

不同类型特种稻种质营养及功能性成分含量的差异

柏鹤^{1,2}, 马小定², 曹桂兰², 刘宪虎¹, 韩龙植²

(¹ 延边大学农学院, 吉林延吉 133002; 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: 本研究以具有有色种皮、巨胚、甜味、香味、糯性等单一特殊性状或 2 个以上特殊性状聚合于一体的新创制特种稻种质 39 份和 1 份白米种质(对照)为试验材料,进行了黑米、黑褐米、红米、香糯米、黑巨胚糯米、红巨胚糯米、巨胚糯米、黑甜米、红甜米、白甜米等不同类型的特种稻种质的营养及功能性成分含量的差异评价。结果表明,供试特种稻类型在大部分氨基酸含量和矿质元素含量上与白米差异不显著,只在个别氨基酸和矿质元素含量上与白米呈显著或极显著差异。黑褐米、红米、黑巨胚糯米、红巨胚糯米、巨胚糯米、红甜米和白甜米等 7 种类型的赖氨酸含量显著或极显著高于白米,高 2.91% ~ 24.68%;黑米、黑褐米、红米、香糯米、黑巨胚糯米和红甜米等 6 种类型的铁含量显著或极显著高于白米,高 17.62% ~ 68.09%;黑褐米、红米、黑巨胚糯米、红巨胚糯米、黑甜米、红甜米、白甜米等 7 种类型的钙含量显著或极显著高于白米,高 23.56% ~ 49.46%;黑米、黑褐米、红米、黑甜米、红甜米、白甜米等 6 种类型的锌含量显著或极显著高于白米,高 12.21% ~ 55.87%。由此表明,具有有色种皮、巨胚、甜味、香味、糯性等单一特殊性状或 2~3 个特殊性状的聚合对赖氨酸含量与铁、钙和锌含量的提高方面具有一定的增加效应,认为在今后以赖氨酸、铁、钙和锌含量为目标性状的功能性水稻育种中,多个特殊性状的聚合将是增加上述功能性成分含量的有效途径之一。通过鉴定评价,从创新种质中还筛选出一些功能性成分含量相对较高的优异种质,白甜米 1553 和红巨胚糯米 1476 的赖氨酸含量较高,比白米分别高 29.37% 和 23.42%;红米 1439 和红米 1440 的铁含量较高,比白米分别高 99.05% 和 80.00%;黑甜米 1511 和黑甜米 1515 的硒含量较高,比白米分别高 194.14% 和 136.48%;白甜米 1551 和香糯米 1446 的 γ -氨基丁酸含量较高,比白米分别高 14.56% 和 11.83%;黑巨胚糯米 1464 和黑米 1432 的花色苷含量较高,比供试 18 份有色稻米的平均值分别高 253.23% 和 248.83%。这些新创制的功能性成分含量较高的水稻种质有待于今后在育种、生态适应性鉴定与产业化中进一步得到利用。

关键词: 特种稻;氨基酸;矿质元素; γ -氨基丁酸;花色苷

The Differences of Nutritional and Functional Components Content in Different Types of Special Rice

BAI He^{1,2}, MA Xiao-ding², CAO Gui-lan², LIU Xian-hu¹, HAN Long-zhi²

(¹ Agricultural College of Yanbian University, Yanji Jilin 133002; ² Institute of Crop Sciences, Chinese Academy of Agricultural Sciences/The National Key Facility for Crop Gene Resources and Genetic Improvement/Key Laboratory of Crop Germplasm Resources and Biotechnology, Ministry of Agriculture, Beijing 100081)

Abstract: The research of special and functional rices has been paid more and more attention by the society, with the development of social economy and the improvement of people's living level, the nutritional and functional components has become one of the important target traits in current rice breeding. The evaluation of nutritional and functional component contents were conducted using newly bred one white rice and 39 accessions of special rices with single or more than two special properties such as fragrance, colored seed coat, giant embryo, sweet and waxy. There are no significant difference in most of the amino acid content and mineral element content between special rices and white

收稿日期: 2017-03-26 修回日期: 2017-04-13 网络出版日期: 2017-10-17

URL: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4996.S.20171017.1057.006.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项目; 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)

第一作者研究方向为水稻新基因发掘与功能性种质创新。E-mail: bh00016@vip.qq.com

通信作者: 韩龙植, 研究方向为水稻新基因发掘与种质创新利用。E-mail: hanlongzhi@caas.cn

刘宪虎, 研究方向为水稻遗传育种。E-mail: liuxh@ybu.edu.cn

rice, while there are significant difference in few amino acids and few mineral elements between special rices and white rice. The lysine content for seven types of special rices including black brown rice, red rice, black giant embryo glutinous rice, red giant embryo glutinous rice, giant embryo glutinous rice, red sweet rice, white sweet rice were significantly higher than white rice for 2.91%-24.68%; the iron content of six types of special rices including black rice, black brown rice, red rice, fragrant glutinous rice, black giant embryo glutinous rice, red sweet rice were significantly higher than white rice for 17.62%-68.09%; the calcium contents for seven types of special rices including black brown rice, red rice, black sweet rice, red sweet rice, white sweet rice were significantly higher than white rice for 23.56%-49.46%; the zinc content for six types of special rices including black rice, black brown rice, red rice, black sweet rice, red sweet rice, white sweet rice were significantly higher than white rice for 12.21%-5.87%. The above shows that there has a certain increasing effect for the content of lysine, iron, calcium and zinc when having a single special trait or aggregating more than two special traits such as colored seed coat, giant embryo, sweetness, fragrance and waxy. Therefore, the aggregation of several special traits will be one of the effective ways to increase the content of lysine, iron, calcium and zinc in the future functional rice breeding. Furthermore, several special rices with higher content of functional components were selected from newly bred germplasms. The lysine content of white sweet rice 1553 and red giant embryo glutinous rice 1476 was 10.22 mg/g and 9.75 mg/g, respectively, higher than white rice for 29.37% and 23.42%, respectively; the iron content of red rice 1439 and red rice 1440 were 20.9 $\mu\text{g/g}$ and 18.9 $\mu\text{g/g}$, respectively, higher than white rice for 99.05% and 80.00%, respectively; the selenium content of black sweet rice 1511 and black sweet rice 1515 were 90.3 ng/g and 72.6 ng/g, respectively, higher than white rice for 194.14% and 136.48%, respectively; γ -aminobutyric acid content of white sweet rice 1551 and fragrant glutinous rice 1446 were 226.6 $\mu\text{g/g}$ and 221.2 $\mu\text{g/g}$, respectively, higher than white rice for 14.56% and 11.83%, respectively; the anthocyanins content of black giant embryo glutinous rice 1464 and black rice 1432 were 53.02 $\mu\text{g/g}$ and 52.36 $\mu\text{g/g}$, respectively, higher than mean value of 18 accessions colored rices tested in this study for 253.23% and 248.83%, respectively. These newly bred special rices having higher functional components will be further used in the future rice breeding, the identification of ecological suitability and industrial development.

Key words: special rice; amino acid; mineral element; γ -aminobutyric acid; anthocyanins

水稻是中国第一大主食作物,其栽培面积约占粮食作物的30%^[1]。中国至今收集保存于国家种质库的水稻种质资源中,黑米、紫米、红米、香米等具有有色种皮、香味等特殊性状的特种稻种质资源约占10%^[2-3]。研究表明^[4-7],特种稻米中含有丰富的氨基酸、蛋白质及人体必需的微量元素,这是特种稻米深受消费者喜欢的原因之一。近20年来,随着社会经济和人们生活水平的提高,消费者越来越追求美味、营养、保健聚合于一体的稻米,对稻米的关注点逐步从特种稻米提升到功能性稻米,因此,稻米营养成分及功能性成分的育种研究倍受育种者的关注,具有香味、黑色种皮、巨胚、甜味等单一性状或聚合2种以上特殊性状的特种稻或功能性水稻的研究结果相继有一些报道。廖江林等^[8]指出,功能性水稻具有稳定的遗传性状,并富含一种或多种营养元素,食用后能够改善人体生理功能。日本针对高血压患者开发出 γ -氨基丁酸(GABA)含量较高的“Haiminori”、“北海269”、“奥羽359”等巨大胚水稻新品种,深受高血压

患者的欢迎^[9-10];韩国从粳稻品种“Hwachungbyeon”诱发突变获得不同类型的巨大胚水稻突变体,其蛋白质、脂肪和维生素含量均较高,且其赖氨酸、生育酚和维生素B1含量明显高于野生型^[11-12]。国内将引种、杂交育种和突变育种相结合,相继培育出富含维生素等生理活性物质、高总糖含量、高赖氨酸、高纤维素、高花色苷含量等多种功能性水稻新品种^[13-14]。进入21世纪,我国将常规育种与生物技术相结合,又先后创制低谷蛋白品种“益肾稻1号”^[15]、低水溶性蛋白品种“康盾1号”^[16]、富硒米“粤航1号”^[17]、富铁米“黑优粘3号”^[18]、巨胚水稻“胚水稻蛋白”^[19]、紫米“晚粳紫宝”^[20]、黑米“云谷1号”^[21]、高花色苷稻“花色苷稻”^[22]、高抗性淀粉稻“功米3号”^[23]等一系列特种稻或功能性水稻新品种,并在水稻生产上得到推广应用,为稻米产业化发展与稻米消费者健康水平的提高发挥了积极的作用。然而,关于不同类型的特种稻种质间营养及功能性成分含量的差异评价方面至今报道很少。本研

究通过对新创制的不同类型特种稻种质的氨基酸、矿质元素、 γ -氨基丁酸、花色苷等营养及功能性成分含量的差异评价,阐明特殊性状的聚合对营养及功能性成分含量的影响,并从中筛选出营养及功能性成分含量较高的特种稻种质,为今后营养及功能性成分育种提供有效的科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试材料是中国农业科学院作物科学研究所将常规杂交与系谱选择相结合,经南繁加代和多代严格

选择而创制的特种稻种质 40 份,包括黑色种皮与香味聚合于一体的黑香米 1 份;种皮呈黑色的黑米 3 份;种皮呈黑褐色的黑褐米 2 份;种皮呈红色的红米 4 份;香味与糯性聚合于一体的香糯米 2 份;黑色种皮、巨胚和糯性聚合于一体的黑巨胚糯米 6 份;红色种皮、巨胚和糯性聚合于一体的红巨胚糯米 6 份;巨胚与糯性聚合于一体的巨胚糯米 4 份;黑色种皮与甜味聚合于一体的黑甜米 4 份;红色种皮与甜味聚合于一体的红甜米 4 份;稻米呈甜味的白甜米种质 3 份;白米种质 1 份(对照)。黑甜米、红甜米和白甜米种质的糙米表面呈皱状,糙米粒的厚度薄(图 1)。



1:白米;2:黑巨胚糯米;3:香糯米;4:红米;5:黑褐米;6:黑米;7:白甜米;8:红甜米;9:黑甜米;10:巨胚糯米;11:红巨胚糯米
1: White rice, 2: Black giant embryo glutinous rice, 3: Fragrant glutinous rice, 4: Red rice, 5: Dark brown rice, 6: Black rice,
7: White sweet rice, 8: Red sweet rice, 9: Black sweet rice, 10: Giant embryo glutinous rice, 11: Red giant embryo glutinous rice

图 1 不同类型特种稻的糙米粒外观

Fig. 1 The grain appearance of brown rice for different types of special rice

1.2 田间种植

2015 年将新创制的 40 份水稻种质种植于中国农业科学院作物科学研究所试验基地。4 月 20 日播种,5 月 20 日插秧,插秧规格 25 cm × 15 cm,3 行小区,行长 5 m。氮、磷(N、P₂O₅)施用量分别为 120 kg/hm²和 60 kg/hm²。成熟后,及时收获脱粒;经晾晒干燥后,保存于通风良好的阴凉处。放置 10 个月后,用作分析原料。

1.3 糙米外观性状测量与营养及功能性成分含量分析

利用种子大米外观品质检测分析仪(万深 SC-G 型)测定糙米的长度、宽度和厚度;利用游标卡尺测量胚的长度,每份材料测 10 粒;挑选饱满糙米 1000 粒,2 次重复,称其重量,其平均值即为千粒重。利用氨基酸自动分析仪(Hitachi L-8800)测定氨基酸含量;利用原子荧光光度计(AFS-2201)测定硒含量;利用电感耦合等离子体原子发射光谱法(Model 8440)测定铁、锌等矿质元素含量;利用高效液相色谱仪(LC-20A)测定 γ -氨基丁酸含量;利用原子吸

收分光光度计(SOLLAA M6)测定花色苷含量。

2 结果与分析

2.1 糙米外观性状

糙米外观性状的调查结果列于表 1。糙米长度变异在 6.67 ~ 9.52 mm 之间,均属于中或长粒形。糙米长宽比变异在 1.97 ~ 3.19 之间,其中香糯米 1448、巨胚糯米 1497、黑褐米 1438、香糯米 1446、白甜米 1553、巨胚糯米 1496、红甜米 1544、黑甜米 1516、红甜米 1537、巨胚糯米 1486 的长宽比在 1.97 ~ 2.19 之间,属于阔卵形;红米 1439 的长宽比为 3.19,属于中长形;其余的糙米长宽比变异在 2.21 ~ 2.75 之间,属于椭圆形。糙米的厚度变异在 1.56 ~ 2.25 mm 之间,其中甜米类型的厚度均较薄,表面呈皱状。甜米类型中,厚度最小的是黑甜米 1516,只有 1.56 mm,最大的是白甜米 1551 和红甜米 1544,其厚度为 1.84 mm,甜米类型的糙米厚度只有白米的 71.6% ~ 84.4%。糙米千粒重变异在 12.77 ~ 27.32 g 之间,其中香糯米 1446 和香糯米 1448

表 1 新创制的特种稻种质糙米外观性状

Table 1 Grain size and shape of brown rice for newly bred special rice

材料名称 Name of materials	长度 宽度 长宽比 厚度 千粒重 胚长					材料名称 Name of materials	长度 宽度 长宽比 厚度 千粒重 胚长						
	(mm)	(mm)	LWR	TN	(g)		(mm)	(mm)	LWR	TN	(g)	(mm)	
黑香米 1424 Black and fragrant rice 1424	7.26	3.09	2.31	1.99	15.68	1.62	红巨胚糯米 1472 Red giant embryo glutinous rice 1472	9.04	3.95	2.27	2.00	18.41	2.40
黑米 1426 Black rice 1426	8.18	3.73	2.26	2.10	21.30	1.61	红巨胚糯米 1474 Red giant embryo glutinous rice 1474	9.19	4.04	2.28	1.91	17.35	2.22
黑米 1428 Black rice 1428	6.67	3.02	2.28	1.99	15.83	1.67	红巨胚糯米 1476 Red giant embryo glutinous rice 1476	8.76	3.84	2.25	1.84	16.65	2.22
黑米 1432 Black rice 1432	8.05	3.42	2.41	2.00	18.89	1.68	红巨胚糯米 1480 Red giant embryo glutinous rice 1480	9.36	4.16	2.25	1.94	20.22	2.14
黑褐米 1437 Dark brown rice 1437	7.19	3.18	2.46	2.08	16.71	1.67	巨胚糯米 1486 Giant embryo glutinous rice 1486	8.60	4.08	2.19	2.18	20.85	2.45
黑褐米 1438 Dark brown rice 1438	8.49	4.12	2.08	2.19	24.70	1.78	巨胚糯米 1496 Giant embryo glutinous rice 1496	8.38	3.96	2.13	2.22	19.65	2.44
红米 1439 Red rice 1439	8.45	2.96	3.19	1.90	16.17	1.68	巨胚糯米 1497 Giant embryo glutinous rice 1497	8.11	4.06	2.00	2.14	18.97	2.21
红米 1440 Red rice 1440	9.24	3.81	2.44	1.86	19.21	1.73	巨胚糯米 1498 Giant embryo glutinous rice 1498	9.16	4.12	2.31	1.98	21.63	2.37
红米 1441 Red rice 1441	7.77	3.19	2.75	1.99	15.59	1.67	黑甜米 1511 Black sweet rice 1511	9.50	4.23	2.23	1.79	18.29	1.71
红米 1442 Red rice 1442	8.40	3.47	2.67	1.94	17.21	1.73	黑甜米 1515 Black sweet rice 1515	9.52	3.98	2.36	1.74	17.03	1.62
香糯米 1446 Fragrant glutinous rice 1446	8.83	4.21	2.10	2.22	25.63	1.54	黑甜米 1516 Black sweet rice 1516	8.67	3.97	2.16	1.56	13.10	1.73
香糯米 1448 Fragrant glutinous rice 1448	8.64	4.41	1.97	2.25	27.32	1.60	黑甜米 1521 Black sweet rice 1521	9.17	4.10	2.24	1.60	13.15	1.74
黑巨胚糯米 1454 Black giant embryo glutinous rice 1454	8.57	3.84	2.21	1.92	17.30	2.54	红甜米 1534 Red sweet rice 1534	8.82	3.77	2.38	1.64	12.77	1.73
黑巨胚糯米 1460 Black giant embryo glutinous rice 1460	8.80	3.82	2.37	1.88	16.69	2.38	红甜米 1537 Red sweet rice 1537	8.39	3.86	2.18	1.74	13.09	1.71
黑巨胚糯米 1463 Black giant embryo glutinous rice 1463	8.70	3.71	2.43	1.93	17.44	2.57	红甜米 1544 Red sweet rice 1544	8.35	3.89	2.13	1.84	13.84	1.63
黑巨胚糯米 1464 Black giant embryo glutinous rice 1464	8.82	3.71	2.39	1.98	18.44	2.53	红甜米 1545 Red sweet rice1545	9.18	4.21	2.22	1.78	16.96	1.73
黑巨胚糯米 1466 Black giant embryo glutinous rice 1466	8.14	3.58	2.28	1.92	16.79	2.41	白甜米 1551 White sweet rice 1551	8.06	3.72	2.21	1.84	15.08	1.90
黑巨胚糯米 1468 Black giant embryo glutinous rice 1468	8.76	3.66	2.39	1.88	17.31	2.12	白甜米 1553 White sweet rice 1553	8.93	4.21	2.13	1.69	15.46	1.76
红巨胚糯米 1470 Red giant embryo glutinous rice 1470	7.92	3.60	2.24	1.90	15.81	2.25	白香米 1555 White fragrant rice 1555	9.22	3.58	2.61	2.07	21.25	1.81
红巨胚糯米 1471 Red giant embryo glutinous rice 1471	8.85	3.90	2.30	1.96	17.58	2.26	白米 1561 White rice 1561	7.83	3.35	2.32	2.18	19.20	1.85

LH: Length, WH: Width, LWR: Length-width ratio, TN: Thickness, GW: Grain weight, LE: Length of embryo

的千粒重较大,分别为 25.63 g 和 27.32 g;红甜米 1534、红甜米 1537 和黑甜米 1516 的千粒重较小,分别为 12.77 g、13.09 g 和 13.10 g,为白米的 66.5% ~ 68.2%。胚的长度变异在 1.54 ~ 2.57 mm 之间,不同种质类型间存在很大差异。其中,巨胚糯米类型的胚长较大,其长度为 2.12 ~ 2.57 mm,为白米的 115% ~ 139%。

2.2 不同类型特种稻种质氨基酸含量的差异

按黑米、黑褐米、红米、香糯米、黑巨胚糯米、红巨胚糯米、巨胚糯米、黑甜米、红甜米、白甜米、白米类型为单位计算各氨基酸及总氨基酸含量的平均值列于表 2。由表 2 可见,在 10 种特种稻类型中,白甜米的氨基酸含量最丰富,其天冬氨酸、谷氨酸、精氨酸、丙氨酸、缬氨酸、苯丙氨酸、亮氨酸和赖氨酸等 8 种氨基酸的含量均显著或极显著高于白米,其总氨基酸含量极显著高于白米。红米、香糯米、黑巨胚糯米、黑甜米等 4 种类型的酪氨酸含量显著高于白米,比白米高 5.06% ~ 8.69%;其中,红米类型的酪氨酸含量最高,为 9.01 mg/g,比白米高 8.69%。黑褐米、红米、黑巨胚糯米、红巨胚糯米、巨胚糯米、红甜米和白甜米等 7 种类型的赖氨酸含量显著或极显著高于白米,比白米高 2.91% ~ 24.68%;其中,红甜米和白甜米类型的赖氨酸含量较高,分别为 9.21 mg/g 和 9.85 mg/g,比白米分别高 16.58% 和 24.68%。只有红米的脯氨酸含量显著高于白米,比白米高 13.66%。以上分析表明,具有种皮色、大胚、甜味和糯性等单一性状或 2~3 个特殊性状聚合于一体的特种稻类型在大部分氨基酸含量上与白米没有显著差异,但在赖氨酸含量的提高方面有一定的增加效应。

在供试材料中挑选部分氨基酸含量较高的 5 份种质按高低顺序列于表 3。赖氨酸含量较高材料有白甜米 1553、红巨胚糯米 1476、黑甜米 1516、白甜米 1551 和红甜米 1544,其赖氨酸含量为 9.38 ~ 10.22 mg/g,比白米(表 2,下同)高 18.73% ~ 29.37%;酪氨酸含量较高的材料有红巨胚糯米 1476、红米 1439、黑巨胚糯米 1463、黑巨胚糯米 1460 和红米 1440,其酪氨酸含量为 9.03 ~ 9.53 mg/g,比白米高 8.93% ~ 14.96%;脯氨酸含量较高的材料有黑褐米 1438、黑甜米 1516、红米 1440、巨胚糯米 1498 和红米 1441,其脯氨酸含量为 5.36 ~ 5.61 mg/g,比白米高 12.61% ~ 17.86%;苏氨酸含量较高的材料有黑甜米 1516、红巨胚糯米 1476、黑甜米 1521、红米 1439 和红甜米 1545,其苏

氨酸含量为 6.98 ~ 7.30 mg/g,比白米高 4.81% ~ 9.61%;缬氨酸含量较高的材料有黑甜米 1521、红巨胚糯米 1476、红甜米 1545、黑甜米 1516 和黑巨胚糯米 1464,其缬氨酸含量为 11.51 ~ 12.73 mg/g,比白米高 3.60% ~ 14.58%;异亮氨酸含量较高的材料有红巨胚糯米 1476、红米 1439、黑甜米 1516、红甜米 1534 和黑巨胚糯米 1464,其异亮氨酸含量为 8.92 ~ 9.82 mg/g,比白米高 1.71% ~ 11.97%;亮氨酸含量较高的材料有红巨胚糯米 1476、红米 1439、黑甜米 1521、黑巨胚糯米 1464 和白甜米 1553,其亮氨酸含量为 13.18 ~ 14.76 mg/g,比白米高 9.47% ~ 22.59%;苯丙氨酸含量较高的材料有甜黑米 1516、红巨胚糯米 1476、黑巨胚糯米 1460、红米 1439 和红甜米 1534,其苯丙氨酸含量为 7.76 ~ 8.21 mg/g,比白米高 6.59% ~ 12.77%。

2.3 不同类型特种稻种质矿质元素含量差异

按黑米、黑褐米、红米、香糯米、黑巨胚糯米、红巨胚糯米、巨胚糯米、黑甜米、红甜米、白甜米、白米为单位计算各矿质元素含量的平均值,列于表 4。由表 4 可见,黑米、红巨胚糯米、巨胚糯米和黑甜米等 4 种类型的硒含量显著或极显著高于白米,其含量为 47.53 ~ 64.85 ng/g,比白米高 54.82% ~ 111.24%。黑米、黑褐米、红米、香糯米、黑巨胚糯米和红甜米等 6 种类型的铁含量显著或极显著高于白米,其含量为 12.35 ~ 17.65 $\mu\text{g/g}$,比白米高 17.62% ~ 68.09%;其中,红米和黑褐米的铁含量较高,分别为 17.65 $\mu\text{g/g}$ 和 14.55 $\mu\text{g/g}$,比白米分别高 68.09% 和 38.57%。黑米、黑褐米、红米、黑甜米、红甜米、白甜米等 6 种类型的锌含量显著或极显著高于白米,其含量为 23.90 ~ 33.20 $\mu\text{g/g}$,比白米高 12.21% ~ 55.87%。只有白甜米类型的镁含量显著高于白米,其含量为 2043.55 $\mu\text{g/g}$,比白米高 12.48%。黑褐米、红米、黑巨胚糯米、红巨胚糯米、黑甜米、红甜米、白甜米等 7 种类型的钙含量显著或极显著高于白米,其含量为 144.20 ~ 174.42 $\mu\text{g/g}$,比白米高 23.56% ~ 49.46%。只有红甜米和白甜米的锰含量显著高于白米,其含量为 25.30 ~ 26.38 $\mu\text{g/g}$,比白米高 59.12% ~ 65.91%。黑米、红米、黑甜米和红甜米等 4 种类型的铜含量显著高于白米,其含量为 3.63 ~ 4.70 $\mu\text{g/g}$,比白米高 45.2% ~ 88.0%。以上分析表明,具有有色种皮、巨胚、甜味、糯性等单一特性或 2~3 个特性聚合于一体的特种稻,其对多数矿质元素含量未见有增加效应,但对铁、锌和钙的含量有一定的增加效应。

表 2 新创制的特种稻种质各种氨基酸含量的平均值

Table 2 Average content of amino acid for newly bred special rice																
种质类型 Type of materials	天冬 氨酸 Asn	谷氨酸 Glu	丝氨酸 Ser	组氨酸 His	甘氨酸 Gly	苏氨酸 Thr	精氨酸 Arg	丙氨酸 Ala	酪氨酸 Tyr	缬氨酸 Val	异亮 氨酸 Ile	苯丙 氨酸 Phe	亮氨酸 Leu	赖氨酸 Lys	脯氨酸 Pro	总氨基 酸含量 TCAA
黑米 Black rice	9.16 ^{ns}	21.69 ^{ns}	8.67 ^{ns}	6.38 ^{ns}	7.15 [*]	6.33 ^{ns}	12.51 ^{ns}	9.66 ^{ns}	8.31 ^{ns}	10.28 ^{ns}	7.76 ^{ns}	7.22 ^{ns}	10.95 ^{ns}	8.07 ^{ns}	4.78 ^{ns}	137.62 ^{ns}
黑褐米 Dark brown rice	9.20 ^{ns}	22.55 [*]	8.63 ^{**}	6.39 ^{**}	7.24 ^{**}	6.37 ^{ns}	12.29 [*]	8.28 [*]	8.51 ^{ns}	9.64 [*]	8.08 ^{ns}	6.99 ^{ns}	11.86 ^{ns}	8.13 [*]	5.28 ^{ns}	139.40 ^{**}
红米 Red rice	9.52 ^{ns}	23.51 ^{ns}	9.15 ^{ns}	6.80 ^{ns}	7.77 ^{ns}	6.73 ^{ns}	13.69 ^{ns}	9.78 ^{ns}	9.01 [*]	10.70 ^{ns}	8.42 ^{ns}	7.48 ^{ns}	12.25 ^{ns}	8.57 [*]	5.41 [*]	148.76 ^{ns}
香糯米 Fragrant glutinous rice	8.74 ^{ns}	23.24 ^{ns}	8.81 [*]	6.52 ^{ns}	7.45 ^{ns}	6.41 ^{ns}	13.71 ^{ns}	9.54 ^{ns}	8.76 [*]	10.20 ^{**}	7.98 ^{**}	7.00 [*]	11.01 ^{ns}	8.03 ^{ns}	4.67 ^{ns}	142.05 ^{ns}
黑巨胚糯米 Black giant embryo glutinous rice	9.83 ^{ns}	23.23 ^{ns}	9.31 ^{ns}	6.68 ^{ns}	7.77 ^{ns}	6.65 ^{ns}	13.70 ^{ns}	9.82 ^{ns}	8.71 [*]	10.35 ^{ns}	8.30 ^{ns}	7.20 ^{ns}	11.61 ^{ns}	8.81 [*]	5.05 ^{ns}	147.00 ^{ns}
红巨胚糯米 Red giant embryo glutinous rice	9.25 ^{ns}	23.11 ^{ns}	9.29 ^{ns}	6.52 ^{ns}	7.67 ^{ns}	6.74 ^{ns}	13.35 ^{ns}	9.65 ^{ns}	8.43 ^{ns}	10.34 ^{ns}	8.45 ^{ns}	7.12 ^{ns}	11.67 ^{ns}	8.43 [*]	4.92 ^{ns}	144.95 ^{ns}
巨胚糯米 Giant embryo glutinous rice	8.43 ^{ns}	22.89 ^{ns}	8.95 [*]	6.57 ^{ns}	7.61 ^{ns}	6.68 ^{ns}	13.47 ^{ns}	9.59 ^{ns}	8.59 ^{ns}	10.50 ^{ns}	8.31 ^{ns}	7.04 ^{ns}	11.24 [*]	8.58 [*]	5.05 ^{ns}	143.48 ^{ns}
黑甜米 Black sweet rice	9.79 ^{ns}	24.18 ^{ns}	9.75 ^{ns}	6.83 ^{ns}	7.72 ^{ns}	7.05 ^{ns}	13.99 ^{ns}	10.26 ^{ns}	8.82 [*]	11.44 ^{ns}	8.53 ^{ns}	7.57 ^{ns}	12.07 ^{ns}	8.25 ^{ns}	5.14 ^{ns}	151.37 ^{ns}
红甜米 Red sweet rice	9.95 [*]	22.6 ^{ns}	9.81 ^{ns}	6.71 ^{ns}	7.72 ^{ns}	6.86 ^{ns}	13.76 ^{ns}	10.10 ^{ns}	8.47 ^{ns}	11.01 ^{ns}	8.52 ^{ns}	7.59 [*]	12.25 ^{ns}	9.21 ^{**}	5.08 ^{ns}	149.62 ^{ns}
白甜米 White sweet rice	10.33 ^{**}	25.03 ^{**}	10.02 ^{ns}	6.83 ^{ns}	8.09 ^{ns}	6.73 ^{ns}	14.97 ^{**}	10.62 [*]	8.50 ^{ns}	11.29 [*]	8.70 ^{ns}	7.62 ^{**}	12.93 ^{**}	9.85 ^{**}	5.06 ^{ns}	156.53 ^{**}
白米 White rice	9.53	23.52	10.23	6.72	7.98	6.66	13.6	9.81	8.29	11.11	8.77	7.28	12.04	7.90	4.76	147.20

* , ** : t-测验结果, 分别表示与白米呈显著和极显著差异; ns: 表示与白米呈无显著差异, 下同

* , ** : Indicate there are significant difference with white rice in 0.05 and 0.01 level by t-test; ns: Indicate there are not significant difference with white rice, the same as below. TCAA: Total content of amino acid

表 3 氨基酸含量较高的部分特种稻种质

Table 3 Some special rices with higher content of amino acid (mg/g)

氨基酸种类 Species of amino acid	材料名称、氨基酸含量及排序 Name of materials, its amino acid content and its order				
	1	2	3	4	5
赖氨酸 Lys	白甜米 1553 10. 22	红巨胚糯米 1476 9. 75	黑甜米 1516 9. 52	白甜米 1551 9. 47	红甜米 1544 9. 38
酪氨酸 Tyr	红巨胚糯米 1476 9. 53	红米 1439 9. 34	黑巨胚糯米 1463 9. 24	黑巨胚糯米 1460 9. 05	红米 1440 9. 03
脯氨酸 Pro	黑褐米 1438 5. 61	黑甜米 1516 5. 57	红米 1440 5. 56	红米 1441 5. 48	巨胚糯米 1498 5. 36
苏氨酸 Thr	黑甜米 1516 7. 30	红巨胚糯米 1476 7. 20	黑甜米 1521 7. 15	红米 1439 7. 14	红甜米 1545 6. 98
缬氨酸 Val	黑甜米 1521 12. 73	红巨胚糯米 1476 12. 66	红甜米 1545 11. 97	黑甜米 1516 11. 67	黑巨胚糯米 1464 11. 51
异亮氨酸 Ile	红巨胚糯米 1476 9. 82	红米 1439 9. 11	黑甜米 1516 9. 00	红甜米 1534 8. 94	黑巨胚糯米 1464 8. 92
亮氨酸 Leu	红巨胚糯米 1476 14. 76	红米 1439 13. 79	黑甜米 1521 13. 75	黑巨胚糯米 1464 13. 37	白甜米 1553 13. 18
苯丙氨酸 Phe	黑甜米 1516 8. 21	红巨胚糯米 1476 8. 16	黑巨胚糯米 1460 7. 93	红米 1439 7. 90	红甜米 1534 7. 76

表 4 新创制的特种稻种质矿质元素含量平均值

Table 4 Average content of mineral element for newly bred special rice

种质类型 Type of materials	硒 (ng/g) Se	铁 (μg/g) Fe	锌 (μg/g) Zn	镁 (μg/g) Mg	钙 (μg/g) Ca	锰 (μg/g) Mn	铜 (μg/g) Cu
黑米 Black rice	63. 60 **	13. 80 *	27. 00 **	1841. 90 ^{ns}	140. 00 ^{ns}	15. 80 ^{ns}	4. 30 *
黑褐米 Dark brown rice	34. 55 ^{ns}	14. 55 **	26. 85 *	1811. 20 ^{ns}	144. 20 *	14. 00 ^{ns}	3. 25 ^{ns}
红米 Red rice	35. 35 ^{ns}	17. 65 **	33. 20 *	1799. 38 ^{ns}	155. 50 *	20. 63 ^{ns}	3. 63 *
香糯米 Fragrant glutinous rice	29. 50 ^{ns}	12. 70 **	19. 85 ^{ns}	1789. 55 ^{ns}	126. 60 ^{ns}	14. 50 ^{ns}	3. 20 ^{ns}
黑巨胚糯米 Black giant embryo glutinous rice	40. 50 ^{ns}	12. 35 *	22. 02 ^{ns}	2015. 08 ^{ns}	174. 42 *	20. 68 ^{ns}	3. 10 ^{ns}
红巨胚糯米 Red giant embryo glutinous rice	55. 47 **	9. 70 ^{ns}	22. 83 ^{ns}	1702. 97 ^{ns}	173. 45 *	20. 67 ^{ns}	3. 90 ^{ns}
巨胚糯米 Giant embryo glutinous rice	47. 53 *	8. 10 **	23. 10 ^{ns}	1815. 50 ^{ns}	124. 00 ^{ns}	16. 68 ^{ns}	3. 70 ^{ns}
黑甜米 Black sweet rice	64. 85 *	11. 00 ^{ns}	29. 68 **	1985. 35 ^{ns}	153. 95 *	23. 68 ^{ns}	4. 70 *
红甜米 Red sweet rice	41. 65 ^{ns}	12. 98 *	24. 43 *	1854. 58 ^{ns}	170. 25 **	26. 38 *	3. 80 *
白甜米 White sweet rice	21. 80 ^{ns}	11. 20 ^{ns}	23. 90 *	2043. 55 *	153. 30 *	25. 30 *	3. 50 ^{ns}
白米 White rice	30. 70	10. 50	21. 30	1816. 80	116. 70	15. 90	2. 50

在供试材料中挑选各矿质元素含量较高的 5 份种质按高低顺序列于表 5。铁含量较高的材料有红米 1439、红米 1440、红米 1442、黑褐米 1437 和黑米 1432,铁含量为 15. 5 ~ 20. 9 μg/g,比白米高 47. 62% ~ 99. 05%;其中,红米 1439 的铁含量最高(20. 9 μg/g),约为白米的 2 倍。锌含量较高的有红米 1439、黑甜米 1511、巨胚糯米 1498、黑甜米 1516 和黑褐米 1438,锌含量为 29. 0 ~ 64. 9 μg/g,比白米高 36. 15% ~ 204. 69%;其中,红米 1439 的锌含

量最高(64. 9 μg/g),为白米的 3 倍以上。铜含量较高的材料有黑甜米 1511、黑甜米 1515、黑米 1432、巨胚糯米 1498 和红巨胚糯米 1472,其含量为 4. 9 ~ 6. 0 μg/g,为白米的 1. 96 ~ 2. 40 倍;锰含量较高的材料有红甜米 1537、黑甜米 1516、红巨胚糯米 1474、白甜米 1553 和红甜米 1545,其含量为 27. 5 ~ 30. 5 μg/g,比白米高 72. 96% ~ 91. 82%;钙含量较高的材料有红巨胚糯米 1474、黑巨胚糯米 1460、黑巨胚糯米 1463、黑巨胚糯米 1466 和白甜米 1553,其

含量为 192.0 ~ 263.2 $\mu\text{g/g}$, 比白米高 64.52% ~ 125.53%; 镁含量较高的材料有黑巨胚糯米 1464、黑甜米 1521、红米 1439、白甜米 1553 和黑巨胚糯米 1460, 其含量为 2099.4 ~ 2326.2 $\mu\text{g/g}$, 比白米高

15.55% ~ 28.04%; 硒含量较高的材料有黑甜米 1511、黑甜米 1515、黑米 1432、黑米 1426 和黑巨胚糯米 1468, 其含量为 66.0 ~ 90.3 ng/g , 比白米高 114.98% ~ 194.14%。

表 5 矿质元素含量较高的特种稻种质

Table 5 The special materials selected with higher content of mineral element

矿质元素 Mineral element	材料名称、矿质元素含量及排序 Name of materials, its mineral element content and its order				
	1	2	3	4	5
铁 Fe($\mu\text{g/g}$)	红米 1439 20.9	红米 1440 18.9	红米 1442 15.9	黑褐米 1437 15.6	黑米 1432 15.5
锌 Zn($\mu\text{g/g}$)	红米 1439 64.9	黑甜米 1511 33.4	巨胚糯米 1498 30.3	黑甜米 1516 29.9	黑褐米 1438 29.0
铜 Cu($\mu\text{g/g}$)	黑甜米 1511 6.0	黑甜米 1515 5.8	黑米 1432 5.1	巨胚糯米 1498 4.9	红巨胚糯米 1472 4.9
锰 Mn($\mu\text{g/g}$)	红甜米 1537 30.5	黑甜米 1516 29.4	红巨胚糯米 1474 29.0	白甜米 1553 27.6	红甜米 1545 27.5
钙 Ca($\mu\text{g/g}$)	红巨胚糯米 1474 263.2	黑巨胚糯米 1460 227.8	黑巨胚糯米 1463 208.1	黑巨胚糯米 1466 207.6	白甜米 1553 192.0
镁 Mg($\mu\text{g/g}$)	黑巨胚糯米 1464 2326.2	黑甜米 1521 2137.0	红米 1439 2135.7	白甜米 1553 2114.3	黑巨胚糯米 1460 2099.4
硒 Se(ng/g)	黑甜米 1511 90.3	黑甜米 1515 72.6	黑米 1432 69.7	黑米 1426 68.8	黑巨胚糯米 1468 66.0

2.4 不同类型特种稻种质 γ -氨基丁酸含量差异

按黑米、黑褐米、红米、香糯米、黑巨胚糯米、红巨胚糯米、巨胚糯米、黑甜米、红甜米、白甜米、白米为单位计算 γ -氨基丁酸含量的平均值(表 6)。结果表明,多数类型特种稻的 γ -氨基丁酸含量与白米差异不显著,只有白甜米、香糯米、巨胚糯米等 3 种类型的 γ -氨基丁酸含量显著或极显著高于白米类型,其

含量为 21.08 ~ 21.92 $\text{mg}/100\text{g}$, 比白米高 6.57% ~ 10.82%。在供试材料中,白甜米 1551、香糯米 1446、黑巨胚糯米 1468、巨胚糯米 1486 和香糯米 1448 的 γ -氨基丁酸含量较高,其含量分别为 22.66、22.12、21.99、21.75、21.60 $\text{mg}/100\text{g}$, 比白米高 9.20% ~ 14.56%。

表 6 不同类型特种稻种质 γ -氨基丁酸含量和花色苷含量的平均值

Table 6 The average of γ -aminobutyric acid content(γ -AAC) and anthocyanin content(AC) for various type of special rices

材料类型 Type of materials	γ -氨基丁酸含量 ($\text{mg}/100\text{g}$) γ -AAC	材料类型 Type of materials	花色苷含量 ($\mu\text{g/g}$) AC
黑米 Black rice	17.49 ^{ns}	黑米 Black rice	24.08
黑褐米 Dark brown rice	18.88 ^{ns}	黑褐米 Dark brown rice	1.82
红米 Red rice	19.71 ^{ns}	黑巨胚糯米 Black giant embryo glutinous rice;	17.68
香糯米 Fragrant glutinous rice	21.86 ^{**}	红巨胚糯米 Red giant embryo glutinous rice	24.05
黑巨胚糯米 Black giant embryo glutinous rice	20.87 ^{ns}	黑甜米 Black sweet rice	14.24
红巨胚糯米 Red giant embryo glutinous rice	19.77 ^{ns}	红甜米 Red sweet rice	0.23
巨胚糯米 Giant embryo glutinous rice	21.08 [*]		
黑甜米 Black sweet rice	19.85 ^{ns}		
红甜米 Red sweet rice	19.00 ^{ns}		
白甜米 White sweet rice	21.92 [*]		
白米 White rice	19.78		

2.5 不同类型特种稻种质花色苷含量差异

按黑米、黑褐米、黑巨胚糯米、红巨胚糯米、黑甜米、红甜米为单位计算花色苷含量的平均值,列于表6。在上述几种类型有色稻米中,黑米和红巨胚糯米的花色苷含量较高,分别为 24.08 $\mu\text{g/g}$ 和 24.05 $\mu\text{g/g}$ 。在测定花色苷含量的 18 份材料中,黑巨胚糯米 1464、黑米 1432、黑甜米 1516、红巨胚糯米 1480 和黑巨胚糯米 1460 的花色苷含量较高,分别为 53.02、52.36、44.24、24.05 和 15.86 $\mu\text{g/g}$,比所测定 18 份有色稻的花色苷含量平均值分别高 253.23%、248.83%、194.74%、60.23% 和 5.66%。

3 讨论

3.1 不同类型特种稻种质氨基酸含量的差异

本研究对不同类型特种稻种质的氨基酸含量分析表明,供试特种稻类型的大部分氨基酸含量与白米差异不显著,只在个别氨基酸含量上与白米类型表现为显著差异。红米、香糯米、黑巨胚糯米、黑甜米等 4 种类型的酪氨酸含量显著高于白米,红米的脯氨酸含量显著高于白米,而黑褐米、红米、黑巨胚糯米、红巨胚糯米、巨胚糯米、红甜米和白甜米等 7 种类型的赖氨酸含量显著或极显著高于白米。这表明具有种皮色、大胚、甜味和糯性等单一性状或聚合 2~3 个特殊性状的聚合虽然对多数氨基酸含量未见效应,但对赖氨酸含量的提高方面具有一定的增加效应,这与韩龙植等^[1]的研究报道较一致。有研究报道^[24],黑米和香米品种的氨基酸组成较为平衡合理,必需氨基酸含量比例较高,黑米的 18 种氨基酸含量比普通籼米和粳米高 10.0%~60.0%,香米比普通籼米和粳米高 14.3%~28.4%。张名位^[24]和高如嵩^[25]研究报道,黑米的各种氨基酸含量明显高于普通稻米;张标金等^[26]研究报道,巨胚稻的氨基酸含量普遍高于普通稻米。本研究还表明,白甜米 1553、红巨胚糯米 1476 和黑甜米 1516 的赖氨酸含量较高;红巨胚糯米 1476、红米 1439 和黑巨胚糯米 1463 的酪氨酸含量较高;黑褐米 1438、黑甜米 1516 和红米 1440 的脯氨酸含量较高。这些材料可在今后水稻功能稻育种中作为亲本利用,并有待于其他特性的鉴定与产业化开发利用。

3.2 不同类型特种稻种质矿质元素含量差异

本研究对不同类型特种稻种质的矿质元素含量分析表明,黑米、红巨胚糯米和黑甜米等 3 种类型的硒含量显著或极显著高于白米,黑米、红米、黑甜米和红甜米等 4 种类型的铜含量显著高于白米,而黑

米、黑褐米、红米、黑甜米、红甜米、白甜米等 6 种类型的锌含量显著或极显著高于白米,黑米、黑褐米、红米、香糯米、黑巨胚糯米和红甜米等 6 种类型铁含量显著或极显著高于白米,黑褐米、红米、黑巨胚糯米、红巨胚糯米、黑甜米、红甜米和白甜米等 7 种类型的钙含量显著或极显著高于白米。这表明具有有色种皮、巨胚、甜味、糯性等单一特性或 2~3 个特性的聚合虽然对多数矿质元素含量未见效应,但对铁、锌和钙含量的提高具有一定的增加效应。裘凌沧等^[27]对 9 个黑米品种、33 个红米品种和 210 个普通水稻品种进行矿质元素含量的分析表明,黑米、红米及普通稻米的钾含量均大于 2450 ng/g ,镁含量均大于 1000 ng/g ,磷含量均大于 3600 ng/g ,硫含量均大于 1450 ng/g ,钙含量均大于 99 ng/g ;其中,有色米的磷、硫含量明显高于普通稻米。赖来展等^[28]研究指出,黑米的微量元素含量显著高于普通稻米,为普通稻米的 50~100 倍;有研究表明^[10,29-31],黑米的铁、锌等矿质元素含量明显高于普通稻米;蔡建成等^[32]研究表明,粳米的铁含量显著高于籼米,糯米的铁含量显著高于粘米,紫米的铁含量显著高于普通米和红米。南钟浩等^[33]和韩龙植等^[29]报道,龙锦 1 号的铁、钙、硒含量分别为 59.7 $\mu\text{g/g}$ 、162 $\mu\text{g/g}$ 和 130.0 ng/g 。本研究表明,红米 1439 和红米 1440 的铁含量、红米 1439 的锌含量,红巨胚糯米 1474 和黑巨胚糯米 1460 的钙含量、黑甜米 1511 和黑甜米 1515 的硒含量相对较高,这些高矿质元素含量的特种稻种质有待利用于育种和产量鉴定试验以及产业化开发应用。

3.3 不同类型特种稻种质 γ -氨基丁酸含量和花色苷含量差异

本研究对供试材料的 γ -氨基丁酸含量分析表明,多数类型特种稻的 γ -氨基丁酸含量与白米差异不显著,只有白甜米、香糯米、巨胚糯米等 3 种类型的 γ -氨基丁酸含量显著或极显著高于白米类型,未见单一特殊性状或 2~3 个特殊性状的聚合对 γ -氨基丁酸含量的影响。刘玲珑等^[19]研究报道,水稻糙米中 γ -氨基丁酸含量约为 2~3 $\text{mg}/100\text{g}$,种子浸水后其含量可提高 5 倍左右;张群等^[34]研究指出,糙米的 γ -氨基丁酸含量约为 50 $\text{mg}/100\text{g}$,种子浸水后其含量明显增加。张标金等^[26]研究表明,巨胚稻与非巨胚稻相比,其糙米 γ -氨基丁酸含量均有大幅度的提高;非巨胚稻糙米的 γ -氨基丁酸含量平均为 37.5 mg/kg ,而巨胚稻糙米的 γ -氨基丁酸含量平均高达 155.4 mg/kg 。本研究表明,不同类型特

种稻种质的平均 γ -氨基丁酸含量变异在 17.49 ~ 21.92 mg/100g, 但本研究未做种子浸水后的 γ -氨基丁酸含量的测定, 尚有待于进一步研究。本研究对 18 份有色特种稻的花色苷含量分析表明, 黑巨胚糯米 1464 和黑米 1432 的花色苷含量最高, 比所测定的 18 份有色稻的花色苷含量平均值高 253.23% ~ 248.83%。E. S. M. Abdel-Aal 等^[35]对多种有色作物花色苷含量的分析表明, 黑色稻的平均总花色苷含量为 3276 $\mu\text{g/g}$, 约为红米的 35 倍; 张名位等^[36]研究表明, 黑米花色苷含量在品种间存在广泛的变异, 变幅为 0.65 ~ 14.98 $\mu\text{g/g}$ 。杭州黑珍珠^[24,37]、龙锦 1 号^[29,33]和晚粳紫宝^[20]的糙米的黑色素含量较高, 分别为 2.6%、2.4% 和 1.56%, 为普通黑米的 2 ~ 5 倍。修茹燕等^[38]指出, 花色苷在水稻果皮中积累, 具有抗氧化、降血脂、降胆固醇、改善冠心病及白血病症状、抗肿瘤等作用, 对提高稻米消费者健康水平方面将发挥积极的作用。

综上分析表明, 本研究供试的具有香味、有色种皮、巨胚、甜味、糯性等单一特殊性状或 2 ~ 3 个特殊性状的聚合对多数氨基酸含量、矿质元素含量以及 γ -氨基丁酸含量未见增加效应, 而对赖氨酸含量及铁、锌和钙含量的提高产生一定的增加效应。因此, 在今后以赖氨酸及铁、锌和钙含量为目标性状的功能性水稻育种中, 多个特殊性状的聚合将是增加上述功能性成分含量的有效途径之一。

参考文献

- [1] 韩龙植, 南钟浩, 全东兴, 等. 特种稻种质创新与营养特性评价[J]. 植物遗传资源学报, 2003, 4(3): 207-213
- [2] 钟代彬, 应存山. 中国特种米资源研究概述[M]//应存山. 中国优异稻种资源. 北京: 中国农业出版社, 1997: 48-54
- [3] 韩龙植, 黄清港, 盛锦山, 等. 中国稻种资源农艺性状鉴定、编目和繁种入库概况[J]. 植物遗传资源科学, 2002, 3(2): 40-45
- [4] 蒋家焕, 王玲, 叶新福, 等. 特种稻黑米遗传研究进展[J]. 福建稻麦科技, 1999(1): 5-8
- [5] 郑金贵, 陈君琛, 黄勤楼, 等. 黑色保健米的研究进展[J]. 福建农学院学报, 1993, 8(2): 7
- [6] 胡芳林. 几种具有滋补作用的黑稻营养成分分析结果[J]. 湖北农业科学, 1990(5): 11
- [7] 张名位, 赖来展, 杨雄, 等. 黑米中几种微量元素的研究[C]//赵则胜. 中国特种稻学术研讨会论文集. 上海: 上海科技教育出版社, 1992: 413-418
- [8] 廖江林, 肖国樱, 李阳生, 等. 我国功能营养稻研究进展及发展对策[J]. 农业现代化研究, 2003, 24(3): 170-173
- [9] 胡培松. 功能性稻米研究与开发[J]. 中国稻米, 2003(5): 3-5
- [10] 苏宁, 万向元, 翟虎渠, 等. 功能型水稻研究现状和发展趋向[J]. 中国农业科学, 2007, 40(3): 433-439
- [11] Kim K H, Heu M H, Park S Z. New mutants for rice grain quality[J]. Korean J Crop Sci, 1991, 36: 197-203
- [12] Koh H J, Heu M H, Mc Couch S R. Molecular mapping of the gene controlling the super-giant embryo character in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Theor Appl Genet, 1996, 93: 257-261
- [13] 张建国, 朴钟泽, 路家安, 等. 中国特种稻的研究利用现状与前景[J]. 上海农业学报, 2002, 18(S): 53-57
- [14] 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
- [15] 黄大年, 钱前, 郭龙彪, 等. 功能性稻米的加工途径及其前景[J]. 农产品加工, 2009(3): 8-9
- [16] 刘凯, 张祥喜, 魏本华, 等. 铁的生理功能与富铁水稻的研究进展[J]. 江西农业学报, 2008, 20(9): 22-26
- [17] 翁志强, 周汉钦, 张永健, 等. 富硒粳航 1 号米对复发性阿弗他溃疡患者血清细胞因子调节[J]. 广东农业学报, 2010, 37(7): 160-162
- [18] 李晨, 涂从勇, 刘军, 等. 一份富铁栽培稻新种质的发现[J]. 广东农业科学, 2004(5): 67-68
- [19] 刘玲瑰, 江玲, 刘世家, 等. 巨胚水稻 W025 糙米浸水后 γ -氨基丁酸含量变化的研究[J]. 作物学报, 2005, 31(10): 23-28
- [20] 黎用朝, 闵军, 刘三雄, 等. 特种稻新品种晚粳紫宝的选育与应用[J]. 中国稻米, 2015, 21(3): 75-76
- [21] 年伟, 邓伟, 李小林. 高原特色优质黑米云谷 1 号的选育及保护利用[J]. 中国种业, 2014(2): 58-59
- [22] 孙明茂, 韩龙植. 梗稻龙锦 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[J]. 植物遗传资源学报, 2017, 18(2): 186-192
- [23] 魏明亮, 杜鹃, 曾亚文, 等. 云南稻微核心种质及其回交高代糙米功能成分含量的遗传变异[J]. 湖南农业大学学报: 自然科学版, 2013, 39(2): 121-125
- [24] 张名位. 特种稻米及其加工技术[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2000: 73-102
- [25] 高如嵩. 陕西黑米的主要营养成分及其利用价值[J]. 西北农学院学报, 1984(1): 97-101
- [26] 张标金, 廖旦根, 尹德凤, 等. 育成巨胚稻与其亲本的 γ -氨基丁酸和氨基酸含量的比较分析[J]. 江西农业学报, 2014(1): 56-58
- [27] 凌淦, 潘军, 段彬伍. 有色米及白米矿质元素营养特征[J]. 中国水稻科学, 1993, 7(2): 95-100
- [28] 赖来展, 张名位, 彭仲明, 等. 黑米稻种质资源的评价与利用研究[J]. 作物品种资源, 1994(S): 58-64
- [29] 韩龙植, 南钟浩, 孙强. 吉林省特种稻优异新品种研究进展[M]//应存山. 中国优异稻种资源. 北京: 中国农业出版社, 1997: 152-154
- [30] 张名位, 郭宝江. 色米的营养功能特点及相应加工技术研究(综述)[J]. 上海农业学报, 2002, 18(S): 18-24
- [31] 张名位, 赖来展, 杨雄. 中国黑米种质资源的评价与利用研究进展[J]. 湖北农学院学报, 1995, 15(4): 310-318
- [32] 蔡建成, 曹桂兰, 束爱萍, 等. 水稻地方品种铁含量的差异评价[J]. 植物遗传资源学报, 2009, 10(1): 55-59
- [33] 南钟浩, 全东兴, 周舰, 等. 吉林特种稻特征特性与开发利用[J]. 延边大学农学学报, 2000, 22(1): 60-62
- [34] 张群, 单杨, 吴跃辉. 糙米浸泡过程中 γ -氨基丁酸的变化[J]. 粮食与饲料工业, 2006(11): 6-8
- [35] Abdel-Aal E S M, Young J C, Rabalski I. Anthocyanin composition in black, blue, pink, purple, and red cereal grains [J]. J Agric Food Chem, 2006, 54: 4696-4704
- [36] 张名位, 郭宝江, 池建伟, 等. 不同品种黑米的抗氧化作用及其与总黄酮和花色苷含量的关系[J]. 中国农业科学, 2005, 38(7): 1324-1331
- [37] 赵则胜, 赖来展, 郑金贵. 中国特种稻[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1995: 64-80
- [38] 修茹燕, 程祖铎, 王龙平, 等. 富含花色苷的发芽黑米速食粥加工工艺优化[J]. 食品科学, 2016, 41(5): 175-179