芦润青，吴云霞，耿敬章，等. 色稻营养、功能成分及生物活性研究进展 [J]. 食品工业科技，2023，44(5)：411−419. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022040192

LU Runqing, WU Yunxia, GENG Jingzhang, et al. Advances in Studies on Nutritional, Functional Components and Biological Activities of Color Rice[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(5): 411−419. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022040192

·专题综述·

色稻营养、功能成分及生物活性研究进展

芦润青[1]，吴云霞[1]，耿敬章[1,*]，王志男[1]，李冬琴[1]，周　芳[1]，田洪磊[1]，芦智远[2]，赵丹妮[2]

（1.陕西理工大学 生物科学与工程学院，中国谢村北派黄酒研究院，陕西汉中 723000；
2.西安市产品质量监督检验院，陕西西安 710065）

摘　要：色稻富含营养成分及功能因子，是理想的主食和功能性食物来源。本文系统介绍了色稻的营养成分（蛋白质、氨基酸、维生素等），功能因子（花青素、酚酸、膳食纤维等）及其生物活性（抗氧化活性、抗炎、抗癌和抗糖尿病特性等），并对色稻资源的开发利用进行了分析。从加强生物活性物质的稳定性等方面展望了色稻的发展趋势，以期为色稻的综合利用提供借鉴。

关键词：色稻，营养成分，功能因子，生物活性

中图分类号：TS201　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1002−0306(2023)05−0411−09

DOI： 10.13386/j.issn1002-0306.2022040192

本文网刊：

Advances in Studies on Nutritional, Functional Components and Biological Activities of Color Rice

LU Runqing[1], WU Yunxia[1], GENG Jingzhang[1,*], WANG Zhinan[1], LI Dongqin[1], ZHOU Fang[1], TIAN Honglei[1], LU Zhiyuan[2], ZHAO Danni[2]

（1.Institute of Biological Sciences and Engineering, Shaanxi University of Technology, Northern Rice Wine Research Institute of Xiecun, Hanzhong 723000, China;
2.Xi'an Supervision & Inspection Institute of Product Quality, Xi'an 710065, China）

Abstract: Rich in nutrients and functional factors, color rice is an ideal staple food and functional food source. This article gives a summary of recent research on the nutritional components (protein, amino acid, vitamin, etc.), functional components (anthocyanin, phenolic acid, dietary fiber, etc.) and biological activities (antioxidant activity, anti-inflammatory, anti-cancer and anti-diabetes properties, etc.) of color rice, and discusses the exploitation and utilization of color rice resource. The development trend of color rice was prospected from strengthening the stability of bioactive substances, so provide a reference for the comprehensive utilization of color rice.

Key words: color rice; nutritional component; functional factor; biological activities

稻米是世界上大多数国家最主要的谷类粮食作物，为世界上大约一半的人口提供每日膳食能量，是人体能量、碳水化合物、蛋白质、矿物质、维生素的重要来源。此外米糠还含有多种酚类物质及膳食纤维，具有抗氧化、抗癌、预防糖尿病等生理活性[1]。稻米中的大部分营养功能物质积累在糊粉层，在去皮和碾磨过程损失较大，过度依赖精白米的饮食会导致部分营养物质的缺失[2]。

色稻是指由于花青素、类胡萝卜素、叶绿素等色素物质在皮层或糊粉层中积累沉淀，使得糙米呈现黑、红、紫、绿、黄等颜色，其中以紫黑米和红米最为常见[2]。我国有悠久的色稻种植历史和丰富的色稻

收稿日期：2022−04−18

基金项目：秦巴生物资源与生态环境国家重点实验室（培育）“市校共建”专项（SXC-2106）；陕西省教育厅产业化项目（20JC010）；陕西省资源生物重点实验室开放基金（SLGPT2019KF03-04）；陕西理工大学秦巴食品资源开发利用科技创新团队科研专项；陕西省科技厅产业攻关项目（2021NY-156）。

作者简介：芦润青（1997−），女，硕士研究生，研究方向：食品科学，E-mail: 15829151208@163.com。

*** 通信作者：**耿敬章（1980−），男，硕士，教授，研究方向：食品质量控制与资源开发利用，E-mail: gengjingzhang@163.com。

种质资源。色稻资源约占我国水稻总资源的 10% 左右，主要分布在广西、云南等地[3]。研究表明色稻的营养成分如蛋白质、氨基酸、矿物质含量等均优于普通白米。此外，色稻所含的花青素、酚酸等多酚类物质，使其能影响细胞的活性氧自由基的形成，具有抗氧化、抗癌、预防糖尿病活性[4]。近年来，随着人们对健康饮食的日益重视，色稻因其含有丰富的高营养植物化学物质成为备受推崇的主食，在欧洲、亚洲许多国家越来越受到欢迎，比如白色稻米（白米）烹饪时常与黑米混合，以增强风味和口感[5]。本文结合国内外研究现状，系统地介绍了色稻的营养功能成分，探讨色稻的营养价值和植物化学物质多样性，并讨论这些功能成分对人类健康的影响，以期为色稻产品深加工和综合利用提供借鉴。

1 色稻的营养成分

1.1 基本营养成分

我国稻米品种繁多，不同品种色稻中的蛋白质、脂肪、灰分等含量略有差异，其基本营养成分的研究结果见表 1。

表 1 色稻基本营养成分含量

Table 1 Content of basic nutrients in color rice

稻米种类	碳水化合物（%）	水分（%）	蛋白质（%）	粗脂肪（%）	灰分（%）	参考文献
紫米	70.1	11.9	9.6	3.1	1.0	[6−7, 9]
黑米	69.5	9.7	11.9	2.4	1.3	[7, 9]
红米	69.5	12.1	10.3	2.2	1.3	[7−9]
黄米	66.4	12.1	10.4	2.7	1.3	[7, 9]
绿米	68.8	10.5	9.6	3.9	1.4	[7, 9]
白米	76.4	13.3	7.4	0.8	0.6	[9]

由表 1 可知，总体而言，色稻的蛋白质、粗脂肪、灰分等营养成分含量远高于白米，表明色稻是理想的主食。碳水化合物是稻米的主要成分，其含量占稻米的 70% 以上，是决定稻米食用品质的主要因素[10]。由表可知，色稻的碳水化合物含量均低于白米。色稻的水分含量均低于白米，较低的水分含量表明色稻具有良好的储存性。蛋白质含量均高于白米，其中黑米蛋白质含量比白米高 60.8%。蛋白质是稻米中仅次于淀粉的第二大主要成分，对稻米的食用品质和营养品质有重要意义，较高的蛋白质含量赋予色稻更高的营养价值，还增加了籽粒的强度和耐压性，但蛋白质含量高也表明色稻米粒结构紧密，吸水速度慢、不易糊化[10]。色稻的脂肪含量远高于白米，约为白米的 2~5 倍，表明色稻油性较高、口感较好[9]。色稻的灰分含量远高于白米，也间接表明色稻的矿物质含量较为丰富。

1.2 氨基酸组成及含量

氨基酸是色稻的重要营养成分，5 种色稻中均可检测到 15 种氨基酸，种类较为齐全，其含量见表 2。总体而言，色稻的总氨基酸、必需氨基酸含量、氨基酸指数均高于白米，且 5 种色稻中，黑米的各种氨基酸含量高于其它色稻，表明黑米具有更高的营养价值。色稻中氨基酸含量最高的是谷氨酸，其次为天冬氨酸、亮氨酸和精氨酸，必需氨基酸含量较高的是亮氨酸、缬氨酸和苯丙氨酸，组氨酸含量较高，表明色稻蛋白质具有良好的消化率。此外，在黑米和红米中还检测到 25.66~51.25 mg/100 g 的 γ-氨基丁酸（GABA）[10]。

表 2 色稻氨基酸含量（g/100 g）

Table 2 Amino acid content of color rice (g/100 g)

氨基酸	黑米	紫米	红米	黄米	绿米	白米
缬氨酸*	0.74	0.66	0.70	0.71	0.66	0.45
苏氨酸*	0.43	0.34	0.38	0.38	0.36	0.26
亮氨酸*	0.87	0.72	0.86	0.87	0.74	0.61
异亮氨酸*	0.40	0.33	0.40	0.44	0.34	0.32
苯丙氨酸*	0.74	0.56	0.71	0.68	0.64	0.40
赖氨酸*	0.42	0.33	0.35	0.36	0.38	0.27
天冬氨酸	1.03	0.80	0.91	0.91	0.90	0.66
丝氨酸	0.60	0.48	0.55	0.54	0.50	0.37
谷氨酸	2.24	1.80	2.14	2.02	1.86	1.38
酪氨酸	0.46	0.42	0.48	0.54	0.46	0.33
精氨酸	0.84	0.68	0.73	0.76	0.70	0.64
组氨酸	0.35	0.28	0.14	0.23	0.12	0.16
脯氨酸	0.45	0.35	0.40	0.40	0.36	0.32
甘氨酸	0.50	0.40	0.43	0.44	0.42	0.33
丙氨酸	0.62	0.50	0.57	0.56	0.52	0.44
必需氨基酸EAA	3.60	2.94	3.40	3.44	3.12	2.31
总氨基酸TAA	10.69	8.65	9.75	9.84	8.96	6.94
EAA/TAA	33.68%	33.99%	34.87%	34.96%	34.82%	33.29%

注：*代表必需氨基酸。

人体对蛋白质的需求不仅在于其含量，还取决于氨基酸的种类和比例[11]。丰富的氨基酸含量和合理的氨基酸组成表明色稻属于优质蛋白质来源。

1.3 脂肪酸

不饱和脂肪酸在人体生理代谢过程中有着重要作用，单不饱和脂肪酸中的油酸可预防动脉硬化[12]，多不饱和脂肪酸具有抗炎作用和神经保护功能，有利于预防痴呆。黑米和红米的脂肪酸含量研究结果见表 3。黑米和红米的不饱和脂肪酸含量远高于白米，但红米的多不饱和脂肪酸含量低于白米。黑米的不饱和脂肪酸以多不饱和脂肪酸为主，红米以单不饱和脂肪酸为主；而两种米的饱和脂肪酸均以棕榈酸为主，单不饱和脂肪酸以油酸为主，多不饱和脂肪酸以亚油酸为主。

色稻的主要脂肪酸为亚油酸、油酸和棕榈酸。脂肪酸种类丰富、不饱和脂肪酸含量丰富赋予色稻较高的营养价值，表明色稻是亚油酸和其它必需脂肪酸的良好来源。目前对黄米、绿米及紫米的脂肪酸构成研究较为缺乏，未来可对其深入研究，以明确其全面营养价值。

1.4 维生素

维生素在体内不能合成或合成量不足，需通过

表 3　黑米、红米与白米脂肪酸含量对照表

Table 3　Comparison table of fatty acid content of black rice, red rice and white rice

色稻种类	MUFA总量(g/100 g)	MUFA含量(%)	PUFA总量(g/100 g)	PUFA含量(%)	UFA/FA(%)	主要脂肪酸种类	参考文献
黑米	0.79	35.37	0.81	36.95	76.56	PUFA	[8, 12]
红米	1.04	48.10	0.42	19.47	67.57	MUFA	[8]
白米	0.20	39.40	0.30	33.10	64.90	MUFA	[9]

注：MUFA为单不饱和脂肪酸；PUFA为多不饱和脂肪酸；UFA为不饱和脂肪酸；FA为脂肪酸。

其他方式进行补充。从食物中摄取是补充维生素的重要方式。不同品种色稻的维生素含量研究结果见表 4，由表可知，除黑米外，其余色稻的 V_{B1} 含量均低于白米；除红米的 V_{B2} 含量高于白米，其余色稻的 V_{B2} 含量与白米基本相同；色稻的 V_{B3} 含量远高于白米，表明色稻有助于预防由于 V_{B3} 缺乏导致的赖皮症；在红米和黑米中还检测到丰富的 V_E，存在形式以 α-V_E 为主，表明色稻是 V_E 的良好膳食来源。但维生素会因热处理而降解。水稻采收后的加工过程会导致维生素含量不同程度下降，通过加工技术减少加工过程中稻米营养物质的损失是色稻未来加工利用的发展方向。

表 4　不同色稻的维生素含量(mg/100 g)

Table 4　Vitamin content of different color rice (mg/100 g)

色稻种类	V_{B1}	V_{B2}	V_{B3}	V_E	参考文献
黑米	0.17	0.06	8.02	0.38	[8, 13]
紫米	0.08	0.04	9.26	–	[9]
红米	0.09	0.17	7.98	0.58	[14−15]
黄米	0.02	0.08	13.2	–	[9]
绿米	0.06	0.04	14.2	–	[9]
白米	0.11	0.05	1.9	–	[9, 13]

注：–代表未找到相关数据，表5、表7、表8、表11同。

1.5　类胡萝卜素

类胡萝卜素是主要的维生素 A 源物质，也是重要的维生素 A 补充剂。色稻中的类胡萝卜素含量见表 5。黑米中的类胡萝卜素含量最高可达 2.20 mg/100 g，而白米中的类胡萝卜素含量极少[13]。色稻中的类胡萝卜素主要是叶黄素和 β-胡萝卜素，还有少量的玉米黄质存在[16]。也有研究表明紫黑稻中类胡萝卜素的主要成分为叶黄素和玉米黄质，次要成分为番茄红素和 β-胡萝卜素[17]。尽管对色稻维生素成分的研究有限，但研究结果表明，黑米和红米是类胡萝卜素的良好来源。更重要的是色稻中的类胡萝卜素多以全反式-β-胡萝卜素形式存在，能最有效地转化为维生素 A。

表 5　不同色稻的类胡萝卜素含量(mg/100 g)

Table 5　Carotenoid content of different color rice (mg/100 g)

色稻种类	黑米	紫米	红米	黄米	绿米	白米
类胡萝卜素	2.20	0.39	0.09	–	–	0
参考文献	[15]	[17]	[13]	–	–	[15]

1.6　矿物质

矿物质是人体健康的重要营养素，在人体生理过程和大量营养素合成中发挥着重要作用。色稻含有多种人体必需的微量元素。不同色稻的矿质元素含量见表 6。由表可知，5 种色稻米的钾、镁、钙、铁、锰、锌、铜含量均高于白米，表明色稻营养更为丰富。此外研究表明，黑米可提供每日推荐摄入量的 75% 的锰、铁、锌，而白米仅能提供 37%[2]。对于缺铁性贫血人群来说，铁元素含量高的色稻是良好的膳食铁补充来源。

2　色稻的功能成分

2.1　花青素

花青素是广泛存在于植物器官内的一种水溶性色素，属于类黄酮类物质，在不同酸碱度或金属离子作用下可呈现红色、紫红色及蓝色，从而赋予植物色彩[20]。食用富含花青素的食物可降低患心血管疾病和癌症的风险[21]。一般来说，花青素在水稻不同部位的含量不同，麸皮含量高于胚、全谷物和胚乳。目前从色稻中分离鉴定出的花色苷单体有矢车菊素-3-葡萄糖苷、芍药苷-3-葡萄糖苷、矢车菊素-3-芸香苷等[22]。花青素的糖基化和酰基糖基化在色稻中产生 18 种花青素，占总花青素的 88%。不同稻米总花青素及单体含量见表 7。

研究表明色稻中总花青素含量最高为 3.28 mg/g。

表 6　不同色稻的矿物质元素含量(mg/kg)

Table 6　Mineral element content of different color rice (mg/kg)

色稻种类	K	Mg	Ca	Fe	Mn	Cu	Zn	参考文献
黑米	165.4~2385	1037	64.3~121.0	8.5~70.3	19.8	1.3	9.8~27.8	[11, 18]
红米	170.2~1473	1324	38.0~486.0	52.2	33.0	2.2~7.7	28.7~41.7	[18−19]
紫米	169.9~2492	1202	94.8~96.6	12.3~100.8	10.2	2.2	16.1~38.2	[11, 18]
黄米	155.9	347.6	112.2	63.7	19.1	1.7	40.0	[18]
绿米	179.1	195.4	64.2	75.0	29.8	1.3	31.0	[18]
白米	68.5	156	48	1.99	0.71	0.18	9.78	[8, 11]

表 7 不同稻米总花青素及单体含量

Table 7 Total anthocyanin and monomer contents in different rice varieties

色稻种类	总花青素含量(mg/g)	矢车菊素-3-葡萄糖苷含量(%)	芍药素-3-葡萄糖苷含量(%)	矢车菊素-3,5-二葡萄糖苷含量(%)	参考文献
黑米	3.28	81.99~90.6	6.3	3.1	[23−25]
红米	0.09	83.3	16.7	−	[23, 26]
紫米	2.51	69.87~90.46	29.83~30.13	−	[6, 27]

色稻中的花色苷单体含量最为丰富的是矢车菊素-3-葡萄糖苷，含量第二的单体为芍药苷-3-葡萄糖苷，含量排第三的单体是矢车菊素-3,5-二葡萄糖苷。与其他代谢物相同，色稻中花青素含量受环境和基因型的影响。不同稻米中矢车菊素-3-葡萄糖苷、矢车菊素-3,5-葡萄糖苷、芍药苷-3-葡萄糖苷所占比例不同。

花青素化学性质极不稳定，易受温度影响[20]。干燥、蒸煮等热处理会降低色稻中花青素含量[2]。利用基因工程开发高花青素含量的新品种，提高花青素保留率，有助于色稻被更多消费者接受。

2.2 酚酸类物质

酚酸是色稻的主要活性成分之一，目前已在色稻中检测到阿魏酸、没食子酸、对香豆酸、香草酸、咖啡酸等多种酚酸[28]。酚酸在色稻中以结合态和游离态两种形式存在，结合态酚酸在有色糙米中的含量远高于游离酚酸。大部分酚酸被酯化到细胞壁，并可以通过氢氧化钠水解释放[29]。结合态酚酸以具有抗氧化、降低糖尿病、心脑血管疾病风险活性[30] 的阿魏酸为主，游离态酚酸含量较高的为原儿茶酸、阿魏酸和香草酸。色稻中不同酚酸的总含量见表 8。

表 8 稻米中不同酚酸的含量

Table 8 Contents of different phenolic acids in rice

酚酸	阿魏酸 (mg/g)	原儿茶酸 (mg/g)	香草酸 (mg/g)	咖啡酸 (mg/g)	没食子酸 (mg/g)	对香豆酸 (mg/g)	参考文献
黑米	27.3	14323	38.7	100.8	24.4	642	[28]
红米	84.6	748	110.3	216.7	70.7	2670	[28, 31]
紫米	29.0	577.7	11.1	0.6	4.8	51.7	[31]
绿米	31.3	−	9.5	12.7	0.3	−	[31]
白米	1.31	0.014	−	−	0.025	0.425	[28]

与白米相比，色稻中的酚酸种类更为丰富，且其游离态、结合态酚酸含量均高于普通稻米，因此赋予了色稻优越的抗氧化活性。尽管有色糙米中酚酸含量较高，但其热稳定性较差，在加工过程会发生降解[32]。使用酶保护酚酸类化合物降低其加工损失是未来研究的方向。

2.3 膳食纤维

膳食纤维是人类饮食中必不可少的营养素，通过调节肠道菌群组成和促进短链脂肪酸的产生影响人体健康。膳食纤维的缺乏会导致患糖尿病、心血管疾病、直肠癌等慢性疾病的风险增加[33]。高纤维饮食已被证明有益于控制糖尿病患者的血糖。色稻米可溶性膳食纤维的主要成分是阿拉伯木聚糖和 β-D-葡聚糖，不溶性膳食纤维由纤维素、半纤维素、不溶性 β-葡聚糖和阿拉伯木聚糖组成[34]。色稻中膳食纤维的含量如表 9 所示，精白米的膳食纤维含量为 0.5%~1.0%，色稻的膳食纤维含量在 2.52%~5.19% 之间，普遍高于精白米，表明色稻是膳食纤维的良好来源，有助于解决当前营养过剩导致的健康问题[34]。

表 9 稻米中膳食纤维的含量

Table 9 Dietary fiber content in rice

稻米	紫米	黑米	红米	黄米	绿米	白米
膳食纤维(%)	5.08	4.55	2.52~4.79	5.19	4.92	0.5~1.0
参考文献	[7]	[7]	[7, 34]	[7]	[7]	[34]

2.4 生物碱

生物碱主要存在于植物中，是一类有显著的生物活性的含氮碱性有机化合物。色稻中的生物碱种类丰富、丰度高。迄今为止，已在色稻中分离鉴定出超过 40 多种生物碱[35]。色稻中的部分生物碱含量见表 10，由表可知色稻的甜菜碱和胆碱含量显著高于普通稻米，此外在色稻中还检测到高丰度但普通稻米中未检测到的甲基莲心碱。

表 10 稻米中生物碱的含量及生物功能

Table 10 Contents and biological functions of alkaloids in rice

生物碱	色稻中的含量 (μg/g)	白米中的含量 (μg/g)	生物功能	参考文献
甜菜碱	323.95	50.10	抗氧化、抗癌活性	[35−36]
胆碱	5.21	0	促进幼儿大脑发育、提高记忆	[35, 37]
甲基莲心碱	0.31	0	抗血栓形成、抗血小板聚集	[35, 38]

目前，对黑米功能成分的研究多集中在花色苷及酚酸，少数研究报道了色稻中生物碱的种类及含量，未来可针对生物碱进行研究，进一步揭示色稻的物质基础及其在保健方面的作用。

2.5 其他物质

色稻还含较高水平的芹菜素、儿茶素、山奈酚和槲皮素等黄酮类物质，其含量见表 11。槲皮素、芹菜素和儿茶素以游离和结合形式存在，木犀草素和杨梅素仅以游离形式存在。不同品种含量有所差异，红米中儿茶素含量较高，黑米中芹菜素、山奈酚等黄酮类物质含量都很丰富。色稻的总黄酮含量高于精白米，可归因于有色大米中黄酮类生物合成基因的转录水平较高[40]。

3 色稻的生物活性

由于富含高生物活性物质，包括矿物质和花青素、酚酸等酚类物质，色稻被认为是一种非常有效的

表 11　色稻中其它黄酮类物质的含量(mg/g)

Table 11　Content of other flavonoids in color rice (mg/g)

色稻种类	芹菜素	儿茶素	山奈酚	槲皮素	木犀草素	杨梅素	参考文献
黑米	149~618	49~896	40~650	5~392	0~30	40	[32, 39]
红米	97~531	24~398	0~7	0~927	0~774	30	[32, 39]
紫米	–	0~63	–	–	–	–	[29, 32]

功能性食物来源。色稻被证实具有抗氧化、抗肥胖、降血糖、抗炎、抗癌、调节肠道菌群、抗衰老等活性。

3.1　抗氧化活性

色稻作为重要的优质稻种资源，其糙米种皮内富集有多种天然抗氧化剂成分，具有较高的抗氧化活性。体外实验表明色稻提取物对于 OH、O_2^-、DPPH、ABTS 等自由基及 H_2O_2 具有明显的清除能力[41]，其花色苷清除 DPPH、ABTS 自由基、H_2O_2 及总还原能力显著高于抗坏血酸；但清除 OH 自由基和 O_2^-自由基能力略低于抗坏血酸[42]。

体内实验表明食用色稻糙米可降低活性氧、提高抗氧化酶活性，显著改善内源抗氧化系统，降低氧化应激生物标志物的出现，减轻氧化应激[43]。膳食中补充紫米的小鼠乙酰胆碱酯酶活性和脂质过氧化产物水平降低，超氧化物歧化酶、过氧化氢酶和谷胱甘肽过氧化物酶活性增加[44]。补充 5 mg/mL 黑米提取物，可使 HepG2 肝癌细胞中的 O_2^-自由基和活性氧水平明显降低 34.0% 和 39.3%[45]。在人体临床试验中发现，色稻中的多酚类物质在治疗氧化应激方面发挥着关键作用，在食用紫米后成年受试者血液样本的抗氧化活性增加了 70.5%，并能持续 4 h，且紫米的抗氧化活性始终高于红米[46]。

多项体内、体外试验证实与白米相比，色稻具有优越的抗氧化活性，且呈剂量-效应关系，是良好的天然抗氧化剂来源，在预防与氧化应激相关的人类疾病方面具有潜在的营养价值。

3.2　抗肥胖作用

色稻中的花青素、阿魏酸等植物化学物质被证实有助于减少脂肪堆积、改善体重[33]。添加黑米花青素的饮食可抑制高脂膳食组大鼠的体重增长并改善高甘油三酯血症，降低其标志物甘油三酯、总胆固醇和低密度脂蛋白水平[47]。八周添加色稻的饮食使 24 名超重者减重 4.7±2.2 kg，还改善了其血脂状况，使其总胆固醇和低密度脂蛋白胆固醇显著降低[48]。

此外，色稻中的阿魏酸和 γ-谷维素也被用于减轻由高脂肪、高果糖饮食引起的肥胖症。体内研究表明，阿魏酸和 γ-谷维素在缓解高果糖、高脂肪饮食诱导的肥胖等代谢综合征方面表现出相似的效果，但 γ-谷维素在改善血清游离脂肪酸水平和细胞内总甘油酯累计方面效果更明显；添加了 0.16% 的 γ-谷维素处理组的小鼠肝脏指数得到改善，包括体重和肝脏总甘油酯含量[49]。Minatel 等[50] 在人脂肪间充质干细胞和小鼠来源的 3T3-L1 细胞中测定了 γ-谷维素的抗生脂活性，结果表明 γ-谷维素显著降低了两种脂肪细胞的脂质积累和甘油-3-磷酸脱氢酶活性。

色稻中的酚类物质被证明可调节脂质代谢，包括肝脏中的脂质氧化和脂肪生成，并减少各种脂肪组织类型中的脂肪细胞的大小[47]。色稻提取物可作为一种潜在的抗肥胖药物。

3.3　降血糖活性

糖尿病是由胰岛素不足引起的慢性高血糖病，被认为是由遗传因素或生活饮食习惯引起的，特别是由过量摄入碳水化合物造成。研究表明色稻提取物在糖尿病大鼠模型中具有改善糖尿病的活性，食用 50 mg/kg 体重的黑米提取物或 100 mg/kg 体重的红米提取物可显著降低糖尿病大鼠的血糖水平，黑米提取物表现出更快的降糖作用[51]。

色稻调节血糖的机制有两种。一方面色稻中的花青素可通过抑制蔗糖酶、葡萄糖苷酶等碳水化合物水解酶的活性，降低淀粉和蔗糖的吸收从而降低血糖积累[52]。2 mg/mL 的红米提取物对 α-淀粉酶有中等水平(41.3%~46.2%)的抑制作用，500 μg/mL 的红米提取物对 α-葡萄糖苷酶抑制率为 90.3%~91.8%[53]。另一方面色稻可通过刺激胰岛素的分泌和肝糖原产生，调节血糖水平[54]。厉成玲等[55] 研究发现补充 4 g/kg 体重的黑米多酚可显著降低糖尿病小鼠的血糖，刺激小鼠胰岛素的分泌，其效果与 500 mg/kg 体重的二甲双胍相当，黑米多酚还可有效刺激小鼠肝糖原的产生，保护糖尿病小鼠的肝脏和肾脏。

与精白米不同，色稻糙米可缓慢释放糖分，有助于持续稳定血糖。多数实验表明高剂量的色稻提取物可改善糖尿病的发展状况，低剂量的色稻可通过长期摄入来改善慢性高血糖水平[4]。因此，对糖尿病人群来讲，色稻是更理想的主食。

3.4　抗炎活性

IL-1β、IL-6 和 TNF-α 等生物标志物被用来证明炎症反应与疾病的发生和发展以及死亡风险之间的联系[56]。研究表明，色稻中的生物活性成分 γ-谷维素、阿魏酸、花青素-3-葡萄糖苷和芍药苷-3-葡萄糖苷及其代谢产物原儿茶酸共同作用，表现出有效的抗炎作用[57]。色稻提取物能有效抑制促炎细胞因子 TNF-α 和 IL-1β mRNA 及炎症介质 NO 和前列腺素 E2 (PGE2)的形成以及一氧化氮合酶(iNOS)和环氧合酶 2(COX-2)的表达，在小鼠活化的巨噬细胞和结肠癌细胞中都能调节炎症反应[58]。在人体临床试验中，食用紫米和红米后，参与者血液中的促炎细胞

因子 IL-6、IL-10、TNF-α 和 IL-12 显著降低，表明紫米和红米比白糙米的抗炎特性更强[59]。因此，色稻提取物可作为潜在的抗炎成分，治疗和预防慢性炎症相关疾病。

3.5 抗癌活性

色稻因其丰富的生物活性化合物及其抑制多种癌细胞增殖活性受到广泛关注。色稻发挥抗癌作用的分子机制包括诱导细胞凋亡、抑制细胞增殖以及改变恶性细胞的周期[60]。

研究表明在半抑制浓度为 8~24.47 mg/mL 的条件下，色稻可抑制结肠癌、乳腺癌和肝癌细胞的增殖，其发挥抗癌作用的物质基础是总酚、总黄酮含量较高，尤其是儿茶素含量高[61]。紫米和红米酚类提取物浓度大于 500 μg/mL 时可显著降低大肠癌细胞 SW 480 活力，红米酚类提取物的抗癌活性高于紫米[62]。色稻提取物对乳腺癌细胞 MCF-7、mda-mb-231 具有较强的抗增殖活性。黑米提取物对 MCF-7、mda-mb-231 的半数抑制浓度分别为 148.6 和 119.2 mg/mL，红米提取物对 MCF-7、mda-mb-231 的半数抑制浓度分别为 175.0 和 151.0 mg/mL[39]，色稻提取物还对宫颈癌细胞 HeLa 和胃癌细胞 AGS 具有较强的抗增殖活性[63]。

因此，将色稻作为一种食物来源化学预防剂，有可能对全球癌症预防产生重大影响。

3.6 调节肠道菌群

肠道微生物生态系统的紊乱可能导致生态失调，与代谢状况、胃肠道炎症、心血管和呼吸系统疾病等慢性疾病以及各种类型的癌症有关[64]。流行病学研究显示，健康个体和不健康个体的微生物多样性存在显著差异，健康个体的微生物群落的丰富度和多样性优于不健康个体[65]。

研究发现摄入谷类食物，特别是那些富含抗氧化剂和膳食纤维的谷物，可以通过不同方式调节肠道菌群。关于色稻膳食纤维对肠道菌群影响的研究很少。目前体外和临床研究仅限于全谷糙米、精米和米糠。在高脂血症小鼠的饲料中添加黑米花青素提取物可增加其肠道菌群如双歧杆菌和乳酸杆菌的多样性和数量[66]。色稻还可降低肠道菌群失衡标志物变形菌门和巨单胞菌属的丰度，增加普雷沃氏菌科和抗炎粪杆菌属丰度，促进短链脂肪酸合成[67]。短链脂肪酸是肠道微生物发酵的重要产物，膳食中添加黑米花青素可通过增加双歧杆菌和乳酸杆菌的丰度赋予胆盐水解酶活性增加短链脂肪酸（SCFA）的合成，保持肠道屏障完整性。

3.7 延长寿命及抗衰老特性

色稻的抗衰老和延长寿命活性与内源抗氧化基因表达的增加相关。含有黑米花青素的饮食明显提高了全身超氧化物歧化酶和过氧化氢酶的活性，降低 MDA 水平[68]。

黑米提取物在 30 mg/mL 的剂量下可通过上调 SOD1、SOD2、过氧化氢酶和 Rpn11 表达水平、下调 Mth 表达水平使果蝇的平均寿命延长 14%[69]。色稻生物活性化合物对人类角质形成细胞的抗衰老作用的能力也有所研究。弹性蛋白酶和胶原酶催化胶原的分解，导致皮肤老化。酪氨酸酶是黑色素产生的限速酶，通过抑制其活性可抑制色素沉着。色稻提取物对弹性蛋白酶、胶原酶和酪氨酸酶有显著的抑制作用[70]，具有很强的抗衰老潜力[71]，可用于皮肤老化治疗。

3.8 其它活性

部分研究还表明，色稻具有改善认知障碍、保护神经细胞的作用，但目前相关研究较少，不能确定是个别稻米品种还是普遍具有此类活性。阿尔兹海默症是老年人最常见的神经退行性疾病之一，其特点是记忆丧失和认知功能障碍。β-淀粉样蛋白的积累被认为是诱发阿尔兹海默症的重要原因之一。研究表明，色稻提取物可通过抑制大脑和肝脏脂质过氧化及 NO 生成，减轻氧化应激损伤来改善 β-淀粉样蛋白诱导的记忆损伤和认知功能障碍[72]。临床试验也证实在食用黑米提取物 12 周后，受试者的主观记忆力有明显改善，高剂量色稻干预可改善有记忆障碍的人的认知功能[73]。神经元细胞具有高代谢活性、非复制性和低抗氧化能力，非常容易受到活性氧作用而受损。研究表明，色稻对神经细胞有保护作用，其可能的机制是通过氢转移、电子转移和形成加合物三种途径抑制活性氧的生成，保护神经细胞免受损伤[74]。Hwang 等[75] 报道 300 mg/kg 黑米提取物处理可抑制反应性星形胶质细胞增生，防止谷胱甘肽过氧化物酶表达的丢失，显著降低海马神经元细胞死亡。

4 总结与展望

色稻富含多种不饱和脂肪酸、维生素、矿物质及生物活性物质，完全符合人们对健康食品的要求。在色稻中鉴定出的多种酚类化合物具有生物活性，如抗氧化活性、抗炎、抗癌和抗糖尿病特性，因而在食品加工领域和医疗行业等有广阔的市场前景。

国内外对于色稻中的花青素、酚酸等功能成分研究进展迅速，其作用机理也逐渐明确。但仍存在部分问题，首先，对色稻功能成分的研究主要集中在花青素，其它功能成分如生物碱的活性和作用机理研究还有待深入。其次，色稻对于人体健康影响的研究多集中在体外实验，未来需要从体外实验转向更多的体内实验和临床试验，以确定多种功能成分与人体健康的关系，促进其功能产品和药品的开发应用。第三，传统的加工、烹饪方法会降低色稻中酚酸、花青素等功能成分的含量，对于维持色稻植物化学物质活性和稳定性方面仍需展开大量研究。

另一方面，关于色稻的营养功能成分的大量研究都表明稻米的副产物米糠含大量生物活性代谢物，然而，实践生产中米糠被大量浪费。将米糠转化为功能性食品或用于生产营养保健品作为生物活性物质、矿物质和维生素的补充剂和具有多种益处的麸皮油，是未来色稻米糠的发展方向。

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]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2013, 61(45): 10626−10641.

[2] MBANJO E G N, KRETZSCHMAR T, JONES H, et al. The genetic basis and nutritional benefits of pigmented rice grain[J]. Frontiers in Genetics, 2020, 11: 229.

[3] MALINI S H, HESWARI D S U, YA D R L, et al. Exploring the therapeutic potential and nutritional properties of 'karuppu kavuni' variety rice of Tamil nadu[J]. International Journal of Pharma and Bio Sciences, 2018, 9(1): 88−96.

[4] BHAT F M, SOMMANO S R, RIAR C S, et al. Status of bioactive compounds from bran of pigmented traditional rice varieties and their scope in production of medicinal food with nutraceutical importance[J]. Agronomy, 2020, 10(11): 1−15.

[5] 满朝坤. 五种颜色糙米多酚类物质抗氧化活性及体外消化特性研究[D]. 沈阳: 沈阳师范大学, 2020. [MAN Chaokun. Antioxidative activity and *in vitro* digestive properties of five-color brown rice polyphenols[D]. Shenyang: Shenyang Normal University, 2020.]

[6] 杨宁, 熊思慧, 何静仁, 等. 紫米营养功能成分及其游离态与结合态组成的 HPLC/LC-MS 分析[J]. 食品与机械, 2017, 33(4): 27−32. [YANG Ning, XIONG Sihui, HE Jingren, et al. HPLC/LC-MS analysis of nutritive functional components and their free and bound states in purple rice[J]. Food and Machinery, 2017, 33(4): 27−32.]

[7] 赵芸卉, 李海洋, 徐姗娜, 等. 洋县五彩稻米的营养成分测定[J]. 现代农业科技, 2016(12): 289−290. [ZHAO Yunhui, LI Haiyang, XU Shanna, et al. Determination of nutrient components in Yangxian colorful rice[J]. Modern Agricultural Technology, 2016(12): 289−290.]

[8] 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. [CHENG Guoxia, NIE Xiaoling, GUO Rong, et al. Analysis and evaluation of nutritional components of three kinds of special rice in Hanzhong, Shaanxi Province[J]. Journal of Nutrition, 2016, 38(1): 99−101.]

[9] 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(1): 20−23. [DAI Yunqing, HE Jiguo, YUAN Fang, et al. Analysis and evaluation of nutrient components of multicolored rice[J]. Chinese Journal of Cereals and Oils, 2006(1): 20−23.]

[10] 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. [ZHANG Mei, YANG Dengxiang, ZHANG Conglan, et al. Determination of nutritional components and principal component analysis of different varieties of rice[J]. Food Science and Technology, 2014, 39(8): 147−152.]

[11] 于玲, 刘志敏, 曾海英, 等. 不同大米营养价值分析[J]. 现代食品, 2020(24): 183−186. [YU Ling, LIU Zhimin, ZENG Haiying, et al. Analysis of nutritional value of different rice[J]. Modern Food, 2020(24): 183−186.]

[12] 徐艳飞. 几种黑色食品化学成分分析[D]. 大连: 辽宁师范大学, 2009. [XU Yanfei. Analysis of chemical components of several black foods[D]. Dalian: Liaoning Normal University, 2009.]

[13] PETRONI K, LANDONI M, TOMAY F, et al. Proximate composition, polyphenol content and anti-inflammatory properties of white and pigmented Italian rice varieties[J]. Universal Journal of Agricultural Research, 2017, 5(5): 312−321.

[14] LAKSHMI S, GOUDAR G, MOHAR S, et al. Variability in resistant starch, vitamins, carotenoids, phytochemicals and *in-vitro* antioxidant properties among diverse pigmented grains[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2021(15): 2274−2789.

[15] YANAI H. Effects of N-3 polyunsaturated fatty acids on dementia[J]. Journal of Clinical Medicine Research, 2017, 9(1): 1−9.

[16] SARAYU L, GIRIDHAR G, MOHAR S, et al. Variability in resistant starch, vitamins, carotenoids, phytochemicals and *in vitro* antioxidant properties among diverse pigmented grains[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2021(15): 2774−2789.

[17] PEREIRA C G, WATANABE S, CROZIER A, et al. Phytochemical profile of a Japanese black-purple rice[J]. Food Chemistry, 2013, 141(3): 2821−2827.

[18] 庞海霞. 汉中五彩米中微量元素的测定分析[J]. 江苏农业科学, 2013, 41(5): 301−302. [PANG Haixia. Determination and analysis of trace elements in colorful rice in Hanzhong[J]. Jiangsu Agricultural Science, 2013, 41(5): 301−302.]

[19] 傅瑶, 顾朝剑, 郭岱明, 等. 三种不同颜色稻米的营养品质分析[J]. 中国稻米, 2018, 24(4): 50−54. [FU Yao, GU Chaojian, GUO Daiming, et al. Nutritional quality analysis of rice with three different colors[J]. China Rice, 2018, 24(4): 50−54.]

[20] 单建伟, 刘晓津, 索海翠, 等. 植物花色苷的研究进展[J]. 南方农业学报, 2019, 50(2): 278−285. [SHAN Jianwei, LIU Xiaojin, SUO Haicui, et al. Research progress on plant anthocyanins[J]. Southern Agricultural Journal, 2019, 50(2): 278−285.]

[21] FANG J. Bioavailability of anthocyanins[J]. Drug Metabolism Reviews, 2014, 46(4): 508−520.

[22] DENG G F, XU X R, ZHANG Y, et al. Phenolic compounds and bioactivities of pigmented rice[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2013, 53(3): 296−306.

[23] ABDEL A E, 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): 4696−4704.

[24] 孔令瑶, 汪云, 曹玉华, 等. 黑米色素的组成与结构分析[J]. 食品与生物技术学报, 2008(2): 25−29. [KONG Lingyao, WANG Yun, CAO Yuhua, et al. Composition and structural analysis of black rice pigment[J]. Journal of Food and Biotechnology, 2008(2): 25−29.]

[25] 娄秋艳. 黑米花青素的组成、对益生菌和致病菌的活性研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017. [LOU Qiuyan. Composition of black rice anthocyanins and their activity on probiotics and pathogenic bacteria[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2017.]

[26] HUANG Y P, LAI H M. Bioactive compounds and antioxidative activity of colored rice bran[J]. Journal of Food and Drug Analysis, 2016, 24(3): 564−574.

[27] ZHENG R L, REN T, NIU C T, et al. Anthocyanins composition and antioxidant activity of purple rice and color degradation under sunlight exposure of purple rice wine[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2022, 16: 1889–1900.

[28] LAOKULDILOK T, SHOEMAKER C F, JONGKAEWWATTANA S, et al. Antioxidants and antioxidant activity of several pigmented rice brans[J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2011, 59(1): 193.

[29] SHAO Y F, XU F F, SUN X, et al. Phenolic acids, anthocyanins, and antioxidant capacity in rice (*Oryza sativa* L.) grains at four stages of development after flowering[J]. Food Chemistry, 2014, 143: 90−96.

[30] LI D, RUI Y X, GUO S D, et al. Ferulic acid: A review of its pharmacology, pharmacokinetics and derivatives[J]. Life Sciences, 2021, 284: 119921.

[31] 严娜, 王芳, 高雪燕, 等. 色米提取物的抗氧化作用与成分分析研究[J]. 中国粮油学报, 2017, 32(3): 1−5. [YAN Na, WANG Fang, GAO Xueyan, et al. Study on the antioxidant effect and composition analysis of the extracts of colored rice[J]. Chinese Journal of Cereals and Oils, 2017, 32(3): 1−5.]

[32] TIOZON R J N, SARTAGODA K J D, FERNIE A R, et al. The nutritional profile and human health benefit of pigmented rice and the impact of post-harvest processes and product development on the nutritional components: A review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2021: 21−28.

[33] YE S X, SHAH B R, LI J, et al. A critical review on interplay between dietary fibers and gut microbiota[J]. Trends in Food Science & Technology, 2022, 124: 237−249.

[34] PRIYA T, NELSON A, RAVICHANDRAN K, et al. Nutritional and functional properties of coloured rice varieties of South India: A review[J]. Journal of Ethnic Foods, 2019, 6(1): 1−11.

[35] 蔡光泽, 罗樊, 蔡兴勇, 等. 黑米水提物功能活性成分分析[J]. 西昌学院学报(自然科学版), 2021, 35(2): 8−14, 38. [CAI Guangze, LUO Fan, CAI Xingyong, et al. Analysis of functional and active components of black rice water extract[J]. Journal of Xichang University (Natural Science Edition), 2021, 35(2): 8−14, 38.]

[36] KAR F, HACIOGLU C, KACAR S, et al. Betaine suppresses cell proliferation by increasing oxidative stress-mediated apoptosis and inflammation in DU-145 human prostate cancer cell line[J]. Cell Stress & Chaperones, 2019, 24(5): 871−881.

[37] HAMMOUD R, PANNIA E, KUBANT R, et al. High choline intake during pregnancy reduces characteristics of the metabolic syndrome in male wistar rat offspring fed a high fat but not a normal fat post-weaning diet[J]. Nutrients, 2021, 13(5): 1438−1451.

[38] YANG R P, ZHOU Y J, SONG W, et al. Pharmacological actions of neferine in the modulation of human platelet function[J]. European Journal of Pharmacology, 2019, 862(C): 172626.

[39] GHASEMZADEH A, KARBALAII 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): 12−17.

[40] NAYEEM S, VENKIDASAMV B, SUNDARARAJAN S, et al. Differential expression of flavonoid biosynthesis genes and biochemical composition in different tissues of pigmented and non-pigmented rice[J]. Journal of Food Science and Technology, 2021, 58(3): 884−93.

[41] TAI L, HUANG S, ZHAO Z, et al. Chemical composition analysis and antioxidant activity of black rice pigment[J]. Chemical Biology & Drug Design, 2020, 97(3): 711−720.

[42] 常世敏, 李乾丽, 谢婵媛, 等. 黑米与欧洲越橘花色苷抗氧化活性比较研究[J]. 食品工业科技, 2019, 40(9): 57−61, 67. [CHANG Shimin, LI Qianli, XIE Chanyuan, et al. Comparative study on antioxidant activity of black rice and bilberry anthocyanins[J]. Food Industry Science and Technology, 2019, 40(9): 57−61, 67.]

[43] YADAV S, APPUKUTTAN J P. Inhibition of LPS induced neurochemical imbalance and oxidative stress by pigmented and non-pigmented rice bran extracts[J]. Journal of Food Biochemistry, 2019, 43(3): 12735−12748.

[44] 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]. Journal of Medicinal Food, 2011, 14(7-8): 688−694.

[45] 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): 798−803.

[46] CALLCOTT E T, BLANCHARD C L, SNELL P, et al. The anti-inflammatory and antioxidant effects of acute consumption of pigmented rice in humans[J]. Food & Function, 2019, 10(12): 8230−8239.

[47] YANG Y, ANDREWS M C, HU Y, et al. Anthocyanin extract from black rice significantly ameliorates platelet hyperactivity and hypertriglyceridemia in dyslipidemic rats induced by high fat diets[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2011, 59(12): 6759−6764.

[48] HONGU N, KITTS D D, ZAWISTOWSKI J, et al. Pigmented rice bran and plant sterol combination reduces serum lipids in overweight and obese adults[J]. Journal of the American College of Nutrition, 2014, 33(3): 231−238.

[49] WANG O, LIU J, CHENG Q, et al. Effects of ferulic acid and γ-oryzanol on high-fat and high-fructose diet-induced metabolic syndrome in rats[J]. PloS One, 2015, 10(2): 118135.

[50] MINATEL I O, LEE Y M, YOON H, et al. Antiadipogenic activity of γ-oryzanol and its stability in pigmented rice[J]. Journal of Medicinal Food, 2016, 19(7): 710−715.

[51] TANTIPAIBOONWONG P, PINTHA K, CHAIWANGYEN W, et al. Anti-hyperglycaemic and anti-hyperlipidaemic effects of black and red rice in streptozotocin-induced diabetic rats[J]. Scienceasia, 2017, 43(5): 281−288.

[52] YOON K D, LEE J Y, KIM T Y, et al. *In vitro* and *in vivo* anti-hyperglycemic activities of taxifolin and its derivatives isolated from pigmented rice (*Oryzae sativa* L. cv. superhongmi)[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2020, 68(3): 742−750.

[53] BOUE S M, DAIGLE K W, CHEN M H, et al. Antidiabetic potential of purple and red rice (*Oryza sativa* L.) bran extracts[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2016, 64(26): 5345−53.

[54] SHIMODA H, AITANI M, TANAKA J, et al. Purple rice extract exhibits preventive activities on experimental diabetes models and human subjects[J]. Rice Research Open Access, 2015, 3(2): 137−141.

[55] 厉成玲, 周东浩. 黑米多酚对四氧嘧啶诱导糖尿病小鼠的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(10): 3189−3193. [LI Chengling, ZHOU Donghao. Effects of black rice polyphenols on alloxan-induced diabetic mice[J]. Journal of Food Safety and Quality Inspection, 2020, 11(10): 3189−3193.]

[56] FURMAN D, CAMPISI J, VERDIN E, et al. Chronic inflammation in the etiology of disease across the life span[J]. Nature Medicine, 2019, 25(12): 1822−1832.

[57] TUNCHANOK W, PIMPISA T, DUMNOENSUN P, et al. Anthocyanins and metabolites from purple rice inhibit IL-1β-induced matrix metalloproteinases expression in human articular chondrocytes through the NF-κB and ERK/MAPK pathway[J]. Biomedicine & Pharmacotherapy, 2019, 112: 108610−108621.

[58] WARUNYOO P, CHAKKRIT K, ARIYPHONG W, et al. The effect of purple rice (*Oryza sativa* L. indica) extract on the inflammatory response in a colon cancer cell line and dextran sulfate-induced tumor promotion in the rat colon[J]. Molecular & Cellular Toxicology, 2017, 13(4): 433−442.

[59] CALLCOTT E T, BLANCHARD C L, SNELL P, et al. The anti-inflammatory and antioxidant effects of pigmented rice con sumption in an obese cohort[J]. Food & Function, 2019, 10(12): 8016−8025.

[60] HENDERSON A J, OLLILA C A, KUMAR A, et al. Chemopreventive properties of dietary rice bran: Current status and future prospects1, 2[J]. Advances in Nutrition: An International Review Journal, 2012, 3(5): 643−653.

[61] BROTMAN Y, LLORENTEWIEGAND C, OYONG G, et al. The genetics underlying metabolic signatures in a brown rice diversity panel and their vital role in human nutrition[J]. The Plant Journal, 2021, 106(2): 507−525.

[62] SHIWANGNI R, KENNETH C, ABISHEK S, et al. Apoptosis induction pathway in human colorectal cancer cell line SW480 exposed to cereal phenolic extracts[J]. Molecules, 2019, 24(13): 2465−2479.

[63] CHUNG S I, LEE S C, YI S J, et al. Antioxidative and antiproliferative activities of ethanol extracts from pigmented giant embryo rice (*Oryza sativa* L. cv. keunnunjami) before and after germination[J]. Nutrition Research and Practice:Nutrition Research and Practice, 2018, 12(5): 365−370.

[64] DURACK J, LYNCH S V. The gut microbiome: Relationships with disease and opportunities for therapy[J]. Journal of Experimental Medicine, 2019, 216(1): 20−40.

[65] BEHROUZI A, NAFARI A H, SIADAT S D. The significance of microbiome in personalized medicine[J]. Clinical and Translational Medicine, 2019, 8(1): 16−25.

[66] WANG H, 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 & Food Research, 2020, 64(8): 1900876.

[67] KASSEM M, EDWARD C D, JENS W, et al. The impact of dietary fiber on gut microbiota in host health and disease[J]. Cell Host & Microbe, 2018, 23(6): 705−715.

[68] LU X L, ZHOU Y, WU T. Ameliorative effect of black rice anthocyanin on senescent mice induced by D-galactose[J]. Food & Function, 2014, 5(11): 2892−2897.

[69] ZUO Y Y, PENG C, LIANG Y T, et al. Black rice extract extends the lifespan of fruit flies[J]. Food & Function, 2012, 3(12): 1271−1279.

[70] TEERANACHAIDEEKUL V, WONGRAKPANICH A, LEANPOLCHAREANCHAI J, et al. Characterization, biological activities and safety evaluation of different varieties of Thai pigmented rice extracts for cosmetic applications[J]. Pharmaceutical Sciences Asia, 2018, 45(3): 140−153.

[71] POOMANEE W, WATTANANAPAKASEM I, PANJAN W, et al. Optimizing anthocyanins extraction and the effect of cold plasma treatment on the anti-aging potential of purple glutinous rice (*Oryza sativa* L.) extract[J]. Cereal Chemistry, 2021, 98(3): 571−582.

[72] LEE A Y, CHOI J M, LEE Y A, et al. Beneficial effect of black rice (*Oryza sativa* L. var. japonica) extract on amyloid β-induced cognitive dysfunction in a mouse model[J]. Experimental and Therapeutic Medicine, 2020, 20(5): 64.

[73] HYUN J S, HAHN C, LIM H K, et al. An exploration of the *Oryza sativa* L. cyanidin-3-glucoside on the cognitive function in older adults with subjective memory impairment[J]. Psychiatry Investigation, 2019, 16(10): 759−765.

[74] CAROLINA G V, JEFERSON D S J, THALLITA K R, 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.

[75] HWANG S N, KIM J C, BHUIYAN M I H, et al. Black rice (*Oryza sativa* L., poaceae) extract reduces hippocampal neuronal cell death induced by transient global cerebral ischemia in mice[J]. Experimental Neurobiology, 2018, 27(2): 129−138.