

紫黑米种质功能成分综合研究与利用

杨加珍^{1,2}, 曾亚文^{1*}, 杜娟¹, 杨晓梦¹, 陶祥¹, 杨树明¹, 普晓英¹, 杨涛¹

1. 云南省农业科学院生物技术与种质资源研究所, 云南省农业生物技术重点实验室, 昆明 650223;

2. 昆明田康科技有限公司, 昆明 650231

摘要: 紫黑米富含花青素、黄酮、多酚等功能成分, 着重介绍了花青素等功能成分的含量差异及其影响因素、功能研究、基于代谢机理与育种及食品加工工艺的功能成分强化研究、功能成分的利用及提取工艺等领域的研究进展。针对国内外紫黑米功能成分综合研究利用进展, 提出紫黑米的育种利用、食品保健、医药研发和分子机理研究及其新型功能食品研制与产业化对策, 以期为紫黑米相关研究提供参考。

关键词: 黑米; 紫米; 米糠; 功能成分; 花青素; 研究利用

DOI: 10.3969/j.issn.2095-2341.2015.01.07

Comprehensive Utilization and Research of Functional Components of Purple Black Rice Germplasm

YANG Jia-zhen^{1,2}, ZENG Ya-wen^{1*}, DU Juan¹, YANG Xiao-meng¹, TAO Xiang¹, YANG Shu-ming¹, PU Xiao-ying¹, YANG Tao¹

1. Provincial Key Laboratory of Agricultural Biotechnology of Yunnan, Biotechnology and Genetic Resources Institute, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Kunming 650223, China;

2. Kunming Tiankang Science & Technology Co. Ltd., Kunming 650231, China

Abstract: Black and purple rice is rich in functional ingredients, such as anthocyanins, flavonoids, polyphenols and so on. The paper reviewed the research progress of composition differences in functional ingredients and the factors, especially anthocyanin, functional studies, functional components strengthening studies based on the metabolic mechanism, breeding and food processing. According to the progress of comprehensive research and utilization of functional components in purple black rice at home and abroad, we put forward to countermeasures of breeding utilization, health food, pharmaceutical research, molecular mechanism, new functional food development and industrialization for purple black rice, which were expected to provide reference for related research.

Key words: black rice; purple rice; rice bran; functional components; anthocyanin; research and utilization

稻米是世界 50% 以上人口的主食, 稻壳及米糠的活性物质对人类和哺乳动物抗氧化、抗菌、抗癌、抗糖尿病以及预防心血管病等具有重要作用^[1]。功能稻米是强调其功能成分对人体充分显示机体防御功能、调节生理节律、预防疾病和促进康复等功能的大米, 功能稻米因防治慢性病功效显著已成为人类补充功能成分的重要来源。尤其是富含功能成分的紫黑米及其制品已成为国内

外非常流行的功能食品。紫黑米含有植酸、异牡荆黄素、 γ -谷维素、植物甾醇类、二十八醇、鲨烯、GABA、维生素 E 和生育三烯甘油酯衍生物等 100 多种活性物质, 具有抗癌、消炎、抗糖尿病、降血脂、抗疲劳和防治心血管疾病等功效。中国、日本和韩国有消费有色稻米的悠久历史, 紫米在中国传统医学中被用于增强肾功能、防治贫血、促进血液循环、消除瘀血、防治糖尿病和改善视力。《本

收稿日期: 2014-11-05; 接受日期: 2014-11-24

基金项目: 云南省科技惠民计划项目 (2014RA060); 云南省重点新产品开发项目 (2014BD001) 资助。

作者简介: 杨加珍, 实验师, 本科, 主要从事功能食品作物育种利用研究。E-mail: 2657313071@qq.com。* 通信作者: 曾亚文, 研究员, 博士, 硕士生导师, 主要从事大麦和功能稻米等功能作物育种利用研究。E-mail: zengyw1967@126.com

草纲目》记载:紫米有滋阴补肾、健脾暖肝、明目活血、抗癌和预防心脏病等作用。紫黑米功能成分防治慢性病研究已取得了一定进展,但对紫黑米功能成分的研究还有待深入以促进紫黑米综合利用及其产业化进程。

1 紫黑米功能成分的研究

1.1 功能成分比较

全粒稻米的胚乳、胚和麸皮的总酚含量分别为 0.11 mg GAE/g、2.79 mg GAE/g 和 7.35 mg GAE/g,麸皮中束缚酚酸占全粒总酸的 90%;黑米和红米麸皮多酚分别占总酚含量的 84%和 86%,自由/结合酚酸分别占总酸的 85%和 65%,而白米多酚和自由/结合酚分别占总酚和总酸的 60%和 41%^[2]。云南稻核心种质紫糙米的抗性淀粉、总黄酮极显著高于白糙米^[3],紫糙米的钾和钙含量最高且极显著高于白糙米^[4]。色米以黑、红和暗紫色为主,由许多黄酮、丹宁酸、多酚、固醇、维生素 E、 γ -谷维素、氨基酸和必需脂肪酸组成^[5],这些成分在色米与白米间的差异尚不十分清楚。

目前,已发现的黑米花青素共 14 种,以矢车菊素-3-葡萄糖苷和芍药素-3-葡萄糖苷为主^[6],而矢车菊素-3,5-二葡萄糖苷、矢车菊素-3-O-戊糖苷、矢车菊素-3-O-己糖苷、矢车菊素-3-鼠李糖苷、芍药素-3-O-戊糖苷、芍药素-3-O-己糖苷、芍药素-3-阿拉伯糖苷、锦葵素-3-半乳糖苷、锦葵素和天竺葵素-3,5-二葡萄糖苷等 12 种含量相对较少。黑米 5 种黄酮甙类(189 $\mu\text{g/g}$)以槲皮素-3-O-葡萄糖苷和槲皮素-3-D-芸香糖甙为主,类胡萝卜素(3.9 $\mu\text{g/g}$)以叶黄素、玉米黄质、番茄红素和 β -胡萝卜素为主, γ -谷维素(279 $\mu\text{g/g}$)是 24-亚甲基环木菠萝醇阿魏酸酯、菜油甾醇阿魏酸酯、环木菠萝烯醇阿魏酸酯和 β -谷甾醇阿魏酸酯的混合物^[7]。云谷 1 号黑糙米含钙 189.5 mg/kg、镁 1100.8 mg/kg、锌 26.2 mg/kg、蛋白质 13.75%和氨基酸 13.38%^[8]。国内外紫黑米功能成分以花青素研究进展显著,而黄酮、多酚、维生素 E、胡萝卜素、 γ -谷维素和矿质元素取得一定进展。黑米功能成分及其药理学研究比紫米功能成分及其药理学研究进展显著;黑米和紫米均在糙米果皮累积具有抗氧化活性的花青素,而黑米与紫米其他

功能成分的异同尚不十分清楚。

1.2 功能机理研究

黑米防治慢性病功效显著,主要归结于花色苷、总黄酮、纤维素、维生素 E、多酚、咖啡酸和阿魏酸等功能成分。黑米功能成分的利用体现在日常食用黑米、黑米酒等功能食品,以及利用黑米麸中防治人类慢性病的功能成分。日常饮食补充黑米提取物有利于减少肝脂质沉着症、高血脂和高血糖等疾病^[9]。用 HPLC-MS/MS 检测出中国黑米酒 15 种酚类成分包括 8 种酚酸、3 种黄酮醇和 4 种花青素^[10]。黑米麸是保护肝脏理想的功能食品原料,黑米麸中矢车菊素-3-葡萄糖苷占黑米麸总花青素提取物的 88%,对肝脏健康起到保护作用^[11]。黑米麸有 21 种成分,补充黑米麸饲喂老鼠 2 周肿瘤体积减少 35%,诱发细胞自然死亡、抑制巨噬细胞和血管再生有助于肿瘤衰退^[12]。黑米麸中亲水性花青素和亲脂性母育酚防止胆固醇和脂肪酸氧化能力较强,有利于预防与心血管疾病及其慢性病相关的炎症;花青素与母育酚相比抗氧化能力相对较高而抑制脂肪酸氧化能力较低^[13]。黑米因纤维素、维生素 E 和多酚含量丰富而具有抗癌、消炎、抗糖尿病、防衰老、抗疲劳和抗衰老痴呆症等保健作用^[14,15]。紫米 γ -谷维素具有抗氧化、抑制胆固醇氧化、减少动物血浆胆固醇水平、有效治疗炎症、抑制肿瘤生长和降低血压等重要作用^[16]。

紫黑米功能成分在医药上应用以花青素及其提取物为主,其他功能成分研发相对滞后。黑米花青苷复方胶囊对 CCl₄ 肝损伤起到一定的防治作用^[17],而且对高血脂症病人具有明显的辅助降血脂作用^[18]。口服黑米花青素提取物通过降低血浆甘油三酸酯和总胆固醇从而改善脂质结构、增强血小板的稳定性,并具有消炎作用^[19],能够改善高果糖饮食相关的高血脂和糖尿病等代谢异常^[20],抗乳腺癌^[21]以及减轻人体乙醇伤害^[22]。黑米花色素有效预防视网膜光化学损伤和抑制荧光灯诱导的视网膜凋亡^[23]。紫米麸提取物及花青素能阻止血管内皮生长因子的作用,抑制血管增殖和迁移,控制视网膜损伤^[24]。黑米中提取花青苷为矢车菊-3-葡萄糖苷和花青素-3-葡萄糖苷的混合物,可抑制小鼠巨噬细胞中氧化氮合酶的表达来减少细胞毒性^[25]。黑米麸含抗炎和抗变

应物质,可防治慢性炎症相关疾病^[26];口服稻壳提取物可使胰岛和肝脏细胞恢复到正常水平,该物质补充于功能食品可防止糖尿病相关的炎症和氧化胁迫,保护胰岛细胞生产胰岛素^[27]。紫米乙醇粗提物抗氧化剂总产明显强于可溶性己烷和乙酸乙酯,而可溶性己烷可诱导结肠癌细胞凋亡^[28]。紫米可作为老年痴呆症的神经退化和记忆损伤潜在的有效药剂^[29]。紫米提取物可通过改变结肠环境预防结肠癌^[30]。

1.3 功能成分的影响因素

紫黑米功能成分含量高低及其稳定性受稻种基因型、果皮部位、环境条件和沉积时期等因素影响。黑米和野生稻米的花青素种类相似,但两者的矢车菊素-3-葡萄糖苷含量有差异^[31]。花青素戊糖类(矢车菊素-3-O-戊糖苷和芍药素-3-O-戊糖苷)位于全果皮,而已糖类(矢车菊素-3-O-己糖苷和芍药素-3-O-己糖苷)位于果皮背部^[32]。黑米果皮授粉后3 d开始沉积花色素,7 d后充满整个颖果皮;果皮所有的部位都可独立合成和沉积花色素,低温或缺氧不利于花色素的合成^[33]。龙井一号花青素以矢车菊素-3-葡萄糖苷为主,随着干旱胁迫加重,花青素含量和苯丙氨酸解氨酶活性上升,但干旱胁迫过重时花青素含量下降而苯丙氨酸解氨酶活性上升^[34]。云南紫米叶的花青素在530 nm处显著吸收峰分布在上下表皮细胞,旗叶中最高光合氧释放率和叶绿素含量分别是28%和23%;太阳下紫叶逆境诱导氧化胁迫下可更有利于花青素成为主要抗氧化剂,紫叶与绿叶间花青素的感光氧化作用可诱导成不同的变异模型^[35]。紫黑米基因型、生长环境等对色素含量有一定影响,在功能成分利用时还要考虑色素理化性质的影响因素。黑米花色苷抗氧化稳定性受光照、温度、食品原料、金属离子和杀菌工艺等多种因素影响^[36]。紫外线照射80 min内、20~80℃、食盐和蔗糖对黑米色素稳定性影响不大,在酸性状态下稳定性好、色泽佳且适合与酸性食品共同食用^[37]。pH为2.2~6.0和温度100~165℃处理黑米花青素的矢车菊素-3-葡萄糖苷和矢车菊素-3-芸香糖苷抗氧化能力类似^[38]。蒸煮时黑米花青素和酚类化合物降解,增加酚醛类物质并增强金属螯合活性^[39]。黑米的生米和熟米均能清除DPPH活性、抑制活性一氧化氮和TNF-α产

生,但蒸煮过程花青素含量及其活性均降低^[40]。

2 功能成分强化研究

黑米是饮食中抗氧化物质的重要来源之一^[14]。紫黑米医药保健价值的研究再次使得功能稻米研发成为热点领域。目前,紫黑米及其米麸的功能成分防治慢性病研究进展显著,但紫黑米及紫黑米麸功能食品用于防治人类慢性病研究进展缓慢,新型紫黑米功能食品和药品尚待研发。

2.1 代谢机理与育种研究

世界稻米消费区慢性病发病率低与稻米抗氧化复合物有关,其活性分子包括类黄酮、花青素、原花色素、酚酸、维生素E、三稀甘油酯、γ-谷维素和植酸,4种米抗氧化活性强弱依次为黑米>紫米>红米>糙米,粳稻抗氧化复合物明显高于籼稻,显然以黑米麸或全粒黑米为主消费可最大限度的吸收抗氧化复合物^[41]。以529个栽培稻种质中获得的 6.4×10^6 个SNPs对840种代谢产物进行代谢全基因组关联分析(metabolic genome-wide association study, mGWAS),发现籼粳亚种间代谢产物自然变异差异极大,鉴别出了36个代谢产物候选基因^[42]。紫米麸的类胡萝卜素少,收获期高温稻米麸皮中总类胡萝卜素水平增加而主要的叶黄素含量降低,揭示了紫米抗氧化活性和着色分子机制^[43]。水稻查尔酮合成酶基因DNA序列扩增,获得CHS外显子Ⅱ部分序列及其SNP 3~5个氨基酸的变异,可能与黑米黄酮含量差异有关^[44]。水稻花青素合成相关基因*OsPAL*, *OsCHS*和*OsCHI*在叶、茎、种子中均有表达, *OsF3H*, *OsF3'H*和*OsDFR*茎中不表达而在叶内表达, *OsANS*在黑米和紫叶水稻的叶片和花中少量表达, *OsBI*和*OsB2*在紫叶水稻叶片中表达, *OsCI*在花期时特异表达^[45]。黑米延长果蝇寿命活性主要与*SOD1*, *SOD2*, *CAT*, *Mth*和*Rpn11*基因表达有关^[46]。黑米花青素着色相关的137个转录因子分为10组,其中9个上调基因和6个下调基因在调节花青素合成中起重要作用^[47]。用黑米近等基因系(near-isogenic line, NIL)和全基因组扫描将黑色必不可少的*Kala1*, *Kala3*和*Kala4*相关着色基因定位于第1、3和4染色体上^[48];水稻第4染色体的*Pb*和第1染色体的*Pa*基因同时存在时种皮呈紫色, *Pa*单独存在时白色, *Pb*单独存在

时棕色^[49]。龙晴4号香味受 *fgr* 基因控制且第2外显子8 bp 碱基缺失,而紫种皮受 *Ra* (*Pb*) 基因控制且第7外显子末端2 bp (GT) 缺失^[50];将2个基因缺失位点设计的2对功能标记(InDel-E7和CAPS-Ra)用于香味紫色基因分子育种。紫黑米花青素的基因表达、相关转录因子、染色体位点、调控因子和分子育种等分子水平研究取得一定进展,但其他次生代谢产物的分子机理研究相对滞后。

尽管中国保存黑米种质441份^[51],但紫黑米育种工作相对滞后。云南选育的思紫19约占普洱紫米种植面积的50%;云南省墨江县是中国紫米之乡,目前建成3万余亩紫米种植基地。墨江紫米单产(5.7 t/hm²)较低而生产成本低,稻谷产量适宜中海拔区的优质黑米云谷1号单产可达8.5 t/hm²;龙晴4号是云南苏资2号与螃蟹谷杂交选育而成的优质紫香型的糯稻品种^[50];以紫宝香糯1号和海选1号杂交,培育出富含维生素A(20.8 IU/100 g)的两系黑米恢恢系紫恢07^[52];本课题组已选育出紫米新品种功米2号(CNA20070618.7)获农业部植物新品种权,单产达8 t/hm²,且籽粒富含GABA(625.4 mg/kg)、钙(226.5 mg/kg)、铁(37.8 mg/kg)和锌(77.9 mg/kg)等功能物质。目前的已育成紫黑米品种较少,随着人们对营养保健食品的要求越来越高,作为功能性食品加速高产紫黑米新品种选育及其产业化十分重要。

2.2 功能性食品加工工艺研究

紫黑米的黑米啤酒、黑米挂面和保健饮料等新型功能食品的工艺研发进展显著。黑米啤酒营养及保健功效明显优于普通啤酒^[53]。添加 α -淀粉酶和适当延长糊化及液化时间可解决黑米中蛋白质及色素含量均高造成的糊化及糖化问题。以黑米粉与小麦粉配比1:9、食盐1.5%、水30%和海藻酸钠0.3%为工艺参数,可制得品质优良、口感尚佳的营养型黑米挂面^[54]。以山药汁40 mL、花生汁20 mL、黑米汁20 mL、水80 mL及白砂糖6%、柠檬酸0.08%配制的复合型保健饮料口味独特、营养丰富、风味良好,感官得分86.7分^[55]。紫糙米热水加工后浸出花青素保留量较低而单酚醛类含量高,煮熟过程中果皮有利于保留水溶性抗氧化物^[56]。

3 功能成分的利用与开发

3.1 开发功能食品

紫黑米是中国消费量最大的功能稻米,其功能成分花青素还是一种重要的天然食品着色剂。色米提取物被用作面包、冰淇淋、酒和功能食品中天然食品的着色剂^[57]。紫米是煮食和加工功能食品的原料,如紫米粳粿、紫米甜白酒、大枣紫米粥、紫米三七炖鸡、紫米八宝饭、紫米汽锅鸡和紫米葫芦鸭等。墨江紫米被列为云南六大名米和中国六大高营养米之一;墨江紫米当地称接骨米,源于元朝墨江紫米粒大、细腻、粘性强,蒸制后断米接成整米饭的特点;紫米色素溶于水、粥晶莹透亮,具有补血益气作用。以墨江紫米为原料研制出紫米封缸酒、紫谷酒、紫米花雕黄酒和紫米果冻。以紫米、魔芋精粉为原料研制出具有保健功能、风味独特且品质优良的低糖型紫米魔芋果冻^[58]。云南地道酒业公司以墨江紫米为原料酿制成天溪紫米封缸酒、紫谷酒和紫米花雕黄酒等名牌产品。

黑米又称补血米、长寿米、药米、月米和贡米。黑米已广泛应用于制备护肝功能食品、黑米啤酒、黑米挂面、黑米复合饮料、黑米复合乳和黑米酸奶。黑米发酵乳清除DPPH $\cdot$ 、清除 $\cdot$ OH、总抗氧化能力和螯合Fe²⁺能力分别高达60.16%、30.76%、0.847%和28.43%^[59]。

3.2 稻米功能成分提取

黑米的功能成分提取物及其抗氧化能力等功效均受提取条件的影响,应优化提取条件以提高功能成分的提取效率和活性。提取条件对黑米黑色素提取的影响大小依次为:pH>乙醇浓度>液料比>温度>时间;pH 2、超声时间30 min、提取温度50℃、液料比30 mL/g和乙醇浓度70%的条件下,平均提取率6.85%^[60]。pH 2.5、料液比1:25时,用40%的乙醇在60℃条件下,紫米提取4 h多酚得率最高(195.6 mg/100g)^[61]。采用4种溶剂和6种吸附剂进行提取优化,以70%的酸化乙醇提取的花青素含量最高,为461.72 mg/L,Amberlite XAD7HP吸附容量最高为0.406 $\pm$ 0.010 mg/g,退吸能力0.252 $\pm$ 0.016 mg/g^[62]。70%乙醇适合作为紫米中多酚类和黄酮类化合物的提取溶剂^[63]。在二氯甲烷-Payao-紫米提取物中的 γ -谷维素水

平最高(44.17 mg/g)而甲醇-Payao-紫米提取物中的花青素含量高(5.80 mg/g);甲醇-Payao-紫米提取物常引起人类 HepG2 细胞中毒,及能与长春碱细胞毒素相互增强作用^[5]。黑米麸提取物中抗氧化和增加伤口愈合的矢车菊素-3-葡萄糖苷、咖啡酸和阿魏酸含量较高,有利于控制皮肤老化和慢性病^[64]。黑米中分离了 2-(3,4-二羟基苯基)-4,6-二羟基苯并呋喃-3-羧酸葡萄糖酯和 2-O-(3,4-二羟基苯甲酰基)-2,4,6-二羟基苯酰乙酸葡萄糖酯 2 个新氧化产物^[65]。

紫米麸提取的亲水抗氧化剂活力比亲脂抗氧化剂更强,花青素和 γ -生育酚提取以紫米麸中的内果皮为主,内果皮亲水花青素提取物(29.0 mg/g)是外果皮的 8 倍,内果皮亲水酚(489.1 $\mu\text{g CE/g}$)和氧自由基清除力(433.6 $\mu\text{mol TE/g}$)分别是外果皮的 4.3 倍和 5.5 倍^[66]。

4 展望

紫黑米花青素含量高低及其稳定性受野生和栽培稻种基因型、果皮部位、环境条件和色素沉积时期等因素影响的有关研究进展显著,然而其他功能成分含量和稳定性的影响因素研究报道甚少。尽管紫米和黑米均研制出较多的新型功能食品,黑米花色苷、总黄酮、纤维素、维生素 E、多酚、咖啡酸和阿魏酸等功能成分及其药理学研发进展显著,但不同黑米品种中色素的种类分布、药理作用、提取分离技术和稳定性等问题仍然是今后研究的重点,紫米功能成分研发相对较少尚待加强。黑米和紫米均是糙米果皮处累积具有抗氧化活性的花青素,在功能成分及其药理学研究方面,黑米比紫米进展显著,紫米与黑米功能成分的异同尚不十分清楚。目前,紫黑米及紫黑米麸的功能成分用于防治慢性病的研究较多,但紫黑米及紫黑米麸功能食品研究进展缓慢。尽管紫黑米是中国消费量最大的功能稻米,并且紫黑米的分子育种和食品加工工艺取得一定进展,但紫黑米的单产偏低和育种水平滞后影响了紫黑米的产业化进程。紫黑米功能食品生产尚处于起步阶段,仅局限于黑米啤酒、黑米挂面、黑米复合乳、黑米酸奶和黑米复合饮料;防治人类慢性病的紫黑米新型功能食品日益受到关注,新型紫黑米功能食品和药品研制亟待加强。稻米尤其是紫黑米次生代谢

物分子机理和功能成分提取工艺研究将促进新型功能食品研发。

结合国内外紫黑米功能成分综合研究利用进展,提出功能稻紫黑米的育种利用、食品保健、医药研发、分子机理研究及其新型功能食品研制与产业化对策如下:①紫黑米富含 100 多种活性物质而功能成分研发主要集中于花青素,应加强紫黑米强其他功能成分的育种利用、分子机理、提取工艺及医疗保健作用等领域的研发;②尽管紫黑米及其制品已成为国内外非常流行的功能食品,然而古老野生稻紫黑米种质仍有 50% 以上尚未开发利用,而紫黑米消费量仅占世界稻米消费量的 0.01%。因此,建立紫黑米种质资源利用与育种中心,联合医药保健及功能食品研发中心,提升紫黑米防治人类慢性病的影响力,推动其产业化进程;③鉴于花青素基因作为报告基因可提高植物转基因研究工作效率^[67],紫黑米花青素基因作为报告基因研发应用前景广阔;④鉴于花青素的抗氧化、肝功能保护、改善血液循环、抗癌、抗炎、抗过敏和视力保护等生理功能及作用机制研究进展显著^[68],应加速紫黑米功能食品研发,将稻米由单一饱腹转变为集饱腹、美味、营养与保健等为一体的复合功能稻米,紫黑米在发挥此复合功能和成为新型功能食品上具有天然的优势;⑤稻壳提取物包含 161 种复合物^[69],可作改良食物品质、安全和环境友好的新型生物材料。

参 考 文 献

- [1] Friedman M. Rice brans, rice bran oils, and rice hulls: Composition, food and industrial uses, and bioactivities in humans, animals, and cells [J]. J. Agric. Food Chem., 2013, 61 (45): 10626–10641.
- [2] Shao Y F, Xu F F, Sun X, et al.. Identification and quantification of phenolic acids and anthocyanins as antioxidants in bran, embryo and endosperm of white, red and black rice kernels (*Oryza sativa* L.) [J]. J. Cereal Sci., 2014, 59 (2): 211–218.
- [3] 曾亚文,杜娟,杨树明,等.云南稻核心种质糙米功能成分栽培型差异及其地带性特征[J].光谱学与光谱分析, 2010, 30(12): 3388–3394.
- [4] 曾亚文,刘家富,汪祿祥,等.云南稻核心种质矿质元素含量及其变种类型[J].中国水稻科学, 2003, 17(1): 25–30.
- [5] Banjerdpongchai R, Wudtiwai B, Sringarm K. Cytotoxic and apoptotic-inducing effects of purple rice extracts and chemotherapeutic drugs on human cancer cell lines [J]. Asian Pac. J. Cancer Prev., 2013, 14(11): 6541–6548.
- [6] Hou F L, Zhang R F, Zhang M W, et al.. Hepatoprotective and

- antioxidant activity of anthocyanins in black rice bran on carbon tetrachloride-induced liver injury in mice[J]. J. Funct. Food, 2013,5(4):1705-1713.
- [7] Pereira-Caro G, Watanabe S, Crozier A, *et al.*. Phytochemical profile of a Japanese black-purple rice [J]. Food Chem.,2013, 141 (3):2821-2827.
- [8] 年伟,邓伟,李小林,等.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.
- [9] Jang H H, Park M Y, Kim H W, *et al.*. Black rice (*Oryza sativa* L.) extract attenuates hepatic steatosis in C57BL/6 J mice fed a high-fat diet via fatty acid oxidation[J]. Nutr. Metab. (Lond), 2012,9(1):27.
- [10] Wang Y, Liu Y, Xiao C, *et al.*. Simultaneous determination of 15 phenolic constituents of Chinese black rice wine by HPLC-MS/MS with SPE[J]. J. Food Sci.,2014,79(6):1100-1105.
- [11] Hou Z H, Qin P Y, Zhang Y, *et al.*. Identification of anthocyanins isolated from black rice (*Oryza sativa* L.) and their degradation kinetics[J]. Food Res. Int., 2013,50(2):691-697.
- [12] Choi S P, Kim S P, Nam S H, *et al.*. Antitumor effects of dietary black and brown rice brans in tumor-bearing mice: Relationship to composition [J]. Mol. Nutr. Food Res.,2013, 57(3):390-400.
- [13] Zhang X M, Shen Y X, Prinyawiwatkul W, *et al.*. Comparison of the activities of hydrophilic anthocyanins and lipophilic tocals in black rice bran against lipid oxidation [J]. Food Chem., 2013,141(1):111-116.
- [14] Peng C, Wang X B, Chen J N, *et al.*. Biology of ageing and role of dietary antioxidants [J/OL]. BioMed. Res. Int, 2014, <http://dx.doi.org/10.1155/2014/831841>.
- [15] Huang J J, Zhao S M, Jin L, *et al.*. Anti-aging effect of black rice in subacute aging model mice [J]. Chin. J. Clin. Rehab, 2006,10(3):82-84.
- [16] Kim H W, Kim J B, Shanmugavelan P, *et al.*. Evaluation of γ -oryzanol content and composition from the grains of pigmented rice-germplasms by LC-DAD-ESI/MS [J]. BMC Res. Notes, 2013,6:149.
- [17] 路宏朝,王杨科,李丽霞,等.黑米花青苷复方胶囊对实验性肝损伤的保护作用[J].食品科学,2013,34(3):261-263.
- [18] 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.
- [19] Xia X D, Ling W H, Ma J, *et al.*. An anthocyanin-rich extract from black rice enhances atherosclerotic plaque stabilization in apolipoprotein E-deficient mice [J]. J. Nutr.,2006,136(8):2220-2225.
- [20] Guo H H, Ling W H, Wang Q, *et al.*. Effect of anthocyanin-rich extract from black rice (*Oryza sativa* L. indica) on hyperlipidemia and insulin resistance in fructose-fed rats [J]. Plant Foods Hum. Nutr.,2007,62(1):1-6.
- [21] Chang H, Yu B, Yu X P, *et al.*. Anticancer activities of an anthocyanin-rich extract from black rice against breast cancer cells *in vitro* and *in vivo* [J]. Nutr. Cancer, 2010, 62(8):1128-1136.
- [22] Hou Z H, Qin P Y, Ren G X. Effect of anthocyanin-rich extract from black rice (*Oryza sativa* L. Japonica) on chronically alcohol-induced liver damage in rats [J]. J. Agric. Food Chem.,2010,58(5):3191-3196.
- [23] Jia H, Chen W, Yu X P, *et al.*. Black rice anthocyanidins prevent retinal photochemical damage *via* involvement of the AP-1/NF- κ B/Caspase-1 pathway in Sprague-Dawley rats [J]. J Vet. Sci.,2013,14(3):345-353.
- [24] Tanaka J, Nakanishi T, Shimoda H, *et al.*. Purple rice extract and its constituents suppress endoplasmic reticulum stress-induced retinal damage *in vitro* and *in vivo* [J]. Life Sci., 2013,92(1):17-25.
- [25] 王金亨.四种黑米花青苷抗氧化活性的构效关系[J].食品科技,2008,(4):143-145.
- [26] Choi S P, Kim S P, Kang M Y, *et al.*. Protective effects of black rice bran against chemically-induced inflammation of mouse skin[J]. J. Agric. Food Chem.,2010,58(18):10007-10015.
- [27] Yang J Y, Kang M Y, Nam S H, *et al.*. Antidiabetic effects of rice hull smoke extract in alloxan-induced diabetic mice[J]. J. Agric. Food Chem., 2012,60(1):87-94.
- [28] Wongjaikam S, Summart R, Chewonarin T. Apoptosis induction in colon cancer cell lines and alteration of aberrant crypt foci in rat colon by purple rice (*Oryza sativa* L. var. glutinosa) extracts[J]. Nutr. Cancer,2014,66(4):690-699.
- [29] Pannangrong W, Wattanathorn J, Muchimapura S, *et al.*. Purple rice berry is neuroprotective and enhances cognition in a rat model of Alzheimer's disease[J]. J. Med. Food,2011,14(7-8):688-694.
- [30] Summart R, Chewonarin T. Purple rice extract supplemented diet reduces DMH-induced aberrant crypt foci in the rat colon by inhibition of bacterial β -glucuronidase [J]. Asian Pac. J. Cancer Prev.,2014,15(2):749-755.
- [31] Kim M K, Kim H A, Koh K, *et al.*. Identification and quantification of anthocyanin pigments in colored rice[J]. Nutr. Res. Pract.,2008,2(1):46-49.
- [32] Yoshimura Y, Zaima N, Moriyama T, *et al.*. Different localization patterns of anthocyanin species in the pericarp of black rice revealed by imaging mass spectrometry [J]. PLoS ONE,2012,7(2):e31285.
- [33] 韩磊,吴先军,张红宇,等.黑米果皮花色素沉积过程的研究[J].中国水稻科学,2006,20(6):384-388.
- [34] 陈应鹏,刘广娜,闫月新,等.干旱胁迫对黑米花青素含量和PAL活性的影响[J].吉林农业科技学院学报,2012,21(1):8-10.
- [35] Peng C, Lin Z, Lin G, *et al.*. The anti-photooxidation of anthocyanins-rich leaves of a purple rice cultivar [J]. Sci. China C: Life Sci., 2006,49(6):543-551
- [36] 李莉蓉,张名位,刘邻渭,等.三种黑色粮油作物种皮花色苷提取物抗氧化能力的稳定性比较 [J]. 中国农业科学, 2007,40(9):2045-2052
- [37] 雷晓燕.黑米色素稳定性的研究[J].沈阳化工大学学报, 2013,27(3):215-219.
- [38] Sui X, Dong X, Zhou W. Combined effect of pH and high temperature on the stability and antioxidant capacity of two anthocyanins in aqueous solution[J]. Food Chem.,2014,163:163-170.

- [39] Surh J, Koh E. Effects of four different cooking methods on anthocyanins, total phenolics and antioxidant activity of black rice[J]. J. Sci. Food Agric., 2014, 94(5): 3296-3304.
- [40] Bhawamai S, Chen Y H. Effects of cooking process on antioxidative and anti-inflammatory activities of black rice extracts[J]. FASEB J., 2014, 28(1): S830.4.
- [41] Goufo P, Trindade H. Rice antioxidants: Phenolic acids, flavonoids, anthocyanins, proanthocyanidins, tocopherols, tocotrienols, γ -oryzanol, and phytic acid[J]. Food Sci. Nutr., 2014, 2(2): 75-104.
- [42] Chen W, Gao Y Q, Xie W B, *et al.*. Genome-wide association analyses provide genetic and biochemical insights into natural variation in rice metabolism[J]. Nat. Genet., 2014, 46(7): 714-721.
- [43] Belefant-Miller H, Grunden E. Carotenoid metabolism is induced in rice bran during very high temperature stress[J]. J. Sci. Food Agric., 2014, 94(9): 1808-1815.
- [44] 邓文辉, 张涛, 吴三桥, 等. 黑稻与白稻生化性状及 CHS 基因部分序列变异分析[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2011, 48(5): 1214-1220.
- [45] 邵雅芳, 徐非非, 唐富福, 等. 水稻花青素合成相关基因的时空表达研究[J]. 核农学报, 2013, 27(1): 9-14.
- [46] Zuo Y Y, Peng C, Liang Y T, *et al.*. Black rice extract extends the lifespan of fruit flies[J]. Food Funct., 2012, 3(12): 1271-1279.
- [47] Kim C K, Cho M A, Choi Y H, *et al.*. Identification and characterization of seed-specific transcription factors regulating anthocyanin biosynthesis in black rice [J]. J. Appl. Genet., 2011, 52(2): 161-169.
- [48] Maeda H, Yamaguchi T, Omoteno M, *et al.*. Genetic dissection of black grain rice by the development of a near isogenic line [J]. Breed. Sci., 2014, 64(2): 134-141.
- [49] 童继平, 李素敏, 刘学军, 等. 有色稻米研究进展[J]. 植物遗传资源学报, 2011, 12(1): 13-18.
- [50] 王军, 杨金欢, 杨杰, 等. 优质紫香糯龙晴 4 号的紫色和香味的基因型分析[J]. 分子植物育种, 2011, 9(6): 688-691.
- [51] 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.
- [52] 杨玉梁, 傅军如, 刘克琦, 等. 含维生素 A 两系恢复系紫恢 07 的选育与应用[J]. 江西农业学报, 2013, 25(4): 5-7.
- [53] 翟秋征, 杨灵. 黑米保健啤酒的研制[J]. 饮料工业, 2009, (6): 25-27.
- [54] 宋娜, 刘学文, 胡海滨, 等. 黑米挂面的研制. 粮食与食品工业, 2009, 16(2): 3-5
- [55] 李超, 商学兵, 宋慧, 等. 山药花生黑米复合保健饮料的工艺研究[J]. 食品工业, 2014, 35(2): 3-6.
- [56] Min B, McClung A, Chen M H. Effects of hydrothermal processes on antioxidants in brown, purple and red bran whole grain rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Food Chem., 2014, 159: 106-115.
- [57] Deng G F, Xu X R, Zhang Y, *et al.*. Phenolic compounds and bioactivities of pigmented rice[J]. Crit. Rev. Food Sci. Nutr., 2013, 53(3): 296-306.
- [58] 付晓萍, 范江平, 张能, 等. 低糖型紫米魔芋果冻的研制[J]. 食品研究与开发, 2014, 35(4): 53-55.
- [59] 郭飞翔, 韩青青, 黄玉军, 等. 黑米发酵乳的体外抗氧化活性研究[J]. 食品研究与开发, 2014, 30(3): 4-7.
- [60] 黄永光, 孔繁晟, 钟红茂, 等. 双频超声协同强化提取黑米黑色素的试验研究[J]. 农业工程学报, 2012, 28(s1): 339-344.
- [61] 魏银花, 申迎宾, 王立, 等. 紫米多酚提取工艺及抗氧化活性研究[J]. 食品与机械, 2013, 29(3): 111-115.
- [62] Kang Y J, Jung S W, Lee S J. An optimal extraction solvent and purification adsorbent to produce anthocyanins from black rice (*Oryza sativa* cv. Heugjinjubyee) [J]. Food Sci. Biotech., 2014, 23(1): 97-106.
- [63] 赵丹, 勾剑颖, 姚世聪, 等. 真菌固态发酵对紫米总酚和总黄酮含量的影响[J]. 食品科技, 2012, 37(12): 136-139.
- [64] Sutthanut K. A local Thai cultivar glutinous black rice bran: A source of functional compounds in immunomodulation, cell viability and collagen synthesis, and matrix metalloproteinase-2 and -9 inhibition [J]. J. Funct. Food, 2014, 7: 650-661.
- [65] Kamiya H, Yanase E, Nakatsuka S. Novel oxidation products of cyanidin 3-O-glucoside with 2, 20-azobis-(2, 4-dimethyl) valeronitrile and evaluation of anthocyanin content and its oxidation in black rice[J]. Food Chem., 2014, 155: 221-226.
- [66] Jang S, Xu Z. Lipophilic and hydrophilic antioxidants and their antioxidant activities in purple rice bran [J]. J. Agric. Food Chem., 2009, 57(3): 858-862.
- [67] 杜建中, 赵欣梅, 王长彪, 等. 可视安全标记花青素合成途径相关基因在植物转化研究中的应用进展[J]. 生物技术进展, 2014, 4(4): 236-244.
- [68] 钟兰兰, 屠迪, 杨亚, 等. 花青素生理功能研究进展及其应用前景[J]. 生物技术进展, 2013, 3(4): 346-352.
- [69] Kim S P, Yang J Y, Kang M Y, *et al.*. Composition of liquid rice hull smoke and anti-inflammatory effects in mice[J]. J. Agric. Food Chem., 2011, 59(9): 4570-4581.