

熊艳珍, 黄紫萱, 马慧琴, 等. 黑米的营养功能及综合利用研究进展 [J]. 食品工业科技, 2021, 42(7): 408–415. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2020060018

XIONG Yanzhen, HUANG Zixuan, MA Huiqin, et al. Advances on Nutritional Functions and Comprehensive Utilization of Black (Pericarp) Rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(7): 408–415. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2020060018

· 专题综述 ·

黑米的营养功能及综合利用研究进展

熊艳珍, 黄紫萱, 马慧琴, 程建峰*

(江西农业大学农学院, 江西南昌 330045)

摘要: 黑米是一种在种皮中富集黑色或黑褐色花色苷的稻米, 营养丰富, 药食兼用, 被广泛应用于食品、医药和化工等行业。本文从营养成分(淀粉、蛋白质、脂肪、矿物质、必需氨基酸、维生素、黄酮类、酚酸类和膳食纤维)、功能特性(抗炎症、抗过敏、抗哮喘、抗氧化、抗肿瘤、减肥降脂及降血糖)和综合利用(食品、医药与化工行业)三方面归纳和概述了黑米的研究进展, 以期科学认识和深入研究黑米提供理论依据, 为综合利用黑米提供有益借鉴。

关键词: 黑米, 营养成分, 功能特性, 综合利用

中图分类号: TS201.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2021)07-0408-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2020060018

Advances on Nutritional Functions and Comprehensive Utilization of Black (Pericarp) Rice (*Oryza sativa* L.)

XIONG Yanzhen, HUANG Zixuan, MA Huiqin, CHENG Jianfeng*

(College of Agronomy, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China)

Abstract: Black (pericarp) rice is a kind of rice with rich black or dark brown anthocyanins in its seed coat. It is rich in nutrients and can be used as both medicine and food, so it is widely used in the different industries such as the food, medicine and chemical. In this review, the research progresses on the nutritional composition (starch, protein, fat, minerals, essential amino acids, vitamins, flavonoids, phenols and dietary fiber), functional characteristics (anti-inflammation, anti-anaphylaxis, anti-asthma, anti-oxidation, anti-tumor, reducing weight and fat, and decreasing blood sugar) and comprehensive utilization (food, medicine and chemical industry) of black rice are systematically concluded and summarized; which shall provide the systematic theoretical basis for its scientific understanding and intensive researches, and the beneficial references for its comprehensive utilization.

Key words: black (pericarp) rice (*Oryza sativa* L.); nutritional composition; functional property; comprehensive utilization

黑米是一种有色大米, 因其麸皮富集的花色苷呈黑色或黑褐色而得名^[1]。黑米是古老而名贵的特色水稻品种, 在我国种植历史悠久, 始于公元前 145 年, 由 2000 多年前汉武帝时的张骞最先在陕西洋县发现^[2]。在世界黑米资源 411 个品种中, 我国拥有 373 个(占 90.8%), 其余分布在东亚和西亚; 我国 2018 年产 14887 万吨, 居世界首位, 约占世界的 1/3 以上^[1]。

黑米大多数表皮乌黑发亮, 少数为紫色或红黑色, 营养丰富, 药食兼用, 自古就有“药米”、“贡米”“黑珍珠”“世界米中之王”的美誉, 最具代表性的有陕西黑米、贵州黑糯米和湖南黑米等^[2-3]。近些年来, 随着人们生活水平的不断提高和健康意识的不断增强, 对药食兼用黑米的需求越来越大, 科研工作者取得的相关研究成果也逐渐增多, 不再停留在古代中医的“以色补色, 以形补形”。本文在大量搜索和全

收稿日期: 2020-06-03

基金项目: 全国大学生创新创业训练计划项目(201910410009)。

作者简介: 熊艳珍(2000-), 女, 本科, 研究方向: 农艺学, E-mail: 1013590782@qq.com。

* 通信作者: 程建峰(1972-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 植物生理生态, E-mail: chjfkarl@163.com。

面研读黑米相关文献资料的基础上,从黑米的营养成分、功能特性和综合利用三方面进行较系统地归纳和概述,以期为黑米的深入科学研究提供理论参考,为黑米的深度综合利用提供有益借鉴。

1 黑米的营养成分

稻米的营养成分包括基本营养成分(如淀粉、蛋白质、脂肪)和特殊营养成分(如维生素、氨基酸及有益矿物质)两大类,含量高低主要取决于品种自身的基因及其生长环境^[4-5]。

1.1 基本营养成分

稻米蛋白质是低抗原性蛋白,是公认谷类蛋白中的佼佼者,氨基酸含量高,第一限制性氨基酸赖氨酸含量高,是其它植物蛋白所无法比拟的,可与鸡蛋、牛乳和牛肉相媲美^[6];稻米中平衡合理的氨基酸组成符合 WTO/FAO 推荐的理想模式易于被人体消化吸收,无过敏反应^[6]。稻米脂肪多为优质的不饱和脂肪酸或淀粉脂肪的复合物,与维生素 A、D、E、F、K 共存,能明显降低血脂、血清胆固醇和动脉硬化,改善神经系统障碍^[7]。表 1 表明,黑米的淀粉含量略低于白米,极差(最大值减去最小值)略高于白米,这表明黑米与白米在主食摄取上的最重要成分——淀粉含量上无明显差异,但黑米中淀粉含量的品种间差异略大;黑米的蛋白质、脂肪和不饱和脂肪酸含量明显高于白米,黑米中蛋白质的最低和最高含量分别是白米的 1.25 倍和 1.51 倍,黑米中脂肪的最低和最高含量分别是白米的 2.96 倍和 1.56 倍,黑米中脂肪的最低含量(2.37%)接近于白米的最高含量(2.50%),黑米中不饱和脂肪酸最低和最高含量分别是白米的 3.45 倍和 2.40 倍,黑米中不饱和脂肪酸的最低含量(1.90%)比白米的最高含量(1.73%)还高;这意味着

黑米比白米含有较多的蛋白质和脂肪,尤其是不饱和脂肪酸含量。

1.2 特殊营养成分

1.2.1 矿物质 表 2 显示,黑米和白米中含量最高的常量元素均为 P,其次为 Mg 和 Ca,黑米的 P、Ca 和 Mg 含量的最低值均高于白米,黑米的 P 和 Mg 含量的最高值均小于白米,而黑米 Ca 含量的最高值大于白米,白米中 P、Mg 和 Ca 含量的幅度(极差)分别是黑米的 1.53 倍、1.06 倍和 1.66 倍,这意味着黑米的 P、Ca 和 Mg 含量的分布相对集中,总体含量稳定性高于白米。

黑米中微量元素含量的大小基本为 Fe>Zn>Mn>Cu,Fe、Mn、Cu 和 Zn 含量的最小值和最大值都高于白米,最小值分别为白米的 3.14 倍、1.17 倍、1.10 倍和 1.38 倍,最大值分别为白米的 1.28 倍、1.69 倍、3.21 倍和 1.47 倍,且 Fe、Mn、Cu 和 Zn 含量的幅度分别为白米的 1.17 倍、1.14 倍、3.45 倍和 1.54 倍(表 2);这表明着黑米的微量元素含量整体高于白米,尤其是 Fe 和 Zn,也从另一个侧面也佐证了黑米自古以来被用于保健的原因,如铁有良好的补血作用、锰能促进骨骼生长改善机体造血功,铜能促进正常黑色素形成及维护毛发正常结构,锌能促进人体蛋白质的合成和消炎抗菌等^[4,6]。

1.2.2 必需氨基酸 由表 3 可知,黑米中除苏氨酸略低于白米外,其他 7 种必需氨基酸含量的最小值都高于白米,其高于白米的程度依次为色氨酸(1.55 倍)>蛋氨酸(1.37 倍)>缬氨酸(1.30 倍)>赖氨酸(1.28 倍)>苯丙氨酸(1.18 倍)>亮氨酸(1.16 倍)>异亮氨酸(1.13 倍);表 3 还表明,黑米中的人体必需氨基酸种类齐全且含量较高,与其他谷类作物比较,

表 1 黑米和白米的基本营养成分比较^[8-14]

Table 1 Comparison of basic nutritional components between black and white rice^[8-14]

成分	黑米		白米	
	含量	极差	含量	极差
淀粉(%)	61.80~78.73	16.93	70.13~86.09	15.96
蛋白质(%)	8.50~16.40	7.90	6.80~10.87	4.07
脂肪(%)	2.37~3.90	1.53	0.80~2.50	1.70
不饱和脂肪酸(%)	1.90~3.12	1.22	0.55~1.73	1.18

表 2 黑米和白米的矿物质含量比较^[9,10,12-16]

Table 2 Comparison of mineral components between black and white rice^[9,10,12-16]

矿物质		黑米		白米	
		含量(mg/kg)	极差(mg/kg)	含量(mg/kg)	极差(mg/kg)
常量元素	P	1575.0~3626.5	2051.5	1071.5~4213.0	3141.5
	Ca	158.4~740.0	581.6	43.7~658.0	614.3
	Mg	396.7~1100.8	704.1	324.27~1491.0	1166.73
微量元素	Fe	15.4~111.7	96.3	4.9~87.4	82.5
	Mn	21.9~50.4	28.5	18.7~29.9	25.0
	Cu	2.2~64.0	61.8	2.0~19.9	17.9
	Zn	23.2~57.07	33.87	16.8~38.8	22.0

表 3 黑米^[8-10,12,16-17]和白米^[17]及其他谷物的必需氨基酸含量比较(g/kg)Table 3 The contents of essential amino acids for human body between black^[8-10,12,16-17], white rice^[17] and other grains (g/kg)

种类		蛋氨酸	缬氨酸	赖氨酸	异亮氨酸	苯丙氨酸	亮氨酸	色氨酸	苏氨酸	总量
黑米	含量	1.9~5.9	5.2~15.8	3.2~6.2	2.7~5.3	4.0~7.6	6.9~7.2	1.5~1.9	2.1~11.7	32.3~42.2
	极差	4.0	10.6	3.0	2.6	3.6	0.3	0.4	9.6	9.9
白米	含量	1.4~4.8	4.0~6.4	2.5~4.6	2.4~4.2	3.4~6.4	6.0~8.2	1.0~1.2	2.7~3.6	23.4~34.2
	极差	3.4	2.4	2.1	1.8	3.0	2.2	0.2	0.9	10.8
小麦 ^[18-21]		1.0~19	5.8~6.8	3.5~4.3	4.5~5.6	5.5~7.3	8.6~10.6	0.2~2.0	3.5~4.3	33.4~39.9
大麦 ^[19-22]		0.1~2.8	2.7~8.1	2.3~8.1	1.4~6.3	2.7~9.7	3.4~12.3	0.1~1.5	2.1~5.6	18.0~22.9
荞麦 ^[19-21,23-24]		0.5~1.5	3.4~7.1	4.7~7.5	2.7~5.5	2.4~6.8	5.1~8.6	0.3~1.2	2.8~4.6	35.4~40.3
玉米 ^[19-21,25]		1.1~3.7	2.3~6.2	1.6~6.9	3.3~4.0	3.8~5.9	7.0~13.8	0.5~0.8	3.6~4.6	30.6~36.5
小米 ^[19-21,26-27]		1.2~4.8	3.1~8.0	1.0~3.0	2.8~6.5	2.8~7.0	9.5~17.8	0.6~1.2	2.4~5.2	31.7~39.4

必需氨基酸总量基本上更高,明显较高的有蛋氨酸、缬氨酸、色氨酸和苏氨酸,可作为补充人体必需氨基酸的首选谷物来源。

1.2.3 生物活性成分 维生素又名维他命,是维持人和动物的正常生理功能且必须从食物中获得的一类微量有机物质,在生长、代谢、发育过程中发挥着不可或缺的重要作用。根据维生素的外源性、微量性、调节性和特异性,大致分为脂溶性(维生素 A、D、E、K)和水溶性(维生素 B、C、H、P、PP、M、T 和 U)两大类^[28]。从表 4 可以看出,黑米中含有主要的维生素 A 源物质——胡萝卜素,而白米中未检出,有利于治疗夜盲症、干眼病及上皮组织角化症,有助于维持免疫功能必需的膜受体状态和免疫调节分子的释放,具有防癌、抗癌、抗衰老、抵抗自由基、治疗心血管病及其他慢性病等作用^[29];黑米和白米中均含有维生素 B₁ 和 B₂,且黑米中的维生素 B₁ 和 B₂ 含量最高值分别是白米的 1.91 倍和 2.79 倍,维生素 B₁ 有助于消化、缓解疲劳、促进神经系统正常活动、减轻晕车、晕船症状和治疗脚气等,维生素 B₂ 有助于预防和消除口腔生殖综合症、结膜炎和脂溢性皮炎等,增进视力,减轻眼睛疲劳,促进人体对铁的吸收^[30];维生素 C 是人体内的高效抗氧化剂,用来减轻抗坏血酸过氧化物酶的氧化应激,凝血,促进人体胶原蛋白的合成,预防人体出现坏血病,黑米中可检测到维生素 C(L-抗坏血酸)含量为 23.93 mg/kg,而白米中很难检测到^[31]。

黄酮类化合物具有防治心血管疾病、止咳、祛痰、平喘、抗菌、抗炎、镇痛、保肝、护肝、降压、降

血脂、抗病毒、抗氧化、抗肿瘤、抗衰老和提高免疫力等广泛的生物活性^[32];黑米中黄酮类含量为 0.10%~1.70%,是白米的 5 倍之多(表 4)。花色苷是以黄酮核为基础的类黄酮物质,由花色苷与糖以糖苷键结合而成,能清除体内自由基、增殖叶黄素、抗肿瘤、抗癌、抗炎、抑制脂质过氧化和血小板凝集、预防糖尿病、减肥及保护视力等^[33];黑米中花色苷含量高达 0.65~14.98 mg/kg,而在白米中难以检测到(表 4)。黑米还含有大量酚酸类化合物,能有效清除损伤脂质、蛋白质和 DNA 等生物大分子的自由基,降低氧化应激和抑制脂质氧化等^[34]。黑米中酚类含量为 2.31~4.84 mg/g,最低值是白米(0.13 mg/g)的 17.7 倍,最高值是白米(0.49 mg/g)的 9.88 倍(表 4)。

1.2.4 膳食纤维 膳食纤维是一种多糖,既不能被胃肠道消化吸收,也不能产生能量,被营养学界补充认定为第七类营养素,和传统的六类营养素——蛋白质、脂肪、碳水化合物、维生素、矿物质与水并列,具有治疗糖尿病、冠心病、肥胖症和便秘及降血压、抗癌、减肥和清除外源有害物质等功能^[36]。黑米中膳食纤维含量(0.88%~5.00%)的最小值和最大值分别为白米的 1.26 倍和 1.11 倍。

2 黑米的营养功能

黑米不仅具有稻米的最基本食物属性,且因含有特殊的营养成分而具有一些独自的功能特性,自古以来就将其作为“药食兼用型”食物。近些年来,随着人们健康意识的增强,对黑米营养功能的探究取得了大量的创新特色成果,将极大推动黑米的产业化生产和规模化利用。

表 4 黑米和白米的生物活性成分比较^[8-10,12-14,35]Table 4 Comparison of bioactive components between black and white rice^[8-10,12-14,35]

种类	黑米		白米		种类	黑米		白米		
	含量	极差	含量	极差		含量	极差	含量	极差	
维生素(mg/kg)	胡萝卜素	0.76	/	未检出	/	黄酮类(%)	0.10~1.70	1.60	0.02~0.32	0.30
	B ₁	2.10~6.89	4.79	3.60	/	花色苷(mg/kg)	0.65~14.98	14.33	未检出	/
	B ₂	1.60~2.90	2.30	1.04	/	酚类(mg/g)	2.31~4.84	2.53	0.13~0.49	0.30
	C	23.93	/	未检出	/	膳食纤维(%)	0.88~5.00	4.12	0.70~4.50	3.80

注:“/”表示数据只有一个或未检出,无法算出极差。

2.1 抗炎症作用

黑米可作为一种潜在的抗炎、抗过敏的食品成分及作为治疗和预防慢性炎症相关疾病的治疗剂^[37]。补充黑米色素组分显著降低血浆可溶性血管细胞黏附分子-1(sVCAM-1)、可溶性 CD₄₀ 配体(sCD₄₀L)和高敏 C 反应蛋白(hs-CRP),通过抑制炎症因子来保护冠心病患者的心脏^[38]。黑米提取物具有最广泛的抗炎活性,其中所含的矢车菊素-3-O-葡萄糖苷(C3G)可能被代谢为花青素和/或原花青素,后者可降低细胞核转录因子 kappa B(NF-κB)活性,促进调节性 T(Treg)细胞增多和分裂素原活化蛋白激酶(MAPK)的活化,抑制免疫球蛋白(Ig)E 介导的肥大细胞活化、组胺、促炎细胞因子肿瘤坏死因子(TNF)-α、白细胞介素(IL)-1β、4、5、6、干扰素(INF)-γ、二十烷类白三烯(LT)B(4)和前列腺素(PGE)E(2)等炎症介质释放来实现有效的抗炎作用^[39-41]。

2.2 抗过敏作用

黑米色素(花色苷)提取物对体外过敏反应的抑制体现在抑制嗜碱性 RBL-2H3 细胞释放组胺和细胞内部钙离子的摄入、β-己糖胺酶、促炎细胞因子基因表达和细胞因子释放,减少 TNF-α、IL-1β、IL-4 和 IL-6 的 mRNA 表达^[40,42,43]。

2.3 抗哮喘作用

黑米花色苷提取物对哮喘小鼠具有保护作用,其机制与显著减少支气管周围区域嗜酸性粒细胞的积累、降低支气管炎肺泡灌洗液(BAFL)中炎症细胞计数、降低血清总 IgE 和 BALF 中 IgE、抑制 p38 MAPK 磷酸化和 NF-κB 的表达、减少 Th2 类细胞因子 IL-4 和 IL-5 的分泌,提高 Th1 类细胞因子 INF-γ 的表达,调节 IL-4/INF-γ 平衡失调和减轻炎症细胞浸润等有关^[44-47]。

2.4 抗氧化作用

黑米比白米具有更强的抗氧化活性,呈浓度依赖性,是天然抗氧化剂的良好来源^[48];总抗氧化活性与花青素-3-葡萄糖苷、氰苷-3-芸香苷和芍药苷 3-葡萄糖苷含量显著正相关^[49]。黑米提取物(BRE)的抗氧化是通过减少体内和体外自由基的生成、增加 SOD 和 CAT 活性、改善血浆抗氧化剂状态及保护氧化低密度脂蛋白(ox-LDL)引起血管内皮细胞的过氧化损伤来介导的^[50-52]。Han 等^[53]认为,BRE 还能降低 p38 和 c-Jun N-末端激酶的活性和抑制 UV 诱导激活蛋白-1(AP-1)的产生,减少人永生角质形成细胞(HaCaT)细胞中 UV 诱导的活性氧产生,减弱 UV 引起的细胞外基质损伤,预防皮肤光老化。

2.5 抗肿瘤作用

黑米花青素提取物(AEBR)通过激活 caspase 级联、裂解多聚(adp-核糖)聚合酶(PARP)、去极化线粒体膜电位和磷酸化等途径,降低肿瘤组织中血管

生成因子基质金属蛋白酶(MMP-2、MMP-9 和尿激酶型纤溶酶原激活物(u-PA)的表达,阻碍 AP-1 的 DNA 结合活性和核转位,阻滞 G0/G1 期,增加单核细胞(CD11b)、巨噬细胞和 T 细胞的增殖,促进外周血单核细胞的巨噬细胞吞噬和降低 B 细胞增殖,抑制多种癌细胞(如 SKHep-1、SCC-4、HeLa、HER2、HL-60 和 Huh-7)的侵袭、活性和生长,表现在瘤体积、瘤组织微血管密度值、促血管生成因子的表达水平和核抗原 Ki-67 表达强阳性细胞数的显著减少、巨噬细胞释放的 TNF-α、IL-1β 和 IL-6 增加等^[54-58]。

2.6 减肥降脂作用

黑米花青素(BRA)可使高脂饮食 C57BL/6 小鼠在 12 周内体重下降 9.6%,通过腺苷活化蛋白激酶(AMPK)途径降低过氧化物酶体增殖物激活受体(PPAR)γ、胆固醇调节元件结合蛋白(SREBP)-1c、脂肪酸合成酶(FASN)、乙酰辅酶 A 羧化酶(ACC)、3-羟基-3-甲基-戊二酰辅酶 A 还原酶(HMGCoA)、TNF、IL-6、诱导型一氧化氮合酶(iNOS)、NF-κF、NPC1 类细胞内胆固醇转运蛋白 1(NPC1L)、乙酰辅酶 A 乙酰转移酶 2(ACAT2)和微粒体甘油三酯转移蛋白(MTTP)的表达,增加肝脏 X 受体(LXR)α、PPARα 和肉毒碱棕榈酰转移酶(CPT)1α 的基因表达水平,增加 PPARα、p-乙酰辅酶 A 羧化酶(ACC)/ACC 和 p-AMPKα/AMPKα 的蛋白表达水平,降低高胆固醇血症小鼠中的血清谷丙转氨酶(ALT)、谷草转氨酶(AST)和 γ-谷氨酰转肽酶(GGT)水平及甘油三酯(TG)、总胆固醇(TC)、非高密度脂蛋白胆固醇水平(non-HDL-C),增加高密度脂蛋白(HDL)水平,增强血小板稳定,有效提高粪便固醇排泄和盲肠短链脂肪酸,提高肝脏的 SOD(超氧化物歧化酶)和 GPX(谷胱甘肽氧化酶)活性,减少脂质过氧化反应^[59-63]。黑米麸皮花青素提取物的稳定胆固醇能力大于玉米醇提取物,可通过上调小肠三磷酸腺苷结合盒转运体 G5/8(ABCG5/8)和 ATP 结合盒转运蛋白重复序列 A1(ABCA1)基因表达,降低胶束胆固醇溶解度,抑制胰脂肪和细胞对胆固醇的吸收,通过增加小肠中胆固醇的排泄;抑制活性与提取物中花青素[矢车菊素-3-糖苷(Cy-3-G)和芍药素-3-糖苷(Pn-3-G)]含量呈正相关^[64-66]。发芽黑糯米甲醇提取物(GBR)通过促进解偶联蛋白 2 的 mRNA 水平升高来抑制小鼠体重增加和体脂(白色脂肪、肝脏重量及血清甘油三酯)显著降低,部分通过减少转录因子来控制脂肪生成,改善血脂水平,降低血浆瘦素和胰岛素水平,提高脂联素水平,可作为一种潜在的抗肥胖药物^[67-68]。

2.7 降血糖作用

富含花青素的黑米提取物可防止大鼠高果糖诱导的胰岛素抵抗,改善葡萄糖耐受不良和高脂血症,通过降低肝细胞的核因子(HNF)1α、1β 和 4α 及参与调节钠依赖葡萄糖转运体 1(SGLT1)和葡萄糖转运蛋白(GLUT)的转录因子表达来减少其基因和蛋

白质表达,增加骨骼肌中的磷酸肌醇的磷酸化 3-kinase(PI3K)、蛋白激酶 B(PKB Akt)和糖原合成酶(GS)1 的活性,降低糖原合酶激酶(GSK)3 β ,从而抑制血液中的氧化应激,改善葡萄糖清除率,降低血糖水平^[69-71]。

3 黑米的综合利用

3.1 食品行业

黑米的营养成分及功能使其在食品行业的综合利用前景广阔,极具市场价值,尤其是用于营养保健食品或功能性食品配方中。目前,黑米在食品方面的开发由发酵类食品、黑米发酵乳、黑米发酵饮料和酒类四个方面^[72-74],黑米的发酵类食品开发主要包括黑米馒头、面包、煎饼及黑米酱和黑米膳食纤维饼干等,这些大多可作为早餐食用,饱腹感强且不易长胖;黑米的发酵乳产品主要包括黑米发酵酸奶、花色苷酸奶和黑米黑豆混合发酵酸奶等,制成发酵乳后的产品更易被人体吸收,营养丰富口感极佳;黑米还可作为制作食醋、酱油和酿酒的原料,可制成黑米保健醋、酱油、清酒、甜酿酒、黄酒和啤酒等,香醇浓郁品质优良,乃餐桌之必备。

3.2 医药行业

近些年来,随着人们对黑米医药价值地逐步关注和深入探究,黑米及其提取物在科学研究和临床实践上的应用也越来越多,良好地效果也层出不穷,极大地推动了黑米在医药上的综合利用。刘静^[75]采用醇溶液浸提法提取黑米花色苷来制备胶囊(含 50mg AREBR)应用于辅助降血脂。陈璐^[76]以黑米花青素为原料开发了黑米花青素片剂,并对其制备工艺及质量标准进行研究。王梦姝等^[77]以黑米花色苷和大豆卵磷脂为原料制备黑米花色苷磷脂复合物,延长了黑米花色苷在体内的半衰期,提高了最大血药浓度和生物利用度。刘文燕^[78]以黑米花色苷为原料,首次采用干法制粒的方式制备黑米花色苷薄膜包衣片剂,起到避光、防潮和隔绝空气等作用,增加片剂中黑米花色苷的稳定性和延长制剂有效期。李雯等^[79]将黑米花青苷、西洋参皂苷、二苯乙烯苷及灵芝多糖含量复配生产出黑米花青苷复方软胶囊。Chomean 等^[80]用天然染料黑糯米提取液代替苏木精对精子细胞核进行染色,染色效果与快速 Papanicolaou(PAP)有较好的一致性和较强的相关性,以减少购买合成染料的昂贵费用及其副作用。

3.3 化工行业

有一些科技人员将黑米应用于化工染色上。徐静等^[81]在 80℃ 下采用 50% 乙醇提取 30 min 获得黑米色素(固液比 1:8),用于后媒法染色,最佳染色工艺为媒染剂浓度 1%。贾艳梅等^[82]在 50℃ 下采用蒸馏水提取 60 min 获得黑米色素(固液比 1:20,以醋酸-醋酸钠调节浸提液的 pH 为 3),80℃ 直接染色柞蚕丝绸 60 min,具有较好的耐皂洗及耐摩擦色牢度,但耐光色牢度较差。于学智等^[83]在 60~70℃

下采用蒸馏水提取 120min 获得黑米色素(固液比 1:20),将其应用于桑蚕丝织物的直接染色(pH=4、100℃ 和 80 min),媒染织物的耐皂洗及耐摩擦色牢度达到 3 级,能抵御紫外线,但耐日晒色牢度较差。

4 展望

黑米是一种传统的水稻品种,品种繁多,在东南亚有悠久的栽培历史和相对较广的种植面积,绿色革命前被印度普通民众和世界上几乎所有的大米食粮地区用作一种潜在的食物来源;更因其具有较高的次生代谢物含量、抗氧化活性和氨基酸营养全面,具有较好保健、预防和治疗作用,古代医学中常作为药食兼用的膳食补充剂,目前被广泛应用于功能性保健食品和药品的生产,服务于有代谢障碍的人(如糖尿病人)^[1-4]。随着科技工作人员的试验研究推进和公众消费黑米的健康意识增强,虽取得了一些成果,但依然还有许多问题有待深入探究,笔者认为目前最亟待解决的主要有如下方面:

4.1 黑米生物强化的遗传改良和品种培育

作物生物强化是指在作物常规生长过程中利用生物科技来特意提高作物中某种必需营养素,改善产品供应的营养质量、提升产品附加值和满足农民增收需求,并以最低的健康风险获取公众健康收益^[84]。黑米含有丰富的营养成分,尤其是一些独特活性成分(如花色苷),若想更好地发挥其医疗保健价值,就必须利用遗传学、组学、分子设计育种和聚合育种等不同学科的先进技术交叉融合来针对性地进行黑米的遗传改良和品种培育,实现本质上的生物强化。赖来展等^[85]改进了周光宇的外源 DNA 直接导入法,将黑糯 P9(蛋白质含量 14.03%)的 DNA 导入高产品种中选育出黑优粘 96。周斗等^[86]采用多重杂交法(复交和回交)聚合了多份水稻(桂黑 1 号、农家常规黑粳稻 E3 和白壳占)的优异基因选育出海亚黑稻 1 号和 2 号品种及多个品系,平均亩产超 450 kg。Kim 等^[70]是通过常规育种培育出的一种新型黑米品种 C3GHi,其氰苷-3-糖苷(C3G)含量比普通黑米高,抗氧化能力强,用于糖尿病患者的功能材料或替代餐开发。

4.2 黑米生物强化的栽培技术和体系集成

以作物营养强化技术体系为核心,培育富含各种维生素、矿物质及功能因子的农作物新品种的农业方式被称为“营养型农业”^[87]。提高黑米营养成分的根本途径是良种培育,但良种离不开良法,良种需要通过最适宜的栽培技术和种植体系才能完美发挥出其潜势。而目前对黑米生物强化的栽培技术研究和种植体系的集成极少,导致黑米产量较低、种植面积零星和生产效益低下,基本停留在种植者的自给自足上,未达到种植的规模化和产业化及产品的商品化和流通化,要想解决目前的现实问题,就需积极开展黑米的生物强化栽培技术和体系集成方面的研究。

4.3 黑米功能特性的深入挖掘和机理研究

古代医学典籍中有很多黑米功能特性的记载,为现代医疗保健提供了重要的文献资料,但因生存环境和所处时代不同导致疾病的发生及实施的策略就不一样,这就要求科技工作者必须深入挖掘新环境、新时代和新形势下可能赋予黑米的更多功能特性,阐明其现代意义上的作用机理,尤其是黑米中特殊营养的功能解析及分子机制,为黑米的综合利用提供理论基础和参考依据。

4.4 黑米综合利用的产品选择和生产工艺

黑米丰富的特殊营养成分解析和较高的医疗保健功能确证为其综合利用提供了广阔的市场前景和可观的利润价值。目前大部分产品集中食品,以黑米为主料或辅料进行附加值较低的产品开发和生产。倘若要发挥出黑米的最大价值,应该在医药行业进行深度综合利用,生产出性价比高的保健品来预防一些疾病的发生,最有价值的是研制出能应用于临床治疗的高效药物。当然,也应该积极推进在其他行业的作用,如化学试剂(如花青素)的提纯和黑色染料的加工等。

参考文献

- [1] Prasad B J, Sharavanan P S, Sivaraj R. Health benefits of black rice: A review[J]. Grain & Oil Science and Technology, 2019, 2(4): 109-113.
- [2] 罗建华,王继忠,韩小丽.浅谈洋县黑米发展优势及利用[J].中国稻米,2015,21(3): 90-93.
- [3] Kushwaha U K S. Black rice research, history and development[M]. Springer International Publishing, 2016: 21-47.
- [4] Ito V C, Lacerda L G. Black rice (*Oryza sativa* L.): A review of its historical aspects, chemical composition, nutritional and functional properties, and applications and processing technologies[J]. Food Chemistry, 2019, 301: 125304.
- [5] Morita T, Kiriya S. Mass production method for rice protein isolate and nutritional evaluation[J]. Journal of Food Science, 2010, 58(6): 1393-1396.
- [6] Bhattacharya K R. Rice quality: A guide to rice properties and analysis[M]. Philadelphia: Woodhead Publishing Limited, 2011: 377-409.
- [7] Yu L L, Li G L, Li M, et al. Genotypic variation in phenolic acids, vitamin E and fatty acids in whole grain rice[J]. Food Chemistry, 2016, 197(Part A): 776-782.
- [8] 张名位,郭宝江,池建伟,等.黑米皮的营养与抗氧化评价及其加工处理的保质效果[J].农业工程学报,2004,20(6): 165-169.
- [9] 黎杰强,朱碧岩,陈敏清.特种稻米营养分析[J].华南师范大学学报(自然科学版),2005,37(1): 95-98, 122.
- [10] 戴蕴青,何计国,袁芳,等.五彩米营养成分分析与评价[J].中国粮油学报,2006,21(1): 20-23.
- [11] 侯锐骁,吴祎林,张路祎,等.大米中黄酮和脂肪酸成分及抗氧化性能的分析[J].食品科学,2008,29(9): 422-425.
- [12] 杨加珍,曾亚文,杜娟,等.紫黑米种质功能成分综合研究与利用[J].生物技术进展,2015,5(1): 47-53.
- [13] 金增辉.黑米素综合利用与加工技术的研究[J].粮食加工,2016,41(5): 24-25, 40.
- [14] 马先红,许海侠,韩昕纯.黑米的营养保健价值及研究进展[J].食品工业,2018,39(3): 264-267.
- [15] 袁凌沧,潘军,段彬伍.有色米及白米矿物质元素营养特征[J].中国水稻科学,1993,7(2): 95-100.
- [16] 程国霞,聂晓玲,郭蓉,等.陕西汉中3种特种稻米营养成分分析与评价[J].营养学报,2016,38(1): 99-101.
- [17] Bao J S. Rice: Chemistry and technology (4th Edition)[M]. Elsevier Inc, 2019: 109-130.
- [18] Jiang X L, Tian J C, Zhao Z H, et al. Protein content and amino acid composition in grains of wheat-related species[J]. Agricultural Sciences in China, 2008, 7(3): 272-279.
- [19] 张林生,路革.关于主要谷物的氨基酸组分评价[J].氨基酸和生物资源,1989(3): 30-32.
- [20] 李春艳,刘兴海,张杰,等.高必需氨基酸米 Y-800 与 11 种食物氨基酸组成比较及营养评价[J].现代食品,2019(15): 98-105.
- [21] 王婧,李小平,刘柳,等.燕麦等五种谷物的氨基酸含量综合评价[J].麦类作物学报,2019,39(4): 438-445.
- [22] 许伟利,董伟志,王军,等.大麦籽粒营养成分及开发研究进展[J].大麦与谷类科学,2019,36(3): 52-55.
- [23] 杜双奎,李志西,于修焯.不同部位荞麦粉营养价值分析[J].粮油加工与食品机械,2006(4): 64-66.
- [24] Sytar O, Chrenkova M, Ferencova J, et al. Nutrient capacity of amino acids from buckwheat seeds and sprouts[J]. Journal of Food and Nutrition Research, 2018(1): 38-47.
- [25] Guo X, Duan X, Wu Y, et al. Genetic engineering of maize (*Zea mays* L.) with improved grain nutrients[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2018, 66(7): 1670-1677.
- [26] Ravindran G. Seed protein of millets: Amino acid composition, proteinase inhibitors and *in-vitro* protein digestibility[J]. Food Chemistry, 1992, 44(1): 13-17.
- [27] 冯耐红,侯东辉,杨成元,等.不同品种小米主要营养成分及氨基酸组分评价[J].食品工业科技,2020,41(8): 224-229.
- [28] Gao L Y, Ma X, Liu X. Research progress on the functions of vitamins in body[J]. Journal of Chinese Pharmaceutical Sciences, 2016, 25(5): 329-341.
- [29] Krinsky N I, Johnson E J. Carotenoid actions and their relation to health and disease[J]. Molecular Aspects of Medicine, 2006, 26(6): 459-516.
- [30] Kräutler B, Arigoni D, Golding B T. Vitamin B and B-Proteins[M]. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH, 2007: 3-43.
- [31] Wong S K, Chin K Y, Ima-Nirwana S. Vitamin C: A review on its role in the management of metabolic syndrome[J]. International Journal of Medical Sciences, 2020, 17(11): 1625-1638.
- [32] Tsukasa I. Flavonoid function and activity to plants and other organisms[J]. Biological Sciences in Space, 2003, 17(1): 24-44.
- [33] Pojer E, Mattivi F, Johnson D, et al. The case for anthocyanin consumption to promote human health: A review[J]. Comprehensive Reviews in Food Science & Food Safety, 2013, 12(5): 483-508.

- [34] 李静, 焦雪, 华泽田, 等. 20种黑米的总酚含量与抗氧化活性[J]. 食品工业科技, 2017, 38(20): 31–35.
- [35] 陈子涵, 蒋继宏, 鞠秀云, 等. 各食用米中活性成分及其抗氧化活性[J]. 食品工业科技, 2018, 39(3): 71–75, 81.
- [36] Anderson J W, Baird P, Davis R H J, et al. Health benefits of dietary fiber[J]. *Nutrition Reviews*, 2009, 67(4): 188–205.
- [37] Hu C, Zawistowski J, Ling W H, et al. Black rice (*Oryza sativa* L. *indica*) pigmented fraction suppresses both reactive oxygen species and nitric oxide in chemical and biological model systems[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2003, 51(18): 5271–5277.
- [38] Wang Q, Han P H, Zhang M W, et al. Supplementation of black rice pigment fraction improves antioxidant and antiinflammatory status in patients with coronary heart disease[J]. *Asia Pacific Journal of Clinical Nutrition*, 2007, 16(S1): 295–301.
- [39] Min S W, Ryu S N, Kim D H. Anti-inflammatory effects of black rice, cyanidin-3-O- β -D-glycoside, and its metabolites, cyanidin and protocatechuic acid[J]. *International Immunopharmacology*, 2010, 10(8): 959–966.
- [40] 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]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2010, 58(18): 10007–10015.
- [41] Hartati F K, Widjanarko S B, Widyaningsih T D, et al. Anti-inflammatory evaluation of black rice extract inhibits TNF- α , IFN- γ and IL-6 cytokines produced by immunocompetent cells[J]. *Food & Agricultural Immunology*, 2017, 28(6): 1–10.
- [42] Han S J. Effect of selection for anthocyanin contents of black colored rice on anti-allergic activity[J]. *Korean Journal of Breeding Science*, 2008, 40(1): 22–25.
- [43] 李良昌, 延光海, 秦向征, 等. 黑米花色苷提取物对大鼠抗过敏作用[J]. *中国公共卫生*, 2011, 27(5): 613–615.
- [44] Lee S H, Sohn Y S, Kang K K, et al. Inhibitory effect of DA-9201, an extract of *Oryza sativa* L. on airway inflammation and bronchial hyperresponsiveness in mouse asthma model[J]. *Biological & Pharmaceutical Bulletin*, 2006, 29(6): 1148–1153.
- [45] 李良昌, 秦向征, 李光昭, 等. 黑米花色苷提取物在小鼠哮喘模型中对 p38 丝裂原活化蛋白激酶信号通路的影响[J]. *解剖学报*, 2012, 43(1): 41–44.
- [46] 王天宇, 车楠, 姜京植, 等. 黑米花色苷抑制哮喘炎症作用研究[J]. *时珍国医国药*, 2017, 28(5): 1104–1105.
- [47] 车楠, 叶晶, 姜京植, 等. 黑米花色苷对哮喘小鼠气道炎症的影响[J]. *医学版*, 2018, 53(1): 30–34.
- [48] 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[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, 824(1): 012017(6pp).
- [49] Hosoda K, Sasahara H, Matsushita K, et al. Anthocyanin and proanthocyanidin contents, antioxidant activity, and in situ degradability of black and red rice grains[J]. *Asian Australasian Journal of Animal Sciences*, 2018, 31(8): 1213–1220.
- [50] Ling W H, Cheng Q X, Ma J, et al. Red and black rice decrease atherosclerotic plaque formation and increase antioxidant status in rabbits[J]. *Journal of Nutrition*, 2001, 131(5): 1421–1426.
- [51] Chiang A N, Wu H L, Yeh H I, et al. Antioxidant effects of black rice extract through the induction of superoxide dismutase and catalase activities[J]. *Lipids*, 2006, 41(8): 797–803.
- [52] Sompong R, Siebenhandl-Ehn S, Linsberger-Martin G, et al. Physicochemical and antioxidative properties of red and black rice varieties from Thailand, China and Sri Lanka[J]. *Food chemistry*, 2011, 124(1): 132–140.
- [53] Han M, Bae J S, Ban J J. Black rice (*Oryza sativa* L.) extract modulates ultraviolet-induced expression of matrix metalloproteinases and procollagen in a skin cell model[J]. *International Journal of Molecular Medicine*, 2018, 41(5): 3073–3080.
- [54] Chen P N, Kuo W H, Chiang C L, et al. Black rice anthocyanins inhibit cancer cells invasion via repressions of mmps and u-pa expression[J]. *Chemico-Biological Interactions*, 2006, 163(3): 218–229.
- [55] 常徽, 糜漫天, 凌文华. 黑米花色苷及联合化疗药物对不同肿瘤细胞增殖的影响[J]. *第三军医大学学报*, 2007, 29(20): 1943–1946.
- [56] 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]. *Nutrition and Cancer*, 2010, 62(8): 1128–1136.
- [57] Lin W H, Xu J M, Wu S P, et al. Selective anti-proliferation of HER2-positive breast cancer cells by anthocyanins identified by highthroughput screening[J]. *Plos One*, 2013, 8(12): e81586.
- [58] Fan M J, Yeh P H, Lin J P, et al. Anthocyanins from black rice (*Oryza sativa*) promote immune responses in leukemia through enhancing phagocytosis of macrophages *in vivo*[J]. *Experimental and Therapeutic Medicine*, 2017, 14(1): 59–64.
- [59] Kil D Y, Ryu S N, Piao L G, et al. Effect of feeding cyanidin 3-glucoside (C3G) high black rice bran on nutrient digestibility, blood measurements, growth performance and pork quality of pigs[J]. *Asian Australasian Journal of Animal Sciences*, 2006, 19(12): 1790–1798.
- [60] Salgado J M, Oliveira A G, Mansi D N, et al. The role of black rice (*Oryza sativa* L.) in the control of hypercholesterolemia in rats[J]. *Journal of Medicinal Food*, 2010, 3(6): 1355–1362.
- [61] Wu T, Guo Q X, Zhang M, et al. Anthocyanins in black rice, soybean and purple corn increase fecal butyric acid and prevent liver inflammation in high fat diet-induced obese mice[J]. *Food Function*, 2017, 8(9): 3178–3186.
- [62] 王心哲, 孟祥敏, 游颖, 等. 黑米花色苷微波辅助提取工艺的优化及其降血脂功能研究[J]. *食品科技*, 2018, 43(8): 198–204.
- [63] Hao W, Liu D, Ji Y L, et al. 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[J]. *Molecular Nutrition for Food Research*, 2020, 64(8): e1900876.
- [64] Zhang X M, Shen Y X, Prinyawiwatkul W, et al. Comparison of the activities of hydrophilic anthocyanins and lipophilic tocopherols

- black rice bran against lipid oxidation[J]. *Food Chemistry*, 2013, 141(1): 111–116.
- [65] Yao S L, Xu Y, Zhang Y Y, et al. Black rice and anthocyanins induce inhibition of cholesterol absorption *in vitro*[J]. *Food and Function*, 2013, 4(11): 1602–1608.
- [66] 马娜, 申婷婷, 赵江, 等. 黑米通过上调小肠 *ABCG5/8* 和 *ABCA1* 基因表达降低胆固醇水平[J]. *食品科学*, 2015, 36(9): 136–140.
- [67] Lee Y M, Han S I, Won Y J, et al. Black rice with giant embryo attenuates obesity-associated metabolic disorders in ob/ob mice[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2015, 64(12): 2492–2497.
- [68] Lim W C, Ho J N, Lee H S, et al. Germinated waxy black rice suppresses weight gain in high-fat diet-induced obese mice[J]. *Journal of Medicinal Food*, 2016, 19(4): 410–417.
- [69] Guo H, Ling W, 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 for Human Nutrition*, 2007, 62(1): 1–6.
- [70] Kim H Y, Kim J H, Lee S A, et al. Antioxidative and anti-diabetic activity of C3GHi, novel black rice breed[J]. *Korean Journal of Crop Science*, 2010, 55(1): 38–46.
- [71] Kang H W, Lim W C, Lee J K, et al. Germinated waxy black rice ameliorates hyperglycemia and dyslipidemia in streptozotocin-induced diabetic rats[J]. *Biological & Pharmaceutical Bulletin*, 2017, 40(11): 1846–1855.
- [72] 要萍, 于金侠. 功能性黑色食品的研究与开发[J]. *粮油食品科技*, 2010, 18(1): 10–12.
- [73] 马先红, 许海侠, 刘洋. 黑米发酵食品研究进展[J]. *食品工业*, 2016, 37(10): 233–236.
- [74] 隋新, 吕进义, 李盛, 等. 黑米饮品的研究进展[J]. 保鲜与加工, 2017, 17(3): 129–132.
- [75] 刘静. 黑米花色苷提取物对血脂异常患者血脂和炎症因子的影响[D]. 广州: 中山大学, 2008.
- [76] 陈璐. 黑米花青素片剂的制备工艺及质量标准研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- [77] 王梦姝, 吕晓玲, 赵焕焦, 等. 黑米花色苷磷脂复合物的制备及生物利用度[J]. *食品科技*, 2017, 42(5): 242–245.
- [78] 刘文燕. 黑米花色苷包衣片的制备及对过敏性鼻炎豚鼠作用研究[D]. 长春: 吉林大学, 2018.
- [79] 李雯, 韩惠敏, 赵天煜, 等. 黑米花青苷复方软胶囊生产工艺研究[J]. *现代食品*, 2018, 4(7): 149–152.
- [80] Chomean S, Sukanto T, Piemsup A, et al. Evaluation of black glutinous rice (*Oryza sativa* L.) extract as a novel nuclear stain for human sperm head assessment by microscopic examination[J]. *Clinical and Experimental Reproductive Medicine*, 2019, 46(2): 60–66.
- [81] 徐静, 姜萌萌. 黑米对棉织物媒染染色性能的研究[J]. *上海纺织科技*, 2016, 44(7): 37–39.
- [82] 贾艳梅, 刘治梅, 路艳华, 等. 黑米天然色素在柞蚕丝绸上的染色性能[J]. *印染助剂*, 2015, 32(2): 10–13.
- [83] 于学智, 姜洪武, 张月, 等. 黑米提取液对桑蚕丝织物的染色性能研究[J]. *印染助剂*, 2019, 36(1): 45–48.
- [84] Fan S G, Yosef S, Pandya-Lorch R. Agriculture for improved nutrition: Seizing the momentum[M]. Washington: IFPRI books, International Food Policy Research Institute (IFPRI), 2019.
- [85] 赖来展, 许秀珍. 黑米稻 DNA 分子育种技术研究[J]. *广东农业科学*, 1993, 22(5): 29–31.
- [86] 周斗, 林雄, 郑文飞, 等. 海南岛乐东盆地黑米育种实践与展望[J]. *中国稻米*, 2016, 22(1): 103–105.
- [87] 卢士军, 黄家章, 吴鸣, 等. 营养导向型农业的概念、发展与启示[J]. *中国农业科学*, 2019, 52(18): 3083–3088.