

基于稻米加工副产物构建膜材料及应用进展

韩 骞, 刘秀英*, 张 威, 舒在习, 王平坪, 朱力杰

(武汉轻工大学 a.食品科学与工程学院 b.大宗粮油精深加工教育部重点实验室
c.农产品加工与转化湖北省重点实验室, 武汉 430000)

摘要: **目的** 介绍稻米加工副产物中主要生物大分子(如大米蛋白、米糠蛋白、大米淀粉)构建膜材料的研究进展, 以期为新型食品包装的研发及应用提供重要参考。**方法** 综述目前以稻米加工副产物为基础的膜材料的开发, 探讨可有效改善成膜特性的方法与手段; 分析基于抑菌成分构建的稻米源膜材料在鸡蛋、水产品、果蔬等食品保鲜领域的应用潜力, 展望稻米加工副产物基膜研究可能面临的挑战与存在问题。**结论** 稻米加工副产物基膜的开发在绿色食品包装领域有较好的应用潜力, 对提升其副产品的高效增值具有重要意义。

关键词: 稻米加工副产物; 功能膜; 大米蛋白; 米糠蛋白; 大米淀粉

中图分类号: TS206.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2023)23-0075-09

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.23.009

Construction of Film Materials Based on Rice Processing By-products and Progress in Application

HAN Qian, LIU Xiu-ying*, ZHANG Wei, SHU Zai-xi, WANG Ping-ping, ZHU Li-jie

(a. College of Food Science and Engineering, b. Key Laboratory for Deep Processing of Major Grain and Oil, Ministry of Education, c. Laboratory for Processing and Transformation of Agricultural Products, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430000, China)

ABSTRACT: The work aims to introduce the research progress of film materials constructed from major biomacromolecules (such as rice protein, rice bran protein, rice starch) in rice processing by-products, with a view to providing important references for the research, development and application of new food packaging. The current development of rice processing by-product-based films was summarized. Ways and means to effectively improve the characteristics of membrane formation were discussed. The application potential of the films based on antimicrobial materials in food preservation such as eggs, aquatic products, fruits and vegetables was analyzed. Challenges and problems that might be faced by the research on rice processing by-product-based films were outlined. The development of rice processing by-product-based films has a good potential for application in green food packaging, which is of great significance in enhancing the high efficiency and additional value of its by-products.

KEY WORDS: rice processing by-products; functional films; rice protein; rice bran protein; rice starch

近年来, 随着我国包装行业的不断壮大与发展, 包装废弃物对人类生存环境造成了严重的危害, 以石

油基聚合物制备的包装材料面临着重大挑战, 因此利用天然生物聚合物开发绿色包装材料已成为研究热

收稿日期: 2023-08-23

基金项目: 武汉轻工大学科研项目资助

*通信作者

点。这些包装膜是以蛋白质、多糖等天然大分子通过相互作用制备的具有网络结构的薄膜。相较于传统塑料包装,生物聚合膜具有诸多优点,其来源广泛、易于获取;由于这些膜材料大多数为天然产物,因此具有较好的降解性,在自然环境中能被微生物降解,减少对环境的污染;此外,部分薄膜具有可食性,这不仅能有效地解决包装废弃物的堆积问题,还具有安全、卫生等优势。随着科学技术的发展,利用绿色包装代替传统包装已经成为当前包装行业的发展趋势,该类材料的开发对解决食品保鲜、环保等问题具有重要意义。

水稻是世界上主要粮食作物之一,其种植区域广泛,是东南亚地区人群每日三餐的主食^[1]。作为农业大国,稻米是我国重要的粮食作物^[2],2022 年稻米年产量达 20 849.5 万吨,稻米加工副产物达上千万吨。这些资源如何合理利用与开发,对提升副产品的高效增值具有重要意义。

稻米加工副产物,如米糠、稻壳、碎米等含有丰富的淀粉、蛋白质等天然生物大分子。这些成分不仅具有良好的营养价值,其中一些还显示出生物活性,例如有研究表明大米蛋白具有抗癌性。利用这些天然成分为原料,通过改性等手段制备开发膜材料,在绿色包装材料的研究与开发中表现出良好的应用前景。近年来,还有研究将具有抑菌性的精油、活性成分等与稻米中提取的生物大分子混合,以制备具有抑菌和保鲜功能的膜材料。这也为稻米副产物的利用提供了新的思路。然而,在该类膜材料的开发过程中仍然面临一些问题,如原料溶解性差、加工性能差等。为了改善稻米源膜材料的综合性能,通常采用改性的方法对其进行处理,按其改性机理可分为物理、化学、酶法和复合改性法等。

本文综述近年来以稻米加工副产物中蛋白质和多糖等主要生物大分子为基础开发的天然膜材料;分析不同改性手段对所构建膜材料性能的影响,并总结基于有效抑菌成分构建的稻米源膜材料在鸡蛋、水产品 and 果蔬等食品保鲜中的应用潜力;最后展望稻米加工副产物薄膜研究可能面临的挑战与存在问题,以期对新型食品包装的研发及应用提供重要参考。

1 以大米蛋白质为基础的膜材料

稻米源蛋白质按其来源和性质分类,主要分为大米蛋白和米糠蛋白。这些蛋白质通常是从稻米加工的副产物如碎米、米糠中获得的。研究以稻米加工副产物为资源开发的蛋白质膜,不仅可以减轻对不可再生材料的需求压力,同时还可以提高稻米加工副产物的经济价值。为了进一步改善稻米源蛋白膜的综合性能,通常采用改性的手段进行处理,如化学改性和物理改性等。大量研究表明,通过改性处理能够较好

地改善稻米源蛋白膜的力学性能、阻氧能力和阻湿性能等。

1.1 大米蛋白

大米蛋白是从大米、米渣、碎米等中提取的蛋白质,主要包括谷蛋白、醇溶蛋白、球蛋白和清蛋白。大米蛋白的含量约为 9%,相比于其他谷物资源,大米蛋白的含量较低。然而,由于大米蛋白氨基酸组成均衡、具有低致敏性及抗癌性等特点,在成膜材料构建、活性包装研究等领域中表现出巨大的开发潜力。

目前,国内外对大豆蛋白、玉米醇溶蛋白^[3]制备薄膜的研究较多,而对大米蛋白膜的研究相对较少。这主要与大米蛋白的结构和性质有关。由于大米蛋白分子间相互作用力较强,导致溶解性差,从而使得大米蛋白膜表面粗糙和成膜性能较差。因此,针对以上问题,近年来研究者们积极开展相关研究,并取得了一定的研究进展。目前,主要通过物理和化学手段改善和提升大米蛋白膜的性能,常见方法如下。

1) 增塑剂。增塑剂的添加改变了大米蛋白的分子结构和分子间的引力,进而提高大米蛋白的溶解性,使成膜更加均匀。此外,增塑剂在成膜过程中还可以起到交联或填充空隙的作用,改善了膜的柔韧性和延展性等力学性能。甘油是目前普遍使用的增塑剂之一,被广泛应用于大米蛋白膜制备中。除此之外,Thirathumthavorn 等^[4]利用山梨醇作为增塑剂制备了大米蛋白复合膜,发现增塑剂的使用可有效提高膜的延展性和耐水性。2023 年, Kurtfaki 等^[5]研究发现以月桂精油(EO)作为增塑剂不仅提升了膜的物理性能,降低了膜的断裂伸长率,还赋予大米蛋白膜抑制蜡芽孢杆菌的特性。

2) 生物交联剂。生物交联剂可以改变蛋白质分子的构象,使得蛋白质分子更易溶解,降低表面疏水性。另外,经过交联反应形成的网络结构,可以增强膜的稳定性和耐水性,提高膜的力学强度和耐久性。多酚化合物作为一种生物交联剂在改善蛋白质成膜性能方面发挥重要作用。目前被用于蛋白质交联的多酚主要包括茶多酚、花青素、白藜芦醇等。其作用机理可解释为多酚中的酚羟基和蛋白质中的氨基酸残基形成氢键和疏水相互作用,使得蛋白质链之间相互交联,进而增强膜的稳定性和机械强度。此外,多酚分子之间也可以通过氢键作用相互交联,形成更为稳定的网络结构。另一方面,由于多酚中的芳香环结构和长碳链结构具有疏水性,可以与蛋白质中的疏水区域相互作用,增加膜的疏水性,这种疏水作用减少水分子在膜中的渗透,提高膜的阻水性能。

阿魏酸是一种酚类物质,存在于多种植物的麸皮中。已有研究证明,作为生物交联剂,阿魏酸能够有效改善大米蛋白膜的性能。例如,沈凯青等^[6]使用阿魏酸作为交联剂对米渣蛋白复合膜进行改性。结果表

明,阿魏酸的最优添加量为0.1%;与纯米渣蛋白膜相比,交联改性后的膜抗拉伸强度提高了20.33%,水蒸气透过率降低了20.58%,水溶性降低了23.88%。

3) 超声波技术。超声波技术属于物理改性制膜的辅助手段之一。超声波处理大米蛋白溶液可以产生剪切力,从而破坏蛋白质的聚集结构,使大米蛋白溶解性增强。提高大米蛋白溶解性有助于改善大米蛋白的成膜均匀性,使成膜分子排列更加均匀,并形成紧密的膜结构,从而提升膜的力学性能。例如,艾丹等^[7]使用超声波物理改性法,以碎米蛋白为基础制备可食用膜。研究发现,经过超声波改性处理后,有效提高了膜的抗拉伸强度,降低了膜的水蒸气透过率。在最佳超声处理条件下,膜的抗拉强度约为5.7 MPa,水蒸气透过率约为 $4 \text{ g}\cdot\text{mm}/(\text{kPa}\cdot\text{d}\cdot\text{m}^2)$ 。2022年,根据Wang等^[8]的研究结果,也证明了超声波技术的有效性。他们发现经800 W超声处理后,薄膜的含水率从 $(8.89\pm 0.06)\%$ 提升至 $(11.97\pm 0.41)\%$,这主要是超声均质化引起的糖分子含量和亲水性的增加,进而影响薄膜的含水率。同时,当超声功率为200 W时断裂伸长率达 $(88.60\pm 3.53)\%$,比未超声处理时提高了40%;400 W时断裂伸长率达到最大值 $(142.38\pm 5.27)\%$,比未处理时提高了125%。综上所述可知,超声波改性技术能有效改善大米蛋白膜的断裂伸长率、氧气阻隔性和水蒸气透过性等性能,这可能是由于颗粒间碰撞和溶液中空化气泡坍塌产生的冲击波引起的^[9]。

4) 水解。鉴于大米蛋白存在溶解性低的问题,近年来有研究者开始关注于大米蛋白水解物。大米蛋白水解物是大米蛋白经过蛋白酶等处理后得到的水解产物。相较于大米蛋白,大米蛋白水解物的水溶性较好。然而,由于大米蛋白水解物的分子量较小,其成膜性能并不理想,因此在成膜过程中通常需要添加辅助材料来构建复合膜。目前,关于大米蛋白水解物的开发已经取得了一定的进展。例如,Xie等^[10]基于大米蛋白水解物制备复合膜,并研究了添加壳聚糖对膜性能的影响。结果发现,使用大米蛋白水解物制膜可有效改善其溶解性和延伸性。复合膜延展性范围可达180.26%~204.08%,这可能是因为水解后的大米蛋白表面暴露出更多的羧基和氨基,这些基团更容易通过氢键与水分子结合。研究还发现,在膜中添加壳聚糖后,随着壳聚糖分子质量($<100 \text{ ku}$)的增加,复合膜的含水率和水蒸气透过率降低,同时拉伸强度升高。2023年,该团队还发现在大米蛋白水解物中添加纤维素纳米晶(CNC)制备复合膜,可有效提高膜的抗拉强度、阻水性和热稳定性。结果表明,所制备复合膜的抗拉强度提高了2.15 MPa,膜的最大降解温度从 311.21°C 提高到 325.67°C ,水蒸气透过率降低至 $203.35 \text{ g}/(\text{m}^2\cdot 24 \text{ h})$ ^[11]。

5) 其他。此外,还有研究将大米蛋白与异源蛋

白进行复合,通过调整2种蛋白间的复合比例,进而对其成膜性能进行调控。有研究发现,将小麦面筋蛋白与大米蛋白进行复合,当小麦面筋与大米蛋白比为3/7时,复合膜的抗拉伸强度和断裂伸长率明显提高^[12]。与单一大米蛋白相比,小麦面筋优良的热塑性弥补了大米蛋白在成膜强度和韧性方面的不足,有效改善了大米蛋白膜的物理性能。

综上所述,在大米蛋白成膜研究中,增塑剂、生物交联剂和超声波技术的使用,以及大米蛋白水解物的开发,都显示出提高大米蛋白溶解性的作用,改善了成膜特性。证明此类手段有效解决了传统的碱处理改善植物蛋白溶解性而导致有毒物残留等问题,对保障食品安全和开发绿色包装具有重要意义。

1.2 米糠蛋白

米糠蛋白是一种优质的植物蛋白质,是从廉价的米糠中提取出来的。其在脱脂米糠中的含量可达18%以上。米糠蛋白的研究对增加米糠的市场价值具有重要的现实意义。然而,米糠蛋白存在溶解性不理想、极易聚集等问题,这也是限制其在膜材料开发中进一步应用的主要因素。近年来,研究者在米糠蛋白膜的制备与性能改善方面取得了重要的进展。

糖基化改性是蛋白基膜主要的改性手段之一。研究表明,糖基化改性可以有效改善蛋白质的功能性质,进而提高蛋白质膜的性能。该手段不仅被广泛用于玉米醇溶蛋白膜^[13]、花生蛋白膜^[14]等相关研究中,近年来也开始在米糠蛋白膜的研究中得到应用。2022年,孟才云等^[15]利用葡萄糖糖基化方法处理米糠蛋白,并制备了葡萄糖糖基化米糠蛋白膜和葡萄糖糖基化米糠蛋白-壳聚糖复合膜。结果表明,当糖基化米糠蛋白与壳聚糖质量比为1:1时,复合膜的力学性能较好,其抗拉强度和断裂伸长率较未改性膜分别提高了197.33%、84.42%。该研究也证实了糖基化改性处理可以提高米糠蛋白膜的性能,且改性后蛋白与壳聚糖的良好结合能够大幅度地改善薄膜的力学性能和耐水性。

此外,在米糠蛋白制膜过程中添加其他成膜材料,构建米糠蛋白复合膜的研究也有报道。例如,Schmidt等^[16]以米糠蛋白为原料制备生物基膜,并研究了蛋白质、甘油浓度、酚醛提取物和蒙脱土添加量对其理化性质的影响。结果表明,薄膜的溶解度小于25%,光度(L^*)大于80,不透明度大于14%,抗拉强度为8.6 MPa,伸长率为70%,弹性大于600 MPa,透气性为 $7.5 \text{ g}\cdot\text{mm}/(\text{d}\cdot\text{m}^2\cdot\text{kPa})$ 。这些结果说明,米糠蛋白可用于生物基膜的生产,并可进一步应用于食品领域。齐艺惠等^[17]添加绿色天然的鼠尾草酸制备米糠蛋白复合膜。结果表明,鼠尾草酸添加量为0.5%时,复合膜具有最大抗拉强度(984g)和最长断裂距离(5.89 mm)。该研究也证明鼠尾草酸不仅赋予了米糠

蛋白膜抗氧化性能,还使得膜的水蒸气透过率有所提高,可应用于包装行业。

综上所述,糖基化改性和其他成膜材料的添加是米糠蛋白成膜性能提高的有效手段。然而,根据现有文献报道,关于米糠蛋白的成膜研究虽已取得一定进展,但相比其他粮食加工副产物,米糠蛋白在包装领域显然未能得到充分利用。在今后米糠蛋白膜的制备与改性工作中,可尝试采用蒸汽闪爆处理、超微粉碎技术等米糠蛋白高新物理改性技术;此外,还可尝试添加植物精油、纤维素纳米等生物天然材料,提高其成膜性能。

2 以大米淀粉为基础的膜材料

大米淀粉是大米的主要组成成分,含量约占 80%,通常可以从碎米和米渣等加工副产物中提取。由于大米淀粉具有良好的增稠性、凝胶性和填充性^[18],常被作为成膜材料用于薄膜的制备。目前,淀粉膜的研究主要集中在木薯淀粉、玉米淀粉和马铃薯淀粉^[19]等方面。相较于这些淀粉,大米淀粉具有粒径较小、分散均匀且成膜性良好的优点。已有研究表明,大米淀粉膜不仅具备良好的力学特性和透明性,还对空气中的二氧化碳和氧气等具有较好的阻隔性,因此在食品包装领域表现出巨大的应用潜力^[20]。

然而,由于大米淀粉膜具有较高亲水性,这也导致其成膜的力学性能仍然不理想,尤其是在高湿度条件下,该类膜还存在对高极性化合物的阻隔性较差等问题^[21]。因此,为了提高大米淀粉膜在食品包装行业的应用范围,研究人员致力于探索不同的方法来改善其性能。已经有研究表明,通过淀粉改性和添加天然生物材料可以有效改善大米淀粉膜的性能。

2.1 改性淀粉膜

天然淀粉成膜特性较差,一般不能满足包装行业的需求。因此,研究者们对淀粉的结构和性质进行改性,以提高其成膜性能。大米淀粉改性按其作用机制和方法可分为化学改性、物理改性和复合改性等。

1) 化学改性法。化学改性是通过改变淀粉结构来改善成膜性能,常见的化学手段包括交联改性和酯化改性等。有研究者使用氯乙酸、三偏磷酸钠作为交联剂对大米淀粉进行改性^[22-24]。结果发现,这种改性方法显著提高了成膜材料的柔韧性和断裂伸长率。此外,柠檬酸也是一种常用的交联剂,在 2021 年, Sornsumdaeng 等^[25]将柠檬酸和氧化钙结合作为交联改性剂,制备大米淀粉复合膜。经改性剂处理后,大米淀粉膜的结晶度、溶胀率和吸湿率均有所下降,这可能是因为氧化钙颗粒可以通过氢键和静电作用与淀粉分子作用,导致淀粉中能够与水相互作用的羟基数降低,进而使基质的吸湿性降低。薄膜的平滑度、

延展性和热降解温度则有所提高。此外,2021 年, Martins 等^[26]利用酯化改性法制备了大米淀粉膜,薄膜的溶解性、结晶度和拉伸强度等物理性能均得以改善。研究者们还发现羧甲基化、醋酸水解和乙酰化等酯化改性手段均不同程度改善了大米淀粉膜的性质。综上,证明了酯化和交联改性是改善大米淀粉膜性能的有效手段。此外,还可以利用的方法有氧化改性、醚化改性和酸水解改性等。

2) 物理改性法。物理改性指仅通过物理手段引起淀粉性质发生变化的方法^[27-28],主要包括糊化改性、干热改性、湿热改性和机械研磨改性等。2022 年,王静雯等^[29]采用糊化改性大米淀粉,成功改善了大米淀粉膜的断裂性能和透光性,同时还提高了大米淀粉与其他材料的相容性。吕杨等^[30]曾使用干热改性大米淀粉制备可食性膜,成膜后的抗拉强度提高了 48.8%,阻氧和阻水等性能更好。2023 年, Zareen 等^[31]采用湿热改性的方法制备大米淀粉复合膜,由于聚合物链间相互作用的增强对薄膜的结晶度和柔韧性产生了影响,进而使得成膜抗拉强度和断裂伸长率分别提高至 15.84 MPa 和 25.38%。同时,经过湿热处理后,复合膜的水蒸气透过率从 $2.49 \times 10^{-10} \text{ g}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$ 降低至 $1.25 \times 10^{-10} \text{ g}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$ 。这可能是由于湿热处理技术可以通过限制水分含量来控制体系中分子的运动性,进而导致了水蒸气透过率的降低。此外,湿热处理后,大米淀粉分子的表面可能会变得粗糙,使得水蒸气难以渗透。总之,湿热处理手段能够有效改善膜的溶解性、抗拉强度和水蒸气透过率等物理特性。

机械研磨也是淀粉物理改性的一种重要手段,经过超微粉碎或球磨粉碎后,淀粉颗粒损伤程度大大增加,结构和功能性质变化明显^[32-33]。2021 年, Soe 等^[34]采用球磨改性糯米淀粉制备复合膜,成功改善了复合膜的物理性能,使得薄膜具有较高的柔韧性,抗拉强度和延伸率分别为 $(9.6 \pm 1.7) \sim (9.8 \pm 1.0) \text{ MPa}$ 和 $(162.5 \pm 6.5) \% \sim (165.7 \pm 2.5) \%$ 。综上,基于此类研究结果可知,物理改性显著提高了大米淀粉膜的性能。因大米淀粉膜具备安全性和有效性等特点,其作为化学试剂的绿色替代品,近年来越来越受研究者的欢迎。

3) 复合改性法。复合改性作为一种淀粉改性手段也常用于淀粉成膜研究工作中,复合改性是将不同的改性方法结合起来,通过相互作用来改变淀粉的性质。常见的复合改性方法包括化学-物理复合改性、酶-物理复合改性和化学-化学复合改性等。化学-物理和化学-化学复合改性是大米淀粉成膜研究工作中的主要手段。例如,2023 年, Zareen 等^[31]采用预糊化和湿热处理制备大米淀粉复合膜,改善了大米淀粉膜的物理性能;除此之外,醚化-交联^[35]和氧化-交联^[36]复合改性等手段也有报道。

综上所述,化学和物理改性方法从改变淀粉的结

构和性质 2 个不同角度提高了其成膜性能;同时,在复合改性方法中,不同手段的协同作用,也是有效提高淀粉膜性能的重要手段。

2.2 天然生物材料复合淀粉膜

大米淀粉与生物材料共混是制备大米淀粉膜常用的手段之一。使用的天然生物材料主要包括明胶、多糖、植物纤维素及其衍生物等。这些材料可以通过与大米淀粉相互作用,从而改善其成膜性能。例如,2023 年有研究指出,将大米淀粉与甘油、果胶和塔拉胶(Tara Gum)进行复合,在成膜过程中,这些大分子间存在相互作用,进而改善了复合膜的伸长率、拉伸应力、水蒸气透过性和溶解度等性能。当甘油质量分数为 29.6%,卡拉胶和果胶质量分数为 5.9%时,

它们的相互作用更明显。这可能是因为该配方中,2 种水胶体的浓度相等,导致相互作用效应的增强^[37]。除了上述材料外,采用碱处理的菠萝叶纤维^[38]、仙人掌溶胶^[39]、绿茶提取物(GTE)^[40]等天然生物材料改善大米淀粉膜的性质也有文献报道。综上,植物多糖、植物纤维素纳米和植物提取物等天然生物材料有效改善了淀粉膜的性能,作为安全可降解材料具有广阔的开发前景。

综上,通过化学和物理等改性方式,可有效改善稻米源膜材料的多种性能。这些改善包括降低水蒸气透过率、结晶度和吸湿率等指标,提高耐水性、热稳定性、抗拉伸强度和断裂伸长率等性能。本文总结了部分改性技术在稻米源膜材料中的应用,如表 1 所示。

表 1 改性技术在稻米源膜材料中的应用
Tab.1 Application of modification techniques to films based on rice source

成膜基材	改性手段	性能优化参数	参考文献
大米蛋白	增塑剂改性	提高延展性、耐水性	[4]
		降低断裂伸长率,赋予抑制菌性	[5]
	超声改性	抗拉强度提高了 5.7 MPa; 水蒸气透过率为 4 g·mm/(kPa·dm ²)	[7]
		含水率提升至 (11.97±0.41) %, 断裂伸长率提高了 125% (微波功率为 200 W)	[8]
	水解改性	降低含水率和水蒸气透过率,提高拉伸强度,延展范围为 180.26%~204.08%	[17]
		拉伸强度提高了 10 倍,最大降解温度提高到 325.67 °C,水蒸气透过率降低至 993.81 g/(m ² ·24 h)	[11]
	糖基化改性	抗拉强度提高了 197.33%,断裂伸长率提高了 84.42%	[15]
	生物交联改性	抗拉伸强度提高了 20.33%,水蒸气透过率降低了 20.58%,水溶性降低了 23.88%	[6]
	异源蛋白复合改性	拉伸强度、断裂伸长率明显提高	[12]
	生物交联改性	结晶度、溶胀率和吸湿率均有所下降;提高平滑度、延展性和热降解温度	[25]
大米淀粉	酯化改性	改善溶解性、结晶度和拉伸强度等物理性能	[26]
	醋酸水解改性	透水性为 5.736%、热水速溶性为 92.30%、抗张强度为 46.392 MPa、断裂伸长率为 4.284%	[41]
	乙酰化改性	提高薄膜的水溶性,降低了薄膜的拉伸强度	[42]
	干热改性	抗拉强度提高了 48.8%	[30]
	湿热改性	抗拉强度提高至 15.84 MPa; 断裂伸长率提高至 25.38%; 水蒸气阻隔率为 1.25×10 ⁻¹⁰	[31]
	球磨改性	抗拉强度为(9.6±1.7)~(9.8±1.0)MPa,延伸率为(162.5±6.5)%~(165.7±2.5)%	[34]
	菠萝纤维改性	储存模量和损耗模量均有所增加,热稳定性提高	[38]
	仙人掌溶胶改性	透气性降低	[39]
	绿茶提取物改性	提升抗氧化性和膜厚度,降低含水率、拉伸强度、断裂伸长率	[40]
	硬脂酸改性	溶解度、水蒸气透过率、力学性能增强	[43]
	羧甲基化改性	提高透气性	[44]
		改善膜的水溶性、透明度	[45]

3 基于抑菌成分的稻米源膜材料在食品保鲜中的应用

稻米加工副产物已被证明是开发功能性膜材料的优良基质。近年来,在薄膜中添加抑菌剂、抗氧化剂等功能成分,制备具有食品保鲜功能的活性包装已经成为研究热点。这些包装膜中的制剂能够在食品储藏保鲜过程中被释放到食品体系中,进而提高食品质量。近年来,将具有抑菌功能的稻米源膜材料应用于鸡蛋、水产品、果蔬、坚果等食品保鲜的相关研究均有报道。

3.1 在鸡蛋中的应用

对于鸡蛋的保鲜,Pires等^[46]将具有抗菌作用的蜂胶和大米蛋白共同制备复合保鲜涂膜,并对鸡蛋进行保鲜。结果表明,采用复合涂膜保鲜的鸡蛋质量减少在2%~3%,未包膜的鸡蛋质量减少达5.39%;在储存期间,一般质量损失为2%~3%是可以接受的,同时,储藏3周后,未包膜的鸡蛋品质从AA级转为A级,6周后转为B级,而包膜处理的鸡蛋储藏5周后,品质从AA级转为A级,表明与未包膜的鸡蛋相比,使用涂层可使鸡蛋内部质量保持1~2周。2020年,该团队采用了大米蛋白/壳聚糖复合保鲜膜液对鸡蛋进行涂膜处理,该涂膜能够使鸡蛋保质期延长了2~3周^[47]。此外,研究中,还有报道利用大米水解蛋白构建鸡蛋保鲜涂膜的方法^[48]。

3.2 在水产品中的应用

在水产品保鲜方面,Martins等^[49]研究发现,当大米淀粉和牛至精油(OEO)添加量分别为3%和4.5%时,所制备的功能膜具有较好的保鲜性能,能够有效延长鱼片货架期。Chumsri等^[50]在大米淀粉中添加质量分数为0.5%的Mon-pu叶提取物,制备复合功能膜。研究发现与未涂膜对照相比,该功能膜可将冷藏鲑鱼片的保鲜期从6d延长至9d。Yan等^[51]制备了大米水解蛋白/壳聚糖复合膜,并将其与聚乙烯和聚丙烯包装膜进行比较。结果表明,在储藏过程中,利用大米水解蛋白复合膜包装的三文鱼在感官品质和组织结构方面均较好。冷藏7d后,大米水解蛋白复合膜包装的鱼肉的过氧化值、TVB-N值、肌红蛋白含量和菌落总数均低于对照膜包装的三文鱼。

3.3 在果蔬中的应用

果蔬富含多种维生素和膳食纤维,是人类膳食结构中不可或缺的一部分。然而,在储藏过程中,新鲜的果蔬仍然进行呼吸和蒸腾作用。此外,微生物污染及活性氧的伤害极易导致果蔬的腐败变质,影响其感官品质和经济价值。果蔬保鲜是控制果蔬腐败变质的

重要手段,Thakur等^[52]采用大米淀粉基可食复合膜作为保鲜材料,对李子进行了保鲜效果的测试。结果表明,这种大米淀粉基可食复合膜可以使果实保持良好的色泽长达3周。这也证明了该材料能够有效延长李子果实的货架期,使果实在储藏期间整体品质良好。此外,采用米糠蛋白^[53]、大米淀粉^[54]膜材料对草莓和番茄的保鲜也有报道。

4 结语

合理利用和开发稻米加工副产物对提升其进一步高效增值综合利用具有重要意义。近年来,以稻米加工副产物为资源开发的膜材料因具有无毒、无害、可食用性等特点,对其开发并将其应用于食品保鲜等领域的相关研究较多,并取得了一定的进展。然而,将这类功能性膜材料的进一步推广与产业化应用仍存在着一定的问题。首先,改性手段主要还停留在实验室阶段,在改性技术满足膜材料物理性能的同时,还需要考虑食品安全问题和成本问题。此外,我国稻米种植范围广、品种繁多、南北稻米品质差异大,但对不同品种、来源和产地的稻米功能膜材料在性能等方面的差异研究并未见报道。

综上所述,稻米源功能膜的开发在改性方面存在着一些问题,未来可以探究多种改性方法联合,可尝试与辐照等高新技术结合,在利于减少化学试剂使用的同时降低稻米功能膜自身溶解性差、加工塑性不好等问题。针对不同品种、来源和产地稻米功能膜的改性方法和膜性能的研究也是未来的研究方向。此外,稻米源功能膜除了在食品保鲜方面的应用外,还可注重在食品分析检测、胶囊储藏和药物释放等方面的应用,使稻米加工副产物资源的增值开发更加多元化。

参考文献:

- [1] 胡时开,胡培松.功能稻米研究现状与展望[J].中国水稻科学,2021,35(4):311-325.
HU Shi-kai, HU Pei-song. Research Progress and Prospect of Functional Rice[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2021, 35(4): 311-325.
- [2] 石彦国,贺殷媛,陈凤莲,等.大米蛋白与蒸煮品质相关性研究进展[J].食品科学技术学报,2020,38(4):1-9.
SHI Yan-guo, HE Yin-yuan, CHEN Feng-lian, et al. Research Progress on Relationship between Rice Protein and Cooking Quality[J]. Journal of Food Science and Technology, 2020, 38(4): 1-9.
- [3] 刘锦渊,刘晓丽,夏文水.负载丁香酚的改性纳米粒对玉米醇溶蛋白膜性能的影响[J].食品科学技术学

- 报, 2023, 41(5): 123-135.
- LIU Jin-yuan, LIU Xiao-li, XIA Wen-shui. Effects of Modified Nanoparticles Loaded with Eugenol on Properties of Zein Films[J]. Journal of Food Science and Technology, 2023, 41(5): 123-135.
- [4] THIRATHUMTHAVORN D, THONGUNRUAN W. Incorporation of Rice Starch Affecting on Morphology, Mechanical Properties and Watervapor Permeability of Glutelin-Based Composite Films: Compositefilms Based on Glutelin and Rice Starch[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2014, 38(4): 1799-1806.
- [5] KURTFARI M, YILDIRIM-YALCIN M. Characterization of Laurus Nobilis L. leaf essential Oil Incorporated Maize Starch and Rice Protein Films[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2023: 17: 4954-4962.
- [6] 沈凯青, 李倩如, 曾绍校, 等. 阿魏酸-米渣蛋白复合膜的结构及性能[J]. 食品工业科技, 2019, 40(18): 201-206.
- SHEN Kai-qing, LI Qian-ru, ZENG Shao-xiao, et al. Structural and Functional Properties of Ferulic Acid-Rice Residue Protein Composite Film[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(18): 201-206.
- [7] 艾丹, 高俊, 黎刚, 等. 不同改性方法对碎米蛋白可食用膜性能的影响研究[J]. 粮食与饲料工业, 2017(10): 19-25.
- AI Dan, GAO Jun, LI Gang, et al. Effect of Different Modification Methods on the Properties of Broken Rice Protein Edible Films[J]. Cereal & Feed Industry, 2017(10): 19-25.
- [8] WANG Ling-ling, DING Jian, FANG Yong, et al. Effect of Ultrasonic Power on Properties of Edible Composite Films Based on Rice Protein Hydrolysates and Chitosan[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2020, 65: 105049.
- [9] 梁月, 李源, 郭旭, 等. 超声处理对豌豆蛋白—卡拉胶复合膜性能的影响[J]. 农业科技与装备, 2022(3): 49-52.
- LIANG Yue, LI Yuan, GUO Xu, et al. Effect of Ultrasonic Treatment on Performance of Pea Protein-Carrageenan Composite Membrane[J]. Agricultural Science & Technology and Equipment, 2022(3): 49-52.
- [10] XIE H, OUYANG K, ZHANG L, et al. Chitosan/Rice Hydrolysate/Curcumin Composite Film: Effect of Chitosan Molecular Weight[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 210: 53-62.
- [11] XIE H, WANG Y, OUYANG K, et al. Development of Chitosan/Rice Protein Hydrolysates/ZnO Nanoparticles Films Reinforced with Cellulose Nanocrystals[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 236: 123877.
- [12] YANG Y, ZHANG K, SONG Y, et al. Preparation and Properties of Wheat Gluten/Rice Protein Composites Plasticized with Glycerol[J]. Chinese Journal of Polymer Science, 2011, 29(1): 87-92.
- [13] 郭浩, 张慧君, 陈又铭, 等. 葡萄糖糖基化改性玉米醇溶蛋白膜的物化性质及在胶囊壳中的应用[J]. 中国油脂, 2019, 44(12): 76-80.
- GUO Hao, ZHANG Hui-jun, CHEN You-ming, et al. Physicochemical Property of Glucose Glycosylated Zein Film and Its Application in Capsule Shells[J]. China Oils and Fats, 2019, 44(12): 76-80.
- [14] 蒋丽梅. 木糖和谷氨酰胺转氨酶复合改性对花生蛋白膜性能影响的研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2016.
- JIANG Li-mei. Study on the Effect of Complex Modification of Xylose and Glutamine Aminotransferase on the Properties of Peanut Protein Membrane[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2016.
- [15] 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 Cai-yun, SUN Yan, XIAO Zhi-gang, et al. Preparation and Characterization of Glycosylated Rice Bran Protein-Chitosan Composite Film[J]. Food Science, 2023, 44(16): 135-142.
- [16] SCHMIDT C G, CERQUEIRA M A, VICENTE A A, et al. Rice Bran Protein-Based Films Enriched by Phenolic Extract of Fermented Rice Bran and Montmorillonite Clay[J]. CyTA - Journal of Food, 2015, 13(2): 204-212.
- [17] 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(上半月), 2017(4): 1-4.
- QI Yi-hui, WU Long-kun, DONG Sheng-zhong, et al. Preparation and Properties of Rice Bran Protein Film Incorporated with Carnosic Acid[J]. Academic Periodical of Farm Products Processing, 2017(4): 1-4.
- [18] REN Guo-mei, WAN Ke-ming, KONG Hao, et al. Recent Advance in Biomass Membranes: Fabrication, Functional Regulation, and Antimicrobial Applications[J]. Carbohydrate Polymers, 2023, 305: 120537.
- [19] 张晓晓, 黄丽婕, 陈杰, 等. 淀粉基食品包装膜材料的研究进展[J]. 包装工程, 2018, 39(3): 83-88.

- ZHANG Xiao-xiao, HUANG Li-jie, CHEN Jie, et al. Research Progress of Starch-Based Food Packaging Film Materials[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(3): 83-88.
- [20] DENG Jia, ZHU En-qing, XU Gao-feng, et al. Overview of Renewable Polysaccharide-Based Composites for Biodegradable Food Packaging Applications[J]. Green Chemistry, 2022, 24(2): 480-492.
- [21] XU Y X, KIM K M, HANNA M A, et al. Chitosan-Starch Composite Film: Preparation and Characterization[J]. Industrial Crops and Products, 2005, 21(2): 185-192.
- [22] DETDUANGCHAN N, SRIDACH W, WITTAYAT. Enhancement of the Properties of Biodegradable Rice Starch Films by Using Chemical Crosslinking Agents[J]. International Food Research Journal 2014, 21(3): 1225-1235.
- [23] WOGGUM T, SIRIVONGPAISAL P, WITTAYA T. Properties and Characteristics of Dual-Modified Rice Starch Based Biodegradable Films[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2014, 67: 490-502.
- [24] KITTIPONGPATANA O S, TRISOPON K, WATTANAARSAKIT P, et al. Fabrication and Characterization of Orodispersible Composite Film from Hydroxypropylmethyl Cellulose-Crosslinked Carboxymethyl Rice Starch[J]. Membranes, 2022, 12(6): 594.
- [25] SORN SUMDAENG K, SEEHARAJ P, PRACHAYAWARAKORN J. Property Improvement of Biodegradable Citric Acid-Crosslinked Rice Starch Films by Calcium Oxide[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 193: 748-757.
- [26] MARTINS P C, MARTINS V G. Effect of Rice Starch Hydrolysis and Esterification Processes on the Physicochemical Properties of Biodegradable Films[J]. Starch-Stärke, 2021, 73(9/10): 2100022.
- [27] BEMILLER J N. Physical Modification of Starch[M]. Elsevier: Starch in Food, 2018: 223-253.
- [28] PUNIA S. Barley Starch Modifications: Physical, Chemical and Enzymatic-A Review[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 144: 578-585.
- [29] 王静雯, 吕雅文, 尚亚卓, 等. 大米淀粉膜的制备及其性能[J]. 应用化学, 2022, 39(11): 1693-1702.
- WANG Jing-wen, LYU Ya-wen, SHANG Ya-zhuo, et al. Preparation and Properties of Rice Starch Film[J]. Chinese Journal of Applied Chemistry, 2022, 39(11): 1693-1702.
- [30] 吕杨. 大米干热变性淀粉及其作为可食用膜应用的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2009.
- LYU Yang. Study on Dry-Heat Modified Starch of Rice and Its Application as Edible Film[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2009.
- [31] ZAREEN S, NAWAB A, ALAM F, et al. The impact of Heat-moisture Treatment and Pre-Gelatinization on Functional, Mechanical, and Barrier Properties of Basmati Rice Starch Films[J]. Cereal Chemistry, 2023, 100(3): 675-684.
- [32] 温钦豪, 谢海燕, 王晓曦. 小麦损伤淀粉与面粉品质[J]. 粮食加工, 2011, 36(4): 13-14.
- WEN Qin-hao, XIE Hai-yan, WANG Xiao-xi. Damage of Wheat Starch and Flour Quality[J]. Grain Processing, 2011, 36(4): 13-14.
- [33] SOE M T, PONGJANYAKUL T, LIMPONGSA E, et al. Modified Glutinous Rice Starch-Chitosan Composite Films for Buccal Delivery of Hydrophilic Drug[J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 245: 116556.
- [34] SOE M T, PONGJANYAKUL T, LIMPONGSA E, et al. Films Fabricated with Native and Ball-Milled Modified Glutinous Rice Starch: Physicochemical and Mucoadhesive Properties[J]. Starch-Stärke, 2021, 73(1/2): 2000012.
- [35] KITTIPONGPATANA O S, KITTIPONGPATANA N. Physicochemical and Functional Properties of Modified KJ CMU-107 Rice Starches as Pharmaceutical Excipients: 7[J]. Polymers, 2022, 14(7): 1298.
- [36] TANETRUNGROJ Y, PRACHAYAWARAKORN J. Effect of Dual Modification on Properties of Biodegradable Crosslinked-Oxidized Starch and Oxidized-Crosslinked Starch Films[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 120: 1240-1246.
- [37] QUEQUEZANA BEDREGAL M, MEDRANO DE JARA E, PALZA CORDERO H, et al. Development and Characterization of Novel Packaging Films from Composite Mixtures of Rice-Starch, Tara Gum and Pectin[J]. Journal of Food Science and Technology, 2023, 60(3): 1153-1162.
- [38] BHADANE P, MISHRA A. The Effect of Alkali Treatment on Pineapple Leaf Fibers (PALF) on the Performance of PALF Reinforced Rice Starch Biocomposites[J]. Journal of Natural Fibers, 2022, 19(16): 1153-1162.

- 14235-14249.
- [39] ANDREUCCETTI C, GALICIA-GARCÍA T, MARTÍNEZ-BUSTOS F, et al. Effects of Nopal Mucilage (*Opuntia Ficus-Indica*) as Plasticizer in the Fabrication of Laminated and Tubular Films of Extruded Acetylated Starches[J]. *International Journal of Polymer Science*, 2021, 2021: 1-9.
- [40] HOMTHAWORNCHOO W, HAN J, KAEWPRACHU P, et al. Green Tea Extract Enrichment: Mechanical and Physicochemical Properties Improvement of Rice Starch-Pectin Composite Film[J]. *Polymers*, 2022, 14(13): 2696.
- [41] 彭雅丽. 酸解酯化复合变性大米淀粉的制备及其在淀粉膜中的应用[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2011.
- PENG Ya-li. Preparation of Acidolytic Esterification Composite Modified Rice Starch and its Application in Starch Film[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2011.
- [42] COLUSSI R, PINTO V Z, EL HALAL S L M, et al. Acetylated Rice Starches Films with Different Levels of Amylose: Mechanical, Water Vapor Barrier, Thermal, and Biodegradability Properties[J]. *Food Chemistry*, 2017, 221: 1614-1620.
- [43] THAKUR R, SABERI B, PRISTIJONO P, et al. Characterization of Rice Starch- κ -Carrageenan Biodegradable Edible Film. Effect of Stearic Acid on the Film Properties[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2016, 93: 952-960.
- [44] LI Y, SHOEMAKER C F, MA J, et al. Paste Viscosity of Rice Starches of Different Amylose Content and Carboxymethylcellulose Formed by Dry Heating and the Physical Properties of Their Films[J]. *Food Chemistry*, 2008, 109(3): 616-623.
- [45] KITTIPONGPATANA O S, CHAITIP W, KITTIPONGPATANA N, et al. Physicochemical and Pharmaceutical Properties of Carboxymethyl Rice Starches Modified from Native Starches with Different Amylose Content[J]. *Cereal Chemistry*, 2007, 84(4): 331-336.
- [46] PIRES P G S, PIRES P D S, CARDINAL K M, et al. Effects of Rice Protein Coatings Combined or Not With Propolis on Shelf Life of Eggs[J]. *Poultry Science*, 2019, 98(9): 4196-4203.
- [47] PIRES P G S, LEUVEN A F R, FRANCESCHI C H, et al. Effects of Rice Protein Coating Enriched with Essential Oils on Internal Quality and Shelf Life of Eggs During Room Temperature Storage[J]. *Poultry Science*, 2020, 99(1): 604-611.
- [48] PIRES P G D S, BAVARESCO C, LEUVEN A F R, et al. Plasticizer Types Affect Quality and Shelf Life of Eggs Coated with RICE PROTEIN[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2020, 57(3): 971-979.
- [49] MARTINS P C, BAGATINI D C, MARTINS V G. Oregano Essential Oil Addition in Rice Starch Films and Its Effects on the Chilled Fish Storage[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2021, 58: 1562-1573.
- [50] CHUMSRI P, PANPIPAT W, CHEONG L, et al. Bio-preservation of Refrigerated Mackerel (*Auxis Thazard*) Slices by Rice Starch-Based Coating Containing Polyphenol Extract from *Glochidion Wallichianum* Leaf[J]. *Foods*, 2022, 11(21): 3441.
- [51] YAN Q, WANG L, SUN X, et al. Improvement in the Storage Quality of Fresh Salmon (*Salmo salar*) Using a Powerful Composite Film of Rice Protein Hydrolysates and Chitosan[J]. *Food Control*, 2022, 142: 109211.
- [52] THAKUR R, PRISTIJONO P, GOLDING J B, et al. Development and Application of Rice Starch Based Edible Coating to Improve the Postharvest Storage Potential and Quality of Plum Fruit (*Prunus Salicina*)[J]. *Scientia Horticulturae*, 2018, 237: 59-66.
- [53] 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.
- [54] DAS D K, DUTTA H, MAHANTA C L. Development of a Rice Starch-Based Coating with Antioxidant and Microbe-Barrier Properties and Study of Its Effect on Tomatoes Stored at ROOM TEMPERATURE[J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2013, 50(1): 272-278.