

粳稻龙锦1号/香软米1578杂交组合 F₅家系群糙米总花色苷含量变异及相关性分析

孙明茂¹, 韩龙植²

(¹潍坊科技学院生物工程研发中心, 山东寿光 262700; ²中国农业科学院作物科学研究所/农作物基因资源
与基因改良国家重大科学工程/农业部作物种质资源与生物技术重点开放实验室, 北京 100081)

摘要:随着环境污染加剧和人们对自身健康关注度的提高,功能性食品在全球范围内蓬勃发展。彩色稻米作为稻米家族中的一员,由于富含微量元素、花色苷、生物碱等功能性成分,已成为当前功能性食品研究开发的热点之一。本研究利用粳稻品种龙锦1号/香软米1578杂交组合214个F₅家系,对水稻糙米总花色苷含量、粒色等级和千粒重的变异及其相关性进行了分析。糙米粒色等级变异范围为1~9,平均值为4.98,变异系数为57.87%;糙米总花色苷含量变异范围为0~5459.34 mg/kg,平均值为834.47 mg/kg,变异系数为191.96%;糙米千粒重变异范围为11.96~26.24 g,平均值为17.75 g,变异系数为12.89%。糙米总花色苷含量、粒色等级和千粒重在F₅家系中不符合正态分布,表现为右偏态,其中糙米总花色苷含量的偏斜程度最大。糙米总花色苷含量和千粒重的峰度系数为正值,表明为尖顶峰;而糙米粒色等级的峰度系数为负值,表明为平顶峰。糙米总花色苷含量与粒色等级呈极显著正相关,相关系数为0.69;糙米总花色苷含量、粒色等级均与千粒重呈极显著负相关,相关系数分别为-0.20和-0.34。与高亲龙锦1号相比,27个家系的糙米总花色苷含量极显著提高,占214个F₅家系的12.62%,为高花色苷水稻种质创新奠定了基础。

关键词:糙米总花色苷含量;糙米粒色等级;糙米千粒重;高花色苷水稻;种质创新

Variation and Correlation Analyses of Total Anthocyanin Content of Brown Rice (*Oryza sativa*) in F₅ Lines from *japonica* Rice Cross Longjin 1/Xiangruanmi 1578

SUN Ming-mao¹, HAN Long-zhi²

(¹Biological Engineering Research and Development Center, Weifang University of Science and Technology, Shouguang Shandong 262700; ²Institute of Crop Science, Chinese Academy of Agricultural Sciences/National Key Facility for Crop Gene Resources and Genetic Improvement/Key Laboratory of Crop Germplasm Resources and Biotechnology, Ministry of Agriculture, Beijing 100081)

Abstract: With increasing environmental pollution and attention to people's health, functional foods become popular in the world. As a member of rice family, pigmented rice is rich in trace elements, anthocyanins, alkaloids and other functional ingredients, which has become one of the hotspots of functional food research and development. In this study, 214 F₅ lines that derived from *japonica* rice cross Longjin 1/Xiangruanmi 1578 were employed. The variation and correlation analyses among total anthocyanin content, grain color grade and thousand grain weight of brown rice for 214 F₅ lines were conducted. Grain color grade of brown rice ranged from 1 to 9, mean was 4.98 and the coefficient of variation was 57.87%. Total anthocyanin content of brown rice ranged from 0 to 5459.34 mg/kg with mean of 834.47 mg/kg, and the coefficient of variation was 191.96%. Thousand grain weight of brown rice

收稿日期:2016-07-29 修回日期:2016-09-14 网络出版日期:2017-02-17

URL: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.4996.S.20170217.1406.018.html>

基金项目:国家重点研发计划课题(2016YFD0100101);国家科技支撑计划课题(2013BAD01B02-2,2013BAD01B0101-2,2015BAD01B01-1);中国农业科学院科技创新工程;国家农作物种质资源保护项目(2016NWB036-01,2016NWB036-12-2);国家农作物种质资源平台(NICGR2016-001)

第一作者主要从事水稻功能性成分、食味品质、优异性状的功能基因及种质创新研究。E-mail:smm-7015@163.com

通信作者:韩龙植,主要从事水稻新基因发掘与种质创新利用研究。E-mail:hanlongzhi@caas.cn

ranged from 11.96 g to 26.24 g with mean of 17.75 g, and the coefficient of variation was 12.89%. The total anthocyanin content, grain color grade and thousand grain weight of brown rice did not follow a normal distribution pattern but a right skewed distribution, among which total anthocyanin content of brown rice showed the largest skew degree. The kurtosis coefficients of total anthocyanin content and thousand grain weight of brown rice were positive, indicating a sharp peak. However, the kurtosis coefficient of grain color grade of brown rice was negative, indicating a flat peak. The total anthocyanin content of brown rice was extremely significant positive correlated with grain color grade of brown rice, and the correlation coefficient was 0.69. The total anthocyanin content and grain color grade of brown rice were extremely significant negative correlated with thousand grain weight of brown rice, and correlation coefficients were -0.20 and -0.34, respectively. Compared with Longjin 1, the total anthocyanin content of brown rice for 27 lines increased extremely significant, accounting for 12.62% of 214 F₅ lines. This study lays the foundation for germplasm innovation of high anthocyanin rice.

Key words: total anthocyanin content of brown rice; grain color grade of brown rice; thousand grain weight of brown rice; high anthocyanin rice; germplasm innovation

彩色稻米是指黑米、紫米、黑褐米、红黑米、红米、红褐米、褐米、浅褐米等,其中黑米和红米占多数,是花色苷在水稻果皮中积累所致。彩色稻米除含有普通稻米所具有的一般成分外,还富含花色苷、微量元素、胡萝卜素、甾醇、木酚素和强心甙等成分,是具有特殊功能成分的特种稻种质资源^[1]。彩色稻米的生物学作用主要包括抗氧化^[2-7]、降血脂^[8]、降胆固醇^[9]、改善冠心病^[10]及白血病症状^[11]、抗肿瘤作用^[12-14],其中起作用的关键成分是花色苷。黑米花色苷能降低氧化低密度脂蛋白对细胞增殖的抑制,明显减轻对内皮细胞形态的损伤,是黑米抗氧化作用的主要物质基础;高血脂患者服用黑米花色苷提取物胶囊后,血清甘油三酯平均下降 16.30% ± 9.32%,血清总胆固醇平均下降 10.27% ± 4.14%,总有效率为 60.78%;黑米花色苷通过抑制胰脂肪酶活力、降低胆固醇溶解度以及减少胆固醇的摄取起到抑制胆固醇吸收的作用;作为药物治疗的一种辅助措施,膳食补充黑米皮特别是花色苷物质可以降低与心血管疾病相关的危险因素;黑米花色苷可能通过阻断 HER-2/neu 和下游 EGFR/Ras/MAPK 信号通路从而抑制肿瘤细胞促血管生成因子的表达;黑米花色苷能够明显抑制白血病 HL-60 细胞增殖,有效诱导 HL-60 细胞凋亡。

水稻作为主要粮食作物,在国内外消费量巨大,若子粒花色苷含量丰富,将对人类健康的改善产生积极影响。剖析水稻子粒花色苷含量的遗传变异规律,对高花色苷水稻育种意义重大。水稻子粒花色苷含量变异及相关性分析,至今已有不少报道。S. Z. Park 等^[15]对 326 份水稻种质的矢车菊素-3-O-

葡萄糖苷含量进行了分析;S. N. Ryu 等^[16]对 591 份水稻品种的矢车菊素-3-O-葡萄糖苷和芍药素-3-O-葡萄糖苷含量进行了分析;黄莹莹^[17]分析了红香 1 号/松 98-131 200 个 F_{2,3}家系的总花色苷含量与矿物质含量、蛋白质含量及农艺性状之间的相关关系。前人对水稻子粒花色苷含量的研究,主要集中在花色苷组成成分及不同水稻品种花色苷含量变异研究,但目前尚缺乏对黑米/白米杂交后代群体的花色苷含量变异的详细研究。本文分析了粳稻品种龙锦 1 号/香软米 1578 杂交组合 F₅家系群糙米总花色苷含量的变异规律及其相关性,将为高花色苷水稻育种提供重要参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料和田间种植

把粳稻品种龙锦 1 号与香软米 1578 配制杂交组合,经加代繁殖,获得 214 个 F₅家系。母本龙锦 1 号的子粒种皮呈黑色,属黑米品种,父本香软米 1578 的子粒种皮呈无色,属一般稻米品种。试验在潍坊科技学院北洛基地水稻试验田进行,试验地肥力均匀,采用大田旱直播。2015 年 6 月 1 日播种,行株距为 30 cm × 15 cm,每行种植 15 穴,单本/穴,2 行区;顺序排列,2 次重复。施用 N:P:K = 15:15:15 复合肥 50 kg/667 m²作为基肥,每 10 ~ 15 d 灌溉 1 次,待完全成熟后,于 10 月中下旬按家系收获。

1.2 试验方法

1.2.1 糙米粒色目测分级 2016 年 3 月,按 F₅家系顺序将手工脱壳的糙米分别放置于培养皿内,在阳光下用肉眼观察糙米的颜色并划分为 9 个等级(图 1)。



图1 龙锦1号/香软米1578 F₅家系群糙米粒色等级

Fig. 1 Grain color grade of brown rice for F₅ lines from Longjin 1/Xiangruanmi 1578

1.2.2 糙米总花色苷含量测定 每个家系随机挑选6粒糙米种子并用万分之一天平称重,称量结束后放入15 mL离心管。然后每管加入1.5 mol/L HCl:95% 甲醇溶液(15:85, V/V)5 mL,避光条件下,60 °C恒温水浴中浸提5 h,每20 min混匀1次。浸提结束后,立即将其从水浴锅中取出,放入黑暗环境中冷却备用。通过波长扫描,确定花色苷提取试样在波长为527 nm处有最大吸收峰。利用1 cm比色皿,通过T6可见分光光度计测其527 nm处的ABS值,参照T. Fuleki等^[18]以及吕英华等^[19]的方法

表1 糙米总花色苷含量、粒色等级和千粒重

Table 1 Total anthocyanin content, grain color grade and thousand grain weight of brown rice

变量 Variable	平均值 Mean	标准差 SD	变异范围 Range of variation	变异系数(%) CV	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis
糙米总花色苷含量(mg/kg) Total anthocyanin content of brown rice	834.47	1601.87	0 ~ 5459.34	191.96	1.76	1.53
糙米粒色等级 Grain color grade of brown rice	4.98	2.88	1 ~ 9	57.87	0.11	-1.49
糙米千粒重(g) Thousand grain weight of brown rice	17.75	2.29	11.96 ~ 26.24	12.89	0.55	1.31

2.2 糙米总花色苷含量、粒色等级和千粒重频数分布

图2是糙米总花色苷含量、粒色等级和千粒重的F₅家系频数分布。正态分布检验表明,糙米总花色苷含量、粒色等级和千粒重的Pr < W值(α = 0.05)分别是<0.0001、<0.0001和0.0023,均小于0.05,原假定非常可疑,所以上述3个指标不符合正态分布。糙米总花色苷含量峰值出现在总花

计算糙米总花色苷含量。糙米总花色苷含量(mg/kg) = OD₅₂₇ × V × MW × 1000 / (ε × m),其中V为浸提液的体积;MW为矢车菊素-3-O-葡萄糖苷的分子量(449.38);ε为矢车菊素-3-O-葡萄糖苷的消光系数(26900 L/cm · mg);m为6粒糙米种子的质量。花色苷含量测定设3次重复。

1.3 数据处理

描述性统计量分析、频数分布、正态分布检验、相关分析、方差分析以及差异显著性分析采用SAS 9.3软件。

2 结果与分析

2.1 糙米总花色苷含量、粒色等级和千粒重变异

从表1可见,214个F₅家系糙米总花色苷含量变异范围为0 ~ 5459.34 mg/kg,平均值为834.47 mg/kg,标准差为1601.87,变异系数为191.96%。糙米粒色等级变异范围为1 ~ 9,平均值为4.98,标准差为2.88,变异系数为57.87%。糙米千粒重的变异范围为11.96 ~ 26.24 g,平均值为17.75 g,标准差为2.29,变异系数为12.89%。其中糙米总花色苷含量变异系数最大,千粒重变异系数最小,这与标准差所反映出来的离散程度一致。上述3个指标的偏度系数都为正值,说明是右偏态,其中糙米总花色苷含量的偏斜程度最大。糙米总花色苷含量和千粒重的峰度系数为正值,表明为尖顶峰;而糙米粒色等级的峰度系数为负值,表明为平顶峰。

色苷含量0 ~ 300 mg/kg,有162个家系,超过高亲龙锦1号家系数有29个。粒色等级峰值出现在第2等级,有51个家系,而高亲龙锦1号出现在第9等级,有41个家系。千粒重峰值出现在17.25 ~ 18.75 g,呈千粒重小于亲本龙锦1号的偏态分布。由图2可见,糙米总花色苷含量和粒色等级杂种优势不是非常明显,需要从大量的家系中筛选超高亲个体。

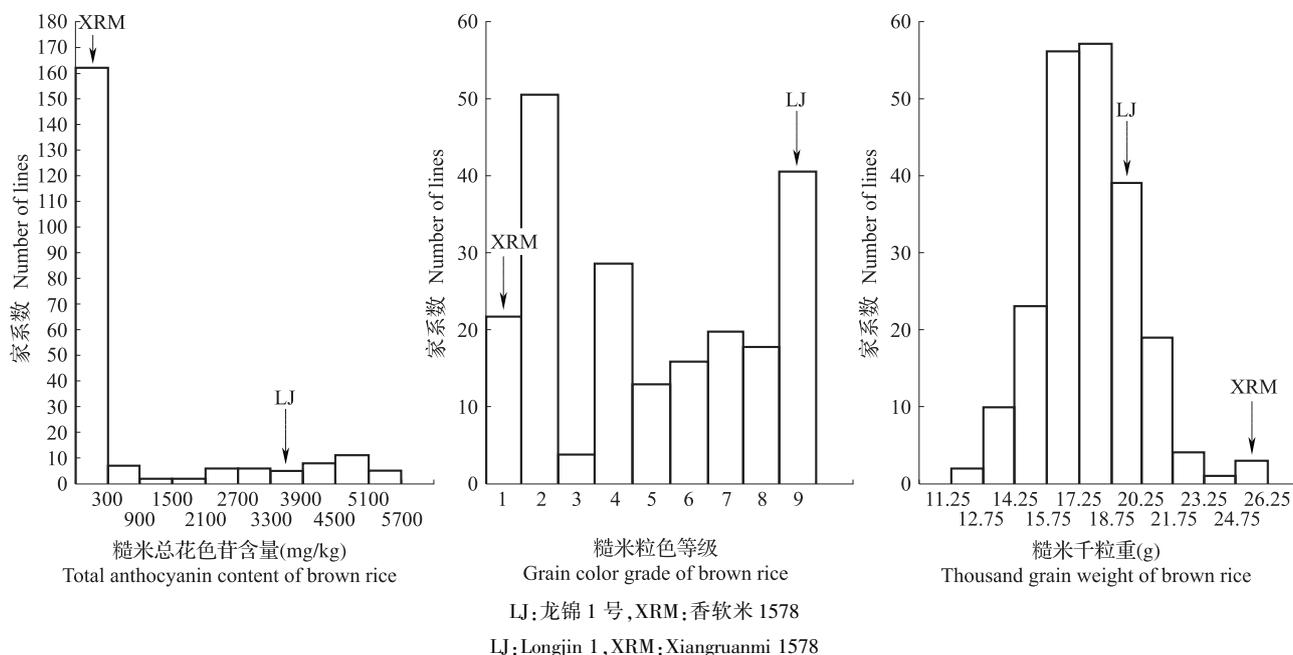


图 2 糙米总花色苷含量、粒色等级和千粒重频数分布

Fig. 2 Frequency distribution of total anthocyanin content, grain color grade and thousand grain weight of brown rice

2.3 糙米总花色苷含量、粒色等级和千粒重相关分析

如表 2 所示,糙米总花色苷含量与粒色等级呈极显著正相关,相关系数为 0.69;糙米总花色苷含量与

千粒重呈极显著负相关,相关系数为 -0.20 ;粒色等级与千粒重呈极显著负相关,相关系数为 -0.34 。说明在一定程度上,粒色等级较高的材料含有较高的糙米总花色苷含量,但千粒重可能要小一些。

表 2 糙米总花色苷含量、粒色等级和千粒重间的相关系数

Table 2 Correlation coefficients among total anthocyanin content, grain color grade and thousand grain weight of brown rice

参数 Parameter	糙米总花色苷含量 Total anthocyanin content of brown rice	糙米粒色等级 Grain color grade of brown rice
糙米粒色等级 Grain color grade of brown rice	0.69 **	
糙米千粒重 Thousand grain weight of brown rice	-0.20 **	-0.34 **

** 表示 0.01 水平下显著相关

** Significant correlation at 0.01 level

2.4 高花色苷家系筛选

对 214 个 F_5 家系糙米总花色苷含量进行方差分析,结果如表 3 所示, F 值为 3606.44, 远大于 1, P 值 <0.0001 , 差异极显著,说明 214 个家系糙米总花色苷含量之间的差别有统计学意义。214 个家系与高亲龙锦 1 号糙米总花色苷含量之间的差别被进一步执行新复极差法检验,结果如表 4 和表 5 所示。在 $\alpha=0.01$ 水平下,误差的自由度为 430, 误差均方为 2148.67, 检验的临界值为 3.98, 最小显著性差异值为 150.65。高亲龙锦 1 号糙米

总花色苷含量均值为 3331.81 mg/kg, 与龙锦 1 号相比, 27 个家系的糙米总花色苷含量极显著提高 ($\alpha=0.01$), 占 214 个 F_5 家系的 12.62%。其中, 家系 564、550-1、566、600、519-1 的糙米总花色苷含量均值分别为 5459.34 mg/kg、5406.34 mg/kg、5365.82 mg/kg、5269.90 mg/kg 和 5258.84 mg/kg, 比龙锦 1 号分别高出 2128 mg/kg、2075 mg/kg、2034 mg/kg、1938 mg/kg 和 1927 mg/kg。这 27 个家系的糙米粒色等级除家系 566 是第 8 等级外, 其他都是第 9 等级。

表 3 龙锦 1 号/香软米 1578 F₅ 家系群糙米总花色苷含量方差分析Table 3 Variance analysis of total anthocyanin content of brown rice for F₅ lines derived from Longjin 1/Xiangruanmi 1578

变异来源 Source	自由度 <i>df</i>	平方和 Sum of squares	均方 Mean square	F 值 F value	P 值 <i>Pr</i> > <i>F</i>
系统 Model	214	1658291358	7749025	3606.44	<0.0001
误差 Error	430	923926	2149		

表 4 新复极差法检验控制实验误差率

Table 4 Dunnett's *t* tests for controlling the type 1 experiment wise error for comparisons of all treatments against a control

参数 Parameter	数值 Value
显著性水准 Alpha	0.01
误差自由度 Error degrees of freedom	430
误差均方 Error mean square	2148.67
Dunnett's <i>t</i> 检验的临界值 Critical value of Dunnett's <i>t</i>	3.98
最小显著性差异值 Minimum significant difference	150.65

表 5 F₅ 家系与龙锦 1 号糙米总花色苷含量差异显著性比较Table 5 Dunnett's *t* tests for total anthocyanin content of brown rice between F₅ lines and Longjin 1

家系与龙锦 1 号比较 Group comparison	均值差 Difference between means	99% 均值差的同时置信区间 Simultaneous 99% confidence limits		标记 Mark
564-LJ	2128	1977	2278	**
550-1-LJ	2075	1924	2225	**
566-LJ	2034	1883	2185	**
600-LJ	1938	1787	2089	**
519-1-LJ	1927	1776	2078	**
560-LJ	1746	1595	1897	**
575-LJ	1685	1534	1836	**
503-LJ	1510	1360	1661	**
645-LJ	1478	1327	1629	**
506-LJ	1473	1323	1624	**
508-LJ	1361	1211	1512	**
572-LJ	1277	1126	1427	**
631-LJ	1270	1120	1421	**
485-LJ	1253	1103	1404	**
583-LJ	1241	1090	1392	**
499-1-LJ	1195	1045	1346	**
463-LJ	1135	984	1286	**
479-LJ	1045	895	1196	**
551-LJ	873	722	1033	**
514-LJ	834	639	985	**
646-LJ	834	639	985	**
571-LJ	817	666	968	**
515-LJ	790	639	940	**
546-LJ	620	469	770	**
536-LJ	344	194	495	**
608-LJ	278	127	429	**
605-LJ	253	102	403	**

** 表示 F₅ 家系与龙锦 1 号糙米总花色苷含量在 0.01 水平的差异显著性** Significant difference at 0.01 level for total anthocyanin content of brown rice between F₅ lines and Longjin 1

3 讨论

3.1 水稻子粒总花色苷含量和糙米粒色等级变异

张名位等^[20]分析了 7 个水稻品种的米皮颜色和米皮总花色苷含量,品种 Hung Hsien Ju、黑糯 83、紫稻 5 号、稀珍黑稻、Dhan Baggi 441、Pangniraj 和 Della 的米皮颜色分别为浅黑、深黑、黑、深黑、浅黑、浅黑和白色,米皮总花色苷含量分别为 5110 mg/kg、28200 mg/kg、14250 mg/kg、24250 mg/kg、3710 mg/kg、4980 mg/kg 和 470 mg/kg,6 个杂交组合 F₂米皮总花色苷含量变异范围分别为 13830 ~ 29460 mg/kg、4580 ~ 29420 mg/kg、490 ~ 29420 mg/kg、5070 ~ 15360 mg/kg、570 ~ 16100 mg/kg 和 590 ~ 5960 mg/kg,其中米皮占糙米质量的 12% 左右^[21]。黄莹莹^[17]分析了亲本和 F₃株系的糙米总花色苷含量,结果表明,亲本红香一号和松 98-131 的糙米总花色苷含量分别为 7.32 mg/kg 和 0.04 mg/kg,200 个 F₃株系糙米总花色苷含量变异范围为 0.15 ~ 5.97 mg/kg,平均值为 1.80 mg/kg,标准差为 1.22,变异系数为 67.72%,偏度为 0.93,峰度为 0.94。H. Maeda 等^[22]以越光 and 红血糯杂交后代近等基因系为材料,采用糙米粒色目测分级方法,将 87 个近等基因系分为白色、3 个褐色和黑色,共 5 个等级。陈廷文^[23]根据糙米种皮色素性状沉积的深浅,将粒色分为白色、微褐、浅褐、中褐、深褐、紫黑、深紫黑和深黑 8 个等级,并转换为 1 ~ 8 级;5 个组合的 F₁粒色等级平均数分别为 4.655、4.618、4.813、4.618 和 5.452,标准差分别为 0.841、0.652、0.394、0.493 和 0.593,变异系数分别为 17.49%、14.12%、8.19%、10.68% 和 10.88%;5 个组合的 F₂粒色等级平均数分别为 4.499、4.803、3.929、3.997 和 4.105,标准差分别为 2.086、2.440、2.001、2.233 和 2.336,变异系数分别为 46.37%、50.80%、50.93%、55.87% 和 56.91%。孙明茂^[24]将 196 个 F₃家系根据糙米种皮花色苷色素沉积的深浅,分为白色、浅褐、褐色、30% ~ 40% 黑、红黑、50% ~ 60% 黑、70% ~ 80% 黑、90% 黑和全黑 9 个等级。S. Z. Park 等^[15]研究发现,326 份水稻种质的糙米矢车菊素-3-O-葡萄糖苷变异范围为微量至 5520 mg/kg,在非色稻品种中,糙米矢车菊素-3-O-葡萄糖苷未检测到。S. N. Ryu 等^[16]研究表明,591 份水稻品种的糙米矢车菊素-3-O-葡萄糖苷变异范围为 0 ~ 4519 mg/kg,芍药素-3-O-葡萄糖苷变异范围为 0 ~ 427 mg/kg。

本研究结果表明,214 个 F₃家系按照糙米花色

苷沉积的深浅,分为 1 ~ 9 个等级,等级类别划分比前人^[22-23]更多,暗示糙米粒色等级变异更丰富。糙米粒色等级平均值为 4.98,标准差为 2.88,变异系数为 57.87%,偏度为 0.11,峰度为 -1.49。糙米粒色等级平均值与陈廷文^[23]对 F₁和 F₂的研究结果相近,糙米粒色等级标准差和变异系数与陈廷文^[23]对 F₂的研究结果相近。214 个 F₃家系糙米总花色苷含量变异范围为 0 ~ 5459.34 mg/kg,平均值为 834.47 mg/kg,标准差为 1601.87,变异系数为 191.96%,偏度为 1.76,峰度为 1.53。糙米总花色苷含量变异范围大于黄莹莹^[17]的报道,与 S. Z. Park 等^[15]和 S. N. Ryu 等^[16]的报道一致。以上分析表明,杂交组合龙锦 1 号/香软米 1578 F₃家系群中糙米花色苷含量性状变异丰富,从中筛选高花色苷家系具有可行性。

3.2 水稻子粒总花色苷含量、粒色等级和产量构成因素之间的相关性

常汇琳^[25]以 190 个重组自交系为材料,5 个试验点的相关性研究表明,糙米总花色苷含量与穗长呈显著正相关,相关系数分别为 0.126、0.161、0.194、0.113 和 0.103;与千粒重呈极显著负相关,相关系数分别为 -0.136、-0.155、-0.159、-0.167 和 -0.128,与单株产量、有效穗数、每穗总粒数、结实率相关不显著。本研究表明,糙米总花色苷含量与粒色等级呈极显著正相关,相关系数为 0.69;糙米总花色苷含量、粒色等级均与千粒重呈极显著负相关,相关系数分别为 -0.20 和 -0.34。糙米总花色苷含量与千粒重呈极显著负相关与常汇琳^[25]的研究结果一致。上述结果表明,一定程度上糙米粒色等级越高,糙米总花色苷含量越高;但花色苷含量高的材料,千粒重可能低一些。因此,在进行高世代材料高花色苷性状筛选的同时,要注意千粒重等产量构成因素性状的选择,尽量选择千粒重高的材料。

3.3 水稻子粒总花色苷含量和粒色等级频数分布

S. Z. Park 等^[15]研究发现,124 个水稻品种糙米矢车菊素-3-O-葡萄糖苷含量低于 100 mg/kg,4 个水稻品种含量介于 100 ~ 500 mg/kg,2 个水稻品种含量介于 500 ~ 1000 mg/kg,5 个水稻品种含量介于 1000 ~ 2000 mg/kg 之间,5 个水稻品种含量超过 2000 mg/kg。S. N. Ryu 等^[16]研究表明,113 个水稻品种糙米矢车菊素-3-O-葡萄糖苷含量低于 500 mg/kg,2 个水稻品种含量介于 500 ~ 1000 mg/kg,5 个水稻品种含量介于 1000 ~ 2000 mg/kg,6 个水稻品种含量

超过 2000 mg/kg; 119 个水稻品种芍药素-3-O-葡萄糖苷含量低于 50 mg/kg, 2 个水稻品种含量介于 50 ~ 200 mg/kg, 5 个水稻品种含量超过 200 mg/kg。黄莹莹^[17]研究发现, 糙米总花色苷含量频数分布峰值为 1.2 ~ 2.0 mg/kg, 包含 70 个左右株系; 糙米总花色苷含量超过 6.0 mg/kg 的株系数不超过 5 个。张名位等^[20]研究发现, 6 个杂交组合 F₂ 米皮总花色苷含量的频数分布峰值分别为 23000 ~ 25000 mg/kg、19000 ~ 21000 mg/kg、13000 ~ 15000 mg/kg、9000 ~ 11000 mg/kg、7000 ~ 9000 mg/kg 和 3000 ~ 5000 mg/kg, 其中杂交组合 1 和 2 的米皮总花色苷含量超过 29000 mg/kg 的株系数均不超过 8 个。

本研究表明, 214 个 F₅ 家系糙米总花色苷含量和粒色等级不符合正态分布, 为右偏态。糙米总花色苷含量峰值出现在总花色苷含量 0 ~ 300 mg/kg, 有 162 个家系, 超过高亲龙锦 1 号的家系数有 29 个。糙米粒色等级峰值出现在第 2 等级, 有 51 个家系, 而高亲龙锦 1 号出现在第 9 等级, 有 41 个家系。龙锦 1 号/香软米 1578 杂交组合糙米总花色苷含量出现超高亲家系, 这与张名位等^[20]的研究结果一致, 并且糙米总花色苷含量超过 2000 mg/kg 的家系数有 41 个, 比 S. Z. Park 等^[15] 和 S. N. Ryu 等^[16] 的高花色苷材料出现频数高, 表明可以从 F₅ 家系中筛选高花色苷材料。

3.4 高花色苷水稻种质培育

近 5 年我国培育的色稻新品种主要包括海亚黑稻 1 号(琼审稻 2011018)^[26]、海亚黑稻 2 号(琼审稻 2011019)^[26]、粤红宝(粤审稻 2012028)^[27]、南红 1 号(粤审稻 2015012)^[28]、金农 3 优 3 号(闽审稻 2012006)^[29]、双亚红香 1 号(陕审稻 2014008)^[30] 和黑米新品系云谷 1 号^[31] 等。国外近 5 年培育的高花色苷水稻新品种主要包括 Keunnunjami^[32]、Superjami 2^[33]、Superjami^[34] 和 Daeripjami^[35] 等, 这些材料糙米矢车菊素-3-O-葡萄糖苷含量分别为 5205 mg/kg、18810 mg/kg、27990 mg/kg 和 9250 mg/kg。此外还包括黑糯巨胚水稻品种 Nunkeunheugchal^[36] 和红褐米水稻品种 Superhongmi^[37] 等。

本研究发现, 27 个家系糙米总花色苷含量比龙锦 1 号高($\alpha = 0.01$), 占 214 个 F₅ 家系的 12.62%。其中, 家系 564、550-1、566、600、519-1 的糙米总花色苷含量均值分别为 5459.34、5406.34、5365.82、5269.90、5258.84 mg/kg, 比龙锦 1 号分别高出 2128、2075、2034、1938 和 1927 mg/kg。表明这些高花色苷家系经过进一步培育, 可以逐步开发为高花

色苷水稻新品种, 满足消费者对高花色苷稻米的迫切需求。

参考文献

- [1] 孙明茂, 韩龙植, 李圭星, 等. 水稻花色苷含量的遗传研究进展[J]. 植物遗传资源学报, 2006, 7(2): 239-245
- [2] Imanishi T, Hano T, Sawamura T, et al. Oxidized low-density lipoprotein induces endothelial progenitor cell senescence, leading to cellular dysfunction [J]. Clin Exp Pharmacol Physiol, 2004, 31: 407-413
- [3] 张名位, 张瑞芬, 郭宝江, 等. 黑米花色苷对血管内皮细胞过氧化损伤的保护作用[J]. 营养学报, 2006, 28(3): 216-220
- [4] 张名位, 郭宝江, 张瑞芬, 等. 黑米抗氧化活性成分的分离纯化和结构鉴定[J]. 中国农业科学, 2006, 39(1): 153-160
- [5] 孙玲, 张名位, 池建伟, 等. 黑米的抗氧化性及其与黄酮和种皮色素的关系[J]. 营养学报, 2000, 22(3): 2465-249
- [6] 孙玲, 陈俊秋, 张名位, 等. 稻米种皮颜色与其生物抗氧化性的关系[J]. 中国粮油学报, 2002, 17(4): 25-27
- [7] Hu C, Zawistowski J, Ling W, et al. Black rice (*Oryza sativa* L. *indica*) pigmented fraction suppresses both reactive oxygen species and nitric oxide in chemical and biological model systems [J]. J Agr Food Chem, 2003, 51(18): 5271-5277
- [8] 秦玉, 凌文华. 黑米花色苷提取物胶囊对高血脂症病人的降血脂作用[J]. 食品科学, 2008, 29(10): 540-542
- [9] 姚树龙. 黑米花色苷类成分对胆固醇吸收的影响及机制研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2014: 1-64
- [10] 王庆, 韩平华, 张名位, 等. 膳食补充黑米皮对冠心病患者血浆中氧化应激、炎症和脂质水平的影响[J]. 中山大学学报: 医学科学版, 2007, 28(3): 301-305
- [11] 常微, 糜漫天, 顾艳艳, 等. 黑米花色苷对白血病细胞株 HL-60 及正常淋巴细胞活性氧及线粒体膜电位的影响[J]. 第三军医大学学报, 2008, 30(7): 585-587
- [12] Kumar R, Yarmand-Bagheri R. The role of HER2 in angiogenesis [J]. Semin Oncol, 2001, 28(16): 27-32
- [13] 于斌, 余小平, 易龙, 等. 黑米花色苷抑制人乳腺癌细胞促血管生成因子表达的机制[J]. 营养学报, 2010, 32(6): 545-550
- [14] 常微, 糜漫天, 凌文华. 黑米花色苷及联合化疗药物对不同肿瘤细胞增殖的影响[J]. 第三军医大学学报, 2007, 29(20): 1943-1946
- [15] Park S Z, Lee J H, Han S J, et al. Quantitative analysis and varietal difference of cyanidin 3-glucoside in pigmented rice [J]. Korean J Crop Sci, 1998, 43(3): 179-183
- [16] Ryu S N, Han S J, Park S Z, et al. Antioxidative activity and varietal difference of cyanidin 3-glucoside and peonidin 3-glucoside contents in pigmented rice [J]. Korean J Crop Sci, 2000, 45(4): 257-260
- [17] 黄莹莹. 水稻子粒花色苷、矿质元素含量及相关性状的 QTL 定位[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2013: 1-41
- [18] Fuleki T, Francis F J. Quantitative methods for anthocyanins. 1. Extraction and determination of total anthocyanin in cranberries [J]. J Food Sci, 1968, 33: 72-77
- [19] 吕英华, 苏平, 那宇, 等. 桑椹色素体外抗氧化能力研究[J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2007, 33(1): 102-107
- [20] 张名位, 彭仲明, 徐运启. 黑米稻种皮色素含量的遗传效应分析[J]. 中国水稻科学, 1995, 9(3): 149-155
- [21] 张名位. 黑米抗氧化与降血脂的活性成分及其作用机理[D]. 广州: 华南师范大学, 2003: 1-152
- [22] Maeda H, Yamaguchi T, Omoteno M, et al. Genetic dissection of black grain rice by the development of a near isogenic line [J]. Breeding Sci, 2014, 64: 134-141
- [23] 陈廷文. 稻谷黑米种皮的遗传特性研究[J]. 四川农业大学学报, 1995, 13(4): 498-505