

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20240927008

引用格式: 李梦雪, 韩雪, 章丽, 等. 羟基肉桂酸类化合物的功能活性及其在食品中的应用研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(2): 1–7.

LI MX, HAN X, ZHANG L, *et al.* Research progress on the functional activity of hydroxycinnamic acids and their application in food [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(2): 1–7. (in Chinese with English abstract).

羟基肉桂酸类化合物的功能活性及其在食品中的应用研究进展

李梦雪^{1,2}, 韩雪¹, 章丽², 及华^{2*}, 祁伟^{1*}

(1. 河北科技大学食品与生物学院, 石家庄 050018;

2. 河北省农林科学院生物技术与食品科学研究所, 石家庄 050051)

摘要: 羟基肉桂酸是一种以肉桂酸为基本化学结构, 广泛分布于植物中的一种天然酚酸类化合物, 在具有抗氧化、抗炎、抗癌、调节血糖和血脂等生物学活性的同时, 还具有调节食品风味、食品保鲜、抑菌、防腐及防止食品中其他生物活性化合物降解等功效, 因此在食品行业中被用作风味剂、保鲜剂、防腐剂和营养补充剂等。本文综述了近年来羟基肉桂酸类化合物的研究成果, 包括提取方法、生物学功能及应用, 以期为深入开发羟基肉桂酸类化合物相关产品, 拓宽应用范围提供参考和依据。

关键词: 羟基肉桂酸类化合物; 提取方法; 功能; 食品行业

Research progress on the functional activity of hydroxycinnamic acids and their application in food

LI Meng-Xue^{1,2}, HAN Xue¹, ZHANG Li², JI Hua^{2*}, QI Wei^{1*}

(1. College of Food and Biology, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China; 2. Institute of Biotechnology and Food Science, Hebei Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Shijiazhuang 050051, China)

ABSTRACT: Hydroxycinnamic acid is a type of natural phenolic acid with cinnamic acid as the basic chemical structure and extensively distributed in plants. It has a variety of biological activities, including antioxidant, anti-inflammatory, anti-cancer, regulation of blood sugar and lipid levels, while also having the functions of adjusting food flavor, food preservation, inhibiting bacteria, anti-corrosion, and preventing the degradation of other bioactive compounds in food. Therefore, it is used in the food industry as a flavoring agent, preservative, antimicrobial agent, and nutrient supplement, *etc.* This article reviewed the recent years research achievements of hydroxycinnamic acid compounds including extraction methods, biological functions, and applications, with the aim of providing reference and

收稿日期: 2024-09-27

基金项目: 河北省现代农业产业技术体系项目(HBCT2023080204); 河北省科技计划项目(22322502D); 河北省农林科学院科技创新人才队伍建设项目(C23R1302)

第一作者: 李梦雪(2000—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为食品营养与分析。E-mail: 1733798986@qq.com

*通信作者: 及华(1967—), 女, 研究员, 主要研究方向为食品质量安全及调控。E-mail: yjsjihua@163.com

祁伟(1979—), 男, 助理研究员, 主要研究方向为食品加工与功能研究。E-mail: 18031168583@163.com

basis for further developing relevant products and expanding the application scope of hydroxycinnamic acid compounds.

KEY WORDS: hydroxycinnamic acids; extraction method; function; food industry

0 引言

羟基肉桂酸是一大类以肉桂酸为基本化学结构的天然酚类化合物^[1],是植物中最常见、分布最广泛的酚酸,起源于肉桂酸与奎宁酸或 3,4-二羟基苯二酸的羟基化、甲基化或酯化反应,也可以以衍生形式存在^[2],例如酰胺(与氨基酸或肽结合)和酯(与羟基酸或糖苷结合)。常见的羟基肉桂酸有阿魏酸、对香豆酸、芥子酸、咖啡酸、绿原酸、迷迭香酸^[3],其中阿魏酸(4'-羟基-3'-甲氧基肉桂酸)、芥子酸(3',5'-二甲氧基-4'-羟基肉桂酸)、对香豆酸(4'-羟基肉桂酸)、咖啡酸(3',4'-二羟基肉桂酸)是羟基肉桂酸的典型代表。羟基肉桂酸可从茶树、可可、肉桂、水果(皮)、蔬菜、玉米等原料中获得^[4],其具有简单的碳骨架 C_6-C_3 化学结构,它的结构特征在于存在连接苯环和羧基的乙烯键,以及存在一个或多个羟基,其氢可以被甲基自由基取代^[5]。肉桂酸和常见羟基肉桂酸化学式,见图 1^[6]。

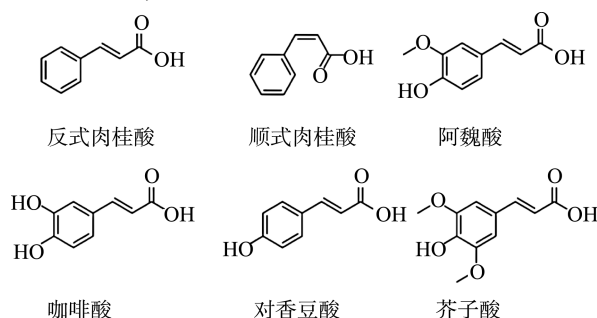


图 1 肉桂酸和常见羟基肉桂酸化学式

Fig.1 Chemical formula of cinnamic acid and common hydroxycinnamic acid

随着对羟基肉桂酸类化合物结构和功能的不断研究,其在行业应用范围不断扩大。本文对羟基肉桂酸的提取方法、生物学功能及应用进展进行了综述,为羟基肉桂酸类化合物的深入研究及开发利用提供理论参考。

1 羟基肉桂酸的提取方法

目前羟基肉桂酸提取方法有微波辅助萃取法、加压热水萃取、高压脉冲电场辅助提取、氢键功能化离子液体萃取、双水相体系提取法、双螺旋挤出机提取法、超临界流体萃取法、碱水解法、反胶束的三相中空纤维液相微萃取、纳滤法、基于铁磁流体的液相微萃取、分子印迹技术、酶水解法和酸水解法等。

1.1 微波辅助萃取法

微波辅助提取原理是通过同向传热和传质的协同效应产生能量,从而促进偶极子旋转和离子传导来进行萃取

的一种方法^[7],常用于从植物材料中提取和纯化活性化合物,如酚类化合物的提取和生物碱的纯化等^[8]。KIM^[9]和 DOVALDE 等^[10]分别运用微波辅助萃取技术从肉桂树皮和蜂胶水溶液中提取肉桂酸化合物,并探讨了提高萃取效率的最佳条件。与传统的回流法相比,微波辅助萃取具有提取时间短、溶剂消耗低和萃取效率高特点。

1.2 加压热水萃取

加压热水萃取是一种可持续技术,其原理是通过提高温度来提取不同类别的植物化合物,是使用有机溶剂萃取方法的替代方案,它能够从不同种类天然植物和水果中提取生物活性化合物,如酚类化合物、香料化合物、蛋白质和多糖等^[11]。研究表明,其萃取率与提取液的温度密切相关^[12-13]。此方法可实现连续提取,是一种一次可提取大量代谢物的绿色萃取方法。此外,还具有成本低,易实现工业化应用等特点。

1.3 高压脉冲电场辅助提取法

该提取法是对两电极间的流态物料反复施加瞬时高电压,以脉冲电场的形式对物料进行处理^[14],目前在食品灭菌^[15]、天然物质提取^[16]以及果蔬干燥^[17]等方面具有广泛的应用。已有的报道均以提高提取率为目的,优化了其工艺变量,并且验证了提取物的生物活性^[18-19]。高压脉冲电场提取法是一种非热细胞膜透过法,具有能耗低,处理时间短,可连续运行等优势,并且全程无废物产生^[20],故是一种新兴的绿色非热加工技术,成为研究的热点。

1.4 氢键功能化离子液体萃取

氢键功能化离子液体萃取利用的是咪唑基离子液体(ionic liquids, ILs),从水中萃取生物活性成分,提取过程中氢键是主要作用力^[21]。常用于天然活性物质的分离纯化,如羟基肉桂酸和酚类化合物的提取等。咪唑基离子液体具有稳定、低消耗、与羟基结合氢键能力强等优点,在分离领域越来越引起研究者的兴趣。研究结果表明,萃取剂的选择是该方法的关键因素,YU 等^[22]选用离子液体 $C_4(1\text{-丁基-3-甲基咪唑六氟磷酸盐})$ 和 $C_6(1\text{-甲基-3-己基咪唑六氟磷酸盐})$ 作为萃取剂,具有不稳定、与水接触易释放有毒和腐蚀性气体等局限性;而以三氟甲磺酸阴离子($CF_3SO_3^-$)作为萃取剂^[21],获得了较强的萃取能力,并且解决了之前咪唑基离子液体不稳定的缺陷。随着研究的不断深入和工业流程的优化,氢键功能化离子液体萃取方法逐渐成为一种稳定、高效和绿色的萃取技术。

1.5 双水相体系提取法

双水相体系提取法是基于不同溶质在两相之间分配

系数不同进行萃取的方法,一般为在水中能以一定浓度混合但互不相溶的两相体系组成^[23]。被广泛应用于植物中生物活性化合物的提取,如酚酸类、黄酮类、花色苷类和苯丙素类等物质^[24]。已报道的文献多选用聚乙二醇-硫酸铵作为双水相萃取体系,研究表明,双水相体系提取过程中聚乙二醇分子量和硫酸铵质量分数是影响提取物萃取率的主要因素^[25-26]。与传统提取方法相比,双水相萃取法在生物活性物质分离方面具有操作范围广,萃取率高,生物相容性高和有机有毒物质用量少等优势。

1.6 双螺旋挤出机提取法

双螺杆挤出机萃取器,集输送、加热和冷却、剪切、混合、固液提取和分离、干燥为一体^[27],在萃取过程中螺杆外形、筒体温度、溶剂类型及其溶剂固液比是主要影响参数。双螺旋挤出机技术目前被应用于从植物^[28]、树皮^[29]、谷物和种子^[30]等原料中提取蛋白质、多酚类、半纤维素和植物油等多种活性物质。CANDY等^[31]采用双螺旋挤出机提取法从工业大麻中提取羟基肉桂酸,结果表明,大麻杆和大麻粉中的对香豆酸提取率分别达到50%和100%、阿魏酸提取率分别达到33%和60%,相比从大麻杆中提取,大麻粉中提取对香豆酸和阿魏酸提取率分别提高了1倍和0.8倍。实践证明,双螺旋挤压提取法具有提取率高、耗时短、能耗少、溶剂消耗少等优点,故是一种绿色提取技术。

1.7 超临界流体萃取法

超临界流体萃取法是一种将待分离物质有效成分按照沸点、极性和分子量的大小依次进行萃取分离的方法^[32]。其核心在于通过对体系温度或压力的调整,促使流体性质产生显著变化,进而对溶剂的溶解度产生影响。目前超临界流体萃取法被应用于从当归和蜂蜜^[33]等物质中萃取羟基肉桂酸类化合物,并在天然药物提取分离方面得到广泛的应用^[34]。超临界流体属于一种物质状态,不仅具有接近气体的扩散系数及黏度,还接近液体的密度^[34],故而具有较好的流动性和传递性能。PEANY等^[35]和SUN等^[36]利用超临界CO₂萃取技术,并添加乙醇作为助溶剂,使提取物中阿魏酸的萃取率大幅提高。研究表明,以超临界CO₂作为萃取溶剂,具备阻燃性、无毒性和可回收性等优点,不仅能够有效地实现基质与萃取物的分离,而且能提高萃取率和纯化效果,故是一种通用的绿色提取技术。

2 羟基肉桂酸的生物学功能

羟基肉桂酸是多酚类化合物的典型代表,具有抗氧化、抗炎、抗癌、调节血糖、调节血脂、预防神经退行性疾病以及维持肠道屏障完整等诸多生物学功能,见图2。

2.1 抗氧化

羟基肉桂酸类化合物具有抗氧化和抗衰老等作用^[37]。鲜切苹果在经过10g/L阿魏酸溶液浸泡处理后,在提高超

氧化物歧化酶活性的同时,还降低了储藏后期多酚氧化酶的活性,故外源阿魏酸处理可通过抗氧化和降低褐变底物含量从而达到减轻鲜切苹果褐变的目的^[38]。FELIPE等^[39]研究表明,在羊饲料中添加羟基肉桂酸,在不影响肉品质的同时,可以提高育肥羔羊的生长性能和抗氧化状态。其抗氧化机制主要通过其分子结构中的酚羟基和其他特定结构来实现,这些结构特性使得它们能够有效地清除自由基,抑制脂质过氧化,从而发挥抗氧化作用,保护细胞免受氧化应激的损害。

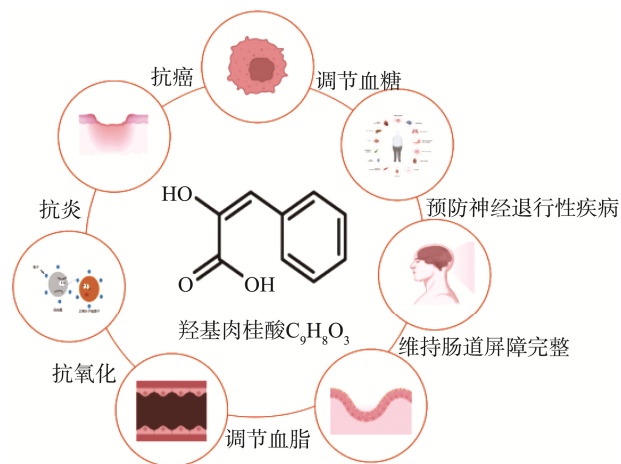


图2 羟基肉桂酸类化合物的功能示意图

Fig.2 Functional diagram of hydroxycinnamic acid compounds

2.2 抗炎和抗癌

酚类或多酚类化合物属于强抗氧化性物质,具备抗炎特性^[40]。研究表明,补充适量的咖啡酸和鞣花酸,小鼠心脏组织中的甘油三酯水平下降,抗凝血、抗氧化以及抗炎能力得到增强^[41];绿原酸对各个系统的炎症性疾病有显著的抗炎效果,机制主要是通过上调白细胞介素和下调促炎细胞因子等相关信号通路^[42]。ZHAO等^[43]以大鼠为研究对象,通过体内实验研究了补充芥子酸对大鼠肝癌细胞的影响,结果表明,芥子酸可诱导大鼠肝癌细胞进行凋亡和自噬。目前研究较多的是阿魏酸和咖啡酸的抗炎活性,在临床上已呈现出积极的成效。基于中医药传统理论及现代医学研究,从调控细胞炎症分子、核因子、蛋白激酶以及信号传导与转录活化因子信号通路等方面,对肉桂酸类化合物及其活性成分治疗神经炎、关节炎、动脉粥样硬化等炎症性疾病开展系列研究。

此外,肉桂酸类化合物自身代谢产生的天然或合成的肉桂酸衍生物也存在一定的抗炎^[44]和抗癌效果。肉桂酸具有一定的抗癌活性,齐墩果酸^[45]和甘草次酸^[46]也具有抗癌活性,且两者结合可起到增强抗癌活性的作用。研究证实,合成的肉桂酸衍生物对宫颈癌^[47]、肺癌^[48]细胞系具有一定的细胞毒性,能够选择性诱导这两种癌细胞凋亡和自噬。可见肉桂酸衍生物具有肺癌和宫颈癌细胞抑制剂的潜力,但对

其它癌细胞是否有抑制效果和对癌细胞选择性防治的功效还有待进一步研究。

2.3 调节血糖和血脂

肉桂酸具有一定的调节血糖的功能。有研究表明,肉桂酸可以改善糖尿病大鼠葡萄糖耐受不良和胰岛素抵抗^[49],补充咖啡酸可以降低基因突变引起的Ⅱ型糖尿病小鼠^[50]和链脲佐菌素诱导的糖尿病大鼠血糖水平^[51],调节雄性近交系小鼠血浆中的胰岛素水平^[52],改善高脂饮食喂养的雄性小鼠的葡萄糖耐受不良^[53]。

另外,已证实肉桂酸和阿魏酸均具有调节血脂的功能。研究表明,补充肉桂酸后降低了高胆固醇大鼠的肝脏甘油三酯水平和胆固醇浓度,且不会产生肝毒性^[54];补充阿魏酸也可降低各种血脂异常模型的胆固醇浓度,如高脂肪饮食喂养的近交品系小鼠^[55]和高胆固醇饮食喂养的叙利亚金仓鼠^[56];此外,人工合成的硫代吗啉和肉桂醇衍生物与阿魏酸、芥子酸和 3,4-二甲氧基肉桂酸偶联,可降低大鼠总胆固醇浓度,且效果略优于降胆固醇药物辛伐他汀^[57]。

综上,肉桂酸类化合物及其衍生物具有一定的调节血糖和血脂的功能。相信随着研究的不断深入,肉桂酸和肉桂酸衍生物可以成为辅助调节血糖和血脂的天然原料,为人类健康提供绿色物质来源。

2.4 预防神经退行性疾病

多项研究发现,羟基肉桂酸类化合物以及合成的衍生物具有辅助治疗神经退行性疾病(帕金森和阿尔茨海默症)的作用效果。徐李亮等^[58]研究证实羟基肉桂酸类化合物具有保护神经、抗氧化和抑制 β 淀粉样蛋白等多种活性协同作用;补充定量的阿魏酸能有效改善大鼠记忆力和学习缺陷^[59];合成的羟基肉桂酸衍生物可诱导干细胞快速分解为神经元,并有助于宿主神经系统和移植细胞连接^[60]。以上研究结果为羟基肉桂酸类化合物及其衍生物在治疗神经退行性疾病方面提供了可行性,以期为抵抗神经退行性疾病药物研发提供新策略。

2.5 维持肠道屏障完整性

肠上皮屏障通透性改变会刺激黏膜产生炎症,从而对肠道屏障造成一定的损伤。研究表明,芥子酸不仅具有改善脂多糖刺激肠上皮细胞造成的肠道屏障损伤作用^[61],还能够抑制核苷酸结合寡聚化结构域样受体蛋白 3 的水平^[62],在治疗或预防肠道炎症损伤和屏障完整性方面表现出一定的应用潜力。

现有研究表明,羟基肉桂酸类化合物可以调节和恢复动物肠道微生物菌群的多样性,减轻肠道的炎症反应,从而维持肠道上皮屏障的完整性^[63-65]。羟基肉桂酸对肠道屏障的保护作用,主要表现为以下 4 个方面:保护紧密连接蛋白,调节促炎细胞因子,发挥抗氧化活性和调节肠道

微生物群。作为人体最重要的生物屏障之一,肠道上皮屏障的完整性对于维持人体适宜的生理和化学环境至关重要。羟基肉桂酸作为天然酚酸类化合物,在维持肠道屏障完整性方面发挥了保护作用,其对肠道健康的影响应该引起更多的关注。

3 羟基肉桂酸在食品中的应用

羟基肉桂酸类化合物因具有抑菌、保鲜、调节食品风味和预防神经退行性疾病等功能,故在食品和保健品等行业应用十分广泛,可作为天然的食品防腐剂、保鲜剂、风味剂、营养补充剂和感官添加剂等。

3.1 防腐和保鲜剂

羟基肉桂酸类化合物具有抑菌、抗紫外线、抗氧化等功效,具备天然防腐保鲜剂的应用潜力。YONG 等^[66]以羟基肉桂酸为原料制成壳聚糖膜,用于猪肉的防腐保鲜,结果表明,被羟基肉桂酸功能化的壳聚糖膜具有更高的紫外线阻挡能力、水蒸气阻挡能力、机械强度、热稳定性以及抗氧化和抗菌活性等优势;此外,肉桂酸-香兰素组合对腐败酵母生物膜具有显著的抑制作用,而酚类与合成的防腐剂结合抑制效果不显著^[67];以肉桂酸为原料制成的肉桂酸钾,可通过破坏菌体的细胞结构、抑制与能量代谢有关酶的活性,从而抑制菌体生长^[68-69];HU 等^[70]研究证实了 4-羟基肉桂酸可以与酪氨酸酶活性位点相互作用,抑制并延缓酪氨酸酶活性,从而达到延缓香菇褐变和延长其保鲜期的目的。

研究表明,羟基肉桂酸类化合物对食品中常见的有害菌如大肠杆菌和金黄色葡萄球菌都有较好的抑菌效果,故可作为天然防腐剂应用于食品包装和防腐保鲜,以发挥延长食品保质期和减少食品中天然活性物质损失等作用。目前以肉桂酸为原料合成的肉桂酸钾,是国标中允许添加的天然防腐保鲜剂,成为羟基肉桂酸类化合物未来广泛应用于食品加工行业的成功案例。

3.2 风味剂

在食品加热过程中羟基肉桂酸类化合物会发生脱羧和氧化反应,其中一些酚类降解产生香气,从而有助于食品的香气形成^[71-72];OLIVER 等^[73]在生咖啡豆中发现了绿原酸和 O-咖啡酰基,研究表明它们在烘焙过程中会转化为苦味化合物,参与咖啡中风味物质的形成;LU 等^[74]研究了咖啡酸处理对采后油桃生理过程的影响,结果表明,经过咖啡酸处理后的油桃其腐败率明显下降且具有合适的糖酸比,在保持油桃品质的同时还赋予了油桃极佳的风味特性。

相关研究证明,羟基肉桂酸类化合物具有辅助调节食品风味的作用,主要通过酚类降解产生香气和味觉活性化合物,以及改变美拉德反应和调节相关挥发性物质组成等多种机制赋予食品风味。羟基肉桂酸类化合物对食品风味特性的作用与其在热加工过程中的化学结构和性质有关,

这为以羟基肉桂酸类化合物为原料研发天然食品添加剂开拓了一条新途径。

3.3 营养补充剂

鉴于羟基肉桂酸类化合物具有有益于人体健康等诸多生理功能,在食品及其营养保健品等行业具有一定的应用潜力。ZHAO 等^[75]通过综述迷迭香酸的生物学功能,又列举了体外实验,结果表明,迷迭香酸可作为预防肿瘤发生和抑制肿瘤生长的膳食补充剂,但目前临床上暂未得到广泛的应用,研究证实了其有望成为未来预防和治疗肿瘤药物的原料来源之一。此外,以绿原酸为原料制成的食品添加剂和抗代谢综合症营养品,在体内和体外实验表明绿原酸具有抗菌,抑制脂肪氧化和防止其他生物活性化合物降解的作用^[76]。尽管相关研究证实了羟基肉桂酸类化合物具有作为膳食补充剂的营养潜力,但它的作用机制及在人体中的代谢途径尚不清楚,因此其在营养保健产业中的应用还需要漫长的探索路径。

3.4 感官添加剂

将肉桂精油和葡萄籽提取物作为功能性添加剂加入到香肠生产中,两者结合使用在展现良好的抗菌活性的同时,还有助于改善香肠颜色和提升感官品质^[77]; OJAGH 等^[78]研究了壳聚糖膜包覆肉桂油处理对冷藏虹鳟鱼的影响,感官评估结果表明,壳聚糖膜包覆肉桂油处理后的冷藏鱼具有较好的颜色、质地和口感,此外,还具有抗氧化、抗菌和保质期长等优点,有助于维持冷藏鱼的品质。在食品加工行业,羟基肉桂酸类化合物未来可作为感官改性剂用于肉代用品组合中,通过减少不良气味和调节植物蛋白质风味来改善产品的感官体验。这种应用不仅提升了植物蛋白产品的市场接受度,还为消费者提供了更多元化的食品选择。

上述研究表明,羟基肉桂酸类化合物可以广泛应用于食品、医药和动物饲料行业中,展现了其在食品科技和健康产业中的重要角色。但其功能特性和健康益处还需进一步探索,使之能更好的为人类健康服务。

4 结束语

本文总结了羟基肉桂酸类化合物的提取工艺、功能活性及应用现状的研究进展,对推动羟基肉桂酸类化合物产品开发与合理利用具有一定的指导意义。今后有望从以下3个方面继续开展相关工作:(1)羟基肉桂酸通常与细胞壁结构中的复杂多糖结合,自身结构中能够分解这些复合物的酶有限,很难以游离的形式呈现出来,故之前研究深度具有一定的局限性。但体内实验表明人体肠道菌群可以消化这些复杂结构,并将其有益的化合物释放到肠道,因此有待通过动物试验研究其对人体肠道菌群的影响,开发相关产品以改善和促进人体健康。(2)羟基肉桂酸类化合物的加工工艺对其构效仍然有制约性,目前加工工艺较少且保

留的活性成分少,故可尝试运用新兴的绿色加工工艺,进一步探索其功效。(3)羟基肉桂酸类化合物的应用范围相对局限,其成分和功效还需深入研究,如在减肥行业中,可作为一种天然的淀粉消化酶抑制剂,抑制淀粉类食物的消化吸收。未来还可以对其结构进行适当改性,进一步探索其功能特性拓展其应用领域。

参考文献

- [1] ASHRAFUL AM, NUSRAT S, HEMAYET H, *et al.* Hydroxycinnamic acid derivatives: A potential class of natural compounds for the management of lipid metabolism and obesity [J]. *Nutrition & Metabolism*, 2016, 13(1): 27.
- [2] SANTOS KV, SILVEIRA NFF, LINCK VB, *et al.* Cyclodextrin-based delivery systems and hydroxycinnamic acids: Interactions and effects on crucial parameters influencing oral bioavailability-A review [J]. *Pharmaceutics*, 2022, 14(11): 2530–2530.
- [3] CONTARDI M, LENZUNI M, FIORENTINI F, *et al.* Hydroxycinnamic acids and derivatives formulations for skin damages and disorders: A review [J]. *Pharmaceutics*, 2021, 13(7): 999.
- [4] ADISAKWATTANA S. Cinnamic acid and its derivatives: Mechanisms for prevention and management of diabetes and its complications [J]. *Nutrients*, 2017, 9(2): 163.
- [5] RUWIZHI N, ADERIBIGBE AB. Cinnamic acid derivatives and their biological efficacy [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2020, 21(16): 5712.
- [6] DENG H, XU Q, GUO HY, *et al.* Application of cinnamic acid in the structural modification of natural products: A review [J]. *Phytochemistry*, 2022, 206: 113532.
- [7] WANG JQ, JING WQ, TIAN HY, *et al.* Investigation of deep eutectic solvent-based microwave-assisted extraction and efficient recovery of natural products [J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2020, 8(32): 12080–12088.
- [8] PROESTOS C, KOMAITIS M. Application of microwave-assisted extraction to the fast extraction of plant phenolic compounds [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2007, 41(4): 652–659.
- [9] KIM J. Extraction time and temperature affect the extraction efficiencies of coumarin and phenylpropanoids from cinnamomum cassia bark using a microwave-assisted extraction method [J]. *Journal of Chromatography B*, 2017, 1063: 196–203.
- [10] DOVALDE J, MODESTAS Z, VITALIS B. Preparation of aqueous propolis extracts applying microwave-assisted extraction [J]. *Processes*, 2022, 10 (7): 1330–1330.
- [11] MERICHEL P, LUISA MM. Pressurized hot water extraction of bioactives [J]. *Trends in Analytical Chemistry*, 2023, 166: 117201.
- [12] JOSÉ RVS, JARA PJ, JOSEP LT, *et al.* Effects of temperature and time on polyphenolic content and antioxidant activity in the pressurized hot water extraction of deodorized thyme (*Thymus vulgaris*) [J]. *Journal of agricultural and food chemistry*, 2012, 60(44): 10920–10929.
- [13] MASIKE K, KHOZA SB, STEENKAMP AP, *et al.* A metabolomics-guided exploration of the phytochemical constituents of *Vernonia fastigiata* with the aid of pressurized hot water extraction and liquid chromatography-mass spectrometry [J]. *Molecules*, 2017, 22(8): 1200.
- [14] 杨宇帆, 陈倩, 王浩, 等. 高压电场技术在食品加工中的应用研究进展[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(19): 316–320, 325.
YANG YF, CHEN Q, WANG H, *et al.* Progress in the application of high-voltage electric field technology in food processing [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2019, 40(19): 316–320, 325.
- [15] 邝金艳, 林颖, 王丽, 等. 高压电场杀菌技术研究进展[J]. *肉类研究*,

- 2023, 37(9): 52–59.
- KUANG JY, LIN Y, WANG L, *et al.* Progress in high-voltage electric field sterilization technology [J]. *Meat Research*, 2023, 37(9): 52–59.
- [16] 李晓娟. 脉冲电场在天然产物提取中的应用研究[J]. 现代食品, 2020(17): 108–113.
- LI XJ. Application of pulsed electric field in natural product extraction [J]. *Modern Food*, 2020(17): 108–113.
- [17] 吕敏明, 杜慧慧, 蔡乐, 等. 脉冲电场预处理在果蔬干燥中的应用研究进展[J]. 食品工业科技, 2023, 44(12): 430–436.
- LV MM, DU HH, CAI L, *et al.* Progress in the application of pulsed electric field pretreatment in fruit and vegetable drying [J]. *Food Industry Science and Technology*, 2023, 44(12): 430–436.
- [18] RIBAS-AGUSTI A, MARTIN-BELLOSO O, SOLIVA-FORTUNY R, *et al.* Enhancing hydroxycinnamic acids and flavan-3-ol contents by pulsed electric fields without affecting quality attributes of apple [J]. *Food Research International*, 2019, 121: 433–440.
- [19] PASHAZADEH B, ELHAMIRAD HA, HAJNAJARI H, *et al.* Optimization of the pulsed electric field-assisted extraction of functional compounds from cinnamon [J]. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 2020, 23(C): 101461.
- [20] BARBA JF, PARNIAKOV O, PEREIRA AS, *et al.* Current applications and new opportunities for the use of pulsed electric fields in food science and industry [J]. *Food Research International*, 2015, 77: 773–798.
- [21] FAN YC, LI XJ, SHEN P, *et al.* Highly effective extraction of hydroxycinnamic acids by hydrogen-bonding-functionalized ionic liquids [J]. *Separation and Purification Technology*, 2017, 179: 126–134.
- [22] YU YY, ZHANG W, CAO SW. Extraction of ferulic acid and caffeic acid with ionic liquids [J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2007, 35(12): 1726–1730.
- [23] JI YW, RAO GW, XIE GF. Ultrasound-assisted aqueous two-phase extraction of total flavonoids from; tremella fuciformis; and antioxidant activity of extracted flavonoids [J]. *Preparative Biochemistry & Biotechnology*, 2022, 52(9): 1060–1068.
- [24] 李申, 卫立心, 董玲珍, 等. 双水相萃取技术在植物多酚分离中的应用[J]. 黑龙江农业科学, 2021(1): 152–156.
- LI S, WEI LX, DONG LL, *et al.* Application of biwater extraction in plant polyphenol separation [J]. *Agricultural Science of Heilongjiang Province*, 2021(1): 152–156.
- [25] 刘康珂, 陈薪宇, 邓爱华, 等. 双水相体系萃取迷迭香酸工艺研究[J]. 农产品加工, 2022(2): 37–39, 43.
- LIU KK, CHEN XY, DENG AIH, *et al.* Research on the extraction process of rosmarinic acid by two-phase aqueous system [J]. *Agricultural Products Processing*, 2022(2): 37–39, 43.
- [26] 梁旭, 朱少英, 张严双, 等. PEG/(NH₄)₂SO₄ 双水相体系萃取金银花中绿原酸的工艺优化[J]. 食品工业, 2018, 39(5): 45–48.
- LIANG X, ZHU SY, ZHANG YS, *et al.* Process optimization of chlorogenic acid extraction from *Lonicera* by PEG/(NH₄)₂SO₄ dual water phase system [J]. *Food Industry*, 2018, 39(5): 45–48.
- [27] SUGIONO S, MASRURI M, ESTIASIH T, *et al.* Structural and rheological characteristics of alginate from *Sargassum cristaefolium* extracted by twin screw extruder [J]. *Journal of Aquatic Food Product Technology*, 2019, 28(9): 944–959.
- [28] COLAS D, DOUMENG C, PONTALIER P, *et al.* Twin-screw extrusion technology, an original solution for the extraction of proteins from alfalfa (*Medicago sativa*) [J]. *Food and Bioproducts Processing*, 2013, 91(2): 175–182.
- [29] CELHAY C, MATHIEU EC, CANDY L, *et al.* Aqueous extraction of polyphenols and antiradicals from wood by-products by a twin-screw extractor: Feasibility study [J]. *Comptes rendus-Chimie*, 2014, 17(3): 204–211.
- [30] SAVOIRE R, LANOISELLE J, VOROBIEV E. Mechanical continuous oil expression from oilseeds: A review [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2013, 6(1): 1–16.
- [31] CANDY L, BASSIL S, RIGAL L, *et al.* Thermo-mechano-chemical extraction of hydroxycinnamic acids from industrial hemp by-products using a twin-screw extruder [J]. *Industrial Crops & Products*, 2017, 109: 335–345.
- [32] 王志锋, 王青. 超临界流体萃取技术在中药提取中的应用[J]. 科技与创新, 2018(14): 13–15.
- WANG ZF, WANG Q. Application of supercritical fluid extraction technology in traditional Chinese medicine extraction [J]. *Technology and Innovation*, 2018(14): 13–15.
- [33] LEE YN, CHEN CR, YANG HL, *et al.* Isolation and purification of 3, 5-diprenyl-4-hydroxycinnamic acid (artepillin C) in brazilian propolis by supercritical fluid extractions [J]. *Separation and Purification Technology*, 2007, 54(1): 130–138.
- [34] GAYLOR MO, HARVEY E, HALE RC. Systematic investigation of factors controlling supercritical fluid extraction (SFE) of spiked and aged PCBs from edible tissues of the blue crab (*Callinectes sapidus*) [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2015, 94(1): 23–28.
- [35] PEANY H, YUYA M, YUSUKE S. Micro-mixing in flow-type process for supercritical CO₂ extraction of ferulic acid and gallic acid from aqueous solution [J]. *Journal of CO₂ Utilization*, 2021, 47: 101503.
- [36] SUN YY, LI SF, SONG HT, *et al.* Extraction of ferulic acid from angelica sinensis with supercritical CO₂ [J]. *Natural Product Research*, 2006, 20(9): 835–841.
- [37] SHANG YJ, LIU BY, ZHAO MM. Details of the antioxidant mechanism of hydroxycinnamic acids [J]. *Czech Journal of Food Sciences*, 2016, 33(3): 210–216.
- [38] 李钰, 姜晋街, 马银银, 等. 外源阿魏酸抑制鲜切苹果褐变机制研究[J]. 保鲜与加工, 2024, 24(6): 9–17.
- LI Y, LOU JX, MA YY, *et al.* Study on the mechanism of exogenous ferulic acid to inhibit browning in fresh-cut apples [J]. *Preservation and Processing*, 2024, 24 (6): 9–17.
- [39] FELIPE JO, ALEJANDRO L, DAVID GM, *et al.* Meta-analysis of hydroxycinnamic acids into finishing lambs' diet: Growth performance, antioxidant status, and meat quality [J]. *Small Ruminant Research*, 2023, 223: 106963.
- [40] LIU YH, ZHANG Y, BAI DY, *et al.* Dietary supplementation with chlorogenic acid enhances antioxidant capacity, which promotes growth, jejunum barrier function, and cecum microbiota in broilers under high stocking density stress [J]. *Animals*, 2023, 13(2): 303.
- [41] CHAO PC, XU CQ, YIN MQ. Anti-inflammatory and anti-coagulatory activities of caffeic acid and ellagic acid in cardiac tissue of diabetic mice [J]. *Nutrition & Metabolism*, 2009, 6(1): 33.
- [42] 凌鑫萍, 晏伟, 杨芬, 等. 绿原酸改善炎症性疾病的研究进展[J]. 中南大学学报(医学版), 2023, 48(10): 1611–1620.
- LING XP, YAN W, YANG F, *et al.* Progress of chlorogenic acid in improving inflammatory diseases [J]. *Journal of Central South University (Medical Edition)*, 2023, 48 (10): 1611–1620.
- [43] ZHAO J, LI H, LI W, *et al.* Effects of sinapic acid combined with cisplatin on the apoptosis and autophagy of the hepatoma cells HepG2 and smmc-7721 [J]. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2021(1): 6095963.
- [44] FREITAS M, RIBEIRO D, JANELA SJ, *et al.* Plant-derived and dietary phenolic cinnamic acid derivatives: Anti-inflammatory properties [J]. *Food Chemistry*, 2024, 459: 140080.
- [45] ZIBERNA L, SAMEC D, MOCAN A, *et al.* Oleonic acid alters multiple cell signaling pathways: Implication in cancer prevention and therapy [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2017, 18(3): 643.
- [46] GAO ZB, KANG X, XU CL. Research progress of anticancer mechanism

- of glycyrrhetic acid [J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2011, 36(22): 3213–3216.
- [47] WANG R, YANG W, FAN YQ, *et al.* Design and synthesis of the novel oleonic acid-cinnamic acid ester derivatives and glycyrrhetic acid-cinnamic acid ester derivatives with cytotoxic properties [J]. Bioorganic Chemistry, 2019, 88: 102951.
- [48] KAUR P, GREWAL AS, PANDITA D, *et al.* Novel cinnamic acid derivatives as potential anticancer agents: Synthesis, *in vitro* cytotoxicity and molecular docking studies [Z]. 2022.
- [49] KASETTI RB, NABI SA, SWAPNA S, *et al.* Cinnamic acid as one of the antidiabetic active principle(s) from the seeds of *Syzygium alternifolium* [J]. Food and Chemical Toxicology, 2012, 50(5): 1425–1431.
- [50] JU UJ, MIKYUNG L, BOK YP, *et al.* Antihyperglycemic and antioxidant properties of caffeic acid in db/db mice [J]. The Journal of pharmacology and experimental therapeutics, 2006, 318(2): 476–483.
- [51] CELIK S, ERDOGAN S, TUZCU M. Caffeic acid phenethyl ester (CAPE) exhibits significant potential as an antidiabetic and liver-protective agent in streptozotocin-induced diabetic rats [J]. Pharmacological Research, 2009, 60(4): 270–276.
- [52] CHAO C, MONG M, CHAN K, *et al.* Anti-glycative and anti-inflammatory effects of caffeic acid and ellagic acid in kidney of diabetic mice [J]. Molecular Nutrition & Food Research, 2010, 54(3): 388–395.
- [53] BEZERRA NMR, VEIGA FL, CAETANO CA, *et al.* Caffeic acid phenethyl ester reduces the activation of the nuclear factor κ B pathway by high-fat diet-induced obesity in mice [J]. Metabolism, 2012, 61(11): 1606–1614.
- [54] LEE M, PARK BY, MOON S, *et al.* Hypocholesterolemic and antioxidant properties of 3-(4-hydroxyl)propanoic acid derivatives in high-cholesterol fed rats [J]. Chemico-Biological Interactions, 2007, 170(1): 9–19.
- [55] SON MJ, RICO CW, NAM SH, *et al.* Influence of oryzanol and ferulic acid on the lipid metabolism and antioxidative status in high fat-fed mice [J]. Journal of Clinical Biochemistry and Nutrition, 2010, 46(2): 150–156.
- [56] WILSON TA, NICOLosi RJ, WOOLFREY B, *et al.* Rice bran oil and oryzanol reduce plasma lipid and lipoprotein cholesterol concentrations and aortic cholesterol ester accumulation to a greater extent than ferulic acid in hypercholesterolemic hamsters [J]. The Journal of Nutritional Biochemistry, 2007, 18(2): 105–112.
- [57] THEODOSIS-NOBELOS P, PAPAGIOUVANNIS G, REKKA EA. Ferulic, sinapic, 3,4-dimethoxycinnamic acid and indomethacin derivatives with antioxidant, anti-inflammatory and hypolipidemic functionality [J]. Antioxidants, 2023, 12(7): 1436.
- [58] 徐李亮, 施罗欣洁, 李若赛, 等. 羟基肉桂酸类化合物及其衍生物在阿尔茨海默病治疗中的研究进展[J]. 海峡药学, 2022, 34(8): 78–82.
- XU LL, SHI LXJ, LI RS, *et al.* Research progress of hydroxycinnamic acid compounds and their derivatives in the treatment of Alzheimer's disease [J]. Straits Pharmacy, 2022, 34(8): 78–82.
- [59] ZAFER FM, FIRDAUS F, ANIS E, *et al.* Prolong treatment with trans-ferulic acid mitigates bioenergetics loss and restores mitochondrial dynamics in streptozotocin-induced sporadic dementia of Alzheimer's type [J]. Neurotoxicology, 2019, 73: 246–257.
- [60] RAZIEH H, FATEMEH M, HAMID R, *et al.* Discovery of neurotrophic agents based on hydroxycinnamic acid scaffold [J]. Chemical Biology & Drug Design, 2016, 88(6): 926–937.
- [61] LAN H, ZHANG LY, HE W, *et al.* Sinapic acid alleviated inflammation-induced intestinal epithelial barrier dysfunction in lipopolysaccharide-(LPS-) treated Caco-2 cells [J]. Mediators of Inflammation, 2021(1): 5514075.
- [62] LI WY, LIU JY, WANG ZX, *et al.* Sinapic acid attenuates chronic DSS-induced intestinal fibrosis in C57bl/6J mice by modulating NLRP3 inflammasome activation and the autophagy pathway [J]. ACS Omega, 2023, 9(1): 1230–1241.
- [63] WILLIAM L, PANGZHEN Z, DANYANG Y, *et al.* Hydroxycinnamic acids on gut microbiota and health [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2020, 20(1): 710–737.
- [64] WANG ZY, YIN Y, LI DN, *et al.* Biological activities of p-hydroxycinnamic acids in maintaining gut barrier integrity and function [J]. Foods, 2023, 12(13): 2636.
- [65] MANZANILLA EG, NOFRARIAS M, ANGUITA M, *et al.* Effects of butyrate, avilamycin, and a plant extract combination on the intestinal equilibrium of early-weaned pigs [J]. Journal of Animal Science, 2006, 84(10): 2743–2751.
- [66] YONG HM, LIU YP, YUN DW, *et al.* Chitosan films functionalized with different hydroxycinnamic acids: Preparation, characterization and application for pork preservation [J]. Foods, 2021, 10(3): 536.
- [67] GITURA BK, MIKLOS T, CSILLA V, *et al.* Activity of binary combinations of natural phenolics and synthetic food preservatives against food spoilage yeasts [J]. Foods, 2023, 12(6): 1338.
- [68] VASCONCELOS NG, CRODA J, SIMIONATTO S. Antibacterial mechanisms of cinnamon and its constituents: A review [J]. Microbial Pathogenesis, 2018, 120: 198–203.
- [69] 余春平, 邹寒, 吴一铭, 等. 肉桂酸钾的抑菌性能研究[J]. 食品科技, 2022, 47(9): 204–210.
- YU CP, ZHOU H, WU YM, *et al.* Study on the bacteriostatic properties of potassium cinnamate [J]. Food Technology, 2022, 47(9): 204–210.
- [70] HU YH, CHEN QX, CUI Y, *et al.* 4-Hydroxy cinnamic acid as mushroom preservation: Anti-tyrosinase activity kinetics and application [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2016, 86: 489–495.
- [71] BORK LV, PROKSCH N, ROHN S, *et al.* Contribution of hydroxycinnamic acids to color formation in nonenzymatic browning reactions with key Maillard reaction intermediates [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2024, 72(3): 1708–1720.
- [72] 曹娅, 钱志伟, 杨雅新. 肉桂和羟基肉桂酸在食品风味调节中的应用[J]. 食品工业, 2020, 41(10): 248–251.
- CAO Y, QIAN ZW, YANG YX. Application of cinnamon and hydroxycinnamic acid in food flavor regulation [J]. Food Industry, 2020, 41(10): 248–251.
- [73] OLIVER F, SIMONE B, GUDRUN K, *et al.* Structure determination of 3-O-caffeoyl-epi-gamma-quinide, an orphan bitter lactone in roasted coffee [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2008, 56(20): 9581–9585.
- [74] LU JX, WANG H, ZHANG Y, *et al.* Caffeic acid enhances the postharvest quality by maintaining the nutritional features and improving the aroma volatiles for nectarine fruit [J]. Food Chemistry, 2024, 464: 141633.
- [75] ZHAO JC, XU LW, JIN D, *et al.* Rosmarinic acid and related dietary supplements: Potential applications in the prevention and treatment of cancer [J]. Biomolecules, 2022, 12(10): 1410.
- [76] SANTANA-GALVEZ J, CISNEROS-ZEVALLOS L, JACOBO-VELAZQUEZ AD. Chlorogenic acid: Recent advances on its dual role as a food additive and a nutraceutical against metabolic syndrome [J]. Molecules, 2017, 22(3): 358.
- [77] AMINZARE M, TAJIK H, ALIAKBARLU J, *et al.* Effect of cinnamon essential oil and grape seed extract as functional-natural additives in the production of cooked sausage-impact on microbiological, physicochemical, lipid oxidation and sensory aspects, and fate of inoculated *Clostridium perfringens* [J]. Journal of Food Safety, 2018, 38(4): e12459.
- [78] OJAGH SM, REZAEI M, RAZAVI SH, *et al.* Effect of chitosan coatings enriched with cinnamon oil on the quality of refrigerated rainbow trout [J]. Food Chemistry, 2009, 120(1): 193–198.

(责任编辑: 韩晓红 安香玉)