

肉桂活性成分、功效及递送体系研究进展

刘婕琳¹,刘功良¹,李南薇¹,黄星源²,白卫东¹,肖更生¹,王宏^{1*}

(1.仲恺农业工程学院广东省岭南特色食品科学与技术重点实验室,农业农村部岭南特色食品绿色加工与智能制造重点实验室,轻工食品学院,广东广州510225;2.广东星耀生物科技有限公司,广东郁南527199)

摘要:肉桂是常用的药食两用植物,具有抑菌、抗氧化、杀虫、降血糖、神经保护等多种生物活性,这与其含有的醛类、多糖、多酚等活性成分密切相关。为使肉桂更好地应用于食品、医药、化妆品等领域,该文对肉桂的主要化学成分、生物活性和递送体系的相关研究进行综述,以期对肉桂相关高附加值产品的开发和综合利用提供依据。

关键词:肉桂;活性成分;功效;作用机理;递送体系

Research Progress in Bioactive Ingredients, Health Benefits and Delivery Systems of Cinnamon

LIU Jielin¹, LIU Gongliang¹, LI Nanwei¹, HUANG Xingyuan², BAI Weidong¹,

XIAO Gengsheng¹, WANG Hong^{1*}

(1.Guangdong Provincial Key Laboratory of Lingnan Specialty Food Science and Technology, Key Laboratory of Green Processing and Intelligent Manufacturing of Lingnan Specialty Food, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, College of Light Industry and Food Technology, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510225, Guangdong, China; 2.Guangdong Xingyao Biotechnology Co., Ltd., Yunan 527199, Guangdong, China)

Abstract: Cinnamon is a commonly used medicinal and food plant with a variety of bioactivities including anti-bacterial, antioxidant, insecticidal, hypoglycemic, neuroprotective effects. These health benefits are closely associated with the presence of aldehyde, polysaccharides, polyphenols, and other bioactive components. To enhance the utilization of cinnamon in the fields of food, medicine, and cosmetics, this paper provides an overview of the main bioactive components, biological activities, and delivery systems of cinnamon, which may provide a basis for the development and comprehensive utilization of high-valuable cinnamon-related products.

Key words: cinnamon; bioactive components; health benefits; mechanism; delivery system

引文格式:

刘婕琳,刘功良,李南薇,等.肉桂活性成分、功效及递送体系研究进展[J].食品研究与开发,2024,45(10):196-202.

LIU Jielin, LIU Gongliang, LI Nanwei, et al. Research Progress in Bioactive Ingredients, Health Benefits and Delivery Systems of Cinnamon[J]. Food Research and Development, 2024, 45(10): 196-202.

肉桂(*Cinnamomum cassia* Presl)别名玉桂、牡桂、菌桂、筒桂,为樟科常绿乔木植物,是常用的药食两用植物,其主要活性成分有糖类、有机酸类、萜烯类、酚类等^[1]。研究表明,肉桂及其活性成分具有良好的抑菌、抗氧化、杀虫、降血糖、神经保护等活性^[2],提高这些活性成分的稳定性和缓释效果对肉桂综合利用具有重要

意义。本文对近年来肉桂活性成分、主要功效及递送体系进行综述,以期对肉桂相关高附加值产品的开发和综合利用提供参考。

1 肉桂活性成分

近年来许多国内外学者对肉桂主要活性成分进行

基金项目:广东省驻镇帮镇扶村农村科技特派员项目-肉桂加工关键技术研究及应用推广(KTP20210415);广东省重点建设学科科研能力提升项目(2021ZDJS005);云浮市科技计划项目“亚热带果蔬生物制造技术研发中心”(2021090102)

作者简介:刘婕琳(2003—),女(汉),本科生,研究方向:生物工程。

*通信作者:王宏(1988—),女(汉),特聘副教授,博士,研究方向:食品活性成分与功能评价。

提取、分离和鉴定,发现肉桂的主要活性成分由挥发性成分和非挥发性成分组成,挥发性成分主要有肉桂醛、乙酸桂酯等,非挥发性成分主要包括肉桂多糖、多酚、肉桂黄酮及其他成分^[3]。大部分关于肉桂的活性成分的研究均为肉桂树皮,因此肉桂的活性成分如来自肉桂树的其他部位将会专门说明,如不说明,则本文论述的肉桂成分来源为肉桂树皮。

1.1 挥发性成分

精油,也称为挥发油,是挥发出强烈气味的复合物。在肉桂精油的所有组分中肉桂醛的相对百分含量最多,其相对百分含量为 62.72%,其次是乙酸桂酯,相对百分含量 11.54%,相对百分含量大于 0.5% 的组分有邻甲氧基肉桂醛(7.33%)、苯甲醛(2.67%)、反油酸(1.76%)、苯丙醛(1.48%)、反式肉桂醛(1.18%)、立方烯(0.93%)、苯乙醇(0.92%)、间羟基苯甲醛(0.86%)、石竹烯(0.55%)、 α -衣兰油烯(0.54%)^[4]。此外,肉桂叶的精油主要由肉桂醛类物质构成。张笱等^[5]通过气相色谱-质谱联用(gas chromatography-mass spectrometer, GC-MS)分析鉴定出肉桂叶精油中的 32 种化合物,主要成分为反式肉桂醛(21.37%~86.46%)、邻甲氧基肉桂醛(1.08%~12.46%)、苯甲醛(0.16%~2.40%)和顺式肉桂醛(0.18%~0.82%)。

1.2 非挥发性成分

目前,对肉桂多糖结构的探究主要针对水提中性多糖。李胜男等^[6]对肉桂水提多糖进行了结构鉴定,结果表明,纯化后的肉桂中性多糖平均相对分子质量为 3 630,其中单糖主要为葡萄糖,主要以 \rightarrow 4) Glu(1 \rightarrow 、Glu(1 \rightarrow 和 \rightarrow 6) Glu(1 \rightarrow 3 种方式连接。由于植物多糖的结构相对复杂,后续仍可进一步挖掘肉桂中其他的多糖组分。

肉桂中含有的多酚主要为类黄酮类、酚酸、单宁及香豆素类化合物,具体鉴定出的包括儿茶素、表儿茶素、肉桂多酚 A2、肉桂多酚 A3、肉桂多酚 A4、甲基羟查耳酮、表没食子儿茶素没食子酸酯(epigallocatechin gallate, EGCG)、原花青素-A、原花青素-B(单倍体、二聚体、三聚体、多聚体)、缩合单宁阿魏酸等^[7]。随着研究的深入,赵月^[8]通过液相色谱-质谱联用技术对纯化后的肉桂酚类物质进行定性定量解析,结果表明,原花青素 B₂ 含量最丰富,达到 112.55 μ g/mg,其次是没食子酰基-鞣花酰基葡萄糖(101.83 μ g/mg)、表儿茶素(75.95 μ g/mg)、A 型原花青素三聚体(34.95 μ g/mg),其余 8 种鉴定出的组分依次为鞣花酸(7.25 μ g/mg)、原儿茶醛(7.10 μ g/mg)、芦丁(5.30 μ g/mg)、没食子酸(4.36 μ g/mg)、A 型原花青素二聚体(1.17 μ g/mg)、槲皮素-3-O-木糖苷(1.41 μ g/mg)、槲皮素-3-葡萄糖醛酸苷(0.86 μ g/mg)和金丝桃苷(0.54 μ g/mg)。此外,肉桂酸和香豆素也是肉桂酚类物质中的重要组成成分,在纯

化后含量分别达 5.765、5.005 mg/g^[9]。由于多酚类物质的纯化方法在不同的研究中存在区别,导致鉴定的多酚类物质组成会有差异,因此肉桂多酚物质解析的相关研究仍有待进一步深入。

2 肉桂及其活性成分的生物活性

近年来,国内外学者对肉桂的生物活性进行了大量研究,表明肉桂及其活性成分具有抗氧化、降血糖、抑菌、杀虫、降脂等多种特性,并在临床方面得到广泛的重视与应用。

2.1 抗氧化活性

抗氧化活性指活性物质将多余的自由基清除,从而延迟、控制或防止食品质量下降或体内退行性疾病的启动和传播。研究表明,肉桂的主要活性成分精油、多酚和多糖都具有一定的抗氧化特性。马廷红等^[10]通过 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)自由基法、羟自由基清除率等测定了肉桂精油的抗氧化活性,虽然肉桂精油的抗氧化活性不及维生素 C,但在 0.4~8.0 mg/mL 浓度范围内能呈现一定的体外抗氧化活性。为了探究精油抗氧化活性的主要成分,路露等^[11]比较了肉桂精油及其主要成分肉桂醛的生物活性,发现相同浓度(16 g/L)肉桂醛的 2,2'-联氮双(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸)二铵盐[2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid, ABTS)]阳离子自由基清除率和铁离子还原能力(ferric ion reducing antioxidant power, FRAP)低于肉桂精油,表明肉桂精油中还含有其他有待进一步挖掘的抗氧化活性物质。

在非挥发性活性成分中,肉桂中性多糖具有较好的抗氧化活性,当肉桂中性多糖的浓度达到 0.5 g/L 时,对 DPPH \cdot 的清除能力与 V_C 相近(84%)^[6]。肉桂粗提物中的酚类物质能通过清除超氧阴离子自由基、氧自由基和羟自由基进而发挥抗氧化作用。Assefa 等^[12]通过研究肉桂的总等效抗氧化能力、总酚含量和总黄酮含量,表明肉桂具有有效的抗氧化能力。黄酮是多酚的重要组成部分,谭冰燕^[13]通过 DPPH \cdot 、ABTS $^{+\cdot}$ 和 FRAP 等方法对越南肉桂树皮黄酮类化合物的抗氧化活性进行分析,结果显示,其具有优良的抗氧化活性,与其中的表儿茶素、金丝桃苷和原花青素 B₂ 显著相关。

目前肉桂及其活性成分的抗氧化活性主要通过 DPPH \cdot 、ABTS $^{+\cdot}$ 和 FRAP 等体外方法进行评价,而在细胞或动物模型中的作用研究较少,因此有待进一步探究。

2.2 降血糖活性

肉桂的降血糖活性不仅在动物实验中得以证实^[14],在临床病例中也被大量文献报道^[15]。Neto 等^[16]发现 2 型糖尿病患者每天服用 3 g 肉桂持续 90 d,可

有效降低血糖水平(血红蛋白 A1c 和空腹静脉血糖)。在降血糖的同时,肉桂还能发挥调节血脂的作用。Senevirathne 等^[17]通过实验证明肉桂能有效降低低密度脂蛋白和血清甘油三酯含量,通过增加胰岛素敏感性从而降低 2 型糖尿病的患病风险。此外,肉桂和其他植物联合使用也成为在降血糖研究中流行的给药形式之一,如肉桂和生姜^[18]、肉桂和水芹籽^[19],但这些研究大多处于动物实验的研究阶段,仍需通过临床实验进一步评价。

研究表明,肉桂可以通过增加胰岛素受体的敏感性、激活糖原合成、刺激葡萄糖摄取,同时还能激活胰岛素受体的激酶从而降低血糖水平^[20]。其中,发挥降血糖功效的活性物质主要是非挥发性成分,如酚类物质和多糖等。张铭儒等^[21]发现肉桂多糖对糖尿病小鼠模型有降血糖作用,并且其降血糖机制可能与调节糖脂代谢有关。Mohammadi 等^[22]发现链脲佐菌素诱导的糖尿病大鼠摄入肉桂后,内脏脂肪组织的 β -肾上腺素受体-3(β -3 adrenergic receptor, β 3-AR)水平提高,引起胞外调节蛋白激酶(extracellular regulated protein kinases, ERK)信号级联激活,促进白色脂肪转化为棕色脂肪组织,进而改善因糖尿病导致的脂质代谢失衡。

2.3 抑菌活性

肉桂中具有抑菌活性的主要成分是精油,可作为病原菌的抑制剂,进而提高食品安全性,延长货架期。Milagres De Almeida 等^[23]比较了多种芳香植物精油对李斯特菌、金黄色葡萄球菌和大肠杆菌等细菌的抑制作用,发现肉桂精油具有突出的抑菌性能。De Aguiar 等^[24]研究发现,肉桂精油能在接触 5 min 内基本消灭猪链球菌。

近年来,国内外学者对肉桂精油的抗菌活性机理进行了研究。肉桂主要通过诱导微生物氧化损伤,破坏细胞膜完整性,导致蛋白质、DNA 和三磷酸腺苷(adenosine triphosphate, ATP)等内容物大量流失,破坏细胞代谢和能量生产,进而诱导细胞死亡。Zhang 等^[25]研究表明,肉桂精油对肠炎沙门氏菌有明显的氧化损伤作用,导致细胞抗氧化酶系统平衡破坏,膜脂代谢物丙二醛(malondialdehyde, MDA)含量增加,蛋白质羰基化加剧,最终造成细胞膜损伤,细胞功能受到干扰,从而抑制肠炎沙门氏菌的生长。陈雪琴等^[26]发现肉桂精油对固、液培养的沙门氏菌生长具有明显的抑制作用,具体表现为菌体的破裂与皱缩,相对电导率和核酸泄漏量提高,同时破坏细胞抗氧化酶系统的平衡。

肉桂精油中最主要的抑菌活性物质是肉桂醛,研究表明,肉桂醛对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、单核增生李斯特菌、黄曲霉、不动杆菌等多种微生物表现出广谱的抗菌性能^[27]。路露等^[11]研究表明,肉桂醛对金黄色葡萄球菌、白色念珠菌和绿脓杆菌的抑制作用显著

优于肉桂精油。除了肉桂醛,邻甲氧基肉桂醛、乙酸桂酯、苯甲醛均表现出一定程度的抑菌活性,其抑菌活性总趋势为肉桂醛>肉桂精油>邻甲氧基肉桂醛>乙酸桂酯>苯甲醛^[4]。此外,李伟^[28]研究表明,肉桂丁香酚作用于蜡样芽孢杆菌可以破坏菌体细胞膜完整性,可能对菌体合成遗传物质造成影响。

肉桂不仅对细菌有抑制作用,对真菌也有抑制作用。Lee 等^[29]对肉桂精油及其成分进行了抗真菌活性研究,结果显示,浓度为 5 mg/纸片的肉桂精油能完全抑制两种植物病原真菌 *Raffaelea quercus-mongolicae* 和 *Rhizoctonia solan*。而反式肉桂醛是其抗真菌活性的主要贡献者。孙培培等^[30]研究发现,肉桂精油对念珠菌属真菌的生长有显著的抑制作用,这主要是通过影响其细胞膜和线粒体的正常代谢功能实现。

2.4 神经保护作用

研究发现,肉桂具有防治阿尔兹海默症(Alzheimer's disease, AD)和帕金森症等神经退行性疾病的潜力。体内 β 淀粉样蛋白(amyloid β -protein, A β)、Tau 蛋白沉积会引发神经毒性,也是 AD 的重要的生物标记。Ciarrelli 等^[31]研究发现肉桂活性成分中的黄烷醇、原花青素和肉桂醛,可阻碍人神经母细胞瘤 SH-SY5Y 细胞系中 A β 的聚集,并抑制 A β 诱导的神经毒性。此外,通过体外实验发现,肉桂提取物还能抑制 Tau 蛋白聚集和丝状物质形成,与其中的主要成分原花青素和肉桂醛密切相关^[32]。这些结果预示肉桂多酚具有多靶点抗 AD 活性的潜力,类似的结果通过动物实验得以证实。李冉等^[33]证实了肉桂提取物可明显提高 AD 模型大鼠的学习和记忆能力,降低海马组织中晚期糖基化终末产物和丙二醛水平,提高过氧化氢酶(catalase, CAT)、超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)酶活以及 SOD1、SOD2、神经元核蛋白(neuronal nuclei, NeuN)、脑源性神经营养因子(brain derived neurotrophic factor, BDNF)和磷酸化酪氨酸激酶 B(phospho-TrkB, p-TrkB)等蛋白的表达水平,表明肉桂提取物可以通过刺激 BDNF/TrkB 通路,增强抗氧化应激能力,改善 AD 症状。

2.5 其他活性

作为传统中药,肉桂活性成分在细胞和动物模型中还呈现出抗肿瘤、调节脂质代谢、缓解类风湿性关节炎等活性。

Aggarwal 等^[34]通过对口腔癌细胞(SCC-4、SCC-9、SCC-25)进行体外实验验证了肉桂提取物及其主要活性成分肉桂醛能显著抑制口腔癌细胞的生长和增殖,并进一步探究其作用机理,发现肉桂提取物和肉桂醛能抑制核因子 κ B(nuclear factor kappa-B, NF- κ B)蛋白在细胞中的转移和侵袭,其中肉桂醛和丝裂原活化蛋白激酶(mitogen-activated protein kinase, MAPK)的

P38 α 部位及二氢叶酸还原酶具有较高亲和力,进而导致这些口腔癌细胞的 PI3k-AKT-mTOR 途径中血管内皮生长因子(vascular endothelial growth factor, VEGF)、环氧合酶-2(cyclooxygenase-2, COX-2)、B 淋巴细胞瘤-2 基因(B-cell lymphoma-2, Bcl-2)和 NF- κ B 等蛋白表达水平降低,产生抗肿瘤作用。

肉桂主要活性成分肉桂醛能有效缓解肝脏脂肪变性,在预防非酒精脂肪肝方面有一定潜力。Xu 等^[35]利用游离脂肪酸诱导小鼠肝复苏率高细胞(alpha mouse liver 12, AML12)建立肝脏脂肪变性模型,通过转录组学和代谢组学联合分析,发现肉桂醛处理刺激甲基转移酶 3(methyltransferase 3, METTL3)的表达,进而促进细胞色素 P450 家族蛋白(CYP4F40)的表达;同时提高癸酸、 γ -亚麻酸、花生四烯酸和二十二碳五烯酸的水平,从而缓解游离脂肪酸诱导的脂肪变性。

3 肉桂活性成分的递送体系

肉桂活性成分包括挥发性组分和非挥发性组分,肉桂精油对氧气、光、温度和 pH 值等多种物理、化学因素敏感,易降解。因此,保护其免受外界因素影响尤为重要。关于肉桂活性成分递送体系的研究集中在微乳液、纳米乳液、皮克林乳液和微胶囊等。以下以肉桂精油为例,总结其递送体系的相关研究。

3.1 微乳液

微乳液是油、水和表面活性剂组成的透明、热力学稳定、各向同性的混合物,通常与助表面活性剂组合配制,其分散域直径为 1~100 nm^[36],具有较高的稳定性和优异的包埋、缓释效果。与普通乳液不同,微乳液含有稳定乳化剂,可降低两个不混溶相之间的相间张力,

在分散相中产生更小的液滴,热力学稳定性更强^[37]。微乳液将肉桂精油包埋在其疏水核中,有效改善了精油的水溶性,并具有较好的保护及缓释作用。Dávila-Rodríguez 等^[38]使用高频超声制备得到肉桂精油的微乳液滴直径为 1.98~5.46 μ m,具有高包封效率(79.91%~81.97%)和低分离率(2.50%~6.67%),稳定性更好,相比未包封的肉桂精油,微乳液对大肠杆菌和单核细胞增生李斯特菌最低抑菌浓度(minimum inhibitory concentration, MIC)和最低杀菌浓度(minimum bactericidal concentration, MBC)更小(20%~75%),抑菌效果更好。除了稳定性,微乳液的缓释性能也是影响微乳液应用的主要因素之一。Shi 等^[39]以吐温 80 作为表面活性剂、无水乙醇作助表面活性剂,与壳聚糖复配制备得到的肉桂精油微乳液面积达到 27.1%,粒径分布集中、包埋性好、稳定性好,延长了肉桂精油的使用时间。

3.2 纳米乳液

纳米乳液是热力学稳定的各向同性系统,其中两种不混溶的液体(水和油)通过适当的表面活性剂或其混合物混合形成单相,相比微乳液,其液滴尺寸更小,通常在 20~200 nm 范围内,并显示出狭窄的尺寸分布^[40]。纳米乳化可提高亲脂性成分在水中的分散性,提高其物理稳定性、光学透明度、水溶性以及功能化合物的体外和体内生物利用度^[41],能穿过膜屏障,其主要缺点是难以大规模灭菌和储存。纳米乳液一般通过超声法、高压均质法、相转温法和溶剂扩散法制备。国内外大量研究表明,纳米乳液可用作肉桂精油的递送体系,显著提高肉桂的稳定性及生物利用率,体系中的乳化剂大多选用吐温 80 的非离子表面活性剂。纳米乳液在肉桂精油递送体系的应用见表 1。

表 1 纳米乳液在肉桂精油递送体系的应用

Table 1 Application of nano-emulsion in cinnamon essential oil delivery systems

乳化剂	油相	制备方法	平均粒径/nm	效果	参考文献
吐温 80	肉桂精油	超声法	9.63	对单核细胞增生李斯特菌和沙门氏菌株的 MIC 分别为 0.078%(体积分数)和 0.039%(体积分数)。	[42]
吐温 80	肉桂精油	超声法和高压均质法	96.34	对单核细胞增生性李斯特菌、金黄色葡萄球菌、沙门氏菌、大肠杆菌有一定的抗菌活性	[43]
吐温 80	肉桂精油	超声法和高压均质法	10~150	有效抑制肉源腐败菌,延缓鸡胸肉的腐败变质	[44]
吐温 80	肉桂精油	相转温法	50.71	有效抑制鱼片储存过程(4 \pm 2) °C 细菌生长	[45]
吐温 80	肉桂精油和中链甘油三酯	相转温法	22.0~101.7	随着脂质相中肉桂精油的增加,对大肠杆菌、鼠伤寒沙门氏菌、金黄色葡萄球菌和副溶血弧菌抗菌活性增加	[46]

3.3 皮克林乳液

皮克林乳液常作为活性物质包埋剂、食品包装材料 and 脂质替代品广泛用于食品领域,是一种更稳定的新型乳液。皮克林乳液通过固体颗粒代替表面活性剂稳定水包油(oil-in-water, O/W)乳液或油包水(water-in-oil, W/O)乳液,它在精油周围形成固体层,防止了油相和水相之间的接触。与传统的表面活性剂稳定的纳米

乳液相比,皮克林乳液在聚合方面具有更高的乳液稳定性^[47]。Huang 等^[48]以肉桂精油为原料,部分脱乙酰甲壳素纳米纤维作为皮克林稳定剂,制备了不含表面活性剂的乳液,随着稳定剂浓度的增加,乳液液滴粒径减小,稳定性增加,乳液显示出更高的抗菌活性,扩散效率得到提高,稳定期长达 90 d。Fan 等^[49]以玉米蛋白纳米颗粒为稳定剂,将含有肉桂精油的皮克林乳液

与壳聚糖/明胶复合膜相结合,形成对副乳假单胞菌和清酒乳杆菌的高抗菌剂,表现出优异的物理稳定性和一定的缓释作用,并且薄膜的阻隔性能也得到了显著改善。由此可见,皮克林乳液是一种具有潜力的基于生物聚合物包装肉桂精油的递送系统。

3.4 微胶囊

微胶囊化是一种涂层技术,具有良好的热稳定性

及缓释性能,通常以成膜基质为壁材,活性功能材料为芯材^[50]。微胶囊化可以将精油变为粉末,通过微胶囊壁对精油的包裹作用,防止其暴露在外界环境中,从而提高稳定性,降低释放速率,延长有效期,减少活性成分丧失^[51]。目前肉桂精油的微胶囊化主要技术有沉淀法、复合凝聚-冷冻干燥法、冷冻干燥法、包结络合法、喷雾干燥法,微胶囊在肉桂精油递送体系的应用见表2。

表2 微胶囊在肉桂精油递送体系的应用

Table 2 Application of microcapsules in cinnamon essential oil delivery systems

壁材	芯材	制备方法	包埋率或平均粒径	效果	参考文献
β -环糊精	肉桂精油	沉淀法	包埋率 74.17%	肉桂叶精油与 β -环糊精之间形成了较好的包合物结构	[52]
玉米糊精、阿拉伯胶、明胶	肉桂精油	复合凝聚-冷冻干燥法	固体肉桂精油微囊和不含明胶的精油微囊平均粒径分别为 49.2 μm 和 11.56 μm	显著抑制指状青霉、意大利青霉和地霉菌株的孢子萌发和菌丝伸长	[53]
改性多孔淀粉和黄原胶	肉桂精油	冷冻干燥法	包埋率 68.73%	对大肠杆菌、枯草芽孢杆菌、酵母菌和霉菌均有明显的抑菌效果	[54]
β -环糊精	肉桂精油	包结络合法	包埋率 30.2%	提高肠道菌群多样性,维持肠道稳态,调控肠道菌群结构	[55]
淀粉辛烯基琥珀酸钠和麦芽糊精	肉桂精油	喷雾干燥法	平均粒径(12.60 \pm 1.09) μm	有效地包封了肉桂精油,具有较高的载药量、包封效率和稳定性	[56]

除单一的微胶囊技术外,微胶囊技术与其他技术结合开发新型材料也受到了国内外学者的广泛关注, Li 等^[57]将微胶囊技术与皮克林乳液结合,构建了肉桂精油皮克林乳液复合微胶囊体系,该体系有效增强了肉桂精油的稳定性和缓释性,对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌能起到有效的长期抗菌作用。Shao 等^[58]将肉桂精油微胶囊通过淀粉与纸基材料相结合,开发了一种用于食用菌保鲜的生物活性纸,改善了涂布纸的机械性能和水蒸气渗透性,成功延长了蘑菇的保质期。

4 结语

肉桂主要活性成分包括精油、多糖、多酚等,研究表明肉桂活性成分具有广泛的生物学效应(抗氧化、降血糖、抑菌等),由于其活性成分对氧气、光、温度和 pH 值等多种物理化学因素敏感且易降解,尤其肉桂精油不溶于水的性质限制了其应用。通过构建递送体系,提高了肉桂精油的水溶性、稳定性、缓释性以及生物利用率,改善了生物活性。目前,常用的肉桂精油递送体系类型有乳液、微乳液、纳米乳液、皮克林乳液和微胶囊等,但使用多重乳液进行包埋递送的研究相对较少。肉桂活性成分递送体系的应用具有良好的发展潜力,随着递送体系研究的深入,未来肉桂活性成分的应用领域将逐步扩大,为肉桂的综合利用及高附加值产品开发奠定基础。

参考文献:

[1] 豆海港,李婷,侯晓东. 肉桂提取物清除自由基及抑菌能力作

- 用研究[J]. 中国调味品, 2015, 40(2): 49-51.
DOU Haigang, LI Ting, HOU Xiaodong. Study on scavenging free radical and antibacterial ability of cinnamon bark extract[J]. China Condiment, 2015, 40(2): 49-51.
- [2] RIBEIRO-SANTOS R, ANDRADE M, MADELLA D, et al. Revisiting an ancient spice with medicinal purposes: Cinnamon[J]. Trends in Food Science & Technology, 2017, 62: 154-169.
- [3] 邓淑蓉,潘宇政. 肉桂主要化学成分及药理作用研究概况[J]. 现代中西医结合杂志, 2018, 27(4): 448-451.
DENG Shurong, PAN Yuzheng. General situation of research on main chemical constituents and pharmacological effects of *Cinnamomum cassia*[J]. Modern Journal of Integrated Traditional Chinese and Western Medicine, 2018, 27(4): 448-451.
- [4] 闫红秀,刘香萍,任乃芄,等. 肉桂精油及其主要组分对饲料中常见真菌的抑菌活性的研究[J]. 饲料工业, 2022, 43(17): 47-53.
YAN Hongxiu, LIU Xiangping, REN Naipeng, et al. Study on antibacterial activity of cinnamon essential oil and its main components against common fungi in feed[J]. Feed Industry, 2022, 43(17): 47-53.
- [5] 张箬晦,钱信怡,童永清,等. 采收月份对肉桂叶出油率及挥发油品质的影响研究[J]. 中国食品添加剂, 2020, 31(3): 139-145.
ZHANG Zuohui, QIAN Xinyi, TONG Yongqing, et al. Oil yield of cinnamon leaves and quality of its volatile oils from different collection months[J]. China Food Additives, 2020, 31(3): 139-145.
- [6] 李胜男,程贤,毕良武,等. 肉桂多糖的结构分析及抗氧化活性研究[J]. 林产化学与工业, 2022, 42(3): 34-40.
LI Shengnan, CHENG Xian, BI Liangwu, et al. Composition analysis and antioxidant activity of cinnamon polysaccharide[J]. Chemistry and Industry of Forest Products, 2022, 42(3): 34-40.
- [7] 胡少平. 肉桂多酚的药理作用研究进展[J]. 云南中医中药杂志, 2014, 35(5): 79-81.
HU Shaoping. Research progress on pharmacological effects of cinnamon polyphenols[J]. Yunnan Journal of Traditional Chinese Medicine and Materia Medica, 2014, 35(5): 79-81.
- [8] 赵月. 肉桂黄酮类抗氧化活性成分的 HPLC 法识别及其成分分

- 析[D]. 天津: 天津商业大学, 2017.
- ZHAO Yue. Recognition of antioxidant components of *Cinnamomum cassia* presl flavonoids by high performance liquid chromatography(HPLC) method and analysis of the chemical compositions[D]. Tianjin: Tianjin University of Commerce, 2017.
- [9] 林款, 徐丛玥, 梁征, 等. 肉桂黄酮的提取纯化及其体外抗氧化活性[J]. 食品科技, 2019, 44(7): 267-272.
- LIN Kuan, XU Congyue, LIANG Zheng, et al. Extraction, purification and antioxidant activities of flavonoids from *Cinnamomi cortex* [J]. Food Science and Technology, 2019, 44(7): 267-272.
- [10] 马延红, 李赛男, 刘文华. 西江肉桂挥发油提取工艺优化及抗氧化研究[J]. 中国调味品, 2019, 44(12): 60-64.
- MA Yanhong, LI Sainan, LIU Wenhua. Study on optimization of extraction process and antioxidant activity of volatile oil from Xijiang cinnamon[J]. China Condiment, 2019, 44(12): 60-64.
- [11] 路露, 束成杰, 葛翎, 等. 肉桂精油和肉桂醛的抑菌、抗氧化和酪氨酸酶抑制活性研究[J]. 林产化学与工业, 2022, 42(3): 105-110.
- LU Lu, SHU Chengjie, GE Ling, et al. The antibacterial activity, antioxidant and antityrosinase activities of cinnamon essential oil and cinnamaldehyde[J]. Chemistry and Industry of Forest Products, 2022, 42(3): 105-110.
- [12] ASSEFA A D, KEUM Y S, SAINI R K. A comprehensive study of polyphenols contents and antioxidant potential of 39 widely used spices and food condiments[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2018, 12(3): 1548-1555.
- [13] 谭冰燕. 越南肉桂主要化学成分、抗氧化活性及扦插繁殖技术研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2019.
- TAN Bingyan. Studies on the main chemical constituents, antioxidant activity and cuttage propagation technology of *Cinnamomum loureirii* nees[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2019.
- [14] KIM S H, HYUN S H, CHOUNG S Y. Anti-diabetic effect of cinnamon extract on blood glucose in db/db mice[J]. Journal of Ethnopharmacology, 2006, 104(1-2): 119-123.
- [15] NAMAZI N, KHODAMORADI K, KHAMECHI S P, et al. The impact of cinnamon on anthropometric indices and glycemic status in patients with type 2 diabetes: A systematic review and meta-analysis of clinical trials[J]. Complementary Therapies in Medicine, 2019, 43: 92-101.
- [16] NETO J C G L, DAMASCENO M M C, CIOL M A, et al. Analysis of the effectiveness of cinnamon (*Cinnamomum verum*) in the reduction of glycemic and lipidic levels of adults with type 2 diabetes: A study protocol[J]. Medicine, 2020, 99(1): e18553.
- [17] SENEVIRATHNE B S, JAYASINGHE M A, PAVALAKUMAR D, et al. Ceylon cinnamon: A versatile ingredient for futuristic diabetes management[J]. Journal of Future Foods, 2022, 2(2): 125-142.
- [18] NURINDA E, KUSUMAWARDANI N, WULANDARI A S, et al. Pharmacological study: Synergistic antidiabetic activity of cinnamon bark and *Zingiber* extract in streptozotocin-induced diabetic rats[J]. Open Access Macedonian Journal of Medical Sciences, 2022, 10(T8): 1-6.
- [19] QUSTI S, EL RABEY H A, BALASHRAM S A. The hypoglycemic and antioxidant activity of cress seed and cinnamon on streptozotocin induced diabetes in male rats[J]. Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine: ECAM, 2016, 2016: 5614564.
- [20] NABILA A, AMALIA R A, WIDIATI V M, et al. The utilization of cinnamon (*Cinnamomum cassia*) as a natural medicine for diabetes mellitus Type 2: Systematic review[J]. International Journal of Biomedical Nursing Review, 2022, 1(1): 1-9.
- [21] 张铭儒, 黄嘉欢, 黎雨菲, 等. 肉桂多糖的单糖组成分析及其降血糖作用研究[J]. 中国医院药学杂志, 2022, 42(15): 1533-1538, 1582.
- ZHANG Mingru, HUANG Jiahuan, LI Yufei, et al. Analysis of monosaccharide composition and hypoglycemic effect of polysaccharides from *Cinnamomum cassia*[J]. Chinese Journal of Hospital Pharmacy, 2022, 42(15): 1533-1538, 1582.
- [22] MOHAMMADI K, KHAJEHLANDI A, MOHAMMADI A. The effect of swimming training with cinnamon consumption on β 3-AR and *ERK2* gene expression in the visceral adipose tissue of diabetic rats[J]. Gene, Cell and Tissue, 2022, 10(1): e122955.
- [23] MILAGRES DE ALMEIDA J, CRIPPA B L, MARTINS ALENCAR DE SOUZA V V, et al. Antimicrobial action of Oregano, Thyme, Clove, Cinnamon and Black pepper essential oils free and encapsulated against foodborne pathogens[J]. Food Control, 2023, 144: 109356.
- [24] DE AGUIAR F C, SOLARTE A L, GÓMEZ-GASCÓN L, et al. Antimicrobial susceptibility of cinnamon and red and common thyme essential oils and their main constituent compounds against *Streptococcus suis*[J]. Letters in Applied Microbiology, 2022, 74(1): 63-72.
- [25] ZHANG Z, ZHAO Y Y, CHEN X, et al. Effects of cinnamon essential oil on oxidative damage and outer membrane protein genes of *Salmonella enteritidis* cells[J]. Foods, 2022, 11(15): 2234.
- [26] 陈雪琴, 赵圆圆, 张珍, 等. 肉桂精油的化学成分分析及其对沙门氏菌细胞膜损伤机制的研究[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(14): 24-32.
- CHEN Xueqin, ZHAO Yuanyuan, ZHANG Zhen, et al. Analysis of cinnamon essential oil composition and its mechanism of cell membrane damage in *Salmonella enterica*[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(14): 24-32.
- [27] 高永生, 金斐, 朱丽云, 等. 植物精油及其活性成分的抗菌机理[J]. 中国食品学报, 2022, 22(1): 376-388.
- GAO Yongsheng, JIN Fei, ZHU Liyun, et al. Antimicrobial mechanism of plant essential oils and its active ingredients[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2022, 22(1): 376-388.
- [28] 李伟. 肉桂精油/ β -环糊精蛋白脂质体纤维膜的制备及在牛肉保鲜中的应用[D]. 镇江: 江苏大学, 2017.
- LI Wei. The preparation of fibrous membranes containing cinnamon essential oil/ β -cyclodextrin proteoliposomes and its application in beef[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2017.
- [29] LEE J E, SEO S M, HUH M J, et al. Reactive oxygen species mediated -antifungal activity of cinnamon bark (*Cinnamomum verum*) and lemongrass (*Cymbopogon citratus*) essential oils and their constituents against two phytopathogenic fungi[J]. Pesticide Biochemistry and Physiology, 2020, 168: 104644.
- [30] 孙培培, 张宁, 赵琳静, 等. 亚抑菌浓度肉桂挥发油暴露对白色念珠菌脂质稳态的影响[J]. 分析化学, 2022, 50(1): 92-107.
- SUN Peipei, ZHANG Ning, ZHAO Linjing, et al. Effects of cinnamon oil at subinhibitory concentration on lipid homeostasis of *Candida albicans*[J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2022, 50(1): 92-107.
- [31] CIARAMELLI C, PALMIOLI A, ANGOTTI I, et al. NMR-driven identification of cinnamon bud and bark components with anti- $\alpha\beta$ activity[J]. Frontiers in Chemistry, 2022, 10: 896253.
- [32] PETERSON D W, GEORGE R C, SCARAMOZZINO F, et al. Cinnamon extract inhibits tau aggregation associated with Alzheimer's disease *in vitro*[J]. Journal of Alzheimer's Disease, 2009, 17(3): 585-597.
- [33] 李冉, 田子明. 肉桂提取物对阿尔茨海默病大鼠学习记忆和氧化应激水平的影响及机制[J]. 中国老年学杂志, 2022, 42(11):

2811-2815.

- LI Ran, TIAN Ziming. Effect of *Cinnamomum cassia* extract on learning and memory and oxidative stress in Alzheimer's disease rats and its mechanism[J]. Chinese Journal of Gerontology, 2022, 42(11): 2811-2815.
- [34] AGGARWAL S, BHADANA K, SINGH B, et al. *Cinnamomum zeylanicum* extract and its bioactive component cinnamaldehyde show anti-tumor effects via inhibition of multiple cellular pathways[J]. Frontiers in Pharmacology, 2022, 13: 918479.
- [35] XU R H, XIAO X L, ZHANG S G, et al. The methyltransferase METTL3-mediated fatty acid metabolism revealed the mechanism of cinnamaldehyde on alleviating steatosis[J]. Biomedicine & Pharmacotherapy = Biomedecine & Pharmacotherapie, 2022, 153: 113367.
- [36] AL-ADHAM I S I, JABER N, AL-REMAWI M, et al. A review of the antimicrobial activity of thermodynamically stable microemulsions[J]. Letters in Applied Microbiology, 2022, 75(3): 537-547.
- [37] KULKARNI V S. Handbook of non-invasive drug delivery systems: science and technology[M]. Norwich, N.Y.: William Andrew, 2009.
- [38] DÁVILA-RODRÍGUEZ M, LÓPEZ-MALO A, PALOU E, et al. Essential oils microemulsions prepared with high-frequency ultrasound: Physical properties and antimicrobial activity[J]. Journal of Food Science and Technology, 2020, 57(11): 4133-4142.
- [39] SHI W W, YAN R X, HUANG L Q. Preparation and insecticidal performance of sustained-release cinnamon essential oil microemulsion[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2022, 102(4): 1397-1404.
- [40] SHAH P, BHALODIA D, SHELAT P. Nanoemulsion: A pharmaceutical review[J]. Systematic Reviews in Pharmacy, 2010, 1(1): 24.
- [41] GHARIBZAHEDI S M T. Ultrasound-mediated nettle oil nanoemulsions stabilized by purified jujube polysaccharide: Process optimization, microbial evaluation and physicochemical storage stability [J]. Journal of Molecular Liquids, 2017, 234: 240-248.
- [42] PAUDEL S K, BHARGAVA K, KOTTURI H. Antimicrobial activity of cinnamon oil nanoemulsion against *Listeria monocytogenes* and *Salmonella* spp. on melons[J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 111: 682-687.
- [43] JIMÉNEZ M, DOMÍNGUEZ J A, PASCUAL-PINEDA L A, et al. Elaboration and characterization of O/W cinnamon (*Cinnamomum zeylanicum*) and black pepper (*Piper nigrum*) emulsions[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 77: 902-910.
- [44] 王雯雯. 肉桂精油纳米乳的制备、抗菌机理及其在冷鲜鸡肉中的应用研究[D]. 郑州: 郑州轻工业大学, 2022.
- WANG Wenwen. Preparation, antibacterial mechanism of cinnamon essential oil nanoemulsion and its application in chilled chicken preservation[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University of Light Technology, 2022.
- [45] CHUESIANG P, SANGUANDEEKUL R, SIRIPATRAWAN U. Enhancing effect of nanoemulsion on antimicrobial activity of cinnamon essential oil against foodborne pathogens in refrigerated Asian seabass (*Lates calcarifer*) fillets[J]. Food Control, 2021, 122: 107782.
- [46] CHUESIANG P, SIRIPATRAWAN U, SANGUANDEEKUL R, et al. Antimicrobial activity and chemical stability of cinnamon oil in oil-in-water nanoemulsions fabricated using the phase inversion temperature method[J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 110: 190-196.
- [47] DICKINSON E. Biopolymer-based particles as stabilizing agents for emulsions and foams[J]. Food Hydrocolloids, 2017, 68: 219-231.
- [48] HUANG Y, LIU H, LIU S, et al. *Cinnamomum cassia* oil emulsions stabilized by chitin nanofibrils: Physicochemical properties and antibacterial activities[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2020, 68(49): 14620-14631.
- [49] FAN S M, WANG D B, WEN X Y, et al. Incorporation of cinnamon essential oil-loaded Pickering emulsion for improving antimicrobial properties and control release of chitosan/gelatin films[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 138: 108438.
- [50] HUANG K H, YUAN Y Z, XU B J. A critical review on the microencapsulation of bioactive compounds and their application[J]. Food Reviews International, 2023, 39(5): 2594-2634.
- [51] RAMDAS A S, ANNAPURE UDAY S. Microencapsulation of curcumin using coconut milk whey and Gum Arabic[J]. Journal of Food Engineering, 2021, 298: 110502.
- [52] 李国良, 刘香萍. 肉桂叶精油/ β -环糊精微胶囊的制备及缓释特性[J]. 林产化学与工业, 2021, 41(4): 35-41.
- LI Guoliang, LIU Xiangping. Preparation and slow-release properties of *Cinnamomum cassia* leaves essential oil/ β -cyclodextrin microcapsules[J]. Chemistry and Industry of Forest Products, 2021, 41(4): 35-41.
- [53] 许国娟, 陈丽君, 吴考, 等. 肉桂精油微囊的制备及对柑橘采后病原菌的抑制作用[J]. 食品科技, 2021, 46(8): 238-243.
- XU Guojuan, CHEN Lijun, WU Kao, et al. Preparation and inhibitory effect of cinnamon essential oil microcapsules on *Citrus* post-harvest pathogenic fungi[J]. Food Science and Technology, 2021, 46(8): 238-243.
- [54] 曹俊英, 徐超, 章中. 改性多孔淀粉包埋肉桂精油和焦亚硫酸钠微胶囊的制备及性质研究[J]. 食品与生物技术学报, 2022, 41(4): 74-83.
- CAO Junying, XU Chao, ZHANG Zhong. Preparation and properties of modified porous starch embedded cinnamon essential oil and sodium metabisulfite microcapsules[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2022, 41(4): 74-83.
- [55] 宋晓秋, 徐亚杰, 肖瀛, 等. 肉桂精油微胶囊对小鼠抗氧化活性与肠道菌群的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(17): 143-152.
- SONG Xiaochu, XU Yajie, XIAO Ying, et al. Effects of microencapsulated cinnamon oil on antioxidant capacity and gut microbiota in mice[J]. Food Science, 2021, 42(17): 143-152.
- [56] LAI W S, LIU Y L, KUANG Y H, et al. Preparation and evaluation of microcapsules containing *Rimulus cinnamomum* and *Angelica Sinenis* essential oils[J]. Journal of Dispersion Science and Technology, 2022: 1-12.
- [57] LI X, GAO Y F, LI Y Z, et al. Formation of cinnamon essential oil/xanthan gum/chitosan composite microcapsules basing on Pickering emulsions[J]. Colloid and Polymer Science, 2022, 300: 1187-1195.
- [58] SHAO P, YU J, CHEN H J, et al. Development of microcapsule bioactive paper loaded with cinnamon essential oil to improve the quality of edible fungi[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2021, 27: 100617.