

# 肉桂醛复合材料的制备工艺及其应用研究现状

张蓉, 兰文婷, 王毅豪, 闫大成, 刘耀文

(四川农业大学 食品学院, 雅安 625014)

**摘要:** **目的** 为肉桂醛(CA)复合材料的创新开发及其应用提供理论依据。**方法** 综述国内外 CA 复合材料的主要复合工艺、应用领域和具体效果, 并对存在的问题进行分析, 同时对 CA 复合材料的发展趋势进行展望。**结果** CA 复合材料因其优良的抑菌抗氧化作用主要被应用在食品包装和医疗方面, 更多地被应用在食品保鲜包装中, 缺乏针对应用在其他方面的研究。**结论** 国内外对 CA 复合材料的研究刚起步不久, 工艺和应用都还比较单一, 研究新型的、具有更多功能的 CA 复合材料以及开发其在其他领域方面的应用将是未来 CA 复合材料的发展趋势。

**关键词:** 肉桂醛; 抑菌; 抗氧化; 食品包装; 复合材料; 制备工艺

**中图分类号:** TB484.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)09-0124-06

## Research Status of Preparation Technology and Application of Cinnamaldehyde Compound Materials

ZHANG Rong, LAN Wen-ting, WANG Yi-hao, YAN Da-cheng, LIU Yao-wen  
(College of Food Science, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, China)

**ABSTRACT:** The work aims to provide theoretical basis for the innovation, development and application of the compound material of cinnamaldehyde (CA). The main compound technology, application fields and specific effects of CA composites at home and abroad were reviewed, and some existing problems were analyzed. Meanwhile, the development trend of CA composites was also envisioned. CA composite was mainly used in food packaging and medical treatment because of its excellent antibacterial and antioxidant effect. Mostly, it was applied in food fresh-keeping package. Therefore, it was short of researches on the application in other aspects. As the research of the CA composite materials is newly started, and the process and application are still relatively simple, the research on new types of CA composite materials with more functions and the development of their application in other fields will be the future development trend of CA composite materials.

**KEY WORDS:** cinnamaldehyde; antibacterial; antioxidant; food packaging; composite material; preparation technology

CA 作为一种天然抑菌抗氧化物质, 广泛来源于天然植物中, 具有优异的抑菌抗氧化作用, 能够有效抑制微生物的生长繁殖, 防腐保鲜效果显著, 广泛应用于食品包装等领域。同时 CA 还可延缓塑料老化, 提高塑料的使用寿命, 减少能耗和污染, 在塑料活性智能包装方面具有极大的应用潜力。单独的 CA 材料具有极强的挥发性, 减弱了其抑菌作用, 而 CA 复合材料在结合其他材料优点的同时, 可在一定程度上减

轻 CA 的挥发作用, 最大限度地实现 CA 的功效, 扩大其应用领域, 因此, 研究 CA 及其复合材料具有极大的现实意义。

### 1 肉桂醛

CA 是从肉桂等植物中提取出来的天然物质, 已通过国标认证可应用于食品添加剂、显色剂、保鲜剂

收稿日期: 2016-09-10

基金项目: 四川省教育厅项目 (16ZB0044, 035Z1373); 国家级大学生创新训练计划 (04070022, 04054686); 四川省大学生创新训练计划 (201610626007)

作者简介: 张蓉 (1995—), 女, 四川农业大学本科生, 主攻抗菌材料的制备。

通讯作者: 刘耀文 (1987—), 男, 博士, 四川农业大学讲师, 主要研究方向为抗菌材料的制备。

和口香糖的制备<sup>[1]</sup>。CA 难溶于水，易溶于乙醇和石油醚，在空气中易被氧化，容易挥发，因此应储存在低温干燥的环境中。天然存在的 CA 都为其反式结构，有强烈的肉桂油香气，香气持久且强烈，由 CA 制备的口香糖在除口臭方面效果较好。

CA 的突出特点是其抗菌性，尤其是对真菌有明显的抑制作用，Raeisi 等<sup>[2]</sup>发现 CA 对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌有极强的抑制作用。同时它还具有极好的抗氧化性<sup>[3]</sup>，在水果保鲜包装方面有着很好的应用前景<sup>[4]</sup>，被广泛应用于食品包装、医疗和日化等领域<sup>[5-7]</sup>。CA 易挥发的特点使其抗菌作用有所减弱，因此目前研究者们多研究 CA 与其他物质的复合材料<sup>[8-9]</sup>，充分发挥 CA 的抑菌抗氧化作用，使其在更多领域拥有更为广泛的应用。

## 2 肉桂醛抗菌机理

CA 的显著特点是其优良的抗菌性，虽然很多研究者对此进行了研究分析，但目前对其真正的抗菌原理还未有明确的解释。戴向荣等<sup>[10]</sup>通过探索 CA 对黄曲霉的抑制机理发现，CA 会损伤黄曲霉的细胞质，侵入细胞内部，破坏细胞的空间结构，导致其新陈代谢紊乱，达到抑制黄曲霉生长的目的。同时，CA 还能通过攻击细胞生物膜发生脂质过氧化作用，生成的脂质过氧化物可引起细胞损伤而加强抗菌性。Shen 等<sup>[11]</sup>利用大肠杆菌和金黄色葡萄球菌来探究 CA 抗菌机理，扫描电镜实验表明，大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的细胞膜结构被破坏，细胞壁裂解，细胞质基质内容物泄漏凝结，整个细胞发生变形，当 CA 的质量浓度为 0.31 mg/mL 时对上述 2 种菌有明显的抑菌作用。张文平等<sup>[12]</sup>则认为 CA 的抗菌机理可能是其对黄曲霉的遗传物质 DNA 和 RNA 的合成有阻碍作用，因此表现出抗菌作用。研究者们普遍认为 CA 通过破坏细胞结构，导致细胞新陈代谢紊乱，阻碍其遗传信息的表达，从而发挥抗菌作用。

## 3 肉桂醛复合材料的复合工艺及应用

CA 作为一种天然抑菌抗氧化物质，具有较大的研究和应用价值。由于其呈液态，可溶于大部分有机溶剂，因此制备其复合材料多采用简单的流延成膜和浇铸成膜法。部分研究者也尝试应用其他工艺方法来制备 CA 复合材料，如静电纺丝法。虽然采用不同工艺制备的材料具有不同的效用，但均具有较好的抑菌抗氧化作用，因此其复合材料常用于食品保鲜方面。已有研究也大多集中在食品保鲜包装方面，但 CA 良好的抗菌性在医学和化工等方面也有极大的应用潜力，只是目前对 CA 复合材料的研究刚起步不久，更

多的应用尚未被开发出来。

### 3.1 流延成膜法

流延成膜法是一种常见的制备复合膜的方法，利用溶剂挥发制得的复合膜均匀性较好，不易混入杂质，但同时制得的复合膜也具有强度低和生产成本较高的缺点。在实际情况下，因该法操作简单方便，在制备 CA 复合材料时应用较多。

Carvalho 等<sup>[13]</sup>以壳聚糖(CS)为基体，反式 CA 为抗菌剂，甘油为增塑剂，14 °C 下先将水溶性 CS 溶解在蒸馏水中，然后加入甘油和反式 CA 混合均匀，得到复合膜液后于玻璃板上流延成 CS/CA 复合膜，运用复合膜对鲜切甜瓜进行保鲜发现，反式 CA 作为自由基清除剂和酶抑制剂，降低了果实的呼吸速率，抑制了果实加工和衰老诱导的氧化应激反应，对果实的细胞膜伤害较小，有效降低了营养物质的损失，可使鲜切甜瓜在 4 °C 下保存 20 d。马中苏等<sup>[14]</sup>将 CA 溶于体积分数为 60% 的酒精中制得不同浓度的 CA 溶液，加入经超声波微波协同作用改性后的浓缩乳清蛋白/CS 复合膜液中混匀，在 -0.8 MPa 下脱气 5 h，取 150 mL 复合膜液于 40 °C 下干燥得到 CA/浓缩乳清蛋白/CS 复合膜。实验发现 CA 的加入可影响复合膜的物理性能、透湿性和透氧性，因 CA 为脂类疏水性物质，当 CA 浓度增加时复合膜的水蒸气透过率下降，当 CA 质量分数为 0.3% 时，复合膜的水蒸气透过系数最小，为  $1.15 \times 10^{-13}$  g/(cm·s·Pa)，并且随着 CA 浓度的增加，其抑菌效果显著增大。曾少甫等<sup>[15]</sup>采用流延成膜法，将 CS 用乙酸溶解，加入甘油和吐温 80 制得 CS 溶液，然后将不同体积分数的 CA 加入 CS 膜液中，混匀，制得 CS/CA 溶液，除泡后流延成复合膜。对该复合膜进行性能研究，发现 CS 与 CA 相容性较好，并且其抗菌性能随着 CA 体积分数的增大而增大，有效提高了 CS 膜的抗菌性。

Otoni 等<sup>[16]</sup>通过将乙酰化单甘酯、蒸馏水和吐温 60 混合获得微乳液和纳米乳液，然后将大豆分离蛋白(SPI)添加到甘油与蒸馏水的混合液中，配制成质量分数为 10% 的 SPI 溶液，搅拌后在 90 °C 下水浴 45 min 使其变性，冷却后将乳液和 CA 加入其中混匀，脱气，流延，室温干燥后即制得 SPI/CA 复合膜。对复合膜进行性能测试发现，乳化剂的添加能显著降低薄膜的拉伸强度，改善其断裂伸长率，并且 CA 的加入可明显提高复合膜的抗菌性，相比纯 SPI 膜，其阻水性和强度均得到改善，更具实用价值。张彬等<sup>[17]</sup>先称取 8 g SPI 溶于一定体积的卡拉胶、甘油和蒸馏水的混合溶液中，搅拌均匀后糊化，40 °C 下冷却 20 min 后加入 CA 混匀，干燥后即制得 CA/SPI 复合膜。进一步研究发现，CA 的加入可影响 SPI 可食膜的力学性能及水溶性等，当 CA 质量分数为 3% 时对大肠杆菌有

100%的抑制作用,质量分数为4%时则对金黄色葡萄球菌和气假单胞菌起到完全的抑制作用。

王卉等<sup>[18]</sup>先配制质量浓度为20 mg/mL的纳米蒙脱土(MMT)悬浊液,室温下磁力搅拌24 h,经超声分散20 min后升温至60 °C,然后将质量浓度为15 mg/mL的CMC-Na水溶液与悬浊液混合,反应2 h,再加入CA(CMC-Na质量的3%),并以吐温80(CMC-Na质量的1%)为乳化剂,高速搅拌后脱泡,流延,自然风干即得复合膜。发现MMT可有效控制CA在复合膜中的扩散和释放,增强复合膜的抗菌性。

采用流延成膜法制备CA复合膜,不同材料复合的效果差异较大。因CA具有较强的挥发性,与其他物质混合时,若两者相容性好,干燥过程挥发少,则抗菌效果好。由于CS与CA均具有良好的抗菌性,两者相容性较好,因此在CA与CS的复合材料中,主要研究的是复合材料抗菌效果的变化,同时因为CA较强的抗氧化性,可有效防止食品的褐变腐败,延长食品的货架期,使得CA/CS复合材料更多地被应用在食品保鲜包装领域;与SPI复合时则主要起到改善其力学性能的作用。

### 3.2 浇铸成膜法

溶液浇铸成膜与流延成膜类似,操作简单,但因所需溶剂大部分为有机溶剂,带有一定的毒性,对人体有一定的影响,在实验过程中应特别注意自身的安全防护。CA可溶于大部分有机溶剂,在制备其复合材料时大多采用溶液浇铸成膜法。Zhang等<sup>[19]</sup>在70 °C下以甘油为增塑剂,加入CaCl<sub>2</sub>溶解配制海藻酸钠溶液,然后将CA与海藻酸钠溶液按质量比为1:1进行混合,加入蒸馏水,控制最后成膜液中海藻酸钠的质量浓度为10 g/L,磁力搅拌后采用溶液浇铸法制得海藻酸钠/CA复合膜。研究表明海藻酸钠与CA复合后具有较高的抗菌性,并且随着CA用量的增加,其抑制致病性和腐败微生物的能力增强,将其应用于哈密瓜的保鲜实验中取得了良好的效果<sup>[20]</sup>。Arancibia等<sup>[21]</sup>利用琼脂和海藻酸钠,掺入0.02 g/mL的CA制备了活性可生物降解多糖双层膜。通过FRAP和ABTS法对复合膜的抗氧化活性进行研究,发现复合膜的自由基清除能力较好,具有良好的抗氧化活性。同时抗菌实验表明该复合膜对大肠杆菌、荧光假单胞菌、单增李斯特菌和金黄色葡萄球菌具有较高的抑制作用,抑菌率均高于85%。应用复合膜在5 °C条件下对虾仁进行保鲜,发现可延长其货架期20 d以上,并且在冷冻储藏方面没有负面影响,可应用在冷藏存储期间来延长食品的保质期。

Souza等<sup>[22]</sup>首先将0.1 g粘土纳米粒子与25 g蒸馏水配成悬浮液,搅拌后放置1 d,加入5 g淀粉和70 g蒸馏水至悬浊液中,然后分别将0.4, 0.6, 0.8 g的

CA和0.010, 0.015, 0.020 g的乳化剂混合,在36~40 °C下再加入0.75, 1.13, 0.02 g甘油,磁力搅拌后和粘土纳米粒子悬浊液混匀,在67~71 °C下加热至淀粉糊化,冷却,用乙醇稀释后采用溶液浇铸法得到木薯淀粉/CA活性复合膜。研究表明,即使复合膜中CA处于最低浓度,也可有效抑制面包中的微生物生长,抗菌作用极好,但是浓度过高则可能影响食物的感官,改变食物原本的风味。该复合膜存在不连续结构,因此,进一步研究提高复合膜的力学性能和阻隔性能对其在食品活性包装的应用上有着极大的意义<sup>[23]</sup>。

Song等<sup>[24]</sup>将CA作为交联剂,先将葵花籽粕蛋白溶解在纳米粘土溶液中,然后加入质量比为2:1的蔗糖和果糖作增塑剂,0.01 g CA作交联剂,搅拌1 h,清洗除去外来物质,晒干,将干燥的红藻削减磨碎,使用目筛过滤,将红藻添加入葵花籽粕蛋白的成膜液中,搅拌1 h后在85 °C下水浴30 min,冷却至40 °C,将成膜溶液通过奶酪布浇铸到聚四氟乙烯涂层的玻璃板上,室温下烘干得到葵花籽粕蛋白复合膜。对该复合膜进行性能测试,发现加入质量分数3%的有机黏土使复合膜的拉伸强度升高了2.19 MPa,水蒸气透过率降低了 $0.52 \times 10^{-9} \text{ g} \cdot \text{m}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ 。将掺有葡萄柚籽提取物质量分数为1.2%的复合膜应用在熏鸭的包装中,经过12 d的存储,发现单核细胞增生李斯特氏菌与控制包装相比下降20.42 CFU,该复合膜具有良好的力学性能和抗菌性能,可作为食品抗菌材料。Otoni等<sup>[25]</sup>先将CA乳化,然后将粉状果胶加入蒸馏水中,搅拌至完全溶解,用蒸馏水稀释1倍后与质量比为1:1的木瓜原浆和CA乳液混合除泡,室温下干燥得到木瓜果胶泥/CA纳米乳食用复合膜。因为木瓜原浆的加入,该复合膜除了良好的抗菌性外还有较高的强度和水蒸气透过率,是一种新型的环境友好食品包装材料。

CA复合材料中浇铸成膜法运用最多,主要是与海藻酸钠和木薯淀粉等的复合。海藻酸钠与CA复合,综合抗菌、抗氧化、保湿等优点,使得复合材料在食品保鲜领域有着更加广泛且有效的应用。淀粉与CA复合后具有较强抗菌性的同时其力学性能在一定程度上得到改善,虽然效果还不明确,但淀粉来源广泛,价格低廉,安全无毒,研究该复合材料在食品包装方面的应用具有很好的实用价值。

### 3.3 静电纺丝法

静电纺丝又称电纺,是对聚合物流体进行静电雾化,最后固化并形成一定纤维状的材料加工技术。由于其可加工性强,操作简单,得到的纳米级纤维比表面积大等优点,目前已广泛应用于食品包装、生物医学、过滤防护、太阳能、传感器等领域<sup>[26-28]</sup>。此法在CA复合材料中应用极少,究其原因可能是电纺

的仪器较昂贵,电纺过程中参数的设定需要大量的试验来确定,并且CA是一种极易挥发的物质,在纺丝过程中可能会存在较严重的挥发情况。目前,我国的刘俊渤等<sup>[29]</sup>采用水溶液饱和法制备了CA/ $\beta$ -环糊精包合物,然后在20~22℃和相对湿度为40%~50%的条件下将一定量的PLA加入盛有丙酮/N,N-二甲基甲酰胺(体积比为1:1)混合溶液的锥形瓶中,控制PLA纺丝液质量分数为10%,与配制好的包合物混合,在40℃下搅拌5h,将制备好的纺丝液注入7号纺丝针头中,铝箔作为接收板,接收距离调整为17cm,电压为18kV,采用静电纺丝法制备出CA/PLA复合纳米纤维膜。Rieger等也以此法制备了CS/CA/PEO纳米纤维膜<sup>[30]</sup>,他们以CA和CS为原料,经缩合反应制得席夫碱,然后在pH值为4的环境下将CS与聚环氧乙烷(PEO)按质量比1:1混合后加入CA溶液,采用静电纺丝法,在22℃和相对湿度为24%~28%的条件下,调节电压为25kV,进料速率为60 $\mu$ L/min,设置距离为120,160和140mm,制备出CS/CA/PEO纳米纤维膜。抗菌实验发现,CA质量分数为0.5%时对大肠杆菌和铜绿假单胞菌的抑制率分别高达99%和62%,当CA质量分数增加到5%时对大肠杆菌的抑菌率仍然高达99%以上,对铜绿假单胞菌的抑菌率则高达82%,相比空白组提高了50%。同时他们发现用氯化CA代替CA所制得的纳米纤维膜性能更好,在医学上的应用也更广泛<sup>[31]</sup>。

采用静电纺丝法制备的CA复合材料存在较严重的CA挥发情况,运用浇铸成膜法,添加0.02g/mL的CA即可对大肠杆菌和荧光假单胞菌等达到85%以上的抑制率,采用流延成膜法时,当CA质量分数为4%则对金黄色葡萄球菌和气假单胞菌起到完全的抑制作用,虽然都存在一定的挥发作用,但相比静电纺丝法极大地节约了材料。然而运用静电纺丝法制备的材料也具有其独特的优点,拥有极大的比表面积使其在医学上有着不容小觑的应用潜力。

### 3.4 其他方法

除了上述3种方法外,还有一些其他制备CA复合材料的方法。Hu等<sup>[32]</sup>以CS和CA为原料,采用离子凝胶法制备纳米CS/CA颗粒,然后将纳米CS/CA乳液喷涂到低密度的聚乙烯膜的表面,在80℃下干燥,得到CS/CA/聚乙烯复合膜,将其应用在猪肉的保鲜中发现,CA作为一种天然防腐剂,具有极强的保持肉与肉制品品质的潜力,在活性包装上有着极大的应用前景。Carmen等<sup>[33]</sup>首先采用乳化蒸发法制备纳米颗粒,将50mg PLGA溶于2mL二氯甲烷中,加入反式CA作为有机相,水相(20mL)则由质量浓度为3g/L的PVA溶液组成,将有机相滴加到水相后进行超声超滤后,在-80℃下放置2h后制备纳米颗粒,

真空干燥后配制纳米悬浊液,加工后得到聚合物微球,通过体外控制释放试验发现,CA的包封率约为92%,对沙门氏菌和李斯特菌有明显的抑制作用,在食品保鲜包装上有广泛的应用。

## 4 肉桂醛复合材料存在的问题

虽然CA具有较好的研究价值,但目前对CA复合材料的研究刚起步不久,还未有系统的研究体系,存在着不少问题:目前CA复合材料大都为CA复合膜,因其较好的抑菌和抗氧化等作用,能抑制大多数腐败菌和致病菌,显著延长食品的货架期,多应用于食品保鲜包装领域<sup>[34-35]</sup>,但对其在其他领域的应用研究较少,相关报道极其少见;由于CA是一种具有强烈挥发性的液体物质,在制备其复合材料时挥发问题无法避免,且其价格较昂贵,挥发会造成经济损失,同时影响复合材料的抗菌抗氧化能力;CA具体的抗菌抗氧化机理还不甚明了,其复合材料在食品中的保鲜机理还未有一个明确的解释;CA复合食品保鲜包装材料在食品中的迁移问题,其迁移量是否符合人体健康标准,其在保鲜过程中是否会对食品风味产生影响;不同工艺方法制备出的CA复合材料在性质与应用方面是否有较大的差别,哪种方法效率较高、实用性较强,没有得到深入研究;CA复合材料的制备工艺较少,主要运用了简单的流延成膜和浇铸成膜法,制备过程中CA的挥发问题较严重,因此工艺方法需要有所改进;目前国内外研究者对CA复合材料的研究还不够深入,与CA复合的物质种类不多,多数还处于试验阶段;对CA的研究更多集中在催化加氢制备肉桂醇<sup>[36-37]</sup>以及研究单一CA在细胞工程中的应用上<sup>[38-39]</sup>。

## 5 结语

目前制备CA复合材料主要采用的是流延成膜法、浇铸成膜法和静电纺丝法。前2种方法所制备的材料主要应用在食品包装领域,利用CA的抑菌抗氧化作用使食品保质期得到延长;后一种方法制备的材料则因其具有较大的比表面积的特点,使其在医学上有着较好的应用潜力。为了减少CA在纺丝过程中的挥发,一般将其制备成包合物后再与其他物质复合,以期最大限度地发挥其作用。与CA复合的物质主要为CS, SPI, PLA, 海藻酸钠和淀粉。CS或海藻酸钠与CA的复合材料主要是研究其抗菌作用,从而考察其在食品包装上的应用;SPI或淀粉与CA的复合材料在具有较好的抗菌性之外还兼具较好的力学性能。总的来说,CA复合材料因结合了其他物质的优点,应用范围更广,未来关于CA复合材料的研究将越来越多,更多的新型CA复合材料将不断被研发出来。

## 参考文献:

- [1] 阮海燕, 肖霄. 肉桂醛的应用[J]. 牙膏工业, 2006(2): 32—33.  
RUAN Hai-yan, XIAO Xiao. Application of Cinnamaldehyde[J]. Toothpaste Industry, 2006(2): 32—33.
- [2] RAEISI M, TAJIK H, YARAHMADI A, et al. Antimicrobial Effect of Cinnamon Essential Oil Against Escherichia Coli and Staphylococcus Aureus[J]. Health Scope, 2015, 4(4): 1—5.
- [3] 王新伟, 崔言开, 田双起, 等. 牛至油、香芹酚、柠檬醛和肉桂醛的抗氧化性能研究[J]. 食品工业科技, 2013, 34(14): 311—313.  
WANG Xin-wei, CUI Yan-kai, TIAN Shuang-qi, et al. Antioxidant Activities of Oregano Oil, Carvacrol, Citral and Cinnamaldehyde[J]. Science and Technology of Food Industry, 2013, 34(14): 311—313.
- [4] 付振喜. 丁香等天然物质的抑菌成分在果蔬保鲜中的应用研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2010.  
FU Zhen-xi. Study on the Effects of Postharvest Treatment with Cloves and Other Kinds of Antibacterial Ingredients on Fruits and Vegetables[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2010.
- [5] CHAO L K, HUA K F, HSU H Y, et al. Cinnamaldehyde Inhibits Pro-inflammatory Cytokines Secretion from Monocytes/Macrophages through Suppression of Intracellular Signaling[J]. Food & Chemical Toxicology, 2008, 46(1): 220—231.
- [6] QIN Y, LIU D, WU Y, et al. Effect of PLA/PCL/ Cinnamaldehyde Antimicrobial Packaging on Physicochemical and Microbial Quality of Button Mushroom (*Agaricus Bisporus*)[J]. Postharvest Biology & Technology, 2015, 99(3): 73—79.
- [7] LIAO B C, HSIEH C W, LIU Y C, et al. Cinnamaldehyde Inhibits the Tumor Necrosis Factor- $\alpha$ -induced Expression of Cell Adhesion Molecules in Endothelial Cells by Suppressing NF- $\kappa$ B Activation: Effects upon I $\kappa$ B and Nrf2[J]. Toxicology & Applied Pharmacology, 2008, 229(2): 161—171.
- [8] 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(3): 561—568.
- [9] HAN C, WANG J, LI Y, et al. Antimicrobial-coated Polypropylene Films with Polyvinyl Alcohol in Packaging of Fresh Beef[J]. Meat Science, 2014, 96(2): 901—907.
- [10] 戴向荣, 蒋立科, 罗曼. 肉桂醛抑制黄曲霉机理初探[J]. 食品科学, 2008, 29(1): 36—40.  
DAI Xiang-rong, JIANG Li-ke, LUO Man. Preliminary Study of Cinnamaldehyde Inhibition on *Aspergillus Flavus*[J]. Food science, 2008, 29(1): 36—40.
- [11] SHEN S, ZHANG T, YUAN Y, et al. Effects of Cinnamaldehyde on *Escherichia Coli*, and *Staphylococcus Aureus*, Membrane[J]. Food Control, 2015, 47(7): 196—202.
- [12] 张文平, 傅颖媛, 谢小梅. 柠檬醛、肉桂醛抗曲霉菌作用机制研究[J]. 南昌大学学报, 2003, 43(6): 10—13.  
ZHANG Wen-ping, FU Ying-yuan, XIE Xiao-mei. Study on Antifungal Mechanism of Cinnamaldehyde and Citral in *Aspergilli*[J]. Journal of Nanchang University, 2003, 43(6): 10—13.
- [13] 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 & Technology, 2016(3): 29—39.
- [14] 马中苏, 隋思瑶, 张宁, 等. 肉桂醛浓度对浓缩乳清蛋白/壳聚糖复合膜性能的影响[J]. 现代食品科技, 2015(2): 113—118.  
MA Zhong-su, SUI Si-yao, ZHANG Ning, et al. Effects of Concentration of Cinnamaldehyde on the Properties of Concentrated Whey Protein/Chitosan Composite Film[J]. Modern Food Science and Technology, 2015(2): 113—118.
- [15] 曾少甫, 胡长鹰, 刘婧. 壳聚糖-肉桂醛复合抗菌降解膜的制备及性能[J]. 食品科学, 2016(10): 6—11.  
ZENG Shao-fu, HU Chang-ying, LIU Jing. Preparation and Properties of Chitosan-Cinnamaldehyde Biodegradable Antibacterial Composite Films[J]. Food Science, 2016(10): 6—11.
- [16] OTONI C G, AVENA-BUSTILLOS R J, OLSEN C W, et al. Mechanical and Water Barrier Properties of Isolated Soy Protein Composite Edible Films as Affected by Carvacrol and Cinnamaldehyde Micro and Nanoemulsions[J]. Food Hydrocolloids, 2016(7): 72—79.
- [17] 张彬, 江娟. 肉桂醛-大豆分离蛋白可食膜的抑菌及其对冷鲜猪肉的保鲜[J]. 食品科学, 2011(1): 106—112.  
ZHANG Bin, JIANG Juan. The Antimicrobial Activity of Soybean Protein Isolate and Its Effect on the Preservation of Chilled Pork[J]. Food Science, 2011(1): 106—112.
- [18] 王卉, 孙宏元, 何节玉, 等. 羧甲基纤维素钠纳米抗菌复合膜的制备及其性能研究[J]. 食品工业科技, 2016, 37(5): 277—280.  
WANG Hui, SUN Hong-yuan, HE Jie-yu, et al. Preparation and Properties of Sodium Carboxymethyl Cellulose (CMC Na)[J]. Food Industry Science and Technology, 2016, 37(5): 277—280.
- [19] ZHANG Y, MA Q, CRITZER F, et al. Physical and Antibacterial Properties of Alginate Films Containing Cinnamon Bark Oil and Soybean Oil[J]. Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie, 2015, 29(1): 4428—4435.
- [20] YUE Z, MA Q, CRITZER F, et al. Effect of Alginate Coatings with Cinnamon Bark Oil and Soybean Oil on Quality and Microbiological Safety of Cantaloupe[J]. International Journal of Food Microbiology, 2015(5): 25—30.
- [21] ARANCIBIA M, GIMENEZ B, LOPEZ-CABALLERO

- M E, et al. Release of Cinnamon Essential Oil from Polysaccharide Bilayer Films and Its Use for Microbial Growth Inhibition in Chilled Shrimps[J]. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie*, 2014, 59(2): 989—995.
- [22] SOUZA A C D, DIAS A M A, SOUSA H C, et al. Impregnation of Cinnamaldehyde into Cassava Starch Biocomposite Films Using Supercritical Fluid Technology for the Development of Food Active Packaging[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2014, 102(4): 830—837.
- [23] SOUZA A C, GOTO G E O, MAINARDI J A, et al. Cassava Starch Composite Films Incorporated with Cinnamon Essential Oil: Antimicrobial Activity, Microstructure, Mechanical and Barrier Properties[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2013, 54(2): 346—352.
- [24] SONG N B, SONG H Y, JO W S, et al. Physical Properties of a Composite Film Containing Sunflower Seed Meal Protein and Its Application in Packaging Smoked Duck Meat[J]. *Journal of Food Engineering*, 2013, 116(4): 789—795.
- [25] OTONI C G, MOURA M R D, AOUADA F A, et al. Antimicrobial and Physical-Mechanical Properties of Pectin/Papaya Puree/Cinnamaldehyde Nanoemulsion Edible Composite Films[J]. *Food Hydrocolloids*, 2014, 41(1): 188—194.
- [26] KIM Y J, CHANG H A, LEE M B, et al. Characteristics of Electrospun PVDF/SiO<sub>2</sub> Composite Nanofiber Membranes as Polymer Electrolyte[J]. *Materials Chemistry & Physics*, 2011, 127(1): 137—142.
- [27] BURKE L, MORTIMER C J, CURTIS D J, et al. In-situ Synthesis of Magnetic Iron-oxide Nanoparticle-Nanofiber Composites Using Electrospinning[J]. *Materials Science & Engineering C*, 2016(7): 512—519.
- [28] YAMAUCHI N, TAKAMURA K, SHIGYO M, et al. Control of Degreening in Postharvest Green Sour Citrus Fruit by Electrostatic Atomized Water Particles[J]. *Food Chemistry*, 2014, 156(11): 160—164.
- [29] 刘俊渤, 李林建, 唐珊珊, 等. 静电纺丝制备肉桂醛/聚乳酸复合纳米纤维膜及其性能[J]. *高分子材料科学与工程*, 2015(3): 173—178.
- LIU Jun-bo, LI Lin-jian, TANG Shan-shan, et al. Preparation of Composite Nano Fiber Membrane and Its Properties by Electrostatic Spinning[J]. *Polymer Materials Science and Engineering*, 2015(3): 173—178.
- [30] 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(3): 561—568.
- [31] RIEGER K A, BIRCH N P, SCHIFFMAN J D. Electrospinning Chitosan/Poly(Ethylene Oxide) Solutions with Essential Oils: Correlating Solution Rheology to Nanofiber Formation[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2015(9): 131—138.
- [32] HU J, WANG X, XIAO Z, et al. Effect of Chitosan Nanoparticles Loaded with Cinnamon Essential Oil on the Quality of Chilled Pork[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2015, 63(1): 519—526.
- [33] CARMEN G, MOREIRA R G, CASTELL-PEREZ E. Poly (DL-Lactide-co-glycolide) (PLGA) Nanoparticles with Entrapped Trans-Cinnamaldehyde and Eugenol for Antimicrobial Delivery Applications[J]. *Journal of Food Science*, 2011, 76(2): 16—24.
- [34] 吴艳, 程春生, 覃宇悦, 等. 肉桂醛聚乳酸复合膜对苹果保鲜的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2014, 40(9): 215—218.
- WU Yan, CHENG Chun-sheng, QIN Yu-yue, et al. Effects of Compound Film of Cinnamon Aldehyde on Preservation of Apple[J]. *Food and Fermentation Industry*, 2014, 40(9): 215—218.
- [35] WEN P, ZHU D H, FENG K, et al. Fabrication of Electrospun Poly(lactic Acid Nanofilm Incorporating Cinnamon Essential Oil/ $\beta$ -cyclodextrin Inclusion Complex for Antimicrobial Packaging[J]. *Food Chemistry*, 2016(6): 996—1004.
- [36] ZHAO B H, CHEN J G, LIU X, et al. Selective Hydrogenation of Cinnamaldehyde over Pt and Pd Supported on Multiwalled Carbon Nanotubes in a CO<sub>2</sub>-Expanded Alcoholic Medium[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2012, 51(4): 12—21.
- [37] LIU Z T, WANG C X, LIU Z W, Et al. Selective Hydrogenation of Cinnamaldehyde over Pt-supported Multi-walled Carbon Nanotubes: Insights into the Tube-size Effects[J]. *Applied Catalysis A General*, 2008, 344(1): 114—123.
- [38] DOMADIA P, SWARUP S, BHUNIA A, et al. Inhibition of Bacterial Cell Division Protein FtsZ by Cinnamaldehyde[J]. *Biochemical Pharmacology*, 2007, 74(6): 831—840.
- [39] IWAOKA Y, HASHIMOTO R, KOIZUMI H, et al. Selective Stimulation by Cinnamaldehyde of Progesterone Secretion in Human Adrenal Cells[J]. *Life Sciences*, 2010, 86(23): 894—898.