

新材料技术

添加纳米氧化锌和植物精油的生物基膜研究进展

方丹丹¹, 王利强^{1,2}

(1.江南大学, 无锡 214122; 2.江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 无锡 214122)

摘要: **目的** 综述近几年国内外以生物质材料为基材, 利用纳米氧化锌和植物精油制备的复合抗菌包装膜的研究成果。**方法** 通过对国内外研究现状和研究成果的分析和总结, 分别阐述纳米氧化锌和植物精油等 2 类抗菌剂的添加对天然生物质膜力学性能、阻隔性和抗菌性等方面的影响, 着重叙述三者之间的协同作用, 并对三者之间的相互作用机理进行探讨。**结果** 纳米氧化锌和植物精油都是优良的天然抗菌剂, 两者的结合不仅能改变基材的力学性能、阻隔性能, 还具有优良的抗菌性。**结论** 以生物质材料为基材, 利用纳米氧化锌和植物精油制备的复合抗菌包装膜具有绿色环保、无毒无害、性能优良等优点, 发展潜力较大。

关键词: 生物基膜; 纳米氧化锌; 植物精油; 协同作用; 力学性能; 阻隔性能

中图分类号: TS206.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)15-0044-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.15.007

Advance of Biomass Films Added with Zinc Oxide Nanoparticles and Plant Essential Oil

FANG Dan-dan¹, WANG Li-qiang^{1,2}

(1.Jiangnan University, Wuxi 214122, China;

2.Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment & Technology, Wuxi 214122, China)

ABSTRACT: The work aims to review the research results of composite antimicrobial packaging films prepared by zinc oxide nanoparticles and plant essential oil at home and abroad in recent years, with biomass material as the substrate. Through analyzing and summarizing research status and research results at home and abroad, the effects of the addition of two antibacterial agents (zinc oxide nanoparticles and plant essential oils) on the mechanical properties, barrier properties and antibacterial properties of natural biomass films were respectively described. The synergy among these properties was emphatically described and the interaction mechanism among them was discussed. Zinc oxide nanoparticles and plant essential oils were excellent natural antibacterial agents. Their combination could not only change the mechanical and barrier properties of the substrate, but also have excellent antibacterial properties. With biomass material as the substrate, the composite antibacterial packaging film prepared by zinc oxide nanoparticles and plant essential oil is green, environmentally friendly, non-toxic and harmless, with excellent performance and great development potential.

KEY WORDS: biomass film; zinc oxide nanoparticles; plant essential oil; synergy; mechanical properties; barrier properties

据统计, 因细菌引发的食品污染问题已经严重危害全球人们的健康^[1]。同时, 合成材料引起的不可降解、消耗资源、毒性迁移等问题使人们越来越关注可降解、绿色以及可用于食品行业的生物质材料^[2]。目前, 多糖、蛋白质、脂类等天然生物材料已被广泛用于开发可食膜^[3]。同时, 在生物质材料中添加各类添加剂, 抗菌剂、抗氧化剂、抗真菌剂等能够在很大程

度上提高产品质量, 延长产品的货架期^[4]。随着纳米增强材料的发展, 添加纳米材料的功能性生物基材引起了研究人员的关注, 利用纳米氧化锌的纳米级材料具有分散能力好、环保、价格低廉、比表面积大、表面能高等特点, 可以将纳米氧化锌很好地分散在基膜中^[5]。纳米氧化锌不仅可以改善基材的力学性能, 还具有良好的抗菌性能。纳米氧化锌是最早用于抗菌的

收稿日期: 2018-03-14

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金 (JUSRP21115)

作者简介: 方丹丹 (1991—), 女, 江南大学硕士生, 主攻食品包装技术。

通信作者: 王利强 (1977—), 男, 博士, 江南大学副教授、硕导, 主要研究方向为食品包装技术。

金属氧化物, 由于纳米氧化锌具有较好的安全性和稳定性, 食品管理局和药物管理局已将其列为安全材料行列^[6], 且其对革兰氏阴性菌、革兰氏阳性菌均有很好的抑制作用^[7]。精油是从植物体内提取的由不同化学成分组成的次代谢产物, 植物精油具有绿色环保、安全无毒等优点, 是广谱抗菌活性抗菌剂的代表, 能够有效抑制细菌、真菌和病毒^[8], 国内外学者均对其进行了大量的研究。研究表明, 植物精油和纳米氧化锌在抗菌方面会产生协同作用^[9]。目前, 以天然高分子为基材, 通过添加植物精油和纳米氧化锌制备复合抗菌材料是当前抗菌包装的研究热点。

1 纳米氧化锌和植物精油的抗菌机理研究进展

1.1 纳米氧化锌的抗菌机理

目前关于纳米氧化锌抗菌机理的研究主要有以下几方面。

1.1.1 光催化机理

纳米氧化锌在外界光线等的照射下, 当得到的辐射能大于 1 个能带宽度时, 电子会发生跃迁, 产生带负电的高活性的光生电子, 同时会产生带正电的光生空穴。光生空穴会与空气接触, 诱导其产生活性氧, 活性氧会和微生物的多种有机物发生氧化反应, 使构成细菌本身的有机物遭到破坏, 造成细菌死亡^[10]。Sapkota 等^[11]分别在光照和无光条件下研究纳米氧化锌对大肠杆菌和枯草芽孢杆菌的抑制作用, 结果发现光照作用会使菌种细胞膜发生破裂, 导致细菌死亡。

1.1.2 金属离子溶出机理

在溶液状态下, 纳米氧化锌会析出锌离子, 锌离子的正电荷与细菌表面的负电荷之间由于电荷之间的相互作用会产生库仑力, 使锌离子吸附到细菌细胞表面, 使细菌细胞壁受损。当锌离子穿过细菌细胞壁后并在细菌体内聚集时, 与细菌内容物发生化学反应或是使其内容物释放出来, 使其生长活动受到抑制, 或是直接引发细菌死亡^[12]。Brayner 等^[13]发现纳米氧化锌可以吸附到大肠杆菌细胞壁表面, 进而破坏其细胞壁结构, 使细菌细胞内容物释放, 导致细菌死亡。此过程结束后, 纳米氧化锌的抗菌活性不会发生变化, 会继续进行杀菌活动。项荣等^[14]使用 10 倍于纳米氧化锌浓度的氯化锌溶液对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌进行实验, 发现抗菌效果不明显, 由此推断出锌离子的溶出抗菌机制可能不是氧化锌抗菌的主要机制, 只是一种辅助效应。

1.1.3 活性氧抗菌机理

20 世纪 90 年代, Sawai 课题组检测氧化锌的浆

液时检测到过氧化氢的存在, 并由此推断纳米氧化锌的主要活性抗菌物质是过氧化氢^[15]。在溶液状态下, 纳米氧化锌会激发产生活性羟基, 进而会生成过氧化氢, 过氧化氢是一种强效氧化剂, 该氧化剂作用于细菌细胞膜会造成细菌细胞膜损伤, 进而使细菌生长受到抑制或是直接引起细胞死亡^[16]。同时有研究表明, 氢过氧化物、过氧化氢、氧负离子、羟基自由基等活性氧自由基也是纳米氧化锌抗菌作用的活性物质^[17]。曲敏丽和姜万超^[18]在探讨纳米氧化锌抗菌机理时发现, 纳米氧化锌对金黄色葡萄球菌和大肠杆菌的抑制作用是光催化机理和金属离子溶出机理共同作用的结果, 由此推断出纳米氧化锌的抗菌活性是不同机理共同作用的结果, 而深入的机制探究及何种机制占据主要地位还需要进一步研究证实。

1.2 植物精油的抗菌机理

植物精油按照其化学成分可分为萜烯族、芳香族、脂肪族及含硫含氮化合物等 4 类, 其中萜烯类是精油的主要成分。Hammer 等^[19]研究了 52 种植物精油对细菌和真菌的抑制作用, 发现柠檬草、牛至和月桂精油具有很强的抗菌活性。Valero 和 Salmeron^[20]对丁香、肉桂、百里香、迷迭香等 11 种比较常见的植物精油进行了研究, 发现这 11 种植物精油对于食源性致病菌蜡样芽孢杆菌的生长均起到了抑制作用, 且肉桂精油对该菌的抑制作用最明显。李玉邯等^[21]将酱牛肉浸渍在不同浓度的百里香精油中, 结果发现浸渍了百里香精油的酱牛肉的菌落数明显小于对照组, 表明百里香精油对微生物的生长和繁殖具有很好的抑制作用。张有林等^[22]研究表明, 百里香精油对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、酵母菌等菌种有很好的抑制效果。

目前, 对于植物精油的抗菌机理, 提出最多的一种作用机制是植物精油作用到细菌细胞膜上, 导致细菌细胞膜的渗透性增加, 使细菌细胞质外漏, 从而造成细菌死亡^[23]。例如罗勒精油及其主要成分, 尤其是芳樟醇(单萜类化合物)可穿透细菌的细胞壁并攻击细胞膜上的磷脂双分子层, 导致细胞质渗漏增加^[24]。另外有研究表明, 植物精油可以破坏细菌的细胞壁, 使其降解。例如, 罗勒精油可以作用于细菌细胞壁上的酶, 影响其代谢水平^[25]。

2 添加纳米氧化锌和植物精油的生物基膜的研究进展

2.1 生物基材、纳米氧化锌与植物精油的协同抗菌作用机理

天然生物物质包装基材主要有多糖类、蛋白质类、脂类以及它们的复合体系。常用于食品包装的是蛋白

类和多糖类材料,这2种材料的成膜性好,制备的膜表面均匀,透明性好^[26],但其大多数本身不具备抗菌性能,不宜直接用于食品包装。纳米氧化锌和植物精油的添加可以提高基材的抗菌性,且三者在抗菌方面会产生协同作用。

2.1.1 纳米氧化锌和基材的协同抗菌作用机理

纳米颗粒作为无机填料应用于生物基膜中可以提高生物基膜的力学性能、热稳定性、阻隔性和抗菌性^[27]。在诸多的无机填料中,由于纳米氧化锌粒子的尺寸小、比表面积大且表面能较高,通过超声分散作用,纳米氧化锌在基膜中具有很强的纳米分散能力,且与基材界面的相互作用很强^[28—29]。纳米氧化锌作为功能性填料对食源性致病菌和腐败菌具有很好的抑制作用^[30]。大多数生物质材料本身不具备抗菌性能,或是具有一定的抗菌性,但其抗菌范围比较窄,通过添加抗菌剂可以实现广谱的抗菌效果。壳聚糖本身具有抗菌性能,但其抗菌方式是非溶出的,只对接触的细菌发挥作用。纳米氧化锌的抗菌方式是溶出型的,其本身可以游离出锌离子,对周围的细菌可以产生抑制效果。将纳米氧化锌添加到壳聚糖基材中制备的纳米复合材料的抗菌性能会更加优异^[12]。

2.1.2 植物精油和基材的协同抗菌作用机理

植物精油对细菌、霉菌的抗菌效果很好,但其本身具有一定的挥发性,其抗菌时间较短,抗菌效果不稳定,且直接将植物精油作用于食品时,其本身的风味也会影响食品的感官品质。将植物精油和生物质基材结合起来,两者会产生协同作用。生物质基材在一定程度上可以降低植物精油的挥发速度,实现缓慢释放的效果^[26]。由此可见,植物精油的添加可以赋予基材更广谱的抗菌性能,从而达到延长食品货架期的目的。例如,将植物精油添加到壳聚糖膜中,植物精油可以弥补壳聚糖对霉菌抑制作用较小的缺陷,同时,壳聚糖膜可以实现对植物精油的缓慢释放或是控制释放的作用^[31]。

2.1.3 植物精油和纳米氧化锌的协同抗菌作用机理

植物精油和纳米氧化锌的协同抗菌作用主要表现在结合两者材料的产品货架期、菌落总数、最小抑菌浓度均比对照组的效果要好。Arfat等^[32]制备的鱼蛋白/鱼皮明胶-纳米氧化锌-罗勒叶精油纳米复合膜用于提高海鲈鱼片的货架期,结果发现整个储存过程中,纳米氧化锌和罗勒精油的添加使鲈鱼片的总菌落数都比对照组的数量少。RADULESCU等^[33]基于纳米氧化锌和甜橙油制备的生物涂层对于金黄色葡萄球菌的最小抑菌浓度比只添加纳米氧化锌的值要小,且该值远小于氯霉素,表明纳米氧化锌和甜橙油之间会产生协同抗菌作用。

2.2 纳米氧化锌和植物精油对基材综合性能影响的研究进展

2.2.1 力学性能

膜的力学性能受到制膜条件、成膜基质、膜组分间相互作用等因素的影响。纳米氧化锌在基膜中分散性好的情况下,纳米氧化锌的加入会使基膜拉伸强度上升,断裂伸长率下降,这主要是由于纳米氧化锌分散在基材分子之间的间隙中,使膜的致密性得到提高。同时,由于纳米氧化锌表面能较高,使和基材分子链段之间的作用力得到增强,改善了基膜的力学性能^[34]。Das等^[35]利用纳米氧化锌和壳聚糖制备了纳米复合材料,发现当氧化锌质量分数为4%时,膜的拉伸强度急剧上升,膜的断裂伸长率下降。

精油的添加一般会降低膜的拉伸强度。精油的疏水性成分会使基膜的成分之间变得不连续,出现相分离的现象^[36]。Zhang等^[37]将生姜油添加到明胶中,发现复合膜拉伸强度降低,断裂伸长率提高。精油和基材成分之间存在弱相互作用,两者的结合会加剧膜的不均匀性和不连续性,结果会使膜变得更加柔软。同时,也有学者发现不同的实验结果。Sanuja等^[38]发现印楝油的添加使壳聚糖膜的拉伸强度和断裂伸长率得到提高,纳米氧化锌和印楝油的生物活性基团以及壳聚糖的官能团之间的相互作用力很强,使膜的拉伸强度得到提高。膜的断裂伸长率提高的原因是精油的添加降低了膜的脆性,使膜变得更加柔软。Abdollahi等^[31]将迷迭香精油添加到壳聚糖基膜中,发现迷迭香精油的添加使壳聚糖基膜的拉伸强度和断裂伸长率分别上升了7%和40%,拉伸强度变化不明显主要有2个方面的原因:迷迭香精油的功能基团和壳聚糖基材的羟基以及氨基之间的相互作用会增加分子间作用力,会使基膜的拉伸强度增加;迷迭香精油的添加会使壳聚糖基膜产生裂纹,会使基膜的拉伸强度降低。断裂伸长率增加是由于裂纹的产生使膜中水分含量也增加,迷迭香精油在基膜中充当增塑剂的作用,使膜变得更加柔软。

2.2.2 水蒸气透过率

水蒸气透过率是食品包装行业产品货架期和产品质量的重要因素之一。水蒸气透过率揭示了食品通过复合膜和产品内部以及外部环境之间的相互作用^[39]。一般情况下,由于植物精油的疏水性会使膜的水蒸气透过率下降。Zhang等^[37]利用罗非鱼皮明胶、纳米氧化锌和不同浓度的生姜油制备了纳米复合膜,随着生姜油浓度的增加,膜的水蒸气透过率降低。一方面是由于植物精油中的小的脂质分子分散在基膜中,使膜内部变得不连续,增加了水分传输过程中的曲折系数。另一方面是由于植物精油的功能基团和基材的官能团会发生相互作用,减少了氢键数目,增加了膜的

疏水性^[38]。同时, 研究人员发现了相反的结果, Abdollahi 等^[31]发现添加体积分数为 0.5% 的迷迭香精油使壳聚糖膜的水蒸气透过率提高了 14%, 主要是 REO 的添加会使基膜产生裂纹, 从而使基膜中水分占有的空间相对增大。Arfat 等^[40]利用鱼蛋白/鱼皮明胶、纳米氧化锌和罗勒精油制备了纳米复合膜, 发现添加质量分数为 3% 纳米氧化锌的复合膜的水蒸气透过率明显下降, 一方面是由于纳米氧化锌的疏水特性, 另一方面是由于可以很好地分散在基膜中, 使水分的扩散路线变得曲折。

2.2.3 抗氧化性

抗氧化性是食品(特别是肉类)包装材料的重要指标。纳米氧化锌对生物基膜的抗氧化性主要是由于纳米氧化锌在聚合物基材中的高分散性降低了气体和水分的传输^[28,36], 间接降低了食品的氧化速率。精油的抗氧化活性归因于其氧化还原性能, 植物精油可以清除各种活性物质, 如超氧化物、羟基、过氧化氢自由基、次氯酸和过氧化物分解产物等^[41]。刘洋洋等^[42]对迷迭香、薰衣草、降香和草豆蔻等 4 种植物精油的抗氧化性进行了比较分析, 根据 FRAP 值得出 4 种精油的抗氧化能力依次为迷迭香>薰衣草>草豆蔻>降香。4 种植物精油均可以清除 DPPH 自由基。李述日等^[43]以丁香酚、肉桂醛、百里香酚、香兰素、茴香脑、水杨醛、柠檬醛、苯甲醛、大茴香醛等 9 种精油为研究对象, 结果发现丁香酚、百里香酚、大茴香醛、柠檬醛等 4 种精油对花生油的抗氧化水平比较突出, 且 4 种抗氧化能力的强弱顺序为丁香酚>百里香酚>大茴香醛>柠檬醛。丁香酚的结构更利于酚羟基提供氢原子和形成丁香酚自由基的稳定化, 阻止丁香酚自由基攻击脂类分子, 因此丁香酚具有优越的抗氧化性。

2.3 添加纳米氧化锌和植物精油生物基膜的应用前景

纳米复合抗菌材料已成为材料学方面研究的热点, 是当今具有发展潜力的材料之一。功能的多样化、纳米化、综合化是抗菌包装材料的发展趋势。功能化的多样化是抗菌方式的多样化。纳米化是指将纳米材料添加到基材中。综合化是指抗菌剂的加入在提高抗菌性能的同时可以实现力学性能、阻隔性能、抗氧化性等的提高。由于纳米氧化锌和植物精油具有良好的性能, 添加纳米氧化锌和植物精油制备的纳米复合材料会越来越多地运用于新鲜肉类、蔬菜以及水果等包装产品, 同时, 此类材料的环保可降解性对于实现包装行业的可持续化发展具有重大的意义。

3 结语

国内外研究表明, 添加纳米氧化锌和植物精油制

备的生物基膜可以运用在包装行业, 然而对将纳米氧化锌和植物精油等 2 种天然抗菌剂添加到生物基材的研究有限, 国内外对此方面的研究仅限于几种材料。现有研究对于植物精油在抗菌过程中的动态规律和纳米材料与基材之间的相容性还不太完善, 且对生物基膜、纳米氧化锌和植物精油之间的协同作用机理还存在不足。随着人们对于健康和环保的追求, 以生物基材料为基材通过添加纳米氧化锌和植物精油来实现抗菌功能的复合材料将具有广大的市场。

参考文献:

- [1] TANKEO S B, LACMATA S T, NOUMEDEM J A K. Antibacterial and Antibiotic-potential Activities of some Cameroonian Food Plants Against Multi-drug Resistant Gram-negative Bacteria[J]. Chinese Journal of Integrative Medicine, 2014, 20(7): 546—554.
- [2] 赵艳云, 连紫璇, 岳进. 食品包装的最新研究进展[J]. 中国食品学报, 2013, 13(4): 1—10.
ZHAO Yan-yun, LIAN Zi-xuan, YUE Jin. The Latest Research Progress in Food Packaging[J]. Chinese Journal of Food Science, 2013, 13(4): 1—10.
- [3] FITCHVARGAS P R, AGUILARPALAZUELOS E, ZAZUETAMORALES J J, et al. Physicochemical and Microstructural Characterization of Corn Starch Edible Films Obtained by a Combination of Extrusion Technology and Casting Technique[J]. Journal of Food Science, 2016, 81(9): 24—32.
- [4] NAGARAJAN M, BENJAKUL S, PRODPRAN T, et al. Effects of Bio-nanocomposite Films from Tilapia and Squid Skin Gelatins Incorporated with Ethanol Extract from Coconut Husk on Storage Stability of Mackerel Meat Powder[J]. Food Packaging & Shelf Life, 2015, 6: 42—52.
- [5] UMAMAHESWARI G, SANUJA S, JOHN V A, et al. Preparation, Characterization and Anti-bacterial Activity of Zinc Oxide-gelatin Nanocomposite Film for Food Packaging Applications[J]. Polymers & Polymer Composites, 2015, 23(3): 199—204.
- [6] ESPITIA P J, SOARES N F, TEÓFILO R F, et al. Physical-mechanical and Antimicrobial Properties of Nanocomposite Films with Pediocin and ZnO Nanoparticles[J]. Carbohydrate Polymers, 2013, 94(1): 199—208.
- [7] MIRHOSSEINI M, FIROUZABADI F B. Antibacterial Activity of Zinc Oxide Nanoparticle Suspensions on Food-borne Pathogens[J]. International Journal of Dairy Technology, 2013, 66(2): 291—295.
- [8] CEYLAN E, FUNG D Y C. Antimicrobial Activity of Spices[J]. Journal of Rapid Methods & Automation in Microbiology, 2004, 12(1): 1—55.
- [9] SANUJA S, AGALYA A, UMAPATHY M J. Synthesis and Characterization of Zinc Oxide-neem Oil-chitosan

- Bionanocomposite for Food Packaging Application[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2015, 74: 76—84.
- [10] AKBAR A, ANAL A K. Zinc Oxide Nanoparticles Loaded Active Packaging, a Challenge Study Against *Salmonella Typhimurium* and *Staphylococcus Aureus*, in Ready-to-eat Poultry Meat[J]. *Food Control*, 2014, 38(4): 88—95.
- [11] SAPKOTA A, ANCENO A J, BARUAH S, et al. Zinc Oxide Nanorod Mediated Visible Light Photo Inactivation of Model Microbes in Water[J]. *Nanotechnology*, 2011, 22(21): 215703—215709.
- [12] 毛星超. 壳聚糖与纳米氧化锌复合材料在抗菌包装中的应用[J]. *印刷杂志*, 2017(7): 54—56.
MAO Xing-chao. Application of Chitosan and Nano-Zinc Oxide Composites in Antibacterial Packaging[J]. *Journal of Printing*, 2017(7): 54—56.
- [13] BRAYNER R, FERRARILLIOU R, BRIVOIS N, et al. Toxicological Impact Studies Based on *Escherichia Coli* Bacteria in Ultrafine ZnO Nanoparticles Colloidal Medium[J]. *Nano Letters*, 2006, 6(4): 866.
- [14] 项荣, 丁栋博, 范亮亮, 等. 氧化锌的抗菌机制及其安全性研究进展[J]. *中国组织工程研究*, 2014, 18(3): 470—475.
XIANG Rong, DING Dong-bo, FAN Liang-liang, et al. Research Progress of Antibacterial Mechanism and Safety of Zinc Oxide[J]. *Chinese Journal of Tissue Engineering Research*, 2014, 18(3): 470—475.
- [15] SAWAI J, YAMAMOTO O, OZKAL B, et al. Antibacterial Activity of Carbon-coated Zinc Oxide Particles[J]. *Bio Control Science*, 2007, 12(1): 15—20.
- [16] TAYEL A A, ELTRAS W F, MOUSSA S, et al. Antibacterial Action of Zinc Oxide Nanoparticles Against Foodborne Pathogens[J]. *Journal of Food Safety*, 2011, 31(2): 211—218.
- [17] 况慧娟, 杨林, 许恒毅, 等. 纳米氧化锌抗菌性能及机制的研究进展[J]. *中国药理学与毒理学杂志*, 2015, 29(1): 153—157.
KUANG Hui-juan, YANG Lin, XU Heng-yi, et al. Research Progress of Antibacterial Properties and Mechanism of Nano Zinc Oxide[J]. *Chinese Journal of Pharmacology and Toxicology*, 2015, 29(1): 153—157.
- [18] 曲敏丽, 姜万超. 纳米氧化锌抗菌机理探讨[J]. *印染助剂*, 2004, 21(6): 45—46.
QU Min-li, JIANG Wan-chao. Antibacterial Mechanism of Zinc Oxide Nanoparticles[J]. *Auxiliary*, 2004, 21(6): 45—46.
- [19] HAMMER KA, CARSON CF, RILEY TV. Antimicrobial Activity of Essential Oils and Other Plant Extracts[J]. *Journal of Applied Microbiology*, 1999, 86(6): 985.
- [20] VALERO M, SALMERON M C. Antibacterial Activity of 11 Essential Oils Against *Bacillus Cereus* in Tantalized Carrot Broth[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2003, 85(1): 73—81.
- [21] 李玉邯, 杨柳, 张一, 等. 百里香精油对酱牛肉品质和抑菌抗氧化性能的研究[J]. *中国调味品*, 2017, 42(9): 36—39.
LI Yu-han, YANG Liu, ZHANG Yi, et al. Study on the Quality and Antibacterial and Antioxidative Properties of Thyme Essential Oil in Sauce Beef[J]. *Chinese Flavoring*, 2017, 42(9): 36—39.
- [22] 张有林, 张润光, 钟玉, 等. 百里香精油的化学成分、抑菌作用、抗氧化活性及毒理学特性[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(9): 1888—1897.
ZHANG You-lin, ZHANG Run-guang, ZHONG Yu, et al. Chemical Composition, Antibacterial Activity, Antioxidant Activity and Toxicological Properties of Thyme Essential Oil[J]. *Chinese Journal of Agricultural Sciences*, 2011, 44(9): 1888—1897.
- [23] 马超, 吴瑛. 抗菌剂抗菌机理简述[J]. *中国酿造*, 2016, 35(1): 5—9.
MA Chao, WU Ying. Antibacterial Agent Antibacterial Mechanism: a Brief Description[J]. *China Brewing*, 2016, 35(1): 5—9.
- [24] HUSSAIN A I, ANWAR F, HUSSAIN SHERAZI S T, et al. Chemical Composition, Antioxidant and Antimicrobial Activities of Basil (*Osmium Basilica*) Essential Oils Depends on Seasonal Variations[J]. *Food Chemistry*, 2008, 108(3): 986.
- [25] EMIROĞLU Z K, YEMIŞ G P, COŞKUN B K, et al. Antimicrobial Activity of Soy Edible Films Incorporated with Thyme and Oregano Essential Oils on Fresh Ground Beef Patties[J]. *Meat Science*, 2010, 86(2): 283—288.
- [26] 王利娜, 冷小京. 可食性抗菌膜的研究进展[J]. *食品科技*, 2011(10): 97—101.
WANG Li-na, LENG Xiao-jing. Research Progress of Edible Antibacterial Membrane[J]. *Food Science and Technology*, 2011(10): 97—101.
- [27] UMAMAHESWARI G, SANUJA S, JOHN V A, et al. Preparation, Characterization and Anti-Bacterial Activity of Zinc Oxide-gelatin Nanocomposite Film for Food Packaging Applications[J]. *Polymers & Polymer Composites*, 2015, 23(3): 199—204.
- [28] JALAL R, SHAHROM M, NIMA N, et al. Physical Properties of Fish Gelatin-based Bio-nanocomposite Films Incorporated with ZnO Nanorods[J]. *Nanoscale Research Letters*, 2013, 8(1): 364.
- [29] ALEBOOYEH R, MOHAMMADINAFCHI A, JOKR M. The Effects of ZnO Nanorods on the Characterization of Sago Starch Biodegradable Films[J]. *Journal of Chemical Health Risks*, 2013, 2(4): 71—85.
- [30] ESPITIA P J, SOARES N F, TEÓFILO R F, et al. Physical-mechanical and Antimicrobial Properties of Nanocomposite Films with Pitocin and ZnO Nanoparticles[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2013, 94(1): 199—208.
- [31] ABDOLLAHI M, REZAEI M, FARZI G. Improvement of Active Chitosan Film Properties with Rosemary Es-

- sential Oil for Food Packaging[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2012, 47(4): 847—853.
- [32] ARFAT Y A, BENJAKUL S, VONGKAMJAN K, et al. Shelf-life Extension of Refrigerated Sea Bass Slices Wrapped with Fish Protein Isolate/Fish Skin Gelatin-ZnO Nanocomposite Film Incorporated with Basil Leaf Essential Oil[J]. *Journal of Food Science & Technology*, 2015, 52(10): 6182—6193.
- [33] RADULESCU M. Antimicrobial Coatings Based on Zinc Oxide and Orange Oil for Improved Bioactive Wound Dressings and Other Applications[J]. *Rom J Morphol Embryos*, 2016, 57(1): 107—114.
- [34] 郑科旺, 付梅芳, 黄超凡, 等. 壳聚糖/淀粉/氧化锌复合膜的制备与性能[J]. *包装工程*, 2017, 38(13): 90—95. ZHENG Ke-wang, FU Mei-fang, HUANG Chao-fan, et al. Preparation and Properties of Chitosan/Starch/ ZnO Composite Membranes[J]. *Packaging Engineering*, 2017, 38(13): 90—95.
- [35] DAS K, MAITI S, LIU D. Morphological, Mechanical and Thermal Study of ZnO Nanoparticle Reinforced Chitosan Based Transparent Biocomposite Films[J]. *Journal of the Institution of Engineers*, 2014, 95(1): 35—41.
- [36] 刘彬, 陈国, 赵珺. 含精油可食性抗菌膜研究进展[J]. *食品科学*, 2014, 35(19): 285—289. LIU Bin, CHEN Guo, ZHAO Jun. Research Progress on Edible Antibacterial Film Containing Essential Oils[J]. *Food Science*, 2014, 35(19): 285—289.
- [37] ZHANG L, LIU A, WANG W, et al. Characterization of Microemulsion Nano Films Based on Tilapia Fish Skin Gelatin and ZnO Nanoparticles Incorporated with Ginger Essential Oil: Meat Packaging Application[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2017, 52(7): 1670—1679.
- [38] SANUJA S, AGALYA A, UMAPATHY M J. Synthesis and Characterization of Zinc Oxide-neem Oil-chitosan Bionanocomposite for Food Packaging Application[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2015, 74: 76—84.
- [39] SANUJA S, AGALYA A, UMAPATHY M J. Studies on Magnesium Oxide Reinforced Chitosan Bionanocomposite Incorporated with Clove Oil for Active Food Packaging Application[J]. *International Journal of Polymeric Materials & Polymeric Biomaterials*, 2014, 63(14): 733—740.
- [40] ARFAT Y A, BENJAKUL S, PRODPRAN T, et al. Properties and Antimicrobial Activity of Fish Protein Isolate/Fish Skin Gelatin Film Containing Basil Leaf Essential Oil and Zinc Oxide Nanoparticles[J]. *Food Hydrocolloids*, 2014, 41(20): 265—273.
- [41] AVS P, HETTIARACHCHY N S. Green Tea and Grape Seed Extracts-potential Applications in Food Safety and Quality[J]. *Food Research International*, 2011, 44(4): 827—839.
- [42] 刘洋洋, 陈德力, 何明军, 等. 4种芳香植物精油抗氧化能力比较研究[J]. *陕西中医*, 2014(4): 487—490. LIU Yang-yang, CHEN De-li, HE Ming-jun, et al. Comparative Study on Antioxidant Capacity of Four Aromatic Plant Essential Oils[J]. *Shanxi Journal of Traditional Chinese Medicine*, 2014(4): 487—490.
- [43] 李述日, 吴克刚, 柴向华, 等. 食用香料对花生油抗氧化作用的研究[J]. *食品工业科技*, 2009(3): 102—104. LI Shu-ri, WU Ke-gang, CHAI Xiang-hua, et al. Study on the Antioxidant Effect of Edible Spices on Peanut Oil[J]. *Food Industry Science and Technology*, 2009(3): 102—104.