

# 肉桂醛在水果保鲜中的应用及其包埋技术研究进展

许超群<sup>1,2</sup>, 戴凡炜<sup>1</sup>, 陈于陇<sup>1</sup>, 叶明强<sup>1</sup>, 岳淑丽<sup>2</sup>, 王美连<sup>1,3</sup>, 陈飞平<sup>1\*</sup>

(1. 广东省农业科学院蚕业与农产品加工研究所, 农业农村部功能食品重点实验室, 广东省农产品加工重点实验室, 广东广州 510610) (2. 华南农业大学食品学院, 广东广州 510642)

(3. 华南农业大学园艺学院, 广东广州 510642)

**摘要:** 肉桂醛是肉桂等植物精油的主要活性成分, 是一种天然的苯丙烯类含醛化合物, 具有优越的抗菌、抗氧化和防止褐变等活性。肉桂醛是国家食品添加剂法规允许使用的生鲜水果防腐保鲜剂, 然而水溶性差、挥发性强、自身气味强烈等特性限制了其产业化应用, 基于生物聚合物包埋对其进行改性是解决其应用瓶颈的有效途径。该研究简述了国内外关于肉桂醛生物活性、抑菌活性与机制、在水果中的应用、应用局限及包埋递送等方面内容, 指出了智能控释是肉桂醛未来载体化技术方向, 可基于肉桂醛的醛基与生物大分子的氨基相互作用构建席夫碱结构, 实现肉桂醛的酸敏响应释放与抑菌, 从而提升肉桂醛的精准保鲜效能。该研究有望为肉桂醛作为天然抑菌剂的产业化应用提供理论支撑以及为生鲜水果采后绿色保鲜提供新的策略。

**关键词:** 肉桂醛; 包埋; 纳米载体; 抑菌; 水果保鲜

文章编号: 1673-9078(2023)12-320-327

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2023.12.0435

## Application of Cinnamaldehyde in Fruit Preservation and Research Progress on Encapsulation Technology

XU Chaoqun<sup>1,2</sup>, DAI Fanwei<sup>1</sup>, CHEN Yulong<sup>1</sup>, YE Mingqiang<sup>1</sup>, YUE Shuli<sup>2</sup>, WANG Meilian<sup>1,3</sup>, CHEN Feiping<sup>1\*</sup>

(1. Sericultural & Agri-Food Research Institute Guangdong Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Functional Foods, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Guangdong Key Laboratory of Agricultural Products Processing, Guangzhou 510610, China) (2. College of Food Science, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China) (3. College of Horticulture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

**Abstract:** Cinnamaldehyde, the main active ingredient of cinnamon essential oil, is a natural aldehyde compound with superior antibacterial, antioxidant, and browning inhibition activity. Cinnamaldehyde is an approved natural preservative for fresh fruits. However, the major limitation of cinnamaldehyde application is its low water solubility, high volatility, and strong aroma. Biomolecular encapsulation has been proved to be effective in addressing these application constraints. The purpose of this review was to provide an overview of current knowledge on the bioactivity, bacteriostatic activity and mechanisms, the application in fruit, the limitations in application and encapsulation technology of cinnamaldehyde, and to highlight nanocarriers with Schiff base structures for smart controlled-release. The Schiff base nanocarriers are prepared based on the interaction between the aldehyde group of cinnamaldehyde and the amino group of biomacromolecules, which enable pH-responsive release and antibacterial effects. This paper is expected to provide theoretical support for the application of cinnamaldehyde in natural antibacterial agents and provides a new strategy of green preservation for fruit storage after harvest.

引文格式:

许超群,戴凡炜,陈于陇,等.肉桂醛在水果保鲜中的应用及其包埋技术研究进展[J].现代食品科技,2023,39(12):320-327

XU Chaoqun, DAI Fanwei, CHEN Yulong, et al. Application of cinnamaldehyde in fruit preservation and research progress on encapsulation technology [J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(12): 320-327

收稿日期: 2023-04-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(32202143);“十四五”广东省农业科技创新十大主攻方向“揭榜挂帅”项目(2022SDZG04);2022年乡村振兴战略专项资金(第三批)资助项目

作者简介: 许超群(1998-),女,硕士研究生,研究方向:食品保鲜,E-mail:xcq@stu.scau.edu.cn;共同第一作者:戴凡炜(1983-),女,研究员,研究方向:农产品保鲜与物流,E-mail:daifanwei@gdaas.cn

通讯作者:陈飞平(1985-),女,博士,副研究员,研究方向:生物材料与农产品保鲜,E-mail:feiping52@126.com

**Key words:** cinnamaldehyde; encapsulation; nanocarrier; antibacterial; fruit preservation

水果富含人体所需的多种营养物质,在人们日常膳食中不可缺少,但采后极易腐烂变质,导致严重的品质劣变及经济损失,防腐保鲜是解决该痛点的重要手段。近年来,由于食品安全问题频发,以及公众对合成化学防腐剂带来的健康风险的日益关注,消费者更倾向于使用天然防腐剂,特别是那些植物来源的防腐剂。植物精油具有广谱的抑菌活性,且已证明对果蔬具有保鲜作用,然而化学不稳定性、异味、低溶解性等缺点以及直接使用对食品感官有负面影响<sup>[1]</sup>,是其产业化应用的重要难题。载体包埋,尤其是纳米载体,被认为是一种可解决植物精油应用瓶颈的方法,而使用生物大分子纳米载体的包埋技术被认为是 21 世纪的新型技术<sup>[2]</sup>。

肉桂醛 (Cinnamaldehyde,  $C_6H_5CH=CHCHO$ ),通常称为桂醛,是肉桂油、桂皮油、茴香油、风信子油和玫瑰油等植物精油的主要成分,是一类天然苯丙烯类含醛化合物,已被美国食品药品监督管理局 (FDA)、美国食品香料和萃取物制造者协会 (FEMA) 归为安全的食品添加剂,也是中国食品添加剂目录中明确能用于生鲜水果的防腐剂,是一种安全的食品和风味添加剂,其具有在果蔬、肉制品、乳制品、饮料等食品保鲜中应用的潜能<sup>[3]</sup>。肉桂醛作为防腐保鲜剂应用的主要优势是除了直接接触外,利用自身高挥发性形成气相也可产生抑菌活性<sup>[4]</sup>,因而应用的潜在方式多,比如浸渍、涂膜、熏蒸、固体缓释等。

肉桂醛具有植物精油的普遍应用缺点,载体包埋是其增溶增效的有效技术途径,但针对生鲜果蔬采后特点、具有刺激响应抑菌的载体研究还鲜见报道。随着我国农业的转型升级,智能化、高效绿色是未来的发展方向,如何调控肉桂醛与生物大分子之间的相互作用,设计具有酸敏响应开关的载体化肉桂醛,通过感知 pH 变化实现精油的动态控释,有望突破防腐保鲜剂按需释放的技术瓶颈,并为水果采后精准保鲜提供新的解决方案。

## 1 肉桂醛的生物活性

肉桂醛具有较强的桂皮油和肉桂油的香气,外观为黄色油状液体,天然状态下均为反式构象。肉桂醛的分子质量约为 500 u、pKa 值为-4.44、分配系数 ( $\log P$ ) 为 1.98、分子极化率为 15.78,肉桂醛分子不含有氢键供体,但含有一个氢键受体<sup>[5]</sup>。

肉桂醛具有多重生物活性,例如抗菌、抗炎、抗氧化、抗寄生虫、杀虫、抗病毒、抗癌、治疗心血管

疾病、抑制酶促褐变和促进伤口愈合等,可广泛应用于食品、医学、饲料、化妆品等行业<sup>[3,5]</sup>。

优越的抗菌活性是肉桂醛作为天然防腐保鲜剂应用的首要条件,而出色的抗氧化、抑制酶促褐变等活性也是其产业化应用的重要依据。过氧化反应的控制是果蔬腐败控制的关键,而褐变抑制也是果蔬采后品控的重要环节之一。研究表明肉桂醛具有清除 DPPH 自由基和还原铁离子的能力,可赋予活性包装抗氧化活性<sup>[6]</sup>;负载肉桂醛的壳聚糖-玉米醇溶蛋白可食性涂膜可显著延缓芒果黄化并保持品质,主要归因于涂膜在水果表面形成微气调大气氛,诱导果实的抗病产生,而负载的肉桂醛活性因子又能起到清除自由基、降低脂质膜氧化的功效,从而达到诱导氧化应激和清除自由基相平衡,避免 ROS 的氧化损伤但保留其作为诱导抗病的信号因子作用的效果<sup>[7]</sup>;Carvalho 等<sup>[8]</sup>研究发现负载肉桂醛的壳聚糖涂膜可延长鲜切甜瓜的货架期和保持更佳的品质,并且明确保鲜效果得益于壳聚糖涂膜的物理屏障起到的抑制呼吸及其相关生理活性作用以及肉桂醛起到的自由基清除剂与酶抑制剂作用。Echegoyen 等<sup>[9]</sup>研究发现负载肉桂精油的活性纸具有优越的抗氧化和抑制酪氨酸酶活性,可抑制香菇采后褐变,而且明确主要的功效因子为肉桂醛;Gao 等<sup>[10]</sup>研究发现,熏蒸植物精油可有效抑制双孢菇的褐变,其中肉桂醛的效果最佳,其可显著抑制多酚氧化酶和过氧化物酶的活性并提高苯丙氨酸酶活性。

## 2 肉桂醛的抑菌活性与机制

疏水性的肉桂醛可以渗透细胞壁,从而破坏细胞质膜结构,通过多种途径影响微生物的正常生理代谢,并抑制或减少微生物产生有害代谢产物,具有广谱抑菌性,且其抑菌性能优于大多数精油和植物提取物<sup>[11-13]</sup>。已有研究表明,肉桂醛对大肠杆菌<sup>[12,14]</sup>、金黄色葡萄球菌<sup>[15,16]</sup>、沙门氏菌<sup>[17]</sup>、单增李斯特菌<sup>[18]</sup>、青霉菌<sup>[19]</sup>、黄曲霉菌<sup>[20]</sup>、黑曲霉菌<sup>[21]</sup>、炭疽菌<sup>[22]</sup>、根癌农杆菌<sup>[23]</sup>、牙龈卟啉单胞菌<sup>[24]</sup>等细菌和真菌均具有较强的抗菌作用。

关于肉桂醛的抑菌机制已有不少的研究报道,大多认为其通过破坏细胞膜、抑制生物膜形成、诱导氧化损伤等途径抑制菌体生长甚至诱导死亡。Doyle 等<sup>[3]</sup>研究发现肉桂醛能通过破坏细胞壁和细胞膜,导致细胞内容物泄漏和细菌裂解、改变脂质分布、抑制 ATP 酶、细胞分裂、膜孔、运动性和生物膜形成,以及通过抗群体感应效应来实现抑菌效应。Shen 等<sup>[16]</sup>以低抑

制浓度的肉桂醛处理大肠杆菌和金黄色葡萄球菌细胞,对细菌细胞形态、膜完整性和通透性进行了研究,结果表明,肉桂醛导致了细胞壁细胞膜分离和裂解、细胞质内容物泄漏、细胞质内容物极化、细胞变形和细胞质内容物浓缩等异常,肉桂醛的抑菌效果存在剂量效应,肉桂醛浓度越高,细菌的损伤越严重。Pang等<sup>[15]</sup>发现肉桂醛可与细胞膜发生相互作用,从而调控病原菌的甘油磷脂生物合成途径,主要靶向磷脂酰甘油和磷脂酰乙醇胺,导致细胞膜完整性被破坏。Yin等<sup>[25]</sup>发现肉桂醛可以抑制鼠伤寒沙门氏菌的I型菌毛进而抑制粘附侵袭和生物膜形成。此外肉桂醛的抗菌活性与诱导其醛基产生酸胁迫的毒性有关,它扰乱代

谢途径,促进活性氧(ROS)产生<sup>[26]</sup>。Wang等<sup>[27]</sup>发现肉桂醛处理会引起ROS积累,细胞内Ca<sup>2+</sup>水平升高,线粒体膜电位去极化,线粒体细胞色素c释放,类半胱天冬酶激活,磷脂酰丝氨酸暴露和DNA断裂,进而诱导细胞凋亡。

### 3 肉桂醛在水果保鲜中的应用

水果在采收、贮藏和销售过程中由于生理作用、病理作用及机械损伤等,导致腐败变质的发生。肉桂醛可通过抑制采后病害和调控采后生理等途径,延长水果货架期、达到保鲜保质的效果。

表1 肉桂醛在水果保鲜中的应用效果与存在问题

Table 1 The preservation effect and problem of cinnamaldehyde in fruit

水果种类	处理方式	保鲜效果	缺点与问题	参考文献
柑橘	肉桂醛-果蜡喷渍	显著降低腐烂率(38% vs 100%)、保持果实品质(可滴定酸、Vc保留分别比对照高14.62%和8.40%)	需与香茅醛联用	[28]
芒果	肉桂醛-果蜡复合涂膜	延长芒果货架期一倍以上	使用浓度高(10 MIC)、涂层导致果实内部代谢的有毒物质积累,造成外部感官品质下降	[30]
木瓜	肉桂醛溶液浸渍	将保鲜期延长至12 d	对果实滋味、香气、质构有一定的负面影响	[35]
番茄	肉桂醛溶液浸渍	常温贮藏15 d, TSS、TA分别下降27.8%、30.6%,显著低于对照组的58.2%、73.5%, Vc含量为14 mg/100 g,显著高于对照组的7 mg/100 g	有效的处理质量浓度高(4 mg/mL)	[31]
柑橘	肉桂醛-果蜡浸渍	有效降低采后柑橘病害发生(33% vs 100%)	有效的处理浓度高(10 MFC)	[38]
南丰蜜橘	肉桂醛复合精油纳米乳液浸泡	显著降低果实腐烂率(4.1% vs 7.4%),保持较高的TSS、TA和Vc含量(15.14% vs 14.41%、0.58% vs 0.53%、24.38 mg/100 g vs 21.28 mg/100 g)	需与丁香酚、香芹酚复合使用	[29]
哈密瓜	纤维素纳米纤维-壳聚糖-肉桂醛涂膜	显著延缓鲜切哈密瓜色泽变化	添加1%肉桂醛的涂膜对果实品质的保持效果没有明显的增效作用	[39]
脐橙	壳聚糖-肉桂醛涂膜	腐烂率从对照的13.57%、壳聚糖涂膜的10.33%降低至6.33%	添加肉桂醛可进一步提高壳聚糖涂膜对脐橙采后腐烂的抑制,但对果实品质的保留没有显著增效	[37]
甜瓜	碳点杂化 $\gamma$ -环糊精-有机金属骨架固体缓释	可将鲜切甜瓜货架期从2 d延长至5 d	/	[40]
草莓	聚羟基脂肪酸酯-肉桂醛微球固体缓释	可将草莓保鲜期从3 d延长至5 d	/	[32]

在采后病害防控方面,肉桂醛可显著抑菌多种病害真菌和细菌的生长。Ouyang等<sup>[28]</sup>用肉桂醛喷洒处理柑橘后抑制了指状青霉的生长,能有效控制柑橘青霉病的发生。Yang等<sup>[29]</sup>研究发现肉桂醛、丁香酚、香芹酚混合精油纳米乳液对指状青霉具有优越的抑制活

性,采用乳液浸泡处理南丰蜜橘,可显著降低果实腐烂率、保持较高的品质。米嘉琦等<sup>[30]</sup>研究发现肉桂醛对芒果胶孢炭疽菌的抑制作用优于丁香酚、柠檬醛等其他5种植物源精油,而且利用肉桂醛-果蜡涂膜处理芒果,发现其可抑制胶孢炭疽菌在芒果表面的生长从

而抑制腐败。张娜娜等<sup>[31]</sup>研究发现肉桂醛对灰葡萄孢菌的菌丝生长和孢子萌发均有较好的抑制作用,浸泡处理番茄,可抑制番茄腐烂发生和保持较好的品质。Yang 等<sup>[32]</sup>研究发现聚羟基脂肪酸酯-壳聚糖微球负载可延长肉桂醛对金黄色葡萄球菌和大肠杆菌的抑制时效至 40 d,采用固体缓释的方式用于草莓保鲜,可延长草莓常温保鲜期至 5 d,并且品质有更好的保留。杨雅景等<sup>[33]</sup>利用肉桂醛抗菌复合保鲜剂涂膜处理荔枝,可显著降低荔枝贮藏腐烂指数和褐变,将常温保鲜期延长至 8 d 以上。此外,肉桂醛还可以直接用于鲜切水果的保鲜,起到抗菌抗氧化的作用。将肉桂醛添加到纤维素纳米纤维涂膜中,可显著提高涂膜液对沙门氏菌、大肠杆菌、单增李斯特菌的抑制活性<sup>[34]</sup>;将肉桂醛和氯化钙联合处理鲜切木瓜可显著抑制细菌和真菌的生长,保持果实硬度<sup>[35]</sup>;经过肉桂醛熏蒸处理的鲜食石榴籽粒可以在 5 °C 下贮藏 12 d 且保持较高的抗氧化水平<sup>[36]</sup>。

在采后生理调控方面,肉桂醛可发挥自由基清除剂和酶抑制剂作用,减轻水果采后过氧化损伤。Carvalho 等<sup>[8]</sup>研究发现,壳聚糖-肉桂醛涂膜可减少鲜切甜瓜过氧化氢自由基产生,从而减轻抗氧化酶活性和脂质过氧化反应,延缓水果软化,并且可降低 G-POD 和 PPO 活性,延缓果实褐变的发生。Xiao 等<sup>[7]</sup>研究发现,肉桂醛涂膜可诱导芒果积累一定量的自由基,从而激活果实的抗氧化系统,保持更佳的芒果贮藏品质。Gao 等<sup>[37]</sup>研究发现,肉桂醛涂膜可提高脐橙的 SOD、CAT、POD、PPO 等酶活,从而诱导其抗病性和延缓果实衰老。

肉桂醛在水果保鲜中的应用方式、效果及其存在问题如表 1 所示,可见肉桂醛具有在生鲜水果采后保鲜保质应用的巨大前景,但直接应用所需的有效使用浓度大,对水果存在一定的负面影响,通过载体包埋后使用,可达到更长的抑菌时效。

#### 4 肉桂醛的应用局限及包埋递送

肉桂醛具有重要的活性功能和广阔的应用范围,但其在水中的溶解度低,对氧、酸、碱、紫外光和高热的敏感性高,在食品加工或储存过程中会降解或挥发,还会影响食品原有的气味、香气和味道,限制了其应用。Friedman 等<sup>[41]</sup>研究表明,高温和氧气会加速肉桂醛的降解,肉桂醛对高温十分敏感性,将温度提高到 40 °C 和 60 °C,1 h 其含量从 90.9% 分别下降到 87.9% 和 69.1%,而在 100 °C 加热仅 20 min,其含量急剧下降约 63.1%。

通过对肉桂醛进行包埋可以改善其理化性质,减

少挥发性及果皮的刺激性,并增强对热和氧化的稳定性,达到感官接受和抗菌效果的平衡;还可以将液体样品改性和粉末,有助于在加工和储存期间最大限度地保护肉桂醛的储存、运输,是提高肉桂醛系统稳定性的有效途径。

多糖<sup>[42]</sup>、蛋白<sup>[43]</sup>、脂质体<sup>[44]</sup>及环糊精<sup>[45]</sup>等载体材料已被广泛用于肉桂醛的包埋递送,扩大了肉桂醛的利用范围。例如 Gong 等<sup>[46]</sup>利用壳聚糖和果胶构建的肉桂精油微胶囊在高温 (>150 °C) 下仍表现出明显较高的肉桂醛保留率;Liu 等<sup>[47]</sup>以乳清蛋白分离物-葡聚糖偶联物和硫酸软骨素静电复合物制备了负载肉桂醛的纳米颗粒,在不同浓度的氯化钠 (1~4 mol/L)、不同 pH 值 (1~10)、90 °C 加热条件下具有稳定性,在室温下贮藏 30 d 后仍具有较强的抑菌性。Wang 等<sup>[44]</sup>发现壳聚糖和肉桂醛脂质体具有协同抑菌作用,制备的壳聚糖修饰的肉桂醛脂质体在 10 min 内就能对金黄色葡萄球菌产生明显的抗菌效果,储存 28 d 后的抗菌效率仍高于 90%,具有快速和长期抑菌效果。通过静电纺丝制备的壳聚糖-聚环氧乙烷基纳米纤维中肉桂醛的气相释放量远高于液相释放量,且在气相和液相中均具有抑菌活性<sup>[48]</sup>。通过海藻酸钠与壳聚糖之间的聚电解质反应形成包埋肉桂醛的纳米颗粒,显著提高后者的水分散性、稳定性和缓释性<sup>[49]</sup>。Istúriz-Zapata 等<sup>[50]</sup>利用壳聚糖-肉桂醛纳米涂膜处理黄瓜,可改善黄瓜采后品质,并具有抗真菌活性。陈佳佳<sup>[51]</sup>利用高压微射流均质技术制备了肉桂醛固体脂质纳米粒,发现其对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、匍枝根霉和黑曲霉具有抑制活性,并且可显著降低草莓果实腐烂、保持新鲜品质。

游离肉桂醛与包埋肉桂醛性质比较如图 1 所示<sup>[52]</sup>,总之载体包埋可实现肉桂醛的水溶化、稳定化并保持抑菌活性,解决了游离肉桂醛的稳定性差、水溶性低、气味强烈等问题。

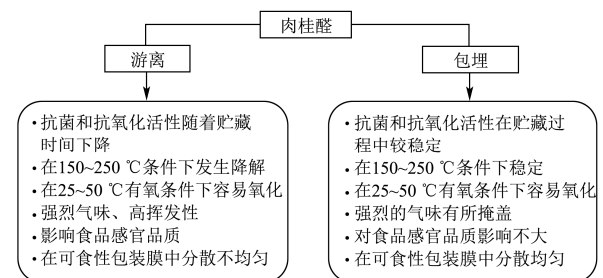


图 1 游离和包埋肉桂醛的性质比较

Fig.1 The comparison of free and encapsulated cinnamaldehyde

通过包埋载体及载体形式的调控,可实现肉桂醛功能的定向增效,例如,热稳定性提高、抑菌增效、

缓释等，拓宽肉桂醛在食品、农产品甚至医药行业的应用前景（表 2）。关于肉桂醛包埋递送载体的研究报道已很多，总的来说可分为脂质体、乳液、纳米颗粒

粒、分子包含、复合凝聚、微胶囊（喷雾干燥）等几种，每种载体都有自身的优点，同时也存在一定的缺点（图 2）<sup>[52]</sup>。

表 2 各种纳米载体对肉桂醛的包埋效果

Table 2 The encapsulation effect of carriers on cinnamaldehyde

包埋载体	载体形式	包埋效果	应用范围	参考文献
壳聚糖、果胶	微/纳米胶囊	热稳定性提高、抗真菌活性降低	烘焙食品，增香	[46]
乳清蛋白分离物-葡聚糖 偶联物、硫酸软骨素	纳米颗粒	在极端 PH、高离子强度、高温条件下 稳定性提高、缓释抑菌	肉制品、酸性饮料、 烘焙食品，调味、防腐	[47]
壳聚糖	纳米涂膜	降低青瓜采后病害、延长货架期	蔬菜（黄瓜）防腐保鲜	[50]
蛋黄卵磷脂、壳聚糖	脂质体	快速抑菌、长效抑菌	天然防腐剂	[44]
壳聚糖、聚环氧乙烷	纳米纤维毡	对大肠杆菌的抑制活性提高，但对绿脓 假单胞菌的抑菌活性稍低于游离肉桂醛	医药（伤口敷料）	[48]
大豆卵磷脂	固体脂质纳米粒	包埋后肉桂醛抑菌效果减弱，但仍为 中敏、高敏抑菌效果，应用于草莓保鲜 具有显著的抑菌保鲜作用同时避免了 精油直接灼伤草莓细胞现象发生	水果（草莓）防腐保鲜	[51]
高直链玉米淀粉	分子包含物	缓释、温度/湿度响应释放	食品添加剂	[53]
海藻酸钙	微胶囊	热稳定性提高、气味掩盖、缓释、 抗氧化、抗真菌活性提高	食品（花生）防腐保鲜	[54]

作为防腐保鲜剂应用是肉桂醛产业化应用的重要方向，如何构建具有高效抑菌、保鲜效果的载体化肉桂醛，是推动其产业化应用的重要抓手。目前大多数研究构建的载体往往无法根据实际需求对肉桂醛进行可控释放。不论食品品质发生变化与否，释放都会发生，且释放一般呈指数式衰减，存在肉桂醛过早消耗、实际抑菌效果不理想等问题。因此，构建具有刺激响应释放并且达到理想持续的抑菌效果的肉桂醛包埋载体，实现肉桂醛的智能控释，可为生鲜水果采后贮藏精准保鲜提供新的策略。

### 5 智能控释：肉桂醛未来载体化方向

载体包埋是一种可解决肉桂醛应用瓶颈的有效方法，然而这些载体系统仍存在问题：①抑菌活性受损，载体包埋后肉桂醛抑菌活性与载体基质、包埋技术等密切相关，有些载体会削弱肉桂醛的抑菌活性，例如生物大分子膜荷载降低肉桂醛的气相抑菌效果<sup>[55]</sup>；卵清蛋白及其纳米颗粒包埋后肉桂醛对真菌的抑制活性降低<sup>[56]</sup>；②结构不稳定，例如环糊精在高湿环境下结构崩塌导致肉桂醛暴释<sup>[57]</sup>；③智能控释载体较少，目前载体化肉桂醛的研究重点是抑菌和保鲜方面，针对水果采后特点的智能控释抑菌体系的研究还不够深入。水果采后仍是有活力的生命体，会进行呼吸代谢、蒸腾作用等生理活动，导致水果微环境变化，例如呼吸代谢产生的 CO<sub>2</sub> 和水汽结合形成 H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>，从而使微环境逐渐呈现酸性，良好的酸性环境会加速果蔬表面微生物的生长繁殖，加剧水果的腐败变质。因此设计具有酸敏响应开关的载体化肉桂醛，能够感知环境 pH 信号变化而动态释放肉桂醛，有望实现水果的精准保鲜，大大提高防腐剂的作用效果。

肉桂醛上的醛基可与氨基缩合生成亚胺键，又称席夫碱结构（Schiff Base），该结构在中性和碱性条件下稳定，在酸性介质中易被水解，从而诱发肉桂醛的 pH 响应释放。Gadkari 等<sup>[58]</sup>利用肉桂醛与壳聚糖的席夫碱反应制备了纳米颗粒，该颗粒的抑菌活性明显优

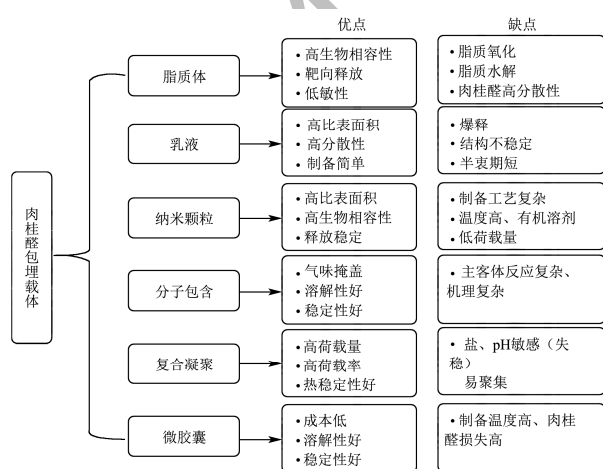


图 2 肉桂醛包埋载体的优缺点

Fig 2 Advantages and disadvantages of encapsulation systems for cinnamaldehyde

于壳聚糖或肉桂醛；郇凌云<sup>[59]</sup>基于席夫碱反应合成了壳聚糖-肉桂醛，并证明其具有 pH 响应释放和抑菌能力。可见，席夫碱结构是一种良好的酸敏响应开关，然而壳聚糖的酸溶性在一定程度上限制了其产业化应用，寻找一种可与肉桂醛发生席夫碱反应、高荷载能力、可应用范围和方式广泛的生物大分子载体对于肉桂醛作为高质量防腐剂的产业化应用仍十分必要。

蛋白质是目前活性物质包埋载体的研究热点，其具有优越的功能特性（聚集、凝胶、乳化等）、自组装特性（薄膜、水凝胶、胶束、纳米颗粒等）以及生物可降解等优点<sup>[2]</sup>，而且具有丰富的氨基酸残基，具有与肉桂醛反应生成席夫碱结构的潜能。现研究已证明肉桂醛可与氨基酸反应生成具有广谱抑菌活性的席夫碱，氨基酸的种类会影响席夫碱的抑菌活性，例如天冬氨酸和谷氨酸与肉桂醛反应生成的席夫碱抑菌活性优于肉桂醛，而肉桂醛与亮氨酸的反应产物的抑菌活性低于肉桂醛<sup>[60]</sup>。另外，有研究报道肉桂醛可与蛋白质发生席夫碱反应，例如肉桂醛可基于席夫碱反应作为蛋白质的交联剂构建生物大分子膜<sup>[61]</sup>；肉桂醛与蛋白质发生席夫碱反应可提高豌豆蛋白、乳清蛋白的界面特性，使其在油滴表面形成致密的粘弹性界面层，提高乳液稳定性<sup>[62,63]</sup>。因此通过选择富含谷氨酸和天冬氨酸的蛋白质，利用蛋白与肉桂醛之间的非共价相互作用以及席夫碱反应构建具有 pH 响应、快速并长效抑菌的复合材料具有可行性。

## 6 结论与展望

肉桂醛是一种天然的抑菌剂，而且具有优越的抗氧化和抑制酶促褐变活性，是国家食品添加剂使用标准中规定的可用于新鲜水果表面处理，防止腐败变质和延长贮藏期的 18 类食品添加剂中唯一一种植物来源活性物质，其产业化应用不仅满足安全、营养的高品质生鲜食品供应的国家战略，还能满足绿色、安全的保鲜技术的产业需求。然而肉桂醛自身的难溶性、高挥发性以及高成本，限制了其产业化应用，通过生物大分子纳米载体实现肉桂醛的水溶化、稳态化和抑菌增效，是拓宽肉桂醛作为天然抑菌剂应用的有效途径。针对水果采后生理特点，设计具有酸敏响应释放的纳米肉桂醛，实现肉桂醛的精准控释，有望进一步提升肉桂醛的防腐保鲜效果以及降低使用成本。

## 参考文献

[1] Guo Q, Du G, Jia H, et al. Essential oils encapsulated by biopolymers as antimicrobials in fruits and vegetables: A review [J]. Food Bioscience, 2021, 44: 101367.

[2] Hosseini H, Jafari S M. Introducing nano/microencapsulated bioactive ingredients for extending the shelf-life of food products [J]. Advance in Colloid and Interface Science, 2020, 282: 102210.

[3] Doyle A A, Stephens J C. A review of cinnamaldehyde and its derivatives as antibacterial agents [J]. Fitoterapia, 2019, 139: 104405.

[4] Balaguer M P, Lopez-Carballo G, Catala R, et al. Antifungal properties of gliadin films incorporating cinnamaldehyde and application in active food packaging of bread and cheese spread foodstuffs [J]. International Journal of Food Microbiology, 2013, 166: 369-377.

[5] Shreaz S, Wani W A, Behbehani J M, et al. Cinnamaldehyde and its derivatives, a novel class of antifungal agents [J]. Fitoterapia, 2016, 112: 116-131.

[6] Hosseini S F, Ghaderi J, Gómez-Guillén. Tailoring physio-mechanical and antimicrobial/antioxidant properties of biopolymeric films by cinnamaldehyde-loaded chitosan nanoparticles and their application in packaging of fresh rainbow troutfillets [J]. Food Hydrocolloids, 2022, 124: 107249.

[7] Xiao J, Gu C, Zhu D, et al. Development and characterization of an edible chitosan/zein-cinnamaldehyde nano-cellulose composite film and its effects on mango quality during storage [J]. LWT - Food Science and Technology, 2021, 140: 110809.

[8] Carvalho R L, Cabral M F, Germano T A, et al. Chitosan coating with trans-cinnamaldehyde improves structural integrity and antioxidant metabolism of fresh-cut melon [J]. Postharvest Biology and Technology, 2016, 113: 29-39.

[9] Echegoyen Y, Nerín C. Performance of an active paper based on cinnamon essential oil in mushrooms quality [J]. Food Chemistry, 2015, 170: 30-36.

[10] Gao M, Feng L, Jiang T. Browning inhibition and quality preservation of button mushroom (*Agaricus bisporus*) by essential oils fumigation treatment [J]. Food Chemistry, 2014, 149: 107-113.

[11] Duan X, Qin D, Li H, et al. Study of antimicrobial activity and mechanism of vapor-phase cinnamaldehyde for killing *Escherichia coli* based on fumigation method [J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 1040152.

[12] Ye H, Shen S, Xu J, et al. Synergistic interactions of cinnamaldehyde in combination with carvacrol against food-borne bacteria [J]. Food Control, 2013, 34(2): 619-623.

[13] 孙琦.肉桂醛对黄曲霉菌生长和产毒的影响机制研究[D].中国农业科学院,2016.

- [14] Kim S A, Rhee M S. Highly enhanced bactericidal effects of medium chain fatty acids (caprylic, capric, and lauric acid) combined with edible plant essential oils (carvacrol, eugenol,  $\beta$ -resorcylic acid, trans -cinnamaldehyde, thymol, and vanillin) against *Escherichia coli* O157:H7 [J]. Food Control, 2016, 60: 447-454.
- [15] Pang D, Huang Z, Li Q, et al. Antibacterial mechanism of cinnamaldehyde: Modulation of biosynthesis of phosphatidylethanolamine and phosphatidylglycerol in *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli* [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2021, 69(45): 13628-13636.
- [16] Shen S, Zhang T, Yuan Y, et al. Effects of cinnamaldehyde on *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus* membrane [J]. Food Control, 2015, 47: 196-202.
- [17] 胡心怡,胡郁汉,潘振辉,等.百里香酚和肉桂醛联用对沙门氏菌的协同抑菌效应及其应用[J].现代食品科技,2021,37(12):112-119.
- [18] Guan P, Wang X, Dong Z, et al. Cinnamaldehyde inactivates *Listeria monocytogenes* at a low temperature in ground pork by disturbing the expression of stress regulatory genes [J]. Food Bioscience, 2023, 51: 102277.
- [19] 陈玉环,万春鹏,彭旋,等.桂枝主要抑菌活性成分对柑橘青霉病菌的作用机制研究[J].现代食品科技,2016,32(10):45-51.
- [20] Tang X, Shao Y, Tang Y, et al. Antifungal activity of essential oil compounds (geraniol and citral) and inhibitory mechanisms on grain pathogens (*Aspergillus flavus* and *Aspergillus ochraceus*) [J]. Molecules, 2018, 23(9): 2108.
- [21] 张宽朝,魏练平,沈浩,等.肉桂醛、柠檬醛抑制黑曲霉生长的比较研究[J].中国微生态学杂志,2011,23(2):141-143.
- [22] He J, Wu D, Zhang Q, et al. Efficacy and mechanism of cinnamon essential oil on inhibition of *Colletotrichum acutatum* isolated from 'hongyang' kiwifruit [J]. Frontiers in Microbiology, 2018, 9: 1288.
- [23] Lee J, Jung M, Lee S, et al. Antibacterial mode of action of trans-cinnamaldehyde derived from cinnamon bark (*Cinnamomum verum*) essential oil against *Agrobacterium tumefaciens* [J]. Pesticide Biochemistry and Physiology, 2020, 165: 104546.
- [24] Wang Y, Zhang Y, Shi Y, et al. Antibacterial effects of cinnamon (*Cinnamomum zeylanicum*) bark essential oil on *Porphyromonas gingivalis* [J]. Microbial Pathogenesis, 2018, 116: 26-32.
- [25] Yin L, Dai Y, Chen H, et al. Cinnamaldehyde resist *Salmonella typhimurium* adhesion by inhibiting type I fimbriae [J]. Molecules, 2022, 27(22): 7753.
- [26] Du G, Yin X, Yang D, et al. Proteomic investigation of the antibacterial mechanism of trans-cinnamaldehyde against *Escherichia coli* [J]. Journal of Proteome Research, 2021, 20(5): 2319-2328.
- [27] Wang H, Peng Z, Wang C, et al. Thymol and trans-cinnamaldehyde induce apoptosis through a metacaspase-dependent mitochondrial pathway in food-spoilage yeast *Zygosaccharomyces rouxii* [J]. Journal of Food Science, 2022, 87(9): 4119-4136.
- [28] Ouyang Q, Okwong R O, Chen Y, et al. Synergistic activity of cinnamaldehyde and citronellal against green mold in citrus fruit [J]. Postharvest Biology and Technology, 2020, 162: 111095.
- [29] Yang R, Miao J, Shen Y. et al. Antifungal effect of cinnamaldehyde, eugenol and carvacrol nanoemulsion against *Penicillium digitatum* and application in postharvest preservation of citrus fruit [J]. LWT - Food Science and Technology, 2021, 141: 110924.
- [30] 米嘉琦,王笑寒,韩欣怡,等.肉桂醛对芒果胶孢炭疽病的抑制作用及其涂膜应用[J].食品工业科技,2020,41(5):250-256, 261.
- [31] 张娜娜,张辉,马丽,等.肉桂醛对番茄采后灰霉病的抑制作用及其对品质的影响[J].食品科学,2014,35(14):251-255.
- [32] Yang S, Miao Q, Huang Y, et al. Preparation of cinnamaldehyde-loaded polyhydroxyalkanoate/chitosan porous microspheres with adjustable controlled-release property and its application in fruit preservation [J]. Food Packaging and Shelf Life, 2020, 26: 100596.
- [33] 杨雅景,韩玉竹,孟醒,等.肉桂醛抗菌复合保鲜剂涂膜对采后荔枝的保鲜效果[J].食品科学,2019,40(23):253-261.
- [34] Zhang J, Ozturk S, Singh R K, et al. Effect of cellulose nanofiber-based coating with chitosan and trans-cinnamaldehyde on the microbiological safety and quality of cantaloupe rind and fresh-cut pulp. Part 1: Microbial safety [J]. LWT - Food Science and Technology, 2020, 134: 109972.
- [35] Albertini S, Lai Reyes A E, Trigo J M, et al. Effects of chemical treatments on fresh-cut papaya [J]. Food Chemistry, 2016, 190: 1182-1189.
- [36] Ranjbar A, Ramezani A. Synergistic effects of modified atmosphere packaging and cinnamaldehyde on bioactive compounds, aerobic mesophilic and psychrophilic bacteria of pomegranate arils during cold storage [J]. Chemical and Biological Technologies in Agriculture, 2022, 9: 24.
- [37] Gao Y, Kan C, Wan C, et al. Quality and biochemical changes of navel orange fruits during storage as affected by cinnamaldehyde-chitosan coating [J]. Scientia Horticulturae, 2018, 239: 80-86.
- [38] 段小芳.肉桂醛和脱氢乙酸钠对柑橘采后酸腐病和绿霉病的防治[D].湘潭:湘潭大学,2016.
- [39] Ozturk S, Zhang J, Singh R K, et al. Effect of cellulose nanofiber-based coating with chitosan and



- trans*-cinnamaldehyde on the microbiological safety and quality of cantaloupe rind and fresh-cut pulp. Part 2: Quality attributes [J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2021, 147: 111519.
- [40] Che J, Chen K, Song J, et al. Fabrication of  $\gamma$ -cyclodextrin-based metal-organic frameworks as a carrier of cinnamaldehyde and its application in fresh-cut cantaloupes [J]. *Current Research in Food Science*, 2022, 5: 2114-2124.
- [41] Friedman M, Kozukue N, Harden L A. Cinnamaldehyde content in foods determined by gas chromatography-mass spectrometry [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2000, 48(11): 5702-5709.
- [42] Muhoza B, Xia S, Cai J, et al. Gelatin and pectin complex coacervates as carriers for cinnamaldehyde: Effect of pectin esterification degree on coacervate formation, and enhanced thermal stability [J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 87: 712-722.
- [43] Balaguer M P, Fajardo P, Gartner H, et al. Functional properties and antifungal activity of films based on gliadins containing cinnamaldehyde and natamycin [J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2014, 173: 62-71.
- [44] Wang X, Cheng F, Wang X, et al. Chitosan decoration improves the rapid and long-term antibacterial activities of cinnamaldehyde-loaded liposomes [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 168: 59-66.
- [45] Yildiz Z I, Kilic M E, Durgun E, et al. Molecular encapsulation of cinnamaldehyde within cyclodextrin inclusion complex electrospun nanofibers: Fast-dissolution, enhanced water solubility, high temperature stability, and antibacterial activity of cinnamaldehyde [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2019, 67(40): 11066-11076.
- [46] Gong C, Lee M C, Godec M, et al. Ultrasonic encapsulation of cinnamon flavor to impart heat stability for baking applications [J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 99: 105316.
- [47] Liu Q, Cui H, Muhoza B, et al. Fabrication of low environment-sensitive nanoparticles for cinnamaldehyde encapsulation by heat-induced gelation method [J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 105: 105789.
- [48] Rieger K A, Schiffman J D. Electrospinning an essential oil: Cinnamaldehyde enhances the antimicrobial efficacy of chitosan/poly (ethylene oxide) nanofibers [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2014, 113: 561-568.
- [49] Ji M, Sun X, Guo X, et al. Green synthesis, characterization and in vitro release of cinnamaldehyde/sodium alginate/chitosan nanoparticles [J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 90: 515-522.
- [50] Istúriz-Zapata M A, Hernández-López M, Correa-Pachero Z N, et al. Quality of cold-stored cucumber as affected by nanostructured coatings of chitosan with cinnamon essential oil and cinnamaldehyde [J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2020, 123: 109089.
- [51] 陈佳佳.肉桂醛固体脂质纳米粒的制备及其在草莓保鲜中应用的研究[D].长春:吉林大学,2022.
- [52] Muhoza B, Qi B, Harindintwali J D, et al. Encapsulation of cinnamaldehyde: An insight on delivery systems and food applications [J]. *Critical Review in Food Science and Nutrition*, 2021, 63: 21-23.
- [53] Gao Q, Sun Y, He R, et al. Molecular encapsulation of cinnamaldehyde in V-type starch: The role of solvent and temperature [J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 136: 108285.
- [54] Zhang C, Pan L, Ma J, et al. Microencapsulation enhances the antifungal activity of cinnamaldehyde during the period of peanut storage [J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2023, 180: 114657.
- [55] Srisa A, Harnkarnsujarit N. Antifungal films from *trans*-cinnamaldehyde incorporated poly (lactic acid) and poly(butylene adipate-co-terephthalate) for bread packaging [J]. *Food Chemistry*, 2020, 333: 127537.
- [56] Fions M B, Deseta M L, Sponton O E, et al. Evaluation of ovalbumin nanocarriers to promote the vehiculization and antifungal properties of cinnamaldehyde in aqueous media [J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2021, 151: 112224.
- [57] Cevallos P A, Buera M P, Elizalde B E. Encapsulation of cinnamon and thyme essential oils components (cinnamaldehyde and thymol) in  $\beta$ -cyclodextrin: Effect of interactions with water on complex stability [J]. *Journal of Food Engineering*, 2010, 99: 70-75.
- [58] Gadkari R R, Suwalka S, Yogi M R, et al. Green synthesis of chitosan-cinnamaldehyde cross-linked nanoparticles: Characterization and antibacterial activity [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2019, 226: 115298.
- [59] 邹凌云.pH 响应释放型肉桂醛-壳聚糖席夫碱的制备及其果蔬保鲜应用研究[D].无锡:江南大学,2021.
- [60] Wei Q Y, Xiong J J, Jiang H, et al. The antimicrobial activities of the cinnamaldehyde adducts with amino acids [J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2011, 150: 164-170.
- [61] Jia F, Wang J J, Huang Y, et al. Development and characterization of gliadin-based bioplastic films enforced by cinnamaldehyde [J]. *Journal of Cereal Science*, 2021, 99: 103208.
- [62] Feng T, Wang X, Fan C, et al. The selective encapsulation and stabilization of cinnamaldehyde and eugenol in high internal phase Pickering emulsions: Regulating the interfacial properties [J]. *Food Chemistry*, 2023, 401: 134139.
- [63] Chen E, Cao L, McClements D J, et al. Enhancement of physicochemical properties of whey protein-stabilized nanoemulsions by interfacial cross-linking using cinnamaldehyde [J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 77: 976-985.



现代食品科技