

# 红米亲本抗氧化活性成分的配合力分析

肖长春<sup>1</sup>, 程祖铎<sup>2,3</sup>, 黄昕颖<sup>2,3</sup>, 谢展文<sup>2</sup>, 林荔辉<sup>2,3</sup>

(<sup>1</sup>三明市农业科学研究院生物技术研究所, 福建三明 365500; <sup>2</sup>福建农林大学农学院 / 作物遗传育种与综合利用教育部重点实验室, 福州 350002; <sup>3</sup>福建农林大学农学院 / 福建省特种作物育种与利用工程技术研究中心, 福州 350002)

**摘要:** 剖析红米抗氧化活性成分的配合力和遗传力, 为富含功能营养成分的红米杂交水稻选育提供理论参考。选用 6 个三系不育系和 8 个红米恢复系, 按不完全双列杂交  $6 \times 8$  (NCII) 设计, 配制 48 个杂交红米组合, 对总酚、总黄酮、原花青素和花色苷含量进行配合力及遗传参数分析。结果表明: 红米杂交组合间的总酚、总黄酮、原花青素和花色苷含量存在遗传差异, 受不育系亲本加性和组合间非加性效应共同影响, 其中总酚、总黄酮和原花青素含量主要受基因非加性效应控制, 花色苷含量受基因加性效应和基因非加性效应互作的共同影响; 亲本一般配合力 (GCA, general combining ability) 的高低与组合特殊配合力 (SCA, special combining ability) 的优劣之间无直接相关, 不同糙米颜色的母本与所配红米杂交组合的特殊配合力也无明显相关性; 遗传力分析表明, 4 个抗氧化活性成分的狭义遗传率变幅为 12.99%~48.29%, 宜在中、高世代选择有效; 不育系的 4 个抗氧化活性成分贡献率均大于恢复系, 红米杂交稻育种中要加强母本的选择; 母本野香 A、品红 1A 在红米抗氧化活性成分育种上有较好的实际利用价值, 野香 A  $\times$  18Rr175 和广 8A  $\times$  18Rr178 两个杂交组合的特殊配合力效应值高, 生产应用潜力大。

**关键词:** 红米; 抗氧化活性成分; 配合力; 遗传力

## Analysis of Combining Ability of Antioxidant Active Ingredients of Red Rice Parents

XIAO Chang-chun<sup>1</sup>, CHENG Zu-xin<sup>2,3</sup>, HUANG Xin-ying<sup>2,3</sup>, XIE Zhan-wen<sup>2</sup>, LIN Li-hui<sup>2,3</sup>

(<sup>1</sup>Biotechnology Research Institute, Sanming Academy of Agricultural Sciences, Fujian Sanming 365500; <sup>2</sup>College of Agriculture, Fujian Agriculture and Forestry University/Key Laboratory of Ministry of Education for Genetics, Breeding and Multiple Utilization of Crops, Fuzhou 350002; <sup>3</sup>College of Agriculture, Fujian Agriculture and Forestry University/Fujian Engineering Technology Research Center of Breeding and Utilization for Special Crops, Fuzhou 350002)

**Abstract:** This study analyzed the combining ability and heritability of the antioxidant active ingredients of red rice, which will provide theoretical reference for breeding of hybrid red rice rich in functional nutrients. By deployment of 6 three-line sterile lines and 8 red rice restorer lines to generate 48 hybrids of red rice following the incomplete diallel hybridization  $6 \times 8$  (NCII), the combining ability and genetic parameters of total phenols, total flavonoids, procyanidins and anthocyanins were analyzed. The results showed that there were genetic differences in the content of total phenols, total flavonoids, procyanidins and anthocyanins among the red rice hybrid combinations, which were affected by the additive effects of the sterile line parents and the non-additive effects between the combinations. The contents of total phenols, total flavonoids and proanthocyanidins were mainly controlled by the non-additive effects of genes, and the content of anthocyanins was affected by the interaction of additive and non-additive effects of genes. There was no direct correlation between the parental general combining

收稿日期: 2021-09-03 修回日期: 2021-09-30 网络出版日期: 2021-11-10

URL: <http://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20210903003>

第一作者研究方向为水稻遗传育种, E-mail: 958358229@qq.com

通信作者: 林荔辉, 研究方向为作物遗传育种专业, E-mail: lihui9027@163.com

基金项目: 福建省科技计划引导性项目 (2018N0007, 2019N0004); 福建省科技对外合作产业化项目 (2018I1011)

**Foundation projects:** Fujian Provincial Science and Technology Plan Pilot Project (2018N0007, 2019N0004), Fujian Science and Technology Foreign Cooperation Industrialization Project (2018I1011)

ability (GCA) and the combined special combining ability (SCA), and there was no obvious correlation between the female parent with different brown rice color and the special combining ability of the red rice combination. The heritability analysis showed that the narrow-sense heritability of the four antioxidant active ingredients ranged from 12.99%-48.29%, which should be effective for selection in the middle and high generations. The contribution rate of the four antioxidant active ingredients of the sterile lines was greater than that of the restorer lines. The selection of female parents should be strengthened in the breeding of red rice hybrid rice. The female parents Yexiang A and Pinhong 1A were better in the breeding of red rice antioxidant active ingredients. Hybrid combinations Yexiang A  $\times$  18Rr175 and Guang 8A  $\times$  18Rr178 had high special combining ability effect value and great potential for production and application.

**Key words:** red rice; antioxidant active ingredients; combining ability; heritability

红米水稻是一种常见的有色稻,属于药食两用资源,中医认为红米可以补气养血、滋阴补肾、延缓衰老,所以红米又被称为药米、补血米、长寿米等<sup>[1-2]</sup>。大量研究结果表明,红米除具有人体所需的基本营养素和一般稻米缺乏的氨基酸、维生素外,还含有重要的抗氧化活性物质,主要包括原花青素、花色苷、类黄酮及其次生代谢物、母育酚、 $\gamma$ -谷维素等抗氧化活性成分,具有降血脂、降血糖、防癌和抗衰老等多种保健功效,对提高以稻米为主食的人群健康水平具有重要作用<sup>[3-7]</sup>。红米的抗氧化活性成分含量高低不仅与自身基因型有关,还受到外界环境因素的影响<sup>[8-11]</sup>。因此,剖析红米亲本抗氧化活性成分含量的配合力及遗传参数,对培育富含高营养价值的红米新品种具有重要的指导意义。

近年来,为满足高端稻米市场需求,红米新品种的选育已备受水稻育种界普遍关注,陆续培育出如粤红宝、广红3号、红丝苗等系列优质红米常规新品种<sup>[12-13]</sup>。随着育种水平进一步提高,红米杂种优势利用也取得明显进展,如特优红1256、渝优红9等高产优质红米杂交稻组合也相继育成<sup>[14-15]</sup>。当前对红米水稻的研究多集中在产量与品质性状的遗传改良,有关红米总酚、总黄酮、原花青素和花色苷等抗氧化活性成分的配合力和遗传参数的研究较少。杨海亮<sup>[16]</sup>和王强<sup>[17]</sup>均对红米杂交组合中的花色苷含量配合力进行分析,结果均表明,红米花色苷含量除受亲本的加性效应影响外,还受到组合间的显性效应共同影响,其中杨海亮<sup>[16]</sup>认为亲本的加性效应对花色苷含量起主要作用,其狭义遗传力较高,宜早代选择有效,但王强<sup>[17]</sup>则认为红米杂交组合间的显性效应对花色苷含量影响大,狭义遗传力较低,不利于早代选择。王诗文<sup>[11]</sup>对红米和黑米杂交组合中花色苷含量的配合力分析结果表明,杂种后代花色苷含量偏向低值亲本,杂交组配上应选择富含花色

苷的材料作为亲本。程祖铎等<sup>[18]</sup>对黑米组合中的总黄酮、花色苷含量进行配合力分析,结果显示,黑米花色苷、总黄酮含量受加性效应和显性效应共同影响,其中以加性效应为主,具有较高的狭义遗传力,因此,黑米杂交稻育种后代的总黄酮、花色苷宜在早代选择。

本研究采用物理诱变创制的7个红米恢复系及广东省审定通过的红米品种广红3号为父本,分别与6个三系不育系按 $6 \times 8$ 不完全双列杂交方式,配制出48个红米杂交组合遗传材料。利用配合力遗传模型分析总酚、总黄酮、原花青素和花色苷等抗氧化活性成分含量的遗传规律,为培育高营养价值的功能型红米杂交稻提供理论参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

选用红、白种皮颜色水稻材料14份,其中10份为红米,4份为白米。其中红米恢复系18Rr174、18Rr175、18Rr178、18Rr190、18Rr243、18Rr250、18Rr274,以及不育系品红1A和品红2A是经<sup>60</sup>Co- $\gamma$ 辐射诱变创制而来。供试亲本材料均来自福建农林大学农产品品质研究所,具体见表1。

### 1.2 试验方法

2018年11月至2019年4月于海南三亚海棠区藤桥镇福建南繁育种基地播种亲本材料,按不完全双列杂交 $6 \times 8$ 设计,配制48个红米杂交组合材料。

2019年6月1日,将14份亲本材料(不育系以同型保持系代替)以及48个配制组合播种于福建农林大学闽侯白沙科教基地,6月26日插秧。每小区按7株 $\times$ 6排种植,3次重复,单本种植,株行距为25 cm $\times$ 25 cm。供试材料四周设置保护行,试验田肥力均匀,田间栽培管理一致。

表 1 供试亲本材料

Table 1 Test parent materials

材料类型 Type of materials	名称 Name	种皮颜色 Seed coat color	辐射的品种 The original variety of radiation
恢复系 Restorer line	18Rr174	红	闽恢 3301
	18Rr175	红	明恢 63
	18Rr178	红	明恢 63
	18Rr190	红	宜恢 1577
	18Rr243	红	蜀恢 527
	18Rr250	红	CDR22
	18Rr274	红	明恢 63
	广红 3 号	红	
不育系 Male-sterile line	品红 1A	红	II-32B
	品红 2A	红	特 B
	荃 9311A	白	
	野香 A	白	
	恒丰 A	白	
	广 8A	白	

上述材料成熟后,每份材料混收 100 g 谷样,风干后并置于常温下贮藏 1 个月后,经砻谷机脱壳,磨粉,过 100 目筛,用于抗氧化活性成分含量测定。其中总酚含量测定采用福林酚比色法<sup>[19]</sup>,原花青素含量测定采用盐酸-香草醛法<sup>[20]</sup>,总黄酮含量和花色苷含量测定分别采用氯化铝法与盐酸-甲

表 2 4 个抗氧化活性成分的方差分析

Table 2 Variance analysis of 4 antioxidant active ingredients

变异来源 Source of variation	总酚 Total polyphenol	总黄酮 Total flavonoid	原花青素 Procyanidine	花色苷 Anthocyanin
组合 Inter-combination	9431.331**	5082.366**	3003.777**	1.224**
不育系 Male-sterile line	14708.069	10113.049*	4097.731*	4.102*
恢复系 Restorer line	11662.415	8150.903	4358.286	1.171
不育系 × 恢复系 Male-sterile line × restorer line	8307.799**	3438.922**	2593.650**	0.645**
误差 Error	110.632	81.591	17.492	0.016

\* 和 \*\* 分别表示 0.05 和 0.01 显著水平

\* and \*\* indicate significance at 0.05 and 0.01 levels, respectively

## 2.2 一般配合力效应分析

根据亲本的 GCA 效应分析结果可知(表 3),不育系在总黄酮、原花青素和花色苷等 3 个抗氧化活性成分含量上的加性效应存在明显差异,对总黄酮、原花青素和花色苷等含量的贡献大小也不同。其中野香 A 和品红 1A 在这 3 个抗氧化活性成分含量上的 GCA 均为正效应值,其中表现较优为野香 A,在总黄酮、原花青素和花色苷含量上的 GCA 效应值分别为 9.160、13.731 和 5.501,可作为提高红

醇法<sup>[21]</sup>。

## 1.3 统计分析

数据经 Microsoft Excel 整理,采用 DPS 7.05<sup>[22]</sup> 软件分析,分析抗氧化活性成分配合力方差、配合力效应值、各项遗传效应方差分量等遗传参数。

## 2 结果与分析

### 2.1 配合力方差分析

4 个抗氧化活性成分含量的配合力方差分析见表 2。从表 2 可知组合间的总酚、总黄酮、原花青素和花色苷含量均方值差异都达到极显著水平,表明供试组合间的活性成分存在明显的遗传差异。由组合间的差异来源分析可知,不育系中除总酚含量一般配合力(GCA, general combining ability) 方差并不显著外,总黄酮、原花青素和花色苷含量的 GCA 方差均达到显著水平。红米恢复系 4 个抗氧化活性成分 GCA 方差差异不显著。组合间的 4 个抗氧化活性成分特殊配合力(SCA, special combining ability) 方差均达到极显著水平,表明这些抗氧化活性成分主要受不育系亲本加性和组合间非加性效应共同影响。为此,应着重对不育系的总黄酮、原花青素和花色苷含量的 GCA 和杂交组合的 SCA 进一步分析。

米杂种总黄酮、原花青素和花色苷含量等 3 个抗氧化活性成分含量的优良母本;其次为品红 1A,该不育系的花色苷含量 GCA 效应值最大,达到 9.482,是提高红米杂交组合花色苷含量的优异亲本。由上可知,野香 A、品红 1A 在红米抗氧化活性成分含量育种上有较好的实际利用价值,是较为理想的亲本材料。此外,作为配组双亲的红米恢复系,它们也是有效提高后代抗氧化活性成分含量的双亲之一,育种选择上也应加以重视。

表 3 亲本 4 个抗氧化活性成分的一般配合力效应值

Table 3 Effect values of GCA of 4 antioxidant active ingredients in parents

名称 Name	总酚 Total polyphenol	总黄酮 Total flavonoid	原花青素 Procyanidine	花色苷 Anthocyanin
品红 1A Pinhong 1A	1.634	5.158	1.734	9.482
品红 2A Pinhong 2A	3.230	6.840	4.339	-2.972
荃 9311A Quan 9311A	-1.617	1.362	-2.197	-2.796
野香 A Yexiang A	9.526	9.160	13.731	5.501
恒丰 A Hengfeng A	-1.641	-6.700	-2.550	-3.151
广 8A Guang 8A	-11.382	-15.186	-15.121	-5.862
18Rr174	0.190	5.110	-3.870	-5.091
18Rr175	16.012	23.631	21.638	5.506
18Rr178	-4.320	5.981	7.187	-18.499
18Rr190	8.320	-2.996	0.706	10.326
18Rr243	-2.964	-11.743	-6.084	12.656
18Rr250	-10.974	-11.418	-13.226	0.703
18Rr274	-8.255	-12.381	-0.691	-19.230
广红 3 号 Guanghong 3 Hao	1.923	2.300	-5.820	13.084

### 2.3 特殊配合力效应分析

供试杂交组合间的 SCA 相对效应值结果见表 4。从表 4 可知, 亲本 GCA 的高低与组合 SCA 优劣之间无直接相关。如亲本 18Rr175 配组的杂交组合在总酚含量性状上 SCA 效应值变幅为 -20.911~55.254, 其中野香 A × 18Rr175 的总酚含量 SCA 效应值最高, 在所有供试红米杂交组合中位居第 1, 而恒丰 A × 18Rr175 的 SCA 效应值较低,

仅排第 46 位。同时在高 SCA 的红米组合中也出现低 GCA 的双亲, 如红米组合广 8A × 18Rr178 的总酚含量 SCA 效应值较高, 在所有供试红米组合中位居第 2, 但其亲本在总酚含量上的 GCA 呈负效应值。其他抗氧化活性成分性状也因亲本或组合的不同, 其 SCA 高低也各有差异。所以, 在选育高抗氧化活性成分含量的红米杂交组合时, 应注意结合 GCA 与 SCA 的效应值进行配组双亲的选择。

表 4 48 个组合的 4 个抗氧化活性成分特殊配合力效应值

Table 4 The effect values of SCA of 4 antioxidant active ingredients in 48 combinations

编号 Numbers	组合 Test combinations	总酚 Total polyphenol	总黄酮 Total flavonoid	原花青素 Procyanidine	花色苷 Anthocyanin
1	品红 1A × 18Rr174	7.301	1.859	13.408	6.536
2	品红 2A × 18Rr174	-4.147	-5.030	2.375	0.307
3	荃 9311A × 18Rr174	10.603	6.892	12.544	-7.223
4	野香 A × 18Rr174	-24.887	-24.149	-33.166	-8.061
5	恒丰 A × 18Rr174	10.554	14.431	8.345	9.834
6	广 8A × 18Rr174	0.456	6.230	-3.625	-1.205
7	品红 1A × 18Rr175	-8.501	8.765	-4.755	-1.563
8	品红 2A × 18Rr175	-2.732	11.210	5.180	-1.499
9	荃 9311A × 18Rr175	-10.777	-20.108	-13.776	2.469
10	野香 A × 18Rr175	55.254	28.897	49.937	28.444
11	恒丰 A × 18Rr175	-20.911	-25.878	-29.854	-25.898
12	广 8A × 18Rr175	-9.167	-5.229	-8.134	-2.597
13	品红 1A × 18Rr178	1.000	5.179	-6.188	-5.955

表 4(续)

编号 Numbers	组合 Test combinations	总酚 Total polyphenol	总黄酮 Total flavonoid	原花青素 Procyanidine	花色苷 Anthocyanin
14	品红 2A × 18Rr178	-21.139	-21.020	-32.142	-11.024
15	荃 9311A × 18Rr178	-19.886	-32.482	-30.880	-4.276
16	野香 A × 18Rr178	1.303	18.617	25.192	-0.280
17	恒丰 A × 18Rr178	6.499	4.110	10.885	-5.431
18	广 8A × 18Rr178	30.907	24.557	34.949	27.455
19	品红 1A × 18Rr190	8.841	5.826	14.688	-4.228
20	品红 2A × 18Rr190	24.013	20.614	19.388	18.317
21	荃 9311A × 18Rr190	-13.777	-0.413	-7.965	4.549
22	野香 A × 18Rr190	-17.842	-25.796	-26.608	-14.967
23	恒丰 A × 18Rr190	5.159	12.160	13.862	10.253
24	广 8A × 18Rr190	-7.393	-12.648	-13.357	-13.862
25	品红 1A × 18Rr243	3.420	6.595	8.717	14.345
26	品红 2A × 18Rr243	6.941	9.160	11.886	-3.598
27	荃 9311A × 18Rr243	12.712	14.701	9.090	21.314
28	野香 A × 18Rr243	-2.777	-14.642	-13.085	-12.584
29	恒丰 A × 18Rr243	-5.587	-8.330	-9.265	-7.548
30	广 8A × 18Rr243	-14.838	-8.915	-6.582	-11.891
31	品红 1A × 18Rr250	5.775	-6.983	0.552	5.461
32	品红 2A × 18Rr250	-0.835	-12.638	-1.723	-8.250
33	荃 9311A × 18Rr250	20.218	34.560	31.786	1.407
34	野香 A × 18Rr250	-12.847	4.424	-6.274	5.284
35	恒丰 A × 18Rr250	-14.838	-19.495	-19.614	-7.621
36	广 8A × 18Rr250	2.831	0.904	-4.243	3.835
37	品红 1A × 18Rr274	1.233	2.181	-4.087	-1.400
38	品红 2A × 18Rr274	-4.938	-7.546	-8.466	3.985
39	荃 9311A × 18Rr274	-11.897	-15.977	-14.865	-6.176
40	野香 A × 18Rr274	4.494	4.471	4.551	1.942
41	恒丰 A × 18Rr274	10.742	14.067	15.481	3.910
42	广 8A × 18Rr274	0.366	1.565	7.642	-2.275
43	品红 1A × 广红 3 号	-19.517	-22.337	-21.781	-13.048
44	品红 2A × 广红 3 号	2.428	4.427	4.924	1.880
45	荃 9311A × 广红 3 号	12.198	12.405	14.617	-11.879
46	野香 A × 广红 3 号	-1.463	6.206	-2.517	-0.174
47	恒丰 A × 广红 3 号	9.517	7.405	10.991	22.187
48	广 8A × 广红 3 号	-3.393	-6.385	-6.447	0.795
正效应组合 Number of positive effect combinations		25	28	23	21
负效应组合 Number of negative effect combinations		23	20	25	27
效应值变幅 Effect value range		-24.887~55.254	-32.482~34.560	-33.166~49.937	-25.898~28.444

从表 4 还可以看出,不同颜色母本与其所配红米杂交组合 SCA 效应值并未呈现明显相关性。双亲或双亲一方为红米各自所配的红米杂交组合,在 4 个抗氧化活性成分含量上的 SCA 效应值没有明显高低差异,白米不育系与红米恢复系杂交也能组配出 SCA 效应值较高的杂交组合,如野香 A × 18Rr175 和广 8A × 18Rr178 在 4 个抗氧化活性成分含量上都具有较高 SCA 效应值,而双亲都是红米的也可能组配出 SCA 效应值低的杂交组合,如品红 2A × 18Rr178 和品红 1A × 广红 3 号在 4 个抗氧化活性成分含量上的 SCA 均为负效应值。因此,育种上应根据相应的育种目标从中筛选具有特色的红米杂交组合。

在 48 个红米杂交组合中,4 个抗氧化活性成分含量的基因非加性互作效应也呈现较大差异,组合间的不同抗氧化活性成分 SCA 效应值也是不同的。总酚、总黄酮、原花青素和花色苷含量上的 SCA 效应值变幅分别为 -24.887~55.254、-32.482~34.560、

-33.166~49.937、-25.898~28.444。13 个杂交组合的 4 个抗氧化活性成分含量的 SCA 呈正效应值,表现出较强的特殊配合力,其中野香 A × 18Rr175、广 8A × 18Rr178 在总酚、总黄酮、原花青素和花色苷含量上都具有较高 SCA,效应值均高于 20.000,具备培育高抗氧化活性成分含量的红米杂交组合的育种潜力。

## 2.4 遗传参数分析

4 个抗氧化活性成分的基因型方差和遗传率分析结果见表 5。由表 5 可知,亲本 GCA 及其组合 SCA 在总酚、总黄酮、原花青素和花色苷含量的杂种后代的遗传是不同的。在总酚、总黄酮和原花青素含量性状上,亲本( $\delta_1+\delta_2$ )GCA 基因型方差小于不育系和恢复系互作( $\delta_{12}$ )SCA 基因型方差,表明总酚、总黄酮和原花青素含量主要受基因非加性效应影响,育种上应注重对杂交组合 SCA 的筛选。亲本花色苷含量( $\delta_1+\delta_2$ )GCA 基因型方差与组合( $\delta_{12}$ )SCA 基因型方差相近,表明花色苷受基因加性效应和基因非加性效应互作的共同影响。

表 5 4 个抗氧化活性成分的遗传参数

Table 5 Genetic parameters of 4 antioxidant active ingredients

活性成分 Active ingredients	基因型方差 Genotypic variance				方差贡献率(%) Percent variance				遗传率(%) Heritability	
	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_{12}$	误差 Error	$V_g$	$V_{g_1}$	$V_{g_2}$	$V_s$	$h_B^2$	$h_N^2$
总酚 Total polyphenol	301.612	116.428	2688.778	110.632	13.46	9.71	3.75	86.54	96.56	12.99
总黄酮 Total flavonoid	372.301	192.963	1105.643	74.513	33.83	22.28	11.55	66.17	95.73	32.39
原花青素 Procyanidine	78.389	71.009	813.952	16.58	15.51	8.14	7.37	84.49	98.31	15.25
花色苷 Anthocyanin	0.179	0.019	0.197	0.015	50.17	45.26	4.91	49.83	96.24	48.29

$\delta_1$ : 不育系一般配合力;  $\delta_2$ : 恢复系一般配合力;  $\delta_{12}$ : 不育系和恢复系互作特殊配合力;  $V_g$ : 一般配合力基因型方差;  $V_{g_1}$ : 不育系一般配合力基因型方差;  $V_{g_2}$ : 恢复系一般配合力基因型方差;  $V_s$ : 不育系和恢复系互作特殊配合力基因型方差;  $h_B^2$ : 广义遗传率;  $h_N^2$ : 狭义遗传率

$\delta_1$ : GCA of male sterile line,  $\delta_2$ : GCA of restorer line,  $\delta_{12}$ : SCA of male-sterile line × restorer line,  $V_g$ : Genotypic variance of GCA,  $V_{g_1}$ : Genotypic variance of male sterile line GCA,  $V_{g_2}$ : Genotypic variance of restorer line GCA,  $V_s$ : Genotypic variance of SCA,  $h_B^2$ : Broad heritability,  $h_N^2$ : Narrow heritability

在总酚、总黄酮和花色苷含量性状上,不育系基因型占总方差比值高于恢复系比值,即  $V_{g_1} > V_{g_2}$ ,而双亲在原花青素性状上的 GCA 基因型方差值相近,表明红米杂交组合在总酚、总黄酮和花色苷含量上更依赖不育系的遗传,即不育系的贡献率优于恢复系,而原花青素则由双亲共同作用。由此可见不育系对 4 个抗氧化活性成分的重要作用,育种中要加强母本的选育。

进一步分析红米杂交组合各抗氧化活性成分遗

传率。亲本遗传给后代的能力大小为花色苷 > 总黄酮 > 原花青素 > 总酚,且 4 个抗氧化活性成分的狭义遗传率较低,变幅为 12.99%~48.29%,表明双亲直接遗传给后代的能力低,育种上宜在中、高世代选择才有效。

## 3 讨论

随着人们对红色稻米保健功能的认知逐年提高,红米品种的选育已备受关注<sup>[2,4,13]</sup>。但多数研

究局限于产量与矿质元素、维生素、蛋白质等营养成分含量的提高,对具有保健价值的原花青素、黄酮、生物碱、母育酚和 $\gamma$ -谷维素等抗氧化活性成分遗传研究鲜见报道<sup>[23-24]</sup>。本研究的结果表明:红米杂交稻组合间在总酚、总黄酮、原花青素和花色苷含量上存在明显的遗传差异,受不育系亲本加性和组合间非加性效应共同影响,其中总酚、总黄酮、原花青素含量则以基因非加性效应为主,在育种上,应特别注重组合特殊配合力的筛选。因供试材料和种植环境的差异,不同研究在有色稻上的花色苷遗传方式的结论也不尽相同<sup>[16-17]</sup>。本研究的结果表明,红米杂交稻的花色苷含量介于配组双亲含量之间,是受基因加性效应和基因非加性效应互作的共同影响。

红米杂交组合的总酚、总黄酮和花色苷主要由不育系特性决定,这一结论与杨海亮<sup>[16]</sup>、王强<sup>[17]</sup>和程祖铨等<sup>[18]</sup>关于红、黑米中花色苷、总黄酮含量配合力的研究结果一致,说明杂交稻的育种中应更注重母本选育,而原花青素由配组双亲共同决定。本研究创制的系列红米恢复系,4个抗氧化活性成分一般配合力方差差异不显著,这可能与7个红米恢复系均由<sup>60</sup>Co- $\gamma$ 辐射诱变创制而来,产生的红色种皮突变遗传背景相近的原因所致,但这些恢复系配置的杂交组合均能显著提高后代抗氧化活性成分含量,育种选择上也应加以重视。

4个抗氧化活性成分的狭义遗传率较低,性状由亲本直接遗传给后代的能力较差,育种上宜在中、高世代选择有效。此外,不同亲本对后代的4个抗氧化活性成分含量上的遗传贡献大小不同,且亲本一般配合力的高低与组合特殊配合力优劣之间无直接相关,对不同颜色母本所配红米杂交稻组合的特殊配合力效应值也无明显差异。普通的白米不育系在4种抗氧化活性成分上也具有较高的一般配合力,也能组配出高特殊配合力效应值的红米杂交稻组合,这与王诗文<sup>[11]</sup>、王强<sup>[17]</sup>的研究结果是相符的。因此,在红米杂交稻的品质育种上,应兼顾亲本的一般配合力效应值和组合的特殊配合力,这也是培育高抗氧化活性成分含量红米杂交稻组合的技术关键。

野香A、品红1A在4种抗氧化活性成分含量的一般配合力均呈正向效应,是可以有效提高红米杂交稻4种抗氧化活性成分含量的优异母本。此外,红米恢复系的培育也是实现育种目标的关键,野香A $\times$ 18Rr175、广8A $\times$ 18Rr178两个杂交稻组合

的4个抗氧化活性成分也具较高的特殊配合力效应值,生产应用潜力大。

#### 参考文献

- [1] 丁颖. 中国古代梗籼稻种栽培及分布之探讨与现在栽培稻种分类法预报. 北京: 中国农业出版社, 1983: 49-73  
Ding Y. Discussion on the cultivation and distribution of japonica and indica rice species in ancient China and the forecast of current cultivated rice species classification. Beijing: China Agriculture Press, 1983: 49-73
- [2] 郑呢喃, 吴昊. 浅析红米的营养功能及应用. 食品安全导刊, 2018(25): 64-66  
Zheng N N, Wu H. Analysis on the nutritional function and application of red rice. Food Safety Guide, 2018(25): 64-66
- [3] Ding J Z, Ulanov A V, Dong M Y, Yang T W, Nemzer B V, Xiong S B, Zhao S M, Feng H. Enhancement of gamma-aminobutyric acid (GABA) and other health-related metabolites in germinated red rice (*Oryza sativa* L.) by ultrasonication. Ultrasonics Sonochemistry, 2017, 40: 791-797
- [4] 柏鹤, 马小定, 曹桂兰, 刘宪虎, 韩龙植. 不同类型特种稻种质营养及功能性成分含量的差异. 植物遗传资源学报, 2017, 18(6): 1013-1022  
Bai H, Ma X D, Cao G L, Liu X H, Han L Z. The difference of nutritional and functional components content in different types of special rice. Journal of Plant Genetic Resource, 2017, 18(6): 1013-1022
- [5] 玉万国, 陈云芳, 黎华圣, 王梓成, 卢玉双, 唐小杨. 红米花色苷的制备及对胆固醇消化吸收的影响. 广西科技大学学报, 2018, 29(2): 103-109  
Yu W G, Chen Y F, Li H S, Wang Z C, Lu Y S, Tang X Y. Preparation of red rice anthocyanins and its effect on cholesterol absorption. Journal of Guangxi University of Science and Technology, 2018, 29(2): 103-109
- [6] Callcott E T, Santhakumar A B, Strappe P D, Luo J X, Blanchard C L. Polyphenols from Australian-grown pigmented red and purple rice inhibit adipocyte differentiation. Journal of Cereal Science, 2018, 81: 140-146
- [7] 童继平, 李素敏, 刘学军, 韩傲男. 有色稻米研究进展. 植物遗传资源学报, 2011, 12(1): 13-18  
Tong J P, Li S M, Liu X J, Han A N. Research advance in colored rice. Journal of Plant Genetic Resources, 2011, 12(1): 13-18
- [8] 沈芸. 稻米抗氧化特性的遗传多样性及NIRS测定方法的建立. 杭州: 浙江大学, 2008  
Shen Y. Genetic diversity of antioxidant property among rice grains and their nondestructive predictive methods using near-infrared spectroscopy. Hangzhou: Zhejiang University, 2008
- [9] 袁昭弟. 红米花色苷的着色规律及基因表达研究. 贵阳: 贵州大学, 2019  
Yuan Z D. Study on the coloring regularity and gene expression of anthocyanins in red rice. Guiyang: Guizhou University, 2019
- [10] 陈梦雨, 黄小丹, 王钊, 龙丹凤, 张珂, 王玉. 植物原花青素的研究进展及其应用现状. 中国食物与营养, 2018, 24(3): 54-58  
Chen M Y, Huang X D, Wang Z, Long D F, Zhang K, Wang Y. Research progress and application of plant proanthocyanidin. Food and Nutrition in China, 2018, 24(3): 54-58

- [ 11 ] 王诗文. 稻米花色苷优异种质资源及其杂种优势的研究. 福州: 福建农林大学, 2016  
Wang S W. Studies on excellent germplasm resources of rice anthocyanin and its heterosis. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2016
- [ 12 ] 姜先芽, 黄显良, 黄日亮, 卢希旭, 伍尚信. 广东特种稻研究利用情况. 农业与技术, 2018, 38( 14 ): 41  
Jiang X Y, Huang X L, Huang R L, Lu X X, Wu S X. Research and utilization situation of Guangdong special rice. Agriculture and Technology, 2018, 38( 14 ): 41
- [ 13 ] 周德贵, 周少川, 王重荣, 李宏, 黄道强, 赖穗春, 王志东, 陈宜波, 吴玉坤, 赵雷. 优质红米新品种红丝苗选育经过、特征特性及高产栽培技术. 农业科技通讯, 2018( 10 ): 209-211  
Zhou D G, Zhou S C, Wang C R, Li H, Huang D Q, Lai S C, Wang Z D, Chen Y B, Wu Y K, Zhao L. Breeding process, characteristics and high yield cultivation techniques of a new high-quality red rice variety Hongsimiao. Bulletin of Agricultural Science and Technology, 2018( 10 ): 209-211
- [ 14 ] 林长河, 迟强, 王应培, 王才经. 红米杂交稻新组合特优红 1256 的选育及机插高产栽培技术. 农业科技通讯, 2019( 2 ): 196-198  
Lin C H, Chi Q, Wang Y P, Wang C J. Breeding of a new red rice hybrid combination Teyouhong 1256 and its high yield cultivation technique by mechanical transplanting. Bulletin of Agricultural Science and Technology, 2019( 2 ): 196-198
- [ 15 ] 肖人鹏, 唐永群, 李经勇, 张现伟, 姚雄, 刘强明, 张巫军, 段秀建. 高产优质红米杂交中稻新组合渝优红 9. 杂交水稻, 2019, 34( 5 ): 82-84  
Xiao R P, Tang Y Q, Li J Y, Zhang X W, Yao X, Liu Q M, Zhang W J, Duan X J. Yuyouhong 9, a new medium hybrid rice combination with high yield, good quality and red grain. Hybrid Rice, 2019, 34( 5 ): 82-84
- [ 16 ] 杨海亮. 特种红米杂交稻主要性状杂种优势及配合力遗传分析. 雅安: 四川农业大学, 2011  
Yang H L. Research on the heterosis and combining ability for main traits of special red hybrid rice. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2011
- [ 17 ] 王强. 红米部分性状杂种优势及配合力遗传分析. 雅安: 四川农业大学, 2013  
Wang Q. Research on the heterosis and combining ability of red hybrid rice on some traits. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2013
- [ 18 ] 程祖铤, 黄昕颖, 肖长春, 林荔辉, 许明, 郑金贵. 黑米亲本总黄酮与花色苷配合力及遗传力分析. 西南农业学报, 2019, 32( 8 ): 1687-1691  
Cheng Z X, Huang X Y, Xiao C C, Lin L H, Xu M, Zheng J G. Analysis of combining ability and heritability of total flavonoids and anthocyanins in black rice parents. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2019, 32( 8 ): 1687-1691
- [ 19 ] 邵雅芳. 稻米酚类化合物的鉴定、分布、遗传与相关基因的表达研究. 杭州: 浙江大学, 2014  
Shao Y F. Polyphenols in rice (*Oryza sativa* L.): Identification, distribution, genetics and gene expression. Hangzhou: Zhejiang University, 2014
- [ 20 ] 黄昕颖. 葡萄花青素还原酶( ANR ) 基因遗传转化优质黑米的研究. 福州: 福建农林大学, 2012  
Huang X Y. Study on genetic transformation of grape anthocyanin reductase( ANR ) gene into quality black rice. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2012
- [ 21 ] 谢翠萍. 功能型杂交稻组合抗氧化能力及降血脂活性的研究. 福州: 福建农林大学, 2013  
Xie C P. Study on the antioxidative and hypolipidemic effect of functional hybrid rice combinations. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2013
- [ 22 ] 唐启义. DPS 数据处理系统: 实验设计、统计分析及数据挖掘. 北京: 科学出版社, 2010: 600-603  
Tang Q Y. Data processing system( DPS ): Experimental design, statistical analysis and data mining. Beijing: Science Press, 2010: 600-603
- [ 23 ] 全东兴, 韩龙植, 南钟浩, 元东林. 特种稻种质资源研究进展与展望. 植物遗传资源学报, 2004, 5( 3 ): 227-232  
Quan D X, Han L Z, Nan Z H, Yuan D L. Progress and prospect of germplasm research for special rice. Journal of Plant Genetic Resources, 2004, 5( 3 ): 227-232
- [ 24 ] 郑菲艳, 郑建华, 王洪飞, 朱永生, 游晴如, 周鹏, 陈春霞, 涂诗航, 董瑞霞, 郑家团, 黄庭旭. 中国有色稻米功能性成分遗传与育种研究进展. 福建农业学报, 2021, 36( 1 ): 115-123  
Zheng F Y, Zheng J H, Wang H F, Zhu Y S, You Q R, Zhou P, Chen C X, Tu S H, Dong R X, Zheng J T, Huang T X. Research progress on genetics and breeding of functional components in colored rice. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2021, 36( 1 ): 115-123