

李向菲, 沈丹, 黄俊凯, 等. 米糠功能活性成分及其功效的研究进展 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(13): 466-474. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021070310

LI Xiangfei, SHEN Dan, HUANG Junkai, et al. Research Progress on Functional Active Components and Its Efficacy in Rice Bran[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(13): 466-474. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021070310

· 专题综述 ·

米糠功能活性成分及其功效的研究进展

李向菲, 沈 丹, 黄俊凯, 陆颖健*

(南京财经大学食品科学与工程学院, 江苏南京 210023)

摘 要: 米糠是一种富含可再生有机碳源的农业副产物, 如今主要用作饲料和肥料的制作。已有研究报道, 米糠富含如膳食纤维、多酚和多糖等多种活性成分, 它们具有显著的抗氧化、降血脂和降血糖等生理活性。本文从米糠的生物活性成分入手, 分析米糠及其活性成分对抗氧化、降血糖、缓解肥胖、降血脂、免疫调节、以及抗肿瘤等方面的功能特性, 旨在提高米糠活性成分的应用价值, 为后续农副产品的有效利用与产业化提供理论依据。

关键词: 米糠, 米糠多糖, 米糠多酚, 改善肥胖, 抑制肿瘤

中图分类号: TS213.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2022)13-0466-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021070310



本文网刊:

Research Progress on Functional Active Components and Its Efficacy in Rice Bran

LI Xiangfei, SHEN Dan, HUANG Junkai, LU Yingjian*

(College of Food Science and Engineering, Nanjing University of Finance and Economics, Nanjing 210023, China)

Abstract: Rice bran is a kind of agricultural by-product, which is rich in renewable organic carbon sources and mainly used in feed and fertilizer production today. It has been reported that rice bran is rich in various active ingredients such as dietary fiber, polyphenols and polysaccharides, which have significant physiological activities such as anti-oxidation, lowering blood lipid and blood sugar. This paper starts with the bioactive components of rice bran, analyzes its the functional properties of rice bran and its active components in anti-oxidation, hypoglycemia, anti-obesity, hypolipidemic, immunomodulating, antitumor, etc, in order to improve the application value of the bioactive components of rice bran and provide theoretical basis for the effective utilization and industrialization of the following agricultural by-products.

Key words: rice bran; rice bran polysaccharide; rice bran polyphenols; improve obesity; inhibiting tumor

稻谷作为我国主要的粮食作物之一, 据国家粮食局统计公告显示, 2019 年我国粮食生产总量为 66384 万吨, 其中, 稻谷产量达 20961 万吨, 约占粮食总产量的 1/3^[1]。我国米糠年产量超过 1200 万吨, 是稻谷加工中最宝贵的副产品^[2], 主要由米胚芽、籽粒表皮种皮、糊粉层和部分胚乳等成分混合而成, 虽质量仅占糙米总重的 7%~11%, 但其营养成分含量高达糙米的 2/3, 且包含人体必需元素的 90% 以上, 素有“天然营养宝库”之称^[3-4]。米糠富含蛋白质、多糖、

不饱和脂肪酸、膳食纤维、维生素、抗氧化物质(γ -谷维素、生育酚、生育三烯酚和阿魏酸)以及矿物质(K、Ca、Mg 和 Fe)等天然活性成分, 具有降血糖、降血脂、抗氧化、抗炎、增强免疫力、预防心血管疾病和缓解肥胖等多重功效^[5-9]。目前, 作为世界资源大国, 我国米糠的加工量仅占 10%~20%, 且其深加工和高值化利用相对处于起步阶段, 多数用作动物饲料和草木灰还田, 仅有少部分加工成米糠营养饮料和米糠油等, 这样既降低了农副产品的附加值, 又造成了

收稿日期: 2021-07-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31801545); 江苏省自然科学基金(SBK2018042932); 中国博士后科学基金资助项目(2020M671517); 江苏省创新训练省级一般项目(202110327077Y); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)。

作者简介: 李向菲(1986-), 女, 博士, 讲师, 研究方向: 食品营养与功能因子, E-mail: xiangfeili@nufe.edu.cn。

* 通信作者: 陆颖健(1985-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品营养与功能因子, E-mail: yingjianlu@nufe.edu.cn。

资源的极大浪费^[10];而美国、日本作为米糠利用技术较好的两大发达国家,米糠资源的深加工量已经达到了 40%~80%,并已开发出多种米糠副产品。随着人们饮食结构的调整,国内外学者对米糠的重视度不断提高,在加强基础研究的前提下,更加重视开发具有针对性的米糠制品,而对米糠成分及功能的系统梳理是开展研究工作的前提。因此,本文将全面总结米糠的活性成分和功能特性,并对其应用研究进行展望,旨在为米糠的健康作用和高值化利用奠定理论依据。

1 米糠的主要活性成分

1.1 米糠多糖

米糠是营养物质和植物化学物质密集的食物资源,也是其他活性成分的优质来源^[11-12]。其中,占据重要地位的米糠多糖,存在于稻谷颖果皮层,约占脱脂米糠总量的 2.6%,是一类由木糖、阿拉伯糖、鼠李糖、半乳糖、甘露糖和葡萄糖等多种糖类物质组成的结构复杂的杂聚多糖,相对分子质量约为 $10^4\sim10^6$ ^[13]。目前,国内外关于米糠多糖的提取纯化和活性功能已有相关报道,虽然由于品种和提取工艺差异造成多糖提取量的差异,但是提取的米糠多糖均具有显著的抗肿瘤、抗衰老、降血糖和增强机体免疫等多种有益的生物活性^[14-15]。而良好的生理功能特性使得许多富含米糠多糖的功能性食品应运而生,如添加米糠多糖的焙烤食品和果蔬浓缩汁等^[16]。据研究,Han 等^[17]发现通过酶辅助法提取的米糠多糖有很好的抗肿瘤活性。刘梁等^[18]研究发现通过灌胃给予小鼠米糠多糖能促进小鼠体内免疫细胞的分泌,增强其机体免疫功能。此外,Pan 等^[19]通过对比单独的米糠多糖(RBP)和米糠多糖配合物 RBP-ca、RBP-zn、RBP-Fe(Ⅲ)对生成细胞内活性氧(ROS)的影响,发现 RBP-Fe(Ⅲ)配合物拥有强有力的抗氧化效果且细胞毒性低。这些发现大大提高了米糠多糖及其金属配合物等在医药和食品工业中应用的研究价值。

1.2 米糠膳食纤维

国际食品法典委员会(Codex Alimentarius Commission, CAC)定义膳食纤维是一类在小肠内未被水解,聚合度不小于 10 的糖单体聚合物^[20]。膳食纤维分为水溶性和水不溶性两种,水溶性膳食纤维如半纤维素、瓜尔胶、果胶等具有粘性,能有效创造肠道的健康生态^[21]。其中,米糠膳食纤维主要以水溶性膳食纤维为主,具有较强的吸水性和持水力,因此,可作为配料添加到食品中改善食品的加工特性。据研究,脂肪含量为 12% 并添加 2% 米糠纤维的法兰克福香肠可降低水分、灰分、碳水化合物、能量值以及蒸煮损失,具有良好的结构特性,与常规品控为 30% 脂肪的香肠相似^[22]。向无麸质面包中添加含有丰富可溶性膳食纤维的米糠,面包的颜色和孔隙度更好,提高了它的感官接受度和延长了保质期^[23]。可见,米糠膳食纤维可通过改变目标物质的相关质构来

改善它的外观,口感及增加它的货架期等。此外,徐田辉等^[24]研究表明经过蒸汽爆破-超微粉碎的米糠膳食纤维可降低小鼠的血糖,并改善它的血脂四项和增加抗氧化活性的指标,对 2 型糖尿病小鼠具有更强的保护作用。据研究发现,米糠水溶性膳食纤维还有极强的抗氧化能力^[25]和良好的抗炎效果^[26]。而且曹龙奎等^[27]通过体外研究发现,经超声-微波协同法改性的小米糠水溶性膳食纤维能够抑制 α -葡萄糖苷酶活性。研究表明,膳食纤维的摄入可有效调节肠道菌群,进而降低癌症、肥胖、2 型糖尿病以及心血管疾病等的发病率。因此,膳食纤维的益生作用备受国内外研究学者的瞩目^[28-31]。

1.3 米糠蛋白

蛋白质被认为是人类最重要的常量营养素。米糠富含优质植物蛋白,约占总重 10%~16%,生物价约 2.0~2.5,消化率大于 90%,与牛奶酪蛋白相似,优于小麦蛋白、玉米蛋白和大豆蛋白^[32]。米糠蛋白所含必需氨基酸齐全,与大米蛋白质相比,其氨基酸组成更接近推荐值,营养价值可与鸡蛋蛋白相媲美^[33]。由于米糠蛋白的高营养价值和低过敏性,已在婴幼儿和敏感人群食品中较早应用^[34]。按照溶解度不同,可将米糠蛋白分为清蛋白、球蛋白、醇蛋白和谷蛋白四种,见表 1。

表 1 米糠蛋白的组成^[35-38]

Table 1 The composition of rice bran protein^[35-38]

溶解度不同	溶剂	蛋白含量(%)	分子量(kDa)	积累时期
清蛋白	水	39	10~200	萌发期
球蛋白	稀盐溶液	34	16~130	萌发期
醇蛋白	醇溶液	23	19~90	贮藏期
谷蛋白	酸碱溶液	4	7~12.6	贮藏期

米糠蛋白独特的营养价值取决于其水解产物中全面而合理的氨基酸组成,氨基酸的配比与 FAO/WHO 推荐模型接近。米糠蛋白中丰富的赖氨酸含量弥补了多数谷物蛋白赖氨酸不足的缺陷^[39]。米糠蛋白中氨基酸的组分和含量见表 2。

1.4 米糠多酚

米糠中有许多重要的酚酸类物质,主要有阿魏酸、对香豆酸、原儿茶酸、香草酸等,其中阿魏酸的含量最高。以阿魏酸为例,它有顺式和反式两种异构体,在米糠中主要以结合态形式存在,通常与低聚糖以酯键相连接而成水溶性酯化物,又称阿魏酰低聚糖(Feruloylated oligosaccharides, FOs),兼具阿魏酸和低聚糖两者共同的生理功能;另一小部分则以游离态形式存在。有研究表明阿魏酸能影响中性白细胞向组织迁移,抑制炎症因子的产生,具有抗炎性^[41];Ibitoye 等^[42]研究发现,阿魏酸可通过增强能量代谢,增加活性氧的生成和电子传递链活性,同时降低谷胱甘肽的含量,从而增强喹诺酮类抗生素对鲍曼不动杆菌的抗菌活性;此外,Chen 等^[43]制作的阿魏酸-甜菜果

表 2 常见谷物蛋白和鸡蛋蛋白中必须氨基酸组成及含量(g/100 g 蛋白)^[39-40]Table 2 The composition and content of essential amino acids in common grain proteins and egg proteins (g/100 g protein)^[39-40]

氨基酸	米糠蛋白	小麦蛋白	大米蛋白	大豆蛋白	鸡蛋蛋白	FAO/WHO推荐模式
赖氨酸	5.8	2.5	4.0	2.5	5.6	5.5
色氨酸	1.6	1.3	1.7	0.5	1.6	1.0
亮氨酸	8.4	6.8	8.2	3.1	9.3	7.0
苏氨酸	3.9	2.9	3.5	1.6	5.2	4.0
缬氨酸	5.5	4.2	5.8	1.9	6.8	5.0
异亮氨酸	4.5	3.6	4.1	2.0	5.0	4.0
苯丙氨酸+酪氨酸	11.1	7.9	10.3	1.0	5.6	>6.0
胱氨酸+蛋氨酸	3.9	3.8	3.9	3.3	6.3	>3.5

肉 肉 果 胶 (Ferulic acid-Sugar beet pulp pectin, FA-SBPP) 比单纯的 SBPP 清除 DPPH 的能力更强, 研究表明可通过改变 SBPP 的化学反应性和极性, 从而提高抗氧化能力。而据 Masuda 等^[44] 研究发现, 谷物中的 FOs 比游离态阿魏酸的抗氧化潜能更强, 可见以结合态形式存在的阿魏酸是否在食品加工、制药及化妆品工业等领域具有更广阔的应用前景^[45], 还需进一步探索研究。

1.5 米糠油

在日本和欧美等发达国家和地区, 米糠油与橄榄油齐名, 深受心脑血管患者喜爱。米糠中油脂的提取起步较早, 并已得到广泛的工业应用。脂肪酸是米糠油脂中的主要活性成分, 其中饱和脂肪酸含量较低, 不饱和脂肪酸含量较高; 不饱和脂肪酸中油酸和亚油酸含量相同, 符合国际组织推荐和人体需要的最佳吸收配比^[46]。作为人体必需脂肪酸, 亚油酸可有效防止血液胆固醇在血管壁的沉积, 具有“血管清道夫”的美誉, 进而有降低血液胆固醇, 预防动脉粥样硬化, 改善心脑血管疾病等公认的活性功能。除此之外, 许多研究表明, 亚油酸还能作为其他不饱和脂肪酸的合成原料, 具有抗氧化、抗肿瘤、提高免疫力、治疗皮肤病等作用。

1.6 米糠多肽

米糠多肽是一种营养丰富的生物活性肽, 由米糠蛋白水解产物而得, 易被人体吸收, 具有降血压、抗菌、抗癌、抗糖尿病、降胆固醇和抑制血管紧张素转换酶活性等生理功效。蛋白酶解反应过程温和, 可改善天然蛋白的性质, 对最终产物的影响较小, 所以通常使用酶解技术来获得生物活性多肽^[47]。国内外对其各种功效做了大量研究, 米糠多肽经过体外胃肠消化可增强它的抗氧化性^[48], 进一步通过双盲随机对照试验, 验证了新肽 Leu-Arg-Ala 对轻度升高的血压具有显著的改善作用, 防止升级为 1 级高血压^[49]。Taniguchi 等^[50] 研究米糠蛋白酶解物中具有抗菌作用的 3 种阳离子肽 RBP-LRR, RBP-EKL 和 RBP-SSF, 它们皆具有潜在的创面愈合作用。Ngamsuk 等^[51] 最新研究表明, 米糠幼乳中加入米糠蛋白酶解液中的生物活性肽, 经高能超声处理后能够提高肽的体外肠道吸收。可见通过酶解米糠蛋白获得的米糠多肽在调

节人体生理机能和抵抗疾病等方面已经有了深入的研究, 对人体健康意义重大。

1.7 植酸

植酸是一种水溶性营养素, 可在体内水解为磷脂和肌醇^[52]。米糠中植酸含量占 10% 左右, 可作为良好的植酸来源。大量研究表明植酸具有较强的金属络合能力, 具有重金属吸附作用; 还可作为氢供体, 结合机体中多余的自由基, 发挥其抗氧化作用; 因此, 常用于食品和医药等工业生产^[52]。通常情况下, 植酸以络合物形式存在, 主要络合矿物质、蛋白质、游离氨基酸和消化酶等物质, 因此会降低其消化利用率, 需通过微生物发酵或酶解等方法降解植酸络合物, 提高植酸的营养价值^[52]。

1.8 γ -谷维素

γ -谷维素, 由甾醇或三萜醇的羟基与阿魏酸的羧基基团酯化而成^[53], 是从米糠层提取的阿魏酸酯和植物甾酯的混合物, 简称阿魏酸酯, 含量 0.3%~0.5%, 脂溶性。通常溶解在制备的米糠油中, 占毛油总重的 2%~3%, 因此, 米糠毛油是获取谷维素的主要原料^[52]。同时, 研究发现谷维素的分子结构具有酚类的性质且呈弱酸性, 皂化后的谷维素容易被碱性皂脚吸附^[54]。 γ -谷维素除了具有抗氧化活性以外, 还与降胆固醇、抗氧化、抗癌和防治糖尿病等有着密不可分的关系^[55-56]。

1.9 米糠蜡

米糠蜡(Rice bran wax, RBW)是从米糠毛油精炼出的一种天然植物蜡, 具有凝胶作用, RBW 以偶数碳链脂肪酸(C16~C32)与脂肪醇(C24~C38)的酯化形式存在^[57]。研究表明, 米糠蜡是一种良好的花生酱稳定剂, 当 RBW 形成针状晶体和花生颗粒分布均匀时, 稳定效果最佳^[58], 在芝麻酱中添加适量的米糠蜡可以有效地降低出油率, 也提高芝麻酱的稳定性^[59]。更有研究结果得出, 用精炼的或粗制压榨的玉米胚芽油和米糠蜡共同制成的油胶在烘焙工业中具有模拟起酥油功能的潜力^[60]。用泰式漂白米糠蜡的方法提取的普利醇是一种很好的有机凝胶剂, 可以在不添加乳化剂和稳定剂的情况下制备水乳化液, 同时, 从米糠蜡中获得的普利醇提取物可为米糠油工业增加附加值^[61]。

2 米糠活性成分的功效

2.1 减轻氧化损伤

大量研究表明米糠具有显著的抗氧化能力,主要归因于其提取物中多糖和酚类物质。目前,关于米糠的抗氧化能力的评价主要通过体内和体外两种手段:体外评价:自由基清除(1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH)清除能力、超氧阴离子自由基清除能力、羟自由基清除能力),电子转移(铁原子还原能力(FRAP)),脂质过氧化;体内评估:超氧化物歧化酶活性(SOD),谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px),丙二醛(MDA)的测定,SOD和GSH-Px的活性与多糖免疫活性相关,而MDA的增加提示氧化损伤增加。已有研究表明多糖的抗氧化过程是通过将电子传递给抗氧化剂而实现的。随着米糠多糖剂量的增加,小鼠血液中SOD和GSH-Px增加,同时MDA的生成量减少^[17]。热水浸提米糠多糖具有良好清除超氧阴离子自由基的能力^[19],黑米米糠及其固态发酵产物能够增强DPPH清除率能力和抑制酪氨酸酶活性,与酚酸的释放量增加呈线性关系^[62-63]。酚酸的释放,对于机体的抵抗氧化的能力起到重要的作用。类似研究表明,米糠中酚类提取物可通过下调ICAM1、CD39、CD73和NOX4的表达,同时上调Nrf2、NQO1、HO1和eNOS的表达,进而调节抗氧化和抗炎通路,最终发挥其抗氧化和抗炎作用^[64]。此外,有研究认为米糠中的植酸之所以有抗癌特性或许是因为它的抗氧化能力^[65]。

2.2 改善肥胖

肥胖已经成为世界流行性疾病,呈现逐年递增趋势,预计2030年全球57.8%的成年人将出现超重或者肥胖的现象^[66]。随着人们膳食结构的不断变化,食物趋于精细化,肥胖现象显著增加,近年来许多科研工作者通过米糠膳食干预来预防和减缓肥胖取得了一定进展。Yang等^[67]研究发现,向高能量饲料中添加不同比例的米糠,与高能量饲料诱导肥胖模型组大鼠相比,添加米糠组大鼠的体重和脂肪细胞大小明显下降;除此之外,米糠的添加对维持血液尿酸、葡萄糖和脂质稳态均有改善作用。在众多指标中,血脂四项(总胆固醇、甘油三酯、高密度脂蛋白和低密度脂蛋白)是评价肥胖是否有所改善的重要指标之一。临床试验中选择75名患有二型糖尿病的绝经后女性作为志愿者,用芥花油和米糠油代替她们饮食中的葵花油,8周后,发现芥花油和米糠油组的女性血液中血脂四项指标明显降低,并且米糠油的效果更佳^[68]。通过双盲试验,发现食用米糠油的志愿者血液中低密度脂蛋白水平显著降低,此外,通过改善氧自由基清除能力和铁离子还原力试验,结果表明米糠油具有抗氧化活性^[69]。Nie等^[70]研究发现给小鼠灌胃米糠多糖,可通过下调肝脂肪生成相关基因PPAR- α 、PPAR- γ 、PPAR- δ 、SREBP-1C、FASN、ACC、SIRT和CD36,对高脂饮食模型小鼠产生降血脂的作用。有研究发

现采用酶解法从脱脂米糠中提取的米糠不溶性膳食纤维有良好的吸附胆固醇和葡萄糖的能力,可改善大鼠的糖脂代谢和调节肠道菌群,从而有效降低肥胖模型大鼠的高血脂^[71]。由此可见,不管是在日常生活还是临床应用上米糠中的多种活性成分都对肥胖有很好的改善作用。

2.3 缓解糖尿病

糖尿病分为I型和II型两种,其中,I型是先天性胰岛受损,II型是胰岛素分泌不足或机体对胰岛素不敏感而造成的。近年来,不少学者通过饮食干预来达到缓解糖尿病的目的,其中米糠蛋白和米糠油也发挥了较好的作用。糖尿病小鼠喂食米糠蛋白8周的研究表明,米糠蛋白能够增强小鼠胰岛素敏感性,降低禁食血糖,改善血脂和尿蛋白/肌酸酐比值异常;进一步将米糠蛋白水解发现,水解产物通过抑制促血管生成和前体蛋白的表达,抑制促炎介质,恢复抗氧化和细胞保护系统,进而减缓糖尿病肾病的进展和恢复肾功能^[72]。此外,米糠油也在改善高血糖方面具有良好的作用,高血糖小鼠长期食用米糠油后,明显降低MDA生成量,修复SOD、过氧化氢酶和GSH-Px、辅酶10和抗氧化指数水平;促进胰腺、肾脏、心脏和肝脏等组织的再生^[73]。类似的另一项研究表明,棕榈油和米糠油中生育三烯酚能改善I型糖尿病小鼠的血糖和肾功能,其中棕榈油的效果稍优于米糠油^[74]。此外,米糠中的植酸可以通过调节肝脏中葡萄糖调节酶的活性来降低由C57BL/6N小鼠高脂饮食引起的高血糖的风险^[75]。以上研究均显示米糠及其提取物在防治糖尿病及其并发症方面具有巨大潜力。

2.4 抑制肿瘤

米糠中的许多生物活性成分对肿瘤有抑制作用,能抑制癌细胞的生长。其中,关于多糖的抗肿瘤作用已为人熟知,主要通过增强机体免疫力、抑制肿瘤DNA和RNA的合成来实现的。目前,已经报道的具有抗肿瘤活性的植物多糖主要包括银杏外种皮多糖、灰树花多糖、当归多糖、灵芝多糖、甘草多糖和枸杞多糖等^[3]。作为多糖的一类,米糠多糖对肿瘤生长的抑制作用的研究也取得了一定成果。已有研究证实不同提取方法制备米糠多糖,以及来源于不同色泽大米的多糖均可通过抑制肿瘤细胞的生长,发挥其抗肿瘤活性。通过水提法、微波辅助提取法和酶提法制备米糠多糖,所得三种不同多糖均对小鼠肿瘤细胞S180具有抑制作用并呈剂量依赖关系;进一步通过体内研究,发现米糠多糖的抗肿瘤活性与增强机体免疫和抗氧化能力密不可分^[17]。此外,来源于不同色泽大米的提取物有所差异,并对肿瘤细胞的作用能力呈现差异。研究者从16种不同颜色的米类中提取植物素和生物活性成分,植物素含量最高的是黑米,其次是红米和棕米;通过乳腺癌细胞试验表明,相比于红米和棕米来说,黑米米糠提取物对乳腺癌细胞MCF-7和MDA-MB-231的半抑制率浓度较低^[63],

可见它的抑制效果最好。

除米糠多糖以外, Kannan 等^[76]从米糠中提取出一种新型的五肽, 研究发现其对乳腺癌细胞(MCF-7, MDA-MB-231)、肝癌细胞(HepG-2)和结肠癌细胞(Caco-2, HCT-116)均具有抑制作用。Al-Fatlawi 等^[77]研究证实了植酸可通过调节凋亡调控基因的表达, 诱导凋亡和抑制 HepG2 细胞生长。且从米糠中提取的植酸能够降低大鼠得结肠癌的风险^[78]。此外, 米糠提取物禾本甾醇能够有效缓解白血病, 通过抑制白细胞肿瘤和诱导产生抗癌相关免疫细胞因子, 抑制 pSTAT3 信号调控肿瘤细胞的生长发育, 诱导细胞周期阻滞和凋亡; 禾本甾醇通过增加 pSTAT1 转录信号控制脾脏造血细胞的增殖和功能, 增加 IFN- γ 的产生, 预防白血病小鼠免疫功能失调; 结合 IFN- γ , 禾本甾醇有效地促进白血病小鼠的免疫调节, 从而改善急性骨髓性白血病的病情; 这些结果表明, 米糠中的禾本甾醇有助于白血病小鼠的免疫恢复并延长其生存期, 进而控制血癌的发展^[79]。

2.5 增强免疫

机体免疫调节主要通过四种方式实现: 激活巨噬细胞、NK 细胞和 T/B 淋巴细胞; 促进细胞因子生产; 促进抗体产生; 激活补体系统^[3]。米糠多糖参与免疫调节主要通过激活巨噬细胞和促进细胞因子的分泌两种方式来实现。通过热水浸提法和碱提法制备水溶性米糠多糖, 然后喂食小鼠, 发现正常小鼠脾淋巴细胞增殖能力提高, 同时明显增强正常小鼠腹腔巨噬细胞吞噬鸡红细胞的能力, 结果表明米糠多糖具有较强的调节正常小鼠免疫功能的作用^[80]。富含 γ -

谷维素的黑米米糠提取物能够上调 CD14 和 Toll 样受体 4 的表达, 促进固有细胞因子、白介素 8 和 CCL2 的分泌, 进而增强 AW264.7 巨噬细胞的吞噬活性, 最终达到提高机体固有免疫应答的作用^[81]。黑米糠与香菇液体发酵培养基中提取的生物处理多糖能够通过激活巨噬细胞的免疫应答而抑制细菌感染^[82]。这些结果表明米糠提取物的抗肿瘤作用与增强免疫调节分不开。

2.6 其他功效

米糠蜡常用作产品的凝胶剂、乳化剂和稳定剂, 但是经 Ishaka 等^[83]研究发现, 米糠蜡聚甘油醇经过纳米乳化后可通过对有高脂血症的大鼠调节肝脏过氧化物酶增殖物激活的受体 γ 来达到增强保护心脏的作用。米糠多酚的代表性物质阿魏酸对短暂性大脑中动脉闭塞(Middle cerebral artery occlusion, MCAo)大鼠可通过抑制超氧自由基、细胞间黏附分子-1(ICAM-1)和核转录因子(NF-kappaB)的表达来影响脑梗死面积和神经功能缺损评分, 减轻脑梗死的程度^[84]。如表 3 所示为米糠活性成分的主要生理功效, 通过不同的作用机制起到减轻氧化损伤, 抑制肿瘤, 改善肥胖, 缓解糖尿病和增强免疫的作用。

3 结论与展望

本文综述了米糠中多糖、蛋白和多酚等主要的活性成分以及它们产生的功效。我国作为米糠资源大国, 将米糠资源开发利用最大化, 深入研究其活性成分及功效, 增加米糠的附加价值, 将其变废为宝, 是我们一直探索前进的方向。米糠提取物在人体健康中发挥着重要作用, 既作为食品原料提供营养素, 又

表 3 米糠活性成分的主要功效

Table 3 The main effects of rice bran active ingredients

功效	活性成分	浓度	效果	作用机制	参考文献
减轻氧化损伤	米糠多糖金属配合物	0.05~4 mg/mL	抑制	清除超氧阴离子自由基	Pan等 ^[19]
	黑米糠发酵产物	1660.6 μ g/g	抑制	清除DPPH自由基	Shin等 ^[62]
	米糠多糖	31.75、62.5、125、250和500 μ g/mL	抑制	通过激活巨噬细胞诱导肿瘤细胞凋亡	Wang等 ^[85]
抑制肿瘤	米糠多糖	50、100和150 mg/kg	抑制	通过直接攻击肿瘤细胞, 清除氧自由基和抗脂质过氧化	Han等 ^[17]
	禾本甾醇	3和9 mg/kg	抑制	通过抑制pSTAT3信号通路控制肿瘤细胞的生长和增强pSTAT1转录信号来控制脾脏造血细胞的增殖和功能	Somintara等 ^[79]
	米糠	2%、4%和8% wt/wt	抑制	通过降低甘油二酯和甘油三酯的升高	Yang等 ^[67]
改善肥胖	米糠油	30 g/d	降低	通过测定前后低密度脂蛋白、高密度脂蛋白、总胆固醇和甘油三酯的值	Salar等 ^[68]
	γ -谷维素	4000、8000和11000 ppm	降低	通过降低低密度脂蛋白胆固醇的水平	Bumrungpert等 ^[69]
缓解糖尿病	米糠蛋白	100和500 mg/kg	减轻	通过改善血脂和尿蛋白/肌酐比值, 抑制促血管生成和前体蛋白表达	Boonlloh等 ^[72]
	米糠油	5%和7.5%米糠油补充剂	减轻	通过增强肝脏抗氧化防御机制, 降低氧化应激, 使胰腺、肾脏、心脏和肝脏的再生细胞恢复正常	Posuwan等 ^[73]
	米糠粗多糖	250 mg/(kg·day)	增强	提高细胞免疫和非特异性免疫	姜元荣等 ^[80]
增强免疫	γ -谷维素	10、50、100 μ g/mL	增强	通过促进天然细胞因子白介素-8和CCL2的分泌和吞噬细胞RAW264.7的吞噬	Shin等 ^[81]
	米糠多糖	10 mg/kg	增强	通过免疫细胞Th1免疫增强激活巨噬细胞介导的免疫应答	Kim等 ^[82]

影响着宿主的正常生理功能及疾病的发生发展。米糠作为一种丰富的物质能源,其不同的活性成分对宿主产生特殊的影响,但目前对宿主影响的作用机制尚需深入研究。目前,大量研究表明肠道菌群与宿主健康之间具有紧密联系,而米糠提取物对宿主肠道微生物的影响尚有待明确。因此,未来的研究方向及重点主要包括:a.米糠活性成分数据库的构建;b.不同活性成分的功能特性探究;c.功能因子的提取、纯化和鉴定等挖掘工作;d.具有特殊活性成分的功能因子的工程化构建;e.将不同米糠功能因子饮食干预下的不同疾病以及相关肠道微生物的多维组学数据结合起来,探究米糠膳食干预、肠道微生态和人体健康之间更为详尽的机制。这些将为米糠资源的深层次挖掘和高值化利用,为膳食营养和健康指导提供理论技术和数据支撑。

参考文献

- [1] 周显青,杨继红,张玉荣.国内外米糠资源利用现状与发展[J].粮食加工,2014,39(5):24-29. [ZHOU X Q, YANG J H, ZHANG Y R. Status and prospect of the utilization of rice bran resource at home and abroad[J]. Grain Processing, 2014, 39(5): 24-29.]
- [2] 肖信锦,李阳洋,钟盛华.米糠中油脂与蛋白提取技术研究进展[J].粮食与油脂,2016,29(3):1-4. [XIAO X J, LI Y Y, ZHONG S H. Advance research on extraction technology of oil and protein from rice bran[J]. Cereals & Oils, 2016, 29(3): 1-4.]
- [3] 许旭.米糠多糖的提取、免疫调节活性及其口含片制备工艺研究[D].武汉:武汉轻工大学,2014,1-67. [XU X. The extraction immunomodulatory activity testing and buccal tablet preparation of rice bran polysaccharide[D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2014, 1-67.]
- [4] 吕诗文.利用稻米副产物米糠联产米糠油、米糠蛋白和4-乙烯基愈创木酚[D].大连:大连理工大学,2018,1-66. [LÜ S W. Co-production of rice bran oil, rice bran protein and 4-vinylguaiacol from rice bran (rice by-product)[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018, 1-66.]
- [5] TOGASHI Y, INOMATA N, SUZUKI A, et al. Pediatric case with rice bran allergy induced by epicutaneous sensitization in a family rice shop[J]. Allergology International:Official Journal of the Japanese Society of Allergology, 2019, 68(1): 117-118.
- [6] SHEN J, YANG T, XU Y, et al. delta-tocotrienol, isolated from rice bran, exerts an anti-inflammatory effect via MAPKs and PPARs signaling pathways in lipopolysaccharide-stimulated macrophages[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2018, 19(10): 3022.
- [7] DENARDI-SOUZA T, LUZ C, MANES J, et al. Antifungal effect of phenolic extract of fermented rice bran with *Rhizopus oryzae* and its potential use in loaf bread shelf life extension[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2018, 98(13): 5011-5018.
- [8] SHARIF M K, BUTT M S, ANJUM F M, et al. Rice bran: A novel functional ingredient[J]. Crit Rev Food Sci Nutr, 2014, 54(6): 807-816.
- [9] ISLAM M S, NAGASAKA R, OHARA K, et al. Biological abilities of rice bran-derived antioxidant phytochemicals for medical therapy[J]. Current Topics in Medicinal Chemistry, 2011, 11(14): 1847-1853.
- [10] LAKKAKULA N R, LIMA M, WALKER T. Rice bran stabilization and rice bran oil extraction using ohmic heating[J]. Biore-source Technology, 2004, 92(2): 157-161.
- [11] 严薇,邓丽莎,王燕,等.基于红外辐射处理的米糠多糖组分、提取率及抗氧化活性的影响[J].食品科学,2020,41(15): 158-163. [YAN W, DENG L S, WANG Y, et al. Effect of infrared radiation on composition, extraction yield and antioxidant properties of polysaccharides from rice bran[J]. Food Science, 2020, 41(15): 158-163.]
- [12] 王仲礼.国外对米糠深加工产品的开发应用[J].中国稻米,2005(3):49-51. [WANG Z L. Development and utilization of deep processing products of rice bran in abroad[J]. China Rice, 2005(3): 49-51.]
- [13] 赵倩,熊善柏,邵小龙,等.米糠多糖的提取及其性质和结构[J].中国粮油学报,2008(3):4-7. [ZHAO Q, XIONG S B, SHAO X L, et al. Extraction, properties and structure of polysaccharide from rice bran[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2008(3): 4-7.]
- [14] 鄢宏浩,蔡乔宇,陈轩,等.米糠多糖的提取纯化及生理功能活性研究进展[J].食品科技,2020,45(10):197-201. [YAN H H, CAI Q Y, CHEN X, et al. Research progress in extraction, purification and physiological function activity of rice bran polysaccharide[J]. Food Science and Technology, 2020, 45(10): 197-201.]
- [15] 喻远东,廖卢艳.米糠整体利用研究进展[J].河北农业科学,2019,23(4):69-76. [YU Y D, LIAO L Y. Advances in comprehensive utilization of rice bran[J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2019, 23(4): 69-76.]
- [16] 胡国华,马正智,吴彬.米糠多糖的保健功能;第三届全国粳稻米产业大会,中国吉林长春,2008[C]. [HU G H, MA Z Z, WU B. Health care function of rice bran polysaccharide; The 3rd national japonica rice industry conference, Changchun, Jilin, China, 2008[C].]
- [17] HAN W, LI J, DING Y, et al. Structural features, antitumor and antioxidant activities of rice bran polysaccharides using different extraction methods[J]. J Food Sci, 2017, 82(10): 2403-2410.
- [18] 刘梁,孙维矿,赵玲,等.米糠多糖的免疫增强作用[J].食品研究与开发,2014,35(22):24-28. [LIU L, SUN W K, ZHAO L, et al. The effect of immune enhancement of rice bran polysaccharide[J]. Food Research and Development, 2014, 35(22): 24-28.]
- [19] PAN X, WU S, YAN Y, et al. Rice bran polysaccharide-metal complexes showed safe antioxidant activity in vitro[J]. Int J Biol Macromol, 2019, 126: 934-940.
- [20] DE MENEZES E W, GIUNTINI E B, DAN M C, et al. Codex dietary fibre definition-Justification for inclusion of carbohydrates from 3 to 9 degrees of polymerisation[J]. Food Chem, 2013, 140(3): 581-585.
- [21] 丁晓萌,侯坤友,胡晓祎,等.脱脂米糠可溶性膳食纤维对小肠葡萄糖吸收和转运的影响及其作用机制[J].食品科学,2020,41(1):183-189. [DING X M, HOU K Y, HU X Y, et al. Ef-

- fect of soluble dietary fiber from defatted rice bran on glucose absorption and transport in small intestine and its mechanism of action[J]. *Food Science*, 2020, 41(1): 183-189.]
- [22] CHOI Y S, KIM H W, HWANG K E, et al. Effects of fat levels and rice bran fiber on the chemical, textural, and sensory properties of frankfurters[J]. *Food Science and Biotechnology*, 2015, 24(2): 489-495.
- [23] PHIMOLSIRIPOL Y, MUKPRASIRT A, SCHOENLECHNER R. Quality improvement of rice-based gluten-free bread using different dietary fibre fractions of rice bran[J]. *Journal of Cereal Science*, 2012, 56(2): 389-395.
- [24] 徐田辉, 苏玉, 黄亮, 等. 蒸汽爆破-超微粉碎米糠膳食纤维对2型糖尿病小鼠的降血糖作用[J]. *中国粮油学报*, 2020, 35(10): 9-15. [XU T H, SU Y, HUANG L, et al. Hypoglycemic effect of steam explosion-superfine pulverization rice bran dietary fiber on type 2 diabetic mice[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2020, 35(10): 9-15.]
- [25] 黄萍, 林亲录, 朱凤霞, 等. 米糠水溶性膳食纤维理化特性及抗氧化性[J]. *食品科学*, 2017, 38(23): 14-19. [HUANG P, LIN Q L, ZHU F X, et al. Physicochemical properties and antioxidant activity of water-soluble dietary fiber from rice bran[J]. *Food Science*, 2017, 38(23): 14-19.]
- [26] LIU B, LIN Q, YANG T, et al. Oat beta-glucan ameliorates dextran sulfate sodium (DSS)-induced ulcerative colitis in mice[J]. *Food Funct*, 2015, 6(11): 3454-3463.
- [27] 曹龙奎, 康丽君, 寇芳, 等. 改性前后小米糠膳食纤维结构分析及体外抑制 α -葡萄糖苷酶活性[J]. *食品科学*, 2018, 39(11): 46-52. [CAO L K, KANG L J, KOU F, et al. Structural analysis and *in vitro* inhibitory effect on α -glucosidase activity of millet bran dietary fiber before and after modification[J]. *Food Science*, 2018, 39(11): 46-52.]
- [28] STREPPPEL M T, OCKE M C, BOSHUIZEN H C, et al. Dietary fiber intake in relation to coronary heart disease and all-cause mortality over 40 y: The Zutphen study[J]. *Am J Clin Nutr*, 2008, 88(4): 1119-1125.
- [29] PARK Y, BRINTON L A, SUBAR A F, et al. Dietary fiber intake and risk of breast cancer in postmenopausal women: The National Institutes of health-AARP diet and health study[J]. *Am J Clin Nutr*, 2009, 90(3): 664-671.
- [30] TUCKER L A, THOMAS K S. Increasing total fiber intake reduces risk of weight and fat gains in women[J]. *J Nutr*, 2009, 139(3): 576-581.
- [31] BELALCAZAR L M, ANDERSON A M, LANG W, et al. Fiber intake and plasminogen activator inhibitor-1 in type 2 diabetes: Look AHEAD (Action for Health in Diabetes) trial findings at baseline and year 1[J]. *Journal of the Academy of Nutrition and Dietetics*, 2014, 114(11): 1800-1810, e1802.
- [32] MASANORI WATANABE C Y, ISAMU MAEDA, CHARINTECHAPUN, et al. Evaluating of quality of rice bran protein concentrate prepared by a combination of isoelectronic precipitation and electrolyzed water treatment[J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2019, 99: 262-267.
- [33] HAN S W, CHEE K M, CHO S J. Nutritional quality of rice bran protein in comparison to animal and vegetable protein[J]. *Food Chem*, 2015, 172: 766-769.
- [34] PRAKASH J, RAMANATHAM G. Effect of stabilisation treatment of rice bran on nutritional quality of protein concentrates[J]. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 1995, 46(2): 177-184.
- [35] HAMADA J S. Characterization and functional properties of rice bran proteins modified by commercial exoproteases and endoproteases[J]. *J Food Sci*, 2000, 65(2): 305-310.
- [36] WANG T, ZHANG H, WANG L, et al. Mechanistic insights into solubilization of rice protein isolates by freeze-milling combined with alkali pretreatment[J]. *Food Chem*, 2015, 178: 82-88.
- [37] 康艳玲, 王章存. 米糠蛋白研究现状[J]. *粮食与油脂*, 2006, 3: 22-24. [KANG Y L, WANG Z C. Research status of rice bran protein[J]. *Cereals & Oils*, 2006, 3: 22-24.]
- [38] 于雷, 张薇, 乔筱童, 等. 超声波辅助双酶法与碱法提取米糠蛋白功能特性的比较研究[J]. *食品科技*, 2014, 39(11): 256-261. [YU L, ZHANG W, QIAO X T, et al. Comparing research on functionality of rice bran protein extracted by alkali and ultrasonic-assisted dual-enzyme[J]. *Food Science and Technology*, 2014, 39(11): 256-261.]
- [39] 吕飞, 许宙, 程云辉. 米糠蛋白提取及其应用研究进展[J]. *食品与机械*, 2014, 30(3): 234-238. [LÜ F, XU Z, CHENG Y H. Progress on extraction and application of rice bran protein[J]. *Food & Machinery*, 2014, 30(3): 234-238.]
- [40] 张薇. 超声波辅助双酶法提取米糠蛋白及其应用的研究[D]. 吉林: 吉林农业大学, 2014, 1-60. [ZHANG W. Extraction and application of rice bran protein by ultrasonic-assisted dual-enzymatic[D]. Jilin: Jilin Agricultural University, 2014: 1-60.]
- [41] 侯晓丽, 孙铭学, 高焕煊, 等. 抗炎天然产物活性成分研究进展[J]. *药学实践杂志*, 2015, 33(1): 20-27. [HOU X L, SUN M X, GAO H H, et al. Progress on anti-inflammatory natural products[J]. *Journal of Pharmaceutical Practice*, 2015, 33(1): 20-27.]
- [42] IBITOYE O B, AJIBOYE T O. Ferulic acid potentiates the antibacterial activity of quinolone-based antibiotics against *Acinetobacter baumannii*[J]. *Microb Pathog*, 2019, 126: 393-398.
- [43] CHEN H, NIU H, ZHANG H, et al. Preparation and properties of ferulic acid-sugar beet pulp pectin ester and its application as a physical and antioxidative stabilizer in a fish oil-water emulsion[J]. *Int J Biol Macromol*, 2019, 139: 290-297.
- [44] MASUDA T, MIZUGUCHI S, TANAKA T, et al. Isolation and structure determination of new antioxidative ferulic acid glucoside esters from the rhizome of alpinia speciosa, a zingiberaceae plant used in okinawan food culture[J]. *J Agric Food Chem*, 2000, 48(5): 1479-1484.
- [45] OU J, SUN Z. Feruloylated oligosaccharides: Structure, metabolism and function[J]. *Journal of Functional Foods*, 2014, 7: 90-100.
- [46] SARAVANAN SUBRAMANI G N, GATTAMANENI LAKSHMI NARAYANA RAO. High free fatty acid crude rice bran oil-A renewable feedstock for sustainable energy and environment[J]. *Clean Soil Air Water*, 2008, 36(11): 835-839.
- [47] LIU Y Q, STRAPPE P, SHANG W T, et al. Functional pep-

- tides derived from rice bran proteins[J]. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 2019, 59(2): 349–356.
- [48] PHONGTHAI S, D'AMICO S, SCHOENLECHNER R, et al. Fractionation and antioxidant properties of rice bran protein hydrolysates stimulated by *in vitro* gastrointestinal digestion[J]. *Food Chem*, 2018, 240: 156–164.
- [49] OGAWA Y, SHOBAKO N, FUKUHARA I, et al. Rice bran supplement containing a functional substance, the novel peptide Leu-Arg-Ala, has anti-hypertensive effects: A double-blind, randomized, placebo-controlled study[J]. *Nutrients*, 2019, 11(4): 726.
- [50] TANIGUCHI M, SAITO K, AIDA R, et al. Wound healing activity and mechanism of action of antimicrobial and lipopolysaccharide-neutralizing peptides from enzymatic hydrolysates of rice bran proteins[J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2019, 128(2): 142–148.
- [51] SAMUCHAYA NGAMSUK, JUE-LIANG HSU, TZOU-CHI HUANG, et al. Ultrasonication of milky stage rice milk with bioactive peptides from rice bran: Its bioactivities and absorption[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2020, 13(7): 462–474.
- [52] 徐浩. 米糠资源研究与应用 [D]. 安徽: 安徽农业大学, 2015, 1–64. [XU H. The research and application of rice bran[D]. Anhui: Anhui Agricultural University, 2015, 1–64.]
- [53] CARLA BEATRIZ DE SOUZA, GIUSEPPINA PACE PEREIRA LIMA, CRISTINE VANZ BORGES, et al. Development of a functional rice bran cookie rich in γ -oryzanol[J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2019, 13(2): 1070–1077.
- [54] 武家琪, 肇立春, 张俊杰, et al. 提高米糠油中谷维素含量的脱酸工艺研究[J]. *中国油脂*, 2020, 45(5): 27–31. [WU J Q, ZHAO L C, ZHANG J J, et al. Deacidification process to increase oryzanol content in rice bran oil[J]. *China Oils and Fats*, 2020, 45(5): 27–31.]
- [55] MINATEL I O, FRANCISQUETI F V, CORREA C R, et al. Antioxidant activity of gamma-oryzanol: A complex network of interactions[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2016, 17(8): 1107.
- [56] SON M J, RICO C W, NAM S H, et al. Effect of oryzanol and ferulic acid on the glucose metabolism of mice fed with a high-fat diet[J]. *J Food Sci*, 2011, 76(1): H7–H10.
- [57] 钟金锋, 覃小丽, 刘雄. 凝胶油及其在食品工业中的应用研究进展[J]. *食品科学*, 2015, 36(3): 272–279. [ZHAONG J F, QIN X L, LIU X. Advances in oleogels and their applications in food industry[J]. *Food Science*, 2015, 36(3): 272–279.]
- [58] HUANG Z, GUO B, DENG C, et al. Stabilization of peanut butter by rice bran wax[J]. *J Food Sci*, 2020, 85(6): 1793–1798.
- [59] 刘怡真, 马传国, 李婕妤. 不同凝胶剂对芝麻酱稳定性的影响[J]. *食品科学*, 2019, 40(12): 70–77. [LIU Y Z, MA C G, LI J Y. Effect of different organogelators on the stability of sesame paste[J]. *Food Science*, 2019, 40(12): 70–77.]
- [60] ZHAO M, LAN Y, CUI L, et al. Formation, characterization, and potential food application of rice bran wax oleogels: Expeller-pressed corn germ oil versus refined corn oil[J]. *Food Chem*, 2020, 309: 125704.
- [61] SAWANYA PANDOLSOOK, KUPONGSAK S. Potential use of policosanol extract from Thai bleached rice bran wax as an organogelator[J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2020, 14: 2078–2086.
- [62] SHIN H Y, KIM S M, LEE J H, et al. Solid-state fermentation of black rice bran with *Aspergillus awamori* and *Aspergillus oryzae*: Effects on phenolic acid composition and antioxidant activity of bran extracts[J]. *Food Chem*, 2019, 272: 235–241.
- [63] 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.
- [64] SAJI N, FRANCIS N, BLANCHARD C L, et al. Rice bran phenolic compounds regulate genes associated with antioxidant and anti-inflammatory activity in human umbilical vein endothelial cells with induced oxidative stress[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2019, 20(19): 4715.
- [65] NORHAIZAN M E, NG S K, NORASHAREENA M S, et al. Antioxidant and cytotoxicity effect of rice bran phytic acid as an anticancer agent on ovarian, breast and liver cancer cell lines[J]. *Malays J Nutr*, 2011, 17(3): 367–375.
- [66] KELLY T, YANG W, CHEN C S, et al. Global burden of obesity in 2005 and projections to 2030[J]. *Int J Obes (Lond)*, 2008, 32(9): 1431–1437.
- [67] YANG S C, HUANG W C, NG X E, et al. Rice bran reduces weight gain and modulates lipid metabolism in rats with high-energy-diet-induced obesity[J]. *Nutrients*, 2019, 11(9): 2033.
- [68] SALAR A, FAGHIH S, PISHDAD G R. Rice bran oil and canola oil improve blood lipids compared to sunflower oil in women with type 2 diabetes: A randomized, single-blind, controlled trial[J]. *J Clin Lipidol*, 2016, 10(2): 299–305.
- [69] BUMRUNGPET A, CHONGSUWAT R, PHOSAT C, et al. Rice bran oil containing gamma-oryzanol improves lipid profiles and antioxidant status in hyperlipidemic subjects: A randomized double-blind controlled trial[J]. *Journal of Alternative and Complementary Medicine*, 2019, 25(3): 353–358.
- [70] NIE Y, LUO F, WANG L, et al. Anti-hyperlipidemic effect of rice bran polysaccharide and its potential mechanism in high-fat diet mice[J]. *Food Funct*, 2017, 8(11): 4028–4041.
- [71] LIU Q, ZHAO J, LIU S, et al. Positive intervention of insoluble dietary fiber from defatted rice bran on hyperlipidemia in high fat diet fed rats[J]. *J Food Sci*, 2021, 86: 3964–3974.
- [72] BOONLOH K, LEE E S, KIM H M, et al. Rice bran protein hydrolysates attenuate diabetic nephropathy in diabetic animal model[J]. *Eur J Nutr*, 2018, 57(2): 761–772.
- [73] POSUWAN J, PRANGTHIP P, LEARDKAMOLKARN V, et al. Long-term supplementation of high pigmented rice bran oil (*Oryza sativa* L.) on amelioration of oxidative stress and histological changes in streptozotocin-induced diabetic rats fed a high fat diet; Riceberry bran oil[J]. *Food Chem*, 2013, 138(1): 501–508.
- [74] SIDDIQUI S, RASHID KHAN M, SIDDIQUI W A. Comparative hypoglycemic and nephroprotective effects of tocotrienol rich fraction (TRF) from palm oil and rice bran oil against hyperglycemia induced nephropathy in type 1 diabetic rats[J]. *Chemico-bio-*

logical Interactions, 2010, 188(3): 651–658.

[75] KIM S M, RICO C W, LEE S C, et al. Modulatory effect of rice bran and phytic acid on glucose metabolism in high fat-fed C57BL/6N mice[J]. *J Clin Biochem Nutr*, 2010, 47(1): 12–17.

[76] KANNAN A, HETTIARACHCHY N S, LAY J O, et al. Human cancer cell proliferation inhibition by a pentapeptide isolated and characterized from rice bran[J]. *Peptides*, 2010, 31(9): 1629–1634.

[77] AL-FATLAWI A A, AL-FATLAWI A A, IRSHAD M, et al. Rice bran phytic acid induced apoptosis through regulation of Bcl-2/Bax and p53 genes in HepG2 human hepatocellular carcinoma cells[J]. *Asian Pac J Cancer Prev*, 2014, 15(8): 3731–3736.

[78] SAAD N, ESA N M, ITHNIN H. Suppression of beta-catenin and cyclooxygenase-2 expression and cell proliferation in azoxymethane-induced colonic cancer in rats by rice bran phytic acid (PA)[J]. *Asian Pac J Cancer Prev*, 2013, 14(5): 3093–3099.

[79] SOMINTARA S, LEARDKAMOLKARN V, SUTTIARPORN P, et al. Anti-tumor and immune enhancing activities of rice bran gramisterol on acute myelogenous leukemia[J]. *PLoS One*, 2016, 11(1): e0146869.

[80] 姜元荣, 姚惠源, 陈正行. 米糠粗多糖对小鼠免疫调节功能影响研究[J]. *粮食与油脂*, 2004(5): 20–23. [JIANG Y R, YAO H Y, CHEN Z X. Investigation on immunomodulating activities of

rice bran polysaccharides in mice[J]. *Cereals & Oils*, 2004(5): 20–23.]

[81] SHIN S Y, KIM H W, JANG H H, et al. Gamma-oryzanol-rich black rice bran extract enhances the innate immune response[J]. *Journal of Medicinal Food*, 2017, 20(9): 855–863.

[82] KIM S P, PARK S O, LEE S J, et al. A Polysaccharide isolated from the liquid culture of *Lentinus edodes* (Shiitake) mushroom mycelia containing black rice bran protects mice against salmonellosis through upregulation of the Th1 immune reaction[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2014, 62(11): 2384–2391.

[83] ISHAKA A, IMAM M U, ISMAIL M. Nanoemulsification of rice bran wax policosanol enhances its cardio-protective effects via modulation of hepatic peroxisome proliferator-activated receptor gamma in hyperlipidemic rats[J]. *J Oleo Sci*, 2020, 69(10): 1287–1295.

[84] CHENG C Y, HO T Y, LEE E J, et al. Ferulic acid reduces cerebral infarct through its antioxidative and anti-inflammatory effects following transient focal cerebral ischemia in rats[J]. *Am J Chin Med*, 2008, 36(6): 1105–1119.

[85] WANG L, LI Y, ZHU L, et al. Antitumor activities and immunomodulatory of rice bran polysaccharides and its sulfates *in vitro*[J]. *Int J Biol Macromol*, 2016, 88: 424–432.