

稻米油主要活性成分及其抗氧化技术研究进展

涂 越¹ 郭雄昌¹ 章文翰² 蔡力创¹ 刘建平¹

(1. 江西省科学院生物制造研究所江西省功能性饲料添加剂工程实验室, 江西 南昌 330096;

2. 高安市清河油脂有限公司, 江西 高安 330815)

摘要: 稻米油是一种独特的天然健康油脂, 其脂肪酸组成合理, 含有植物甾醇、谷维素、生育三烯酚、角鲨烯等天然抗氧化成分, 具有很高的营养价值、多样的生理功能和良好的煎炸性能, 应用前景广阔。文章对稻米油的主要活性成分、生理功能、氧化稳定性的影响因素及抗氧化技术的研究进展进行了综述, 并对稻米油的未来发展方向进行了展望。

关键词: 稻米油; 活性成分; 生理功能; 抗氧化技术

Research advances in rice bran oil bioactive components and antioxidant technologies

Tu Yue¹ Guo Xiongchang¹ Zhang Wenhan² Cai Lichuang¹ Liu Jianping¹

(1. Jiangxi Functional Feed Additive Engineering Laboratory, Institute of Biomanufacturing, Jiangxi Academy

of Sciences, Nanchang, Jiangxi 330096, China; 2. Gao'an Qinghe Oil Co., Ltd., Gao'an, Jiangxi 330815, China)

Abstract: Rice bran oil is a unique natural edible oil with healthy benefits and a reasonable fatty acid composition. Containing natural antioxidant components including phytosterols, oryzanol, tocotrienols, and squalene, rice bran oil is characterized by high nutritional value, diverse physiological functions, and excellent frying performance, thus demonstrating broad application potential. This study reviews the research advances in the bioactive components, physiological functions, factors influencing oxidative stability, and antioxidant technologies of rice bran oil, while providing prospects for future development.

Keywords: rice bran oil; bioactive component; physiological function; antioxidant technology

稻米油又称米糠油, 通过压榨或溶剂萃取从米糠和胚芽中提取、精炼成食用油, 属于米糠深加工产品。稻米油的脂肪酸组成比例合理^[1], 其中油酸和亚油酸比值、单不饱和脂肪酸和多不饱和脂肪酸的比值均与世界卫生组织(WHO)推荐的膳食标准(1:1 黄金比例)较为接近。与其他精炼植物油相比, 稻米油不仅含有多种植物甾醇、谷维素等生物活性成分, 长期食用对预防心血管疾病、提高人体免疫力、调节血糖等有明显作用^[2-4], 还具有较好的煎炸稳定性^[5], 是国际上公认的天然绿色健康油脂。

近年来, 中国稻谷每年总产量维持在 2 亿 t 以上, 稳居全球稻米生产国之首。米糠作为稻米加工过程中的主要副产物, 其产出量约为 5%~10%^[6], 米糠含油率为 12%~

23%, 经过提取精制后制成稻米油, 发展潜力巨大。目前中国的米糠利用率不足 20%, 远远低于日本、印度等国家。为此, 国家发布《全国乡村产业发展规划(2020—2025 年)》《农业农村部关于促进农产品加工环节减损增效的指导意见》等一系列政策, 鼓励推进稻壳米糠、麦麸等副产物综合利用, 开发米粉、米线、米糠油等食品或食品配料, 提高粮油综合利用效率, 拓宽食用植物油来源, 挖掘稻米油、玉米胚芽油等生产潜力。文章拟对稻米油中主要活性成分、生理功能、氧化稳定性的影响因素及抗氧化技术进行综述, 了解目前有关稻米油的研究现状与发展趋势, 为进一步开发米糠资源和发展稻米油产业提供依据。

基金项目: 中央引导地方科技发展资金项目(编号: 20241ZDF02092); 江西省重点研发计划项目(编号: 20223BBH80008)

通信作者: 刘建平(1983—), 男, 江西省科学院生物制造研究所研究员, 硕士。E-mail: stephenlau1983@foxmail.com

收稿日期: 2025-06-23 **改回日期:** 2026-02-06

引用格式: 涂越, 郭雄昌, 章文翰, 等. 稻米油主要活性成分及其抗氧化技术研究进展[J]. 食品与机械, 2026, 42(7): 210-216.

Citation: Tu Yue, Guo Xiongchang, Zhang Wenhan, et al. Research advances in rice bran oil bioactive components and antioxidant technologies[J]. Food & Machinery, 2026, 42(7): 210-216.

1 主要活性成分及生理功能

稻米油是一种天然优质植物油,富含多种人体必需不饱和脂肪酸如亚油酸、油酸等,以及植物甾醇、生育三烯酚、谷维素、角鲨烯等生物活性成分,具有丰富的生理

功能(见图1),是均衡膳食的重要来源。这些活性成分的协同作用,使稻米油不仅具有调节胆固醇代谢、降血脂降血糖、预防心血管疾病的功能,还能抗炎、抗衰老、增强免疫力、改善睡眠等,是一种营养又保健的优质食用油。

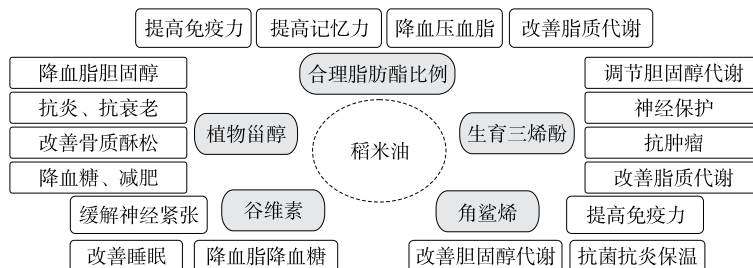


图1 稻米油的主要活性成分和生理功能

Figure 1 Primary bioactive components and physiological function of rice bran oil

1.1 脂肪酸

食用油脂中脂肪酸的组成比例决定了其营养价值的高低,这一关键指标直接影响油脂的健康效益。从结构上来说,脂肪酸有不饱和脂肪酸(单不饱和脂肪酸、多不饱和脂肪酸)和饱和脂肪酸两类。适当摄入不饱和脂肪酸对人体健康大有益处,可以改善心脑血管疾病、降血压血脂、提高免疫力等^[7]。而且大多数人体不能合成,只能从膳食中获得。稻米油的脂肪酸组成及含量见表1,脂肪酸组成以油酸、亚油酸、棕榈酸为主,含量>93%;油酸、亚油酸比例为1.06:1~1.50:1,单不饱和脂肪酸、多不饱和脂肪酸比例为1.05:1~1.42:1,其脂肪酸组成比例接近中国居民膳食营养素推荐摄入量^[11]。油酸能够通过提高人体循环中的油酰乙醇酰胺水平来达到控制食欲、提高记忆力、改善脂质代谢的作用,还可以维持心脑血管健康、改善代谢综合征,有“安全脂肪酸”之称^[12-14]。亚油酸作为人体必需多不饱和脂肪酸,具有多重生理功能,包括抗病毒、提高免疫力、降低胆固醇、防治动脉粥样硬化及心血管疾病等^[15-17]。

表1 稻米油中脂肪酸含量

脂肪酸成分	文献[1]	文献[8]	文献[9]	文献[10]
棕榈酸(C _{16:0})	16.48	17.56	20.0	22.5
油酸(C _{18:1})	40.73	41.48	42.7	44.3
亚油酸(C _{18:2})	38.11	34.89	33.1	29.5
亚麻酸(C _{18:3})	1.07	1.54	0.5	1.5
饱和脂肪酸(SFA)	19.44	20.19	22.5	24.7
单不饱和脂肪(MUFA)	41.38	42.43	44.0	44.3
多不饱和脂肪酸(PUFA)	39.18	36.34	33.6	31.0
总不饱和脂肪酸(UFA)	80.56	78.77	77.6	75.3

1.2 植物甾醇

植物甾醇是一类以环戊烷全氢菲为骨架的天然醇类化合物,是植物细胞膜、细胞器的主要成分,被称为“生命的钥匙”。植物甾醇可根据C-4位置上的甲基数量分为4-无甲基甾醇、4-单甲基甾醇和4,4-二甲基甾醇3种。稻米油中含有4-无甲基甾醇如谷甾醇、菜籽甾醇、豆甾醇等,含量约为10.55 g/kg^[18]。由于其结构与胆固醇相似,4-无甲基甾醇通过在肠道中与胆固醇竞争性抑制、促进排泄等方式降低人体对胆固醇的吸收,从而发挥调节血脂、预防心血管疾病的作用。同时,4-无甲基甾醇还具有抗炎、抗衰老等生理活性,对骨质疏松症、癌症、阿尔兹海默病都有一定的防治作用^[19-22]。稻米油中还含有较高含量的4,4-二甲基甾醇,可能通过非竞争性抑制 α -葡萄糖苷酶活性、促进胰岛素分泌、降低肠道葡萄糖吸收来改善餐后高血糖,通过抑制葡萄糖依赖性促胰岛素肽释放、腺苷酸活化蛋白激酶(AMPK途径)诱导脂噬促进脂肪酸氧化来达到抑制脂肪沉积及减肥的作用^[23]。

1.3 谷维素

相比于其他植物油,稻米油中含有一种特有的活性成分——谷维素。稻米油中谷维素含量约为0.9%~3.0%^[24],是谷维素最为丰富的提取来源之一。从结构上来说,谷维素是一种由阿魏酸和三萜醇通过酯键形成的酯类化合物的天然混合物,其主要成分为三萜醇类阿魏酸酯,有很强的抗氧化性(为生育酚的6倍),能够清除自由基、保护细胞免受损伤。谷维素可通过调节神经递质的水平来缓解紧张及焦虑情绪、改善睡眠、防治痴呆综合征^[25-26];通过增加脂联素分泌和AMP-依赖蛋白激酶磷酸化促进脂肪酸氧化,从而具有降血脂、降血糖的功效^[27];通过细胞和体液介导机制增强免疫活性^[28]。此外,谷维素可以避免稻米油在煎、炸、炒的加热过程中产生不良风

味,使稻米油具有很好的煎炸性能。

1.4 生育三烯酚及生育酚

稻米油中含有生育三烯酚、生育酚等多种维生素 E 类天然抗氧化剂,以 α -生育酚和 γ -生育三烯酚为主。生育三烯酚和生育酚的化学结构相似,但生育三烯酚比生育酚的不饱和度更高,侧链上含有多个双键。所以生育三烯酚的抗氧化性比生育酚的更强,生理功能更强。生育三烯酚具有保护神经、抗癌抗肿瘤、调节胆固醇合成等生理功能^[29]。生育三烯酚可通过减少活性氧产生、抑制胆固醇合成限速酶(HMG-CoA 还原酶)的活性、抑制核因子 κ B(NF- κ B)和哺乳动物雷帕霉素靶蛋白(mTOR)等多个通路来改善脂质代谢、抗炎以及治疗年龄相关的慢性疾病^[30]。

1.5 角鲨烯

角鲨烯是一种天然存在于多种生物体内的三萜类化合物,稻米油中含有约 0.13 g/kg 的角鲨烯^[31]。角鲨烯具有很强的抗氧化性,可通过促进免疫细胞如巨噬细胞和淋巴细胞的增殖和活性来提高人体免疫力。角鲨烯通过抑制单核细胞和巨噬细胞 CD36 受体的表达、降低血液中的低密度脂蛋白水平来改善胆固醇代谢^[32]。此外,角鲨烯还具有抗菌、抗炎特性,能保护皮肤屏障、对皮肤有保湿和修复作用^[33]。

2 稻米油氧化稳定性的影响因素

油脂是人体重要的能量和营养来源,其内在的品质稳定性是决定其食用价值与工业应用的关键。稻米油中的主要活性成分如谷维素、维生素 E、植物甾醇等,不仅构成了油脂的风味与营养,更构成了油脂的微观防御体系,是其抵抗外界环境侵袭、维持自身稳定、防止品质劣变的核心力量。油脂的氧化稳定性是衡量其在加工和贮藏过程中抵抗氧化酸败能力的关键指标,主要受到油脂中活性成分的组成、含量以及各成分之间可能存在的相互作用等因素的影响。此外,油脂的氧化稳定性还与其加工工艺、贮藏条件等外在因素有关。稻米油在加工生产过程中需经过多道工序,包括米糠原料的收集与清理、稳定化处理(脂肪酶灭活防止酸败)、控温干燥、油脂提取(压榨/溶剂萃取)、多级精炼、过滤与无菌包装等,最终通过质量检测达标后方可制成成品,确保油品符合食用标准。其中,稻米油精炼过程包括脱胶、脱酸、脱色、脱臭、脱蜡等。脱胶是通过水化脱胶、酸法脱胶或者酶法脱胶等方法去除油中如磷脂、蛋白质、糖类等胶质。这些物质在油脂中会使油浑浊或产生沉淀,影响其稳定性。在此过程中,可能存在一些脂溶性成分如维生素 E、植物甾醇流失的情况。脱酸是通过碱炼法、蒸馏法或者膜分离法等方法去除油中的游离脂肪酸。在工业生产最常用的碱炼法脱酸过程中,游离脂肪酸与碱反应生成皂角,然后分离去

除。但是,油中谷维素和植物甾醇在脱酸过程中流失较为严重,可能是由于谷维素结构含有酚羟基呈弱酸性,与碱发生酸碱中和反应而被去除,同时游离甾醇也容易一并转移到皂角中,离心后随皂角从油中脱除。脱色是通过使用吸附剂如活性白土、活性炭等吸附油中的色素和杂质。在此过程中,吸附剂还会吸附一部分有益成分如维生素 E、植物甾醇、角鲨烯等。脱臭是在高温高真空条件下通过蒸气蒸馏去除油中的挥发性成分,比如游离脂肪酸、醛、酮等异味物质,同时也能去除一些氧化产物。该步骤温度较高,不仅可能会导致热敏性成分如维生素 E、植物甾醇、角鲨烯等的分解,且这些成分会随蒸气一并馏出。脱蜡是通过低温结晶、过滤去除油中的蜡质和固体脂类,这些物质主要影响油的透明度和口感。综上,稻米毛油在一系列的精炼加工过程中不可避免地损失了一部分营养物质(谷维素、甾醇、角鲨烯、维生素 E 等),直接影响了稻米油的氧化稳定性。因此,精炼工艺条件不仅直接影响稻米油的营养成分保留量,更对其氧化稳定性具有关键作用。稻米油生产企业需要对精炼工艺进行合理优化,提高油脂的精炼程度,才能生产出营养价值高、品质稳定的稻米油产品。

作为日常膳食中不可或缺的食品及食品原料,食用油脂的品质优劣与人体健康密切相关,直接影响着人们的营养摄入和生理机能。油脂在贮藏过程中容易受到温度、光照、氧气等环境因素的影响,造成油脂氧化酸败后产生小分子醛类、酮类等危害人体健康的物质。煎炸时,高温会使其发生水解、氧化、异构化、聚合和裂解等一系列化学反应,破坏油脂的风味营养,甚至与食物反应生成苯并芘,导致致癌风险。油脂氧化分为自动氧化(最主要氧化机制)、酶促氧化和光氧化 3 个类型。油脂在常温下与氧气发生自由基链式反应:油脂中的不饱和脂肪酸在外界条件作用下生成自由基(诱导期),自由基与氧气反应生成过氧自由基,进一步与其他脂肪酸反应,生成氢过氧化物和新的自由基(传播期),最后自由基之间互相结合形成稳定的产物(终止期)。稻米油在加工过程中抗氧化成分的流失也会降低其氧化稳定性。因此,工业生产中通过外源添加抗氧化剂、微胶囊包埋技术、控制贮藏条件及包装材料等措施来延缓食用油脂氧化,确保产品质量和安全性。

3 稻米油抗氧化技术

3.1 过热蒸气预处理技术

过热蒸气技术是一种以过热水蒸气为介质,对物料进行短时高温热处理的新兴技术。该技术具备高效、环保且安全的显著优势,在食品加工领域有着广泛的应用前景。过热蒸气技术能够除菌、钝酶,提高油料的出油率与油脂的氧化稳定性,进而提升油脂品质^[34]。罗舜菁

等^[35]采用过热蒸气预处理米糠后,总酚含量和抗氧化性显著提高,且谷维素、生育酚等营养物质含量无显著变化,大大提高了米糠的贮藏稳定性。Wang等^[36-37]研究表明,过热蒸气预处理不仅能有效保持或改善油脂色泽,减缓过氧化值等指标的上升速度,还可以保留其营养成分。尽管过热蒸气预处理技术因高能耗和严苛的设备要求尚未在油脂加工领域大规模应用,但其显著的抗氧化效果已使其成为国内外学者的研究热点。

3.2 外源添加抗氧化剂

外源添加抗氧化剂因其成本较低、见效快,成为工业化大规模油脂生产中被广泛采用的抗氧化解决方案之一。根据GB 2760—2024,食用油脂常用抗氧化剂及添加限量见表2。由于人工合成抗氧化剂高效且价格低廉,目前在食用油脂中添加叔丁基对苯二酚(TBHQ)、丁基羟基茴香醚(BHA)等人工合成抗氧化剂仍是主流。然而,人工合成抗氧化剂存在潜在毒性和致癌风险,加上消费者对食品安全的要求日益提高,开发兼具安全性、实用性、高效性和经济性的天然油脂抗氧化剂已成为行业发展的迫切需求。王志兴等^[38]发现,稻米油中添加0.5%大叶冬青多酚能够显著提高稻米油的氧化诱导时间(约62.77%),并减缓贮藏及煎炸过程中酸价、过氧化值的上升趋势。李恒彬等^[39]研究表明,在稻米油中添加0.2 g/kg的茶多酚和迷迭香提取物均能显著增强稻米油在煎炸过程中的氧化稳定性。其中迷迭香提取物对于减缓稻米油的酸值升高、保留 α -生育酚和谷维素、抑制苯并芘生成的效果更佳。徐梦青等^[40]研究发现,添加 α -生育酚可有效提高稻米油在煎炸过程中的氧化稳定性。陈玉^[41]向稻米油中添加0.02%迷迭香提取物、0.06%脂溶性茶多酚后发现,迷迭香提取物可以将稻米油煎炸时间延长28%,且反式脂肪酸和苯并芘含量均未超国标。万苗等^[42]向稻米油中添加0.05%迷迭香提取物和0.01%抗坏血酸—棕榈酸酯的复合抗氧化剂后发现,稻米油的抗氧化效果可与TBHQ相媲美,且其脂肪酸含量变化较小。还有研究发现,竹叶多糖^[43]、甜茶提取物^[44]均对稻米油有良好的抗氧化作用。Zhao等^[45]研究发现,当谷维素与生育酚质量比为8:1时,稻米油的抗氧化效果最佳。

近年来,人们对天然油脂抗氧化剂多酚类如茶多酚、山楂多酚等,黄酮类如大豆异黄酮、苦瓜籽黄酮等,多糖类如植物多糖、真菌多糖等,色素类如类胡萝卜素、番茄红素等,精油类如柠檬精油、肉桂精油等的研究越来越多,并将天然抗氧化剂复配使用,可产生协同效应,形成氧化还原循环体系,提高抗氧化能力,产生1+1>2的效果。因此,开发安全、有效的天然复合抗氧化剂成为食用油脂抗氧化剂领域的重要研究方向,但目前相关研究仍停留在实验室阶段,伴随着许多问题例如天然抗氧化剂的效果取决于植物提取物中活性成分的纯度、试验的差

表2 中国食用油中允许添加的抗氧化剂

Table 2 Antioxidants allowed to be added to edible oil in China

分类	抗氧化剂	最大使用量/(g·kg ⁻¹)
天然抗氧 化剂	迷迭香提取物	0.7
	茶多酚	0.4
	茶黄素	0.4
	甘草抗氧化物	0.2
	抗坏血酸(维生素C)	按生产需要适量使用
	维生素E(包括dl- α -生育酚、按生产需要适量使用d- α -生育酚、混合生育酚浓缩物)	按生产需要适量使用
半合成/ 人工合成 抗氧化剂	植酸(肌醇六磷酸)、植酸钠	0.2
	竹叶抗氧化物	0.5
	抗坏血酸棕榈酸酯	0.2
	茶多酚棕榈酸酯	0.6
	没食子酸丙酯(PG)	0.1
	丁基羟基茴香醚(BHA)	0.2
	二丁基羟基甲苯(BHT)	0.2
	特丁基对苯二酚(TBHQ)	0.2
	羟基硬脂精(氧化硬脂精)	0.5

异性较大,天然抗氧化剂的溶解性、热稳定性问题,与食材一起烹饪是否会产生其他新物质、是否影响油脂中其他营养成分的流失等,仍需更深入的探讨。

3.3 控制贮藏环境

油脂的安全贮藏与环境条件息息相关,油脂在贮藏过程中容易因环境条件不当而发生氧化、水解或酸败,导致品质劣变。所以,油脂应尽量在避光、低温、低湿、隔氧条件下贮藏。工业贮藏过程中可以通过使用特殊的铝膜避光包装材料或采用气调贮藏(充氮保护、真空包装)等方式达到提高油脂的贮藏稳定性,延长油脂的保质期。

3.4 微胶囊包埋技术

微胶囊技术可使用天然或者合成高分子材料对稻米油进行包埋处理,壁材会在油脂外部构建起密封的囊膜结构,可有效避免油脂出现氧化、变质等情况。史素伟等^[46]使用微胶囊技术有效延缓了稻米油的氧化进程(在加速氧化条件下,达到国标中过氧化值的限值的贮藏时间约延长1.35倍),大大延长了稻米油的保质期。马超^[47]采用阿拉伯胶、麦芽糊精对稻米油进行微胶囊化处理后,稻米油在贮藏过程中过氧化值变化趋势平缓,说明微胶囊技术可以显著降低稻米油的氧化速度。不仅如此,微胶囊化油脂有利于提高油脂的分散性,从而提升其加工性能。然而,微胶囊技术在提升稻米油抗氧化性方面表现优异,但其工业化应用仍受限于高昂成本、复杂工艺及设备要求,目前主要应用于高端油脂、功能性食品等高附

加值油脂产品。在未来,开发低成本壁材(如大豆蛋白、玉米蛋白等农业副产物)以降低原料成本,优化制备工艺,从而增强技术普适性,使其在常规油脂加工中具备经济可行性。

4 结论与展望

稻米油因具有高烟点(精炼后通常为 230~250 ℃)、均衡的脂肪酸组成,以及丰富的天然抗氧化成分(如维生素和生育酚),故相较于其他常见植物油,表现出更优异的热稳定性和氧化稳定性。这一特性使其特别适用于工业生产中的连续高温煎炸、烘焙等热加工场景。在这一背景下,稻米油的抗氧化技术的选择需兼顾稳定性提升与原有营养特性的保留。因此,基于不同工业场景的需求,可针对性采用差异化抗氧化方案。例如,在高端休闲食品加工中,优先选用天然复配抗氧化剂,虽可能面临成本较高与耐温性不足的限制,但能在有效延缓脂质氧化的同时符合清洁标签要求;在大规模生产成本敏感的煎炸食品(如方便面)时,则以合成抗氧化剂为主要方案,并辅以少量天然抗氧化剂,以实现经济性 with 氧化稳定性的统一;而对于奶粉、粉末调味料等产品,则适宜采用微胶囊包埋技术,通过物理阻隔作用显著降低油脂与环境的接触,从而延长产品货架期。

综上,稻米油不仅具有均衡的脂肪酸组成,还富含植物甾醇、谷维素、生育三烯酚、角鲨烯等天然抗氧化成分,营养价值高,是优质的健康油脂。但现阶段中国对稻米油的开发不够,人们对稻米油的认识不足,稻米油的稳定性工艺有待提升。因此,稻米油的未来发展可从以下方面进行:① 优化稻米油的加工工艺,采用低温压榨、优化精炼工艺或利用新兴技术尽量减少稻米油中天然抗氧化成分的流失,既保证稻米油的营养价值又提高其氧化稳定性;② 开发兼具安全性、高效性与经济性的天然复合抗氧化剂体系,并建立完善的安全性评价方法,是当前解决稻米油等食用油脂工业化抗氧化问题最具可行性的技术路径;③ 中国米糠资源丰富,米糠蜡、米糠蛋白等其他米糠资源还有待进一步开发利用,例如稻米油加工副产物米糠蜡中含有米糠脂肪醇等功能性成分,可应用于化妆品、医药及食品等领域。同时,创新开发稻米油精深加工产品也同样具有显著的市场潜力,例如利用稻米油中甾醇和谷维素的凝胶特性,开发一种可将稻米油转化为固定脂肪的固体油凝胶,替代传统的植物奶油、黄油等^[48-49],既满足工艺需要又能提高其营养特性,拓展稻米油在食品领域的应用范围。不仅可延伸稻米产业链价值,更能满足健康消费升级趋势下对功能性产品的迫切需求,特别是在国家“粮食加工副产物综合利用”政策引导和科技进步的双重驱动下,这类高附加值产品的开发将成为粮油产业转型升级的重要突破口。

参考文献

- [1] 张继光, 曲良冉, 李南, 等. 稻米油特征参数的测定与脂肪酸组成分析[J]. 食品工业, 2023, 44(4): 313-317.
Zhang J G, Qu L R, Li N, et al. Determination of characteristic parameters of rice bran oil and analysis of fatty acid composition [J]. The Food Industry, 2023, 44(4): 313-317.
- [2] 陶黎丽, 邓乾春, 盛锋, 等. 稻米油的营养成分、制取工艺及应用研究进展[J]. 中国油脂, 2021, 46(12): 62-68.
Tao L L, Deng Q C, Sheng F, et al. Progress in nutrients, preparation technology and application of rice bran oil[J]. China Oils and Fats, 2021, 46(12): 62-68.
- [3] Sohail M, Rakha A, Butt M S, et al. Rice bran nutraceuticals: a comprehensive review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2017, 57(17): 3 771-3 780.
- [4] Singanusong R, Jacoby J J. 米糠油的营养与应用综述[J]. 粮油食品科技, 2021, 29(5): 9, 21-25.
Singanusong R, Jacoby J J. Nutrition and applications of rice bran oil overview[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2021, 29(5): 9, 21-25.
- [5] 魏学鼎, 陈玉, 高盼, 等. 稻米油与其他 4 种常见煎炸油的煎炸性能比较[J]. 粮食与油脂, 2021, 34(12): 50-55, 65.
Wei X D, Chen Y, Gao P, et al. Comparison of frying performance between rice oil and other four common frying oils [J]. Cereals & Oils, 2021, 34(12): 50-55, 65.
- [6] 樊振江, 孟楠, 栗亚琼, 等. 米糠油的提取工艺与营养价值的研究进展[J]. 食品科技, 2023, 48(11): 171-177.
Fan Z J, Meng N, Li Y Q, et al. Research progress on the extraction process and nutritional value of rice bran oil[J]. Food Science and Technology, 2023, 48(11): 171-177.
- [7] 尹红娜, 高海东, 高火亮, 等. 多元复配比例的植物油中相关脂肪酸的变化规律[J]. 食品工业, 2021, 42(6): 287-292.
Yin H N, Gao H D, Gao H L, et al. Change rule of related fatty acids in vegetable oils with multiple proportion[J]. The Food Industry, 2021, 42(6): 287-292.
- [8] 喻凤香, 林亲录, 陈煦, 等. 我国主稻区米糠原油的脂肪酸分析[J]. 食品工业, 2012, 33(8): 156-158.
Yu F X, Lin Q L, Chen X, et al. Analysis on fatty acids of crude rice bran oil from main rice region in China[J]. The Food Industry, 2012, 33(8): 156-158.
- [9] Orsavova J, Misurcova L, Ambrozova J V, et al. Fatty acids composition of vegetable oils and its contribution to dietary energy intake and dependence of cardiovascular mortality on dietary intake of fatty acids[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2015, 16(6): 12 871-12 890.
- [10] Bhatnagar A S, Prasanth Kumar P K, Hemavathy J, et al. Fatty acid composition, oxidative stability, and radical scavenging activity of vegetable oil blends with coconut oil[J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 2009, 86(10): 991-999.
- [11] 中国营养学会. 中国居民膳食营养素参考摄入量: 2023 版

- [M]. 北京: 人民卫生出版社, 2023: 163.
- Chinese Nutrition Society. Dietary reference intakes for China: 2023 edition[M]. Beijing: People's Medical Publishing House, 2023: 163.
- [12] Bowen K J, Kris-Etherton P M, Shearer G C, et al. Oleic acid-derived oleoylethanolamide: a nutritional science perspective[J]. *Progress in Lipid Research*, 2017, 67: 1-15.
- [13] 金青哲, 王月, 方靖凯, 等. 油酸和高油酸油脂对人体健康的影响研究进展[J]. *粮食与油脂*, 2023, 36(3): 1-3, 8.
- Jin Q Z, Wang Y, Fang J K, et al. Research progress on the effects of oleic acid and high oleic acid oil on human health[J]. *Cereals & Oils*, 2023, 36(3): 1-3, 8.
- [14] 潘小吕. 茶油的营养成分与保健功效的探索[J]. *食品安全导刊*, 2024(6): 116-118.
- Pan X L. Exploration of the nutritional components and health benefits of tea oil[J]. *China Food Safety Magazine*, 2024(6): 116-118.
- [15] Kohn A, Gitelman J, Inbar M. Interaction of polyunsaturated fatty acids with animal cells and enveloped viruses[J]. *Antimicrobial Agents and Chemotherapy*, 1980, 18(6): 962-968.
- [16] 陈彦婕, 唐嘉诚, 宫萱, 等. 鱼油提取、多不饱和脂肪酸富集及 EPA 和 DHA 的应用研究进展[J]. *食品与机械*, 2021, 37(11): 205-210, 220.
- Chen Y J, Tang J C, Gong X, et al. Research progress on extraction of fish oil, enrichment of polyunsaturated fatty acids and application progress of EPA and DHA[J]. *Food & Machinery*, 2021, 37(11): 205-210, 220.
- [17] 吴洪号, 张慧, 贾佳, 等. 功能性多不饱和脂肪酸的生理功能及应用研究进展[J]. *中国食品添加剂*, 2021, 32(8): 134-140.
- Wu H H, Zhang H, Jia J, et al. Research progress of physiologic function and application of functional polyunsaturated fatty acids[J]. *China Food Additives*, 2021, 32(8): 134-140.
- [18] 叶虔臻, 王微, 李春松, 等. 米糠油应用研究进展[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(3): 300-306.
- Ye Q Z, Wang W, Li C S, et al. Research progress in comprehensive application of rice bran oil[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2019, 40(3): 300-306.
- [19] Wagle N, Nagarjuna S, Sharma H, et al. Evaluation of antinociceptive and anti-inflammatory activity of phytosterol present in chloroform extract of *Phyllanthus maderaspatensis* [J]. *Indian Journal of Physiology and Pharmacology*, 2016, 60(1): 90-95.
- [20] Wang T, Li S J, Yi C G, et al. Protective role of β -sitosterol in glucocorticoid-induced osteoporosis in rats *via* the RANKL/OPG pathway[J]. *Alternative Therapies in Health and Medicine*, 2022, 28(7): 18-25.
- [21] Zhao H G, Zhang X, Wang M, et al. Stigmasterol simultaneously induces apoptosis and protective autophagy by inhibiting Akt/mTOR pathway in gastric cancer cells[J]. *Frontiers in Oncology*, 2021, 11: 629008.
- [22] 张志旭, 昌超, 刘东波. 天然植物甾醇的来源、功效及提取研究进展[J]. *食品与机械*, 2014, 30(5): 288-293, 298.
- Zhang Z X, Chang C, Liu D B. Advance research on origin, function and extraction of natural phytosterol[J]. *Food & Machinery*, 2014, 30(5): 288-293, 298.
- [23] 谢亮亮, 李龙, 谢丹, 等. 4,4-二甲基甾醇生物活性研究进展[J]. *中国油脂*, 2024, 49(7): 47-53.
- Xie L L, Li L, Xie D, et al. Research progress on biological activity of 4,4-dimethylsterol[J]. *China Oils and Fats*, 2024, 49(7): 47-53.
- [24] 沈鸿, 熊志琴, 姜绍通. 谷维素对3种食用植物油的抗氧化效果研究[J]. *中国油脂*, 2017, 42(1): 22-25, 30.
- Shen H, Xiong Z Q, Jiang S T. Oryzanol as natural antioxidant for improving antioxidation of three kinds of edible vegetable oils[J]. *China Oils and Fats*, 2017, 42(1): 22-25, 30.
- [25] Lee S C, Tsai C C, Yao C H, et al. Ferulic acid enhances peripheral nerve regeneration across long gaps[J]. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2013, 2013(1): 876327.
- [26] Fujii M, Butler J P, Sasaki H. Gamma-oryzanol for behavioural and psychological symptoms of dementia[J]. *Psychogeriatrics*, 2018, 18(2): 151-152.
- [27] 张伟君, 朱振南, 马一玮, 等. 稻米油及其 γ -谷维素营养的研究进展[J]. *粮油食品科技*, 2024, 32(5): 84-92.
- Zhang W J, Zhu Z N, Ma Y W, et al. Nutritional research progress of rice bran oil and γ -oryzanol[J]. *Science and Technology of Cereals, Oils and Foods*, 2024, 32(5): 84-92.
- [28] Ghatak S B, Panchal S J. Investigation of the immunomodulatory potential of oryzanol isolated from crude rice bran oil in experimental animal models[J]. *Phytotherapy Research*, 2012, 26(11): 1701-1708.
- [29] 牛玲玲, 徐伟丽, 刘蕾, 等. γ -生育三烯酚的生物活性及其作用机理研究进展[J]. *食品工业科技*, 2016, 37(5): 374-377, 383.
- Niu L L, Xu W L, Liu L, et al. Advances in biological activity of γ -tocotrienol and its mechanism[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2016, 37(5): 374-377, 383.
- [30] Malavolta M, Pierpaoli E, Giacconi R, et al. Anti-inflammatory activity of tocotrienols in age-related pathologies: a SASPected involvement of cellular senescence[J]. *Biological Procedures Online*, 2018, 20(1): 22.
- [31] 秦玉川, 徐新快, 王衍彬, 等. 山稻米糠油营养成分分析与比较[J]. *中国粮油学报*, 2023, 38(7): 140-147.
- Qin Y C, Xu X K, Wang Y B, et al. Analysis and comparison of nutritional components of upland rice bran oil[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2023, 38(7): 140-147.
- [32] Granados-Principal S, Quiles J L, Ramirez-Tortosa C L, et al. Squalene ameliorates atherosclerotic lesions through the

- reduction of CD36 scavenger receptor expression in macrophages[J]. *Molecular Nutrition & Food Research*, 2012, 56(5): 733-740.
- [33] 覃慧婷, 康恒, 付帆, 等. 角鲨烯来源及其生物活性研究进展[J]. *粮食科技与经济*, 2024, 49(1): 102-107.
- Qin H T, Kang H, Fu F, et al. Research progress on the source and bioactivity of squalene[J]. *Food Science and Technology and Economy*, 2024, 49(1): 102-107.
- [34] 朱森森, 刘园, 牛佳钰, 等. 过热蒸汽预处理技术在油脂加工中的研究进展[J]. *食品科学*, 2025, 46(9): 337-350.
- Zhu M M, Liu Y, Niu J Y, et al. Research progress on superheated steam pretreatment in oil processing[J]. *Food Science*, 2025, 46(9): 337-350.
- [35] 罗舜菁, 胡迪, 黄克愁, 等. 过热蒸汽处理对米糠营养性质和储藏稳定性的影响[J]. *中国食品学报*, 2020, 20(5): 213-221.
- Luo S J, Hu D, Huang K C, et al. Effects of superheated steam treatment on the nutritional properties and storage stability of rice bran[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2020, 20(5): 213-221.
- [36] Wang M, Zou Q, Zhang Y C, et al. Effects of superheated steam pretreatment on phenolics and its antioxidant activity in *Camellia oleifera* oil[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2023, 185: 115028.
- [37] Lee K Y, Rahman M S, Kim A N, et al. Effect of superheated steam treatment on yield, physicochemical properties and volatile profiles of perilla seed oil[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 135: 110240.
- [38] 王志兴, 邢文君, 张森. 大叶冬青多酚对稻米油抗氧化作用及煎炸性能的影响[J]. *中国食品添加剂*, 2023, 34(10): 194-202.
- Wang Z X, Xing W J, Zhang M. Effects of polyphenols from *Ilex latifolia* on antioxidant activity and frying performance of rice oil[J]. *China Food Additives*, 2023, 34(10): 194-202.
- [39] 李恒彬, 高盼, 江小明, 等. 两种天然抗氧化剂对稻米油煎炸性能的影响[J]. *中国油脂*, 2023, 48(8): 34-40.
- Li H B, Gao P, Jiang X M, et al. Effects of two natural antioxidants on frying performance of rice bran oil[J]. *China Oils and Fats*, 2023, 48(8): 34-40.
- [40] 徐梦青, 王志贤, 任育林, 等. α -生育酚对稻米油煎炸性能的影响[J]. *中国油脂*, 2025, 50(11): 28-33.
- Xu M Q, Wang Z X, Ren Y L, et al. Effect of α -tocopherol addition on frying performance of rice oil[J]. *China Oils and Fats*, 2025, 50(11): 28-33.
- [41] 陈玉. 基于热稳定性的稻米煎炸油的研究[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2019: 67.
- Chen Y. Study of RBO frying oil based on the thermal stability [D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2019: 67.
- [42] 万亩, 周裔彬, 徐亚元, 等. 脂溶性迷迭香提取物对米糠油的抗氧化作用[J]. *中国油脂*, 2013, 38(9): 52-54.
- Wan M, Zhou Y B, Xu Y Y, et al. Antioxidation of lipid-soluble rosemary extract on rice bran oil[J]. *China Oils and Fats*, 2013, 38(9): 52-54.
- [43] 朱兴一, 王建国, 谢捷, 等. 竹叶多糖对食用油抗氧化作用研究[J]. *林产化学与工业*, 2012, 32(6): 57-60.
- Zhu X Y, Wang J G, Xie J, et al. Antioxidation of polysaccharides from bamboo leaves on edible oil[J]. *Chemistry and Industry of Forest Products*, 2012, 32(6): 57-60.
- [44] 杜静, 张海龙, 李丽, 等. 龙牙百合花和甜茶提取物对食用油抗氧化作用的研究[J]. *中国油脂*, 2017, 42(12): 40-43, 48.
- Du J, Zhang H L, Li L, et al. Antioxidant effects of extracts of Longya Lily flower and *Lithocarpus polystachyus* on edible oil [J]. *China Oils and Fats*, 2017, 42(12): 40-43, 48.
- [45] Zhao Z M, Huang J H, Jin Q Z, et al. Influence of oryzanol and tocopherols on thermal oxidation of rice bran oil during the heating process at Chinese cooking temperatures[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 142: 111022.
- [46] 史素伟, 熊华, 胡居吾, 等. 米糠油微胶囊产品的制备及其稳定性研究[J]. *食品科技*, 2011, 36(6): 185-189.
- Shi S W, Xiong H, Hu J W, et al. Preparation and stability of microcapsuled rice bran oil[J]. *Food Science and Technology*, 2011, 36(6): 185-189.
- [47] 马超. 水酶法提取米糠油和蛋白及米糠油微胶囊化研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2014: 49.
- Ma C. Study on the extraction of rice bran oil and protein by enzymatic method and rice bran oil microencapsulation[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2014: 49.
- [48] 屈岩峰, 刘偲铭, 孔珍, 等. 油凝胶的制备及在食品中应用研究进展[J]. *食品与机械*, 2025, 41(3): 221-227.
- Qu Y F, Liu N M, Kong Z, et al. Research progress on oleogel preparation and application in food[J]. *Food & Machinery*, 2025, 41(3): 221-227.
- [49] 徐杭蓉, 郑远荣, 刘振民. 稻米油对涂抹再制干酪品质的影响[J]. *食品与机械*, 2018, 34(3): 200-203.
- Xu H R, Zheng Y R, Liu Z M. Effects of rice bran oil on quality of the spread processed cheese[J]. *Food & Machinery*, 2018, 34(3): 200-203.