

特种稻黑米和红米研究进展

武文豪, 何冲冲, 王传波, 杨小川, 方中明

(贵州大学农学院/贵州省粮油作物分子育种重点实验室/贵州省高等学校功能农业重点实验室, 贵阳550025)

摘要: 黑米和红米特种稻是一类由于色素沉积而导致种皮表现出黑(紫)色或红色的特殊稻种资源, 其营养物质丰富, 除了含有比白米更多的蛋白质、矿物质及膳食纤维外, 还富含花青素(原花青素)、黄酮类、萜类等生理活性物质, 其营养物质及价值都远超白米, 因此受到越来越多稻米消费者的青睐。我国黑米和红米资源丰富, 合理利用这些营养丰富的黑米和红米资源, 创制优异的黑米和红米新种质并培育出新品种, 对于推动特种稻产业发展意义重大。本文分4个阶段概括了黑米和红米的研究历史并介绍了我国黑米和红米资源的分布情况, 综述了黑米和红米的品质、产量、抗性及其开发利用等方面的研究进展, 重点阐述了黑米和红米在品质差异及形成机制上的最新研究进展。最后总结了黑米和红米当前研究的薄弱之处并提出了对黑米和红米未来研究方向的展望, 为黑米和红米的新品种培育及进一步开发利用提供参考。

关键词: 黑米; 红米; 品质; 产量; 抗性; 加工应用

Research Progress on Black and Red Rice of Special Varieties

WU Wenhao, HE Chongchong, WANG Chuanbo, YANG Xiaochuan, FANG Zhongming

(College of Agriculture, Guizhou University / Key Laboratory of Molecular Breeding for Grain and

Oil Crops in Guizhou Province / Key Laboratory of Functional Agriculture of

Guizhou Provincial Department of Education, Guiyang 550025)

Abstract: Black and red rice varieties are special resources that exhibit black (purple) or red seed coat, respectively, due to pigment deposition, which is rich in nutrients, with more protein, minerals and dietary fiber than white rice. They are also rich in physiological activator such as anthocyanins (procyanidins), flavonoids, and terpenes. Their nutrient substance and value are significantly higher than those of white rice varieties. Therefore, they are favored by more and more rice consumers. Our country is rich in black and red rice resources, rational utilization of nutrient-rich black and red rice resources, and creation of elite new germplasm and breeding of new black and/or red rice varieties are of great significance to promote the development of special rice industry. In this study, the research history of black and red rice were summarized in four stages and the resource distribution of black and red rice were introduced; the research progress in quality, yield, resistance, and development and utilization of black and red rice were summarized, especially for the latest

收稿日期: 2023-12-24 网络出版日期: 2024-02-02

URL: <https://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20231224002>

第一作者研究方向为水稻分子遗传研究, E-mail: 18749012732@163.com

通信作者: 方中明, 研究方向为水稻分子遗传研究, E-mail: zmfang@gzu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(32260498); 贵州省优秀青年科技人才项目(黔科合平台人才-YQK(2023)002); 贵州省科技项目(黔科合基础-ZK(2022)Key 008); 贵州省粮油作物分子育种重点实验室项目(黔科合中引地(2023)008); 贵州省高等学校功能农业重点实验室(黔教基(2023)007); 黔东南州科技支撑项目(黔东南科合支撑(2023)06)

Foundation projects: National Natural Science Foundation of China (32260498); Guizhou Provincial Excellent Young Talents Project of Science and Technology (Qiankehapingtairencai-YQK(2023)002); Guizhou Provincial Science and Technology Projects (Qiankehējichu-ZK(2022)Key 008); Key Laboratory of Molecular Breeding for Grain and Oil Crops in Guizhou Province (Qiankehēzhongyindi(2023)008); Key Laboratory of Functional Agriculture of Guizhou Provincial Department of Education (Qianjiaoji(2023)007); Qiongdongnan Science and Technology Support Project (Qiongdongnankehe Support(2023)06)

research progress on quality specificity and formation mechanism. Finally, the weaknesses of current research on black and red rice were summarized, and prospects for future research directions on black and red rice were proposed, so as to provide a reference for the cultivation of new varieties of black and red rice and the further development and utilization of black and red rice.

Key words: black rice; red rice; quality; yield; resistance; processing application

水稻是全球最重要的粮食作物之一,大约有50%以上的人口以水稻为主食。近年来,随着人民生活水平提高及对健康饮食的要求,人们对于稻米的需求逐渐改变,兼具营养及色、香、味的稻米成为人们对稻米的新追求。特种稻是指拥有特定遗传性状和特殊用途的稻谷,这种稻谷主要分为三类,即有色稻米、香稻米和专用稻米^[1]。特种稻是我国重要的水稻资源,其存在为稻米消费者提供了更多的选择,丰富了我国的饮食文化。特种稻中黑米和红米是指由于色素沉积而导致种皮表现出黑(紫)色或红色的特异水稻种质资源,是最常见的两种有色稻米^[2]。黑米和红米富含花青素、不饱和脂肪酸、谷维素、维生素和多种矿物质,有抗氧化、清除自由基、控血糖、抗衰老的功效,是营养价值较高的食品。黑米和红米的食用或利用方式以糙米或稍精碾的粗精米为主,其口感和产量还存在不足^[3]。目前,针对黑米和红米的研究主要集中在黑米和红米自身的色素物质和营养品质方面,因此系统了解黑米和红米的研究现状、探讨黑米和红米资源利用及遗传改良方向,对于培育兼具色香味及营养的黑米或红米品种具有重要意义。本文综述了特种稻黑米和红米的相关研究进展,提出了黑米和红米的改良方向,并概述了未来黑米和红米的改良途径及育种潜力。

1 黑米和红米的研究历史及资源分布

1.1 黑米和红米的研究历史

黑米和红米是我国劳动人民在耕作过程中发现并不断培育得到的特殊水稻品种,种植历史悠久。有关黑米的记载最早可见于《诗经·大雅·生民》中“诞降嘉种,维秬维秠,维糜维芑。恒之秬秠,是获是苗”^[4],红米则相传在南北朝时期就有种植。而随后的历朝历代也均有关于黑米和红米的记载,如北魏时期贾思勰在《齐民要术》中将紫(黑)米描述为“又有香者,皮带紫黑色,名香稻,味鲜。不中常食。和糯以佳”^[5];《本草纲目》中更有有关贵州惠水黑糯米“补中益气,治消渴、暖脾胃,止虚寒泻痢,发痘疮”等药用功效的记述^[6];鸭血糯是江苏常熟地

区的知名红糯米品种,唐朝诗人兼农学家陆龟蒙在《别墅怀归》中将其取名为“红莲”,留下了“遥为晚化吟白菊,近炊香稻识红莲”的优美诗句^[7]。黑米和红米的研究历史主要可以分为以下4个阶段:

第一阶段是从黑米和红米种植到最后一个封建王朝的没落,此时的黑米和红米凭借优良的营养品质及药用功能深受人们追捧,在历朝历代多作为皇室贡品^[8]，“红”极一时。

第二阶段为20世纪40-60年代,由于稻米食用者饮食习惯的倾向以及黑米和红米与落粒性、易倒伏等不利性状连锁遗传,因此白米稻成为主要的栽培稻^[9],黑米、红米等有色米很少被研究者关注。

第三阶段为20世纪70年代到20世纪末,研究者对黑米和红米等特种稻逐渐关注起来。此时的黑米和红米研究主要集中在种质资源的收集以及种皮颜色基因的定位研究,并基于种质资源培育出了一批如黑糯141、鸭血糯等黑米或红米品种在生产上推广应用。

第四阶段为20世纪末至今,研究者对于有色米中富含的生理活性物质的研究,人们逐渐发现黑米和红米中含有比白米更丰富的营养物质以及白米不具有的药用功能物质^[10-14]。自此,更多的黑米和红米品种如红稻8号和华墨香5号的推出、张启发院士等提出了“黑米主食化”等^[15],都使水稻研究者更加关注黑米和红米。此时,对于黑米和红米的研究也逐渐集中到黑米或红米的演化过程及赋能基因的深入挖掘。如有研究从分子水平上对红米的起源进行追溯^[16];利用代谢组分析揭示黑米和红米的代谢物差异^[17];利用全基因组关联分析鉴定黑米或红米中控制优良品质的QTL位点^[18]等。总之,黑米和红米自发现以来,因其品质曾一度被当作皇室贡品而深受追捧,后因白米的推广而被水稻研究者关注较少,但在追求健康饮食的今天,黑米和红米因其品质优势被广泛关注。

1.2 黑米的资源分布

中国地域辽阔,横跨多个气候带,拥有多样的自然环境,这使得我国成为了世界上黑米和红米的重要产地之一。黑米和红米是由野生稻经过长期

的自然选择和人工驯化培育而来,在漫长的农业发展过程中,我国各地利用当地的野生稻资源培育形成了众多具有独特的外观和营养价值的黑米或红米地方品种。我国黑米资源丰富,种类多样,涉及水稻和陆稻、籼稻和粳稻、糯型和粘型等多个类型。1995年调查显示我国黑米资源总计373份^[19]。种植地区涉及我国的吉林、辽宁、黑龙江、湖南、湖北、安徽、云南、四川、贵州、广西、江西、陕西、广东等地^[20]。在黑米的各个种植地中,云贵高原一带的黑米资源最为丰富。贵州地区仅黑糯米资源就有81份^[21],其中惠水黑糯米最为出名。早在1985年,贵州惠水县利用当地特有的黑糯米资源培育出优质黑糯品种黑糯141^[22],并在之后的几年时间凭借一定的黑米种植规模以及优异的黑米种质斩获了“中国黑糯米之乡”“中国优质米之乡”称号。而云南2006年调查显示有黑米资源109份^[23],其中元江黑米、普洱黑米等都凭借自身的上乘品质深受云南当地稻米消费者的喜爱。除了云贵高原地区,其他地区也有独特的黑米品种,如陕西的洋县黑米、广东的潮汕黑米、广西的红河谷黑米等。

1.3 红米的资源分布

中国幅员辽阔、气候条件多样,同样为红米的

演化与生长提供了得天独厚的环境,孕育了丰富的红米资源。1995年调查显示我国共有红米资源8963份,其中多为地方品种^[2]。我国红米颜色多呈赤褐色,主要种植于云南、贵州、广西、江西、江苏、陕西、甘肃、广东、安徽、福建、湖南、河南等地^[24],当中又以云南、贵州、江西三地的种类最为多样。根据1998年不完全统计,贵州省红米资源高达600余份^[25],包括了糯稻、粘稻等各种类型,其中以盘州红米、高坡红米、剑河红米最为出名。而相比贵州,云南具有更丰富的红米资源,据2006年调查统计,在云南地区发现2318份红米资源^[23],占我国红米资源总量的1/4。江西红米资源也较为丰富,1995年调查显示总计有红米资源665份^[26],柳条红、井冈红两个籼型红米都是当地著名的红米品种。除此之外,福建的蒲城红米、山西的红香稻、红香米以及陕西的长安柳叶米、宝鸡红稻子都是我国著名的红米品种。各地独特的红米品种的品质、抗性等性状不一,具有丰富的遗传多样性,其分布横跨东西(东经101°30'~124°06',北纬18°38'~42°47'),资源数量可称有色米之最。合理利用这些品质和特性各异的黑米或红米地方资源(表1),对于推进黑米与红米研究并培育黑米或红米品种意义重大。

表1 黑米和红米资源比较

Table 1 Comparison of black rice and red rice resources

性状 Characters	黑米资源 Black rice resources	红米资源 Red rice resources
亚种类型 Subspecies type	粳稻偏多	以籼稻为主
水旱性 Paddy and upland field	以水稻为主,具有少量的陆稻类型	以水稻为主,具有少量的陆稻类型
粘糯性 Viscosity	糯稻偏多	以粘稻为主
株高(cm) Plant Height	100~180	80~140
生育期 Growth period	以晚稻为主	以中晚稻为主
抗性 Resistance	对白背飞虱、苗瘟、白叶枯具有一定抗性,对褐飞虱具有较强抗性,部分资源具有一定的抗盐、抗旱能力	对苗瘟具有一定抗性,对白叶枯、褐飞虱具有较强抗性,部分资源具有一定的抗盐、抗旱能力

以上数据来源于中国作物种质资源信息网

The above data is from the China Crop Germplasm Resources Information Network

2 黑米和红米的品质研究进展

黑米和红米中含有丰富的营养成分,除氨基酸、淀粉、蛋白质、矿物质元素等常规营养元素外,

黑米和红米中还含有相比白米更多的维生素、花青素等营养元素(表2)。而黑米中的微量营养元素和生理活性物质更多,具有一定的药用功能,被称为“药食两用”的稻米之一。

表2 目前已报道的部分优质黑米和红米种质^[27]

Table 2 Some high-quality black and red rice germplasm currently reported

序号 No.	种质名称 Germplasm name	总淀粉含量 (%) Total starch content	蛋白质含量 (%) Protein content	膳食纤维含量 (%) Dietary fiber content	总酚含量 (mg GAE/g) Phenolics content	总黄酮含量 (mg CE/g) Total flavonoids content	花青苷含量 (mg/g) Anthocyanin content
1	红米 1	74.94	9.00	4.38	4.12	2.69	0.46
2	红米 2	79.50	9.40	4.43	4.88	2.98	0.25
3	曹妃红	78.59	8.86	4.24	4.16	3.15	0.07
4	吉稻	77.78	8.31	3.96	6.06	4.31	8.17
5	惠生黑稻	78.48	8.78	3.63	2.54	2.96	2.28
6	黑粘香	78.39	8.11	3.64	5.38	4.20	6.62
7	吉黑稻	78.61	6.40	3.68	2.52	2.72	2.66
8	陕黑	78.20	7.15	4.62	6.52	4.46	10.08

GAE:总酚含量以没食子酸当量表示;CE:总黄酮含量以儿茶素当量表示

GAE:The phenolics content is expressed as gallic acid extract equivalent;CE:The total flavonoids content is expressed as catechin extract equivalent

2.1 黑米的品质研究

黑米由于其丰富的营养物质一直被当作优质稻米食用,目前对于黑米品质的研究包括蛋白质、淀粉等常规营养物质含量和维生素、色素等微量营养元素或活性物质含量两个方面。研究发现我国黑米品种的总淀粉含量为71.11%~78.61%,脂肪含量在2.02%~2.40%,蛋白质含量在6.40%~15.11%,膳食纤维含量在3.62%~4.62%^[27-31];各矿物质元素含量在不同黑米品种中并无差异,其中Mg元素含量最多(138.09~151.29 mg/100g),Cu含量最少(0.65 mg/100g左右),其他常规矿物质元素含量依次为Ca、Fe、Zn、Mn^[12]。对比国外黑米品质的研究结果,以上各类营养物质含量有较大差异^[32],说明品种或栽培环境对于黑米的品质有很大影响。

黑米的黑色外观是由色素在种皮中积累导致的,Okamoto等^[33]研究结果表明黑米色素中的主要物质是花青素,其中矢车菊素-3-O-葡萄糖苷是其主要组成物质,占黑米花青素含量的95%以上^[34]。黑米中花青素的积累量决定了黑米的颜色深浅,目前研究表明我国的黑(紫)米品种花青素含量为156.55~533.03 mg/kg^[30]。维生素类物质也是黑米中重要的生理活性物质。黑米中含有比白米更丰富的维生素类物质^[35-36],其中维生素A、维生素C更是黑米独有的微量营养物质^[37]。此外,黑米中还含有黄酮类^[12]、酚类^[38-39]、萜类^[14]等生理活性物质。众多生理活性物质主要沉积在黑米的麸皮层(果皮、糊粉层和胚芽)中^[40],使黑米具有抗氧化^[41]、降低血脂^[42]、

降低胆固醇^[43]等药用功能。

2.2 红米的品质研究

红米的品质研究与黑米类似,同样集中在红米所含有的各类物质。我国红米资源总淀粉含量为74.73%~78.59%,脂肪含量在1.50%~2.58%,蛋白质含量在8.78%~9.40%,膳食纤维含量在4.24%~4.79%^[27-29]。红米的矿物质元素含量占比情况同黑米,常规矿物质元素含量同样为Mg元素最多,Ca元素最少,其他含量依次为Fe、Zn、Mn^[12]。

红米的红色外皮由原花青素(单宁)决定^[33],单宁是由不同数量的儿茶素或表儿茶素以及无色花色色素缩合而成。原花青素可以无色或有色,只有在被类黄酮氧化酶氧化后才会形成红/棕色^[44]。不同品种的红米原花青素含量也略有差异,研究表明红米的原花青素含量为1.07~2.27 mg/g^[45]。红米中同样具有与黑米相似的生理活性物质,如酚类^[38]和萜类^[14]等,但含量略有差异。因此红米虽然也具有抗氧化抗炎^[46]、降低血脂等药用功能,但与黑米的药用效力略有差异。

2.3 黑米和红米的品质差异

黑米和红米不仅外表颜色不同,在营养物质及生理活性物质含量方面也有较大差异。研究表明黑米或红米等有色米的总淀粉含量在73.5%~79.6%,对比常规白米,黑米和红米中含有更容易消化的淀粉^[47],可作为人体更优的淀粉摄入来源。对于淀粉结构而言,黑米和红米均呈现出A型X射线衍射图和多边形形状的淀粉颗粒,支链淀粉链长主

要为B链($12 < DP \leq 24$)和A链($DP \leq 12$)(DP:聚合度),但在聚合度超过36的长链中,黑米支链淀粉中的长链含量往往高于红米^[48]。在脂肪酸、维生素等其他营养物质含量方面,相比于白米和红米,黑米含有更高水平的脂肪酸甲酯、游离脂肪酸、有机酸和氨基酸^[12]。黑米和红米中的饱和脂肪酸与 β -胡萝卜素(维生素A)含量有显著的正相关性^[13]。在矿物质含量上,黑米的矿物质含量最多,红米次之,普通稻米含量最少^[10]。黑米中Fe和Mn的含量更多,而红米中则富含Zn和Cu^[49]。另外,有研究指出黑米色素沉积导致了稻米矿物质元素阳离子含量的增加^[50],该研究结果提出了黑米矿物质元素含量偏多的原因。

黑米和红米中的多种生理活性物质导致了黑米和红米具有不同的功能特性。研究表明总多酚含量与黑米和红米的抗氧化活性密切相关^[51],黄酮类物质的差异也导致了黑米和红米都具有比白米更强的抗氧化性^[12]。黑米的抗氧化能力来源于槲皮素;红米来源于儿茶素;白米主要来源于槲皮素和三叶草素^[52]。在抗氧化能力方面,黑米强于红米,但红米具有比黑米更强的酪氨酸酶抑制作用^[53]。代谢组学研究发现黑米或红米和白米之间存在很多差异代谢物,主要涉及脂类、核苷酸及其衍生物、氨基酸及其衍生物等代谢物质^[54]。总之,代谢物的差异是导致黑米和红米功能特性差异的主要原因,不同的代谢物种类使黑米或红米具有不同的育种潜力。如黑米含有比白米、红米更丰富的芳香次生代谢物^[17],可用于开发香味层次更丰富的香稻品种;而红米具有更强的酪氨酸酶抑制作用,可用于培育作为保健食品的红米品种。

2.4 黑米和红米品质的形成机制研究

目前,关于黑米和红米品质形成机制的研究主要集中在其色素形成方面。黑米的黑色种皮由花青素决定,目前有关花青素的合成途径已经较为清晰。花青素合成开关由*Pb*基因控制,合成途径中有多个基因参与,其转录调控主要是通过1个复合体MBW实现^[55],MYB^[56-57]、bHLH^[58]和WD40蛋白^[59]都是该复合体的重要组成部分。不同的*R2R3-MYB*、*bHLH*调节因子控制不同水稻组织中花青素的产生。如*OsC1(R2R3-MYB)*、*OsRb(bHLH)*和*OsDFR*调节叶片中的花青素生物合成^[60]; *OsC1-OsPa(bHLH)-OsDFR*和*OsC1-OsPs(bHLH)-OsDFR*分别调节顶端和柱头中的花青素积累^[61];而*OsMYB3*调控黑米和红米籽粒中的花青素合成^[62]。*GzMYB-7D1*

是在小麦中被发现负责调控花青素合成的关键基因,将其转入水稻,发现该基因也可以在水稻中正调控花青素的含量^[63]。

红米的红色种皮由原花青素决定,相较于黑米中的花青素,原花青素的研究较少。目前研究表明单个基因*Rc*就可以调控原花青素的生物合成^[64]。原花青素可能与花青素具有类似的MBW蛋白复合物调节途径^[65]。随着对黑米和红米色素沉积机制的进一步研究发现,*Rc*和*Pb*基因可以正向调节原花青素和花青素的积累,并且证明了*Rc*和*Pb*基因的堆叠可以进一步增加两种黄酮类化合物的含量^[66],从而提高黑米和红米内的抗氧化物质含量。

在黑米或红米营养品质遗传机制研究方面,已通过全基因组关联分析在有色米中鉴定出了与谷物蛋白或铁含量等品质相关联的QTL位点^[18]。在维生素合成机制方面,通过对黑米和白米的转录组分析,鉴定出了53个与黑米中维生素合成有关的差异表达基因^[67]。目前对于黑米或红米营养品质及其他化学物质形成机制的研究仍然较少,基本停留在QTL定位或挖掘差异基因上,详述阐明黑米或红米某一营养品质形成机制的研究较少。近期有研究报道的由重复基因复制后的转录收敛引起的水稻和大麦黑色果皮性状趋同进化的案例^[68],为提高黑米和红米中的色素含量提供了新的思路。

3 黑米和红米的其他研究进展

黑米和红米虽然营养品质突出,但大部分营养物质都位于果皮及糊粉层内,导致黑米和红米的食用以糙米为主,但糙米口感较硬,香味及适口性均不如平时所食用的精米。另外,黑米和红米具有良好的抗性,但其在种植过程中株型高、易倒伏、栽培周期长、产量低。综述黑米或红米除营养品质外的其他方面的研究进展以及加工利用现状,对于开发高产优质的黑米或红米品种,推进黑米和红米产业发展具有重要意义。

3.1 黑米和红米的种质创制

在黑米和红米的种质创制方面,少数研究者通过诱变处理以获得产量提高的黑米或红米品系。如以红米品种Thani 1为材料,诱变衍生出多个红米突变株系,比较发现其中两个红米突变株系产量相对于野生型显著提高,并且对品质无显著影响^[69]。以红稻Dawk Kha 50为材料,通过EMS诱变处理,成功得到了产量提高的突变系^[70]。近期研究提出以白米稻高产品种为背景培育高产黑米和红米品

种比改良黑米和红米地方资源更有优势^[71]。

在黑米和红米培育方面,已利用传统育种技术培育出比一般黑糯米营养物质含量和产量更高的特种稻品种黑糯178^[72]。通过多组学技术鉴定筛选了含有较多抗氧化剂和维生素B2的黑米和红米品种,并利用CRISPR/Cas9敲除印尼黑稻的3个开花时间抑制因子,获得了1个早熟、矮小和优质的黑米品种^[17]。还利用CRISPR/Cas9编辑技术和杂交技术培育了高花青素含量的香稻紫(黑)米品种^[73]。多数研究认为提高黑米或红米产量会导致其品质变差^[74],如何协调黑米或红米产量和品质之间的平衡,对于培育高产优质黑米或红米品种至关重要。

3.2 黑米和红米的抗性研究

黑米和红米丰富的代谢物质和矿物质元素为黑米或红米提供了远超常规白米的抗胁迫能力^[75]。黑米和红米中更高的Si元素含量可能为其提供更强的稻瘟病和纹枯病抗性^[76-77]。过氧化物酶、多酚氧化酶、超氧化物歧化酶等物质则为其贡献了更强的褐飞虱抗性^[78-79]。利用 γ 射线辐照邦加地区的红米,显著提升了其抗旱潜力^[80]。以云南地区部分红米为材料进行有色米抗病性研究发现,所选的几个红米品种均表现出较强的抗病性^[81]。研究者从新疆地区的8个红米突变系中筛选到了1个在营养生长阶段对盐胁迫具有一定抗性的突变品系G2^[82]。在黑米和红米抗性机制形成方面,一些新的抗性QTL在黑米和红米中被鉴定出来^[83],黑米和红米有潜力成为抗性育种新的基因来源。

3.3 黑米和红米的加工利用研究

由于黑米和红米的营养物质、花青素或原花青素含量丰富,更有白米中不具备的部分维生素,因此近年来基于黑米或红米优良品质进行的加工利用研究也越来越多。目前关于黑米和红米的开发利用研究主要包含以下四个方面:(1)直接利用黑米或红米作为粥食或杂粮米饭的传统应用方式,但黑米和红米普遍粗糙,口感较差,目前适合用于此类食用方式的黑米或红米品种仍然较少。(2)用于食品开发,目前已经有大量利用黑米或红米开发的食品,如黑(红)米糕、黑(红)米酒、黑(红)米饮料等^[84-85],这类食品因添加黑米或红米后口感独特或具有一定的保健功能^[86],深受部分消费者追捧。(3)利用黑米或红米提取色素用作工业漂染或食品色素^[87]。(4)医疗保健方面,黑米和红米中丰富的生物活性物质可用于各种疾病的治疗和保健预防,如抗氧化^[41,46]、降低血脂^[42]、降低胆固醇^[43]等。

4 展望

大多数黑米和红米品种通过野生稻驯化而来,在我国不同地域自然条件下表现出丰富的遗传变异,通常具有较强的抗性,富含各类营养物质,但口感普遍较差。此外,黑米和红米植株通常较高,容易倒伏,生育周期较长,产量相对较低。目前,对黑米和红米的研究主要侧重于研究其本身的品质特征,尤其是对其色素和黄酮类物质的研究较为深入,但其他活性物质如多糖和萜类化合物的研究关注较少。另外,目前通过与高产品种杂交仍是提高黑米或红米产量的主要途径,对黑米和红米产量性状形成机制关注较少,导致黑米和红米产量性状的基础研究工作较为薄弱。在黑米和红米加工利用方面,由于黑米和红米的淀粉特性,在面包等产品的开发利用时,黑米或红米只作为部分添加剂,黑米或红米作为主料开发的产品仍旧较少。因此,后续黑米和红米研究可从以下四个方面入手:(1)黑米和红米抗性、品质及色素形成相关重要基因的挖掘与功能验证。利用我国丰富的黑米和红米资源,结合其独特的表型,利用多组学技术等深入挖掘黑米或红米中调控抗性、品质及色素形成相关的重要基因并进行功能验证,将其应用到黑米或红米甚至常规白米中,可以为水稻高抗和优质育种提供重要的遗传资源,进一步通过分子标记辅助选择和回交技术实现黑米或红米相关关键基因或基因组区域进入白米高产水稻品种。(2)加强黑米和红米的优异种质创制和育种利用。保留黑米和红米地方种质资源的优点,利用传统育种和现代育种技术综合弥补种质资源存在的缺陷或不足,并结合市场消费者需求灵活创制黑米和红米优异新种质,促进其在生产中的推广和应用。(3)利用分子育种技术对黑米和红米现有品种进行遗传改良。利用单倍型技术、分子标记辅助育种技术、基因编辑技术等来精确调控黑米或红米现有品种的淀粉、蛋白质、代谢物及香味等途径相关关键基因的表达,以改善黑米和红米的口感和食味品质。探究制约黑米和红米产量不足的关键因素及与品质可能存在的矛盾,从而培育优质与高产协调的黑米或红米新品种。(4)利用现代育种技术对黑米和红米资源进行系统开发与利用。利用野生稻从头驯化、多基因编辑、染色体片段替换、单倍体技术等多种现代育种手段在黑米或红米品种中聚集有利等位基因,实现对黑米或红米品种的全面改良,综合协调黑米和红米产

量、品质、抗性、生育期等性状,解决黑米和红米因产量低、应用成本高、淀粉特性差而只能作为添加剂的开发窘境,为黑米和红米生产和食品开发做出更大的贡献。

参考文献

- [1] 赵则胜. 特种稻研究与利用. 北方水稻, 2007(6): 1-6
Zhao Z S. Research and utilization of special rice. Northern Rice, 2007(6): 1-6
- [2] 赵则胜. 中国特种稻. 上海: 上海科学技术出版社, 1995
Zhao Z S. Special rice in China. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1995
- [3] 徐庆国. 特异稻米育种技术及开发前景探讨. 作物研究, 1995(2): 3-6
Xu Q G. Discussion on the breeding technology and development prospect of specific rice. Crop Research, 1995(2): 3-6
- [4] 王滨. 洋县黑米:“米中三珍”之冠. 黑龙江粮食, 2018(11): 37-41
Wang B. Yangxian black rice: The crown of "three treasures in rice". Heilongjiang Grain, 2018(11): 37-41
- [5] 王彩霞. 有色米的品质特性与种皮颜色性状的分子遗传学研究. 杭州: 浙江大学, 2007
Wang C X. Molecular genetics study on quality characteristics and seed coat color characters of colored rice. Hangzhou: Zhejiang University, 2007
- [6] 孙义伟. 谈谈黑米的开发和利用. 江西农业科技, 1992(2): 30-31
Sun Y W. Talk about the development and utilization of black rice. Jiangxi Agricultural Science and Technology, 1992(2): 30-31
- [7] 闵宗殿. 太湖地区历史上的优质水稻品种资源. 古今农业, 1994(1): 50-57
Min Z D. Historical high-quality rice variety resources in Taihu Lake area. Ancient and Modern Agriculture, 1994(1): 50-57
- [8] 隋新, 吕进义, 李盛, 马先红. 黑米饮品的研究进展. 保鲜与加工, 2017, 17(3): 129-132
Sui X, Lv J Y, Li S, Ma X H. Research progress of black rice beverages. Preservation and Processing, 2017, 17(3): 129-132
- [9] Porteres R. Taxonomie Agrobotanique des Riz cultives *O. sativa* L. et *O. glaberrima* Steudel. Journal D'agriculture Traditionnelle et de Botanique Appliquee, 1956, 3(7): 341-384
- [10] 吕文英. 米类食品中锌、铁、钙、锰、铜等元素含量测定与研究. 矿质元素与健康研究, 2000, 17(4): 46-47
Lv W Y. Determination and study of zinc, iron, calcium, manganese, copper and other elements in rice food. Research on Mineral Elements and Health, 2000, 17(4): 46-47
- [11] Thilakarathna S H, Rupasinghe H P. Flavonoid bioavailability and attempts for bioavailability enhancement. Nutrients, 2013, 5(9): 3367-3387
- [12] Chen X, Zhou X, Yang Z, Gu C, Tao Y, Guo Q, Guo D, Zhang H, Xu P, Liao Y, Wang Y, Duan Q, Ran X, Wang L, Li Y, Wu X. Analysis of quality involving in minerals, amylose, protein, polyphenols and antioxidant capacity in different coloured rice varieties. Food Science and Technology Research, 2019, 25(1): 141-148
- [13] Frei M, Becker K. Fatty acids and all-trans- β -carotene are correlated in differently colored rice landraces. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2005, 85(14): 2380-2384
- [14] Kim T J, Kim S Y, Park Y J, Lim S H, Ha S H, Park S U, Lee B, Kim J K. Metabolite profiling reveals distinct modulation of complex metabolic networks in non-pigmented, black, and red rice (*Oryza sativa* L. cultivars). Metabolites, 2021, 11(6): 367
- [15] 张启发. 保障粮食安全, 促进营养健康: 黑米主食化未来可期. 华中农业大学学报, 2021, 40(3): 1-2
Zhang Q F. Ensure food security, promote nutrition and health: The future of black rice staple food. Journal of Huazhong Agricultural University, 2021, 40(3): 1-2
- [16] Xie L, Wu D, Fang Y, Ye C, Zhu Q, Wei X, Fan L. Population genomic analysis unravels the evolutionary roadmap of pericarp color in rice. Plant Communications, 2023, (6): 100778
- [17] Sedeek K, Zuccolo A, Fornasiero A, Weber A M, Sanikommu K, Sampathkumar S, Rivera L F, Butt H, Mussurova S, Alhabsi A, Nurmansyah N, Ryan E P, Wing R A, Mahfouz M M. Multi-omics resources for targeted agronomic improvement of pigmented rice. Nature Food, 2023, 4(5): 366-371
- [18] Chattopadhyay K, Bagchi T B, Sanghamitra P, Sutapa S, Anilkumar, Bishnu C M, Awadhes K, Nutan M, Shuvendu S M, Soumya K S. Mapping genetic determinants for grain physicochemical and nutritional traits in brown and pigmented rice using genome-wide association analysis. Euphytica, 2023, 219(5): 57
- [19] 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. 湖北农学院学报, 1995, 15(4): 310-318
Zhang M W, Lai L Z, Yang X. Research progress on evaluation and utilization of black rice germplasm resources in China. Journal of Hubei Agricultural University, 1995, 15(4): 310-318
- [20] 马先红, 许海侠, 韩昕纯. 黑米的营养保健价值及研究进展. 食品工业, 2018, 39(3): 264-267
Ma X H, Xu H X, Han X C. Nutritional and health value of black rice and research progress. Food Industry, 2018, 39(3): 264-267
- [21] 游俊梅, 陈惠查, 阮仁超. 贵州黑糯米种质资源性状评价. 广东农业科学, 2006(8): 3-4, 76
You J M, Chen H C, Ruan R C. Evaluation on germplasm resources and traits of black glutinous rice in Guizhou. Guangdong Agricultural Sciences, 2006(8): 3-4, 76

- [22] 吴邦琮. 黑糯 141 亩产 400 斤群体结构及栽培技术. 耕作与栽培, 1993(1): 47-48
Wu B Z. Population structure and cultivation technique of black glutinous rice 141 with a yield of 400 catties per mu. Tillage and Cultivation, 1993(1): 47-48
- [23] 杨忠义, 曹永生, 苏艳, 卢义轩, 刘晓莉, 李华惠. 云南作物资源特征特性及生态地理分布研究 I. 云南地方稻种资源中特种稻资源. 植物遗传资源学报, 2006, 7(3): 331-337
Yang Z Y, Cao Y S, Su Y, Lu Y X, Liu X L, Li H H. Study on characteristics and ecogeographical distribution of crop resources in Yunnan I. Special rice resources among local rice resources in Yunnan. Journal of Plant Genetic Resources, 2006, 7(3): 331-337
- [24] 郑兴飞, 董华林, 高艳琼, 费震江, 李珍连, 游艾青, 张兴中, 徐得泽. 我国红米资源研究进展与开发前景. 农业科技通讯, 2019(6): 4-6
Zheng X F, Dong H L, Gao Y Q, Fei Z J, Li Z L, You A Q, Zhang X Z, Xu D Z. Research progress and development prospect of red rice resources in China. Agricultural Science and Technology Bulletin, 2019(6): 4-6
- [25] 游俊梅, 陈惠查, 金桃叶, 阮仁超. 贵州有色稻米种质资源的评价和利用. 种子, 1998(4): 52-54, 67
You J M, Chen H C, Jin T Y, Ruan R C. Evaluation and utilization of colored rice germplasm resources in Guizhou. Seed, 1998(4): 52-54, 67
- [26] 黎毛毛, 余丽琴, 付军如, 彭小松, 朱昌兰, 贺晓鹏, 熊玉珍, 贺浩华. 江西红米稻种资源主要农艺性状及营养特性分析与评价. 植物遗传资源学报, 2008, 9(4): 480-484
Li M M, Yu L Q, Fu J R, Peng X S, Zhu C L, He X P, Xiong Y Z, He H H. Analysis and evaluation of main agronomic traits and nutritional characteristics of red rice seed resources in Jiangxi province. Journal of Plant Genetic Resources, 2008, 9(4): 480-484
- [27] 徐清宇, 余静, 朱大伟, 郑小龙, 孟令启, 朱智伟, 邵雅芳. 基于主成分分析和聚类分析的不同水稻品种营养品质评价研究. 中国稻米, 2022, 28(6): 1-8
Xu Q Y, Yu J, Zhu D W, Zheng X L, Meng L Q, Zhu Z W, Shao Y F. Study on nutritional quality evaluation of different rice varieties based on principal component analysis and cluster analysis. China Rice, 2022, 28(6): 1-8
- [28] 于玲, 刘志敏, 曾海英, 吕桂方, 许雯雯. 不同大米营养价值分析. 现代食品, 2020, 12(24): 183-186
Yu L, Liu Z M, Zeng H Y, Lv G F, Xu W W. Analysis of nutritional value of different rice. Modern Food, 2020, 12(24): 183-186
- [29] 赵芸卉, 李海洋, 徐姗姗, 王玉凤. 洋县五彩稻米的营养成分测定. 现代农业科技, 2016, (12): 289-290
Zhao Y H, Li H Y, Xu S N, Ma Y F. Determination of nutrient composition of colored rice in Yangxian County. Modern Agricultural Science and Technology, 2016, (12): 289-290
- [30] 师江, 李倩, 李维峰, 陈云兰, 黄艳丽, 刘兴勇. 不同产地紫米营养成分比较及其相关性分析. 热带作物学报, 2022, 43(11): 2324-2333
Shi J, Li Q, Li W F, Chen Y L, Huang Y L, Liu X Y. Comparison and correlation analysis of nutritional components of purple rice from different producing areas. Journal of Tropical Crops, 2022, 43(11): 2324-2333
- [31] Pradipta S, Ubaidillah M, Siswoyo T A. Physicochemical, functional and antioxidant properties of pigmented rice. Current Research in Nutrition and Food Science Journal, 2020, 8(3): 837-851
- [32] Fitri I G S, Nurhasanah, Handoyo T. Genetic and phytochemical analysis of Indonesian black rice cultivars. Journal of Crop Science and Biotechnology, 2021, 24(5): 567-578
- [33] Oki T, Masuda M, Kobayashi M, Nishiba Y, Furuta S, Suda I, Sato T. Polymeric procyanidins as radical-scavenging components in red-hulled rice. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2002, 50(26): 7524-7529
- [34] 王艳龙, 陈进, 韩豪, 李新生, 黄重, 张选明, 沙志鸿. 黑米花青苷药理学作用研究进展. 大麦与谷类科学, 2016, 33(3): 5-8
Wang Y L, Chen J, Han H, Li X S, Huang Z, Zhang X M, Sha Z H. Advances in pharmacologic effects of black rice anthocyanin. Barley and Cereal Science, 2016, 33(3): 5-8
- [35] Ling W H, Wang L L, Ma J. Supplementation of the black rice outer layer fraction to rabbits decreases atherosclerotic plaque formation and increases antioxidant status. The Journal of Nutrition, 2002, 132(1): 20-26
- [36] Kong S, Lee J. Antioxidants in milling fractions of black rice cultivars. Food Chemistry, 2010, 120(1): 278-281
- [37] 熊艳珍, 黄紫萱, 马慧琴, 程建峰. 黑米的营养功能及综合利用研究进展. 食品工业科技, 2021, 42(7): 408-415
Xiong Y Z, Huang Z X, Ma H Q, Cheng J F. Research progress on nutritional function and comprehensive utilization of black rice. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(7): 408-415
- [38] Ziegler V, Ferreira C D, Hoffmann J F, Chaves F C, Vanier N L, Oliveira M, Elias M C. Cooking quality properties and free and bound phenolics content of brown, black, and red rice grains stored at different temperatures for six months. Food Chemistry, 2018, 242: 427-434
- [39] Ding C, Liu Q, Li P, Pei Y, Tao T, Wang Y, Yan W, Yang G, Shao X. Distribution and quantitative analysis of phenolic compounds in fractions of Japonica and Indica rice. Food Chemistry, 2019, 274: 384-391
- [40] Dipti S S, Bergman C, Indrasari S D, Herath T, Hall R, Lee H, Habibi F, Bassinello P Z, Graterol E, Ferraz J P, Fitzgerald M. The potential of rice to offer solutions for malnutrition and chronic diseases. Rice, 2012, 5(1): 16
- [41] Shen Y, Jin L, Xiao P, Lu Y, Bao J. Total phenolics, flavonoids, antioxidant capacity in rice grain and their relations to grain color, size and weight. Journal of Cereal Science, 2009, 49(1): 106-111
- [42] Wang H, Liu D, Ji Y, Liu Y, Xu L, Guo Y. Dietary

- supplementation of black rice anthocyanin extract regulates cholesterol metabolism and improves gut microbiota dysbiosis in C57BL/6J mice fed a high-fat and cholesterol diet. *Molecular Nutrition & Food Research*, 2020, 64(8): 1900876
- [43] Kopec A, Zawistowski J, Kitts D D. Benefits of anthocyanin-rich black rice fraction and wood sterols to control plasma and tissue lipid concentrations in wistar kyoto rats fed an atherogenic diet. *Molecules*, 2020, 25(22): 5363
- [44] Pourcel L, Routaboul J M, Kerhoas L, Caboche M, Lepiniec L, Debeaujon I. TRANSPARENT TESTA10 encodes a laccase-like enzyme involved in oxidative polymerization of flavonoids in *Arabidopsis* seed coat. *The Plant Cell*, 2005, 17(11): 2966-2980
- [45] Gunaratne A, Wu K, Li D, Bentota A, Corke H, Cai Y Z. Antioxidant activity and nutritional quality of traditional red-grained rice varieties containing proanthocyanidins. *Food Chemistry*, 2013, 138(23): 1153-1161
- [46] Prapasawat R, Palipoch S, Suwannalert P, Payuhakrit W, Kunsorn P, Laovithayangoon S, Thakaew S, Munkong N, Klajing W. Red rice bran extract suppresses colon cancer cells via apoptosis induction/cell cycle arrest and exerts antimutagenic activity. *Experimental Oncology*, 2023, 45(2): 220-230
- [47] Hosoda K, Sasahara H, Matsushita K, Tamura Y, Miyaji M, Matsuyama H. Anthocyanin and proanthocyanidin contents, antioxidant activity, and *in situ* degradability of black and red rice grains. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 2018, 31(8): 1213
- [48] Park J Y, Oh S H, Han S I, Lee Y Y, Lee B W, Ham H, Choi Y H, Oh S K, Cho J H, Song Y C. Starch structure and physicochemical properties of colored rice varieties. *Korean Journal of Crop Science*, 2016, 61(3): 153-162
- [49] Yang X, Ye Z Q, Shi C H, Zhu M L, Graham R D. Genotypic differences in concentrations of iron, manganese, copper, and zinc in polished rice grains. *Journal of Plant Nutrition*, 1998, 21(7): 1453-1462
- [50] Koh H J, Won Y J, Wan G W, Heu M H. Varietal variation of pigmentation and some nutritive characteristics in colored rices. *Korean Journal of Crop Science*, 1996, 41(5): 600-607
- [51] Seo W D, Kim J Y, Han S I, Ra J E, Lee J H, Song Y C, Park M J, Kang H W, Oh S K, Jang K C. Relationship of radical scavenging activities and anthocyanin contents in the 12 colored rice varieties in Korea. *Journal of the Korean Society for Applied Biological Chemistry*, 2011, 54: 693-699
- [52] Chen X, Yang Y, Yang X, Zhu G, Lu X, Jia F, Diao B, Yu S, Ali A, Zhang H, Xu P, Liao Y, Sun C, Zhou H, Liu Y, Wang Y, Zhu J, Xiang Q, Wu X. Investigation of flavonoid components and their associated antioxidant capacity in different pigmented rice varieties. *Food Research International*, 2022, 161: 111726
- [53] Batubara I, Maharni M, Sadiyah S. The potency of white rice (*Oryza sativa*), black rice (*Oryza sativa* L. *indica*), and red rice (*Oryza nivara*) as antioxidant and tyrosinase inhibitor// Margareta Rahayuningsih. *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing: Zaenuri, 2017: 012017
- [54] Zhang L, Cui D, Ma X, Han B, Han L. Comparative analysis of rice reveals insights into the mechanism of colored rice via widely targeted metabolomics. *Food Chemistry*, 2023, 15(399): 133926
- [55] Baudry A, Heim MA, Dubreucq B, Caboche M, Weisshaar B, Lepiniec L. TT2, TT8, and TTG1 synergistically specify the expression of *BANYULS* and proanthocyanidin biosynthesis in *Arabidopsis thaliana*. *The Plant Journal*, 2004, 39(3): 366-380
- [56] Nesi N, Jond C, Debeaujon I, Caboche M, Lepiniec L. The *Arabidopsis* *TT2* gene encodes an R2R3 MYB domain protein that acts as a key determinant for proanthocyanidin accumulation in developing seed. *The Plant Cell*, 2001, 13(9): 2099-2114
- [57] Liu Y, Lin-Wang K, Espley R V, Wang L, Yang H, Yu B, Dare A, Varkonyi-Gasic E, Wang J, Zhang J, Wang D, Allan A C. Functional diversification of the potato R2R3 MYB anthocyanin activators AN1, MYBA1, and MYB113 and their interaction with basic helix-loop-helix cofactors. *Journal of Experimental Botany*, 2016, 67(8): 2159-2176
- [58] Xu W, Dubos C, Lepiniec L. Transcriptional control of flavonoid biosynthesis by MYB-bHLH-WDR complexes. *Trends in Plant Science*, 2015, 20(3): 176-185
- [59] Hichri I, Barrieu F, Bogs J, Kappel C, Delrot S, Lauvergeat V. Recent advances in the transcriptional regulation of the flavonoid biosynthetic pathway. *Journal of Experimental Botany*, 2011, 62(8): 2465-2483
- [60] Zheng J, Wu H, Zhu H, Huang C, Liu C, Chang Y, Kong Z, Zhou Z, Wang G, Lin Y, Chen H. Determining factors, regulation system, and domestication of anthocyanin biosynthesis in rice leaves. *New Phytologist*, 2019, 223(2): 705-721
- [61] Meng L, Qi C, Wang C, Wang S, Zhou C, Ren Y, Cheng Z, Zhang X, Guo X, Zhao Z, Wang J, Lin Q, Zhu S, Wang H, Wang Z, Lei C, Wan J. Determinant factors and regulatory systems for anthocyanin biosynthesis in rice apiculi and stigmas. *Rice*, 2021, 14(1): 37
- [62] Zheng J, Wu H, Zhao M, Yang Z, Zhou Z, Guo Y, Lin Y, Chen H. *OsMYB3* is a R2R3-MYB gene responsible for anthocyanin biosynthesis in black rice. *Molecular Breeding*, 2021, 41(8): 51
- [63] Luo J, Huang W, Yan J, Fang Z, Ren M. The *GzMYB-7D1* gene of Guizimai No.1 wheat is essential for seed anthocyanins accumulation and yield regulation. *Plant Science*, 2022, 320: 111293
- [64] Sweeney M T, Thomson M J, Pfeil B E, McCouch S. Caught red-handed: *Rc* encodes a basic helix-loop-helix protein conditioning red pericarp in rice. *The Plant Cell*, 2006, 18(2): 283-294

- [65] Li S, Zachgo S. *TCP 3* interacts with R2R3-MYB proteins, promotes flavonoid biosynthesis and negatively regulates the auxin response in *Arabidopsis thaliana*. *The Plant Journal*, 2013, 76(6): 901-913
- [66] Chen M H, Pinson S R M, Jackson A K, Edwards J D. Genetic loci regulating the concentrations of anthocyanins and proanthocyanidins in the pericarps of purple and red rice. *The Plant Genome*, 2023, 16(2): 20338
- [67] Zhou Z, Li H, Wei R, Li D, Lu W, Weng Z, Yang Z, Guo Y, Lin Y, Chen H. RNA-seq reveals transcriptional differences in anthocyanin and vitamin biosynthetic pathways between black and white rice. *Gene*, 2022, 844: 146845
- [68] Li B, Jia Y, Xu L, Zhang S, Long Z, Wang R, Guo Y, Zhang W, Jiao C, Li C, Xu Y. Transcriptional convergence after repeated duplication of an amino acid transporter gene leads to the independent emergence of the black husk/pericarp trait in barley and rice. *Plant Biotechnology Journal*, 2024, 22(5): 1282-1298
- [69] Yamsaray M, Sreewongchai T, Phumichai C, Chalermchaiwat P. Yield and nutritional properties of improved red pericarp Thai rice varieties. *Science Asia*, 2023, 49(2): 155-160
- [70] Soonsuwon W, Chadakan N, Ali A, Nualsri C. Improving yield components and overall yield in M2-M4 phenotypic mutants, induced by {EMS}, of upland red rice (*Oryza sativa* L.) cv. Dawk Kha 50. *Science Asia*, 2023, 49(4): 491-496
- [71] Lu Y, Zuo Z, Yang Z. Toward breeding pigmented rice balancing nutrition and yield. *Trends in Plant Science*, 2023, 6(23): 1360-1385
- [72] 吴九根, 张文胜. 特种稻黑糯 178 的选育及米质分析. *广东农业科学*, 1994 (6): 5-7
Wu J G, Zhang W S. Breeding and rice quality analysis of special rice Heinuo 178. *Guangdong Agricultural Science*, 1994 (6): 5-7
- [73] Shi T, Gao Y, Xu A, Wang R, Lyu M, Sun Y, Chen L, Liu Y, Luo R, Wang H, Liu J. A fast breeding strategy creates fragrance- and anthocyanin-enriched rice lines by marker-free gene-editing and hybridization. *Molecular Breed*, 2023, 43(4): 23
- [74] Lu Y, Zuo Z, Yang Z. Toward breeding pigmented rice balancing nutrition and yield. *Trends in Plant Science*, 2023, (23): 1360-1385
- [75] Jia Y, Gealy D. Weedy red rice has novel sources of resistance to biotic stress. *The Crop Journal*, 2018, 6(5): 443-450
- [76] Bryant R, Proctor A, Hawkridge M, Jackson A, Yeater K, Counce P, Yan W, McClung A, Fjellstrom R. Genetic variation and association mapping of silica concentration in rice hulls using a germplasm collection. *Genetica*, 2011, 139(11-12): 1383-1398
- [77] Sathe A P, Kumar A, Mandlik R, Raturi G, Yadav H, Kumar N, Shivaraj S M, Jaswal R, Kapoor R, Gupta S K, Sharma T R, Sonah H. Role of silicon in elevating resistance against sheath blight and blast diseases in rice (*Oryza sativa* L.). *Plant Physiology and Biochemistry*, 2021, 166: 128-139
- [78] Deepa K, Pillai M A, Murugesan N. Biochemical bases of resistance to brown planthopper (*Nilaparvata lugens*) (Stal) in different rice accessions. *Agricultural Science Digest-A Research Journal*, 2016, 36(2): 102-105
- [79] Pati P, Jena M, Bhattacharya S, Behera S K, Pal S, Shivappa R, Dhar T. Biochemical defense responses in red rice genotypes possessing differential resistance to brown planthopper, *Nilaparvata lugens* (Stal). *Insects*, 2023, 14(7): 632
- [80] Mustikarini E D, Ardiarini N R, Basuki N, Kuswanto. The improvement of early maturity red rice mutant trait for drought tolerance. *International Journal of Plant Biology*, 2017, 7(1): 6345
- [81] 朱二, 陈汉明, 李江英, 杨红雁, 黑二, 李小波. 云南省有色稻米产量潜力和抗病性初探. *农业技术与装备*, 2021(11): 4
Zhu E, Chen H M, Li J Y, Yang H Y, Hei E, Li X B. Yield potential and disease resistance of colored rice in Yunnan province. *Agricultural Technology and Equipment*, 2021(11): 4
- [82] Kasim N, Musa Y, Mustari K, Syaiful S A, Riadi M, Sjahril R, Ahyani N. Screening of eight mutants of Sinjai lokal red rice (*Oryza sativa*) to salinity stress// Krasae Chanawongse. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Makassar, In donesia: IOP Publishing, 2020: 012089
- [83] Liu Y, Qi X, Gealy D R, Olsen KM, Caicedo AL, Jia Y. QTL analysis for resistance to blast disease in US weedy rice. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, 2015, 28(7): 834-844
- [84] 韦剑思, 林莹. 黑米营养和部分功能成分特性及综合应用研究进展. *广西农学报*, 2022, 37(6): 86-94
Wei J S, Lin Y. Research progress on nutritional and functional components of black rice and their comprehensive application. *Guangxi Journal of Agronomy*, 2022, 37(6): 86-94
- [85] 郝艳萍, 李军辉, 朱克庆. 红米的超微加工及其开发利用. *粮食加工*, 2020, 45(4): 40-43
Hao Y P, Li J H, Zhu K Q. Ultramicro processing of red rice and its development and utilization. *Grain Processing*, 2020, 45(4): 40-43
- [86] Kumari R, Gupta M. Characterization of black rice (*Oryza sativa* L.) incorporated rusk for physicochemical, functional properties, in-vitro starch digestibility, and anti-inflammatory efficacy. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2024, 104(5): 2610-2620
- [87] 于学智, 姜洪武, 张月, 王秋蓝. 黑米提取液对桑蚕丝织物的染色性能研究. *印染助剂*, 2019, 36(1): 4
Yu X Z, Jiang H W, Zhang Y, Wang Q L. Study on dyeing performance of black rice extract on Mulberry silk fabric. *Printing and Dyeing Auxiliaries*, 2019, 36(1): 4