

(下转第 232 页)

DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2019.09.043

红米的健康作用及综合利用

The healthy benefits and applications of red rice

王立¹ 朱璠¹ 王发文² 李言¹WANG Li¹ ZHU Fan¹ WANG Fa-wen² LI Yan¹钱海峰¹ 张晖¹ 齐希光¹QIAN Hai-feng¹ ZHANG Hui¹ QI Xi-guang¹

(1. 江南大学食品学院, 江苏 无锡 214122; 2. 宇顺高科种业股份有限公司, 安徽 安庆 246051)

(1. School of Food Science and Technology of Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China;

2. YuShun High Tech Seed Co., Ltd., Anqing, Anhui 246051, China)

摘要:从红米营养价值、降胆固醇、抗癌、降血压、抗炎抗氧化的健康作用及综合利用等方面进行了综述,分析了红米的综合利用方面所存在的问题,并对后续研究进行了展望。

关键词:红米;健康作用;综合利用

Abstract: Red rice contains proteins, amino acids, vitamins, trace elements, and some biological active ingredients. Recently, its health benefits had been reported, including lowering blood glucose and total cholesterol level, antioxidant ability, antitumor activity, and so on. This review summarized the nutrients, health benefits and comprehensive utilization of red rice.

Keywords: red rice; healthy benefit; comprehensive utilization

有色稻米是一类由于色素沉积在糙米果皮上而使稻米具有颜色的特异水稻资源。中国是有色稻米的种植大国,产量占世界 90% 以上。中国种植的有色稻米中,以红米稻为首,广泛分布于云南、广西、湖南、江西和安徽等地。红米表皮呈红色,胚乳为白色或者透明,有粳、梗、糯等品种,其中粳型黏稻占 73.8%^[1]。红米属于药食两用资源,富含蛋白质、氨基酸、维生素、微量元素以及功能性成分。近年来,已有较多关于红米的研究报道,文章综述了红米的营养价值、健康作用及其开发利用,以期对红米的深度开发利用提供參考。

1 红米的营养价值

研究^[2]表明,红米中蛋白质含量约为 11%,远高于普通大米的 7%;同时,红米中谷氨酸、天冬氨酸和亮氨酸的含量相对较高,红米的必需氨基酸/总氨基酸和必需氨基酸/非必需氨基酸分别为 35.92% 和 56.06%,接近 FAO/WHO 的推荐模式。赖氨酸是大米的第一限制性必需氨基酸,其含量决定了大米蛋白质的品质,红米的赖氨酸含量是普通大米的 2.14 倍^[3]。红米中 Zn、Fe、Cu、Mn 等微量元素的含量均显著高于普通大米中的含量^[4],同时,硒和有机锗分别比普通大米高 330.77%、20.00%^[5]。此外,红米中不饱和脂肪酸含量也高于白米^[6],主要的脂肪酸为棕榈酸(18.34%)、油酸(36.85%)和亚油酸(38.04%)^[7]。

红米的总酚含量显著高于白米^[8],V_E 含量也较高(α 型, 0.07 mg/100 g; γ 型, 0.14 mg/100 g)^[7]。红米的黄酮类物质以及 γ -氨基丁酸的含量较高,分别达到 329.994^[9]、2.910 mg/100 g^[10],因此,红米可作为健康大米进行开发利用^[11]。目前,红米中已鉴定出 10 种 γ -谷维素成分^[12],总含量为 45.2 mg/100 g^[7],高于普通白米和紫米。红米中的色素主要集中在红米的种皮上,具有较好的抗氧化性,含量达 198.62 μ g/g^[13],故红米可用于冰淇淋、面包、白酒以及功能性食品的制作^[14]。红米色素的稳定性较好,但氧化剂和光照会使其褪色,使用还原剂、蔗糖以及葡萄糖能起到护色作用^[15]。红米色素主要为花色苷和原花青素,花色苷包含二甲花翠素^[16]和矢车菊素-3-葡萄糖苷^[17],可以用微波^[18]、超声波^[19]等进行辅助提取,酸性条件和加热会影响其稳定性;红米中的原花青素为非酯性原花青素,由(-)-表儿茶素和(+)-儿茶素聚合

基金项目:国家自然科学基金项目(编号:31671890);安徽省科技重大专项(编号:18030701176)

作者简介:王立(1978—),男,江南大学教授,博士。

E-mail: wl0519@163.com

收稿日期:2019-05-08

而成,低聚原花青素占 60% 以上^[20],抗氧化活性均大于 V_c ^[21]。原花青素是红米具有抗氧化性的主要物质^[22],76% 的丙酮在 39 °C 下提取两次可得到较多的原花青素^[23]。

2 红米的健康作用

有研究^[24]表明,有色米的摄入可降低心血管疾病、2 型糖尿病、肥胖、癌症等慢性病的发病率。

2.1 降胆固醇

通过调节饮食来降低胆固醇含量是目前常用的一种方法。陈起萱等^[25]将红米和普通大米分别添加到高脂高胆固醇混合饲料中喂养新西兰兔,发现红米可以促进胆固醇逆转运、清除体内胆固醇、降低主动脉脂质斑块面积。Park 等^[26]研究发现红米可以显著降低高胆固醇血症小鼠的低密度脂蛋白胆固醇、甘油三酯以及总胆固醇水平。Kamalakkannan 等^[27]研究发现红米可以显著降低由链脲佐菌素诱导的糖尿病大鼠体内的胆固醇和甘油三酯的含量。玉万国等^[28]研究发现红米花色苷通过抑制胰脂肪酶以及降低胆固醇微团的溶解度来降低胆固醇,且红米中花色苷含量越高,抑制效果越好。

2.2 抗癌

有报道显示红米具有抗癌效果。Chen 等^[29]测定了红米中酚类、花青素和原花青素的含量,进一步研究发现红米对白血病、宫颈癌和胃癌均有很强的抑制作用。Baek 等^[30]发现由于红米的酚类和黄酮类化合物含量高,还原能力强,可以通过诱导癌细胞凋亡来抑制乳腺癌、黑色素瘤和口腔癌。Koide 等^[31]在研究接种 Meth/A 淋巴瘤细胞的 Balb/C 小鼠存活时间时发现,用红米喂养的小鼠的存活时间显著长于用白色普通大米或市售标准食品喂养的小鼠。Pintha 等^[32]发现红米中的原花青素可抑制和细胞外基质降解有关的蛋白质以及细胞间黏附分子-1 和白细胞介素-6 的表达,同时可以抑制胶原蛋白酶和人基质金属蛋白酶-9 的活性,从而减少 MDA-MB-231 人乳腺癌细胞的迁移和侵袭。Ghasemzadeh 等^[33]使用 MTT 测定法对乳腺癌细胞系(MCF-7 和 MDA-MB-231)的抗增殖活性进行评估,发现红米米糠对乳腺癌细胞系的抑制作用强于普通大米米糠,红米米糠对 MCF-7 和 MDA-MB-231 细胞系的最大抑制浓度(IC_{50})分别为 175.0, 151.0 mg/mL,而普通大米米糠对 MCF-7 和 MDA-MB-231 细胞系的最大抑制浓度分别为 382.3, 346.1 mg/mL。

2.3 降血糖

糖尿病是一种以高血糖为特征的代谢性疾病,预计到 2030 年患病人数将达 4 亿^[34]。红米可以显著降低血糖浓度。Nurhidajah 等^[35]报道了富含 κ -角叉菜聚糖和花青素的红米可以显著降低糖尿病大鼠的血糖,并增加其血浆的抗氧化能力。Itagi 等^[36]发现红米、蒸谷红米和磷酸化的蒸谷红米均可降低链脲佐菌素诱导的糖尿病大鼠

的血糖,并显著减弱由此引起的糖尿病并发症。Nurhidajah 等^[37]发现红米胚芽可降低 STZ-NA 诱导的糖尿病大鼠的血糖和胰岛素抵抗水平,主要原因可能是提高胰岛素水平和增强胰岛 β 细胞。Boue 等^[38]认为红米可以通过抑制 α -葡萄糖苷酶和 α -淀粉酶活性来降低血糖。Premakumara 等^[39]也发现红米比白米的抗淀粉酶活性和抗糖化酶活性更强。Pongjanta 等^[40]报道了红米总酚类化合物以及抗性淀粉的含量比白米高,可有效降低 2 型糖尿病的发病率。胡柏等^[41]发现红米多酚对 α -淀粉酶、 α -葡萄糖苷酶、蔗糖酶均有抑制作用,还可抑制葡萄糖在小肠内的吸收,从而抑制血糖升高,有效预防糖尿病。同时,有研究^[42]表明红米多酚降低血糖机理为红米中的酚类物质可以抑制肠道消化酶,保护胰岛细胞,促进胰岛素的分泌,清除自由基,减少胰岛细胞的氧化损伤,控制和糖异生有关的基因的表达。Liu 等^[43]研究了红米多酚对胰腺 α -淀粉酶的抑制机理,认为红米多酚通过氢键和胰腺 α -淀粉酶的活性中心结合,从而抑制胰腺 α -淀粉酶的活性。

此外有报道显示加工方式不同会对红米的降血糖作用产生影响。Kaur 等^[44]指出,在蒸煮红米时或蒸煮前加入酥油可以提高抗性淀粉的含量,抑制餐后血糖升高。Somaratne 等^[45]研究了抛光程度对红米和白米血糖生成指数的影响,发现红米的血糖生成指数显著低于白米,且抛光程度与血糖生成指数呈正相关。

2.4 减肥

红米具有控制体重的作用,一方面是因为红米含有 1.11% 左右的膳食纤维,高于普通大米^[46],让人具有更强的饱腹感;另一方面,红米中所含有的多酚类物质也具有抑制脂肪吸收的作用。Callcott 等^[47]比较了不同水稻品种的多酚提取物抗脂肪特性,发现红米的多酚提取物能显著降低脂肪积累,使脂肪细胞 PPAR γ 基因的表达降低了 61.2%。除此之外,Minatel 等^[48]发现 γ -谷维素可以抑制脂肪细胞的晚期分化,进而抑制脂肪在 hASCs 和 3T3-L1 细胞中的积累,而通过蒸煮和焙烤可以有效地使细胞壁中存在的 γ -谷维素蛋白复合物分解,从而显著提高红米中 γ -谷维素的含量。

2.5 抗炎及抗氧化

人体抗氧化酶的活性随着年龄的增长而降低,因此具有抗氧化作用的天然提取物在食品行业受到广泛的关注^[49]。红米提取物具有抗炎和抗氧化的作用,Limtrakult 等^[50]发现红米极性提取物可以抑制脂多糖诱导的 Raw 264.7 细胞中白细胞介素-6、肿瘤坏死因子- α 和 NO 的产生,同时抑制炎症酶、诱导型一氧化氮合酶和环氧合酶-2 的表达,此外还可通过抑制细胞核中 AP-1 和 NF- κ B 转录因子的激活达到抗炎效果。Callcott 等^[51]发现红米的多酚提取物可以降低肥胖人群血浆中丙二醛和 TNF- α

的浓度,起到抗炎、抗氧化作用。Kim 等^[52]发现红米具有较好的抗氧化活性,且该性能与其中的矢车菊素-3-O-葡萄糖苷、芍药素葡萄糖苷、原花青素和儿茶酸含量呈正相关。Niu 等^[53]分析测定了 22 个红米样品的总酚含量(0.43~2.21 mg FAE/g),并首次检测到异阿魏酸。Thiti-pramote 等^[54]比较了红米、黑米、白米的抗氧化性,结果表明红米的抗氧化能力最强。Rao 等^[55]发现红米具有很高的血浆还原能力(约 303.8 mg/100 g Trolox 当量),根据其色谱图发现两个未鉴定出的峰的抗氧化活性最高。

提取方式对红米的抗氧化性有一定的影响。Chen 等^[56]研究发现甲醇加 1% 的 HCl 红米提取物具有最好的抗氧化能力。柴军红等^[57]研究了乙醇提取得到的红米色素体外抗氧化性,结果显示红米色素的超氧自由基清除率为 81.13%,羟基自由基清除率为 71.43%,DPPH 自由基清除率为 93.40%。Shao 等^[58]研究发现蒸煮后红米的总酚、总黄酮的含量显著降低,但游离的可溶性马来酸和阿魏酸则含量较高。Zaupa 等^[59]比较了烹饪方法对红米抗氧化能力的影响,结果表明烩饭(所有的水分均被红米吸收)可以保留绝大部分酚类化合物,保持红米的抗氧化能力。Ziegler 等^[60]发现随着贮藏时间的延长和温度的升高,红米的 ABTS⁺ 自由基清除能力下降,硬度增加。Shao 等^[61]发现 γ 射线辐照可以提高红米的总抗氧化活性,并降低其黏度和硬度。

3 红米的综合利用

3.1 配方米

配方米一般是以改善感官品质和丰富营养特性为目标,由不同品种的稻米按一定比例混合而成^[62]。红米富含蛋白质、氨基酸、矿物质等营养物质,尤其是富含酚类物质,营养价值高于精白米。因此将红米和精白米复配,可以在改善红米口感较硬、黏附性较差等感官特性的同时,提高复配米的营养价值^[63],一般红米和精米的比例为 15:85 或者 10:90^[64]。

3.2 发芽红米

发芽红米就是将红米在一定条件下进行培养,发芽到一定程度后灭活干燥得到的产品。发芽过程中,红米内源性酶被激活,极大提高了营养和生物活性物质的含量,同时皮层被部分分解,质地变软,能有效提高其消化率^[65]。王艳等^[66]研究发芽红米时发现,随着发芽时间增加,游离氨基酸含量持续上升,在 96 h 时达最大值,必需氨基酸占总游离氨基酸的百分比从 20.3% 上升到 48.0%,赖氨酸含量从 1.4% 上升至 5.3%,GABA 为未发芽红米的 14.2 倍;进一步研究^[67]发芽红米抗氧化活性发现,相比较未发芽红米,发芽红米的总酚含量和 DPPH 清除率均提高 1.1 倍,阿魏酸和对香豆酸的含量显著提高。Bulatao 等^[68]发现发芽红米的粗纤维含量显著减少,抗氧化

活性增强。Maksup 等^[69]研究结果表明,发芽红米的总酚类化合物含量、花色苷含量和抗氧化活性比未发芽红米分别高约 2.6,2.2,9.2 倍。用富含矿物质的溶液浸泡红米使其发芽,可以改善红米的保健功能。徐航丹^[70]用硫酸锌溶液发芽红米,发现硫酸锌浓度在 25~250 mg/L 时,其锌含量得到极大提高,同时 V_C、还原糖、可溶性蛋白和 GABA 的含量均有所提高。

发芽红米的后续产品加工方法也会影响其所含的营养物质及抗氧化性能。Hu 等^[71]测定了发芽红米在蒸煮 5 min 以内可以提高发芽红米的总游离酚含量和抗氧化活性。Ding 等^[72]发现超声波处理脱壳的发芽红米 36 h 可以显著促进淀粉水解,提高葡萄糖含量,改善蒸煮发芽红米饭的感官特性。除此之外,Ding 等^[10]还发现红米中的 GABA 和核黄素在发芽 72 h 后显著增加,发芽过程中超声处理可进一步提高 GABA 和核黄素的含量。Shen 等^[73]研究发现厌氧处理可显著提高 GABA 含量(增加 9.7 倍),但天冬氨酸和谷氨酸的含量略有降低。

3.3 红米米糠

米糠是由糙米碾白过程脱落的米皮和米胚组成,而红米中的矿物质、色素和生物活性物质大部分存在于米皮和米胚中。王金英等^[74]研究发现红米米糠中的 Se、Cu、Fe、Zn、Ca、Mn 分别是精米的 2.35,6.20,10.36,3.22,4.85,12.44 倍。Huang 等^[75]发现原花青素只存在于红米米糠中,并且首次在红米米糠中鉴定出原儿茶醛。Min 等^[76]发现加热可以使红米米糠中聚合度<4 的原花青素含量增加 6 倍,使聚合度>4 的原花青素含量显著降低。李清华等^[77]研究发现红米米糠中的黄酮含量是精米中黄酮含量的 28.24 倍,是白米米糠中黄酮含量的 5.69 倍。Bett-Garber 等^[78]发现红米米糠具有较高的酚类和类黄酮含量,且与风味相关。Poulev 等^[79]发现红米米糠中含有黄酮三叶苷,具有抗癌作用。Vargas 等^[80]发现红米米糠在受过氧化氢损害的 SH-SY5Y 细胞中有神经保护能力。Shao 等^[81]测得胚乳、胚、米糠中的总酚含量和抗氧化能力依次提高,酚类物质在米糠中含量最高,约占 86%。就红米米糠的抗氧化机制而言,Surarit 等^[82]认为红米米糠提取物可以恢复氧化应激诱导的 A549 细胞中的超氧化物歧化酶和过氧化氢酶活性。Khammanit 等^[83]认为红米米糠具有抗氧化作用是由于提取物诱导谷胱甘肽过氧化物酶-1(GPx-1),谷胱甘肽还原酶和过氧化氢酶的 mRNA 表达,同时增加了 GPx-1 和过氧化氢酶的作用,抑制了活性氧簇(ROS)的产生。

3.4 红米食品开发

近年来,人们对健康食品的关注度越来越高,利用红米为原料制作的食品越来越多。婴儿期是人类生长发育的关键阶段,研究^[84]发现活性氧化物易对婴儿的细胞造成损伤,引发疾病,在 4~6 个月大的婴儿食用的米粉

中加入红米米粉可使其具有抗氧化的作用。Estuti 等^[85]用黑豆和红米研发了一款适用于绝经女性的奶油汤,其中总异黄酮含量为 162.59 $\mu\text{g/g}$,花青素含量为 254.58 $\mu\text{g/g}$,抗氧化能力为 723.73 mg/100 g。张小华等^[86]用红米为辅料制作啤酒,既保留了啤酒的口感,又增加了啤酒中黄酮和烟酰胺的含量。李敏等^[87]研究了以红米和葡萄干为原料的红米酒工艺,在葡萄干 20%,红米 30%,接种量 1.0%,28 $^{\circ}\text{C}$ 下发酵 48 h 得颜色微红、酒味香醇、感官评分最高的红米酒。陈析磊等^[88]比较了米酒和红米酒,发现红米酒味道柔和,余味良好,比米酒酸度低,酒质香醇。魏振承等^[89]制作了一款红米饮料,高温淀粉酶添加量 0.04%,100 $^{\circ}\text{C}$ 下酶解 12 min 后得到淡红色、口感良好、均匀无分层的饮料,稳定剂为琼脂 0.05%、海藻酸钠 0.05%、黄原胶 0.05% 和藻酸丙二醇酯 0.05%。余飞等^[90]研究得到红米南瓜复合饮料的最佳工艺为红米添加量 5%,南瓜添加量 9.4%~9.5%、牛奶添加量 18%、蔗糖添加量 8.00%~8.15%,复合稳定剂 0.5%。胡海娥^[91]研究了红米南瓜粥工艺,得到白砂糖 60 g、红米 80 g、糯米 80 g、复合稳定剂 1.0 g、水 1 000 mL、南瓜 200 g 时可制作出口感甜柔形态均一,香味纯正的南瓜红米粥。

4 结论及展望

目前,红米的综合利用还不够广泛,主要还存在以下几个方面的问题:① 红米含有的生物活性物质主要分布在外层种皮层中,这部分纤维素含量较高,在加工利用时一方面阻碍水分进入淀粉,使其不能充分糊化,另一方面由于纤维的存在导致其口感变差。因此,如何利用加工技术或生物酶技术改善红米的感官品质,同时保留红米的功能成分还有待研究。② 已有报道显示红米具有多种健康作用,但大多还停留在动物试验层面,很少有关于人体试验的报道。鉴于人体消化系统和动物有一定的区别,利用人体试验证明红米的健康作用有待研究。③ 红米色素是一种天然的抗氧化剂,起主要作用的是花色苷类物质,稳定性较差,如何提高红米色素在食品中的稳定性有待进一步研究。

参考文献

[1] 李文绍,许鸿江,廖荣周. 红米稻开发前景及其遗传育种研究进展[J]. 福建农业科技, 2013(4): 10-13.
 [2] 乔海鸥,王辛,程国霞,等. 陕西洋县红米营养成分分析[J]. 营养学报, 2013, 35(6): 616-617.
 [3] 吴娟,陈建民. 红米稻皖稻 129 与普通稻米营养成分比较分析[J]. 杂交水稻, 2014, 29(4): 81-83.
 [4] 郭咏梅,段延碧,李少明,等. 有色稻米 Fe、Zn、Cu 和 Mn 含量及与种皮颜色相关分析[J]. 植物遗传资源学报, 2011, 12(6): 971-974.
 [5] 王丽华,徐宗光,叶小英,等. 红色水稻色素着生位置与四种微量元素的研究[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2007,

44(5): 1 097-1 100.
 [6] BISWAS S K, KIM D E, KEUM Y S, et al. Metabolite profiling and antioxidant activities of white, red, and black rice (*Oryza sativa* L.) grains[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2018, 12(4): 2 484-2 492.
 [7] MINATEL I O, HAN S I, ALDINI G, et al. Fat-soluble bioactive components in colored rice varieties[J]. Journal of Medicinal Food, 2014, 17(10): 1 134-1 141.
 [8] THITIPRAMOTE N, PRADMEETEEKUL P, NIMKAMNERD J, et al. Bioactive compounds and antioxidant activities of red (Brown Red Jasmine) and black (Kam Leum Pua) native pigmented rice[J]. International Food Research Journal, 2016, 23(1): 410-414.
 [9] 汤翠凤,董超,阿新祥,等. 云南不同种皮色地方稻种的总黄酮含量及其对种子萌发的影响[J]. 植物遗传资源学报, 2016, 17(5): 883-888.
 [10] DING Jun-zhou, ULANOV A V, DONG Meng-yi, et al. Enhancement of gamma-aminobutyric acid (GABA) and other health-related metabolites in germinated red rice (*Oryza sativa* L.) by ultrasonication[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2017, 40: 791-797.
 [11] 张美,杨登想,张丛兰,等. 不同品种大米营养成分测定及主成分分析[J]. 食品科技, 2014, 39(8): 147-152.
 [12] KIM H W, KIM J B, SHANMUGAVELAN P, et al. Evaluation of gamma-oryzanol content and composition from the grains of pigmented rice-germplasms by LC-DAD-ESI/MS[J]. BMC Research Notes, 2013, 6(1): 149.
 [13] 薛鹏,张威毅,张丰香,等. 元阳红米麸皮、精米、糙米、留胚米中营养成分及花色苷含量分析[J]. 现代食品科技, 2018, 34(3): 212-217.
 [14] DENG Gui-fang, XU Xiang-rong, ZHANG Yuan, et al. Phenolic compounds and bioactivities of pigmented rice[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2013, 53(3): 296-306.
 [15] 薛博,李新华,韩韬,等. 红米色素的提取及稳定性研究[J]. 粮食与油脂, 2016, 29(7): 10-13.
 [16] CHEN Xiao-qiong, NAGAO N, ITANI T, et al. Anti-oxidative analysis, and identification and quantification of anthocyanin pigments in different coloured rice [J]. Food Chemistry, 2012, 135(4): 2 783-2 788.
 [17] ABDEL-AAL E S M, YOUNG J C, RABALSKI I. Anthocyanin composition in black, blue, pink, purple, and red cereal grains[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2006, 54(13): 4 696-4 704.
 [18] 蒋海伟,杨婷婷,李佳桥,等. 响应面法优化红米花色苷微波辅助提取工艺及其抗氧化活性研究[J]. 中国食品学报, 2015, 15(5): 74-81.
 [19] 郑琳,张钟,陈湘,等. 超声波辅助提取红米色素的工艺研究[J]. 现代食品科技, 2011, 27(3): 296-298.
 [20] PEREIRA-CARO G, CROS G, YOKOTA T, et al. Phytochemical profiles of black, red, brown, and white rice from

- the camargue region of France[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2013, 61(33): 7 976-7 986.
- [21] 马焯. 红米原花青素的提取纯化与抗氧化活性研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2016: 36-40.
- [22] GUNARATNE A, WU Kao, LI Dong-qin, et al. Antioxidant activity and nutritional quality of traditional red-grained rice varieties containing proanthocyanidins[J]. Food Chemistry, 2013, 138(2/3): 1 153-1 161.
- [23] 罗舜菁, 马焯, 刘成梅, 等. 响应面优化红米原花青素提取工艺[J]. 食品工业科技, 2016, 37(7): 176-181.
- [24] MATTEI J, MALIK V, WEDICK N M, et al. Reducing the global burden of type 2 diabetes by improving the quality of staple foods: The global nutrition and epidemiologic transition initiative [J]. Globalization and Health, 2015, 11(1): 23.
- [25] 陈起萱, 凌文华, 马静, 等. 黑米和红米对兔主动脉脂质斑块面积和血脂的影响 [J]. 卫生研究, 2000, 29 (3): 170-172.
- [26] PARK Y, PARK E M, KIM E H, et al. Hypocholesterolemic metabolism of dietary red pericarp glutinous rice rich in phenolic compounds in mice fed a high cholesterol diet[J]. Nutrition Research and Practice, 2014, 8 (6): 632-637.
- [27] KAMALAKKANNAN N, PRINCE P S M. Antihyperlipidaemic effect of Aegle marmelos fruit extract in streptozotocin-induced diabetes in rats[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2005, 85(4): 569-573.
- [28] 玉万国, 陈云芳, 黎华圣, 等. 红米花色苷的制备及对胆固醇消化吸收的影响[J]. 广西科技大学学报, 2018, 29(2): 103-109.
- [29] CHEN Ming-hsuan, CHOI S H, KOZUKUE N, et al. Growth-inhibitory effects of pigmented rice bran extracts and three red bran fractions against human cancer cells: relationships with composition and antioxidative activities[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2012, 60 (36): 9 151-9 161.
- [30] BAEK J A, CHUNG N J, CHOI K C, et al. Hull extracts from pigmented rice exert antioxidant effects associated with total flavonoid contents and induce apoptosis in human cancer cells[J]. Food Science and Biotechnology, 2015, 24 (1): 241-247.
- [31] KOIDE T, KAMEI H, HASHIMOTO Y, et al. Antitumor effect of hydrolyzed anthocyanin from grape rinds and red rice [J]. Cancer Biotherapy and Radiopharmaceuticals, 1996, 11(4): 273-277.
- [32] PINTHA K, YODKEEREE S, LIMTRAKUL P. Proanthocyanidin in red rice inhibits MDA-MB-231 breast cancer cell invasion *via* the expression control of invasive proteins [J]. Biological & Pharmaceutical Bulletin, 2015, 38 (4): 571-581.
- [33] GHASEMZADEH A, KARBALAI M T, JAAFAR H Z E, et al. Phytochemical constituents, antioxidant activity, and antiproliferative properties of black, red, and brown rice bran[J]. Chemistry Central Journal, 2018, 12(1): 17.
- [34] DONGOWSKI G, DRZIKOVA B, SENGE B, et al. Rheological behaviour of beta-glucan preparations from oat products[J]. Food Chemistry, 2005, 93(2): 279-291.
- [35] NURHIDAJAH N, ASTUTI M, SARDJONO S, et al. Blood antioxidant profile of diabetes rats feed with red rice enriched with Kappa-Carrageenan and anthocyanin extracts [J]. Agritech, 2017, 37(1): 81-87.
- [36] ITAGI H B N, PRADEEP S R, SINGH V, et al. Beneficial influence of phosphorylated parboiled dehusked red rice (*Oryza sativa* L.) in streptozotocin-induced diabetic rats[J]. Starch-Starke, 2016, 68(5/6): 568-580.
- [37] NURHIDAJAH N, NURRAHMAN N. Hypoglycemic effect of red rice germ on insulin levels, HOMA-IR and HOMA beta index of STZ-NA induced rats[J]. Agritech-jurnal Teknologi Pertanian, 2016, 36(4): 433-439.
- [38] BOUE S M, DAIGLE K W, CHEN Ming-hsuan, et al. Antidiabetic potential of purple and red rice (*Oryza sativa* L.) bran extracts[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2016, 64(26): 5 345-5 353.
- [39] PREMAKUMARA G A S, ABEYSEKERA W K S M, RATNASOORIYA W D, et al. Antioxidant, anti-amylase and anti-glycation potential of brans of some Sri Lankan traditional and improved rice (*Oryza sativa* L.) varieties[J]. Journal of Cereal Science, 2013, 58(3): 451-456.
- [40] PONGJANTA J, CHOMSRI N O, MEECHOU S. Correlation of pasting behaviors with total phenolic compounds and starch digestibility of indigenous pigmented rice grown in upper Northern Thailand[J]. Functional Foods in Health and Disease, 2016, 6(3): 133-143.
- [41] 胡柏, 张宇, 张晖, 等. 红米多酚对体外碳水化合物消化和吸收的影响[J]. 现代食品科技, 2015, 31(10): 134-139.
- [42] 胡柏. 红米多酚降血糖作用的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2015: 20-41.
- [43] LIU Mei, HU Bo, ZHANG Hui, et al. Inhibition study of red rice polyphenols on pancreatic alpha-amylase activity by kinetic analysis and molecular docking[J]. Journal of Cereal Science, 2017, 76: 186-192.
- [44] KAUR B, RANAWANA V, TEH A L, et al. The glycemic potential of white and red rice affected by oil type and time of addition[J]. Journal of Food Science, 2015, 80 (10): H2 316-H2 321.
- [45] SOMARATNE G M, PRASANTHA B D R, DUNUWILA G R, et al. Effect of polishing on glycemic index and antioxidant properties of red and white basmati rice [J]. Food Chemistry, 2017, 237: 716-723.
- [46] 马静, 陈起萱, 凌文华. 红、黑米的保健功效研究[J]. 食品科学, 2000, 21(12): 139-140.
- [47] CALLCOTT E T, SANTHAKUMARanthakumar A B,

- STRAPPE P, et al. Polyphenols from Australian-grown pigmented red and purple rice inhibit adipocyte differentiation[J]. Journal of Cereal Science, 2018, 81: 140-146.
- [48] MINATEL I O, LEE Y M, YOON H, et al. Antiadipogenic activity of gamma-Oryzanol and its stability in pigmented rice[J]. Journal of Medicinal Food, 2016, 19(7): 710-715.
- [49] SEO W D, KIM J Y, SONG Y C, et al. Comparative analysis of physicochemicals and antioxidative properties in new red rice (*Oryza sativa* L. cv. Gunganghongmi)[J]. Journal of Crop Science and Biotechnology, 2013, 16(1): 63-68.
- [50] LIMTRAKULT P, YODKEEREE S, PITCHAKARN P, et al. Anti-inflammatory effects of proanthocyanidin-rich red rice extract via suppression of MAPK, AP-1 and NF- κ B pathways in raw 264.7 macrophages[J]. Nutrition Research and Practice, 2016, 10(3): 251-258.
- [51] CALLCOTT E T, THOMPSON K, OLI P, et al. Coloured rice-derived polyphenols reduce lipid peroxidation and pro-inflammatory cytokines ex vivo[J]. Food & Function, 2018, 9(10): 5 169-5 175.
- [52] KIM G R, JUNG E S, LEE S, et al. Combined mass spectrometry-based metabolite profiling of different pigmented rice (*Oryza sativa* L.) seeds and correlation with antioxidant activities[J]. Molecules, 2014, 19(10): 15 673-15 686.
- [53] NIU Yu-ge, GAO Bo-yan, SLAVIN M, et al. Phytochemical compositions, and antioxidant and anti-inflammatory properties of twenty-two red rice samples grown in Zhejiang[J]. LWT-Food Science and Technology, 2013, 54(2): 521-527.
- [54] THITIPRAMOTE N, PRADMEETEEKUL P, NIMKAMNERD J, et al. Bioactive compounds and antioxidant activities of red (Brown Red Jasmine) and black (Kam Leum Pua) native pigmented rice[J]. International Food Research Journal, 2016, 23(1): 410-414.
- [55] RAO S, CALLCOTT E T, SANTHAKUMAR A B, et al. Profiling polyphenol composition and antioxidant activity in Australian-grown rice using UHPLC Online-ABTS system[J]. Journal of Cereal Science, 2018, 80: 174-179.
- [56] CHEN Xiao-qiong, IRIFUNE K, YANG Ding-qian, et al. Comparative evaluation of 2,2-diphenyl-1-picryl-hydrazyl-hydrate (DPPH) free radical-and oxygen radical absorbance capacity (ORAC) assays in measuring the antioxidant capacities of pigmented rice varieties[J]. Philippine Agricultural Scientist, 2017, 100(2): 190-199.
- [57] 柴军红, 何婷婷, 宋红霜. 红米色素抗氧化研究[J]. 中国林副特产, 2017(5): 25-26.
- [58] SHAO Ya-fang, FANG Chang-yun, ZHANG Hua-li, et al. Variation of phenolics, tocopherols, antioxidant activities and soluble sugar compositions in red and black rice (*Oryza sativa* L.) during boiling[J]. Cereal Chemistry, 2017, 94(5): 811-819.
- [59] ZAUPA M, CALANI L, DEL RIO D, et al. Characterization of total antioxidant capacity and (poly) phenolic compounds of differently pigmented rice varieties and their changes during domestic cooking [J]. Food Chemistry, 2015, 187: 338-347.
- [60] ZIEGLER V, FERREIRA C D, HOFFMANN J F, et al. Cooking quality properties and free and bound phenolics content of brown, black, and red rice grains stored at different temperatures for six months[J]. Food Chemistry, 2018, 242: 427-434.
- [61] SHAO Ya-fang, TANG Fu-fu, XU Fei-fei, et al. Effects of γ -irradiation on phenolics content, antioxidant activity and physicochemical properties of whole grain rice[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2013, 85: 227-233.
- [62] 魏振承, 张名位, 马永轩, 等. 粳稻配方案配制技术研究[J]. 食品工业科技, 2017, 38(4): 211-216.
- [63] 邹茜, 寇姝燕, 朱振华, 等. 一种提高哈尼梯田红米食味品质的新工艺[J]. 中国稻米, 2017, 23(3): 53-58.
- [64] 杨华文. 红米品种培育及综合利用途径研究进展[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(30): 10 499-10 500.
- [65] 王艳. 有色发芽糙米功能营养品质研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016: 17-36.
- [66] 王艳, 李梅, 柴立红, 等. 有色糙米发芽过程中游离氨基酸含量的动态变化 [J]. 中国农学通报, 2016, 32(20): 65-71.
- [67] 王艳, 徐非非, 柴立红, 等. 有色发芽糙米抗氧化活性的动态变化[J]. 农产品加工, 2016(5): 11-14.
- [68] BULATAO R M, ROMERO M V. Effects of germination on the proximate composition, antioxidant property and eating quality of brown rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Philippine Agricultural Scientist, 2014, 97(1): 19-27.
- [69] MAKSUP S, PONGPAKPIAN S, ROYTRAKUL S, et al. Comparative proteomics and protein profile related to phenolic compounds and antioxidant activity in germinated *Oryza sativa* 'KDML105' and Thai brown rice 'Mali Daeng' for better nutritional value[J]. Journal of The Science of Food and Agriculture, 2018, 98(2): 566-573.
- [70] 徐航丹. 发芽红米的锌营养强化及营养物质的变化规律[D]. 海口: 海南大学, 2015: 14-30.
- [71] HU Zhan-qiang, TANG Xiao-zhi, LIU Jun-fei, et al. Effect of parboiling on phytochemical content, antioxidant activity and physicochemical properties of germinated red rice[J]. Food Chemistry, 2017, 214: 285-292.
- [72] DING Jun-zhou, HOU G G, DONG Meng-yi, et al. Physicochemical properties of germinated dehulled rice flour and energy requirement in germination as affected by ultrasound treatment[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2018, 41: 484-491.
- [73] SHEN Sheng-quan, WANG Yan, LI Mei, et al. The effect of anaerobic treatment on polyphenols, antioxidant properties, tocopherols and free amino acids in white, red, and black germinated rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Journal of Functional Foods, 2015, 19: 641-648.
- [74] 王金英, 江川, 郑金贵. 不同色稻的糯米与米糠中矿物质元素的含量[J]. 福建农林大学学报: 自然版, 2002, 31(4):

- 409-413.
- [75] HUANG Yu-ping, LAI Hsi-mei. Bioactive compounds and antioxidative activity of colored rice bran [J]. Journal of Food and Drug Analysis, 2016, 24(3): 564-574.
- [76] MIN B, MCCLUNG A, CHEN Ming-hsuan. Effects of hydrothermal processes on antioxidants in brown, purple and red bran whole grain rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Food Chemistry, 2014, 159: 106-115.
- [77] 李清华, 江川, 林玲娜, 等. 不同色稻精米与米糠中黄酮含量的差异分析[J]. 福建农业学报, 2005, 20(1): 49-52.
- [78] BETT-GARBER K L, LEA J M, MCCLUNG A M, et al. Correlation of sensory, cooking, physical, and chemical properties of whole grain rice with diverse bran color [J]. Cereal Chemistry, 2013, 90(6): 521-528.
- [79] POULEV A, CHEN Ming-hsuan, CHERAVURU S, et al. Variation in levels of the flavone tricetin in bran from rice genotypes varying in pericarp color [J]. Journal of Cereal Science, 2018, 79: 226-232.
- [80] VARGAS C G, DA SILVA J D, RABELO T K, et al. Bioactive compounds and protective effect of red and black rice brans extracts in human neuron-like cells (SH-SY5Y) [J]. Food Research International, 2018, 113: 57-64.
- [81] SHAO Ya-fang, XU Fei-fei, SUN Xiao, 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]. Journal of Cereal Science, 2014, 59(2): 211-218.
- [82] SURARIT W, JANSOM C, LERDVUTHISOPON N, et al. Evaluation of antioxidant activities and phenolic subtype contents of ethanolic bran extracts of Thai pigmented rice varieties through chemical and cellular assays [J]. International Journal of Food Science and Technology, 2015, 50(4): 990-998.
- [83] KHAMMANIT R, LOMARAT P, ANANTACHOKE N, et al. Inhibition of oxidative stress through the induction of antioxidant enzymes of pigmented rice bran in HEK-293 Cells [J]. Natural Product Communications, 2017, 12(7): 1107-1110.
- [84] HIRAWAN R, DIEHL-JONES W, BETA T. Comparative evaluation of the antioxidant potential of infant cereals produced from purple wheat and red rice grains and LC-MS analysis of their anthocyanins [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2011, 59(23): 12330-12341.
- [85] ESTUTI W, MARLIYATI S A, DAMANIK M R M, et al. Development of cream soup product made from combination of black soybean (*Glycine soja* L. merriam) and red rice (*Oryza nivara*) as an alternative functional food for menopausal women [J]. Jurnal Gizi Dan Pangan, 2018, 13(2): 103-110.
- [86] 张小华, 傅筱冲, 张婷, 等. 红米辅料红色啤酒的研制 [J]. 江西科学, 2014, 32(4): 520-522.
- [87] 李敏, 王琪, 刘琨毅, 等. 葡萄干红米酒生产工艺的研究 [J]. 酿酒, 2016, 43(5): 88-90.
- [88] 陈析磊, 夏兵兵, 丁琦峰, 等. 红米/大米半固态酿制米酒的比较研究 [J]. 成都大学学报: 自然科学版, 2011, 30(3): 209-211.
- [89] 魏振承, 唐小俊, 张名位, 等. 红米营养饮料加工工艺研究 [J]. 食品工业科技, 2013, 34(9): 210-213.
- [90] 余飞, 陈云霞. 红米南瓜复合饮料的工艺研究 [J]. 粮食与食品工业, 2012, 19(5): 27-30.
- [91] 胡海娥. 南瓜红米粥工艺研究 [J]. 农产品加工: 学刊, 2013(9): 35-37.
-
- (上接第 225 页)
- [32] 宋小勇, 常志娟, 苏树强, 等. 远红外辅助热泵干燥装置性能试验 [J]. 农业机械学报, 2012, 43(5): 136-141.
- [33] 宋小勇. 远红外辅助热泵干燥对铁棍山药片品质影响 [J]. 核农学报, 2015, 29(7): 1337-1343.
- [34] NACHAISIN M, JAMRADLOEDLUK J, NIAMNUY C. Application of combined far-infrared radiation and air convection for drying of instant germinated brown rice [J]. Journal of Food Process Engineering, 2016, 39(3): 306-318.
- [35] THUWAPANICHAYANAN R, PRACHAYAWARAKORN S, SOPONRONNARIT S. Heat and moisture transport behaviour and quality of chopped garlic undergoing different drying methods [J]. Journal of Food Engineering, 2014, 136: 34-41.
- [36] NATHAKARANAKULE A, JAIBOON P, SOPONRONNARIT S. Far-infrared radiation assisted drying of longan fruit [J]. Journal of Food Engineering, 2010, 100(4): 662-668.
- [37] 汪岳刚, 邓云, 王丹凤, 等. 鲢鱼片远红外热泵干燥中水分迁移及品质变化 [J]. 食品与机械, 2013, 29(6): 34-37, 53.
- [38] ANTONIO V G, MIRANDA M, RODRIGO C, et al. Effect of air temperature on drying kinetics and quality characteristics of osmo-treated jumbo squid (*Dosidicus gigas*) [J]. LWT - Food Science and Technology, 2011, 44(1): 16-23.
- [39] WANG Yue-gang, YUE Jin, LIU Zhen-min, et al. Impact of far-infrared radiation assisted heat pump drying on moisture distribution and rehydration kinetics of squid fillets during rehydration [J]. Journal of Aquatic Food Product Technology, 2016, 25(2): 147-155.
- [40] DENG Yun, WANG Yue-gang, YUE Jin, et al. Thermal behavior, microstructure and protein quality of squid fillets dried by far-infrared assisted heat pump drying [J]. Food Control, 2014, 36(1): 102-110.
- [41] LUO Lei, KANG Xin-yan, ZHU Wen-xue, et al. Optimization of far-infrared assisted heat pump drying parameters for quality control of dried honeysuckle [J]. Food Science, 2016, 37(18): 6-12.