DOI:10.12441/spyswjs.20250512001 [文章编号] 1673-1689(2026)03-0001-10

稻米油水酶法提取与破乳技术研究进展

郝 佳[1] 王雷鑫[1] 孙忞川[1] 许朵霞[2,3] 张 民[1*]

(1. 天津农学院食品科学与生物工程学院,天津 300392; 2. 北京工商大学食品与健康学院,北京 100048; 3. 老年营养与健康教育部重点实验室(北京工商大学),北京 100048)

摘要:米糠是稻谷加工的重要副产物,年产量约 1 500 万 t,其富含优质脂质,是制备稻米油的理想原料。稻米油含有丰富的不饱和脂肪酸、谷维素、维生素 E、植物甾醇等功能活性成分,具有较高的营养保健价值。水酶法作为一种绿色提油技术,凭借其所得油脂品质佳、环境友好、对蛋白质破坏小等优势,成为油脂提取领域的研究热点。本文综述了水酶法提油的原理、产业化瓶颈与关键影响因素,重点解析了提取过程中产生乳状液的破乳技术,并结合行业趋势展望未来研究方向,以期推动米糠高值化利用与水酶法提取技术的工业化应用。

关键词:稻米油;水酶法;提取;破乳技术

Research Progress in Aqueous Enzymatic Extraction and Demulsification Technologies of Rice Bran Oil

HAO Jia[1] *WANG Leixin*[1] *SUN Minchuan*[1] *XU Duoxia*[2,3] *ZHANG Min*[1*]

(1. School of Food Science and Biological Engineering, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300392, China; 2. School of Food and Health, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China; 3. Key Laboratory of Geriatric Nutrition and Health (Beijing Technology and Business University), Ministry of Education, Beijing 100048, China)

Abstract: Rice bran, an important byproduct of rice processing, has an annual output of about 15 million tons. With rich high-quality lipids, rice bran is an ideal raw material for rice bran oil production. The oil is rich in unsaturated fatty acids, oryzanol, vitamin E, and sterols, boasting significant nutritional and health benefits. As a green extraction technology, the aqueous enzymatic method has gained attention for its advantages in high oil quality, environmental friendliness, and minimal protein damage. This review summarizes the principles of aqueous enzymatic extraction, industrialization bottlenecks, and key influencing factors. It focuses on demulsification technologies for the emulsion generated during extraction and prospects future directions aligned with industry trends, aiming to promote high-value utilization of rice bran and industrial application of the aqueous enzymatic extraction method.

Keywords: rice bran oil; aqueous enzymatic method; extraction; demulsification technology

水稻(*Oryza sativa* L.)是禾本科稻属的重要粮食作物,其栽培历史可追溯至 7 000 年前长江流域的古代农耕文明,随后沿丝绸之路向西传入印度,并于中世纪传播至南欧地区[1]。当前,我国水稻主产区集中在东北平原、长江中下游平原及珠江三角洲等区域。国家统计局数据显示,2024 年全国粮食总产量达 7.07 亿 t,其中稻谷产量为 2.08 亿 t,产量规模持续位居全球首位[2]。米糠是稻谷精加

基金项目:河南工业大学小麦和玉米深加工国家工程研究中心开放课题项目(NL2024005);北京工商大学食品风味与健康交叉创新研究开放课题项目(FFHCI-2026044)。

通信作者:张民(1972—),男,博士,教授,博士研究生导师,主要从事农副产品高值化转化研究。E-mail:zhangmin@tjau.edu.cn

收稿日期:2025-05-12 **修回日期:**2025-07-28

工制备精米的主要副产物，主要由果皮层、胚芽及碎米粒组成，约占稻谷质量的8%，年产量可达1 500万t[3]。但目前国内米糠多直接用作饲料，高值利用率不足20%，资源利用水平与国外相比存在很大差距[4]。美国和日本等发达国家已实现米糠资源的高值化利用，开发出食用米糠油、环保生物材料、功能性谷维素、益生菌发酵制品等多元化产品体系[5]。已有研究证实，米糠富集了约64%的营养物质，除富含脂类、蛋白质、碳水化合物及维生素等营养成分外，还含有γ-氨基丁酸、植酸钙镁、二十八烷醇等多种生物活性物质，其营养素保留率受原料品种、加工工艺参数等因素影响[6-7]。

米糠中脂类物质质量分数为15%~22%，若以我国年产米糠总量的50%用于榨油、出油率16%测算，可年产稻米油约百万吨[8]。稻米油的脂肪酸组成以油酸（质量分数约40%）、亚油酸（质量分数约34%）和软脂酸（质量分数约17%）为主，同时含有质量分数约1%的亚麻酸，这4类脂肪酸总量约占稻米油脂质成分的92%[9]。据统计，2024年前11个月，我国油料作物进口量达10 600.6万t，其中大豆进口量9 709.0万t，油菜籽进口量578.2万t，出口量仅98.9万t；同期食用植物油进口总量651万t，其中棕榈油进口量231万t，菜籽油进口量172万t，葵花籽油及红花油进口量102万t，豆油进口量27万t[10-11]，出口量仅16万t。由此可见，米糠油脂资源对我国年进口量超百万吨的食用油市场形成了有效补充。开发米糠制油技术不仅能够提升我国植物油的自给能力，而且对优化油脂行业国际贸易结构、保障粮油安全也具有重要的战略意义。

传统植物油提取工艺以压榨法和浸出法为主，虽然这2类工艺的出油率可达95%以上，但仍存在明显缺陷：高温高压易导致蛋白质结构不可逆变性，降低副产物综合利用价值；浸出工艺存在溶剂残留风险，易引发食品安全问题[12]。相比之下，水酶法作为新型生物提取技术，提取条件温和，既能保持油脂的天然品质、减少后续精炼环节，又可最大程度地保护蛋白质组分，更符合清洁生产理念，具有广阔的应用前景[13]。近年来，国内外针对菜籽油、大豆油、花生油、核桃油的水酶法提取研究日益成熟，采用该技术制备稻米油的相关报道也不断增加，见图1。基于此，作者重点综述了水酶法提取稻米油与破乳技术的研究进展，以期为该技术的工业化应用提供参考。

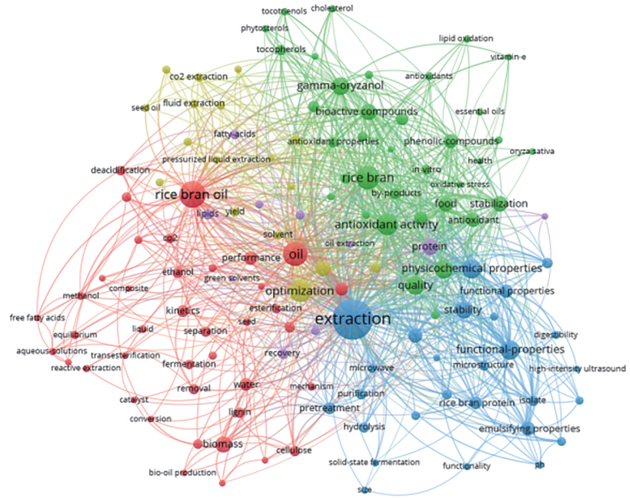
1 稻米油的组成

2010年世界卫生组织将稻米油（即米糠油）列为全球三大健康食用油之一[14]。作为优质新兴植物油，其不饱和脂肪酸质量分数超过80%，油酸与亚油酸质量比接近1∶1，属于典型的油酸-亚油酸型油脂[15]。研究表明，这类不饱和脂肪酸能够降低低密度脂蛋白（LDL）水平、提升高密度脂蛋白（HDL）水平，进而调节血脂水平。Devarajan等[16]研究发现，日常搭配食用芝麻油与稻米油，不仅能够辅助调节血压、血脂，还可与降压药发挥协同增效作用。稻米油还富含谷维素、生育酚、角鲨烯及植物甾醇等多种生物活性物质[17]。α-生育酚、多酚与角鲨烯等组分可显著提升HDL水平、降低LDL水平，同时能够增强肝脏组织的抗氧化能力[18]。刘慧敏[19]对13种植物油微量成分进行对比分析，发现仅在米糠油中检测到谷维素。γ-谷维素是稻米油的特征性成分，已被证实可抑制肿瘤细胞增殖、调节胆固醇水平、改善糖耐量等。其代谢产物阿魏酸的抗氧化活性优于维生素E，使得稻米油在健康食品领域广受消费者青睐[20]。另有研究表明，稻米油中棕榈酸（16∶0）、硬脂酸（18∶0）、油酸（18∶1）、亚油酸（18∶2）、亚麻酸（18∶3）、总不饱和脂肪酸质量分数分别为10.79%~19.78%、0.58%~2.17%、37.95%~46.78%、1.24%~2.13%、70.89%~87.43%；α-生育酚、β-生育酚、γ-生育酚、α-生育三烯酚、γ-生育三烯酚、δ-生育三烯酚质量分数分别为6.45%~40.76%、1.85%~2.71%、2.53%~13.07%、2.79%~27.75%、37.97%~48.33%、1.55%~2.24%；谷维素、甾醇、角鲨烯质量分数分别为0.90%~2.90%、2.98%~3.38%、2 376.03~3 189.00 mg/kg[21-22]。

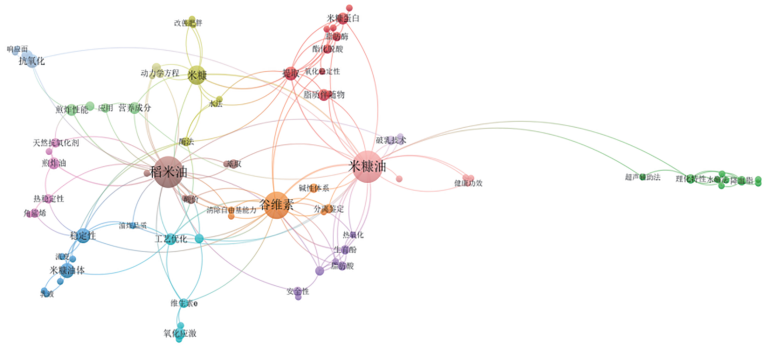
2 植物油提取方法

2.1 植物油传统提取方法

植物油传统与新型提取方法见图2。其中，植物油传统提取方法主要分为机械压榨法与溶剂浸出法。机械压榨需要先对原料进行蒸炒预处理，再通过螺旋挤压机或液压装置破坏油料细胞结构，实现油脂分离，可分为热压与冷压2种工艺。其中，热压工艺出油率高、原料适用性广，但加工过程中的高温环境易引发油脂氧化变质。相较于



(a) 对Web of Science检索的与稻米油提取相关的参考文献标题和摘要的可视化叠加图



(b) 对中国知网检索的与稻米油提取相关的参考文献标题和摘要的可视化叠加图

图 1　稻米油提取研究的文献计量叠加分析

Fig. 1　Bibliometric overlay analysis of rice bran oil extraction research

热压工艺，冷压工艺虽然出油率偏低，但可在低温条件下最大限度地保留油脂的天然风味特征[23]。溶剂浸出法基于相似相溶原理，采用有机溶剂溶解并提取油料中的油脂组分。该方法具有提取率高、宜于自动化生产等优势，已成为现代油脂工业中的主流加工技术。

机械压榨法具有操作流程简便、对技术要求较低、生态兼容性好等优势，但存在饼粕残油率高、人工成本较高等缺陷，且副产物高效回收难度较大，制约了该技术的工业化应用[24]。溶剂浸出法虽然产能优势显著，但存在诸多弊端：加工过程易造成油料蛋白质不可逆变性；粗制油中含有较多杂质，需经过多道精炼工序处理，可能生成多环芳烃、反式脂肪酸等有害成分；存在溶剂残留风险。传统有机试剂如正己烷等易燃易爆，不仅增加了生产安全隐患，还会对生态环境造成不利影响[25]。目前行业虽研发了低毒环保型溶剂体系，但现有有机溶剂大多依托不可再生资源制备，因此，急需开发契合绿色可持续发展理念的新型植物油脂分离技术[26]。

2.2　植物油新型提取方法

2.2.1　超临界流体提取法

物质存在固态、液态、气态及超临界态4种基本相态。当温度与压力超过物质临界点时，气液两相界面完全消失，形成超临界流体。这种特殊的相态兼具液态溶剂的高溶解性与气态物质的高扩散性，且密度、黏度等物性参数可通过调控温度、压力实现精准调节，是一种高效的萃取介质[27]。在食品加工领域，超临界二氧化碳的临界参数（31.1 ℃、7.31 MPa）易于实现，同时具备安全

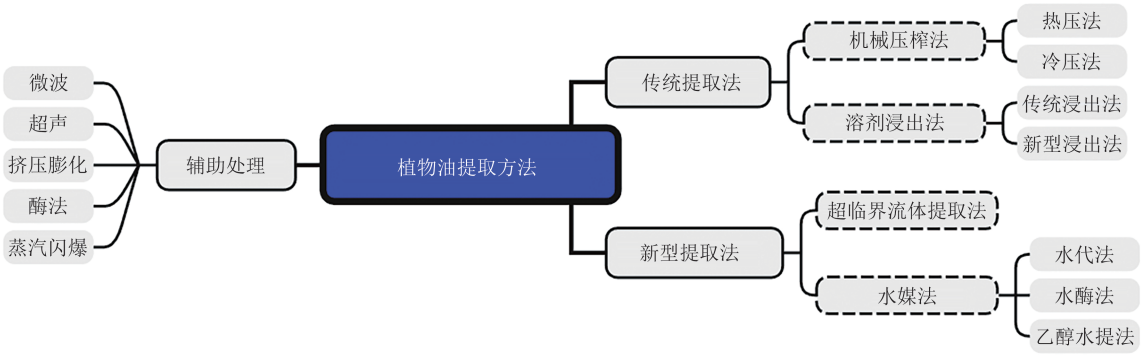


图 2　植物油传统与新型提取方法

Fig. 2　Conventional and novel extraction methods for vegetable oils

环保、能耗低、可循环使用等优势，是目前应用最广泛的超临界流体[28]。该技术凭借无溶剂残留、可选择性提取生物活性物质及产品纯度高等特点，已成功应用于植物油脂（如玉米胚芽油、牡丹籽油等）及中草药功能性成分的提取和加工[29-30]。

2.2.2　水媒法

水媒法是以水为基本溶剂，选择性添加酶制剂或乙醇的油脂提取工艺，主要包括水代法、水酶法及乙醇水提法[31]。水媒法通常涵盖 4 个核心步骤：原料破碎、油脂浸提、离心分离及乳状液破除。为了提高出油率，通常会对原料进行预处理，以抑制脂肪酶活性、瓦解细胞结构并抑制乳化现象。常用的预处理方法包括热处理、微波处理、超声波处理、挤压膨化、酶法处理、蒸汽闪爆处理等[32-33]。传统水代法是水媒法的基础工艺，仅依靠油水理化性质差异实现油脂与蛋白质的同步分离，但提取过程中易形成稳定的乳浊体系，导致出油率偏低。水酶法作为水媒法的升级工艺，通过机械破碎结合特异性酶解作用，定向降解纤维素、果胶等细胞壁结构多糖及脂质复合物，进而实现高效提油[34]。水酶法提取条件温和、生产过程绿色无污染，不仅能够最大程度地保留营养成分，所得蛋白质还具备较高的食品应用价值。同时，水酶法制备的油脂酸价及过氧化值更低，可省去传统工艺的多道精炼工序[35-36]。水酶法提取稻米油的原理见图 3。目前，水酶法已在花生、大豆等油料加工中实现规模化应用，如 2013 年江西建成国内首条水酶法提取茶油生产线，年处理量达 20 万 t[37]。乙醇水提法是一种新型的水媒法提油工艺，利用乙醇-水体系的低界面张力特性，可有效解决乳化问题，任燕勤[38]研发的牡丹籽油等提取工艺已实现产业化应用，乙醇提取茶油生产线在江西成功运行。

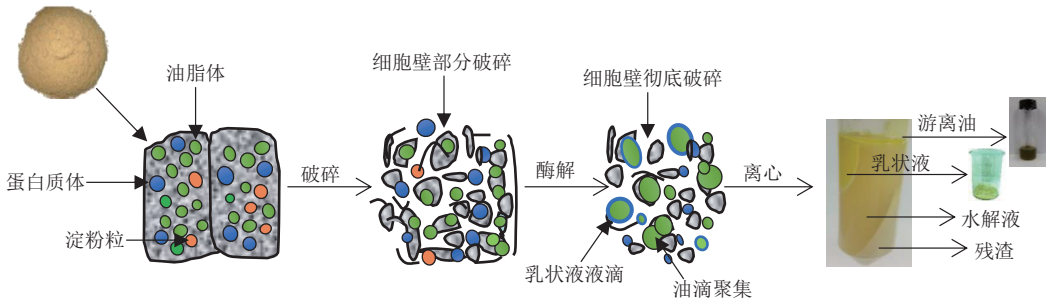


图 3　水酶法提取稻米油的原理

Fig. 3　Principle of rice bran oil extraction by aqueous enzymatic method

3　水酶法提取稻米油的研究进展及现状

1959 年，Subrahmanyan 等[39]将酶解技术应用于花生油脂的分离，为酶法制油奠定了研究基础。20 世纪 70 年代，随着酶制剂的规模化生产与商业化应用，水酶法提取植物油的相关研究进入快速发展阶段。1996 年，Sengupta 等[40]将果胶酶、纤维素酶与有机溶剂结合，用于稻米油的提取研究。随后，Hanmoungjai 等[41]围绕该工艺进行了系统研究，通

过评估出油率、蛋白质回收率及还原糖含量等关键参数，证实Alcalase 2.4L能显著提高稻米油和蛋白质的提取效率，糖酶能有效促进水解液中还原糖的积累。目前，国外相关研究多聚焦于稻米油新型提取工艺开发与产品品质的优化，针对水酶法提油的作用机制研究仍较为薄弱[42]。

我国水酶法提取稻米油的研究起步相对较晚。2004年，杨慧萍等[43]开展米糠水酶法提油研究，通过优化工艺参数，将米糠出油率提升至85.76%。为突破提油效率的瓶颈，研究者逐步构建了挤压膨化处理、微波辅助处理及超声波协同处理等多种预处理技术。仇梓冰等[44]将超声波与复合酶解技术相结合，解决了传统工艺效率低、乳液分离困难等问题，最终实现90.53%的稻米油提取效率。石钰丰[45]通过工艺优化，将小米糠油的过氧化值降至（4.61±0.36）mmol/kg、酸价稳定在（18.34±0.28）mg/g，符合食品安全国家标准。综上，目前水酶法提油技术尚未实现工业化应用，特异性酶制剂的开发与油脂品质的精准调控是现阶段急需突破的技术壁垒。

4　水酶法提油的影响因素

4.1　原料的破碎程度

在油料细胞中，完整的细胞壁及大分子物质的包裹会阻碍油脂的释放，导致出油率偏低。因此，破坏油料细胞结构来促进油脂充分释放是提高油脂提取率的关键[46]。原料破碎程度直接影响油脂的提取率，适当减小颗粒尺寸可有效破坏细胞壁屏障，扩大物料与溶剂的接触面积，促进脂质分子的扩散与溶出。但破碎强度需合理调控，若颗粒细度过高，体系乳化现象加剧，反而会降低油脂分离效率[47]。因此，可探索新型破碎技术，如超声辅助破碎技术可通过空化效应在低破碎强度下高效破坏细胞壁，同时有效抑制乳化现象的发生[48]。

4.2　酶制剂的种类与用量

水酶法提取植物油工艺中常用的酶制剂见表1，可以看出，糖酶与蛋白酶是主要的酶制剂[49]。其中，纤维素酶、果胶酶与半纤维素酶可降解植物细胞壁中的纤维素、半纤维素与果胶组分，破坏油料作物的细胞结构，促进油脂释放；蛋白酶可水解油料中的蛋白质基质，实现油脂体与蛋白质基质的分离，同时兼具辅助破乳作用；淀粉酶与β-葡聚糖酶能够降解淀粉和脂多糖复合物，从而弱化其对油脂的包裹作用，为油脂溶出创造条件[50]。鉴于油料作物的多组分特性和酶作用的专一性限制，可采用复合酶体系。复合酶制剂兼具多种酶活性，可协同降解油料中的各类结构，但不同油料的细胞壁组分与结构差异较大，导致复合酶的水解稳定性较差。因此，优化复合酶体系配比、充分发挥多酶协同作用是提升提油率的关键。在酶制剂添加量方面，虽然提油率通常与酶制剂添加量呈正相关，但过量酶制剂会增加生产成本，同时易增

表1　水酶法提取植物油常用酶制剂

Table 1　Commonly used enzyme preparations for vegetable oil extraction by aqueous enzymatic method

酶类别	酶名称	作用机制
糖酶	纤维素酶	水解纤维素、生成葡萄糖
	果胶酶	水解细胞间的果胶质
	半纤维素酶	水解构成植物细胞壁的多糖类
	β-葡聚糖酶	水解谷类、麦类细胞壁的β-葡聚糖
	葡萄糖淀粉酶（糖化酶）	水解α-1,4和α-1,6糖苷键
	中温淀粉酶（α-淀粉酶、液化酶）	作用于α-1,4糖苷键
	木聚糖酶	水解木聚糖
蛋白酶	碱性蛋白酶	碱性条件下水解蛋白质肽键
	中性蛋白酶	内切酶
	酸性蛋白酶	水解蛋白质
	风味蛋白酶	内切酶、外切酶
	木瓜蛋白酶	酸性、中性、碱性条件均可水解蛋白质
其他酶	磷脂酶	水解甘油磷脂
	植酸酶	水解植酸

加酶解产物复杂度及后续油脂纯化的难度。在现有研究工艺中，酶制剂添加量一般为原料质量分数的1%~5%[51]。综上，科学选择酶制剂种类、精准控制酶添加量，是决定水酶法提油技术工业化可行性的关键。后续研究需进一步深化酶解动力学研究，明确不同油料体系下各酶制剂的最小有效用量。

4.3 酶解pH

酶解pH是水酶法提油的核心工艺参数，不仅直接决定了酶的催化效率，还会显著影响蛋白质溶出特性与油脂分离效果。多数植物源蛋白质的等电点偏酸性，在碱性介质中溶解性更佳。适度提高酶解体系的pH可促进蛋白质溶解，进而促使油脂从复合体系中有效释放[52]。当体系pH接近蛋白质等电点时，蛋白质分子间的静电作用减弱，溶解度降至最低，油脂难以随蛋白质溶出，最终导致提油率下降[53]。此外，pH不仅影响蛋白质的溶解特性，还会改变酶的空间结构与活性位点，且不同类型的酶的最适pH存在差异[54]。例如，纤维素酶在酸性环境中活性较高，而碱性蛋白酶则更适合在碱性条件下发挥作用。实际生产中需根据使用的酶制剂来精确控制体系的pH，以发挥多酶协同酶解效应。

4.4 酶解温度

温度对酶活性的影响呈现典型的钟形曲线，偏离最适温度区间会导致酶的催化效率下降。温度过低会降低酶活性中心与底物的结合能力，从而降低酶解反应速率；温度过高则可能导致酶变性失活，不仅抑制油脂提取，还会劣化成品油品质[55]。因此，需将酶解温度控制在最适区间，以保持酶制剂的最大酶活性。目前水酶法提油工艺的酶解温度一般为40~60 ℃[35]。

4.5 其他因素

水酶法提油工艺的影响因素还包括料液比、酶解时间、搅拌速度、离心力等。水酶法体系的料液比一般为1 g∶(3~10) mL。较低的料液比可降低体系黏度、改善传质效果，但会增加后续废水处理压力；较高的料液比可能导致酶解不充分，同时增大搅拌过程中的能量消耗[13]。酶解时间并非越长越好，过度酶解会促使蛋白质水解产生小分子肽，这类物质可作为乳化剂稳定乳液，增大油脂分离难度；而酶解时间不足则无法彻底破坏油料细胞结构，导致油脂释放不完全，提油率偏低[56]。搅拌速度需平衡传质效率与剪切力对酶及油脂的影响。搅拌速度过高，产生的剪切力会破坏酶的空间构象，同时加剧乳化现象；搅拌速度过低，物料混合不均匀，酶解反应一致性较差[57]。离心力需根据料液性质和分离设备特点进行调整，适宜的离心力可实现油、水、残渣的高效分离；离心力过小会造成组分分离不彻底，过大则会增加能耗、加剧设备磨损[58]。

综上，影响提油率的因素较多且相互关联，且不同油料之间的差别较大。因此，需通过响应面法等多因素优化方法，系统分析各因素的主效应及交互作用，构建精准可靠的工艺参数模型[59]。同时，需结合工业化生产的实际需求，在保障提油率的基础上，统筹兼顾生产效率、成本控制与产品质量，为水酶法提油技术的产业化应用提供支撑。

5 破乳技术研究现状

在水酶法提油过程中，体系中存在大量磷脂、蛋白质及细胞碎片，这些物质可作为天然乳化剂包裹油脂颗粒，极易形成稳定的乳状液（油体）。该乳状液属于典型的水包油（O/W）多相分散体系，微观结构显示其有明显的核壳特征[60-61]。因此，高效破乳是提升水酶法油脂提取率的关键环节。目前，国内外学者针对花生、椰子、大豆等油料的水酶法提油过程形成的乳液展开了诸多破乳试验，破乳技术主要有物理处理法（如离心、超声）、化学破乳法（破乳剂）与生物酶解法[62]。

物理破乳法依靠外力作用促使乳状液液滴聚结以破坏体系稳定性，主要包括热处理、冷冻解冻处理、微波处理等。彭瑶瑶等[63]对比了4种物理破乳法（微波法、加热法、冷冻解冻法、静置上浮法）的破乳效果，发现冷冻解冻法的破乳率最高。化学破乳法通过添加特定试剂改变乳化体系的界面特性，以实现油水分离，常用方法包括调节pH、添加无机盐、乙醇破乳等。研究者对比了pH法、$CaCl_2$法和乙醇破乳法对米糠油乳状液的破乳效果，发现处理后油滴表面膜蛋白结构发生瓦解，油滴颗粒明显聚集、平均粒径显著增大、表面电势值下降[64]。生物酶解法则通过特异性降解油滴表面的蛋白质-磷脂复合膜实现破乳，破乳机理见图4。Li等[65]研究了物理法（加热、冻融）、无机盐（$CaCl_2$和NaCl）、蛋白

酶（Protex 6L、Protex 7L、Protex 50FP、Alcalase 2.4L、木瓜蛋白酶）、磷脂酶和淀粉酶处理对花生油乳状液的破乳效果，发现蛋白酶的破乳效果显著优于其他方法。目前，破乳技术面临的主要挑战是由于油料组分存在明显差异，加工参数变化导致的乳化液乳化特性存在显著差异，未来需重点开展水酶法提取稻米油产生乳状液的破乳机理与技术创新研究，进一步提升油脂提取率。

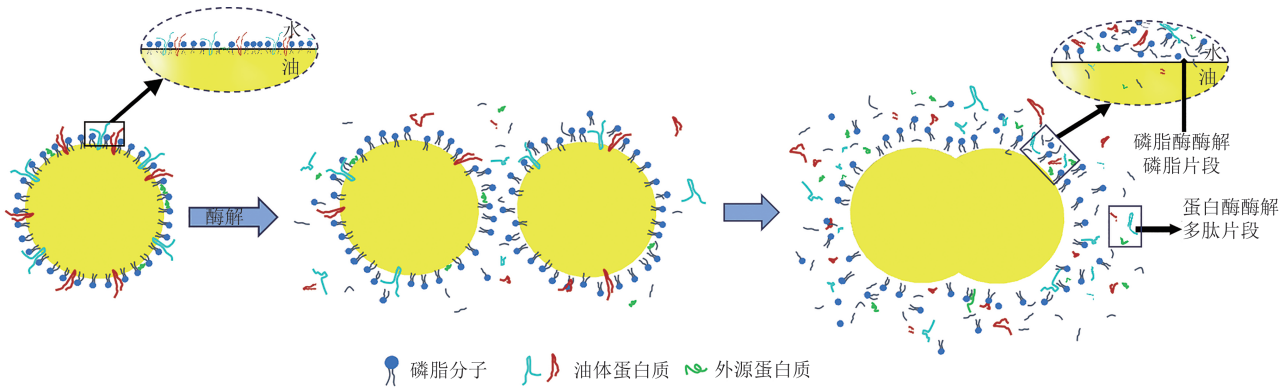


图 4　生物酶解法破乳机理

Fig. 4　Mechanism of demulsification *via* biological enzymatic method

6　展望

水酶法提油技术绿色环保，且副产物附加值高，具备良好的工业化应用潜力，但在稻米油提取领域仍面临诸多挑战。目前国内大米加工企业生产规模有限，导致米糠原料难以实现集约化加工；同时，米糠易发生氧化酸败，原料贮藏稳定性差。此外，该工艺还存在能源与资源消耗量较大、酶制剂成本较高、出油率不理想等问题，严重制约了水酶法稻米油产业的规模化发展。针对这些技术瓶颈，国内科研团队已开展大量研究并取得阶段性突破。未来研究应重点围绕以下几个方面开展：1）通过预处理辅助技术提高出油率，探索适用于工业化生产的低能耗、高效率的预处理方案；2）研发与水酶法提取工艺适配的专用油脂提取设备；3）实现油脂、蛋白质及膳食纤维等组分的同步提取与综合利用；4）深入解析提取过程中乳状液体系的形成机制；5）建立稻米油特征香气成分的鉴定体系，为产品质量控制提供科学依据。上述关键技术的突破可推动我国米糠资源的高值化利用，助力油脂加工技术向绿色节能方向转型升级，具有重要的理论价值与实践意义。

参考文献

[1] 赵春江，马晨，李瑾，等. 丘陵山地水稻机械化技术研究现状与展望[J]. 农业工程学报，2025，41（1）：1-11.
ZHAO C J，MA C，LI J，et al. Research status and prospects of mechanization technology for rice in hilly and mountainous areas[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2025，41（1）：1-11.（in Chinese）

[2] 国家统计局. 关于2024年粮食产量数据的公告[EB/OL]. （2024-12-13）[2025-07-28]. https://www.stats.gov.cn/xxgk/sjfb/zxfb2020/202412/t20241213_1957744.html.

[3] CAPELLINI M C，GIACOMINI V，CUEVAS M S，et al. Rice bran oil extraction using alcoholic solvents：physicochemical characterization of oil and protein fraction functionality[J]. Industrial Crops and Products，2017，104：133-143.

[4] 马宗会，殷宝茹，张海，等. 食品级米糠的研究进展及前景展望[J]. 粮油食品科技，2021，29（5）：11-20.
MA Z H，YIN B R，ZHANG H，et al. Research progress and outlook of food grade rice bran[J]. Science and Technology of Cereals，Oils and Foods，2021，29（5）：11-20.（in Chinese）

[5] 冯俊然，洪滨，山珊，等. 米糠提取物在食品及健康领域中的应用研究进展[J]. 食品科学，2024，45（17）：287-295.
FENG J R，HONG B，SHAN S，et al. Research progress on the application of rice bran extract in food and health fields[J]. Food Science，2024，45（17）：287-295.（in Chinese）

[6] 左英秀，沈军. 稻米加工副产物米糠综合利用的研究[J]. 粮食与食品工业，2020，27（6）：11-14.
ZUO Y X，SHEN J. Studies on comprehensive utilization of rice bran，a byproduct of rice processing[J]. Cereal & Food Industry，2020，27（6）：11-14.（in Chinese）

[7] 余诚玮，邓施璐，温志刚，等. 米糠及其脂肪酶的研究进展[J]. 食品安全质量检测学报，2019，10（2）：297-305.

YU C W，DENG S L，WEN Z G，et al. Research progress of rice bran and its lipase[J]. Journal of Food Safety & Quality，2019，10(2)：297-305.(in Chinese)

[8] 陈国威. 全脂火糠中主要组分的分步提取分离研究[D]. 无锡：江南大学，2014.

[9] 张金建. 米糠功能成分梯度提取及理化特性、抗氧化性研究[D]. 杭州：浙江科技学院，2017.

[10] 中华人民共和国海关总署. 海关统计数据在线查询平台[EB/OL].[2025-07-28]. shttp://stats.customs.gov.cn/.

[11] 中华人民共和国农业农村部. 全国重点农产品市场信息平台[EB/OL].[2025-07-28]. https://ncpscxx.moa.gov.cn/#/queryDataMain/trade item=3&id=2.

[12] 张楚婕，李道明，张佳浩，等. 不同提取方法对米糠油品质的影响[J]. 陕西科技大学学报，2023，41(6)：37-46.
ZHANG C J，LI D M，ZHANG J H，et al. The effect of different extraction methods on the quality of rice bran oil [J]. Journal of Shaanxi University of Science & Technology，2023，41(6)：37-46.(in Chinese)

[13] 关梦真，陈复生，王颖颖. 水酶法提取特色植物油的研究进展[J]. 粮油食品科技，2024，32(6)：84-91.
GUAN M Z，CHEN F S，WANG Y Y. Research advances on aqueous enzymatic extraction of featured vegetable oil[J]. Science and Technology of Cereals，Oils and Foods，2024，32(6)：84-91.(in Chinese)

[14] 陈中伟，丁芬，吴其飞，等. 亚临界丙烷、超临界CO_2及正己烷对米糠油提取品质的对比研究[J]. 中国粮油学报，2017，32(3)：36-41，47.
CHEN Z W，DING F，WU Q F，et al. Comparison research of the quality of rice bran oil extracted by subcritical propane，supercritical CO_2 and hexane[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association，2017，32(3)：36-41，47.(in Chinese)

[15] 潘保辉，殷娇娇，王澍，等. 基于文献计量分析稻米油的研究热点和发展趋势[J]. 中国油脂，2025，50(2)：114-120.
PAN B H，YIN J J，WANG S，et al. Analysis of research hotspots and development trends of rice bran oil based on bibliometric[J]. China Oils and Fats，2025，50(2)：114-120.(in Chinese)

[16] DEVARAJAN S，CHATTERJEE B，URATA H，et al. A blend of sesame and rice bran oils lowers hyperglycemia and improves the lipids[J]. The American Journal of Medicine，2016，129(7)：731-739.

[17] XU D X，HAO J，WANG Z H，et al. Physicochemical properties，fatty acid compositions，bioactive compounds，antioxidant activity and thermal behavior of rice bran oil obtained with aqueous enzymatic extraction[J]. LWT-Food Science and Technology，2021，149：111817.

[18] 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.(in Chinese)

[19] 刘慧敏. 不同植物油微量成分与抗氧化能力的相关性研究[D]. 无锡：江南大学，2015.

[20] 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.(in Chinese)

[21] 曹子伦. 稻米油酶法脱胶工艺及脱胶产物磷脂的性质研究[D]. 武汉：武汉轻工大学，2023.

[22] 徐学兵. 米糠：一种潜在的食用资源[J]. 粮油食品科技，2021，29(5)：5-8.
XU X B. Rice bran：a potential resource for human consumption[J]. Science and Technology of Cereals，Oils and Foods，2021，29(5)：5-8.(in Chinese)

[23] 付尧，张东举，别海. 油莎豆油提取技术及其生物活性研究进展[J]. 食品安全质量检测学报，2025，16(6)：151-160.
FU Y，ZHANG D J，BIE H. Research progress on extraction technology and biological activity of *Cyperue Cyperue esculentust* L. oil[J]. Journal of Food Safety & Quality，2025，16(6)：151-160.(in Chinese)

[24] 曹雪丹，吕霞敏，杨华夏，等. 椪柑籽油提取工艺优化及其抗氧化活性的研究[J]. 中国粮油学报，2023，38(12)：128-136.
CAO X D，LÜ X M，YANG H X，et al. Optimization of extraction process for oil from ponkan (*Citrus reticulata* Blanco) seed and its antioxidant activity[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association，2023，38(12)：128-136.(in Chinese)

[25] 宋亚，王元泽，冯鑫鑫，等. 6种不同方法提取的八月瓜果籽油品质特征研究[J]. 中国粮油学报，2025，40(2)：146-153.
SONG Y，WANG Y Z，FENG X X，et al. Quality characteristics of seed oil extracted from *Akebia trifoliate* fruit by six different methods[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association，2025，40(2)：146-153.(in Chinese)

[26] 杨焕月，王振华，许朵霞，等. 异丙醇提取稻米油动力学特性[J]. 食品科学，2019，40(19)：40-45.
YANG H Y，WANG Z H，XU D X，et al. Kinetics of rice bran oil extraction with isopropanol[J]. Food Science，2019，40(19)：40-45.(in Chinese)

[27] 干淼钰，田方，曹爱玲，等. 超临界流体技术在鱼油加工中的应用研究进展[J]. 中国油脂，2024，49(9)：16-22.
GAN M Y，TIAN F，CAO A L，et al. Research progress on the application of supercritical fluid technology in fish

oil processing[J]. China Oils and Fats，2024，49(9)：16-22.(in Chinese)

[28] 王呈馨，张忠，范柳萍，等. 翅果油超临界CO_2流体萃取工艺优化及其不同提取方法的比较[J]. 中国油脂，2019，44(7)：12-15.
WANG C X，ZHANG Z，FAN L P，et al. Optimization of supercritical CO_2 fluid extraction of *Elaeagnus mollis* Diels seed oil and comparison of different extraction methods[J]. China Oils and Fats，2019，44(7)：12-15.(in Chinese)

[29] 黄沅玮. 超临界流体萃取技术及其在植物油脂提取中的应用[J]. 食品工程，2020(3)：12-15，61.
HUANG Y W. Supercritical fluid extraction technology and its application in the extraction of vegetable oil[J]. Food Engineering，2020(3)：12-15，61.(in Chinese)

[30] 孟雨东，马宇翔，汪学德，等. 超临界CO_2流体提取3种河南木本油料油脂工艺的研究[J]. 粮食与油脂，2021，34(5)：47-50，67.
MENG Y D，MA Y X，WANG X D，et al. Study on supercritical CO_2 fluid extraction of three kinds of woody oleiferous in Henan Province[J]. Cereals & Oils，2021，34(5)：47-50，67.(in Chinese)

[31] 杨瑞金，倪双双，张文斌，等. 水媒法提取食用油技术研究进展[J]. 农业工程学报，2016，32(9)：308-314.
YANG R J，NI S S，ZHANG W B，et al. Summarization on vegetable oil extraction technology by aqueous medium method[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2016，32(9)：308-314.(in Chinese)

[32] 张雅娜，沙莎，马丽媛，等. 不同预处理辅助水酶法提取玉米胚芽油的实验研究[J]. 发酵科技通讯，2025，54(1)：42-47.
ZHANG Y N，SHA S，MA L Y，et al. Experimental study on the extraction of corn germ oil by different pretreatment assisted aqueous enzymatic method[J]. Bulletin of Fermentation Science and Technology，2025，54(1)：42-47.(in Chinese)

[33] 李嘉鑫，魏君锋，陈复生，等. 超声辅助水酶法提取植物油研究进展[J]. 中国油脂，2026，51(2)：19-26.
LI J X，WEI J F，CHEN F S，et al. Research progress on ultrasound-assisted aqueous enzymatic extraction of vegetable oil[J]. China Oils and Fats，2026，51(2)：19-26.(in Chinese)

[34] 王立敏，马文君，孙红波，等. 生物解离大豆过程中形成的乳状液结构[J]. 食品科学，2018，39(12)：67-72.
WANG L M，MA W J，SUN H B，et al. Structural study on emulsion formed during enzyme-assisted aqueous extraction from soybean oil[J]. Food Science，2018，39(12)：67-72.(in Chinese)

[35] 郭鑫，焦博，吴必聪，等. 微波预处理对水酶法提取花生油和花生蛋白得率的影响[J]. 中国食品学报，2025，25(4)：279-288.
GUO X，JIAO B，WU B C，et al. Effect of microwave pretreatment on the yield of peanut oil and peanut protein extracted by aqueous enzymatic extraction[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology，2025，25(4)：279-288.(in Chinese)

[36] 关梦真，陈复生，赵宇辉. 水酶法制取植物油研究进展[J]. 食品与机械，2023，39(12)：185-191.
GUAN M Z，CHEN F S，ZHAO Y H. Research trends on the extraction of vegetable oil by aqueous enzymatic method[J]. Food & Machinery，2023，39(12)：185-191.(in Chinese)

[37] 李鹏飞. 水酶法提取花生油及蛋白质[D]. 无锡：江南大学，2017.

[38] 任燕勤. 乙醇水提法提取菜籽油的工艺研究[D]. 无锡：江南大学，2017.

[39] SUBRAHMANYAN V，BHATIA D S，KALBAG S S，et al. Integrated processing of peanut for the separation of major constituents[J]. Journal of the American Oil Chemists' Society，1959，36(2)：66-70.

[40] SENGUPTA R，BHATTACHARYYA D K. Enzymatic extraction of mustard seed and rice bran[J]. Journal of the American Oil Chemists' Society，1996，73(6)：687-692.

[41] HANMOUNGJAI P，PYLE D，NIRANJAN K. Enzyme-assisted water-extraction of oil and protein from rice bran[J]. Journal of Chemical Technology & Biotechnology，2002，77(7)：771-776.

[42] PANDEY R，SHRIVASTAVA S L. Comparative evaluation of rice bran oil obtained with two-step microwave assisted extraction and conventional solvent extraction[J]. Journal of Food Engineering，2018，218：106-114.

[43] 杨慧萍，王素雅，宋伟，等. 水酶法提取米糠油的研究[J]. 食品科学，2004，25(8)：106-109.
YANG H P，WANG S Y，SONG W，et al. Study on extracting rice bran oil from rice bran by aqueous enzymatic method[J]. Food Science，2004，25(8)：106-109.(in Chinese)

[44] 仇梓冰，刘法显，付磊，等. 超声波辅助水酶法提取米糠油的工艺研究[J]. 食品工业科技，2016，37(9)：250-255.
QIU Z B，LIU F X，FU L，et al. Research of technology of extraction oil from rice bran with ultrasonic assisted aqueous enzymatic[J]. Science and Technology of Food Industry，2016，37(9)：250-255.(in Chinese)

[45] 石钰丰. 小米糠油的提取与微胶囊制备及其理化性质分析[D]. 太谷：山西农业大学，2021.

[46] HAO J，WANG Q Y，LI X Y，et al. Extraction of

structurally intact and well-stabilized rice bran oil bodies as natural pre-emulsified O/W emulsions and investigation of their rheological properties and components interaction [J]. Food Research International, 2023, 164: 112457.

[47] 宋媛媛. 乙醇辅助水酶法提取牡丹籽油工艺研究[D]. 无锡: 江南大学, 2018.

[48] KHADHRAOUI B, UMMAT V, TIWARI B K, et al. Review of ultrasound combinations with hybrid and innovative techniques for extraction and processing of food and natural products[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 76: 105625.

[49] GAO Y H, DING Z S, LIU Y F, et al. Aqueous enzymatic extraction: a green, environmentally friendly and sustainable oil extraction technology[J]. Trends in Food Science & Technology, 2024, 144: 104315.

[50] PENG L, YE Q, LIU X Y, et al. Optimization of aqueous enzymatic method for *Camellia sinensis* oil extraction and reuse of enzymes in the process [J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2019, 128(6): 716-722.

[51] QIAN J Q, TONG J, CHEN Y, et al. Study on lipids transfer in aqueous enzyme hydrolysis soybean protein and oil extraction process [J]. Industrial Crops and Products, 2019, 137: 203-207.

[52] 郝倩, 岳昊. 大豆油水酶法提取技术研究进展[J]. 中国油脂, 2024, 49(9): 23-27, 49.
HAO Q, YUE H. Research progress on aqueous enzymatic extraction technology of soybean oil [J]. China Oils and Fats, 2024, 49(9): 23-27, 49. (in Chinese)

[53] 刘粤龙. 水酶法工艺对花生油品质特性的影响研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2024.

[54] HAO J, ZHANG F R, DECKER E A, et al. Study on the interfacial properties of rice bran oil bodies affecting their physicochemical properties, stability and adsorption behavior at the oil-water interface for the design of precisely emulsified systems[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 148: 109449.

[55] 杨洁, 余佳荣, 喻宁华, 等. 超声预处理辅助水酶法提取油莎豆油的研究[J]. 中国粮油学报, 2025, 40(3): 124-130.
YANG J, SHE J R, YU N H, et al. Research on the extraction of tiger nut oil using ultrasonic pretreatment-assisted enzymatic method[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2025, 40(3): 124-130. (in Chinese)

[56] 龙红杏, 史海明, 姜元荣, 等. 水酶法制取高芝麻素酚芝麻油的工艺优化[J]. 食品与生物技术学报, 2020, 39(9): 68-75.
LONG H X, SHI H M, JIANG Y R, et al. Preparation of high sesaminol sesame oil by aqueous enzymatic method [J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2020, 39(9): 68-75. (in Chinese)

[57] NANTIYAKUL N, FURSE S, FISK I, et al. Phytochemical composition of *Oryza sativa* (rice) bran oil bodies in crude and purified isolates[J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 2012, 89(10): 1867-1872.

[58] ZHANG P J, DI BARI V, BRIARS R, et al. Influence of pecan nut pretreatment on the physical quality of oil bodies[J]. Journal of Food Quality, 2017, 2017(1): 3864126.

[59] 张敏, 许朵霞, 王振华, 等. 水酶法提取米糠油的试验研究[J]. 粮油食品科技, 2021, 29(5): 1-10.
ZHANG M, XU D X, WANG Z H, et al. Research on the enzyme assisted extraction of rice bran oil[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2021, 29(5): 1-10. (in Chinese)

[60] WU L K, WANG L M, QI B K, et al. 3D confocal Raman imaging of oil-rich emulsion from enzyme-assisted aqueous extraction of extruded soybean powder [J]. Food Chemistry, 2018, 249: 16-21.

[61] 赵宇辉, 陈复生, 刘晨, 等. 水酶法提取花生油过程中乳状液性质研究进展[J]. 食品与机械, 2022, 38(8): 222-226.
ZHAO Y H, CHEN F S, LIU C, et al. Advance of progress on emulsion properties in aqueous enzymatic extraction of peanut oil[J]. Food & Machinery, 2022, 38(8): 222-226. (in Chinese)

[62] 张亚靖, 陈复生, 王颖颖, 等. 油脂体的提取方法及其在食品中应用的研究进展[J]. 中国油脂, 2024, 49(8): 131-136.
ZHANG Y J, CHEN F S, WANG Y Y, et al. Research progress on extraction methods and application in food of oleosomes[J]. China Oils and Fats, 2024, 49(8): 131-136. (in Chinese)

[63] 彭瑶瑶, 王千千, 王爱梅, 等. 水酶法提取牡丹籽油的研究[J]. 中国油脂, 2014, 39(6): 12-17.
PENG Y Y, WANG Q Q, WANG A M, et al. Aqueous enzymatic extraction of *Paeonia suffruticosa* seed oil[J]. China Oils and Fats, 2014, 39(6): 12-17. (in Chinese)

[64] 郝佳, 许朵霞, 王振华, 等. 水酶法提取稻米油形成乳状液的破乳技术研究[J]. 中国油脂, 2021, 46(3): 12-17.
HAO J, XU D X, WANG Z H, et al. Demulsification of the emulsion formed during aqueous enzymatic extraction of rice bran oil[J]. China Oils and Fats, 2021, 46(3): 12-17. (in Chinese)

[65] LI P F, ZHANG W B, HAN X, et al. Demulsification of oil-rich emulsion and characterization of protein hydrolysates from peanut cream emulsion of aqueous extraction processing[J]. Journal of Food Engineering, 2017, 204: 64-72.