

## 米糠蛋白的提取、特性、功能复合物及应用研究进展

唐彩云, 张凤姣, 刘金光, 曲亚男, 刘玉茜

### Research Progress on Extraction, Properties, Functional Complexes and Application of Rice Bran Protein

TANG Caiyun, ZHANG Fengjiao, LIU Jinguang, QU Yanan, and LIU Yuqian

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023060168>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 米糠蛋白-阿拉伯木聚糖接枝复合物制备及其功能性质研究

Process Optimization and Functional Properties of Rice Bran Protein-Arabinoxylan Conjugate

食品工业科技. 2020, 41(17): 193-198 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.17.032>

#### 蛋白质多酚多糖三元复合物的结构和功能特性研究进展

Advance in research on the structural and function characteristics of noncovalent interactions of protein, polyphenol and polysaccharide

食品工业科技. 2017(17): 329-334 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2017.17.064>

#### 大米蛋白的提取、特性及其应用的研究进展

Research Progress in Extraction, Properties and Application Status of Rice Protein

食品工业科技. 2020, 41(19): 347-351 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.19.054>

#### 提取方法对银杏蛋白功能特性及抗氧化活性的影响

Effects of Extraction Methods on Functional Properties and Antioxidant Activity of *Ginkgo biloba* Proteins

食品工业科技. 2021, 42(20): 37-43 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020120198>

#### 菜籽饼粕蛋白的提取、功能特性及其在食品中应用的研究进展

Extraction, Functional Properties and Food Applications of Rapeseed Meal Protein Isolates

食品工业科技. 2021, 42(12): 389-397 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020070065>

#### 黑木耳蛋白提取工艺优化及其功能特性研究

Optimization of Extraction Process of *Auricularia auricula* Protein and Its Functional Properties

食品工业科技. 2021, 42(18): 157-166 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020120003>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

唐彩云, 张风姣, 刘金光, 等. 米糠蛋白的提取、特性、功能复合物及应用研究进展 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(12): 367-378. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023060168

TANG Caiyun, ZHANG Fengjiao, LIU Jinguang, et al. Research Progress on Extraction, Properties, Functional Complexes and Application of Rice Bran Protein[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(12): 367-378. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023060168

· 专题综述 ·

# 米糠蛋白的提取、特性、功能复合物及应用研究进展

唐彩云, 张风姣, 刘金光, 曲亚男, 刘玉茜\*

(山东农业大学食品科学与工程学院, 山东泰安 271018)

**摘要:** 米糠作为稻谷加工的主要副产物, 富含油脂、蛋白质及生物活性物质等诸多营养成分。米糠中蛋白质含量约占米糠的 15%~17%, 分为清蛋白、球蛋白、醇溶性蛋白和谷蛋白, 其氨基酸组成接近 FAO/WHO 推荐的模式, 致敏性低, 生物效价高, 是一种优质的植物蛋白资源。米糠蛋白的获取能够提高稻谷的附加值, 在食品、医药领域有着广阔的应用前景。因此, 本文综述了米糠蛋白的提取方法、功能特性及功能复合物, 介绍了米糠蛋白及其复合物在生物活性肽、婴幼儿食品、食品添加剂、营养递送体系等领域的应用现状, 最后提出了未来米糠蛋白的研究挑战, 为米糠蛋白的工业化生产及高值利用提供一定的思路和参考。

**关键词:** 米糠蛋白, 提取方法, 功能特性, 功能复合物

中图分类号: TS210.9

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2024)12-0367-12

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023060168



本文网刊:

## Research Progress on Extraction, Properties, Functional Complexes and Application of Rice Bran Protein

TANG Caiyun, ZHANG Fengjiao, LIU Jinguang, QU Yanan, LIU Yuqian\*

(College of Food Science and Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China)

**Abstract:** As the main by-product of rice processing, rice bran is rich in many nutrients, such as oil, protein, and bioactive substances. The protein content in rice bran accounts for about 15%~17% of rice bran, which is divided into albumin, globulin, gliadin and glutenin with the amino acid composition close to the pattern recommended by FAO/WHO. It is a high-quality plant protein source with low allergenicity and high bio-efficacy. The acquisition of rice bran protein can increase the added value of rice and has broad application prospects in the fields of food and medicine. Therefore, this paper reviews the extraction methods, functional properties and functional complexes of rice bran protein, and the application status of rice bran protein and its complexes in the fields of bioactive peptides, infant food, food additives, nutrition delivery system are also introduced. Finally, the challenge of future research on rice bran protein is proposed. This review provides certain ideas and references for the industrial production and high-value utilization of rice bran protein.

**Key words:** rice bran protein; extraction method; functional properties; functional complexes

米糠是稻谷经过砻谷、碾磨等工序后所得的副产物。我国年产米糠 1000 万吨以上, 是一种产量大、种植面积广的可再生资源<sup>[1]</sup>。米糠虽然只占整个稻米质量的 6%~8%, 但却集中了稻谷 60% 以上的

营养<sup>[2]</sup>。米糠中蛋白质含量约占米糠的 15%~17%, 分为清蛋白、球蛋白、醇溶性蛋白和谷蛋白, 四种蛋白质的含量分别为米糠蛋白总量的 12.5%~43%、3%~36%、1%~5% 和 22%~45%<sup>[3]</sup>。米糠蛋白中可溶

收稿日期: 2023-06-19

基金项目: 国家自然科学基金(32102049); 山东省高等学校青创人才引进计划。

作者简介: 唐彩云(2000-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 粮食储藏, E-mail: 17866708216@163.com。

\* 通信作者: 刘玉茜(1990-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 粮食储藏、植物蛋白化学分析, E-mail: lyq0929@sdau.edu.cn。

性蛋白含量较高,约占70%,与大豆蛋白接近<sup>[4]</sup>。与其他谷物蛋白相比,米糠蛋白的氨基酸种类丰富,其组成接近FAO/WHO所推荐的模式,具有合理的生物效价(2.0~2.5)、低致敏性和高消化率(>90%)<sup>[5]</sup>。但由于米糠蛋白提取率低,工业化生产仍受到限制<sup>[6]</sup>。目前,主要用到的米糠蛋白提取方法主要有碱法、酶法及物理法辅助提取<sup>[7]</sup>。由于米糠蛋白的聚集和二硫键相互作用,米糠蛋白中一些功能性官能团不能暴露出来,导致溶解性较差,而米糠中大量高植酸(约1.7%)会与蛋白相结合,增加了米糠蛋白的提取难度<sup>[8]</sup>。因此,改善米糠蛋白的功能特性从而提高其提取率是目前研究的热点。米糠蛋白的水解产物具有良好的功能性,通过提高蛋白质水解产物的溶解性和乳化性可以扩大其作为功能性成分在多种食品中的应用<sup>[9]</sup>。利用酶催化水解米糠蛋白时,米糠蛋白会被水解成不同链长的小分子多肽,其具有抗氧化、降血压、降血糖、调节免疫、抗癌等多种生理活性<sup>[10]</sup>。米糠蛋白氨基酸组成中赖氨酸和苏氨酸的含量更高,因此可用于婴幼儿食品中<sup>[11]</sup>。米糠蛋白的营养品质高、致敏性低,是食品配料工业中具有竞争力的蛋白替代品,但存在溶解性低的缺陷<sup>[12]</sup>。因此多用来复配其他物质制备成复合物进行改善。利用米糠蛋白持水性、乳化性,以及抗氧化、抗癌等功能特性,可与其他材料复合,制备米糠蛋白基的包埋载体<sup>[2]</sup>。目前对米糠蛋白营养价值与功能特性的研究已较完善,利用米糠蛋白的低过敏性、抗癌活性和保健功能等开发药品、功能性食品、添加剂、婴幼儿奶粉等是食药领域的开发热点。

尽管米糠蛋白有巨大的市场应用前景,但全球每年约90%的米糠都被直接用作畜禽饲料,综合利用水平率较低<sup>[13]</sup>。因此,本文系统地综述了米糠蛋白提取方法的最新研究进展,对米糠蛋白的功能特性以及在生物活性肽、婴幼儿食品、食品添加剂、纳米乳液、微胶囊、可食用膜等食品领域中的应用进行了阐述,对米糠蛋白未来的发展前景做出了展望,旨在为实现米糠蛋白的高值利用提供依据和参考。

## 1 米糠蛋白的组成

米糠蛋白根据蛋白质的溶解度和可萃取性分为清蛋白、球蛋白、醇溶性蛋白和谷蛋白,四种蛋白质分别可溶于水、盐溶液、醇溶液和碱溶液<sup>[6]</sup>。在米糠蛋白中清蛋白含量最高,约占40%,主要由分子质量52.85、76.51、95.43 kDa的亚基构成,其持水性是这四种储存蛋白中最高的。由于其水溶性较好,最易被人体吸收利用,具有较高的生物价值<sup>[14]</sup>。米糠球蛋白由分子质量76.51和103.12 kDa的亚基构成,自身携带净电荷,易溶于盐溶液,约占米糠蛋白的35%,不含赖氨酸,但含有一定量的胱氨酸和蛋氨酸<sup>[15]</sup>。醇溶蛋白是米糠蛋白中含量最少的蛋白,约占米糠蛋白的4%左右,由分子质量14 kDa的亚基构成,易溶于醇溶液,几乎不溶于水<sup>[16]</sup>。谷蛋白是由分

子质量为14.00、20.00、36.29 kDa的亚基构成,约占米糠总蛋白质的11%~27%,可溶于强碱溶液,由于含有二硫键和糖苷键,结构紧密,因此难以从麸皮中提取<sup>[17]</sup>。

## 2 米糠蛋白的提取方法

### 2.1 碱法

碱法提取是最常用的一种提取方法,将米糠置于pH9~12的强碱环境下,碱液能够破坏蛋白质分子的氢键、酰胺键和二硫键,从而使米糠蛋白被分离出来<sup>[8]</sup>。在碱法提取蛋白操作过程中,蛋白质提取率受温度及pH影响较大,当pH一定时,随着温度的升高蛋白质提取效率也升高,但由于蛋白质在高温条件下容易发生热变性等因素的影响,蛋白质的含量会有所下降,碱法提取米糠蛋白的提取率与pH和温度的影响成正相关,当温度由30℃升高至75℃时,提取效率由21%增加至48%,蛋白质含量则由79%下降至71%<sup>[18]</sup>。虽然蛋白质的提取效率随着pH的增加而上升,但过高的pH会改变蛋白质的营养特性并伴随有毒物质的产生<sup>[19]</sup>。蛋白质的半胱氨酸和丝氨酸残基可以转化为脱氢丙氨酸,脱氢丙氨酸随后可转化为赖氨酸,使得蛋白质的营养特性降低<sup>[9]</sup>。通过碱法提取的弊端是提取的蛋白质颜色往往较深,风味不佳,结构不稳定,还会增加米糠蛋白发生美拉德反应的机率<sup>[20]</sup>。

### 2.2 酶法

近年来,酶法提取米糠蛋白应用逐渐较多,酶法能够克服碱性环境对蛋白质的影响,在提高蛋白质提取率的同时,纯度也有所提高<sup>[17]</sup>。在中性或者弱碱性环境下,酶能够使蛋白质暴露出来,弱碱条件减少了碱性环境对蛋白质的损害作用,使蛋白质的营养价值尽可能多地保留,还可改善天然蛋白质的理化和感官特性<sup>[21]</sup>。酶法提取蛋白质主要应用的酶有蛋白酶、糖酶和植酸酶。

不同的酶提取原理不同。蛋白酶可将蛋白质与其他物质相连的复合物中分离开来,使蛋白酶的回收率升高,而且将米糠蛋白水解成短链的肽使得蛋白质的消化利用率也升高。糖酶通过分解细胞壁,使蛋白质更多地从糖基质中释放出来,从而提高蛋白质的提取效率<sup>[22]</sup>。由于米糠蛋白中分子间二硫键的交联及与植酸及其盐类结合引起蛋白结构改变,导致形成不溶性的植酸-蛋白质复合物,使得蛋白质的提取存在一定困难。植酸酶可以通过破坏植酸盐与蛋白质的结合作用,从而增加蛋白质的提取效率和蛋白的纯度<sup>[23]</sup>。

糖酶主要包括纤维素酶、半纤维素酶、果胶酶、木聚糖酶、淀粉酶等。纤维素与半纤维素是米糠中主要的碳水化合物,因此使用最多且提取效果最好<sup>[21]</sup>。在最适温度和pH下,单独使用一种糖酶提取米糠中的蛋白质时,纤维素酶的提取效果高于果胶酶、淀粉酶、木聚糖酶<sup>[24-25]</sup>。除单独使用糖酶外,植

酸酶与糖酶的复合可以通过酶解细胞壁, 阻止植酸与蛋白质的结合促进蛋白质的释放, 来进一步提高米糠蛋白的提取效率。植酸酶与木聚糖酶联合使用可将蛋白质的提取率由 57% 升高至 74.60%<sup>[26]</sup>。类似地, 在同时使用  $\alpha$ -淀粉酶、纤维素酶和植酸酶时, 当添加量分别为 20、300 和 50 U/g 的条件下, 米糠蛋白的提取效率达到了 80.06%, 它们可以有效地切割多糖基质内的连接, 从而释放出更多的细胞间蛋白, 蛋白含量远高于单独使用一种酶<sup>[27]</sup>。与糖酶类似, 蛋白酶的单一提取效果也不及多酶复合。王晓雅等<sup>[28]</sup>使用碱性蛋白酶提取米糠中的蛋白质, 在加酶量 2.50% 的条件下, 米糠蛋白的提取效率可达 75.42%。利用双酶复合法提取米糠蛋白, 在碱性蛋白酶与中性蛋白酶的用量比为 2:1, 加酶总量为 75% 的最佳条件下, 米糠蛋白的提取率可达 84.63%, 比单独使用蛋白酶的提取率明显升高<sup>[29]</sup>。

### 2.3 物理法辅助提取

单独使用碱法提取蛋白的效率并不高, 且存在一定的缺陷。食品级酶制剂具有反应条件温和、产物安全性高的优势, 但酶制剂成本较高。单独使用物理法提取米糠中的蛋白质提取效率低、对设备的要求高, 因此物理法一般作为辅助手段与化学法或者酶法连用以提高蛋白质的提取效率。如表 1 所示, 物理法辅助碱法和酶法, 对比单独使用一种, 提取方式更温和, 提取率明显提高。因此目前对米糠蛋白的提取工艺仍在持续优化中。

物理法提取蛋白质主要应用超声、微波、胶体磨、均质、高速混匀、高压、冻融、亚临界萃取等方式。超声处理是最有前途的辅助提取蛋白质的物理方法之一。超声能够破坏米糠的刚性结构, 酶解和碱

性条件会进一步使米糠的纤维结构变得疏松多孔, 从而有助于米糠蛋白的释放, 因此能够显著提高米糠蛋白的提取率。采用超声(260 W, 20 min)辅助碱法提取米糠蛋白, 在 pH 为 9.5、碱提时间为 2 h 时, 蛋白质提取率最大为 75.7%<sup>[30]</sup>。除了使用超声辅助碱法外, 超声辅助酶法同样可以释放更多蛋白质, 米糠蛋白包含在植物细胞壁内的蛋白质体中, 在完全溶解和提取细胞之前, 可通过物理手段破坏细胞壁, 为酶催化提供合适的环境或增加蛋白质溶解度的环境, 提高米糠蛋白的提取效率。采用超声波(300 W, 15 min)辅助酶法提取米糠蛋白, 在纤维素酶添加量为 0.50%, 提取时间为 5 h 的条件下蛋白质的提取率为 63.11%, 显著高于单独使用酶法提取<sup>[31]</sup>。

胶体磨、均质和高速混匀中的剪切力可破坏细胞结构, 冻融过程中冰晶的形成会破坏细胞膜的结构, 高压则会造成细胞破裂, 而微波通过直接加热导致样品基质内部的温度和压力升高, 使目标化合物有效地转移到溶剂中, 这些手段均可促进蛋白质的释放<sup>[32]</sup>。采用响应面优化物理法辅助碱法提取米糠蛋白, 发现胶体磨超声辅助碱法提取米糠蛋白, 提取率可达 90.84%<sup>[33]</sup>。利用反复冻融法辅助弱碱法提取米糠蛋白, 将脱脂米糠置于 -20 °C 冷冻 4 h, 反复冻融 4 次, 在 45 °C 下提取 150 min, 比单采用弱碱法的提取率提高了 11.49%<sup>[34]</sup>。单独高压处理蛋白提取率最高为 11.10%, 而高压加混合酶的提取率可达 66.3%<sup>[35]</sup>。Phongthai 等<sup>[36]</sup>以及 Bandyopadhyay 等<sup>[37]</sup>采用微波辅助提取米糠蛋白, 其蛋白提取效率比碱性法分别提高了 33.18% 和 21.1%。联合超微粉碎和超声波提取米糠蛋白, 优化米糠蛋白最佳提取工艺, 在料液比 1:57(g/mL)下, 超声 9 min 提取

表 1 米糠蛋白的提取方法

Table 1 Extraction methods of the rice bran protein

米糠蛋白提取方法	提取条件	提取率(%)	参考文献
碱法提取			
pH=9.5	0.5 mol/L NaOH, pH=9.5, 1 h, 30~75 °C	48	[18]
pH=9	0.1 mol/L NaOH, pH=9, 2 h, 液料比10:1	56	[24]
物理法辅助碱法提取			
超声+碱法	超声260 W, 20 min, pH=9.5, 2 h	75.7	[23]
反复冻融+碱法	冻融4次, pH=9.5, 2.5 h, 45 °C, 料液比1:15,	63.07	[34]
超声+微波+碱法	超声600 W, 微波500 W, 20 min, 料液比1:40, pH=9	86.94	[10]
胶体磨+超声+碱法	米糠粒径40目, 超声69 W, 40 min, 料液比1:20, pH=9	90.84	[33]
蒸汽闪爆	2.10 MPa, 210 s	65.6	[40]
联合预处理	0.9wt%硫酸浸泡90 °C, 300 W超声30 min	72.8	[38]
酶法提取			
植酸酶	植酸酶: 2.5 U/g 3 h, 55 °C, pH=5.6	42.89	[24]
果胶酶	酶用量4%, 3 h, 50 °C, pH=3.8, 料液比1:10	48.70	[19]
木聚糖酶	酶用量4%, 3 h, 55 °C, pH=4.5, 料液比1:10	50.10	[19]
纤维素酶	酶用量3%, 3 h, 50 °C, pH=5, 料液比1:10	58.30	[19]
物理法辅助酶法提取			
超声+纤维素酶	超声功率300 W, 15 min, 纤维素酶0.5%, pH=5, 5 h, 60 °C, 料液比1:9	63.11	[26]
高压+混合酶	500 MPa, 淀粉酶22000 units, 蛋白酶12000 units, 45 °C, 3 h, 料液比1:10	66.3	[35]

4 h, 米糠蛋白提取率比传统碱溶酸沉法提高了 41.62%<sup>[38]</sup>。Zhang 等<sup>[39]</sup>通过联合预处理(0.9wt% 硫酸浸泡 90 °C, 300 W 超声 30 min), 蛋白质提取率达到 72.8%。由于稀硫酸浸泡有助于超声处理松缓或打开生物质结构, 从而促进溶剂对蛋白质的可及性。

除了以上所述的物理手段外, 亚临界水处理也可应用于米糠蛋白的提取当中。Chaisuwan 等<sup>[40]</sup>利用亚临界水辅助碱法和酶解提取法提取米糠蛋白, 发现酶解提取物具有一种新的蛋白质和抗氧化来源, 可用于功能性食品和饮料的开发。蒸汽闪爆处理也可提高米糠蛋白的提取率和功能特性, 在 2.10 MPa、210 s 条件下, 提取率增加到 65.60%<sup>[41]</sup>, 且蒸汽闪爆处理后蛋白质的溶解度受温度的影响程度降低, 乳化性、持水性相应提高<sup>[42]</sup>。

综上所述, 提取米糠蛋白的不同手段, 相比较而言, 碱法提取效率高、方便快捷, 但提取的蛋白质质量较差, 且易发生美拉德反应<sup>[6]</sup>。酶法能改善碱性环境对蛋白质的影响, 提取效率高, 蛋白质的质量好, 但成本较高<sup>[7]</sup>。物理法对食品营养成分破坏低、经济实用, 应用范围更广, 经过物理法辅助后蛋白质的提取效率和功能特性都有所提高。

### 3 米糠蛋白的功能特性

米糠蛋白含有丰富的营养物质, 含有人体必需的 8 种必需氨基酸, 衡量食品中蛋白质质量优劣的指标主要是蛋白质含量的高低、必需氨基酸的种类及含量、在人体内消化吸收和利用率<sup>[43]</sup>。米糠蛋白的氨基酸组成如表 2 所示<sup>[7]</sup>。

表 2 米糠蛋白与其他蛋白质的氨基酸组成分析  
(g/100 g 蛋白质)

Table 2 Analysis of the amino acid composition of rice bran protein and other proteins (g/100 g protein)

氨基酸	FAO/WHO 推荐模式	米糠蛋白	大米蛋白	玉米蛋白	鸡蛋蛋白
赖氨酸	5.50	5.80	4.00	2.00	5.60
苏氨酸	5.50	3.90	3.50	4.10	5.20
色氨酸	1.00	1.60	1.70	0.60	1.60
蛋氨酸+半胱氨酸	>3.50	3.90	3.90	3.00	6.30
赖氨酸	5.00	5.50	5.80	5.70	6.80
亮氨酸	7.00	8.40	8.20	14.60	9.30
异亮氨酸	4.00	4.50	4.10	4.20	5.00
苯丙氨酸+酪氨酸	>6.00	11.10	10.30	8.40	5.60

对比米糠蛋白与大米蛋白、玉米蛋白和鸡蛋蛋白的氨基酸组成后发现, 米糠蛋白中赖氨酸、蛋氨酸含量明显高于玉米蛋白, 可以与鸡蛋蛋白相媲美。米糠蛋白的生物效价可达到 2.00~2.50, 营养价值丰富, 可与鸡蛋蛋白和牛乳蛋白相比拟<sup>[44]</sup>。因此, 米糠蛋白是理想的蛋白质强化剂和功能蛋白。

如表 3 所示, 不同的食品所侧重的米糠蛋白的功能性质不同。通过研究米糠蛋白的功能特性, 有助于更好地将米糠蛋白的优势应用于各领域中, 从

而实现米糠资源的充分利用, 有助于增加其产品附加值。

表 3 米糠蛋白在不同食品中所发挥的功能特性  
Table 3 Functional characteristics of rice bran protein emphasized by different foods

食品类型	米糠蛋白发挥的功能特性	对食品品质的改善作用	参考文献
饮料等液体溶液	溶解性	增加可溶性营养物质含量, 增加澄清透明度, 保持粘度	[45]
乳制品及肉制品	乳化性	防止水油分离, 保持产品的稳定性	[46]
	持水性	增加肉制品的弹性	
油炸食品以及面制品	吸油性	增加油炸制品的表皮酥脆感, 增加面制品的弹性	[47]
啤酒、烘焙食品	起泡性	作为发泡剂使用	[48]

#### 3.1 溶解性

蛋白质的溶解性影响蛋白质的其它功能特性, 例如蛋白质的乳化性、起泡性等。溶解度低的蛋白质很难大面积地应用在食品工业中, 因此研究改善米糠蛋白的溶解性对扩大米糠蛋白的应用范围具有重要的意义。

影响蛋白质溶解性的因素有很多, 如蛋白的电荷分布、粒径大小、pH、温度、离子强度等。研究发现, 米糠蛋白的溶解性随着 pH 的增大而升高, 溶解性最高可达 75%<sup>[49]</sup>。酶对米糠蛋白溶解性的影响大于 pH, 当使用酶处理米糠蛋白时其溶解性显著增大, 最高可达 91.83%<sup>[50]</sup>。王长远等<sup>[51]</sup>研究了干热处理对米糠蛋白溶解性的影响, 结果表明, 溶解性在 90 °C 时达到最高, 超过 100 °C 后溶解度下降, 主要是因为高温会使蛋白质的空间构象发生改变, 破坏了蛋白质中肽键的特定结构, 使得分子内部的一些非极性基团暴露出来, 从而导致其溶解度的下降。超声等不同物理手段处理也能影响蛋白的溶解度。采用超声辅助木瓜蛋白酶改性技术提取米糠蛋白, 在酶添加量 2.5 g/100 mL、酶反应时间 3 h、pH7、酶反应温度 50 °C 的条件下米糠蛋白溶解性增强<sup>[52]</sup>。郑丽慧等<sup>[53]</sup>通过研究发现超声波、超声波辅助酶法均可以改善米糠蛋白的溶解性, 其中超声波辅助酶法处理后米糠蛋白的溶解性最高。此外, 酶法改性对米糠蛋白溶解度也有一定的改善作用。胰蛋白酶在不同水解度下(1%、3%、7%)均可显著提高米糠蛋白的溶解性, 在水解度 7% 时的溶解性最高<sup>[54]</sup>。

#### 3.2 乳化性和起泡性

乳化性和起泡性都属于蛋白质的界面性质, 是蛋白质能够在油水界面上形成连续相的能力。蛋白质能在界面上吸附、降低界面张力, 因此蛋白质能够作为表面活性剂和泡沫稳定剂使用<sup>[55]</sup>。乳化性和起泡性的高低, 决定了其在食品领域中的应用范围。根据分散相的不同可将乳液分为两类, 水包油(O/W)型和油包水(W/O)型。由于水油之间存在界面张力, 因此乳液在热力学上是不稳定的。加入蛋白质降低不

同食品间表面张力,能够增加产品的体积还能起到酥松的作用,海绵蛋糕、冰淇淋、奶油等应用的都是这一原理<sup>[56]</sup>。米糠蛋白具有良好的水和油的结合能力,在高糖、高盐浓度下具有良好的乳化潜力。研究表明,蛋白质乳化性的高低可以通过一定的加工处理有所改变<sup>[53]</sup>。在实际应用中可以根据食品所需功能特性选择合适的改性方式,从而获得最佳的产品。

以乳化性为指标,将米糠蛋白碱法提取、微波与酶法改性相联合,在最佳的提取条件下,米糠蛋白质乳化稳定性提高了 84.12%<sup>[57]</sup>。夏宁等<sup>[58]</sup>通过研究喷射蒸汽处理对天然米糠蛋白和热稳定米糠蛋白的影响后发现,喷射蒸汽处理可以提高米糠蛋白的乳化性和起泡性。超声处理同样可以提高米糠蛋白的乳化性和起泡性。王长远等<sup>[59]</sup>通过超声处理米糠蛋白后发现,米糠蛋白的乳化性和起泡性分别提高了 82.28% 和 36.12%。孙靖辰<sup>[60]</sup>对比了超声处理制备的米糠蛋白和未经改性处理的米糠蛋白,发现其乳化性、起泡性、泡沫稳定性都有一定的提高。此外,采用静高压联合碱性蛋白酶对米糠蛋白进行改性,米糠蛋白的溶解性、乳化性、乳化稳定性、起泡性和泡沫稳定性均得到改善<sup>[61]</sup>。

### 3.3 吸水性和吸油性

蛋白质吸水性和吸油性决定了蛋白质在烘焙食品、饮料和肉制品等食品中的应用价值。高持水性的蛋白质能够减少水分损失,有助于保持烘焙食品的新鲜度和湿润的口感<sup>[62]</sup>。研究发现蛋白质吸水性受多种因素的影响,分子大小、形状、空间构型、脂质、碳水化合物的含量等都会影响蛋白质的吸水能力<sup>[63]</sup>。蛋白质的吸油性在食品生产中的应用也十分广泛,香肠、蛋黄酱、沙拉酱等产品就需要较高的吸油能力。另外,持油性高的植物蛋白能够作为肉类的替代品或补充剂,可以增强风味和口感,对开发素肉产品具有重要意义。吸水性和持油性的提高可改善米糠蛋白的应用限制,拓展其利用空间。Zhang等<sup>[64]</sup>用碱性蛋白酶提取米糠蛋白,经分析后发现,所制得的米糠蛋白其吸水性和吸油性良好。超声处理也可提高米糠蛋白的吸油能力,最高可将米糠蛋白的乳化稳定性和吸油能力分别提升 16.95% 和 10.77%。

## 4 米糠蛋白功能复合物

### 4.1 米糠蛋白与多糖复合物

蛋白质和多糖在食品和制药工业中具有广泛的应用,在改善质地、增加稳定性和营养方面具有独特的作用。研究发现向米糠蛋白中添加亚麻籽胶,能提高米糠蛋白产品的质地和感官特性。通过探究米糠蛋白/亚麻籽胶凝聚层在不同条件下的流变性质,发现通过控制 pH 和二者的比例可在一定程度上改善复合物的质地,且复合物制备条件还可应用于其他复合物中<sup>[65]</sup>。将米糠蛋白经葡萄糖糖基化改性处理后制备的米糠蛋白-壳聚糖复合膜,能够有效改善米糠蛋白膜阻隔性、耐水性差等问题<sup>[66]</sup>。米糠蛋白与阿

拉伯木聚糖在湿热条件下形成的接枝复合物,其持水性相比米糠蛋白有所提高,乳化性和乳化稳定性也有所改善<sup>[67]</sup>。

### 4.2 米糠蛋白与多酚复合物

蛋白质与多酚在食品体系中相互作用可以改善蛋白质的结构特征和功能特性。表没食子儿茶素没食子酸酯(EGCG)与米糠蛋白之间存在较强的相互作用,形成不发光的基态化合物,影响色氨酸残基在空间结构中所处的微环境<sup>[68]</sup>。EGCG 引起米糠蛋白荧光猝灭现象,主要以静态猝灭为主。二者的结合常数、热力学参数、结合距离等均证明二者之间具有很强的相互作用。在米糠清蛋白与 EGCG 的非共价反应中,EGCG 可以改善米糠清蛋白中几个必需氨基酸的热稳定性,同时 EGCG 的热稳定性也能得到一定程度的提高<sup>[69]</sup>。拉曼光谱分析荞麦多酚对米糠蛋白结构的影响,发现随着荞麦多酚添加量的增加,米糠蛋白二级结构中  $\alpha$ -螺旋含量逐渐降低,无规则卷曲含量逐渐增加, $\beta$ -折叠含量呈现先增加后降低的变化趋势。赖氨酸及色氨酸先趋于“暴露式”后趋于“包埋式”,荞麦多酚的添加使米糠蛋白二硫键由 t-g-t 构型和 g-g-t 构型逐渐转变为 g-g-g 构型<sup>[70]</sup>。荞麦多酚与米糠蛋白的交互作用可部分破坏米糠蛋白分子间的二硫键,降低米糠蛋白分子间作用,从而增强米糠蛋白结构的稳定性。

EGCG 与米糠蛋白通过氢键、范德华力、疏水作用力结合可提高米糠蛋白的持水性、乳化性、起泡性,二者之间的相互作用不仅会改善蛋白质的功能性质,还会影响体外消化性质<sup>[71]</sup>。吴伟等<sup>[72]</sup>研究发现 EGCG 会抑制米糠蛋白的体外胃蛋白酶的消化率,这可能是由于 EGCG 与米糠蛋白之间通过非共价作用(氢键、范德华力、疏水作用)和共价键(二硫键、非二硫键)形成凝聚体,掩蔽了米糠蛋白谷氨酸亚基的降解作用,使得抗氧化肽的比例增加,消化产物的自由基清除能力和金属螯合能力均会上升。该复合体系的消化性质,为米糠蛋白营养特性的评价和相关产品的开发提供了参考。

### 4.3 米糠蛋白与蛋白质复合物

米糠蛋白除可与多糖反应形成复合物可以改善蛋白质功能特性外,还可与其他蛋白质等化合物相结合。米糠蛋白与乳清蛋白形成的复合物具有良好的凝胶特性,可用于婴幼儿/成人的功能性食品中<sup>[73]</sup>。付薇<sup>[71]</sup>使用碱性蛋白酶对米糠蛋白及乳清蛋白进行限制性水解,采用转谷氨酰胺酶法对水解后的米糠蛋白、乳清蛋白进行交联,对制备的米糠蛋白-乳清蛋白改性接枝物进行表征后发现接枝物的营养特性、热稳定性等较米糠蛋白有了很大幅度的提高,为蛋白质的合成提供了一定的理论依据。

## 5 米糠蛋白的应用

米糠蛋白作为一种来源丰富的植物蛋白资源,通过研究和改善米糠蛋白的功能特性从而使米糠蛋

表4 米糠蛋白在食药领域中的应用

Table 4 Application of the rice bran protein in field of food and medicine

米糠蛋白的应用	发挥的作用	参考文献
生物活性肽		
抗氧化活性肽	作为天然抗氧化剂用于大体积的散装油和乳液模型中	[74-75]
抑制二肽基肽酶-IV活性肽	预防或者治疗2-型糖尿病	[76]
ACE抑制活性肽	血管舒张和降压作用	[77-78]
类阿片样拮抗活性肽	镇定消炎,食品源的阿片样拮抗肽副作用小	[81]
婴幼儿食品		
米糠蛋白配方乳粉	不含抗营养因子和致敏性成分	[83]
米糠蛋白粉	改善复合蛋白粉的消化率、生物学效价和蛋白质净利用率	[84]
食品添加剂		
乳化剂	牛乳复合饮料、乳化肠:改善产品性能,增加营养和特有的风味	[85-86]
营养增强剂	饼干、蛋糕:改善风味和质地,又能增加产品的附加值	[46]
发泡剂	低脂蛋糕:代替鸡蛋白制成蛋白发泡粉,可发挥良好的发泡作用	[47]
风味增强剂	经蛋白酶水解和脱酰胺作用后作为谷氨酸类风味增强剂	[24]
可食性膜	含有1%葡萄柚籽提取物的米糠蛋白膜包裹的草莓,货架期延长	[88]
	米糠蛋白鼠尾草酸复合膜,自由基清除活性、抗氧化活力显著提高	[89]
营养递送体系		
乳剂	米糠蛋白-儿茶素复合物乳液;亚麻籽油(O/W型)乳液;米糠蛋白-绿原酸复合乳液;米糠蛋白水解物-阿魏酸乳液;粒径小、分布均匀、界面蛋白含量高	[92-95]
纳米乳剂	充当乳化层,包埋 $\beta$ -胡萝卜素	[96]
	充当乳化层,包埋槲皮素	[97]
纳米颗粒	抗溶剂沉淀法包埋姜黄素	[99]
	溶剂蒸发的单一乳化程序包埋阿霉素	[90]
微胶囊	米糠蛋白和麦芽糊精复合壁材包埋嗜酸乳杆菌La-5	[101]
	麦芽糊精和米糠蛋白复合壁材包埋 $\beta$ -胡萝卜素	[102]
	米糠蛋白-牛血清白蛋白-角叉菜胶复合壁材包埋丁香酚	[103]
	米糠蛋白原纤维和黄原胶复合壁材包埋鱼油	[104]
	米糠蛋白-亚麻籽胶的复合壁材包埋香兰素	[105]

白能够广泛地应用于各领域之中。如表4所述,米糠蛋白的应用主要集中在生产活性多肽、婴幼儿乳粉、食品添加剂、可食性膜、纳米乳液和微胶囊等方面。

### 5.1 在活性多肽方面的应用

利用酶催化水解米糠蛋白时,米糠蛋白会被水解成不同链长的小分子多肽,通过分离可制成不同活性的多肽。多肽可调节机体代谢、增强机体的防御功能,具有抗氧化、降血压、降血糖、调节免疫、抗癌等多种生理活性,根据发挥活性的功能区别可以将米糠肽细分为抗氧化肽、降血压肽、阿片样拮抗肽、免疫调节肽等。米糠肽具有天然安全、效果明显等优点,应用前景广阔<sup>[74]</sup>。

Ladda等<sup>[75]</sup>使用木瓜蛋白酶和胰蛋白酶水解天然和改性的米糠蛋白,发现胰蛋白酶水解的改性米糠蛋白具有最高的抗氧化活性,可作为一种天然抗氧化剂应用于食品等各个领域。此外,米糠蛋白肽的抗氧化能力也与水解程度有关。研究发现随着米糠蛋白水解度的增加,米糠蛋白的抗氧化能力也相应增强,将其加入水包油乳液中可延缓脂质的氧化速度,增长保质期,因此米糠蛋白可以作为一种有效的天然抗氧化剂用于大体积的散装油和乳液模型中<sup>[76]</sup>。

除抗氧化活性肽外米糠蛋白中还有多种生物活

性肽,如Hatanaka等<sup>[77]</sup>使用脲酶G和生物吡酶SP酶解米糠蛋白成功制备了具有抑制二肽基肽酶-IV(DPP-IV)活性的米糠蛋白肽,并通过体外实验确定了抑制肽的序列为Leu-Pro和Ile-Pro,且证明对预防或者治疗2-型糖尿病具有巨大的潜力。米糠蛋白肽还具有显著的ACE抑制活性。血管紧张素转换酶(Angiotensin I-converting Enzyme, ACE)是一类锌蛋白酶,研究中常用抑制ACE的手段达到降压的效果。Boonla等<sup>[78]</sup>研究米糠蛋白肽对两肾一夹(2K-1C)型肾血管高血压大鼠的血管舒张和降压作用,实验大鼠用米糠蛋白肽灌胃,对照大鼠用蒸馏水灌胃,6周后发现,实验大鼠血压显著降低,ACE含量降低。证明米糠蛋白肽可以通过抑制ACE活性、促使血管舒张从而起到降压的作用。张玲瑜等<sup>[79]</sup>通过优化酶解条件,以ACE抑制率为指标,在最优酶解工艺条件下所得酶解物ACE抑制率为73.15%±0.64%,且酶解物含有丰富的疏水性氨基酸(23.09 g/100 g)。米糠蛋白酶解物的ACE抑制活性受活性肽的分子量大小的影响。邹智鹏等<sup>[80]</sup>采用碱性蛋白酶水解小米米糠蛋白,发现<1 kDa肽组分可能作为功能性成分用于降血压相关的功能食品和保健品的开发,因此,小米米糠蛋白水解物是降血压功能食品开发的优良原料。Kannan等<sup>[81]</sup>研究了米糠

肽水解物的抗癌活性,以热稳定脱脂米糠为原料,用食品级 Alcalase 酶解后经胃肠液处理,并按不同分子量进行分级。结果表明,低于 5 kDa 的米糠水解肽对结肠癌、乳腺癌、肺癌和肝癌细胞都具有抑制生长的作用。此外,米糠蛋白肽还具有类阿片样拮抗活性,用胰蛋白酶水解米糠可溶性蛋白,在最适条件下,胰蛋白酶水解产物具有显著的类阿片样拮抗活性。相比于传统的阿片类药物副作用来讲,食品源的阿片样拮抗肽副作用小,应用前景更加广阔<sup>[82]</sup>。

## 5.2 在婴幼儿食品中的应用

很多植物源、动物源蛋白中都具有抗营养因子,如大豆中含有有害人体健康的蛋白酶抑制素和凝血素、牛奶中存在  $\beta$ -乳球蛋白,它们能引起某些特殊人群过敏或者中毒。其中牛奶、花生和鸡蛋是导致儿童过敏的主要食物。婴幼儿对于抗营养成分更为敏感,因此对婴幼儿食品的原料要求更加严苛。

现有报道未见米糠蛋白含有抗营养成分,也不含致敏性成分,未见有婴幼儿对稻米过敏的相关报道,因此米糠蛋白以其独特的氨基酸组成、良好的功能特性及高消化率和低致敏性可作为优质蛋白质原料应用于婴幼儿食品中<sup>[83]</sup>。Khan 等<sup>[84]</sup>将米糠蛋白按照配方与多种谷物粉、植物油、奶粉、维生素、矿物质等制备成粉末状产品,通过理化分析、感官评价及可接受度分析后发现,该配方乳粉能够满足婴幼儿对能量的需求,具有经济、营养、成分好的优点。刘颖等<sup>[85]</sup>以米糠蛋白和奶粉为原料,通过计算得出蛋白质互补效果最好的复合米糠蛋白粉配方。通过大鼠生长实验和代谢实验对复合米糠粉进行营养价值评价和酪蛋白比较分析,发现复合蛋白粉的消化率、生物学效价和蛋白质净利用率都得到了改善,与酪蛋白接近,证实了米糠蛋白营养价值丰富,能够作为一种优质的蛋白质应用于婴幼儿食品中。

## 5.3 在食品添加剂中的应用

米糠蛋白具有乳化性和发泡性,营养价值丰富,可作为乳化剂、营养增强剂、发泡剂应用于食品中,能够改善产品性能,增加营养和特有的风味<sup>[15]</sup>。米糠蛋白作为乳化剂增强乳制品的乳化稳定性,增加营养和特有的风味。向牛乳中添加米糠蛋白研制复合乳饮料,在米糠蛋白添加量为 0.70% 配方下制的复合乳饮料口感细腻,乳化稳定性达到 97.52%,且营养丰富,口感佳<sup>[45]</sup>。向乳化香肠中添加米糠蛋白,当米糠蛋白的添加量为 5% 时,香肠硬度降低,弹性增加,制得的香肠肠衣与肉馅结合好、坚实,香气浓郁<sup>[46]</sup>。米糠蛋白也可直接作为一种营养添加剂应用于饼干和蛋糕中,既可以改善风味和质地,又能增加产品的附加值<sup>[47]</sup>。在低脂蛋糕中利用米糠蛋白代替鸡蛋蛋白制成蛋白发泡粉,可发挥良好的发泡作用<sup>[48]</sup>。米糠蛋白经蛋白酶水解和脱酰胺作用后,产生大量的谷氨酰胺,可作为谷氨酸类风味增强剂<sup>[24]</sup>。

## 5.4 在可食性膜中的应用

涂膜可以降低果实的呼吸作用,减少营养物质的损耗,从而能够保持果实的硬度和新鲜饱满程度,并减少由病原菌侵染造成的食品腐败。为了避免传统膜中添加的化学物质可能对人体造成的危害,故目前研究人员以多糖、蛋白质为原料,利用分子间的相互作用形成一种可食性膜,该膜具有绿色环保、可降解、无污染等多种优点,在食品包装等领域应用广泛<sup>[86]</sup>。可食性膜的成膜材料主要有大豆分离蛋白、小麦面筋蛋白、胶原蛋白、玉米醇溶蛋白、酪蛋白、明胶等<sup>[87]</sup>。而米糠蛋白的乳化性、溶解性和稳定性与大豆分离蛋白相似,所制成的薄膜与大豆蛋白薄膜具有相当的功能特性,阻氧阻油性好,适用于禽蛋果蔬油脂含量高的食品,与大豆分离蛋白类似,米糠蛋白来源广价格低廉,但提取率低,成本较大豆分离蛋白相对高,通过改善米糠蛋白的提取效率,有利于其在可食用膜中的进一步应用<sup>[88]</sup>。作为可食膜的材料具有广阔前景。

Shin 等<sup>[89]</sup>研究使用 50 ppm 二氧化氯水溶液和 5 kJ/m<sup>2</sup> 紫外线照射处理,并用含有 1% 葡萄柚籽提取物的米糠蛋白膜包装的草莓,通过感官评价和微生物分析发现该草莓的货架期显著增长。齐艺慧等<sup>[90]</sup>以米糠蛋白为成膜基质,添加鼠尾草酸制成复合膜,当鼠尾草酸添加量为 0.50% 时米糠蛋白复合膜具有最大抗拉强度和最长断裂距离。复合膜水蒸气透过率较对照组有所提高,可见该膜具有较好的组织结构。随着鼠尾草酸添加量的增大,该复合膜的自由基清除活性、抗氧化活力均显著提高。此外,所制备的鼠尾草酸米糠蛋白复合膜具有抗氧化性能,可应用于食品包装行业。

## 5.5 在营养递送体系中的应用

米糠蛋白因其具有抗氧化、抗菌和抗癌等生物活性以及良好的持水性、乳化性等功能特性,可与其他材料复合,用于制备各种米糠蛋白基的包埋载体,包括乳剂、纳米乳剂、纳米颗粒、微胶囊,作为载体的米糠蛋白可提高包封率以及起到生物活性的控释作用<sup>[91]</sup>。

5.5.1 乳剂 以乳化剂为基础的载体在生物活性物质的保护、控释和靶向递送方面具有显著的高效性。食品工业经常使用基于蛋白的乳液体系作为载体来封装和传递脂溶性生物活性物质<sup>[92]</sup>。Li 等<sup>[93]</sup>研究了在添加儿茶素时,米糠蛋白和米糠蛋白-儿茶素复合物乳液的稳定性。结果表明,添加儿茶素后,米糠蛋白的  $\alpha$ -螺旋和  $\beta$ -折叠含量降低,表面疏水性增加,油水界面张力降低,且米糠蛋白-儿茶素复合物的乳液液滴粒径最小,乳化性能最佳。以米糠蛋白为乳化剂通过高速剪切制备的亚麻籽油(O/W 型)乳液,在米糠蛋白添加量 0.56% 时,乳液具有良好的 pH 稳定性和抗氧化性<sup>[94]</sup>。以米糠蛋白水解物和阿魏酸制成的共价结合物用作乳化剂,乳化剂在超声功率为

300 W 时获得了更好的稳定性和乳化性能,能够制备出粒径更小、分布更均匀、界面蛋白含量更高的乳液<sup>[95]</sup>。以米糠蛋白-绿原酸复合制备的乳液,其包封率和负载量分别为 86.26%±0.11% 和 17.25%±0.06 g/100 g。此外,超声预处理可使乳液液滴的粒径减小均匀,粘度降低,乳液稳定性更高,为乳液在食品工业中的工业化应用奠定了理论基础<sup>[96]</sup>。

**5.5.2 纳米乳剂** 纳米乳剂(NEs)具有稳定的相分离、混凝、沉淀和絮凝性能。它们还可以通过提高液滴表面积来改善潜在的功能。米糠蛋白在纳米乳剂中充当乳化层,包围  $\beta$ -胡萝卜素,隔绝其与空气或水直接接触防止其氧化<sup>[97]</sup>。此外,以米糠蛋白包埋槲皮素制备的纳米乳液在碱性和低盐离子条件下具有良好的稳定性,能保护槲皮素不被中性或酸性的胃液破坏,体外消化和细胞实验表明,槲皮素包埋在米糠蛋白系统中可提高槲皮素的生物利用率,因此米糠蛋白纳米乳液可以作为传递活性物质的有效载体<sup>[98]</sup>。

**5.5.3 纳米颗粒** 粒径为 20~500 nm 的粒子称为纳米颗粒(NPs),由于颗粒很小,更容易通过靶向穿透组织或受体,因此在细胞中的生物利用度较高,此纳米颗粒除了具有较高的承载能力,还能提供更好的生物活性物质的控释<sup>[99]</sup>。通过使用抗溶剂沉淀法将姜黄素包埋在米糠蛋白基的纳米颗粒中,包埋率可高达 94.95%。此外,纳米颗粒具有良好的水分散和贮存稳定性,抗炎、抗氧化和体外抗肿瘤细胞增殖活性均高于游离姜黄素<sup>[100]</sup>。纳米颗粒还应用在酸性肿瘤环境中释放,用于乳腺癌治疗的阿霉素中,使用溶剂蒸发的单一乳化程序制备的纳米复合材料,具有较高的包封效率<sup>[91]</sup>。

**5.5.4 微胶囊** 在微胶囊化过程中,用适当的壁材包裹小的固体、液体或气体微粒,在特定条件下保证生物活性的释放免受不利环境条件的影响。各种营养素(如类胡萝卜素、多酚、维生素等)和药物均可使用天然蛋白质为基质进行封装<sup>[101]</sup>。Vaniski 等<sup>[102]</sup>以米糠蛋白和麦芽糊精为原料,采用喷雾干燥法对嗜酸乳杆菌 La-5 进行微胶囊化,发现微胶囊化的嗜酸乳杆菌的热稳定性、保存率、消化性均有所提高。类似地,将  $\beta$ -胡萝卜素加入到麦芽糊精和米糠蛋白的复合壁材中,包封率高达 85%~98%,且随着米糠蛋白的比例增加, $\beta$ -胡萝卜素的自由基清除活性也增加<sup>[103]</sup>。喷雾干燥制备的含角叉菜胶的米糠蛋白-牛血清白蛋白微胶囊,包埋丁香酚时包埋率达到了 79.4%<sup>[104]</sup>。此外,米糠蛋白和多糖形成的微胶囊适用于将鱼油等脂质包封在功能性食品中。Tang 等<sup>[105]</sup>通过冷冻干燥制备的米糠蛋白原纤维和黄原胶共稳定的乳液,用于包埋鱼油时发现米糠蛋白的纤维化进一步提高了鱼油微胶囊的氧化稳定性和包封率。米糠蛋白-亚麻籽胶复合凝聚层的使用也已被批准用于包封挥发性物质的应用当中。通过此复合物凝聚层

包封香兰素,能够实现香兰素热稳定性的提高和释控<sup>[106]</sup>。

## 6 结论与展望

米糠蛋白具有价廉易得、氨基酸组成优异及致敏性低的优点,增加米糠蛋白的研究不仅能够扩大米糠蛋白的应用,还能促进米糠的综合利用,实现附加值最高的目标。近年来,关于米糠蛋白提取、功能特性及应用已有大量研究,其研究结果虽然表现出了良好的应用前景,但未来米糠蛋白的研究仍旧存在巨大的挑战。针对米糠蛋白的提取方法尽管一直在改进,但仍无法实现工业化生产,这严重限制了米糠蛋白在食品、医药领域的应用。目前对于米糠蛋白及其肽类的研究主要集中在粗提物及制剂上,尚无足够的证据揭示米糠蛋白肽发挥功能的作用机制。综上,随着世界范围内消费者对植物蛋白等天然组分兴趣的不断提高,预计米糠蛋白在食品及医药领域中的应用也会不断上升。

© The Author(s) 2024. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

## 参考文献

- [1] 于殿宇,张欣,邹丹阳,等.酶法改性对米糠蛋白凝胶硬度及功能性质的影响[J].中国食品学报,2020,20(9):139-146. [YU D Y, ZHANG X, ZOU D Y, et al. Effect of enzymatic modification on the hardness and functional properties of rice bran protein gel[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2020, 20(9): 139-146.]
- [2] MANZOOR A, PANDEY V K, DAR A H, et al. Rice bran: Nutritional, phytochemical, and pharmacological profile and its contribution to human health promotion[J]. Food Chemistry Advances, 2023, 2100296.
- [3] RODRÍGUEZ-RESTREPO Y A, FERREIRA-SANTOS P, ORREGO C E, et al. Valorization of rice by-products: protein-phenolic based fractions with bioactive potential[J]. Journal of Cereal Science, 2020, 95(1): 103-139.
- [4] CHEN W, DING Y, ZHAO Y M, et al. Strategies to improve the emulsification properties of rice proteins as a promising source of plant-based emulsifiers: An updated mini-review[J]. Food Bioscience, 2023, 53102697.
- [5] CHO S J. Changes in the antioxidant properties of rice bran protein isolate upon simulated gastrointestinal digestion[J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 126109206.
- [6] BEHL T, KUMAR S, SEHGAL A, et al. Rice bran, an offshoot to newer therapeutics in neurological disorders[J]. Biomedicine Pharmacotherapy, 2021, 140111796.
- [7] LONG X K, GUAN C M, WANG L, et al. Rice storage proteins: focus on composition, distribution, genetic improvement and effects on rice quality[J]. Rice Science, 2023, 30(3): 207-221.
- [8] TANGPROMPHAN P, DUANGSRISAI S, JAREE A. Development of separation method for Alpha-Tocopherol and Gamma-Oryzanol extracted from rice bran oil using Three-Zone simulated moving bed process[J]. Separation and Purification Technology, 2021: 272118930.

- [9] SUN K M, SEUNG T L. Enhanced antioxidant activity of rice bran extract by carbohydrase treatment[J]. *Journal of Cereal Science*, 2016, 68: 116–121.
- [10] PHONGTHAI S, HOMTHAWORNCHOO W, RAWDKUEN S. Preparation, properties and application of rice bran protein: A review[J]. *International Food Research Journal*, 2017, 24(1): 25–34.
- [11] 谭书琪, 张燕鹏, 张维农, 等. 米糠蛋白加工利用研究进展[J]. *食品科技*, 2020, 45(2): 185–189. [TAN S Q, ZHANG Y P, ZHANG W N, et al. Research progress in the processing and utilization of rice bran protein[J]. *Food Science and Technology*, 2020, 45(2): 185–189.]
- [12] NAJAMUDDIN U, GORJI S G, FITZGERALD M. Effect of post-milling process on the oxidation of the rice bran[J]. *Journal of Cereal Science*, 2023, 111103678.
- [13] FARAH N, WAN Z W I, NAZAMID S, et al. The effect of alkaline extraction and drying techniques on the physicochemical, structural properties and functionality of rice bran protein concentrates[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 242(3): 124908.
- [14] ADEBIVI A P, HASEGAWA Y, OGAWA T. Isolation and characterization of protein fractions from deoiled rice bran[J]. *European Food Research Technology*, 2009, 288: 391–401.
- [15] FABIAN C, JU Y H. A review on rice bran protein: its properties and extraction methods[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2011, 51(9): 816–827.
- [16] 张敏, 周梅, 王长远. 米糠 4 种蛋白质的提取与功能性质[J]. *食品科学*, 2013, 34(1): 18–21. [ZHANG M, ZHOU M, WANG C Y. Extraction and functional properties of four proteins of rice bran[J]. *Food Science*, 2013, 34(1): 18–21.]
- [17] CONTRERAS M D, LAMA-MUNOZI M, MANUEL G, et al. Protein extraction from agri-food residues for integration in biorefinery: Potential techniques and current status[J]. *Bioresource Technology*, 2019, 280: 459–477.
- [18] GUPTA S, CHANDI G K, SOGI D S. Effect of extraction temperature on functional properties of rice bran protein concentrates[J]. *International Journal of Food Engineering*, 2008, 4(2): 99–107.
- [19] SUDARAT J, VORANUCH S, HARPER W J. Extraction of rice bran protein concentrate and its application in bread[J]. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, 2005, 27(1): 403–416.
- [20] 王乔, 侯同刚, 咸漠, 等. 两步酶解提取米糠蛋白的工艺研究及优化[J]. *氨基酸和生物资源*, 2016, 38(4): 77–83. [WANG Q, HOU T G, XIAN M, et al. Study and optimization on extraction of rice bran protein by two-step enzymatic hydrolysis[J]. *Amino Acids and Biotic Resources*, 2016, 38(4): 77–83.]
- [21] LETIZIA S, SARA S, FABIO R, et al. Use of carbohydrases to promote protein extraction from rice bran and soybean meal: A comparative study[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2023, 184: 115060.
- [22] ANSHARULLAH, HOURIGAN J A, CHESTERMAN C F. Application of carbohydrates in extracting protein from rice bran[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 1997, 74(2): 141–146.
- [23] 马永强, 程文红, 那治国, 等. 植酸酶在米糠谷蛋白提取中应用的研究[J]. *食品工业科技*, 2016, 37(10): 189–193. [MA Y Q, CHENG W H, NA Z G, et al. Application of phytase on the extraction of rice bran gluten[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2016, 37(10): 189–193.]
- [24] 张琴秋, 秦文, 胡欣洁. 米糠蛋白提取和利用的研究进展[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(19): 307–313. [ZHANG Q Q, QIN W, HU X J, et al. Progress in the extraction and utilization of rice bran proteins[J]. *Food and Fermentation Industry*, 2021, 47(19): 307–313.]
- [25] 王腾宇, 周凤超, 王玉, 等. 米糠蛋白提取及其应用[J]. *粮油加工*, 2010, 386(8): 74–76. [WANG T Y, ZHOU F C, WANG Y, et al. Rice bran protein extraction and application[J]. *Machinery for Cereals Oil and Food Processing Main Contents*, 2010, 386(8): 74–76.]
- [26] WANG M, HETTIARACHCHY N S, QI M, et al. Preparation and functional properties of rice bran protein isolate[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1999, 47(2): 411–416.
- [27] 李坤, 刘颖, 窦博鑫. 米糠蛋白提取中褐变抑制剂的筛选[J]. *食品工业科技*, 2012, 33(2): 218–223. [LI K, LIU Y, DOU B X. Screening of browning inhibitors in rice bran protein extraction[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2012, 33(2): 218–223.]
- [28] 王晓雅, 朱新鹏, 樊明涛, 等. 碱性蛋白酶提取米糠蛋白的研究[J]. *河南农业科学*, 2012, 41(6): 38–41. [WANG X Y, ZHU X P, FAN M T, et al. Extraction of rice bran protein by alcalase[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2012, 41(6): 38–41.]
- [29] 李楨, 李玉锋, 赵军, 等. 响应面优化双酶解提取米糠蛋白工艺的优化[J]. *黑龙江畜牧兽医*, 2015(9): 18–22. [LI Z, LI Y F, ZHAO J, et al. Optimization of the extraction process with double enzymatic hydrolysis for the rice bran protein by response surface methodology[J]. *Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine*, 2015(9): 18–22.]
- [30] 付珊珊, 周显青, 张玉荣, 等. 超声辅助酶法和碱法对米糠蛋白提取率的影响研究[J]. *食品科技*, 2021, 46(9): 149–155. [FU S S, ZHOU X Q, ZHANG Y R, et al. Effect of ultrasonic-assisted enzymatic method and alkaline method on the extraction rate of rice bran protein[J]. *Food Science and Technology*, 2021, 46(9): 149–155.]
- [31] 张金建, 赵优萍, 唐思煜, 等. 米糠蛋白提取工艺优化研究[J]. *浙江科技学院学报*, 2017, 29(3): 214–218, 234. [ZHANG J J, ZHAO Y P, TANG S Y, et al. Study on optimization of rice bran protein extraction progress[J]. *Journal of Zhejiang University of Science and Technology*, 2017, 29(3): 214–218, 234.]
- [32] 冯海云. 富硒米糠微波稳定化研究和蛋白提取工艺[D]. 南京: 南京农业大学, 2010. [FENG H Y. The research on the microwave stability of selenium enriched rice bran[D]. Nanjing: Nanjing agricultural university, 2010.]
- [33] 许凤, 王长远. 响应面法优化物理辅助碱法提取米糠蛋白工艺[J]. *食品科学*, 2014, 35(20): 11–16. [XU F, WANG C Y. Optimization of physical force-assisted alkaline extraction of rice bran protein[J]. *Food Science*, 2014, 35(20): 11–16.]
- [34] 张安宁, 王晔, 李照晴, 等. 反复冻融辅助弱碱法提取米糠蛋白[J]. *食品工业*, 2020, 41(10): 141–145. [ZHANG A N, WANG Y, LI Z Q, et al. Extraction of rice bran protein by using repeated freezing and thawing combined with weak alkali method[J]. *The Food Industry*, 2020, 41(10): 141–145.]
- [35] TANG S H, HETTIARACHCHY N S, SHELLHAMMER T H. Protein extraction from heat-stabilized defatted rice bran. 1. physical processing and enzyme treatments[J]. *J Agr Food Chem*, 2002, 50(25): 7444–7448.
- [36] PHONGTHAI S, LIM S T, RAWDKUEN S. Optimization of microwave-assisted extraction of rice bran protein and its hydrolysates properties[J]. *Journal of Cereal Science*, 2016, 70(1):

146-154.

- [37] BANDYOPADHYAY K, CHAKRABORTY C, BARMAN A. Effect of microwave and enzymatic treatment on the recovery of protein from Indian defatted rice bran meal[J]. *Journal Oleo Science*, 2012, 61(1): 525-529.
- [38] 易佳, 刘昆仑. 超微联合超声波优化提取米糠蛋白及其对米糠蛋白溶解性的影响[J]. *食品研究与开发*, 2022, 43(19): 117-123. [YI J, LIU K L. Optimization of extraction process of rice bran protein by ultrafine grinding combined with ultrasound and effect of extraction on protein solubility[J]. *Food Research and Development*, 2022, 43(19): 117-123.]
- [39] ZHANG Y P, WANG B, ZHANG W N, et al. Effects and mechanism of dilute acid soaking with ultrasound pretreatment on rice bran protein extraction[J]. *Journal of Cereal Science*, 2019, 87(1): 318-324.
- [40] CHAISUWAN B, SUPAWONG S. Physicochemical and antioxidative characteristics of rice bran protein extracted using subcritical water as a pretreatment and stability in a functional drink model during storage[J]. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 2022: 44102466.
- [41] 那治国, 佟钰, 张岚, 等. 蒸汽闪爆处理对米糠粕中蛋白质功能特性的影响[J]. *食品科技*, 2019, 14(11): 206-212. [NA Z G, TONG M, ZHANG L, et al. Effect of steam flash explosion on functional properties of rice bran meal protein[J]. *Food Science and Technology*, 2019, 14(11): 206-212.]
- [42] 肖俊琪, 翟爱华, 李嘉庆, 等. 蒸汽爆破预处理辅助提取米糠蛋白的工艺研究[J]. *中国食品添加剂*, 2018, 175(9): 104-111. [XIAO J Q, ZHAI A H, LI J Q, et al. Study on the technology of steam explosion pretreatment assisted extraction of protein from rice bran[J]. *China Food Additives*, 2018, 175(9): 104-111.]
- [43] KOWSALYA P, MAHENDRAN R P. Traditional rice varieties: A comprehensive review on its nutritional, medicinal, therapeutic and health benefit potential[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2022, 114: 104742.
- [44] ZHU T W, YANG J Y, QIN W T, et al. Drying kinetics of soy protein isolate-corn starch film during preparation and its moisture adsorption characteristics during storage[J]. *Grain and Oil Science and Technology*, 2023: 2590-2598.
- [45] 张薇, 宋春春, 徐玉娟, 等. 米糠蛋白复合乳饮料制备及其乳化稳定性[J]. *乳业科学与技术*, 2013, 36(4): 7-10. [ZHANG W, SONG C C, XU Y J, et al. Formulation and emulsion stability of a composite rice bran protein-dairy beverage[J]. *Journal Dairy Science Technology*, 2013, 36(4): 7-10.]
- [46] 王丽杰, 李娜, 查恩辉, 等. 米糠蛋白在乳化香肠加工中的应用[J]. *黑龙江畜牧兽医*, 2014, 15(1): 118-121. [WANG L J, LI N, ZHA E H, et al. Application of rice bran protein in the processing of emulsified sausage[J]. *Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine*, 2014, 15(1): 118-121.]
- [47] YADAV R B, YADAV B S, CHAUDHARY D. Extraction, characterization and utilization of rice bran protein concentrate for biscuit making[J]. *British Food Journal*, 2011, 113(9): 1173-1182.
- [48] 郑煜焱, 杨大光, 李新华, 等. 米糠蛋白在海绵蛋糕中的应用研究[J]. *粮油加工*, 2010, 3(1): 85-88. [ZHENG Y Y, YANG D G, LI X H, et al. Application of rice bran protein in sponge cake[J]. *Cereals Oils Process*, 2010, 3(1): 85-88.]
- [49] SINGH P T, SIDDIQI S R, SOGI D S. Enzymatic modification of rice bran protein: Impact on structural, antioxidant and functional properties[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 138: 110648.
- [50] 张薇. 超声波辅助双酶法提取米糠蛋白及其应用的研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2014. [ZHANG W. Extraction and application of rice bran protein by ultrasonic-assisted dual-enzymatic[D]. Changchun: Jilin agricultural university, 2014.]
- [51] 王长远, 郝天舒, 张敏. 干热处理对米糠蛋白结构与功能特性的影响[J]. *食品科学*, 2015, 36(7): 13-18. [WANG C Y, HAO T S, ZHANG M. Effect of dry heat treatment on structural and functional properties of rice bran protein[J]. *Food Science*, 2015, 36(7): 13-18.]
- [52] 常慧敏, 杨敬东, 田少君. 超声辅助木瓜蛋白酶改性对米糠蛋白溶解性和乳化性的影响[J]. *中国油脂*, 2019, 44(4): 35-40. [CHANG H M, YANG J D, TIAN S J. Influence of ultrasound-assisted papain modification on solubility and emulsification of rice bran protein[J]. *China Oils and Fats*, 2019, 44(4): 35-40.]
- [53] 郑丽慧, 周晓瑞, 汪洋, 等. 不同处理方式对米糠蛋白溶解性的影响研究[J]. *现代面粉工业*, 2021, 35(1): 29-32. [ZHENG L H, ZHOU X R, WANG Y, et al. Effect of different treatments on the solubility of rice bran proteins[J]. *Modern Flour Milling Industry*, 2021, 35(1): 29-32.]
- [54] 吴彬, 刘昆仑. 米糠蛋白酶解产物功能特性及乳液稳定性研究[J]. *食品安全质量检测学报*, 2022, 13(9): 2940-2946. [WU B, LIU K L. Functional properties and emulsion stability of hydrolyzed rice bran protein[J]. *Journal Food Safety Quality*, 2022, 13(9): 2940-2946.]
- [55] WANG W N, LUO S N, WANG X, et al. Structure and emulsifying properties of rice bran protein alkylated using an electrochemical reactor[J]. *Food Research International*, 2023, 170: 112561.
- [56] 王跃猛, 郭宜鑫, 焦涵, 等. 蛋清蛋白起泡性改性手段及作用机制研究进展[J]. *食品科技*, 2023, 48(1): 197-204. [WANG Y M, GUO Y X, JIAO H, et al. Research progress on modifications and mechanisms on foaming properties of egg white protein[J]. *Food Science*, 2023, 48(1): 197-204.]
- [57] 朱珈庆, 李帅斐, 于雷, 等. 米糠蛋白碱法提取联合微波与酶法改性工艺的优化[J]. *粮食与油脂*, 2017, 30(7): 60-64. [ZHU J Q, LI S F, YU L, et al. Optimization of alkaline extraction joint microwave and enzymatic modification of rice bran protein[J]. *Cereals Oils*, 2017, 30(7): 60-64.]
- [58] 夏宁, 胡磊, 王金梅, 等. 喷射蒸煮处理对米糠蛋白功能特性及体外消化性的影响[J]. *中国粮油学报*, 2012, 27(5): 44-49. [XIA N, HU L, WANG J M, et al. Effect of hydrothermal cooking treatment of rice bran on functional properties and *in vitro* digestibility of protein[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2012, 27(5): 44-49.]
- [59] 王长远, 许凤, 张敏. 超声时间对米糠蛋白理化和功能特性的影响[J]. *中国粮油学报*, 2014, 29(12): 43-47, 59. [WANG C Y, XY F, ZHANG M. Effect of ultrasound time on physicochemical and functional properties of rice bran protein[J]. *Journal Chinese Cereals Oils Association*, 2014, 29(12): 43-47, 59.]
- [60] 孙靖辰. 超声处理提高米糠蛋白溶解性与乳化性的工艺研究[J]. *农产品加工*, 2019, 14(1): 33-38, 42. [SUN J C. Study on the process of improving the solubility and emulsibility of rice bran protein by ultrasonic treatment[J]. *Farm Products Processing*, 2019, 14(1): 33-38, 42.]
- [61] 刘加艳, 任宇鹏. 米糠蛋白的静高压联合酶法改性工艺优化及其特性研究[J]. *中国油脂*, 2021, 46(7): 75-79, 91. [LIU J Y, REN Y P. Optimization of modification of rice bran protein by static high pressure combined with enzymatic method and its characteristics[J]. *China Oils Fats*, 2021, 46(7): 75-79, 91.]
- [62] CHANDI G K, SOGI D S. Functional properties of rice bran

- protein concentrates[J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, 79(2): 592–597.
- [ 63 ] HU Z Y, QIU L, SUN Y, et al. Improvement of the solubility and emulsifying properties of rice bran protein by phosphorylation with sodium trimetaphosphate[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 96: 288–299.
- [ 64 ] ZHANG H J, ZHANG H, WANG L, et al. Preparation and functional properties of rice bran proteins from heat-stabilized defatted rice bran[J]. *Food Research International*, 2012, 47(2): 359–363.
- [ 65 ] ELHAM H, ALI R. Characterization of flaxseed gum/rice bran protein complex coacervates[J]. *Food Biophysics*, 2018, 13(4): 1–9.
- [ 66 ] 孟才云, 孙妍, 肖志刚, 等. 葡萄糖糖基化米糠蛋白-壳聚糖复合膜的制备及表征[J]. *食品科学*, 2023, 44(16): 135–142. [ MENG C Y, SUN Y, XIAO Z G, et al. Preparation and characterization of glucose glycosylated rice bran protein-chitosan composite film[J]. *Food Science*, 2023, 44(16): 135–142. ]
- [ 67 ] 赵悦琳, 田忠华, 刘东旭, 等. 米糠蛋白-阿拉伯木聚糖接枝复合物制备及其功能性质研究[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(17): 193–198. [ ZHAO Y L, TIAN Z H, LIU D X, et al. Process optimization and functional properties of rice bran protein-arabinoxylan conjugate[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41(17): 193–198. ]
- [ 68 ] 苗向硕, 吴伟, 吴晓娟. 表没食子儿茶素没食子酸酯对米糠蛋白结构和功能性质的影响[J]. *中国粮油学报*, 2020, 35(3): 52–59. [ MIAO X S, WU W, WU X J. Effects of epigallocatechin gallate on the structure and functional properties of rice bran protein[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2020, 35(3): 52–59. ]
- [ 69 ] ZHOU Z K, XU J J, LIU Y Q, et al. Thermal stability improvement of rice bran albumin protein incorporated with epigallocatechin gallate[J]. *Journal of Food Science*, 2017, 82(1–3): 350–357.
- [ 70 ] 谢凤英, 马岩, 王晓君, 等. 拉曼光谱分析荞麦多酚对米糠蛋白结构的影响[J]. *食品科学*, 2017, 38(3): 32–36. [ XIE F Y, MA Y, WANG X J, et al. Effect of buckwheat polyphenols on the structure of rice bran proteins analyzed by raman spectroscopy[J]. *Food Science*, 2017, 38(3): 32–36. ]
- [ 71 ] 付薇. 米糠蛋白-乳清蛋白改性接枝物的制备及性质研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨商业大学, 2016. [ FU W. Research the preparation and properties of rice bran protein-whey protein modification graft materials[D]. Harbin: Harbin University of Commerce, 2016. ]
- [ 72 ] 吴伟, 苗向硕, 吴晓娟. 表没食子儿茶素没食子酸酯对米糠蛋白体外胃蛋白酶消化性质的影响[J]. *中国粮油学报*, 2021, 36(3): 35–40. [ WU W, MIAO X S, WU X J. Effect of epigallocatechin gallate on *in vitro* pepsin digestibility of rice bran protein[J]. *Journal Chinese Cereals Oils Association*, 2021, 36(3): 35–40. ]
- [ 73 ] RAFI A, VAHEDI E, HASAN-SAREI A G. Rheology and microstructure of binary mixed gel of rice bran protein- whey: effect of heating rate and whey addition[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2016, 96(11): 3890–3896.
- [ 74 ] LIU Y Q, STRAPPE P, SHANG W T, et al. Functional peptides derived from rice bran proteins[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2019, 59(2): 349–356.
- [ 75 ] LADDA W, CHOCKCHAI T, SAMANTHI W, et al. Isolation and identification of antioxidant peptides from enzymatically hydrolyzed rice bran protein[J]. *Food Chemistry*, 2016, 192(1): 156–162.
- [ 76 ] CHEETANGDEE N, BENJAKUL S. Antioxidant activities of rice bran protein hydrolysates in bulk oil and oil-in-water emulsion[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2015, 95(7): 1461–1468.
- [ 77 ] HATANAKA T, INOUE Y, ARIMA J, et al. Production of dipeptidyl peptidase IV inhibitory peptides from defatted rice bran[J]. *Food Chemistry*, 2012, 134(2): 797–802.
- [ 78 ] BOONLA O, KUKONGVIRIYAPAN U, PAKDEECHOTE P, et al. Peptides-derived from thai rice bran improves endothelial function in 2K-1C renovascular hypertensive rats[J]. *Nutrients*, 2015, 7(7): 5783–5799.
- [ 79 ] 张玲瑜, 苗建银, 曹愚, 等. 米糠蛋白源 ACE 抑制肽的酶解制备及活性研究[J]. *食品与机械*, 2022, 38(3): 160–166. [ ZHANG L Y, MIAO J Y, CAO Y, et al. Enzymatic preparation and activity study of rice bran protein-derived ACE inhibitory peptide[J]. *Food and Machinery*, 2022, 38(3): 160–166. ]
- [ 80 ] 邹智鹏, 王明洁, 刘梦婷, 等. 小米米糠蛋白水解物及其膜分离组分的降血压相关活性研究[J]. *中国粮油学报*, 2020, 35(6): 31–38. [ ZOU Z P, WANG M J, LIU M T, et al. Antihypertensive properties of enzymatic hydrolysate of millet bran protein and its ultrafiltered fractions[J]. *Journal Chinese Cereals Oils Association*, 2020, 35(6): 31–38. ]
- [ 81 ] 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.
- [ 82 ] 陈季旺, 孙庆杰, 姚惠源, 等. 米糠蛋白酶解物类阿片拮抗活性的研究(英文)[J]. *食品科学*, 2005(6): 141–145. [ CHEN J W, SUN Q J, YAO H Y, et al. Opioid antagonist activities of enzymatic hydrolysates from rice bran protein[J]. *Food Science*, 2005(6): 141–145. ]
- [ 83 ] 王昕. 米糠蛋白利用的研究进展[J]. *现代食品*, 2020(18): 65–67. [ WANG X. Progress in the utilization of rice bran proteins[J]. *Modern Food*, 2020(18): 65–67. ]
- [ 84 ] KHAN S H, BUTT M S, ANJUM F M, et al. Quality evaluation of rice bran protein isolate-based weaning food for preschoolers[J]. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 2011, 62(3): 280–288.
- [ 85 ] 刘颖, 田文娟. 复合米糠蛋白粉的研制与营养价值评价[J]. *食品科学*, 2012, 33(4): 292–295. [ LIU Y, TIAN W J. Development and nutritional evaluation of compound rice bran protein powder[J]. *Food Science*, 2012, 33(4): 292–295. ]
- [ 86 ] 王娜. 米糠蛋白聚集体及其成膜特性研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2020. [ WANG N. Studies on rice bran protein aggregates and their membrane-forming properties[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2020. ]
- [ 87 ] 尹兴, 朱俊南, 陈林, 等. 可食性大豆分离蛋白膜的制备及其性能研究[J]. *包装工程*, 2020, 41(23): 83–89. [ YIN X, ZHU J N, CHEN L, et al. Preparation of edible soybean isolated protein membrane and its properties[J]. *Package Engineering*, 2020, 41(23): 83–89. ]
- [ 88 ] 任佳欣, 遇世友, 许锡凯, 等. 可食性蛋白膜在食品包装中的应用研究进展[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(9): 320–326. [ REN J X, YU S Y, XU X K, et al. Progress in the application of edible protein membrane in food packaging[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41(9): 320–326. ]
- [ 89 ] SHIN Y J, SONG H Y, SONG K B. Effect of a combined treatment of rice bran protein film packaging with aqueous chlorine dioxide washing and ultraviolet-C irradiation on the postharvest

- quality of 'Goha' strawberries[J]. *Journal of Food Engineering*, 2012, 113(3): 374–379.
- [ 90 ] 齐艺惠, 吴隆坤, 董生忠, 等. 鼠尾草酸米糠蛋白复合膜的制备及性能研究[J]. *农产品加工*, 2017, 409(7): 1–4. [ QI Y H, WU L K, DONG S Z, et al. Preparation and properties of rice bran protein film incorporated with carnosic acid[J]. *Farm Product Process*, 2017, 409(7): 1–4. ]
- [ 91 ] ARJAMA M, MEHNATH S, RAJAN M, et al. Sericin/RBA embedded gellan gum based smart nanosystem for pH responsive drug delivery[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, 120(1): 1561–1571.
- [ 92 ] GUAN T W, ZHANG Z H, LI X J, et al. Preparation, characteristics, and advantages of plant protein-based bioactive[J]. *Molecule Delivery Systems Foods*, 2022, 11(11): 1562.
- [ 93 ] LI H S, SHI W L, CI H C, et al. Preparation and characterization of rice bran protein - stabilized emulsion by using ultrasound homogenization[J]. *Cereal Chemistry*, 2019, 96(3): 478–486.
- [ 94 ] QADIR N, WANI I A. Functional properties, antioxidant activity and in-vitro digestibility characteristics of brown and polished rice flours of Indian temperate region[J]. *Grain and Oil Science and Technology*, 2023, 6(1): 43–57.
- [ 95 ] WANG S R, LI X Y, ZHU J S, et al. Covalent interaction between high hydrostatic pressure-pretreated rice bran protein hydrolysates and ferulic acid: Focus on antioxidant activities and emulsifying properties[J]. *Journal of Agricultural Food Chemistry*, 2022, 69(27): 7777–7785.
- [ 96 ] WANG W N, WANG R Y, YAO J, et al. Effect of ultrasonic power on the emulsion stability of rice bran protein-chlorogenic acid emulsion[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2022, 84(1): 105959.
- [ 97 ] BAZANA M T, CODEVILLA C F, MENEZES C D. Nanoencapsulation of bioactive compounds: challenges and perspectives[J]. *Current Opinion Food Science*, 2019, 26(1): 47–56.
- [ 98 ] LIU Y L, LIU C, ZHANG S Y, et al. Comparison of different protein emulsifiers on physicochemical properties of  $\beta$ -carotene-loaded nanoemulsion: Effect on formation, stability, and in vitro digestion[J]. *Nanomaterials*, 2021, 11(1): 167.
- [ 99 ] CHEN W, JU X, ALUKO R E, et al. Rice bran protein-based nanoemulsion carrier for improving stability and bioavailability of quercetin[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 108: 106042.
- [ 100 ] SCREMIN F, VEIGA R SILVA-BUZANELLO R, et al. Synthesis and characterization of protein microcapsules foreugenol storage[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2018, 131(1): 653–660.
- [ 101 ] LIU C, YANG X Q, WU W, et al. Elaboration of curcumin-loaded rice bran albumin nanoparticles formulation with increased in vitro bioactivity and in vivo bioavailability[J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 77(1): 834–842.
- [ 102 ] VANISKI R, SILVA S C, SILVA B R, et al. Improvement of Lactobacillus acidophilus La-5 microencapsulation viability by spray - drying with rice bran protein and maltodextrin[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2021, 45(4): 153–164.
- [ 103 ] MAGNAYE M, MOPERA L. Effect of rice bran protein concentrate as wall material adjunct on selected physicochemical and release properties of microencapsulated  $\beta$ -carotene[J]. *Food Science and Technology International*, 2018, 28(8): 653–662.
- [ 104 ] LI D, ZHAO Y, WANG X, et al. Effects of (+)-catechin on a rice bran protein oil-in-water emulsion: Droplet size, zeta-potential, emulsifying properties, and rheological behavior[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 98: 105306.
- [ 105 ] TANG W T, PANG S X, LUO Y X, et al. Improved protective and controlled releasing effect of fish oil microcapsules with rice bran protein fibrils and xanthan gum as wall materials[J]. *Food & Function*, 2022, 13(8): 4734–4747.
- [ 106 ] HASANWAND E, RAFA A. Development of vanillin/ $\beta$ -cyclodextrin inclusion microcapsules using flax seed gum-rice bran protein complex coacervates[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 131: 60–66.