

阿魏酸及其复合物制备研究进展

张晨曦¹, 马燕^{1,2,3*}, 马相杰², 孟少华², 赵建生², 张德权³, 黄现青¹, 王田林^{1,2}, 李天歌^{1,2}

(1. 河南农业大学 食品科学技术学院 河南省食品加工与流通安全控制工程技术研究中心, 河南 郑州 450002; 2. 河南双汇投资发展股份有限公司 河南省肉类智能分割与生物转化工程研究中心, 河南 漯河 462005; 3. 中国农业科学院农产品加工研究所 农业农村部农产品质量安全收贮运管重点实验室, 北京 100193)

摘要: 阿魏酸是一种酚酸类化合物, 具有抗氧化、抗炎等多种生理活性, 在医疗保健、生物农业、日化等领域广泛应用。然而阿魏酸因水溶性较差, 且对氧气、温度、光等条件敏感, 易降解, 稳定性差, 导致其在食品工业中应用受限。通过将阿魏酸与多糖、蛋白质或脂质等物质复合可提高阿魏酸的应用价值。该文对阿魏酸的提取及合成进行介绍, 总结近年来阿魏酸复合物的制备以及其在食品工业中的应用, 以为后续阿魏酸在食品工业中进一步研究与开发提供参考。

关键词: 阿魏酸; 功能; 阿魏酸复合物; 性能; 食品工业

Research Progress in the Preparation of Ferulic Acid and Its Complexes

ZHANG Chenxi¹, MA Yan^{1,2,3*}, MA Xiangjie², MENG Shaohua², ZHAO Jiansheng², ZHANG Dequan³, HUANG Xianqing¹, WANG Tianlin^{1,2}, LI Tiange^{1,2}

(1. Henan Engineering Technology Research Center of Food Processing and Circulation Safety Control, College of Food Science and Technology, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, Henan, China; 2. Henan Intelligent Meat Segmentation and Biotransformation Engineering Research Center, Henan Shuanghui Investment & Development Co., Ltd., Luohe 462005, Henan, China; 3. National Risk Assessment Laboratory of Agro-products Processing Quality and Safety, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Institute of Food Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China)

Abstract: Ferulic acid is a phenolic acid with antioxidant, anti-inflammatory, and other pharmacological activities. It has been widely used in medical care, biological agriculture, daily chemical and other fields. However, ferulic acid has poor water solubility and is prone to degradation under oxygen, temperature, and light conditions. The poor stability limits the application of ferulic acid in the food industry. This issue can be addressed by complexing ferulic acid with polysaccharides, proteins, or lipids. The extraction and synthesis of ferulic acid were introduced, and the recent advancements in the preparation and application of ferulic acid complexes in the food industry were reviewed, with a view to providing valuable reference for the further research and development of ferulic acid in the food industry.

Key words: ferulic acid; function; ferulic acid complexes; performance; food industry

引文格式:

张晨曦, 马燕, 马相杰, 等. 阿魏酸及其复合物制备研究进展[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(6): 176-183.

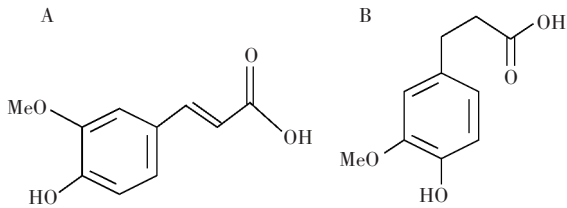
ZHANG Chenxi, MA Yan, MA Xiangjie, et al. Research Progress in the Preparation of Ferulic Acid and Its Complexes[J]. Food Research and Development, 2025, 46(6): 176-183.

基金项目: “十四五”国家重点研发计划项目(2022YFD2100505); 河南青年人才托举工程项目(2023HYTP018); 中国博士后科学基金资助项目(2022M711460); 河南省研究生联合培养基地项目(YJS2022JD16); 河南省高校科技创新团队项目(23IRTSTHN023)

作者简介: 张晨曦(2001—), 男(汉), 在读硕士研究生, 研究方向: 食品营养与安全。

*通信作者: 马燕(1989—), 女(汉), 副教授, 研究方向: 食品营养与安全。

阿魏酸(ferulic acid, FA), 1866年首次从阿魏中分离得到, 并根据植物学名命名^[1]。阿魏酸很少以游离形式存在, 多与植物细胞壁中的多糖、糖蛋白、多胺、木质素和羟基脂肪酸共价结合^[2]。阿魏酸结构式为C₁₀H₁₀O₄, 分子内含碳碳双键, 其具有两种不同的结构形式见图1。顺式阿魏酸呈黄色油状, 而反式阿魏酸则为微黄色或白色的结晶, 并具备更高的应用价值, 阿魏酸可溶解于乙酸乙酯、丙酮和乙醇等极性溶剂中, 但在苯等非极性溶剂中的溶解性较差^[3]。



A. 顺式阿魏酸; B. 反式阿魏酸。

图1 顺式阿魏酸和反式阿魏酸的结构式

Fig.1 Structural formulas of *cis*- and *trans*-ferulic acid

阿魏酸具有多种生理功能如抗氧化、抗癌、改善血管机能等^[4], 在医疗保健、生物农业、日化等领域广泛应用。阿魏酸也有水溶性差、性质不稳定等缺点, 其易氧化, 在碱性环境和高温下会快速降解^[5]。本文综述阿魏酸的提取方法、合成手段、制备复合物以及阿魏酸复合物在食品工业中实际应用, 以期阿魏酸复合物在食品工业中的研究与应用提供参考。

1 提取方法

阿魏酸通常存在于谷类、蔬菜、水果、豆类以及坚果中^[6]。阿魏酸较常用的提取方法有碱解法、酸法和

酶解法^[7-9], 除此之外, 还有加压溶剂法、超声波辅助法、超临界CO₂、微波辅助法等方法^[10-14], 本文主要介绍碱解法、酶解法以及协同法从植物中提取阿魏酸。

1.1 碱解法提取

采用酸解或碱解均可制备阿魏酸, 而有研究表明酚酸类物质在高温加酸性环境下易发生分解, 采用酸法会降低阿魏酸的提取率^[15], 故阿魏酸一般通过碱解法制备。早期研究中碱解法由于反应时间过长仅被用于分析细胞壁中的阿魏酸含量, 碱解法最早以4%的NaOH在通氮条件下常温反应24h可释放出细胞壁中的所有阿魏酸^[16]。后续研究通过提高提取温度, 并加入适当的保护剂(如亚硫酸钠), 以0.5% NaOH浓度在较短时间内就能将麦麸中大部分阿魏酸游离出来^[17]。夏文静等^[18]通过对花生壳、玉米芯、玉米秸秆和小麦秸秆进行比较, 发现玉米芯最适合作为阿魏酸提取原料, 其通过试验确定NaOH浓度0.5 mol/L、固液比(玉米芯:碱液)1:30 g/mL、提取温度50℃、提取时间2.5h为从玉米芯中提取阿魏酸的最佳工艺条件, 该条件下阿魏酸提取量最高为14.05 mg/g。碱解法可以有效地从谷物副产物中提取阿魏酸, 但后续采用碱处理提取过程中的碱会导致盐的产生, 可能会对环境污染, 同时碱解法不能充分保持阿魏酸的活性。

目前, 阿魏酸主要通过碱水解谷维素制备。谷维素中含有阿魏酸的结构单元, 以酯的形式存在, 且易于分解。该过程如图2所示, 谷维素在碱性的醇水溶液中先进行水解, 生成阿魏酸钠盐和环木菠萝醇, 阿魏酸钠盐再与盐酸于冷水浴中作用生成阿魏酸^[19]。水解谷维素制备阿魏酸的操作简便, 阿魏酸提取率高, 并且谷维素来源广、产量大、价格适中。

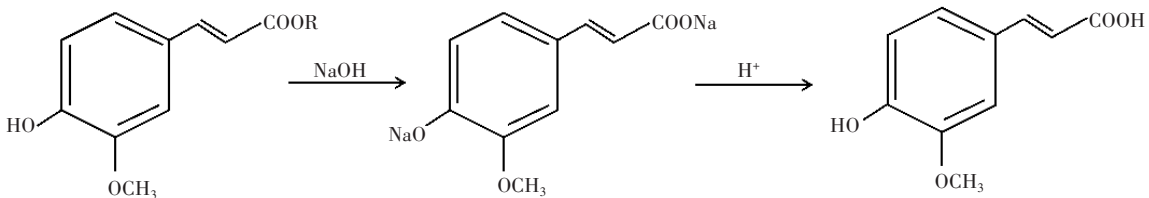


图2 谷维素制备阿魏酸的反应方程式

Fig.2 Reaction equation for preparing ferulic acid from oryzanol

1.2 酶解法提取

酶解法是指使用单一酶制剂或复合酶制剂分解物料中的淀粉、蛋白质等物质, 从而制取高纯度产物的方法。例如玉米芯是玉米加工过程的一种副产物, 通常情况下, 玉米芯中的阿魏酸通过碱水解进行分离, 这种方法会使用大量的化学试剂而对环境造成污染。相比之下酶水解的方法对环境的影响较低, 所使用的化学试剂少, 并且耗能较低^[20]。阿魏酸酯酶可以破坏阿魏酸和所连接糖之间的酯键, 而将阿魏酸从植物细胞壁

中释放出来^[21]。Gopalan等^[22]用阿魏酸酯酶从脱淀粉的麦麸中提取阿魏酸, 研究了载酶量、反应时间、pH值、温度对阿魏酸提取量的影响, 经其优化后的方案使最终阿魏酸的提取率提高了2.5倍, 达到碱解得到阿魏酸提取率的34.6%。也可以先使用一种特定的细胞壁降解酶如木聚糖酶, 通过溶解部分细胞壁结构形成低分子量的阿魏酸水解化合物, 再使阿魏酸酯酶作用于这些低分子量的阿魏酸水解化合物, 释放阿魏酸, 从而进一步改善提取^[20]。Wu等^[23]采用两种木聚糖降解

酶即木聚糖酶和阿魏酸酯酶在协同作用下对小麦麸皮进行酶促水解,在该方法下,小麦麸皮释放阿魏酸的比例从单个酶作用下仅释放 16.8% 提高至 70%。酶解法提取阿魏酸受到酶制剂成本以及生产工序的限制,在降低成本以及优化生产工艺上还有待研究。

1.3 协同法提取

超声波、微波等方法能够破坏植物细胞壁以促进阿魏酸的释放,但这些辅助手段不能作为一种单独的方法提取阿魏酸,只作为预处理和辅助手段。Ferri 等^[4]采用高压灭菌或蒸汽爆破技术使麸皮重新水化,再通过碱性蛋白酶和耐温淀粉酶进行酶促预处理以去除蛋白质和糖类物质,随后使用戊聚糖酶和阿魏酸酯酶进行酶促水解溶解酚类物质,并通过固相萃取从最终产物中回收阿魏酸。这一方法的阿魏酸提取率高于对照组碱水解的方法,阿魏酸释放量为 0.82~1.05 g/kg 麸皮。Gharat 等^[24]研究采用天然低共熔溶剂(nature eutectic solvents, NADES)在 25 kHz 下超声辅助从脱脂米糠中提取阿魏酸,在最终的优化条件下阿魏酸的最大提取率为 9.34 mg/g,而在常规提取和 NADES 提取(无超声辅助)中获得的阿魏酸产量分别为 3.33 mg/g 和 8.71 mg/g,且提取超声下阿魏酸提取时间更短。超声辅助的方法能使阿魏酸的提取速率、提取率更高。Xie 等^[25]采用 NADES 与微波辅助萃取(microwave-assisted extraction, MAE)相结合的方法提取川芎中的阿魏酸,初步筛选出 20 种 NADES,并采用响应面法优化 NADES-MAE 提取川芎中阿魏酸的工艺条件。采用 NADES 可以得到比传统溶剂更高的阿魏酸提取率,氯化胆碱和 1,2-丙二醇的组合是最有效的。当提取条件为时间 20 min、提取温度 68 ℃、液料比为 30:1 (mL/g) 时,可获得最高提取率,此时阿魏酸的提取率为 2.32 mg/g,比传统方法的提取率高。

协同法提取能得到更高的阿魏酸提取率,但辅助手段如超声波技术的成本问题以及前处理后样品后如何优化后续生产工序乃至工业化生产仍需探索。

2 合成方法

阿魏酸的合成方法主要有化学合成法和生物合成法。阿魏酸的化学合成包括 Witting-Horner 反应法和 Knoevenagel 反应法,这两种方法均有较大缺点,如 Knoevenagel 反应法在早期存在一些问题,如所用化学试剂毒性较大,反应时间较长,所用原料也较为昂贵。丁伟等^[26]的改进方法中采用乙酸酐和香兰素为原料,在碳酸钾的催化下反应先合成乙酰阿魏酸,然后催化水解得到阿魏酸。虽然该法缩短了反应时间并优化了试剂的使用,但这两种化学合成方法所得产品为顺式阿魏酸和反式阿魏酸的混合物,后续两种阿魏酸难以分离,并且反应时间仍然较长。

生物合成法是通过微生物将几种阿魏酸前体转化为阿魏酸,如将丁香油中提取得到的丁香酚肉桂酸酯转化为阿魏酸^[27],但目前该方法阿魏酸的产量较低,无法大量生产。

3 阿魏酸复合物概况

近年来,可食用生物膜或涂层材料备受关注。它们在食品保鲜以及延长食品材料的保质期等方面发挥着至关重要的作用。这些可食用的薄膜或涂层不仅可以提供有效保护,防止食品与外界环境之间产生不良反应,还能够为食品附加额外的功能如抗氧化、抗菌功能等。阿魏酸作为一种多功能的酚类物质,被广泛应用于抗氧化剂、抗菌、抗炎和功能性食品等领域,能与多糖、蛋白质、脂质等生物聚合物材料进行良好的复合,且这些材料最常用于生产可食用膜^[28]。阿魏酸的水溶性较差,暴露于空气、紫外线和较高温度下易被氧化,影响使用。通过将阿魏酸制成复合物能有效提高阿魏酸的热稳定性、抗氧化性、水溶性等性能^[29]。

3.1 阿魏酸与多糖类的复合

阿魏酸与多糖的复合一般通过直接酯化法、基于碳二亚胺的化学偶联法、酶催化接枝法等方法^[30]。刘莉等^[31]研究采用研磨法制备甘草黄酮-阿魏酸-环糊精复合包合物,分别采用乳化法和溶胀法制备复合包合物的乳膏剂和凝胶剂,结果显示阿魏酸的加入可促进甘草苷的皮肤透过量并且包合后可提高阿魏酸的皮肤滞留量,更适于阿魏酸的局部给药。Yerramathi 等^[32]将阿魏酸负载于海藻酸钠制备可食性膜,对膜的性能、结构和形态模式进行分析,阿魏酸加入后的海藻酸钠膜性质稳定并且刚性增强,同时膜的抗氧化性能也得到提升。有研究通过喷雾干燥将阿魏酸分别包封于麦芽糊精以及羟丙基甲基纤维素中制成微胶囊,阿魏酸与麦芽糊精以及羟丙基甲基纤维素包封效果良好,包封后的阿魏酸相比游离态的阿魏酸,水溶性和稳定性均有所增强^[33]。另有研究采用搅拌球磨再通过机械活化的方法制备了木薯淀粉-阿魏酸(cassava starch-ferulic acid-ferulic acid, CS-FA)复合物,并对其表征和理化性质进行研究,所制备的复合物在扫描电镜下结构光滑,木薯淀粉的断裂结构消失,热重分析下显示机械活化的方法会降低复合物的热稳定性,而阿魏酸的加入可以提高复合物的热稳定性,并且复合物的溶解度随着机械活化时间的延长而增加,因此机械活化是一种可靠的合成 CS-FA 复合物的方法^[34]。Chen 等^[35]的研究以水为溶剂,采用中温加热的方法制备一种安全的水溶性抗氧化剂阿魏酸-壳聚糖复合物,采用光谱法确定阿魏酸-壳聚糖复合物的化学结构,并对其热稳定性和流变性能进行研究,其所得到的阿魏酸-壳聚糖复合物提高了阿魏酸的水溶性,并且复合物的抗氧化性能

优于游离阿魏酸。

3.2 阿魏酸与蛋白类的复合

蛋白质具有亲水性,由蛋白质制成的可食用膜能有效阻隔氧气、二氧化碳、香味物质和油脂等,而蛋白质制备膜的一些性能(如高水蒸气透过率、低机械性能)限制了其应用。阿魏酸能增加蛋白质的交联,主要通过以下一些机制:一是通过以醌为媒介反应进行交联^[36-37];二是通过与蛋白质或者多糖的羟基进行酯化来交联;三是以自由基为媒介进行交联^[38]。通过与阿魏酸的交联能够达到改善膜性能的效果。陈达佳等^[39]在阿魏酸改性胶原蛋白-壳聚糖复合膜的制备过程中对复合膜性能的影响因素进行了研究,其中阿魏酸的添加量、热处理温度、热处理时间对膜性能影响显著,其通过优化试验条件最终使复合膜的拉伸强度、断裂伸长率、水蒸气透过率、溶解度透光率得到改善,这些性能说明阿魏酸能够增加胶原蛋白-壳聚糖复合膜分子间的交联,改善复合膜的特性。Ling等^[40]制备了大米蛋白-阿魏酸复合物,对其进行了漆酶和非漆酶催化的研究,结果显示漆酶能有效诱导阿魏酸的氧化和聚合,促进阿魏酸和大米蛋白的相互作用,大米蛋白对阿魏酸在模拟口腔液中的降解有保护作用且在胃肠液中能使阿魏酸保持稳定,大米蛋白与阿魏酸复合可以保护消化道中的阿魏酸以保持阿魏酸的抗氧化功能。Chang等^[41]以阿魏酸为原料研究其对于卵清蛋白结构和发泡性能的影响,其通过将相同体积的阿魏酸和卵清蛋白在25℃水浴2h进行复合,阿魏酸和卵清蛋白的复合的主要驱动力为疏水作用和氢键,阿魏酸的加入使卵清蛋白分子之间有少量的聚集,这使得卵清蛋白起泡后相邻的薄膜更加牢固和稳定,改善了卵清蛋白的发泡性能,使泡沫具有长期稳定性。Zhao等^[42]以大豆分离蛋白(soy protein isolate, SPI)和阿魏酸为材料,在漆酶(laccase, LC)催化下制备了共价配合物大豆分离蛋白-阿魏酸复合物(SPI-FA)并将该复合物进一步用微生物转谷氨酰胺酶(transglutaminase, TGase)处理以形成水凝胶,扫描电镜显示所制备的水凝胶形成了分层且有序的凝胶结构,并且其硬度和持水力均有所提高,体外消化后,复合水凝胶仍能保持稳定的抗氧化活性。阿魏酸与蛋白质类化合物的结合能有效改善复合物的功能特性,同时也增强了阿魏酸的应用价值。

3.3 阿魏酸与脂质的复合

有文献报道阿魏酸与脂质的复合是通过将阿魏酸制成固体分散体、脂质体、包合物等方式^[43]。张小飞等^[43]以纳米结构脂质载体(nanostructured lipid carriers, NLC)通过热熔乳化-超声波法制备阿魏酸纳米结构脂质载体(FA-loaded NLCs),并通过三因素三水平Box-Behnken试验设计得到条件为脂质浓度2.7%、药物浓度为69.6 mg/mL、表面活性剂浓度3%时所得

的FA-loaded NLCs性质最好,制备的FA-loaded NLCs粒径(167.6±34.6)nm,包封率为(81.5±3.6)%,载体表面光滑不黏连,粒径较小且分布均匀,且24h阿魏酸最终释放率可达86.7%。Gupta等^[44]通过先乳化再超声的方法制备了硬脂酸聚乙二醇甘油酯(Gelucire 50/13)与阿魏酸的纳米乳液与纳米颗粒,试验结果显示添加10%脂质(Gelucire 50/13)和0.5%阿魏酸为制备纳米乳液和纳米颗粒的最佳浓度,在纳米颗粒中阿魏酸分子主要存在于纳米颗粒的表面层,在乳液体系中阿魏酸与脂质分子的相互作用以范德华力为主,同时也有氢键之间的作用力存在。高艺敏^[45]采用超声法制备阿魏酸固体脂质纳米粒,通过单因素试验得到乳化剂选择为硬脂酰乳酸钠(sodium stearyl lactate, SSL)和Tween 80以1:1的质量比进行复配,乳化剂添加浓度为1%,阿魏酸适宜添加量为5%,当水油比为70:1,超声时间为5min,超声功率为180W,该超声法所制备的阿魏酸固体脂质纳米粒粒径小、包封率高(91.5±1.27)%。另一项研究分别采用薄膜-超声法和乳化挥发法,通过单硬脂酸甘油酯将阿魏酸包裹在内,得到了阿魏酸固体脂质纳米粒(ferulic acid-solid lipid nanoparticles, FA-SLNs),由薄膜-超声法制成的FA-SLNs粒径较小,由乳化挥发法获得较高的FA-SLNs包封率。两种方法在适宜的工艺条件下制备得到的样品能稳定地在4℃下储存21d,这说明采用这两种方法制备FA-SLNs可行^[46]。阿魏酸同脂质复合多是制成负载阿魏酸的纳米脂质颗粒或将阿魏酸包封于脂质纳米粒内部,并且复合效果良好,能有效提高阿魏酸的性能。

3.4 阿魏酸与混合高分子材料的复合

混合高分子材料同阿魏酸的复合同样能有效提高阿魏酸的功能性质。Huang等^[47]制备了一种芯鞘结构的静电纺丝玉米醇溶蛋白-聚氧化乙烯超薄纤维,并将阿魏酸掺入其中,以确保其协同抗氧化性能。所制备的超薄纤维具有良好的形貌和光滑的表面,纤维的内部结构稳定。对于不同的阿魏酸加载位置,观察到芯层阿魏酸加载纤维具有持续作用,鞘层阿魏酸加载纤维具有预爆裂作用。Sharma等^[48]采用溶剂浇铸法制备聚乳酸-聚己二酸丁二醇酯-对苯二甲酸丁二醇酯[(poly(lactide)-poly(butylene adipate-co-terephthalate), PLA-PBAT)-阿魏酸的天然抗菌活性共混物。阿魏酸的引入提高了PLA-PBAT膜的物理、机械(拉伸强度、断裂失效和弹性)和抗菌性能,还使膜的热稳定性明显增强。添加阿魏酸的PLA-PBAT薄膜具有较高的紫外阻隔性能和较强的抗菌活性,可有效避免食品包装上有害的光化学反应和致病菌的生长,因此可作为活性包装材料使用。Jin等^[49]通过共混静电纺丝法制备了负载阿魏酸的聚乙烯醇-小麦面筋-葡萄糖薄膜(polyvinyl alcohol-wheat gluten-glucose, PWG),并对复

合膜进行释放试验和抑菌试验,结果表明膜对阿魏酸有良好的控制释放作用,对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌具有良好的抑菌效果,这显示出了阿魏酸-PWG可降解膜是一种活性食品包装的潜在可能。MARYAM等^[50]通过将氧化石墨烯(graphene oxide, GO)添加到鱼明胶(fish gelatin, FG)中并使用阿魏酸与明胶-氧化石墨烯薄膜进行交联,得到了明胶-氧化石墨烯/阿魏酸(gelatin-graphene oxide/ferulic acid, gel-GO/FA)薄膜,研究中采用不同的阿魏酸添加浓度并对膜的性能进行分析,阿魏酸的加入使薄膜微观结构更加致密、弯曲度增加、膜的水蒸气透过率降低,随着阿魏酸浓度的提高膜的抗氧化活性显著提高。阿魏酸的最佳添加量为1%,此时膜的拉伸强度最高,同时可使紫外线透过率显著下降。明胶-氧化石墨烯薄膜通过与阿魏酸交联改善了膜的机械性能、水蒸气透过率、光阻隔性能以及功能特性,显示出了该复合膜作为食品包装的可能性。

4 阿魏酸及其复合物在食品工业中的应用

新鲜水果、蔬菜、水产品 and 肉类在收获、运输和储存过程中极易受外界因素(如氧气、水分、微生物等)的影响,可能会使农产品及其加工食品受到污染或变质。这会导致许多问题,如质地、颜色、营养价值的损失,从而导致食品货架期降低。通过选择适宜的包装材料能有效避免外界污染,维持食品的新鲜品质。阿魏酸作为一种天然的多功能抗氧化剂,其复合物近年来在新鲜水果、蔬菜、水产品 and 肉类保鲜方面显示出了良好的效果。

4.1 水果保鲜

Huang等^[47]制备阿魏酸负载玉米醇溶蛋白、聚环氧乙烷超薄纤维同轴电纺纤维,并将其应用于苹果包装当中,在包装苹果片的研究中纤维膜包装降低了苹果片的失重率和褐变率,有良好的抗褐变作用并提供了抗氧化保鲜的效果。Yang等^[51]采用枯草芽孢杆菌(*Bacillus vallismortis*) fmb-103 重组漆酶(fmb-rL103)催化阿魏酸接枝壳聚糖,将其用于芒果的保鲜,包装组芒果在16 d 颜色没有变化,仍具有较高的硬度和较低的失重率。并且包装能有效降低芒果的病变率,空白组在16 d 时病变率为55%,而涂有FA接枝的中、高分子量壳聚糖包装组病变率则为0%和15%。该复合物有效降低了果实的透氧性、透水性。Jia等^[52]以甲壳素纳米纤维水悬浮液为基材,阿魏酸作为物理交联剂,得到多功能复合水果保护涂层。甲壳素与FA涂膜表现出优异的机械性能、耐水性和耐氧性,有效降低新鲜草莓和鲜切苹果的失水率、延迟成熟、抗氧化和微生物入侵。Liu等^[53]研究了阿魏酸和纳他霉素联合处理采后黑莓的保护机制,与对照组相比,阿魏酸和纳他霉素联合处理组分别含有439个和388个差异表达基因(dif-

ferentially expressed genes, DEGs)和差异表达蛋白(differentially expressed proteins, DEPs),其中414个DEGs和387个DEPs下调。它们主要是催化活性和结合基因和蛋白,大部分参与代谢过程和细胞过程、细胞器和细胞部分的分子功能,说明二者联合处理黑莓可抑制碳水化合物代谢、能量生物代谢、氨基酸生物合成、减弱呼吸作用、提高果实的抗逆能力,从而延长鲜果货架期。

4.2 肉制品保鲜

新鲜肉制品富含多不饱和脂肪酸、脂类和蛋白质,这些物质容易氧化并导致微生物生长。这会导致肉变色、风味改变、营养价值降低乃至变质。Wang等^[54]研究通过碳二亚胺介导的偶联反应合成了具有较强抗氧化和抗菌活性的阿魏酸接枝壳聚糖。将所制得的阿魏酸-壳聚糖复合物用作新鲜猪肉的食用包膜材料。与未包膜猪肉对比,包膜猪肉的总活菌数、挥发性盐基氮值、pH值、硫代巴比妥酸活性物质含量和滴水损失均较低。肖乃玉等^[55]以胶原蛋白为成膜基材,添加抗菌剂阿魏酸以及海藻酸钠、甘油、戊二醛等辅助材料,流延制备出阿魏酸-胶原蛋白膜液,将其涂覆于腊肠上,定期对细菌总数、挥发性盐基氮值、pH值进行测定,与未涂膜腊肠对比,阿魏酸-胶原蛋白膜能有效提升腊肠的贮存品质。

4.3 水产品保鲜

水产品如鱼类肉质鲜嫩可口,富含蛋白质、维生素、不饱和脂肪酸和矿物质。其中蛋白质和脂肪等生物大分子在鱼死后的运输和贮藏阶段会发生许多分解反应,导致鱼肉品质下降。Xiao等^[56]以魔芋葡甘聚糖(konjac glucomannan, KGM)为成膜基质, ϵ -聚赖氨酸盐化物(ϵ -polylysine hydrochloride, ϵ -PL)和阿魏酸为防腐剂,制备了一种复合涂层。将3种处理过的海鲈鱼(KGM、KGM- ϵ -PL和KGM- ϵ -PL-fa)和未处理的海鲈鱼分别在4℃下储存20 d。结果显示复合膜能有效抑制鲈鱼的内源酶活性、脂肪氧化反应和微生物生长,改变其挥发性成分,降低异味,保持鲈鱼鱼片的原始品质。王丽平^[57]以 β 环糊精和阿魏酸为原料利用共沉积法构建阿魏酸- β 环糊精包合物。使用该包合物对4℃冷藏的带鱼进行预处理,能有效延长货架期3~5 d,与未使用涂膜的对照组相比,涂膜处理能够降低鱼肉中的挥发性盐基氮值,并显著延缓脂质氧化过程。Liu等^[58]探究了阿魏酸-壳聚糖复合膜对于南美白对虾的保鲜效果,试验结果显示应用阿魏酸-壳聚糖复合膜后,对虾的失重率、pH值、挥发性盐基氮、硫代巴比妥酸值、菌落总数和感官评分均得到良好的改善,所得阿魏酸复合膜的保鲜效果良好。

4.4 其他食品保鲜

魏舒楠等^[59]将氯化钙、阿魏酸和乙醇进行复配,并

测试复配物对于鲜切莲藕的保鲜效果,复配的保鲜剂有效维持了鲜切莲藕的品质,可在4℃下延长其保质期至第12天。在提升鲜切莲藕抗氧化能力的同时,保持了活性氧清除系统的正常功能和细胞结构的完整性。陈达佳^[60]利用以鲑鱼皮胶原蛋白和壳聚糖为成膜基质,由阿魏酸改性胶原蛋白-壳聚糖膜,对于方便面调料进行包装,并进行了储存试验,在0~90 d内阿魏酸改性胶原蛋白-壳聚糖膜所包裹的蔬菜和调料粉的质量均有小幅度的下降,在对于食用油的存储时,食用油的过氧化值有一定的升高但仍在GB 2716—2018《食品安全国家标准 植物油》规定范围内,说明膜的阻氧性能良好。虽然阿魏酸改性胶原蛋白-壳聚糖膜在性能上不及塑料包装,只能部分起到替代塑料包装的效果,但这也拓宽了阿魏酸复合物在食品工业中的应用。

5 总结

阿魏酸作为一种多功能的酚类物质,具有抗氧化、抗炎、抑菌等多种作用,可广泛应用于多个领域。阿魏酸目前常用的提取方法有碱解法、酶法、超声波辅助法等方法,现阶段阿魏酸的制备方法是通过碱水解谷维素为主,而阿魏酸的合成方法由于技术的限制,尚不能广泛使用。将阿魏酸与多糖、蛋白质、脂质、生物聚合物材料等进行复合制备可食用生物膜或涂层材料,可有效提高阿魏酸的热稳定性、水溶性,应用于水果、肉品、水产品的保鲜时表现出良好的抗氧化及抗菌性能。优化阿魏酸的提取工艺,降低制备成本以及研究出更多种类、更优性能、更好效果的阿魏酸复合物,并将其应用于食品的保鲜当中是未来需要持续研究的重点方向。

参考文献:

- [1] ALAM M A. Anti-hypertensive effect of cereal antioxidant ferulic acid and its mechanism of action[J]. *Frontiers in Nutrition*, 2019, 6: 121.
- [2] 张国治, 杨徐宁, 张雨. 阿魏酸在食品和农业领域的研究进展[J]. *粮食加工*, 2019, 44(4): 41-43.
ZHANG Guozhi, YANG Xuning, ZHANG Yu. Research progress of ferulic acid in food and agriculture[J]. *Grain Processing*, 2019, 44(4): 41-43.
- [3] 王新颖, 孙尚德, 吕亚萍, 等. 米糠加工副产物生产阿魏酸的高值化利用研究进展[J]. *中国油脂*, 2020, 45(5): 117-122, 127.
WANG Xinying, SUN Shangde, LÜ Yaping, et al. Progress in high utilization value of ferulic acid produced from by-product of rice bran processing[J]. *China Oils and Fats*, 2020, 45(5): 117-122, 127.
- [4] FERRI M, HAPPEL A, ZANAROLI G, et al. Advances in combined enzymatic extraction of ferulic acid from wheat bran[J]. *New Biotechnology*, 2020, 56: 38-45.
- [5] 熊洁, 杨丹, 孟宏, 等. 阿魏酸皮肤生理作用及其化妆品包载技术研究进展[J]. *日用化学工业(中英文)*, 2023(9): 1073-1079.
XIONG Jie, YANG Dan, MENG Hong, et al. Research progress in skin physiological effects and its cosmetic encapsulation technology of ferulic acid[J]. *China Surfactant Detergent & Cosmetics*, 2023(9): 1073-1079.
- [6] KUMAR N, PRUTHI V. Potential applications of ferulic acid from natural sources[J]. *Biotechnology Reports*, 2014, 4: 86-93.
- [7] CHEN Z W, MENSE A L, BREWER L R, et al. Wheat bran layers: Composition, structure, fractionation, and potential uses in foods[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2024, 64(19): 6636-6659.
- [8] BURANOV A U, MAZZA G. Extraction and purification of ferulic acid from flax shives, wheat and corn bran by alkaline hydrolysis and pressurised solvents[J]. *Food Chemistry*, 2009, 115(4): 1542-1548.
- [9] LAU T, HARBOURNE N, ORUÑA-CONCHA M J. Valorisation of sweet corn (*Zea mays*) cob by extraction of valuable compounds[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2019, 54(4): 1240-1246.
- [10] XU F, SUN R C, SUN J X, et al. Determination of cell wall ferulic and p-coumaric acids in sugarcane bagasse[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2005, 552(1/2): 207-217.
- [11] LI P, LI S P, LAO S C, et al. Optimization of pressurized liquid extraction for Z-ligustilide, Z-butylidenephthalide and ferulic acid in *Angelica sinensis*[J]. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 2006, 40(5): 1073-1079.
- [12] SUN Y Y, WANG W H. Ultrasonic extraction of ferulic acid from *Ligusticum chuanxiong*[J]. *Journal of the Chinese Institute of Chemical Engineers*, 2008, 39(6): 653-656.
- [13] SUN Y Y, LI S F, SONG H T, et al. Extraction of ferulic acid from *Angelica sinensis* with supercritical CO₂[J]. *Natural Product Research*, 2006, 20(9): 835-841.
- [14] LIU Z L, WANG J, SHEN P N, et al. Microwave-assisted extraction and high-speed counter-current chromatography purification of ferulic acid from *Radix Angelicae sinensis*[J]. *Separation and Purification Technology*, 2006, 52(1): 18-21.
- [15] ROBBINS R J. Phenolic acids in foods: An overview of analytical methodology[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2003, 51(10): 2866-2887.
- [16] 赵东平, 杨文钰, 陈兴福. 阿魏酸的研究进展[J]. *时珍国医国药*, 2008, 19(8): 1839-1841.
ZHAO Dongping, YANG Wenyu, CHEN Xingfu. Research progress of ferulic acid[J]. *Lishizhen Medicine and Materia Medica Research*, 2008, 19(8): 1839-1841.
- [17] 欧仕益, 张颖, 张景, 等. 碱解麦麸制备阿魏酸的研究[J]. *食品科学*, 2002, 23(8): 162-165.
OU Shiyi, ZHANG Ying, ZHANG Jing, et al. Study on ferulic-acid release from wheat bran treated with sodium hydroxide[J]. *Food Science*, 2002, 23(8): 162-165.
- [18] 夏文静, 李飞, 常钰, 等. 碱解玉米芯制备阿魏酸和对香豆酸[J]. *安徽农业科学*, 2014, 42(29): 10302-10305.
XIA Wenjing, LI Fei, CHANG Yu, et al. Production of ferulic acid and p-coumaric acid from corn cob by alkaline hydrolysis[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2014, 42(29): 10302-10305.
- [19] 马书玉, 陈丽. 谷维素水解制备阿魏酸[J]. *黑龙江科技信息*, 2010(14): 179.
MA Shuyi, CHEN Li. Preparation of ferulic acid by hydrolysis of oryzanol[J]. *Heilongjiang Science and Technology Information*, 2010(14): 179.
- [20] ALVIRA P, TOMÁS-PEJÓ E, BALLESTEROS M, et al. Pretreatment technologies for an efficient bioethanol production process based on enzymatic hydrolysis: A review[J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(13): 4851-4861.

- [21] FAULDS C B, WILLIAMSON G. Release of ferulic acid from wheat bran by a ferulic acid esterase (FAE-III) from *Aspergillus niger*[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 1995, 43(6): 1082-1087.
- [22] GOPALAN N, NAMPOOTHIRI K M. Biorefining of wheat bran for the purification of ferulic acid[J]. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 2018, 15: 304-310.
- [23] WU H L, LI H L, XUE Y, et al. High efficiency co-production of ferulic acid and xylooligosaccharides from wheat bran by recombinant xylanase and feruloyl esterase[J]. Biochemical Engineering Journal, 2017, 120: 41-48.
- [24] GHARAT N N, RATHOD V K. Extraction of ferulic acid from rice bran using NADES-ultrasound-assisted extraction: Kinetics and optimization[J]. Journal of Food Process Engineering, 2023, 46(6): e14158.
- [25] XIE Y L, LIU H R, LIN L, et al. Application of natural deep eutectic solvents to extract ferulic acid from *Ligusticum chuansiong* Hort with microwave assistance[J]. RSC Advances, 2019, 9(39): 22677-22684.
- [26] 丁伟, 赵伟博, 季卫刚. 阿魏酸的制备[J]. 广东化工, 2015, 42(6): 24-25.
DING Wei, ZHAO Yibo, JI Weigang. The preparation of ferulic acid[J]. Guangdong Chemical Industry, 2015, 42(6): 24-25.
- [27] 陈洋, 唐瑶, 曹婉鑫, 等. 阿魏酸的制备及在食品工业中应用的研究进展[J]. 杭州化工, 2014, 44(4): 12-15.
CHEN Yang, TANG Yao, CAO Wanxin, et al. Research progress in preparation and application of ferulic acid in food industry[J]. Hangzhou Chemical Industry, 2014, 44(4): 12-15.
- [28] ALI A, AHMED S. Recent advances in edible polymer based hydrogels as a sustainable alternative to conventional polymers[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2018, 66(27): 6940-6967.
- [29] OU S Y, KWOK K C. Ferulic acid: Pharmaceutical functions, preparation and applications in foods[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2004, 84(11): 1261-1269.
- [30] 张新雪, 殷丽君, 王琨, 等. 阿魏酸修饰多糖及提高其抗氧化性研究进展[J]. 粮食与油脂, 2022, 35(5): 23-25, 30.
ZHANG Xinxue, YIN Lijun, WANG Kun, et al. Research progress of ferulic acid modified polysaccharide and its antioxidant activity [J]. Cereals & Oils, 2022, 35(5): 23-25, 30.
- [31] 刘莉, 张璐, 刘强, 等. 甘草黄酮阿魏酸环糊精包合物制备及其评价[J]. 中成药, 2012, 34(9): 1670-1674.
LIU Li, ZHANG Lu, LIU Qiang, et al. Preparation and evaluation of licoflavone and ferulic acid cyclodextrin inclusion compound[J]. Chinese Traditional Patent Medicine, 2012, 34(9): 1670-1674.
- [32] YERRAMATHI B B, KOLA M, ANNEM MUNIRAJ B, et al. Structural studies and bioactivity of sodium alginate edible films fabricated through ferulic acid crosslinking mechanism[J]. Journal of Food Engineering, 2021, 301: 110566.
- [33] YU J, ROH S, PARK H. Characterization of ferulic acid encapsulation complexes with maltodextrin and hydroxypropyl methylcellulose[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 111(4): 106390.
- [34] FANG K, HE W, JIANG Y, et al. Preparation, characterization and physicochemical properties of cassava starch - ferulic acid complexes by mechanical activation[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 160: 482-488.
- [35] CHEN H, DUAN X, XU J B, et al. Thermal-assisted synthesis of ferulic acid-chitosan complex in water and its application as safe antioxidant[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 227: 384-390.
- [36] HURRELL R F, FINOT P A. Nutritional consequences of the reactions between proteins and oxidized polyphenolic acids[J]. Advances in Experimental Medicine and Biology, 1984, 177: 423-435.
- [37] O'CONNELL J E, FOX P F. Proposed mechanism for the effect of polyphenols on the heat stability of milk[J]. International Dairy Journal, 1999, 9(8): 523-536.
- [38] FIGUEROA-ESPINOZA M C, MOREL M H, SURGET A, et al. Attempt to cross-link feruloylated arabinoxylans and proteins with a fungal laccase[J]. Food Hydrocolloids, 1999, 13(1): 65-71.
- [39] 陈达佳, 赵利, 袁美兰, 等. 阿魏酸改性胶原蛋白-壳聚糖复合膜工艺优化[J]. 食品科学, 2014, 35(20): 73-78.
CHEN Dajia, ZHAO Li, YUAN Meilan, et al. Effect of modification with ferulic acid on properties of collagen-chitosan edible films[J]. Food Science, 2014, 35(20): 73-78.
- [40] LING X, ZHANG J J, TENG J W, et al. Effects of cross-linking of rice protein with ferulic acid on digestion and absorption of ferulic acid[J]. International Journal of Food Sciences and Nutrition, 2023, 74(3): 313-326.
- [41] CHANG K F, LIU J B, JIANG W, et al. Ferulic acid-ovalbumin protein nanoparticles: Structure and foaming behavior[J]. Food Research International, 2020, 136: 109311.
- [42] ZHAO R, WU L, GAO Y, et al. Fabrication and characterization of soy protein isolation-ferulic acid antioxidant hydrogels[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2024, 104(4): 2049-2058.
- [43] 张小飞, 果秋婷, 邹俊波, 等. 阿魏酸钠纳米结构脂质载体的构建与质量评价[J]. 中华中医药杂志, 2020, 35(3): 1213-1218.
ZHANG Xiaofei, GUO Qiuting, ZOU Junbo, et al. Construction and quality evaluation of ferulic acid-loaded nanostructured lipid carriers[J]. China Journal of Traditional Chinese Medicine and Pharmacy, 2020, 35(3): 1213-1218.
- [44] GUPTA K M, DAS S, CHOW P S, et al. Encapsulation of ferulic acid in lipid nanoparticles as antioxidant for skin: Mechanistic understanding through experiment and molecular simulation[J]. ACS Applied Nano Materials, 2020, 3(6): 5351-5361.
- [45] 高艺敏. 基于甘油二酯构建阿魏酸固体脂质纳米粒及其消化特性研究[D]. 广州: 暨南大学, 2019.
GAO Yimin. Construction of ferulic acid solid lipid nanoparticles based on diglyceride and study its digestion characteristics[D]. Guangzhou: Jinan University, 2019.
- [46] 高艺敏, 张震, 陈佩敏, 等. 乳化挥发法和薄膜-超声法制备阿魏酸固体脂质纳米粒工艺比较[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(6): 127-132.
GAO Yimin, ZHANG Zhen, CHEN Peimin, et al. Preparation and comparison of ferulic acid solid lipid nano-particles made by emulsification evaporation and thin film-ultrasonic method[J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(6): 127-132.
- [47] HUANG X Y, JIANG W L, ZHOU J F, et al. The applications of ferulic-acid-loaded fibrous films for fruit preservation[J]. Polymers, 2022, 14(22): 4947.
- [48] SHARMA S, JAISWAL A K, DUFFY B, et al. Ferulic acid incorporated active films based on poly(lactide)/poly(butylene adipate-co-terephthalate) blend for food packaging[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2020, 24: 100491.
- [49] JIN C M, ZHANG H J, REN F Y, et al. Preparation and characterization of ferulic acid wheat gluten nanofiber films with excellent antimicrobial properties[J]. Foods, 2023, 12(14): 2778.
- [50] MARYAM ADILAH Z A, HAN LYN F, NABILAH B, et al. Enhancing the physicochemical and functional properties of gelatin/graphene oxide/cinnamon bark oil nanocomposite packaging films using ferulic acid[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2022, 34: 100960.

- [51] YANG J, SUN J N, AN X J, et al. Preparation of ferulic acid-grafted chitosan using recombinant bacterial laccase and its application in mango preservation[J]. RSC Advances, 2018, 8(13): 6759-6767.
- [52] JIA Q Q, LIN X H, YANG Y W, et al. Multifunctional edible chitin nanofibers/ferulic acid composite coating for fruit preservation[J]. Journal of Polymer Science, 2024, 62(2): 338-352.
- [53] LIU H X, YANG H Y, ZHAO H F, et al. The mechanism of protective effect on postharvest blackberry fruit treated with ferulic acid and natamycin jointly using transcriptomics and proteomics methods[J]. European Food Research and Technology, 2022, 248(10): 2637-2649.
- [54] WANG G T, LIU Y P, YONG H M, et al. Effect of ferulic acid-grafted-chitosan coating on the quality of pork during refrigerated storage[J]. Foods, 2021, 10(6): 1374.
- [55] 肖乃玉, 卢曼萍, 陈少君, 等. 阿魏酸-胶原蛋白抗菌膜在腊肠保鲜中的应用[J]. 食品与发酵工业, 2014, 40(4): 210-215.
XIAO Naiyu, LU Manping, CHEN Shaojun, et al. Application of ferulic acid-collagen protein antibacterial membrane in fresh-keeping of meat[J]. Food and Fermentation Industries, 2014, 40(4): 210-215.
- [56] XIAO H B, LIAO J, CHEN Y S, et al. Effects of konjac glucomannan/ ϵ -polylysine hydrochloride/ferulic acid composite coating on the freshness preservation performance and flavor of refrigerated sea bass fillets[J]. Foods, 2023, 12(3): 517.
- [57] 王丽平. 阿魏酸- β -环糊精包合物制备及带鱼保鲜研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
WANG Liping. Preparation of ferulic acid- β -cyclodextrin inclusion complexes and preservation for hairtail (*Trichiurus lepturus*) [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [58] LIU W J, XIE J, LI L, et al. Properties of phenolic acid-chitosan composite films and preservative effect on *Penaeus vannamei*[J]. Journal of Molecular Structure, 2021, 1239: 130531.
- [59] 魏舒楠, 韩延超, 刘瑞玲, 等. 鲜切莲藕复合保鲜剂的优化及保鲜效果研究[J]. 核农学报, 2022, 36(5): 978-987.
WEI Shunan, HAN Yanchao, LIU Ruiling, et al. Optimization and preservation effect of compound preservative for fresh-cut *Lotus* root [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2022, 36(5): 978-987.
- [60] 陈达佳. 胶原蛋白-壳聚糖可食用复合膜的制备、改性及应用[D]. 南昌: 江西科技师范大学, 2014.
CHEN Dajia. The preparation, modification and application of collagen-chitosan edible film[D]. Nanchang: Jiangxi Science and Technology Normal University, 2014.

加工编辑: 刘艳美
收稿日期: 2024-04-22