目(CARS-01-28);扬州大学创新培育基金项目(135030250);江苏高校优势学科建设工程项目

作者简介: 刘坤伦(2000-),男,安徽宿州人,硕士,主要从事水稻优质高产栽培及生理研究。(E-mail) 1969579614@qq.com

通讯作者: 赵灿, (E-mail) canzhao@yzu.edu.cn

used 16 weedy rice experimental materials and 12 cultivated rice experimental materials collected from Jiangsu province to compare the quality differences between weedy rice and cultivated rice, and determined the processing quality, appearance quality, nutritional quality, cooking and eating quality, texture characteristics and pasting properties. The results showed that compared with conventional *indica* rice, conventional *japonica* rice and hybrid rice, the amylose content of weedy rice increased

significantly by 52.5%, 84.3% and 42.0% respectively ($P < 0.05$), the protein content increased significantly by 57.5%, 38.8% and 76.3% respectively ($P < 0.05$), and the taste value decreased significantly by 59.5%, 58.5% and 50.5% respectively ($P < 0.05$). The texture characteristics of weedy rice varied greatly, and the hardness and elasticity were higher. In addition to peak time and pasting temperature, the coefficients of variation of other pasting characteristics of weedy rice ranged from 21.25% to 60.10%. The results of correlation analysis indicated that the taste value was significantly or extremely significantly positively correlated with head rice rate, grain length, length-width ratio, peak viscosity and disintegration value, and significantly or extremely significantly negatively correlated with chalky grain rate, chalkiness, amylose content, protein content, hardness, elasticity, viscosity, equilibrium value and setback value. Hardness was significantly negatively correlated with disintegration value, but was significantly positively correlated with setback value. It can be seen that the quality traits of weedy rice in Jiangsu province are rich in variation, the eating quality is poor, but the nutritional quality is high, and it has great potential utilization value, which can provide a theoretical basis for the cultivation of high-quality rice germplasm resources with high protein content.

Key words: *Oryza sativa* f. *spontanea*; *Oryza sativa* L.; grain quality; texture properties; pasting properties

杂草稻(*Oryza sativa* f. *spontanea*)通常比伴生水稻早发芽、早分蘖、早抽穗、早成熟,而且落粒性强^[1]。Song 等^[2]认为杂草稻在竞争生长资源上比栽培稻更有优势,从而影响栽培稻的产量和品质。但杂草稻也被认为是一种有用的种质资源,因为杂草稻已经成功适应了自然生长环境。早期研究结果揭示了杂草稻和粳稻品种之间的相容性^[3],它们都属于 AA 基因型,不存在生殖隔离,是栽培稻的一级基因源,通过杂交能选育出具有优良性状的个体^[4]。李茂柏等^[5]通过对杂草稻和栽培稻进行耐老化处理,发现杂草稻含有相当优良的耐储藏特性。魏毅等^[6]发现杂草稻含有丰富的维生素 B₂ 以及铁(Fe)、硒(Se)、锗(Ge)等微量元素。同时,杂草稻在耐冷性、耐盐性、耐旱性和发芽特性方面也具有许多优良基因^[7-8]。这表明杂草稻可作为改良栽培稻品种和开发特种功能稻的遗传资源。因此,对杂草稻资源进行收集、筛选和鉴定,并深入研究其优异的遗传特性,对培育优质、多抗的新品种具有重要意义。

水稻是中国的主要粮食作物,超过 60% 人口以稻米为主食。近年来,随着人民生活水平的提高,人们对稻米品质的要求也越来越高,因此优质稻米正逐渐成为消费者和稻米市场的首选^[9]。当前,国内外对稻米品质的评价指标主要集中在加工、外观、营养和蒸煮食味 4 个方面,其中食味指标最为重要^[10-11],因此改良食味品质已成为水稻育种的重要目标。在实际生产中,收割栽培稻时,杂草稻也会随之被一同收获,影响了正常大米的销售,甚至产生了一系列纠纷,严重损害了稻农的利益。因此,研究二者稻米品质的差异具有重要意义。杂草稻稻米的蒸

煮品质和营养品质均存在较大变异性^[12-13],而且与栽培稻相比,杂草稻的蛋白质含量较高^[14]。前人对栽培稻稻米品质做了大量研究。孙兴荣等^[15]发现不同基因型水稻品种间的稻米品质差异明显。阮新民等^[16]认为未来品质育种的关键在于降低垩白粒率和垩白度,维持中等直链淀粉含量,并提升整精米率。龚金龙等^[17]通过比较籼稻和粳稻的主要稻米品质指标,发现粳稻具有低垩白率、低蛋白质含量、高黏度淀粉含量等特性,为“籼转粳”的实现提供了理论依据。有关杂草稻对栽培稻产量和品质的影响已有较多报道,而有关杂草稻和栽培稻稻米品质差异的研究较少。为了全面了解江苏省杂草稻稻米品质特性,进一步明确杂草稻与栽培稻在稻米品质上的差异,本研究拟对 16 个杂草稻和 12 个栽培稻的加工品质、外观品质、营养品质、质构特性、蒸煮食味品质和糊化特性等方面进行比较分析,以期为进一步防治和综合利用杂草稻提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试的 16 份杂草稻样本采集于江苏省各市(表 1),试验材料编号为 RRL01~RRL16,其伴生水稻品种均为江苏省大面积种植的主推品种,均为单株采集,供试杂草稻在试验过程中均未发现性状分离。12 个供试栽培稻品种包括 4 个常规粳稻(南粳 46、南粳 9108、宁粳 7 号、南粳 0212)、4 个常规籼稻(扬稻 6 号、黄华占、美香占 2 号、象牙香占)、4 个杂交稻(甬优 2640、甬优 1540、野香优莉丝、丰优香占)。

表 1 供试杂草稻的信息

Table 1 Information of weedy rice used in this study

试验材料 编号	采集地	经纬度	抽穗时间 (年-月-日)
RRL01	淮安市洪泽区	119°38'E,33°10'N	2020-08-19
RRL02	扬州市仪征市	119°37'E,32°28'N	2020-08-17
RRL03	镇江市丹阳市	119°41'E,31°56'N	2020-08-19
RRL04	宿迁市宿城区	118°16'E,33°58'N	2020-08-18
RRL05	常州市武进区	119°42'E,31°26'N	2020-08-21
RRL06	淮安市涟水县	119°11'E,33°50'N	2020-08-17
RRL07	淮安市淮阴区	119°07'E,34°21'N	2020-08-16
RRL08	无锡市滨湖区	120°12'E,31°41'N	2020-08-21
RRL09	扬州市江都区	119°27'E,32°34'N	2020-08-20
RRL10	苏州市吴中区	120°06'E,31°03'N	2020-08-22
RRL11	徐州市鼓楼区	117°11'E,34°15'N	2020-08-15
RRL12	扬州市高邮市	119°14'E,32°27'N	2020-08-21
RRL13	南京市溧水区	118°22'E,31°14'N	2020-08-19
RRL14	盐城市建湖县	120°05'E,33°49'N	2020-08-17
RRL15	南通市如东县	120°08'E,32°01'N	2020-08-19
RRL16	淮安市淮安区	119°13'E,34°36'N	2020-08-21

1.2 试验设计

本试验于 2020 年在扬州大学沙头试验基地 (32°19'N, 119°31'E) 进行, 土壤类型为潜育型水稻土, 黏性质地。0~20 cm 土层的有机质含量为 31.72 g/kg, 全氮含量为 1.96 g/kg, 速效钾含量为 165.26 mg/kg, 速效磷含量为 62.54 mg/kg。每份试验材料设置 3 个重复, 小区面积 4 m×3 m, 栽插密度为每穴 2 苗, 行株距为 30 cm×14 cm。磷肥(施用量为 650 kg/hm²)和钾肥(施用量为 300 kg/hm²) 在移栽前作基肥一次性施用, 尿素(含氮量 46%) 按基肥: 分蘖肥: 穗肥=4:3:3 施用。施用五氟磺草胺和氰氟草酯进行杂草防除。其他措施和田间管理按常规栽培要求实施。

1.3 试验方法

1.3.1 稻米品质测定 按照 Zhao 等^[18] 的方法测定杂草稻和栽培稻的稻米品质相关指标, 包括加工品质指标(糙米率、精米率、整精米率)、外观品质指标(粒长、粒宽、长宽比、垩白粒率、垩白度)、营养品质指标和蒸煮食味品质指标(蛋白质含量、食味值、直链淀粉含量、胶稠度)。

1.3.2 质构特性测定 采用英国 Stable Micro Systems 公司生产的 TA-XT2i 质构仪进行质构分析。

通过探头 2 次挤压米饭, 获得压力-位移曲线, 根据曲线计算米饭的硬度、黏度、弹性和均衡值等质构参数。采用 Measure force in compression 测试模式, 将 3 粒米饭呈环形摆放, 用 P/75 圆盘挤压探头, 压缩程度 70%, 压缩速率 0.5 mm/s, 测试速率 30 mm/min, 触发力 5 g, 感应元量程 500 N, 上升高度 10 mm^[19]。

1.3.3 糊化特性测定 采用 Zhao 等^[18] 的方法测定糊化特性相关指标, 主要包括峰值黏度、热浆黏度、崩解值、最终黏度、消减值、峰值时间、成糊温度和回复值。

1.4 数据分析

采用 Microsoft Excel 2019 进行数据统计, 采用 SPSS 23.0 软件进行数据方差分析, 采用 Origin 2021 作图。

2 结果与分析

2.1 杂草稻稻米加工品质

表 2 显示, 杂草稻糙米率的变化幅度为 77.23%~82.27%, 平均值为 79.68%, 糙米率在 82.00% 以上的试验材料有 1 份, 编号为 RRL05, 糙米率为 82.27%。RRL10 的精米率最小, 为 62.33%; RRL15 的精米率最大, 为 73.34%。所有试验材料精米率的平均值为 68.24%, 多数试验材料的精米率在 68.00% 以上, 占 62.5%。精米率在 72.00% 以上的试验材料有 2 份, 编号分别为 RRL05 (精米率为 72.23%) 和 RRL15 (精米率为 73.34%)。整精米率的变化幅度为 38.06%~64.44%, 平均值为 55.04%, 其中整精米率在 60.00% 以上的试验材料有 5 份, 编号分别为 RRL01 (整精米率为 60.30%)、RRL07 (整精米率为 61.96%)、RRL11 (整精米率为 62.59%)、RRL13 (整精米率为 64.44%) 和 RRL15 (整精米率为 60.48%)。杂草稻糙米率和精米率的变异系数较小, 分别为 1.58% 和 4.29%, 而整精米率变异系数较大, 达到 13.06%。

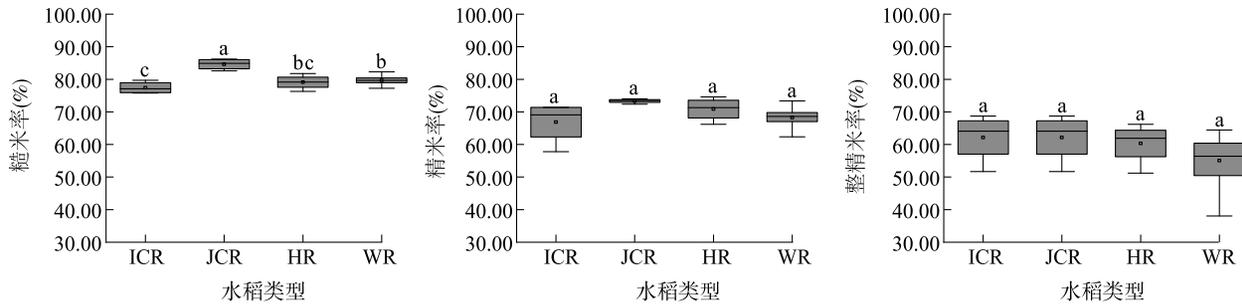
表 2 杂草稻的加工品质指标

Table 2 Processing quality indices of weedy rice

指标	最小值	最大值	标准差	平均值
糙米率(%)	77.23	82.27	1.26	79.68
精米率(%)	62.33	73.34	2.93	68.24
整精米率(%)	38.06	64.44	7.19	55.04

图 1 显示,常规籼稻的糙米率和精米率最高,分别为 84.64% 和 73.34%,糙米率比杂草稻高 6.22%。杂草稻糙米率高于栽培稻糙米率平均值的试验材料仅有 5 份,占杂草稻的 31.25%;而杂草稻精米率高于栽培稻精米率平均值的试验材料有 4 份,占杂草稻的 25.00%。说明栽培稻的加工品质

相对稳定,而杂草稻耐碾磨性差。从整精米率来看,常规籼稻的整精米率最高,达 62.18%。杂草稻的整精米率高于栽培稻整精米率平均值的试验材料有 5 份,占杂草稻的 31.25%。参试的 16 份杂草稻试验材料中,RRL04、RRL14 和 RRL15 的加工品质较好,可作为重点材料加以挖掘和利用。



ICR: 常规籼稻; JCR: 常规粳稻; HR: 杂交稻; WR: 杂草稻。图中不同小写字母表示不同水稻类型间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 1 常规籼稻、常规粳稻、杂交稻、杂草稻加工品质比较

Fig.1 Comparison of processing quality of conventional *indica* rice, conventional *japonica* rice, hybrid rice and weedy rice

2.2 杂草稻稻米外观品质

表 3 显示,杂草稻稻米的粒长和粒宽分别为 4.95~6.19 mm 和 2.28~2.88 mm,变异幅度较小,变异系数分别为 5.41% 和 5.57%。杂草稻稻米的长宽比为 1.86~2.60,变异系数为 7.97%,长宽比平均值为 2.15。有 7 份杂草稻试验材料的稻米长宽比高于所有杂草稻长宽比的平均值,占杂草稻的 43.75%。杂草稻稻米垩白粒率变化范围为 5.40%~76.05%,平均值为 29.36%,变异系数达到 57.91%,变异幅度大。其中,有 1 份试验材料(RRL15)的稻米垩白粒率在 15.00% 以下,为 5.40%,米粒外观较好,占杂草稻的 6.25%;有 15 份试验材料的稻米垩白粒率在 20.00% 以上,外观较差。杂草稻稻米垩白度为 1.12%~27.00%,平均值为 9.44%,变异系数大,达到 63.36%。垩白度低于 5.00% 的试验材料有 2 份,分别为 RRL06 (4.80%) 和 RRL15 (1.12%)。参试杂草稻中有 14 份试验材料的稻米垩白度低于 15.00%,籽粒外观好,占比为 87.50%,其余试验材料的稻米垩白度大,外观品质差。

图 2 显示,杂草稻稻米粒长和长宽比显著低于常规籼稻和杂交稻,高于常规粳稻。杂草稻稻米粒宽高于常规籼稻和杂交稻,但低于常规粳稻。常规籼稻、常规粳稻、杂交稻和杂草稻稻米的垩白粒率、垩白度变异幅度均较小,差异不显著。常规籼稻、常规粳稻

和杂交稻的稻米垩白粒率和垩白度平均值分别为 18.02% 和 4.58%。杂草稻稻米垩白粒率高于 18.02% 的试验材料有 13 份,占杂草稻的 81.25%;而垩白度高于 4.58% 的试验材料有 15 份,占杂草稻的 93.75%。上述结果表明杂草稻高垩白粒率和高垩白度导致了其外观品质较差,但垩白粒率和垩白度变异幅度大,其中 RRL06 和 RRL15 外观品质较好。

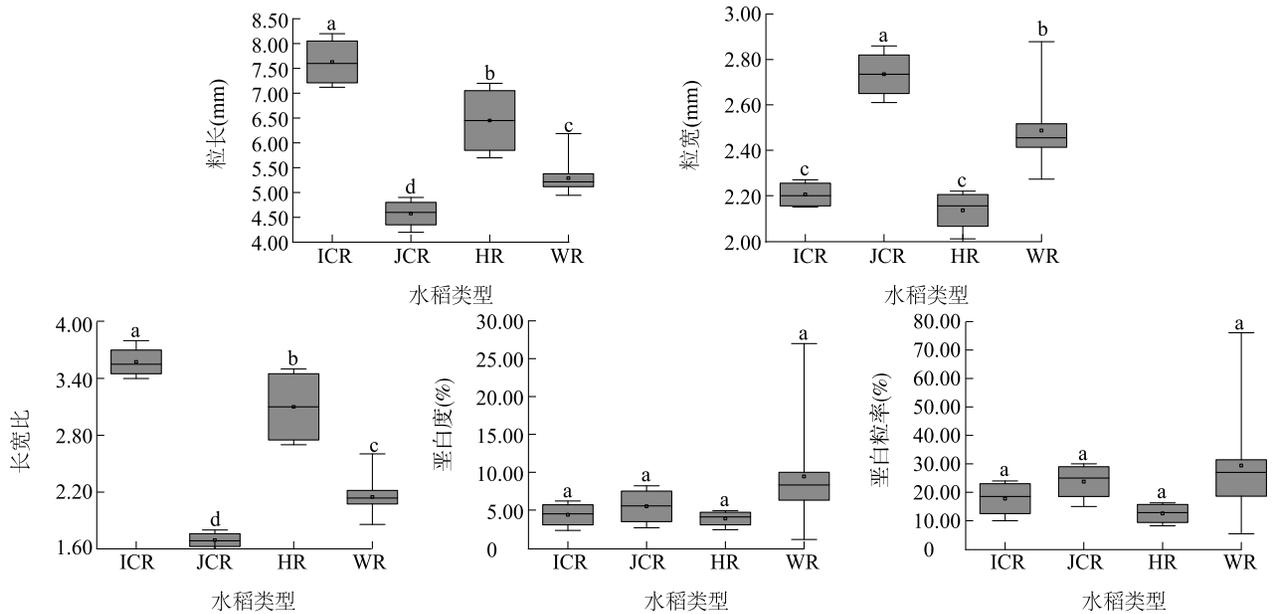
表 3 杂草稻稻米的外观品质指标

Table 3 Appearance quality indices of weedy rice

指标	最小值	最大值	标准差	平均值
粒长 (mm)	4.95	6.19	0.29	5.29
粒宽 (mm)	2.28	2.88	0.14	2.49
长宽比	1.86	2.60	0.17	2.15
垩白粒率 (%)	5.40	76.05	17.01	29.36
垩白度 (%)	1.12	27.00	5.98	9.44

2.3 杂草稻稻米的营养品质和蒸煮食味品质

表 4 显示,杂草稻稻米直链淀粉含量为 16.52%~30.35%,平均值为 25.66%,变异系数为 16.09%。直链淀粉含量最低和最高的试验材料分别是 RRL15 和 RRL03。其中,有 12 份试验材料稻米的直链淀粉含量高于 25.66%,占杂草稻的 75.00%。蛋白质含量最低为 9.77% (RRL13),最高为 12.41% (RRL03),平均值为 10.58%,变异系数为



ICR:常规籼稻;JCR:常规粳稻;HR:杂交稻;WR:杂草稻。图中不同小写字母表示不同水稻类型间差异显著($P < 0.05$)。

图2 常规籼稻、常规粳稻、杂交稻、杂草稻外观品质比较

Fig.2 Comparison of appearance quality of conventional *indica* rice, conventional *japonica* rice, hybrid rice and weedy rice

6.74%。其中,蛋白质含量高于10.58%的试验材料有7份,占杂草稻的43.75%;蛋白质含量为9.00%~10.58%的试验材料有9份,占杂草稻的56.25%。胶稠度为31.33~86.67 mm,变异系数达到27.76%。有13份试验材料的胶稠度在50.00 mm以上,占杂草稻的81.25%。食味值的最大值为44.50(RRL15),食味值超过40.00的试验材料有2份(RRL15、RRL16),占杂草稻的12.50%。

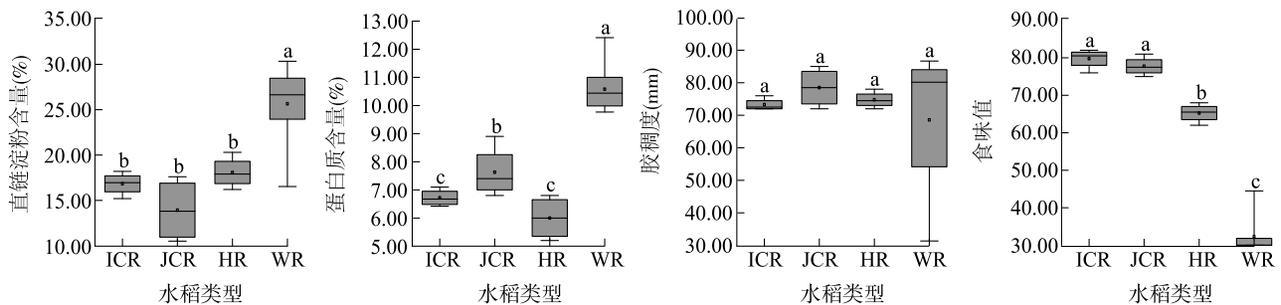
图3显示,与常规籼稻、常规粳稻和杂交稻相比,杂草稻稻米直链淀粉含量分别显著提高52.5%、84.3%、42.0% ($P < 0.05$),蛋白质含量分别显著提高57.5%、38.8%、76.3% ($P < 0.05$),食味值

分别显著降低59.5%、58.5%、50.5% ($P < 0.05$)。胶稠度低于3类栽培稻平均值的杂草稻试验材料有7份,占比43.75%;而杂草稻的食味值均低于3类栽培稻。表明杂草稻营养品质较优,但蒸煮食味品质较差。

表4 杂草稻稻米的营养品质和蒸煮食味品质指标

Table 4 Nutritional quality and cooking and eating quality indices of weedy rice

指标	最小值	最大值	标准差	平均值
直链淀粉含量(%)	16.52	30.35	4.13	25.66
蛋白质含量(%)	9.77	12.41	0.71	10.58
胶稠度(mm)	31.33	86.67	19.04	68.58
食味值	30.00	44.50	4.31	32.30



ICR:常规籼稻;JCR:常规粳稻;HR:杂交稻;WR:杂草稻。图中不同小写字母表示不同水稻类型间差异显著($P < 0.05$)。

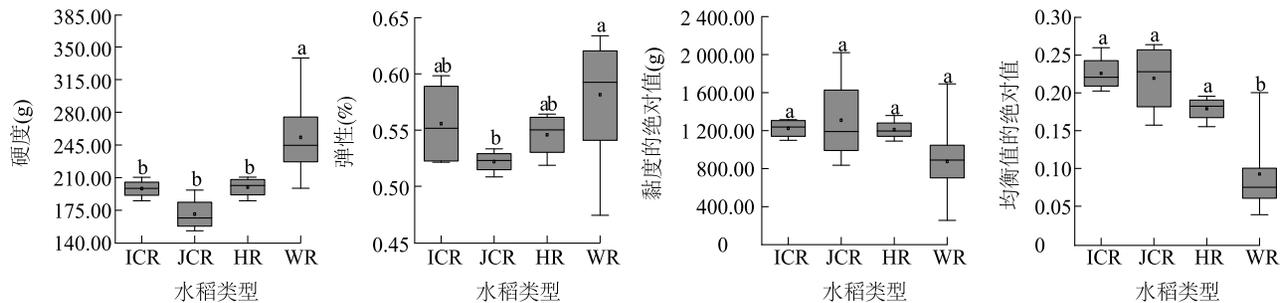
图3 常规籼稻、常规粳稻、杂交稻、杂草稻稻米的营养品质和食味品质比较

Fig.3 Comparison of nutritional quality and eating quality of conventional *indica* rice, conventional *japonica* rice, hybrid rice and weedy rice

2.4 杂草稻米饭的质构特性

表 5 显示,杂草稻米饭硬度为 199.10~338.61 g,变异幅度较大,变异系数为 15.36%,平均值为 253.54 g。有 6 份试验材料的硬度值高于 253.54 g,占杂草稻的 37.50%;硬度值低于 200.00 g 的试验材料有 1 份(RRL07)。杂草稻弹性值为 0.47%~0.63%,变异系数为 8.47%,其中有 8 份试验材料的弹性值高于 0.58%,占杂草稻的 50.00%。杂草稻黏度绝对值为 255.00~1 691.89 g,变异幅度较大,变异系数为 42.07%。黏度的绝对值大于 1 200.00 g 的试验材料有 2 份,分别为 RRL06 和 RRL10。均衡值变异幅度最大,变异系数达 56.41%。其中有 4 份试验材料均衡值的绝对值在 0.09 以上,占杂草稻的 25.00%。

图 4 显示,与常规籼稻、常规粳稻和杂交稻相比,杂草稻米饭的硬度分别显著提高 27.67%、



ICR:常规籼稻;JCR:常规粳稻;HR:杂交稻;WR:杂草稻。图中不同小写字母表示不同水稻类型间差异显著($P < 0.05$)。

图 4 常规籼稻、常规粳稻、杂交稻、杂草稻米饭质构特性比较

Fig.4 Comparison of texture properties of conventional *indica* rice, conventional *japonica* rice, hybrid rice and weedy rice

2.5 杂草稻米粉糊化特性

表 6 显示,峰值时间和成糊温度的变化较小,变异系数分别为 3.92%和 2.73%,其他指标的变异系数较大,为 21.25%~60.10%。其中消减值变异系数最大,其次是回复值、热浆黏度、最终黏度、崩解值、峰值黏度。峰值黏度、热浆黏度、崩解值和最终黏度在平均值以上的试验材料分别有 8 份、8 份、7 份和 8 份,分别占杂草稻的 50.00%、50.00%、43.75%和 50.00%。消减值为 72~1 277 cP,均值为 524 cP,其中有 2 份试验材料消减值在 300 以下,占杂草稻的 12.50%,分别为 RRL03 和 RRL15。成糊温度低于平均值的杂草稻试验材料有 8 份,占比 50.00%。其中 RRL07 和 RRL03 的成糊温度较低,分别为 78.07 °C 和 78.32 °C。

48.02%、26.67%。与常规粳稻相比,杂草稻的弹性显著提高 11.12%。与常规籼稻、常规粳稻和杂交稻相比,杂草稻的均衡值显著降低 60.17%、58.97%、49.71%。杂草稻黏度低于常规籼稻、常规粳稻和杂交稻的黏度平均值的试验材料有 4 份,占杂草稻的 25.00%。所有参试杂草稻试验材料中,米饭质构特性较好的材料是 RRL12。

表 5 杂草稻米饭的质构特性分析

Table 5 Texture characteristics of weedy rice

指标	最小值	最大值	标准差	平均值
硬度(g)	199.10	338.61	38.94	253.54
弹性(%)	0.47	0.63	0.05	0.58
黏度(g)	-1 691.89	-255.00	368.33	-875.58
均衡值	-0.20	-0.04	0.05	-0.09

表 6 杂草稻的米粉糊化特性分析

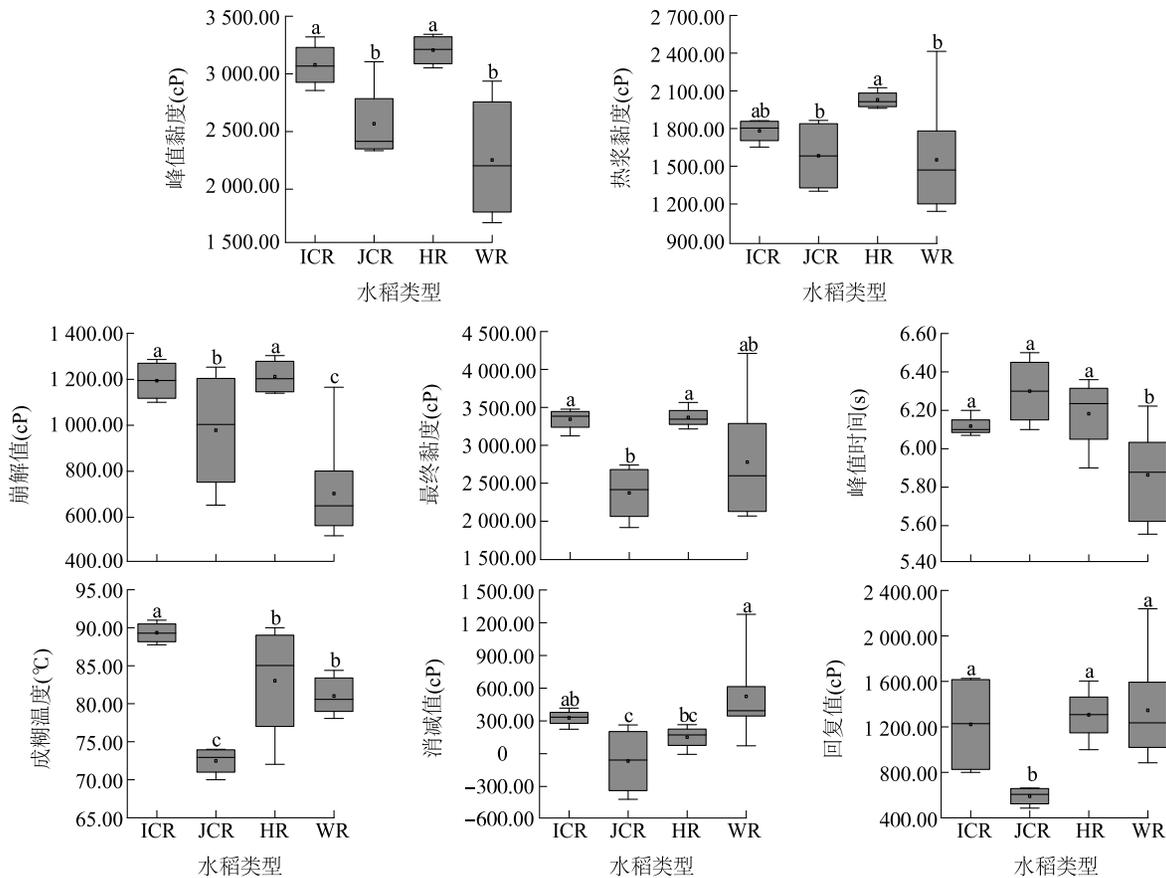
Table 6 Pasting properties of weedy rice flour

指标	最小值	最大值	标准差	平均值
峰值黏度(cP)	1 709.00	2 938.00	479.00	2 253.00
热浆黏度(cP)	1 141.00	2 415.00	406.00	1 550.00
崩解值(cP)	520.00	1 166.00	180.00	703.00
最终黏度(cP)	2 068.00	4 211.00	714.00	2 777.00
消减值(cP)	72.00	1 277.00	315.00	524.00
峰值时间(s)	5.56	6.22	0.23	5.86
成糊温度(°C)	78.07	84.38	2.21	81.01
回复值(cP)	884.00	2 238.00	373.00	1 345.00

图 5 显示,不同类型水稻的米粉糊化特性之间存在明显的差异。杂交稻的峰值黏度、热浆黏度和

崩解值最高,分别比杂草稻高 42.2%、30.8% 和 72.4%。杂草稻的峰值黏度、热浆黏度、崩解值和峰

值时间最低,最终黏度和成糊温度介于常规粳稻和杂交稻之间,而回复值和消减值最高。



ICR: 常规籼稻; JCR: 常规粳稻; HR: 杂交稻; WR: 杂草稻。图中不同小写字母表示不同水稻类型间差异显著 ($P < 0.05$)。

图5 常规籼稻、常规粳稻、杂交稻、杂草稻米粉糊化特性比较

Fig.5 Comparison of pasting properties of conventional *indica* rice, conventional *japonica* rice, hybrid rice and weedy rice

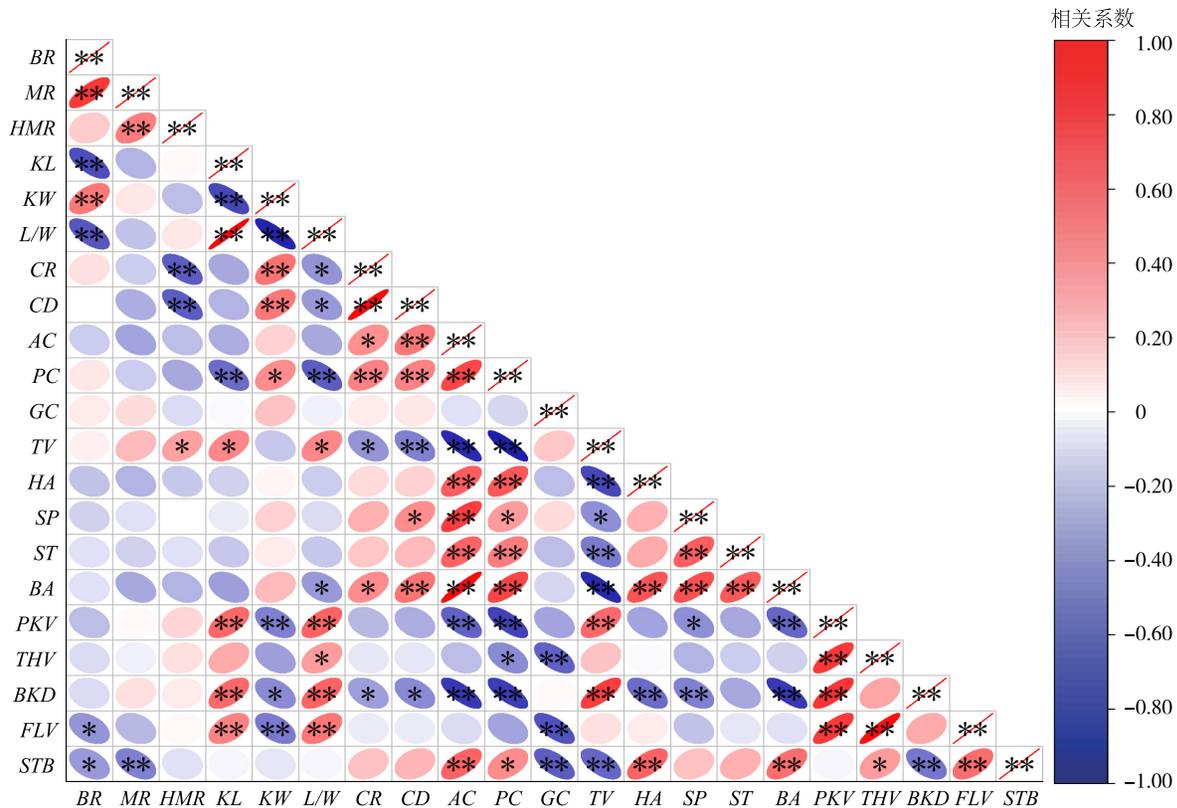
2.6 杂草稻和栽培稻米品质指标间的相关性分析

图6显示,在加工品质中,糙米率与粒长、最终黏度和消减值呈极显著或显著负相关,与粒宽呈极显著正相关;精米率与消减值呈极显著负相关;整精米率与垩白粒率、垩白度呈极显著负相关,与食味值呈显著正相关。在外观品质中,粒长与长宽比、食味值、峰值黏度、崩解值、最终黏度呈显著或极显著正相关,与粒宽和蛋白质含量呈极显著负相关;粒宽与长宽比、峰值黏度、崩解值和最终黏度呈显著或极显著负相关;长宽比与垩白粒率、垩白度、蛋白质含量、均衡值呈显著或极显著负相关,与热浆黏度、最终黏度、食味值、峰值黏度、崩解值呈显著或极显著正相关;垩白粒率和垩白度与直链淀粉含量、蛋白质含量、均衡值呈显著或极显著正相关,与食味值、崩解值呈显著或极显著负相关;垩白度与垩白粒率呈极

显著正相关,与弹性呈显著正相关。在营养品质中,直链淀粉含量与蛋白质含量、硬度、弹性、黏度、均衡值、消减值呈极显著正相关,与食味值、峰值黏度、崩解值呈极显著负相关;蛋白质含量与硬度、弹性、黏度、均衡值、消减值呈显著或极显著正相关,与食味值、峰值黏度、热浆黏度、崩解值呈显著或极显著负相关。在蒸煮食味品质中,胶稠度与热浆黏度、最终黏度、消减值呈极显著负相关;食味值与整精米率、粒长、长宽比、峰值黏度、崩解值呈显著或极显著正相关,与垩白粒率、垩白度、直链淀粉含量、蛋白质含量、硬度、弹性、黏度、均衡值、消减值呈显著或极显著负相关。分析米饭质构特性各参数,弹性与峰值黏度呈显著负相关;除黏度外,质构特性其他参数与崩解值呈极显著负相关,硬度、均衡值与消减值呈极显著正相关。从快速黏度分析仪(RVA)谱特征值

来看,峰值黏度与热浆黏度、崩解值、最终黏度呈极显著正相关;热浆黏度与最终黏度、消减值呈极显著

或显著正相关;消减值与最终黏度呈极显著正相关,与崩解值呈极显著负相关。



BR:糙米率;MR:精米率;HMR:整精米率;KL:粒长;KW:粒宽;L/W:长宽比;CR:垩白粒率;CD:垩白度;AC:直链淀粉含量;PC:蛋白质含量;GC:胶稠度;TV:食味值;HA:硬度;SP:弹性;ST:黏度;BA:均衡值;PKV:峰值黏度;THV:热浆黏度;BKD:崩解值;FLV:最终黏度;STB:消减值。*和**分别表示显著相关($P < 0.05$)和极显著相关($P < 0.01$)。

图6 常规籼稻、常规粳稻、杂交稻、杂草稻稻米品质指标间的相关性分析

Fig.6 Correlation analysis between quality indices of conventional *indica* rice, conventional *japonica* rice, hybrid rice and weedy rice

3 讨论

稻米品质不仅受土壤类型、气候条件、氮素施用的影响,还取决于水稻类型^[20]。杂草稻具有早熟、根系活性强和氮素利用率高等特点^[21-22],本研究指出,江苏省部分地区的杂草稻与栽培稻在稻米品质指标上存在显著差异。就加工品质而言,杂草稻的精米率、整精米率与栽培稻不存在显著差异,这与周勇军等^[14]的研究结果一致。部分杂草稻外观品质相关指标,尤其是垩白粒率和垩白度大于栽培稻,这可能是杂草稻早熟^[21,23],灌浆结实期较短,杂草稻灌浆时环境温度高于栽培稻,较高的环境温度降低了籽粒致密性^[24],使垩白增加,恶化了外观品质。杂草稻粒长和长宽比介于常规粳稻和常规籼稻之间,这与前人研究结果^[14]一致。在营养品质和蒸煮

食味品质方面,我们发现杂草稻的直链淀粉含量和蛋白质含量显著高于栽培稻,胶稠度与栽培稻无显著差异,而食味值显著低于栽培稻。究其原因,可能是杂草稻拥有更强的根系活力^[18],保证了籽粒中碳氮代谢相关酶的活性,促进氮素的吸收、转运和利用,从而提高了籽粒中直链淀粉含量和蛋白质含量。前人研究发现,高直链淀粉含量和蛋白质含量会显著降低稻米食味值^[25],这与本研究结果一致。此外,有关杂草稻和栽培稻米粉蛋白质组分和游离氨基酸含量的差异特性,还有待进一步研究。在质构特性方面,杂草稻的硬度和弹性较高,而黏度和均衡值较低。朱大伟等^[26]发现高蛋白质含量和高直链淀粉含量会导致米饭硬度大、黏度低,质地变差。在RVA谱特征方面,杂草稻的崩解值显著低于栽培稻,消减值较高,热浆黏度较低,表明杂草稻淀粉黏

滞性较差。这可能是因为杂草稻米淀粉颗粒间蛋白质含量高,抑制了淀粉的糊化和膨胀,使淀粉颗粒间空隙变小,降低吸水速率,进而导致黏度降低。同时,直链淀粉含量高会抑制淀粉受热时的膨胀,从而提高了蒸煮时的糊化温度^[27]。总体来看,与栽培稻相比,杂草稻的整精米率较低、硬度大、黏度低、食味差,这可能是因为育种家们为了满足人们的需求,通过人工定向变异选择,不断筛选出整精米率高、外观品质好、食味佳的优质稻米,而杂草稻的品质性状是自然选择的结果。据报道,中国杂草稻均起源于栽培稻,起源方式为独立去驯化起源^[28]。我们推测控制杂草稻米品质性状的相关基因也是通过独立去驯化起源方式形成的,且具有新的遗传效应,杂草稻和栽培稻米品质差异相关分子机制有待进一步研究。

综合分析杂草稻和栽培稻米品质相关指标,并进行相关性分析,结果表明杂草稻和栽培稻各稻米品质指标间存在一定的相关性。其中,加工品质与米饭质构特性关系较为密切,糙米率和精米率越高,米饭弹性和黏度就越差,这与朱大伟等^[26]的研究结果类似。营养品质与外观品质关系密切,蛋白质含量和直链淀粉含量越高,垩白粒率和垩白度就越高,该结果与旷娜等^[29]的研究结果一致。蒸煮食味品质与米饭质构特性关系密切,一般认为,胶稠度大,硬度小,食味越佳,这与本研究结果相符。李刚等^[30]认为米粉糊化特性与外观品质关系最为密切,垩白粒率和垩白度是影响稻米外观品质的重要因素。本研究发现垩白度和垩白粒率越大,崩解值越低。米饭质构特性与黏滞性关系密切,米饭硬度和弹性越大,崩解值就越低,消减值就越大,这是因为直链淀粉在糊化过程中受剪切力作用,导致淀粉颗粒崩解的较少^[31]。本研究结果表明,热浆黏度、峰值黏度与消减值相关性没有达到极显著水平。值得一提的是,本研究发现食味值和直链淀粉含量与米粉糊化特性的关系密切,可能是由淀粉热力学特性和精细结构决定的,相关内在机制有待进一步研究。

随着社会经济的发展和人们生活水平的提高,人们对优质稻米的需求也越来越多样化,功能性稻米逐渐受到人们的重视^[32]。然而杂草稻和栽培稻之间抗性淀粉的含量以及相关营养品质指标的差异性,还有待进一步研究。国际水稻研究所(IRRI)通过杂交方法培育出含铁量比普通水稻高60%的高

产水稻IR164。先正达公司培育出类胡萝卜素含量是普通水稻23倍的新型稻米,为解决贫困地区维生素A的缺乏问题提供了潜在的解决方案。本研究发现江苏省部分地区杂草稻的品质虽然整体较差,但其变异丰富,遗传基础较宽。例如:杂草稻蛋白质含量最高达12.41%,显著高于栽培稻。针对蛋白质含量较高的杂草稻材料,能够加工生产出营养价值高的稻米,对改善贫困地区营养不良状况具有重要意义。而蛋白质含量较低的杂草稻材料,其口感、食味较好,应加大生理特性方面的研究。杂草稻直链淀粉含量最高达30.35%,显著高于栽培稻,在今后的研究中,我们可以有针对性地利用杂草稻直链淀粉含量高这一特点。同时,本研究筛选了一批糊化特性良好的杂草稻试验材料,可供育种利用。可见,杂草稻在稻米品质方面有较大的潜在利用价值。针对具有良好稻米品质的杂草稻试验材料,可通过三种方式加以利用:一是从天然杂草稻试验材料中鉴定出含有特殊稻米品质的水稻资源,结合常规育种技术进行育种和利用;二是转基因方式,即通过基因工程将稻米优异品质的外源基因转入栽培稻基因组,进而获得改良的特殊品质;三是通过现代分子生物学手段,比如分子标记辅助选择,并紧密结合常规育种程序,进行多种有利的功能基因聚合育种。因此,今后需进一步采集杂草稻野生资源,挖掘杂草稻资源中更多的优异品质和优良性状,并结合现代育种技术,培育功能型水稻,来满足社会对不同功能型大米消费的需求。

4 结论

江苏省杂草稻稻米的精米率与栽培稻类似,硬度大,峰值黏度低,崩解值小,食味值低,但是其直链淀粉含量和蛋白质含量显著高于栽培稻。杂草稻稻米的品质性状变异大,可作为丰富的种质资源加以挖掘利用。直链淀粉含量和蛋白质含量高的材料可用于开发特种功能稻,以此来合理利用杂草稻的优异性状,丰富水稻种质资源,为稻米品质改良提供新的思路。

参考文献:

- [1] TANG L, MA D R, XU Z J, et al. Utilization of weedy rice for development of japonica hybrid rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Plant Science, 2011, 180 (5): 733-740.

- [2] SONG D M, MA D R, YANG Q, et al. Effects of weedy rice on yield and quality and micro-ecological environment in cultivated *Japonica* rice population[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2009, 35(5): 914-920.
- [3] OH C S, CHOI Y H, LEE S J, et al. Mapping of quantitative trait loci for cold tolerance in weedy rice[J]. *Breeding Science*, 2004, 54(4): 373-380.
- [4] 马殿荣,王楠,王莹,等. 中国北方杂草稻深覆土条件下出苗动力源分析[J]. *中国水稻科学*, 2008, 22(2): 215-218.
- [5] 李茂柏,王慧,朴钟泽,等. 杂草稻人工老化和耐储藏特性的初步研究[J]. *作物杂志*, 2010(5): 30-33.
- [6] 魏毅,靳西彪,杨海亮,等. 红色色素与微量元素硒之间关系的初步研究[J]. *种子*, 2010, 29(5): 1-4.
- [7] 陈增建,朱立宏. (禾鲁)稻与云南稻地方品种亲缘关系的初步研究[J]. *作物学报*, 1990, 16(3): 219-227, 291.
- [8] 郭俊祥,邹德堂,孙世臣,等. 黑龙江省典型杂草稻杂交后代野生性状的比较分析[J]. *黑龙江农业科学*, 2006(6): 11-13.
- [9] 马会珍,陈心怡,王志杰,等. 中国部分优质粳稻外观及蒸煮食味品质特征比较[J]. *中国农业科学*, 2021, 54(7): 1338-1353.
- [10] 张洪程,张军,龚金龙,等. “籼改粳”的生产优势及其形成机理[J]. *中国农业科学*, 2013, 46(4): 686-704.
- [11] 胡培松,翟虎渠,唐绍清,等. 利用 RVA 快速鉴定稻米蒸煮及食味品质的研究[J]. *作物学报*, 2004, 30(6): 519-524.
- [12] 陈丽,马静,孙建昌. 杂草稻稻米蒸煮品质与营养品质的相关性分析[J]. *宁夏农林科技*, 2018, 59(9): 3-5.
- [13] 陈丽,王兴盛,孙建昌,等. 西北干旱区杂草稻品质性状分析[J]. *西北农业学报*, 2018, 27(12): 1772-1779.
- [14] 周勇军,陆永良,谢晓东,等. 丹东杂草稻与栽培稻的稻米品质分析比较[J]. *中国稻米*, 2012, 18(2): 37-40.
- [15] 孙兴荣,卞景阳,刘琳帅,等. 氮肥施用量对水稻产量及品质的影响[J]. *黑龙江农业科学*, 2019(11): 48-51.
- [16] 阮新民,施伏芝,从夕汉,等. 2009-2019年安徽中籼稻米品质综合评价及关键影响因子分析[J]. *中国农业科技导报*, 2021, 23(5): 108-115.
- [17] 龚金龙,邢志鹏,胡雅杰,等. 籼、粳超级稻主要品质性状和淀粉 RVA 谱特征的差异研究[J]. *核农学报*, 2015, 29(7): 1374-1385.
- [18] ZHAO C, LIU G M, CHEN Y, et al. Excessive nitrogen application leads to lower rice yield and grain quality by inhibiting the grain filling of inferior grains[J]. *Agriculture*, 2022, 12(7): 962.
- [19] 张超,吴焱,魏海燕,等. 半糯性粳稻的淀粉精细结构及其米粉/饭功能特性研究[J]. *中国粮油学报*, 2021, 36(6): 1-7.
- [20] 魏海燕,张洪程,杭杰,等. 不同氮素利用效率基因型水稻氮素积累与转移的特性[J]. *作物学报*, 2008, 34(1): 119-125.
- [21] ZHAO C, XU W R, SONG X L, et al. Early flowering and rapid grain filling determine early maturity and escape from harvesting in weedy rice [J]. *Pest Management Science*, 2018, 74(2): 465-476.
- [22] ZHAO C, XU W R, LI H W, et al. The rapid cytological process of grain determines early maturity in weedy rice [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2021, 12: 711321.
- [23] ZHAO C, XU W R, MENG L C, et al. Rapid endosperm development promotes early maturity in weedy rice (*Oryza sativa* f. *spontanea*) [J]. *Weed Science*, 2020, 68(2): 168-178.
- [24] 王夫玉,张洪程,赵新华,等. 温光对水稻籽粒充实度的影响[J]. *中国农业科学*, 2001, 34(4): 396-402.
- [25] 郭亚丽,李芳,洪媛,等. 大米理化成分与米饭品质的相关性研究[J]. *武汉轻工大学学报*, 2015, 34(3): 1-6.
- [26] 朱大伟,李敏,郭保卫,等. 氮肥水平对优质粳稻蒸煮食味品质与质构特性的影响[J]. *贵州农业科学*, 2018, 46(3): 62-66.
- [27] 唐健,唐闯,郭保卫,等. 氮肥施用量对机插优质晚稻产量和稻米品质的影响[J]. *作物学报*, 2020, 46(1): 117-130.
- [28] QIU J, ZHOU Y J, MAO L F, et al. Genomic variation associated with local adaptation of weedy rice during de-domestication [J]. *Nature Communications*, 2017. DOI: 10.1038/ncomms15323.
- [29] 旷娜,唐启源,郑华斌,等. 再生季稻米蛋白质含量与外观、加工品质及营养品质的关系[J]. *中国粮油学报*, 2021, 36(5): 1-7.
- [30] 李刚,邓其明,李双成,等. 稻米淀粉 RVA 谱特征与品质性状的相关性[J]. *中国水稻科学*, 2009, 23(1): 99-102.
- [31] 谢新华,李晓方,肖昕,等. 稻米淀粉黏滞性和质构性研究[J]. *中国粮油学报*, 2007, 22(3): 9-11, 20.
- [32] 刘仲华,李来平,曾海燕,等. 国内外功能性稻米研究进展[J]. *广东微量元素科学*, 2010, 17(12): 13-20.

(责任编辑:王妮)