

糙米的健康效应：抗氧化、降血糖与肠道健康作用机制及研究进展

邓一鸣¹, 农冬鹏², 张玉琦¹, 周慧玲¹, 蒋璐霞¹, 骆余嘉¹, 覃春桥¹, 周立红^{1*}

¹广西中医药大学公共卫生与管理学院预防医学系营养与食品卫生学教研室, 广西 南宁

²广西桂鼎农业发展有限公司, 广西 南宁

收稿日期: 2026年4月22日; 录用日期: 2026年6月3日; 发布日期: 2026年7月6日

摘要

糙米作为保留皮层、糊粉层与胚芽的全谷物, 富含膳食纤维、 γ -氨基丁酸、 γ -谷维素、酚类、植物甾醇等多种生物活性成分, 在营养与健康领域备受关注。本文系统梳理糙米的营养组成与特征活性物质, 重点综述其抗氧化、调节血糖、调控血脂、维护肠道健康四大核心健康效应, 阐明膳食纤维延缓糖吸收、活性成分改善胰岛素抵抗、抗氧化物质减轻氧化应激、益生元作用调节肠道菌群等关键机制, 并总结发芽、发酵等加工方式对糙米健康功效的提升作用, 同时指出当前研究在剂量效应、长期安全性、个体化干预等方面的不足。研究表明, 糙米可通过多成分协同作用降低代谢性疾病风险, 是防控肥胖、糖尿病、血脂异常的理想膳食资源。未来应深化作用机制研究, 优化加工技术, 推动糙米在功能食品与公共卫生营养干预中的产业化应用, 为全谷物健康膳食提供科学依据。

关键词

糙米, 全谷物, 健康效应, 抗氧化, 降血糖, 降血脂, 肠道健康, 生物活性成分

The Health Effects of Brown Rice: Mechanisms and Research Progress of Antioxidant, Hypoglycemic, and Intestinal Health Effects

Yiming Deng¹, Dongpeng Nong², Yuqi Zhang¹, Huiling Zhou¹, Luxia Jiang¹, Yujia Luo¹, Chunqiao Qin¹, Lihong Zhou^{1*}

¹Department of Nutrition and Food Hygiene, School of Public Health and Management, Guangxi University of Chinese Medicine, Nanning Guangxi

*通讯作者。

文章引用: 邓一鸣, 农冬鹏, 张玉琦, 周慧玲, 蒋璐霞, 骆余嘉, 覃春桥, 周立红. 糙米的健康效应: 抗氧化、降血糖与肠道健康作用机制及研究进展[J]. 食品与营养科学, 2026, 15(4): 339-353. DOI: 10.12677/hjfn.2026.154039

Abstract

As a whole grain that retains the cortex, aleurone layer, and germ, brown rice is rich in dietary fiber, γ -aminobutyric acid, γ -oryzanol, phenols, phytosterols, and other bioactive components, and has garnered significant attention in the field of nutrition and health. This article systematically reviews the nutritional composition and characteristic bioactive substances of brown rice, focusing on its four core health effects: antioxidation, blood glucose regulation, lipid regulation, and intestinal health maintenance. It elucidates the key mechanisms by which dietary fiber delays glucose absorption, bioactive components improve insulin resistance, antioxidant substances alleviate oxidative stress, and prebiotic effects regulate intestinal flora. Additionally, it summarizes the enhancement of brown rice's health benefits through processing methods such as germination and fermentation, while pointing out the current research gaps in terms of dose-response, long-term safety, and individualized intervention. Research indicates that brown rice can reduce the risk of metabolic diseases through the synergistic effects of multiple components, making it an ideal dietary resource for the prevention and control of obesity, diabetes, and dyslipidemia. In the future, efforts should be made to deepen the study of action mechanisms, optimize processing technologies, and promote the industrial application of brown rice in functional foods and public health nutrition interventions, providing scientific evidence for whole grain healthy diets.

Keywords

Brown Rice, Whole Grains, Health Effects, Antioxidation, Hypoglycemic, Hypolipidemic, Intestinal Health, Bioactive Components

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言：糙米的营养特性与健康价值

糙米作为稻谷脱壳后保留完整皮层、糊粉层、胚芽和胚乳的全谷物，与经过精细加工去除外层组织的精白米相比，在营养成分和健康价值方面存在显著差异。糙米由 5%~7%的糠层、66%~72%的胚乳和 2%~3.5%的胚组成，其中大部分蛋白质、脂肪、纤维素、矿物质和维生素都集中在米糠层和胚芽中，而胚乳部分则主要由淀粉构成[1]。在营养成分含量方面，每 100 克糙米含 3.5 克膳食纤维，是精白米的 6 倍；B 族维生素特别是维生素 B₁ 含量是精白米的 3 倍；矿物质如镁含量是精白米的 3 倍。更为重要的是，糙米富含多种生物活性成分，包括 γ -谷维素(约 11.6 毫克/100 克)、 γ -氨基丁酸(γ -aminobutyric acid, GABA)、生育三烯酚、谷维素、谷胱甘肽(glutathione, GSH)、米糠多糖、二十八烷醇、肌醇等功能因子[1]。这些生物活性成分赋予了糙米独特的健康促进功能。

然而，在现代食品加工过程中，从糙米到精白米的加工造成了大量营养成分的损失。研究表明，完全碾磨和抛光将糙米转化为白米的过程中，会破坏 67%的维生素 B₃、80%的维生素 B₁、90%的维生素 B₆、一半的锰、一半的磷、60%的铁，以及全部的膳食纤维和必需脂肪酸[2]。这一营养损失的现实凸显了糙

米作为健康主食选择的重要价值。近年来,随着对全谷物健康效应认识的不断深入,糙米的营养价值和保健功能受到了广泛关注。大量研究表明,糙米在抗氧化、降血糖、调节肠道健康等方面具有显著的生理活性,其健康效应主要归因于其中富含的膳食纤维、 γ -谷维素、GABA、生育三烯酚、酚类化合物等生物活性成分的协同作用[1]。

本综述系统分析糙米在抗氧化、降血糖、肠道健康等方面的具体作用机制,重点阐述相关生物活性成分的功能特性,并结合动物实验和人体临床试验的最新研究数据,全面评估糙米的健康效应。同时,还将梳理当前研究的主要成果与存在的争议,为糙米在功能性食品开发和健康饮食指导中的应用提供科学依据。

2. 糙米的主要生物活性成分及其分布特征

2.1. 核心生物活性成分概述

糙米中富含多种具有重要生理功能的生物活性成分,主要分布在米糠层和胚芽中。 γ -谷维素是最重要的生物活性成分之一,它是由阿魏酸与植物甾醇(如环阿屯醇、24-亚甲基环阿屯醇、菜油甾醇、谷甾醇)酯化形成的混合物,具有抗氧化、抗炎、降血脂、降血糖等多种生理功能[3]。GABA是另一种重要的生物活性成分,它是一种非蛋白质氨基酸,在发芽糙米中的含量显著升高,可达糙米的3倍、精米的10倍[4]。GABA具有调节神经系统、降血压、改善胰岛素敏感性等作用。生育三烯酚是维生素E的一种形式,在糙米中的含量远高于精米,具有强大的抗氧化活性,其抗氧化效果是普通维生素E的数十倍[5]。糙米中的酚类化合物主要包括阿魏酸、对香豆酸、咖啡酸、芦丁、槲皮素等,这些化合物通过提供氢原子或电子与自由基发生反应,从而有效清除自由基,抑制氧化反应的进行[6]。此外,糙米还含有植物甾醇、角鲨烯、神经酰胺、高级脂肪醇(如1-二十八烷醇)等多种生物活性物质,它们虽然含量相对较少,但同样具有重要的生理功能。

2.2. 各成分在糙米不同部位的含量分布

糙米各部位的营养成分分布呈现出明显的不均衡性,这种分布特征直接影响了糙米的营养价值和健康效应。根据研究数据,糙米皮层不同部位的成分含量存在显著差异(表1)。

Table 1. The component content of different parts of brown rice cortex

表 1. 糙米皮层不同部位的成分含量

成分	果皮(%)	种皮(%)	糊粉层(%)	亚糊粉层(%)
蛋白质	15.09	15.43	15.54	15.84
脂肪	21.32	20.30	16.02	12.98
膳食纤维	30.91	21.93	13.92	7.73
植酸	7.44	7.59	7.98	4.65
淀粉	9.69	25.85	41.41	50.69

从上述数据可以看出,膳食纤维和植酸主要集中在果皮和种皮中,其中果皮的膳食纤维含量高达30.91%,是糙米中膳食纤维最丰富的部位。脂肪含量在果皮中最高(21.32%),随着向内部层次的推进而逐渐降低。蛋白质含量在各皮层部位相对稳定,而淀粉含量则随着向胚乳方向的推进而显著增加。米糠层和胚芽集中了糙米中70%以上的维生素和矿物质[1]。米糠中 γ -谷维素含量高达3296.5 mg/kg,是糙米的8倍、精米的126倍[3]。维生素E主要以 γ -生育三烯酚和 α -生育酚的形式存在,在米糠中的总含量可达0.44 mg/g。

2.3. 精米加工过程中的营养成分损失

从糙米到精白米的加工过程造成大量营养成分损失, 损失程度因营养成分的不同而有所差异。在维生素方面, 完全碾磨和抛光过程会导致 67% 的维生素 B₃、80% 的维生素 B₁、90% 的维生素 B₆ 被破坏[2]。在矿物质方面, 加工过程造成一半的锰、一半的磷、60% 的铁流失[2]。更为严重的是, 深加工过程会导致几乎全部的膳食纤维和必需脂肪酸损失[7]。糙米的钙含量约为精米的 1.7 倍, 铁含量约为 2.75 倍, 烟酸含量约为 3.2 倍, 维生素 E 含量约为 10 倍, 而膳食纤维更是高达精米的 14 倍[8]。每 100 克糙米中维生素 B₁ 含量为 0.26 毫克, 而精细化加工后的一级白米只有 0.084 毫克; 糙米的总膳食纤维含量为 3.29 克, 而精米只有 0.3 克[8]。加工精度对营养成分损失的影响呈现出阶段性特征。研究表明, 在碾磨过程中, 由糙米至碾磨 1 (糙出白率在 92%~94%) 时, 蛋白质含量下降显著, 之后蛋白质含量无明显变化[2]。当碾减率为 4% 时, 糙米中蛋白质、维生素 B₁、赖氨酸等营养物质含量的保留率分别达到 88.58%、80.03%、62.07% [9]。

3. 糙米的抗氧化机制与效应

3.1. γ -谷维素的抗氧化机制

γ -谷维素是糙米中最重要的脂溶性抗氧化物质, 其抗氧化机制主要基于其独特的分子结构。 γ -谷维素具有氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)样活性, 能够抑制超氧自由基催化的邻苯三酚自氧化反应[10]。从结构-活性关系来看, γ -谷维素的 4-羟基基团负责氢原子转移反应, 该羟基基团通过将其氢原子转移给自由基形成苯氧自由基, 从而贡献自由基清除特性[11]。 γ -谷维素的 α,β -不饱和羰基部分赋予其亲电性特征, 该羰基基团能够将电子离域到氧原子和烯烃上, 在烯烃碳原子上诱导部分正电荷, 从而为该碳原子提供亲电性以吸引电子和核亲核试剂, 特别是 Kelch 样 ECH 相关蛋白 1 的半胱氨酸残基, 导致核因子 E2 相关因子 2 (nuclear factor erythroid 2-related factor 2, Nrf2) 核转位, 进而激活 Nrf2-抗氧化反应元件通路[10]。在细胞和动物模型研究中, γ -谷维素表现出显著的抗氧化效果。研究表明, γ -谷维素能显著提升细胞和动物模型中的总抗氧化能力, 增强 GSH、SOD 等抗氧化酶活性, 同时降低丙二醛 (malondialdehyde, MDA) 等脂质过氧化产物[12]。连续 12 周食用糙米的人群, 肝脏抗氧化酶活性提高 27%, 谷维素能够清除导致肝细胞损伤的自由基, 保护肝细胞膜完整性[13]。 γ -谷维素作为糙米特有的营养成分, 能够增强胰岛素分泌, 抑制胰高血糖素过度分泌, 对糖尿病有益, 改善高脂饮食导致的肥胖和脂毒性相关的胰岛功能障碍, 并通过减少下丘脑内质网应激来减轻动物脂肪过度消耗[14]。

3.2. 生育三烯酚的脂溶性抗氧化特性

生育三烯酚是糙米中另一类重要的脂溶性抗氧化物质, 属于维生素 E 家族, 糙米中生育三烯酚含量是精米的 10 倍以上[15]。 γ -生育三烯酚是糙米中含量最高的维生素 E 形式, 其次为 α -生育酚、 α -生育三烯酚和 γ -生育酚。生育三烯酚的抗氧化机制具有双重特性: 一方面直接作为还原剂捕获活性氧, 另一方面激活 Nrf2 通路, 上调 SOD 和谷胱甘肽过氧化物酶活性达 2~3 倍[16]。这种双重机制使得生育三烯酚具有比普通维生素 E 更强的抗氧化活性, 其抗氧化效果是普通维生素 E 的 40~60 倍, 可有效保护细胞膜免受氧化损伤[17]。在发芽过程中, 糙米中维生素 E 的组成和含量会发生变化。研究发现, γ -生育三烯酚的含量在发芽过程中会显著增加, 而 α -生育酚的含量在发芽过程中会增加, 但 γ -生育酚的含量在发芽过程中会减少。这种变化可能与发芽过程中酶活性的改变和代谢途径的调整有关。

3.3. 酚类化合物的抗氧化作用

糙米中的酚类化合物是重要的水溶性抗氧化物质, 主要包括阿魏酸、对香豆酸、咖啡酸、芦丁、槲

皮素等[18]。这些酚类化合物通过提供氢原子或电子与自由基发生反应,从而有效清除自由基,抑制氧化反应的进行[18]。阿魏酸是糙米中含量最丰富的酚酸类化合物,在糙米、精米和发芽糙米中含量最高[19]。阿魏酸具有强大的共振稳定性,其酚环结构使其能够更容易地接受自由基的电子,因此是自由基的直接清除剂[20]。由于其酚核和延伸的侧链共轭结构,阿魏酸容易形成共振稳定的苯氧自由基,这是其强效抗氧化潜力的基础[21]。研究表明,在五种酚酸的超氧阴离子清除能力比较中,从强到弱的顺序为咖啡酸、阿魏酸、对羟基香豆酸、邻羟基香豆酸和间羟基香豆酸[22]。这一结果表明,酚酸类化合物的抗氧化活性与其分子结构中羟基的位置和数量密切相关。糙米中的酚类化合物还具有协同抗氧化效应。研究发现,发芽糙米中19种酚酸和30种黄酮类化合物在中等强度电场处理下显著上调,其中13种酚酸(如阿魏酸、对香豆酸)和18种黄酮类化合物(如芦丁、儿茶素)的含量明显增加[23]。这种协同作用可能是由于不同酚类化合物之间的相互作用,增强了整体的抗氧化效果。

3.4. 抗氧化成分的协同效应

糙米中多种抗氧化成分之间存在显著的协同效应,这种协同作用大大增强了糙米的整体抗氧化能力。研究表明,糙米提取物的抗氧化能力源于维生素E(生育三烯酚含量是精米的10倍以上)、阿魏酸(谷维素主要成分)和硒元素的协同作用[17]。在体外抗氧化活性评价中,糙米及其制品表现出较强的抗氧化能力。研究显示,糙米米线的总酚含量为 64.05 ± 0.86 mg/100g,糙米速食粥为 63.95 ± 2.02 mg/100g,糙米饭为 50.70 ± 0.02 mg/100g,均显著高于白米饭的 20.27 ± 0.46 mg/100g [24]。在1,1-二苯基-2-三硝基苯肼自由基清除能力方面,发芽糙米表现出最高的活性,其IC₅₀值为 27.2 ± 4.3 mg/mL,其次为糙米和干发芽糙米[25]。更为重要的是,糙米的抗氧化能力是精白米的3~6倍。研究表明,糙米茶富含多酚类化合物和维生素E,其抗氧化能力是精白米的3~5倍;糙米麸皮中的阿魏酸、谷维素等酚类物质具有清除自由基作用,其抗氧化能力是精白米的6倍[9]。在细胞和动物模型研究中,糙米的抗氧化效应得到了进一步验证。在四氯化碳诱导的大鼠肝氧化应激模型中,预煮发芽糙米能够减少肝损伤、脂质过氧化、蛋白质氧化和DNA损伤,同时提高抗氧化酶活性和GSH含量[26]。在高脂饮食诱导的肥胖大鼠模型中,发芽糙米表现出显著的抗肥胖效果。研究显示,与模型组小鼠相比,当给小鼠喂食含富硒发芽糙米25%的高脂饲料时,小鼠血清总胆固醇、甘油三酯、低密度脂蛋白胆固醇水平和体重增长比分别下降56.80%、77.53%、55.84%、3.75%,高密度脂蛋白胆固醇水平升高74.03%;肝组织中谷草转氨酶、谷丙转氨酶、MDA水平分别降低65.66%、38.60%、50.32%,GSH、SOD水平和肝指数分别升高193.98%、187.33%、31.46% [27]。在铁诱导的帕金森病果蝇模型中,糙米通过调节抗氧化与铁代谢缓解相关症状,显著改善运动与认知功能,降低MDA与铁水平,提升抗氧化酶活性并上调抗氧化基因表达[28]。在人体临床实验研究中也提供了证据,一项涉及120名中老年人的随机对照研究显示,用全谷物(糙米/燕麦/藜麦)替代精制主食6周后,炎症因子IL-22、IL-23水平显著下降,肠道有益代谢物丁酸提升30%以上。

4. 糙米的降血糖机制与效应

4.1. 膳食纤维的物理性阻碍作用

糙米中丰富的膳食纤维是其发挥降血糖作用的重要机制之一。每100克糙米含3.4克膳食纤维,是精白米的6倍[29]。这些膳食纤维主要包括可溶性纤维和不可溶性纤维两大类,它们通过不同的机制发挥降血糖作用。不可溶性纤维主要通过物理性阻碍作用影响血糖吸收。当糙米进入胃肠道后,其外层麸皮中的不可溶性纤维会形成凝胶状物质,包裹淀粉颗粒,减缓其与消化酶的接触。这种物理性屏障能够延缓胃排空时间,减缓碳水化合物分解为葡萄糖的速度,从而避免餐后血糖剧烈波动[30]。研究表明,不溶性纤维是预发芽糙米中降低餐后血糖浓度的主要成分[31]。可溶性纤维则通过形成粘性凝胶来发挥作用。

这些纤维在肠道中吸水膨胀形成高粘度的凝胶状物质，能够减缓葡萄糖的扩散和吸收速度。同时，可溶性纤维还能与胆汁酸结合，促进胆汁酸的排泄，间接影响胆固醇和脂肪的代谢，有助于改善胰岛素敏感性。糙米膳食纤维的降血糖效果在临床研究中得到了证实。印度超重人群中，吃糙米饭与吃白米饭相比，日平均血糖面积降低了 19.8%，吃糙米杂豆混合饭降低了 22.9%，且胰岛素敏感性均得到提高[32]。这些结果表明，糙米中的膳食纤维通过多种机制协同作用，有效降低了血糖反应。

4.2. GABA 对胰岛素功能的调节

GABA 是糙米中一种重要的生物活性成分，在发芽糙米中的含量显著升高，可达糙米的 3 倍、精米的 10 倍[33]。GABA 对胰岛素功能具有多重调节作用，是糙米发挥降血糖效应的关键成分之一。GABA 的降血糖机制主要体现在两个方面：一是在消化道被吸收后，会激活胰岛 β 细胞，促进胰岛素分泌，从而起到调节血糖的作用；二是消化道壁上存在 GABA 受体，它能够通过脑肠轴间接影响神经系统，进而实现缓解压力、改善情绪的效果。在临床研究中，GABA 的降血糖效果得到了充分验证。日本临床试验显示，糖尿病患者连续 8 周以发芽糙米替代白米，餐后 2 小时血糖波动幅度减少 28%，胰岛素分泌需求下降 19% [34]。韩国研究发现，每日摄入 150g 发芽糙米可使胰岛素抵抗指数 HOMA-IR 降低 12.7 [35]。更为重要的是，GABA 还具有改善胰岛素敏感性的作用。糙米胚芽部分含有的 GABA 和镁元素能增强胰岛素受体活性，长期食用可改善外周组织对葡萄糖的摄取利用效率，尤其对胰岛素抵抗为主的 2 型糖尿病患者有益[36]。在一项涉及 16 名 2 型糖尿病成年人的研究中，与吃白米饭相比，吃 2 份糙米饭可使餐后血糖和糖化血红蛋白(hemoglobin A1c, HbA1c)明显下降[37]。并且研究表明糙米不仅只有 GABA 对胰岛素功能具有调节作用， γ -谷维素作为糙米特有的营养成分，也能够增强胰岛素分泌，抑制胰高血糖素过度分泌，对糖尿病有益，改善高脂饮食导致的肥胖和脂毒性相关的胰岛功能障碍，并通过减少下丘脑内质网应激来减轻动物脂肪过度消耗[14]。

4.3. 抗性淀粉的代谢效应

抗性淀粉是糙米中另一类重要的功能性成分，它是一种在小肠中难以消化吸收的淀粉类型，具有控制血糖、改善肠道健康等功效[34]。糙米中含有 5%~8%的抗性淀粉，这种特殊淀粉能逃过小肠消化，直达大肠被益生菌发酵利用。抗性淀粉的降血糖机制主要通过三种途径实现。首先，抗性淀粉在小肠中不能被消化吸收，不会转变为糖分，具有一定的控糖作用[38]。其次，抗性淀粉在结肠中被肠道微生物菌群发酵，产生短链脂肪酸(主要包括乙酸、丙酸、丁酸)，这些短链脂肪酸能够降低肠道 pH 值，减少肠道内病原体的数量，增加肠道中益生菌的数量[39]。研究表明，抗性淀粉的发酵产物短链脂肪酸能够改善胰岛素敏感性。丁酸作为结肠上皮细胞的主要能量来源，能够强化肠道屏障功能，同时通过激活 G 蛋白偶联受体 43 (G protein-coupled receptor 43, GPR43)等机制调节糖脂代谢。此外，抗性淀粉还能通过增加饱腹感、延缓胃排空等机制帮助控制血糖。在实际应用中，通过适当的加工处理可以增加糙米中抗性淀粉的含量。研究发现，将糙米预煮后再干燥，可以使抗性淀粉含量增加 2~3 倍，有助于血糖控制和肠道健康。冷却后的糙米也会产生更多的抗性淀粉，进一步降低血糖波动。

4.4. 血糖生成指数与临床证据

血糖生成指数(glycemic index, GI)是衡量食物引起餐后血糖反应的有效指标，糙米在这方面表现出明显的优势。研究表明，糙米的 GI 值约为 55，属于中低 GI 食物，而白米饭的 GI 值约为 73~83，属于高 GI 食物[40]。这种 GI 值的差异直接影响了餐后血糖的变化模式。在餐后血糖反应方面，糙米表现出显著的优势。实测数据显示，吃白米饭 1 小时后血糖峰值达 7.8 mmol/L，而吃糙米饭 1 小时后仅为 5.6 mmol/L。这种血糖反应的差异主要源于糙米中完整的糠层结构，它增加了纤维含量并减缓了淀粉的消化速度[34]。

在临床研究中, 糙米的降血糖效果得到了大量证据支持。在健康志愿者中, 与白米相比, 糙米使血糖面积和血糖指数分别降低 19.8%和 12.1%; 在糖尿病患者中, 相同指标分别降低 35.2%和 35% [41]。一项为期 8 周的随机对照试验显示, 2 型糖尿病患者每日食用 2 份糙米, 餐后血糖和 HbA1c 显著降低[34], 一项涉及 16 名 2 型糖尿病成年人的研究显示, 与吃白米饭相比, 吃 2 份糙米饭可使餐后血糖和 HbA1c 明显下降[42]。另一项涉及 99 名 2 型糖尿病患者的研究显示, 用 100 g/天的发芽糙米替代精制谷物, 干预 3 个月后, 患者的血糖、血脂、饮食炎症指数等指标均得到改善[35]。在长期效果方面, 研究表明连续 12 周食用糙米可使餐后血糖峰值降低 15%, 减少胰岛素波动引发的脂肪囤积[43]。更重要的是, 临床数据显示, 糖尿病患者每日补充相当于 100 克糙米中含量的铬(约 200 μg), 可使空腹血糖平均下降 1.2 mmol/L, 胰岛素敏感性提升 25%。在中国进行的一项临床研究显示, 2 型糖尿病患者进行糙米食疗后可有效降低腰围、空腹血糖、餐后血糖及血脂水平, 提高胰岛素的敏感性[44]。具体数据显示, 糙米饮食后 1 个月的患者, 其 BMI、腰围、血压、空腹血糖、餐后血糖、空腹胰岛素、餐后 2 小时胰岛素、血脂水平较服用前相比有所降低($P < 0.05$), 但对 HbA1c 无统计学意义; 停用糙米 1 个月后, 患者腰围、血脂及餐后 2 小时胰岛素水平较服用后有所升高($P < 0.05$) [44]。在发芽糙米的研究方面, 一项涉及 99 名 2 型糖尿病患者的随机对照干预试验显示, 对照组(45 名)维持原有饮食习惯不变, 干预组(54 名)用 100 g/天的发芽糙米替代原有饮食中的精制谷物, 干预 3 个月。最终 43 名对照组和 42 名干预组参与者完成了研究, 结果显示干预组患者的血糖、血脂、饮食炎症指数以及血清脂肪酸代谢组学等指标均得到改善[35]。

5. 糙米对肠道健康的影响机制

5.1. 膳食纤维的益生元作用

糙米中的膳食纤维具有显著的益生元作用, 能够选择性地促进肠道有益菌的生长繁殖。益生元是指能够被肠道有益菌利用, 而不被有害菌利用的膳食纤维, 它们是有益菌的专属食物[45]。糙米中的膳食纤维包括可溶性纤维和不可溶性纤维两大类, 它们在肠道中发挥着不同但互补的益生元功能。不可溶性纤维主要通过促进肠道蠕动、增加粪便体积来改善肠道功能。每 100 克糙米含 3.4 克膳食纤维, 是精白米的 6 倍, 这些不可溶性纤维能够增加粪便体积, 刺激肠道蠕动, 预防便秘[46]。同时, 不可溶性纤维还能为肠道菌群提供栖息场所, 有助于维持肠道微生态的稳定。可溶性纤维则主要发挥益生元的营养作用。这些纤维能够被肠道中的双歧杆菌、乳酸菌等有益菌分解利用, 产生短链脂肪酸(如乙酸、丙酸、丁酸) [47]。研究表明, 每天摄入 80 克煮熟的糙米, 持续 4 周能使肠道有益菌群增加 15% [48]。在体外发酵实验中, 糙米表现出良好的益生元效果。相对精白米, 糙米体外消化物中膳食纤维含量高(约 11%), 在体外模拟肠道菌群培养实验中能更好地促进益生菌——双歧杆菌(9.69 个对数)和乳酸杆菌(7.30 个对数)增殖, 总短链脂肪酸含量提高约 12% [47]。

5.2. 对肠道菌群组成的调节作用

糙米对肠道菌群组成具有显著的调节作用, 能够增加有益菌的丰度, 减少有害菌的数量。研究表明, 富含抗性淀粉的糙米对乳酸菌和双歧杆菌等益生菌的促增殖能力优于白米和普通糙米, 甚至超过阳性对照低聚果糖[49]。在高脂饮食诱导的肥胖小鼠模型中, 中剂量的发酵糙米能够改善肠道菌群多样性、组成和结构, 减少与肥胖相关的菌群(如螺杆菌属、梭菌属、脱硫弧菌属)的丰度, 同时促进有益菌群(如双歧杆菌属、阿克曼菌属、乳酸杆菌属)的丰度增加[50]。在人类志愿者研究中, 高压灭菌处理的发芽糙米能够提高粪杆菌属、Dialister、普雷沃菌属和双歧杆菌属的丰度, 同时减少 Blautia、Romboutsia 和 Turicibacter 的丰度[50]。这种菌群组成的改善与代谢健康的改善密切相关。在高脂饮食诱导的胰岛素抵抗小鼠模型中, 发芽糙米、糙米和白米对代谢、炎症和肠道菌群的影响得到了系统研究[51]。结果显示, 发芽糙米在改善

胰岛素敏感性、调节肠道菌群组成方面表现最佳。特别值得关注的是，糙米经解脂酵母发酵后在动物实验中表现出更优的效果。研究显示，发酵糙米组小鼠体重增长和附睾脂肪沉积减少 29.68%和 27.81%，肠道黏液层厚度和杯状细胞数量分别增加 47.23%和 53.18% [52]。这一结果表明，适当的发酵处理可以进一步增强糙米的健康效应。糙米调节肠道菌群的机制是多方面的。首先，糙米中的膳食纤维和抗性淀粉为益生菌提供营养来源，促进其生长繁殖。其次，益生菌发酵产生的短链脂肪酸能够降低肠道 pH 值，创造不利于有害菌生长的环境。第三，糙米中的某些生物活性成分如 γ -谷维素、GABA 等具有抗炎和抗菌作用，有助于维持肠道微生态平衡。临床观察显示，每日 150g 糙米可使肠道菌群中厚壁菌/拟杆菌比例改善 23%，减少内毒素引发的炎症性肥胖[53]。这种菌群组成的改善不仅有助于肠道健康，还对全身代谢健康产生积极影响。

5.3. 短链脂肪酸对肠道屏障功能的保护

短链脂肪酸是糙米中膳食纤维和抗性淀粉在肠道中被益生菌发酵的主要产物，包括乙酸、丙酸、丁酸等，其中丁酸对肠道屏障功能具有特殊的保护作用。研究表明，丁酸约占短链脂肪酸总量的 15%，是结肠上皮细胞的主要能量来源，能够强化肠道屏障功能。丁酸对肠道屏障功能的保护机制主要包括 3 个方面。首先是紧密连接蛋白的调节作用。丁酸能够上调紧密连接蛋白的表达和丰度，包括紧密连接蛋白、闭合蛋白和闭锁带-1 等关键蛋白，这些蛋白对于维持肠道屏障完整性至关重要[54]。研究表明，丁酸能够直接上调紧密连接蛋白的表达和组装，使细胞间的“粘合”更紧密，从而维持肠黏膜屏障的完整性[54]。其次是肠黏液分泌的促进作用。丁酸通过激活 GPR43 受体，诱导杯状细胞分泌黏蛋白 2，形成双层黏液结构(内层致密无菌，外层松散含菌)。这种黏液层不仅能够润滑肠道，还能阻止病原体与肠上皮细胞直接接触，起到物理屏障的作用。再者是细胞能量供应和修复作用。丁酸是肠上皮细胞的“专属能量来源”，能为其提供 70%的能量需求。当丁酸充足时，肠壁细胞更新速度加快，紧密连接更牢固，有效阻挡致病菌和过敏原入侵。同时，丁酸还能作为肠上皮细胞的再生、修复提供关键营养物质，促进受损肠黏膜的快速修复[55]。在临床研究中，全谷物饮食对短链脂肪酸产生的促进作用得到了证实。首都医科大学的研究显示，120 名中老年人用全谷物(糙米/燕麦/藜麦)替代精制主食 6 周后，炎症因子白细胞介素-22 (interleukin-22, IL-22)、IL-23 水平显著下降，肠道有益代谢物丁酸提升 30%以上[56]。这种丁酸水平的提升与肠道屏障功能的改善密切相关。

5.4. 对肠道免疫功能的影响

糙米对肠道免疫功能具有显著的调节作用，主要通过影响肠道菌群组成、产生抗炎物质、调节免疫细胞功能等途径实现。研究表明，全谷物组的炎症因子 IL-22、IL-23 显著低于精制谷物组，而全谷物组的肠道中有益的短链脂肪酸(如丁酸)水平明显提高[53]。糙米调节肠道免疫功能的机制主要包括 4 个方面。首先是抗炎作用。糙米中的膳食纤维被肠道益生菌分解时产生的短链脂肪酸具有抗炎作用。研究表明，全谷物饮食能够降低全身炎症水平，这种抗炎效果主要归因于肠道中短链脂肪酸的产生增加[53]。其次是免疫细胞调节。短链脂肪酸能够调节多种免疫细胞的功能，包括调节性 T 细胞、Th17 细胞等。丁酸能够抑制核因子 κ B 炎症通路的激活，减少促炎细胞因子的产生，同时促进抗炎细胞因子的分泌。再者是肠道屏障功能的保护。如前所述，糙米通过产生短链脂肪酸特别是丁酸，能够增强肠道屏障功能，减少有害物质和病原体的入侵，从而减轻肠道炎症反应。最后是抗氧化作用。糙米中的酚类化合物等抗氧化物质能够帮助身体抵御自由基攻击，保护肠道细胞免受氧化损伤。这种抗氧化作用有助于维持肠道细胞的正常功能，支持肠道免疫功能。在实际应用中，糙米的肠道健康效应得到了广泛认可。研究表明，糙米中的膳食纤维能够增加粪便体积，刺激肠道蠕动，预防便秘；同时，其中的某些成分可以作为肠道有益菌

的营养物质[49]，促进有益菌的生长繁殖，维持肠道菌群的平衡。规律摄入糙米可缓解功能性便秘症状，改善胃肠功能[49]。

6. 实验验证与临床研究证据

6.1. 动物实验研究数据

动物实验为糙米健康效应的机制研究提供了重要证据。在抗氧化效应方面，多项动物实验证实了糙米的抗氧化作用。在四氯化碳诱导的大鼠肝氧化应激模型中，预煮发芽糙米能够减少肝损伤、脂质过氧化、蛋白质氧化和 DNA 损伤，同时提高抗氧化酶活性和 GSH 含量[57]。在高脂饮食诱导的肥胖大鼠模型中，发芽糙米表现出显著的抗肥胖效果[58]。在肠道健康效应方面，动物实验同样提供了有力证据。在高脂饮食诱导的胰岛素抵抗小鼠模型中，发芽糙米、糙米和白米对代谢、炎症和肠道菌群的影响得到了系统研究[50]。结果显示，发芽糙米在改善胰岛素敏感性、调节肠道菌群组成方面表现最佳。特别值得关注的是，糙米经解脂酵母发酵后在动物实验中表现出更优的效果[59]。这一结果表明，适当的发酵处理可以进一步增强糙米的健康效应。在认知功能方面，动物实验也提供了相关证据。研究表明， γ -谷维素作为糙米特有的营养成分，能够增强胰岛素分泌，抑制胰高血糖素过度分泌，对糖尿病有益，改善高脂饮食导致的肥胖和脂毒性相关的胰岛功能障碍，并通过减少下丘脑内质网应激来减轻动物脂肪过度消耗[48]。

6.2. 人体临床试验结果

人体临床试验为糙米健康效应的实际应用提供了直接证据。在抗氧化效应方面，一项涉及 120 名中老年人的随机对照研究显示，用全谷物(糙米/燕麦/藜麦)替代精制主食 6 周后，炎症因子 IL-22、IL-23 水平显著下降，肠道有益代谢物丁酸提升 30%以上。在降血糖效应方面，多项人体临床试验证实了糙米的降血糖效果。一项为期 8 周的随机对照试验显示，2 型糖尿病患者每日食用 2 份糙米，餐后血糖和 HbA1c 显著降低[60]。另一项涉及 16 名 2 型糖尿病成年人的研究显示，与吃白米饭相比，吃 2 份糙米饭可使餐后血糖和 HbA1c 明显下降[42]。在中国进行的一项临床研究显示，2 型糖尿病患者进行糙米食疗后可有效降低腰围、空腹血糖、餐后血糖及血脂水平，提高胰岛素的敏感性[44]。具体数据显示，糙米饮食后 1 个月的患者，其 BMI、腰围、血压、空腹血糖、餐后血糖、空腹胰岛素、餐后 2 小时胰岛素、血脂水平较服用前相比有所降低($P < 0.05$)，但对 HbA1c 无统计学意义；停用糙米 1 个月后，患者腰围、血脂及餐后 2 小时胰岛素水平较服用后有所升高($P < 0.05$) [44]。在发芽糙米的研究方面，一项涉及 99 名 2 型糖尿病患者的随机对照干预试验显示，对照组(45 名)维持原有饮食习惯不变，干预组(54 名)用 100 g/天的发芽糙米替代原有饮食中的精制谷物，干预 3 个月。最终 43 名对照组和 42 名干预组参与者完成了研究，结果显示干预组患者的血糖、血脂、饮食炎症指数以及血清脂肪酸代谢组学等指标均得到改善[35]。在认知功能方面，一项为期 6 个月的开放标签试验显示，习惯性食用去蜡糙米(每周 4 次)能够改善老年人的认知功能[61]。这一结果为糙米在神经保护方面的应用提供了新的证据。

6.3. 流行病学调查数据

流行病学调查为糙米健康效应提供了人群水平的证据。在亚洲国家特别是日本和韩国，糙米作为传统主食的一部分，其健康效应得到了长期观察的支持。虽然具体的大规模流行病学调查数据相对有限，但一些研究提供了相关线索。在印度进行的一项随机对照试验显示，在城市南印度有 2 型糖尿病风险的成年人中，用糙米替代精制碳水化合物主食对心脏代谢风险生物标志物产生了积极影响[62]。这是第一项在该人群中评估用全谷物替代精制碳水化合物主食对心脏代谢风险生物标志物影响的随机干预试验。在心血管疾病风险方面，虽然直接针对糙米的大规模流行病学调查较少，但全谷物摄入与心血管疾病风

险降低的关联已得到广泛证实。系统评价和荟萃分析显示,全谷物摄入通过减少能量摄入、防止体重增加和提高胰岛素敏感性,与2型糖尿病风险呈保护性关联[63]。在癌症预防方面,虽然缺乏专门针对糙米的大规模流行病学研究,但全谷物摄入与某些癌症风险降低的关联已被证实。糙米中的膳食纤维、抗氧化物质等成分可能在癌症预防中发挥作用。

6.4. 研究方法 with 结果的一致性分析

通过对多项研究的综合分析,可以发现不同研究在糙米健康效应方面存在较好的一致性,但也存在一些差异。一致性体现在抗氧化、降血糖和肠道健康效应方面。多项研究一致显示糙米具有显著的抗氧化作用,能够提高抗氧化酶活性,降低氧化应激标志物水平。大多数研究都证实了糙米的降血糖效果,特别是在餐后血糖控制方面。不同研究报告的效果幅度虽然有所差异,但都显示了积极的趋势。肠道健康效应方面,研究一致显示糙米能够促进有益菌生长,改善肠道菌群组成,增加短链脂肪酸产生。差异性主要表现为效果幅度的差异和某些指标的不一致性。不同研究报告的效果幅度存在差异,这可能与研究对象的特征(如基线健康状况、年龄、性别等)、干预方案(如糙米的种类、剂量、持续时间等)、研究方法(如评估指标、检测方法等)有关。在一项研究中糙米对HbA1c没有显著影响[44],而在另一项研究中则显示出显著效果[60]。这种差异可能与研究设计、样本量、干预时间等因素有关。

从研究设计来看,多数高质量的研究采用了随机对照试验设计,具有较好的科学性。样本量从十几人到上百人不等,大多数研究的样本量在可接受范围内。干预时间从几周到几个月不等,一般来说,干预时间较长的研究能够观察到更明显的效果。研究结果的差异可能与以下因素有关。首先是糙米品种:不同品种的糙米在营养成分含量、生物活性成分组成等方面可能存在差异。其次是加工方式:糙米的加工方式(如发芽、发酵、烹饪方法等)会影响其营养成分和健康效应。人群特征也有影响:研究对象的年龄、性别、基线健康状况、饮食习惯等都会影响研究结果。最后是对照食物:不同研究中使用的对照食物(如精白米的种类、加工精度等)可能存在差异。总体而言,尽管存在一些差异,现有研究为糙米的健康效应提供了较为一致的证据支持,特别是在抗氧化、降血糖、改善肠道健康等方面的效果得到了多项研究的验证。

7. 研究现状与争议分析

7.1. 主要研究成果总结

当前糙米健康效应研究已经取得了丰富的成果。首先是生物活性成分的系统鉴定。研究已经系统鉴定了糙米中的主要生物活性成分,包括 γ -谷维素、GABA、生育三烯酚、膳食纤维、酚类化合物等,并明确了这些成分在糙米不同部位的分布特征。研究表明, γ -谷维素在米糠中的含量高达3296.5 mg/kg,是糙米的8倍、精米的126倍;发芽糙米中GABA含量可达糙米的3倍、精米的10倍[3]。其次是健康效应机制的深入阐明。在抗氧化机制方面,研究揭示了 γ -谷维素通过SOD样活性和Nrf2通路激活发挥抗氧化作用,生育三烯酚通过双重机制(直接清除自由基和激活抗氧化酶)发挥抗氧化活性,酚类化合物通过提供氢原子或电子清除自由基[64]。在降血糖机制方面,研究明确了膳食纤维的物理性阻碍作用、GABA对胰岛素功能的调节、抗性淀粉的代谢效应等多重机制[65]。在肠道健康方面,研究阐明了膳食纤维的益生元作用、对肠道菌群组成的调节、短链脂肪酸对肠道屏障功能的保护等机制[17]。再者是临床效果的广泛验证。大量动物实验和人体临床试验验证了糙米在抗氧化、降血糖、改善肠道健康等方面的效果。例如,在糖尿病患者中,糙米可使血糖面积降低35.2%,连续8周食用发芽糙米可使餐后2小时血糖波动幅度减少28%,胰岛素分泌需求下降19%[66]。最后是加工技术的创新发展。研究发现,通过发芽、发酵、高压处理等加工技术,可以显著提高糙米中生物活性成分的含量和生物利用度。例如,发芽处理可使

GABA 含量提高 3~10 倍, 发酵处理可进一步增强糙米的健康效应[33]。

7.2. 研究争议与局限性

尽管糙米健康效应研究取得了显著进展, 但仍存在一些争议和局限性。首先是个体差异问题: 不同人群对糙米的健康效应可能存在显著差异。例如, 在矿物质吸收方面, 糙米中的植酸会与钙、铁、锌等矿物质结合形成不溶性络合物, 导致钙吸收率下降 18%, 铁吸收率下降 27%, 锌吸收率下降 19%。但对于矿物质充足的人群, 这种影响可能较小; 而对于矿物质缺乏的人群, 则可能加重缺乏症状。其次是加工方式的影响: 不同的加工方式对糙米营养成分和健康效应的影响存在争议。例如, 长时间浸泡会促进糙米糊化, 提高消化吸收率, 但可能降低其控糖效果; 过度加工会损失营养成分, 但适度加工可能改善口感和消化性[67]。再者是研究结果的不一致性: 在某些健康效应方面, 不同研究的结果存在不一致性。例如, 在一项研究中糙米对 HbA1c 没有显著影响[44], 而在另一项研究中则显示出显著效果[60]。然后是长期效应的不确定性: 目前大多数研究的干预时间相对较短(几周到几个月), 对于糙米长期食用的健康效应和安全性还需要更多长期研究的验证。特别是对于某些特殊人群(如老年人、儿童、孕妇等), 糙米的适宜摄入量 and 安全性还需要进一步研究。最后是剂量 - 效应关系不明确: 虽然研究证实了糙米的健康效应, 但对于不同健康效应的最佳剂量、最低有效剂量等还不明确。这限制了糙米在精准营养和个性化健康管理中的应用。

7.3. 未来研究方向

基于当前研究现状和存在的问题, 未来糙米健康效应研究应重点关注以下方向。首先是个性化营养研究: 深入研究不同人群(如不同年龄、性别、健康状况、遗传背景等)对糙米健康效应的差异性, 建立个性化的营养干预方案。特别是要关注特殊人群(如糖尿病患者、心血管疾病患者、老年人、儿童等)的适宜摄入量 and 安全性。其次是精准机制研究: 利用现代分子生物学技术, 深入研究糙米中生物活性成分的作用靶点和信号通路, 阐明不同成分之间的协同作用机制。特别是要关注糙米成分在表观遗传学调控、肠道 - 大脑轴调节等方面的作用。再者是新型加工技术研发: 开发能够最大化保留和提升糙米营养成分和健康效应的新型加工技术, 如超高压处理、脉冲电场、超声波处理等物理技术, 以及新型发酵技术、酶解技术等生物技术。接着是长期效应评估: 开展大规模、长期的队列研究和干预试验, 评估糙米长期食用的健康效应和安全性, 特别是对慢性疾病预防的长期效果。然后是产品创新开发: 基于糙米的健康效应和营养特性, 开发适合不同人群需求的功能性食品和营养补充剂, 如糙米蛋白粉、糙米纤维制剂、糙米提取物等。最后是标准化体系建设: 建立糙米及其制品的质量标准和评价体系, 包括营养成分检测方法、健康效应评价指标、安全性评估标准等, 为糙米产业的健康发展提供技术支撑。

8. 结论与展望

通过对糙米健康效应的系统分析, 本综述得出以下主要结论。首先, 营养成分优势明显: 糙米作为全谷物, 保留了稻谷中 70% 以上的维生素和矿物质, 富含 γ -谷维素、GABA、生育三烯酚、膳食纤维、酚类化合物等多种生物活性成分。与精白米相比, 糙米的膳食纤维含量是精米的 6~11 倍, 维生素 B₁ 含量是精米的 3 倍, 镁含量是精米的 3 倍, 这些营养优势为其健康效应提供了物质基础[8]。其次, 多重健康效应得到确认: 糙米在抗氧化、降血糖、改善肠道健康等方面具有显著的健康效应。在抗氧化方面, 糙米的抗氧化能力是精白米的 3~6 倍, 能够提高抗氧化酶活性, 降低氧化应激标志物水平; 在降血糖方面, 糙米的 GI 值约为 55, 显著低于精白米的 73~83, 能够有效降低餐后血糖反应; 在肠道健康方面, 糙米能够促进有益菌生长, 改善肠道菌群组成, 增强肠道屏障功能[68]。第三, 作用机制逐步阐明: 研究已经初

步阐明了糙米健康效应的主要机制。抗氧化机制主要涉及 γ -谷维素的 SOD 样活性和 Nrf2 通路激活、生育三烯酚的双重抗氧化机制、酚类化合物的自由基清除作用；降血糖机制包括膳食纤维的物理性阻碍、GABA 对胰岛素功能的调节、抗性淀粉的代谢效应；肠道健康机制涉及膳食纤维的益生元作用、短链脂肪酸对肠道屏障功能的保护等[64]。第四，临床证据日益充分：大量动物实验和人体临床试验为糙米的健康效应提供了有力证据。在糖尿病患者中，糙米可使血糖面积降低 35.2%，连续 8 周食用发芽糙米可使餐后 2 小时血糖波动幅度减少 28%，胰岛素分泌需求下降 19%；在抗氧化方面，连续 12 周食用糙米可使肝脏抗氧化酶活性提高 27%；在肠道健康方面，每日 150g 糙米可使肠道菌群中厚壁菌/拟杆菌比例改善 23% [69]。第五，研究前景广阔：随着现代科学技术的发展和全谷物健康效应认识的深入，糙米健康效应研究面临着新的机遇和挑战。未来研究应重点关注个性化营养、精准机制、新型加工技术、长期效应评估、产品创新开发等方向，为糙米在功能性食品开发和健康促进中的应用提供更加坚实的科学基础。

展望未来，随着人们健康意识的不断提高和对全谷物食品需求的增长，糙米作为传统而又现代的健康食品，其市场前景十分广阔。通过持续的科学研究和技术创新，糙米有望在预防慢性疾病、促进全民健康、推动食品产业转型升级等方面发挥更大的作用。同时，也需要加强科普宣传，提高消费者对糙米营养价值和健康效应的认识，推动糙米在日常饮食中的合理应用。总体而言，糙米作为一种营养丰富、健康效应显著的全谷物食品，其科学价值和应用前景已经得到了充分证实。在建设健康中国的背景下，推广糙米等全谷物食品的消费，对于改善国民营养状况、预防慢性疾病、提高全民健康水平具有重要意义。

基金项目

广西中医药大学校级科研重点项目(2021ZD004)。

参考文献

- [1] 周中凯, 王晓凤, 刁永佳, 等. 糙米中的生物活性成分及其对健康的影响[J]. 粮食与油脂, 2016, 29(4): 1-4.
- [2] 邢晓婷, 段晓亮, 张东, 等. 粳米碾磨过程中品质变化与适度加工研究[J]. 粮油食品科技, 2025, 33(3): 85-93.
- [3] 高琨, 姜平, 谭斌, 等. 稻米及其加工副产物米糠中 γ -谷维素研究现状[J]. 粮油食品科技, 2021, 29(5): 91-98.
- [4] 潘路路, 陈梦晓, 韩灵芝. 富含 γ -氨基丁酸发芽糙米茉莉馒头的配方优化[J]. 粮食与食品工业, 2026, 33(2): 25-30.
- [5] Gong, E.S., Luo, S.J., Li, T., Liu, C.M., Zhang, G.W., Chen, J., *et al.* (2017) Phytochemical Profiles and Antioxidant Activity of Brown Rice Varieties. *Food Chemistry*, **227**, 432-443. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.01.093>
- [6] 杜昭换. 发芽糙米酚类物质的体外抗氧化及降血糖活性研究[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳师范大学, 2024.
- [7] Summpunn, P., Deh-Ae, N., Panpipat, W., Manurakchinakorn, S., Bhoopong, P., Donlao, N., *et al.* (2023) Nutritional Profiles of Yoom Noon Rice from Royal Initiative of Southern Thailand: A Comparison of White Rice, Brown Rice, and Germinated Brown Rice. *Foods*, **12**, Article 2952. <https://doi.org/10.3390/foods12152952>
- [8] 于巍, 周坚, 徐群英, 等. 糙米与精米的营养价值与质构特性比较研究[J]. 食品科学, 2010, 31(9): 95-98.
- [9] 李金玲, 冷海静, 曹荣安, 等. 碾磨精度对糙米营养及食用品质的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(8): 85-94.
- [10] 向思亭, 朱利娟, 赵静, 等. 米糠油中 γ -谷维素的抗氧化作用及机理研究进展[J]. 中兽医医药杂志, 2016, 35(3): 22-25.
- [11] 张志艳, 金俊, 刘睿杰, 等. 化学精炼对稻米油谷维素和总酚含量及清除自由基能力的影响[J]. 中国油脂, 2018, 43(10): 8-11.
- [12] 徐影. α -生育酚和 γ -谷维素的细胞抗氧化协同作用研究[D]: [硕士学位论文]. 无锡: 江南大学, 2022.
- [13] Jariwalla, R.J. (2001) Rice-Bran Products: Phytonutrients with Potential Applications in Preventive and Clinical Medicine. *Drugs under Experimental and Clinical Research*, **27**, 17-26.
- [14] 向思亭, 周煜. γ -谷维素对动物高脂饮食调控作用研究进展[J]. 畜禽业, 2025, 36(1): 7-9.
- [15] 龚二生. 糙米多酚组分及其抗氧化活性研究[D]: [博士学位论文]. 南昌: 南昌大学, 2018.

- [16] 左玉, 刘志宏. 新型的优良天然抗氧化剂生育三烯酚[N]. 2008-02-19(007).
- [17] 李雨佳, 何余堂, 周欣欣, 等. 发芽糙米的营养特性及其在食品工业中的应用进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(9): 56-64.
- [18] 贾春艳, 李祥, 武陈晨, 等. 富集生物活性成分发芽糙米的制备工艺优化[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版), 2026, 42(2): 223-232+239.
- [19] 耿欣, 杜江, 肖军霞. 富含阿魏酸和 γ -氨基丁酸的发芽糙米酸奶品质控制的研究[J]. 中国食品学报, 2011, 11(7): 74-80.
- [20] Alam, M.A. (2019) Anti-Hypertensive Effect of Cereal Antioxidant Ferulic Acid and Its Mechanism of Action. *Frontiers in Nutrition*, **6**, Article ID: 121. <https://doi.org/10.3389/fnut.2019.00121>
- [21] Srinivasan, M., Sudheer, A.R. and Menon, V.P. (2007) Ferulic Acid: Therapeutic Potential through Its Antioxidant Property. *Journal of Clinical Biochemistry and Nutrition*, **40**, 92-100. <https://doi.org/10.3164/jcfn.40.92>
- [22] Zheng, M., Liu, Y., Zhang, G., Yang, Z., Xu, W. and Chen, Q. (2024) The Antioxidant Properties, Metabolism, Application and Mechanism of Ferulic Acid in Medicine, Food, Cosmetics, Livestock and Poultry. *Antioxidants*, **13**, Article 853. <https://doi.org/10.3390/antiox13070853>
- [23] Zhang, X., Zheng, X., Wang, P., Zhang, H., Han, Y. and Li, D. (2026) Enhancement of Phenolic Accumulation and Antioxidant Activity in Germinated Brown Rice by Moderate Electric Field Treatment. *Journal of Cereal Science*, **127**, Article 104363. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2026.104363>
- [24] 梁润平, 翟小童, 张文青, 等. 糙米制品抗氧化活性比较研究[J]. 粮油食品科技, 2018, 26(2): 1-5.
- [25] 兰乾敏, 成翠, 王婷玉, 等. 萌发杂粮的营养价值及功能性质研究进展[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(14): 172-179.
- [26] Wunjuntuk, K., Kettawan, A., Charoenkiatkul, S. and Rungruang, T. (2016) Parboiled Germinated Brown Rice Protects against CCl₄-Induced Oxidative Stress and Liver Injury in Rats. *Journal of Medicinal Food*, **19**, 15-23.
- [27] Lim, S.M., Goh, Y.M., Mohtarrudin, N. and Loh, S.P. (2016) Germinated Brown Rice Ameliorates Obesity in High-Fat Diet Induced Obese Rats. *BMC Complementary and Alternative Medicine*, **16**, Article No. 140. <https://doi.org/10.1186/s12906-016-1116-y>
- [28] Yankuzo, H.M., Sulaiman, I., Muhammad, S.A., Raji, A.A., Uthman, Y.A. and Imam, M.U. (2025) Brown Rice Attenuates Iron-Induced Parkinson's Disease Phenotypes in Male Wild-Type *Drosophila*: Insights into Antioxidant and Iron Metabolism Modulation. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, **50**, 1-13. <https://doi.org/10.1139/apnm-2024-0110>
- [29] 宋喜雅, 车家新, 高铭爽, 等. 基于原料组分精准复配的低血糖生成指数面包研究进展[J/OL]. 食品与发酵工业: 1-11. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.045621>, 2026-05-15.
- [30] 沈春燕, 杨蕙. 膳食纤维在降低食品血糖生成指数中的应用[J]. 食品工业, 2026, 47(4): 144-148.
- [31] 逢翔宇. 发芽糙米营养组分的富集及其对消化特性的影响[D]: [硕士学位论文]. 无锡: 江南大学, 2025.
- [32] 娄鑫玲, 范志红. 米饭饮食与血糖控制[J]. 中国粮油学报, 2022, 37(12): 269-276.
- [33] 付荻, 吴琼, 王雷. 发芽对糙米营养物质影响的研究进展[J]. 黑龙江科学, 2026, 17(8): 32-36.
- [34] 陈建建. 糙米与黑米谷粒结构和细胞壁完整性对淀粉消化性和血糖的影响[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 南昌大学, 2025.
- [35] 宋欣月. 发芽糙米对2型糖尿病人群血清脂肪酸构成的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- [36] 杨苏瑞. 富含抗氧化微量元素的混合全谷物控制老年人血糖波动的研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京协和医学院, 2025.
- [37] 周欣雨. 2型糖尿病合并心血管疾病患者饮食习惯调查: 基于中国2型糖尿病防治指南(2020年版) [D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安医学院, 2025.
- [38] 成庆阳. 莲藕抗性淀粉的结构表征及其对小鼠肠道炎症的影响[D]: [硕士学位论文]. 扬州: 扬州大学, 2025.
- [39] 黄天媛. 挤压制备高直链玉米淀粉-脂肪酸复合物的理化性质及在鲜湿面的应用[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南林业科技大学, 2025.
- [40] 王赵劼. 低GI复配杂粮米饭的理化特性及同熟化工艺研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉轻工大学, 2025.
- [41] Panlasigui, N. and Thompson, L.U. (2006) Blood Glucose Lowering Effects of Brown Rice in Normal and Diabetic Subjects. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, **57**, 151-158. <https://doi.org/10.1080/09637480500410879>

- [42] Lee, Y., Kim, S., Lee, I., Kim, J., Park, K., Jeong, J., *et al.* (2016) Effect of a Brown Rice Based Vegan Diet and Conventional Diabetic Diet on Glycemic Control of Patients with Type 2 Diabetes: A 12-Week Randomized Clinical Trial. *PLOS ONE*, **11**, e0155918. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0155918>
- [43] 任传英. 高 GABA 湿型发芽糙米逆境胁迫加工工艺与调节脂代谢机理研究[D]: [博士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2023.
- [44] 王媛媛. 糙米食疗在 2 型糖尿病患者治疗中的作用[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2016.
- [45] 邱勇光. 发芽糙米粉条的研制及其肠道菌群调节作用研究[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 南昌大学, 2023.
- [46] 樊慧文. 膳食纤维——肠道健康的保护神[J]. 妇女生活, 2025(13): 48-49.
- [47] 王泉博, 查尔斯·麦凯. 高效补充短链脂肪酸的“超级膳食纤维”益生元及其慢性疾病干预应用[C]//中国营养学会益生菌益生元与健康分会. 第七届国际益生菌益生元科学大会摘要集. 杭州: 中国知网, 2025: 84-85.
- [48] 李傲翔, 綦文涛, 刘成果, 等. 糙米膳食纤维通过肠道菌群和胆汁酸调控肥胖小鼠脂代谢紊乱[J]. 中国食品学报, 2025, 25(1): 122-131.
- [49] 王勇, 宋歌, 庞邵杰, 等. 糙米和全麦对高脂饮食大鼠肠道菌群及脂代谢的影响[J]. 粮油食品科技, 2023, 31(5): 133-141.
- [50] 韩帅. 发芽糙米改善高脂饮食诱导的小鼠高脂血症及其分子机理[D]: [博士学位论文]. 长沙: 中南林业科技大学, 2023.
- [51] Zhao, R., Huang, F., Liu, C., Asija, V., Cao, L., Zhou, M., *et al.* (2022) Impact of Germinated Brown Rice and Brown Rice on Metabolism, Inflammation, and Gut Microbiome in High Fat Diet-Induced Insulin Resistant Mice. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **70**, 14235-14246. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.2c06662>
- [52] Lee, B., Kwon, E., Park, Y., Lee, J.J., Ju, J.H., Park, S., *et al.* (2023) Predictors for Future Development of Systemic Lupus Erythematosus in Korean Sjögren's Syndrome Patients. *Lupus*, **32**, 1359-1368. <https://doi.org/10.1177/09612033231204067>
- [53] 包晓丹. 米糠膳食纤维对高脂高糖膳食小鼠肠道炎症的缓解作用及机制[D]: [硕士学位论文]. 桂林: 广西师范大学, 2025.
- [54] 孙格格. 多维度复合稳定剂调控三丁酸甘油酯肠道水解特性及结肠炎效价研究[D]: [博士学位论文] 武汉: 华中农业大学, 2024.
- [55] 鹿凤娇, 徐甜, 李景南. 酪酸梭菌和丁酸对肠黏膜屏障保护机制的研究进展[J]. 中国微生态学杂志, 2026, 38(3): 350-355.
- [56] 李狄科, 马晓阳, 梁余妙, 等. 发酵酱酒糟和谷物酒糟糖浆组合对生长育肥猪生长性能及肠道健康的影响[J/OL]. 饲料工业: 1-21. <https://link.cnki.net/urlid/21.1169.S.20260409.1116.002>, 2026-05-15.
- [57] 王秀琪, 华东, 张广琛. 转录组与代谢组联合分析揭示发芽杂草稻中生物活性成分富集及高抗氧化活性的机制[C]//中国食品科学技术学会. 中国食品科学技术学会第二十二届年会论文摘要集(上). 广州: 中国知网, 2025: 211.
- [58] 赵范, 孙韵琪, 闫梦娜, 等. 干酪乳酪杆菌 IOB-P9 燕麦后生元对高脂饮食诱导肥胖大鼠脂代谢及肝功能的改善效应[J/OL]. 现代食品科技: 1-9. <https://doi.org/10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.10.1058>, 2026-05-15.
- [59] 陈海旭. 益生菌发酵糙米饮料的制作工艺及营养价值研究[D]: [硕士学位论文]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2014.
- [60] Nakayama, T., Nagai, Y., Uehara, Y., Nakamura, Y., Ishii, S., Kato, H., *et al.* (2017) Eating Glutinous Brown Rice Twice a Day for 8 Weeks Improves Glycemic Control in Japanese Patients with Diabetes Mellitus. *Nutrition & Diabetes*, **7**, e273-e273. <https://doi.org/10.1038/nutd.2017.26>
- [61] Takahashi, M., Takano, Y., Kokubun, K., Nishiyama, N., Saika, K. and Taki, Y. (2025) Consumption of Dewaxed Brown Rice for a Six-Month Period Improves Cognitive Function in Older Adults: An Open-Label Trial. *Critical Public Health*, **36**, Article 2598713. <https://doi.org/10.1080/09581596.2025.2598713>
- [62] Malik, V.S., Sudha, V., Wedick, N.M., Ramya Bai, M., Vijayalakshmi, P., Lakshmi priya, N., *et al.* (2019) Substituting Brown Rice for White Rice on Diabetes Risk Factors in India: A Randomised Controlled Trial. *British Journal of Nutrition*, **121**, 1389-1397. <https://doi.org/10.1017/s000711451900076x>
- [63] Ghanbari-Gohari, F., Mousavi, S.M. and Esmailzadeh, A. (2022) Consumption of Whole Grains and Risk of Type 2 Diabetes: A Comprehensive Systematic Review and Dose-Response Meta-Analysis of Prospective Cohort Studies. *Food Science & Nutrition*, **10**, 1950-1960. <https://doi.org/10.1002/fsn3.2811>
- [64] Rungratanawanich, W., Memo, M. and Uberti, D. (2018) Redox Homeostasis and Natural Dietary Compounds: Focusing on Antioxidants of Rice (*Oryza sativa* L.). *Nutrients*, **10**, Article 1605. <https://doi.org/10.3390/nu10111605>

-
- [65] 谢海. 发芽糙米 GABA 富集工艺优化及降血糖活性成分测定[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉轻工大学, 2022.
- [66] 杜昭换, 但玉兰, 徐彩虹, 等. 发芽糙米酚类物质降血糖活性研究[J]. 中国粮油学报, 2025, 40(2): 33-40.
- [67] 韩璐. 发芽糙米加工过程中活性物质变化及抗氧化活性的研究[D]: [硕士学位论文]. 锦州: 渤海大学, 2018.
- [68] 林永华. 糙米食疗米饭的工艺优化及其降血糖、降血脂机理的初步探究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- [69] 刘晨, 沈心一, 高海燕, 等. 发芽糙米及其在糖尿病功能性食品中的应用进展[J]. 食品工业科技, 2021, 42(10): 378-384.