

植物源生物保鲜剂对水产品微生物抑菌 机制研究进展

Research progress on bacteriostatic mechanism of plant derived bio-preservatives against the microbodies in the aquatic products

蓝蔚青^{1,2,3,4} 陈梦玲¹ 王蒙¹ 谢晶^{1,2,3,4}

LAN Wei-qing^{1,2,3,4} CHEN Meng-ling¹ WANG Meng¹ XIE Jing^{1,2,3,4}

(1. 上海海洋大学食品学院, 上海 201306; 2. 上海水产品加工及贮藏工程技术研究中心, 上海 201306;

3. 上海冷链装备性能与节能评价专业技术服务平台, 上海 201306;

4. 食品科学与工程国家级实验教学示范中心〔上海海洋大学〕, 上海 201306)

(1. Shanghai Ocean University College of Food Science and Technology, Shanghai 201306, China; 2. Shanghai Aquatic Products Processing and Storage Engineering Technology Research Center, Shanghai 201306, China;

3. Shanghai Professional Technology Service Platform on Cold Chain Equipment Performance and Energy Saving Evaluation, Shanghai 201306, China; 4. National Experimental Teaching Demonstration Center for Food Science and Engineering [Shanghai Ocean University], Shanghai 201306, China)

摘要:在对不同来源生物保鲜剂主要优缺点进行比较的基础上,对植物源保鲜剂分类予以说明,阐述其对水产品中主要微生物的作用机制,提出存在的问题与改进建议,并展望植物源生物保鲜剂在水产品保鲜中的应用前景。

关键词:植物源生物保鲜剂;水产品;微生物;抑菌机理

Abstract: Based on the advantages and disadvantages comparison in different sources of bio-preservatives, the classification of plant source bio-preservatives was described, and their bacteriostatic mechanism in aquatic products was introduced. Moreover, its existing problems and improvement suggestions were put forward, and the future development of plant derived bio-preservatives on the preservation of the aquatic products was also prospected.

Keywords: plant source bio-preservatives; aquatic products; microorganism; bacteriostatic mechanism

水产品是人类重要的优质蛋白源^[1]。但其组织脆弱、不

饱和脂肪酸易氧化,流通期间易在微生物与酶的作用下腐败变质^[2]。化学防腐剂虽能提供抑制微生物生长的环境条件或将其直接杀灭,但存在药物残留、安全性不高、使食品营养价值与感官品质下降等问题。近年来,生物保鲜剂以其来源广、成本低、安全无毒,仅需少量即可较好保持水产品的良好风味,延长其流通货架期,受到研究者的关注,并在水产品保鲜中得到应用^[3]。生物保鲜剂按其来源可分为植物源、动物源、微生物源与酶类保鲜剂4种^[4]。其主要优缺点见表1。

中国植物资源丰富,许多植物提取物的抗菌活性和安全性已经过多年实践得到证明。植物源保鲜剂按其成分可分为精油、多酚、多糖、醌类与生物碱类。部分植物源保鲜剂,如迷迭香提取物、竹叶抗氧化物与茶多酚可清除自由基且具有良好的抑菌性,已作为食品抗氧化剂应用于水产制品中^[10]。其中,房杰等^[11]研究得出根皮素可很好维持冷藏三文鱼的感官品质,降低生物胺的生成量,延长其货架期;张赟彬等^[12]将肉桂精油用于真空包装鲤鱼的冷藏保鲜,结果使处理组货架期比对照组延长了2 d。但目前关于植物源保鲜剂的抑菌机理尚不明确,其所含抑菌活性物质与靶向抑菌机制仍需进一步研究^[13]。本文在对不同来源生物保鲜剂主要优缺点比较的基础上,对植物源保鲜剂的分类予以说明,通过对植物源生物保鲜剂的抑菌机制进行阐述,提出其存在的问题及改进建议,并对植物源生物保鲜剂的未来发展趋势予以展望,以期植物源保鲜剂在水产品保鲜中的应用提供理论参考。

基金项目:农业部海水鱼产业体系(编号:CARS-47);2016年上海市科技兴农重点攻关项目[编号:沪农科攻字(2016)第1-1号];上海市科委平台能力建设项目(编号:16DZ2280300);上海市科委公共服务平台建设项目(编号:17DZ2293400)

作者简介:蓝蔚青,男,上海海洋大学高级工程师,博士。

通信作者:谢晶(1968—),女,上海海洋大学教授,博导,博士。

E-mail: jxie@shou.edu.cn

收稿日期:2018-05-06

表 1 不同来源生物保鲜剂的主要优缺点比较

Table 1 Comparison of the advantages and disadvantages from different sources in bio-preservatives

生物保鲜剂类型	主要代表物	优点	缺点
植物源	肉桂精油、竹叶精油、茶多酚 ^[5]	广谱抑菌性、安全,抗氧化能力强	对环境条件敏感、水溶性不佳,部分精油存在明显气味、其抑菌机理尚未明确
动物源	壳聚糖、鱼精蛋白	广谱抑菌性、溶解性好 ^[6] 、可食用、可降解、安全高效	溶解性与抑菌性易受综合因素影响、部分产品味苦,应用领域有限 ^[7]
微生物源	Nisin、聚赖氨酸、抗菌肽	水溶性与热稳定性好,易培养、适应性强、不受季节限制	专一抑菌性、微生物及其代谢产物的抑菌性易受周围环境的变化影响 ^[8]
酶类	溶菌酶、脂肪酶	广谱抑菌性、无毒无味,作用条件温和、作用效率高	价格昂贵,其实际应用尚未深入 ^[9]

1 植物源生物保鲜剂对水产品中微生物的作用

现有研究得出,植物源生物保鲜剂主要通过激发调动机体内在的抗菌积极因素、调节激发机体吞噬细胞系统^[14]、破坏微生物细胞壁、细胞膜的完整性与通透性、抑制其呼吸作用、影响其遗传物质(DNA),从而达到抑制或杀灭微生物的目的^[15]。

1.1 植物精油

植物精油是一类植物次生代谢产物,有广谱抑菌性,主要含有萜类与酚类化合物,酚类物质通过作用于细胞,改变细胞膜的通透性,释放出核酸、蛋白质、核糖等胞内物质,同时干扰膜的正常生理功能,最终使细胞死亡,植物精油的抑菌机理可能是一种或多种作用的结合,国内外对其研究现已深入到分子水平^[16-17]。美国 FDA 将植物精油认作“一般认为安全的物质(Generally recognized as safe, GRAS)”^[18]。

肉桂精油可赋予食物独特的气味,是一种天然的水产品保鲜剂,其抑菌成分主要为肉桂醛,含量高达 68.95%^[19-20]。Huang 等^[21]研究发现肉桂精油可将草鱼的货架期延长 4 d;抑菌靶位点在菌体细胞膜,能与 DNA 疏水结合;张赟彬等^[12]研究表明肉桂醛对金黄色葡萄球菌与大肠杆菌抑菌效果显著,其对 2 种菌的最小抑菌浓度(Minimal Inhibit Concentration, MIC)与最小杀菌浓度(Minimum bactericidal concentration, MBC)分别为 0.2, 0.5 $\mu\text{L/mL}$;2 种菌经 0.25 $\mu\text{L/mL}$ 肉桂醛处理后,菌体表面扭曲变形,出现凹陷,胞内核酸蛋白质分子外泄,离子稳态瓦解,同时膜电位降低,菌体正常代谢受阻,最终菌体死亡。Clemente 等^[22]发现肉桂精油对大肠杆菌的 MIC 为 200 $\mu\text{g/mL}$,其可穿过细胞壁与细胞内的蛋白质和羧基相互作用,使菌体形态改变,但低水溶性的特点限制了肉桂精油在食品工业中的应用。Jim 等^[23]用超声波与高压均质法来增强肉桂精油水溶性,结果使肉桂精油的抗氧化性增强,且对单增李斯特菌和大肠杆菌均显现强抑菌性。

竹叶精油是竹子的次生代谢产物,其主要成分是棕榈酸、植物醇、二十五烷。王媛媛等^[24]发现竹叶精油对枯草芽孢杆菌、金黄色葡萄球菌与大肠杆菌抑菌性好且稳定;经 2 MIC 竹叶精油处理的菌体表面粗糙,扭曲变形;随着作用时

间的延长,菌体细胞膜通透性被影响,核酸类物质外泄,可溶性蛋白含量减少,且对菌体脂肪酸含量有不同程度影响。Tyagi 等^[25]研究得出大肠杆菌经柠檬草精油作用后,菌体表面出现皱缩粗糙,菌体干瘪并伴有细胞质流出,表明柠檬草精油通过破坏菌体细胞膜抑制其生长。百里香为唇形科草本植物,百里香精油对金黄色葡萄球菌、枯草芽孢杆菌与大肠杆菌等均有抑菌活性,在 pH 值较低时抗菌性升高^[26]。Huang 等^[27]研究印度藏茴香精油对金黄色葡萄球菌有较好抑菌性,其主要抑菌成分为百里酚、对甲基异丙基苯和萜品烯;蒋慧亮等^[10]研究发现百里酚对腐败希瓦氏菌的抑菌效果显著,1 g/kg 的百里酚作用于腐败希瓦氏菌,能使胞内糖类物质与蛋白质分子外泄,膜通透性改变,磷脂双层被破坏,Lanbert 等^[28]也得出相同结论。杨英铎等^[29]发现香樟精油对金黄色葡萄球菌的 MIC 为 12.5%,香樟精油可能通过破坏菌体细胞膜结构,引起内含物渗漏,导致细菌缺乏营养物质而死亡。Wang 等^[30]研究发现野胡麻属精油对金黄色葡萄球菌、大肠杆菌和肠炎沙门氏菌的 MIC 分别为 0.5, 1.0, 2.0 $\mu\text{L/mL}$,其通过破坏细胞结构影响生物膜的形成而达到抑菌目的。

1.2 植物多酚

植物多酚又名植物单宁,广泛存在于植物体内,因具有酚羟基结构而具有较强的抗氧化能力,通常包括黄酮、鞣质与其他酚类。茶多酚、海带多酚与柠檬多酚等已在水产品保鲜中得到应用。茶多酚主要包括儿茶素、酚酸类、黄酮类与花青素类,儿茶素约占总量的 60%~80%,黄酮含量丰富,是目前研究较多的抑菌剂之一,其主要通过与膜表面结合发挥静电作用,影响细胞正常代谢与菌体总蛋白的正常表达来实现抑菌活性。

其中,孙京新等^[31]研究表明 0.3%茶多酚能使假单胞菌的完整性受到破坏,碱性磷酸酶渗出,在细胞膜孔形成孔道,导致紫外吸收物与蛋白质渗漏,影响细胞的正常代谢;周本宏等^[32]发现地榆鞣质提取物使金黄色葡萄球菌胞膜的通透性改变,细胞完整性受到破坏而达到抑菌目的。Leiro 等^[33]发现用 1~100 μL 反式白藜芦醇处理分离出的腹腔吞噬细胞,可调控细胞中的转录因子 NF- κB 信号通路而起到抗炎作用。钱丽红等^[34]发现茶多酚对金黄色葡萄球菌与铜绿假单

胞菌有抑菌性,其基础结构主要为多酚基多环结构,对蛋白质、核酸、碳水化合物等生物大分子具有高度亲和力;多名学者发现茶多酚对革兰氏阳性菌的抑菌性比革兰氏阴性菌强,推测其由于细胞壁结构不同而引起。王慧敏等^[35]研究发现茶多酚对腐败希瓦氏菌的 MIC 与 MBC 分别为 1.0、16.0 mg/mL,2 mg/mL 茶多酚处理能显著抑制细菌的生长,细胞壁与细胞膜受损,胞内成分外泄,最终使细胞死亡;董璐等^[36]研究发现茶多酚对大肠杆菌的 MIC 为 40 μ g/mL,通过影响菌体细胞膜的通透性,同时作用于遗传物质 DNA 达到抑菌目的;Yi 等^[37]发现经茶多酚处理后的铜绿假单胞菌的细胞内膜与外膜通透性改变,细胞壁的完整性被破坏,蛋白质组学分析发现菌体代谢发生紊乱,最终使菌体死亡。二氢杨梅素中的主要活性物质为黄酮,Liu 等^[38]研究表明二氢杨梅素对副溶血弧菌的 MIC 为 0.625 mg/mL,通过破坏细胞形态,使胞内离子渗漏到胞外达到抑菌目的,并发现细胞疏水性与抑菌性具有相关性;杨楠等^[39]发现生姜提取物浓度高于 0.25% 时,可抑制铜绿假单胞菌的生长,破坏其细胞壁,改变膜的通透性。

1.3 植物多糖

植物多糖是由一定数量单糖聚合而成的高分子碳水化合物。Diao 等^[40]研究表明半乳糖基月桂酸甘油三酯能破坏枯草芽孢杆菌细胞膜通透性,引起细胞裂解和膜损伤,最终使细胞死亡。Liu 等^[41]研究发现海藻多糖在未解聚之前并无抗菌活性,但解聚后的海藻多糖对金黄色葡萄球菌与大肠杆菌抑菌活性良好,且低分子量可提高其抑菌效果,破坏膜结构,使细胞裂解死亡。王巍等^[42]研究显示山楂果胶寡糖对金黄色葡萄球菌、大肠杆菌与枯草芽孢杆菌的 MIC 分别为 0.625、1.250、0.625 g/L,胞膜和胞壁完整性被破坏,蛋白质、核酸物质大量外泄而使菌体死亡。

1.4 其他

生物碱是从植物中获取的一类含氮杂环化合物,结构复杂多样,按其化学结构可分为吡啶类、哌啶类、萜类、甾体类、肽类生物碱等。不同生物碱上不同主碳链的抑菌效果不同,其抑菌性受到国内外学者的广泛关注。其中 Fatma 等^[43]研究了小檗碱、紫堇碱、波尔定碱与莲碱 4 种生物碱对枯草芽孢的抑菌作用,发现莲碱的抑菌作用最佳;黄花菜中的秋水仙碱^[44]对金黄色葡萄球菌以及大肠杆菌均有抑制作用;Lee 等^[45]研究发现将粉防乙碱与细胞表面活性剂联用使金黄色葡萄球菌的膜通透性增加。茜草具有广泛的生理活性,郑翠萍等^[46]研究发现茜草丙酮提取物对枯草芽孢杆菌的 MIC 为 0.125 mg/mL,其通过将细胞壁或细胞膜中的酶降解,使膜通透性提高影响菌体的生长繁殖使菌体死亡。谢丽玲等^[47]研究黄芩醇提物对致病菌副溶血性弧菌的抑菌机制得出其 MIC 和 MBC 均为 3.91 mg/mL,菌体经处理后出现变形,细胞壁被破坏而裂解死亡。Zhou 等^[48]探究了从樟树叶中提取出的松脂醇对大肠埃希菌、铜绿假单胞菌、金黄色葡萄球菌、枯草芽孢杆菌、沙门氏菌的抑菌性,发现 62.5 μ g/mL 的松脂醇对 5 种受试菌均有抑菌性,经扫描电镜观察得出铜绿假单

胞菌与枯草芽孢杆菌均有可溶性糖和蛋白质泄漏,证明其对菌体细胞质膜与细胞壁有破坏作用。Yong 等^[49]探究了紫珠叶、野牡丹、半枝莲 3 种植物提取物通过破坏大肠杆菌与铜绿假单胞菌的细胞膜通透性与完整性而起到抑菌作用,通过 GC-MS 分析起到抑菌作用的物质有二甲基苯酚、棕榈酸甲酯和丙酮。侯伟峰等^[50]与谢晶等^[51]分别研究了植酸对大肠杆菌与腐败希瓦氏菌的作用机制,结果得出其对 2 种菌的 MIC 分别为 0.4%,0.2%,植酸主要通过破坏菌体细胞壁与细胞膜的完整性使细胞质外渗,达到杀灭菌目的。

2 存在的问题与改进建议

天然植物提取物安全无毒、抗菌活性强、成本低并且易获取,取代化学防腐剂已成为必然趋势。然而,其用量多少势必会影响食品的感官品质^[52]。且多数植物源生物保鲜剂仍处于实验室研究水平,其抑菌物质与靶向抑菌作用位点仍不明确;部分植物抑菌成分还与其收获季节、种类与提取方法密切相关。有些提取物存在易氧化、脂溶性差、单独使用效果不佳与提取成本高等不足,深入研究提取物靶向抑制的作用位点,才能更好发挥其抑菌性;此外,不同植物源生物保鲜剂对菌体细胞的作用效果也表现出靶位作用机制的差异。因此,如能利用栅栏技术,将植物源保鲜剂与其他生物保鲜剂复配,能更好发挥其协同效应,增强抑菌性^[53-54]。天然植物中含有多糖、皂甙、有机酸等活性因子,将多种植物混合使用能发挥其抑菌效能。如黄锦炉等^[55]将白芍、杜仲、知母 3 种物质按不同的混合比例添加在草鱼饲料中,发现其可明显提高草鱼抗嗜水气单胞菌感染能力。刘焕明等^[56]将脂肽与茶多酚复配后,与 1/16 MIC 脂肽、1/8 MIC 茶多酚单独作用进行对比时发现,前者复合使用对副溶血性弧菌的细胞膜通透性影响和蛋白质的抑制显著增强,且磷代谢完全受到抑制。蓝蔚青等研究了 3.0 g/L 茶多酚与 10.0 g/L 壳聚糖、0.3 g/L 溶菌酶组成的复合生物保鲜剂对腐败希瓦氏菌^[57]、金黄色葡萄球菌^[58]与荧光假单胞菌^[59]等作用机制,得出其对 3 种菌的菌体生长均有明显抑制,且能影响菌体细胞壁与细胞膜的完整性。菌体内部核酸与蛋白质外泄,影响细胞的代谢循环。菌体在扭曲变形的同时,还发生干瘪破裂现象,细胞壁溶解,细胞质从菌体细胞体内大量渗出。

3 前景与展望

部分研究^[60]表明,一些复杂的食品基质与生物分子会黏附到蛋白质或脂类中的疏水基团,从而影响其保鲜效果与抑菌能力。目前,研究人员对植物源生物保鲜剂的抑菌机理、抑菌谱与应用范围的研究尚浅,在蛋白质组学、遗传物质方面的研究深度不够,因此研究亟待深入。此外,随着消费者安全意识的逐年提高,对植物源生物保鲜剂的安全性评价标准与使用规定仍需加以完善。总之,在当今积极倡导“绿色、环保、安全、健康”生活理念的时代,植物源生物保鲜剂将以其独特优势,成为未来食品工业发展进程中的主要热点。

参考文献

[1] 蓝蔚青, 谢晶. 生物保鲜剂对水产品保鲜效果影响的研究进

- 展[J]. 山西农业科学, 2009, 37(6): 75-78.
- [2] 刘剑侠. 茶多酚处理对冷藏大菱鲆的抑菌机制研究[D]. 锦州: 渤海大学, 2014: 53.
- [3] 车旭, 王婷, 杜若源, 等. 植物源生物保鲜剂在水产品保鲜中的研究进展[J]. 食品工业科技, 2015, 36(12): 375-378, 384.
- [4] 李婷, 周月, 宋丽雅, 等. 植物抑菌剂抑菌机理的研究方法进展[J]. 北方园艺, 2016(4): 179-184.
- [5] PAVANI Pannuru, ANJEETA Rani, PANNURU Venkatesu, et al. The effects of biological buffers TRIS, TAPS, TES on the stability of lysozyme[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 112: 720-727.
- [6] DIEGO Romano Perinelli, LAURA Fagioli, RAFFAELLA Campana, et al. Chitosan-based nanosystems and their exploited antimicrobial activity[J]. European Journal of Pharmaceutical Sciences, 2018, 117: 8-20.
- [7] 皮杜娟. 鱼精蛋白对草鱼片保鲜效果及其抑菌机理的初探[D]. 武汉: 华中农业大学, 2017: 39-57.
- [8] IMRAN Khan, DEOG-HWAN Oh. Integration of Nisin into nanoparticles for application in foods[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2016, 34: 376-384.
- [9] PAVANI Pannuru, ANJEETA Rani, PANNURU Venkatesu, et al. The effects of biological buffers TRIS, TAPS, TES on the stability of lysozyme[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 112: 720-727.
- [10] 蒋慧亮, 李学英, 杨宪生, 等. 生物保鲜剂对鱼类腐败菌抑菌效果比较及抑菌机理研究[J]. 食品科学, 2012, 33(23): 31-35.
- [11] 房杰. 根皮素对冷藏三文鱼的保鲜效果研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2016: 33-43.
- [12] 张赞彬, 刘笑宇, 姜萍萍, 等. 肉桂醛对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抑菌作用及抑菌机理研究[J]. 现代食品科技, 2015, 31(5): 31-35.
- [13] ZHANG Yue-mei, LI Dong-ping, LV Jian, et al. Effect of cinnamon essential oil on bacterial diversity and shelf-life in vacuum-packaged common carp (*Cyprinus carpio*) during refrigerated storage[J]. International Journal of Food Microbiology, 2017, 249: 1-8.
- [14] 甘利平, 杨维仁, 张崇玉, 等. 植物提取物的生物学功能及其作用机理[J]. 动物营养学报, 2015, 27(9): 2 667-2 775.
- [15] HE Feng, YANG Ying, YANG Guang, et al. Studies on antibacterial activity and antibacterial mechanism of a novel polysaccharide from *Streptomyces virginia* H03[J]. Food Control, 2010, 21(9): 1 257-1 262.
- [16] JAYANT Shankar Raut, SANKUNNY Mohan Karuppaiyil. A status review on the medicinal properties of essential oils[J]. Industrial Crops and Products, 2014, 62(62): 250-264.
- [17] 范超, 张梅, 张晶, 等. 天然防腐剂的研究进展[J]. 食品工业, 2017, 38(10): 200-203.
- [18] 王筱梦, 江芸, 孙芝兰, 等. 生物防腐剂的保鲜机理及应用[J]. 食品工业科技, 2017, 38(19): 304-310, 315.
- [19] ZHANG Yun-bin, LIU Xiao-yu, WANG Yi-fei, et al. Antibacterial activity and mechanism of cinnamon essential oil against *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus*[J]. Food Control, 2016, 59: 282-289.
- [20] HAMIDPOUR R, HAMIDPOUR M, HAMIDPOUR S, et al. Cinnamon from the selection of traditional applications to its novel effects on the inhibition of angiogenesis in cancer cells and prevention of Alzheimer's disease, and a series of functions such as antioxidant, anticholesterol, antidiabetes, antibacterial, antifungal, nematocidal, acaricidal, and repellent activities[J]. Traditional and Complementary Medicine, 2015(5): 66-70.
- [21] HUANG Zhan, LIU Xiao-chang, JIA Shi-liang, et al. Antimicrobial effects of cinnamon bark oil on microbial composition and quality of grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) fillets during chilled storage[J]. Food Control, 2017, 82: 316-324.
- [22] ISABEL Clementea, MARGARITA Aznar, FILOMENA Silva, et al. Antimicrobial properties and mode of action of mustard and cinnamon essential oils and their combination against foodborne bacteria[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2016, 36: 26-33.
- [23] MARIBEL Jiménez, JAZMÍN A Domínguez, LUZ A Pascual-Pineda, et al. Elaboration and characterization of O/W cinnamon (*Cinnamomum zeylanicum*) and black pepper (*Piper nigrum*) emulsions[J]. Food Hydrocolloids, 2017: 1-9.
- [24] 王媛媛. 竹叶精油的复配及其抑菌机理的研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2016: 39-49.
- [25] AMIT K Tyagi, ANUSHREE Malik. Bactericidal action of lemon grass oil vapors and negative air ions[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2012, 13: 169-177.
- [26] 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): 1 888-1 897.
- [27] HUANG Wei, WANG Jian-qing, SONG Hai-yan, et al. Chemical analysis and in vitro antimicrobial effects and mechanism of action of *Trachyspermum copticum* essential oil against *Escherichia coli* [J]. Asian Pacific Journal of Tropical Medicine, 2017, 10(7): 663-669.
- [28] LAMBERT R J W, SKANDAMIS P N, COOTE P J, et al. A study of the minimum inhibitory concentration and mode of action of oregano essential oil, thymol and carvacrol[J]. Journal of Applied Microbiology, 2001, 91: 453-462.
- [29] 杨英铎, 陆大洪, 杨冬梅, 等. 香樟精油对金黄色葡萄球菌的抑菌活性及抑菌机理研究[J]. 中国现代中药, 2017, 19(3): 372-376.
- [30] WANG Fei, WEI Fu-yao, SONG Chun-xiao, et al. *Dodartia orientalis* L. essential oil exerts antibacterial activity by mechanisms of disrupting cell structure and resisting biofilm[J]. Industrial Crops & Products, 2017, 109: 358-366.
- [31] 孙京新, 王文娟. 茶多酚对假单胞菌抑菌机理研究[J]. 肉类工业, 2010(1): 36-39.
- [32] 周本宏, 松长青, 姜姗, 等. 地榆鞣质提取物的抗菌活性及对金黄色葡萄球菌的抑菌机制研究[J]. 中国药师, 2016, 19(3): 464-469.
- [33] LEIRO J, ALVAREZ E, ARRANZ J, et al. Effect of cis-resveratrol on inflammatory murine macrophages: antioxidant ac-

- tivity and down-regulation of on inflammatory genes [J]. Journal of Leukocyte Biology, 2004, 75(6): 1 156-1 165.
- [34] 钱丽红, 陶研, 谢晶. 茶多酚对金黄色葡萄球菌和铜绿假单胞菌的抑菌机理[J]. 微生物学通报, 2010, 37(11): 1 628-1 633.
- [35] 王慧敏, 朱军莉, 陆海霞, 等. 茶多酚抑制腐败希瓦氏菌机理研究[J]. 茶叶科学, 2014, 34(2): 149-155.
- [36] 董璐, 代增英, 韩晴, 等. 茶多酚对大肠杆菌抑菌机理的研究[J]. 生物学杂志, 2015, 32(1): 72-75.
- [37] YI Shu-min, ZHU Jun-li, FU Ling-lin, et al. Tea polyphenols inhibit *Pseudomonas aeruginosa* through damage to the cell membrane[J]. International Journal of Food Microbiology, 2010(144): 111-117.
- [38] LIU Dan, PANG Wen-cong, DING Li-jun, et al. An insight into the inhibitory activity of dihydromyricetin against *Vibrio parahaemolyticus*[J]. Food Control, 2016, 67: 25-30.
- [39] 杨楠, 王静, 余友恒, 等. 生姜活性提取物对铜绿假单胞菌的抑制机理研究[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(20): 95-97.
- [40] DIAO Ming-ming, QI Dan-ping, XU Miao-miao, et al. Antibacterial activity and mechanism of monolauryl-galactosylglycerol against *Bacillus cereus* [J]. Food Control, 2018 (85): 339-344.
- [41] LIU Ming, LIU Yi-xiang, CAO Min-jie, et al. Antibacterial activity and mechanisms of depolymerized fucoidans isolated from *Laminaria japonica* Ming [J]. Carbohydrate Polymers, 2017(172): 294-305.
- [42] 王巍, 牟德华, 李丹丹. 山楂果胶寡糖的抑菌性能及机理[J]. 食品科学, 2018, 39(3): 110-116.
- [43] FATMA Gizem Avci, NIHAT Alpugu Sayar, BERNA Sariyar Akbulut. An OMIC approach to elaborate the antibacterial mechanisms of different alkaloids[J]. Phytochemistry, 2018, 149: 123-131.
- [44] 朱礼芳. 黄花菜中秋水仙碱的提取及其抑菌性能研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2013: 75-79.
- [45] LEE Young-seob, HAN Sin-hee, LEE Su-hwan, et al. The mechanism of antibacterial activity of tetrandrine against *Staphylococcus aureus* [J]. Foodborne Pathog Dis, 2012, 9 (8): 686.
- [46] 郑翠萍, 权美平, 康莉娜, 等. 茜草丙酮提取物抑菌活性及机制的研究[J]. 食品工业科技, 2015, 36(9): 116-119.
- [47] 谢丽玲, 彭齐, 蔡链纯, 等. 黄芩醇提取物对副溶血性弧菌抑制机制的研究[J]. 生物技术通报, 2015, 31(8): 159-165.
- [48] ZHOU Hai-xu, REN Jia-li, LI Zhong-hai. Antibacterial activity and mechanism of pinorensinol from *Cinnamomum Camphora* leaves against food-related bacteria[J]. Food Control, 2017, 79: 192-199.
- [49] YONG Ann-li, OOH Keng-fei, ONG Hean-chooi, et al. Investigation of antibacterial mechanism and identification of bacterial protein targets mediated by antibacterial medicinal plant extracts[J]. Food Chemistry, 2015, 186: 32-36.
- [50] 侯伟峰, 谢晶, 蓝蔚青, 等. 植酸对大肠杆菌抑菌机理的研究[J]. 江苏农业学报, 2012, 28(2): 443-447.
- [51] 谢晶, 侯伟峰, 汤毅, 等. 植酸对腐败希瓦氏菌的抑菌机理[J]. 食品工业科技, 2011, 32(10): 85-88.
- [52] ABDO Hassoun, OZLEM Emir Çoban. Essential oils for antimicrobial and antioxidant applications in fish and other seafood products[J]. Trends in Food Science & Technology, 2017, 68: 26-36.
- [53] ARANCIBIA M, GIMENEZ B, LOPEZ-CABALLERO M E, et al. Release of cinnamon essential oil from polysaccharide bi-layer films and its use for microbial growth inhibition in chilled shrimps[J]. LWT-Food Science and Technology, 2014, 59: 989-995.
- [54] 赵宏强, 蓝蔚青, 张皖君, 等. 超高压技术在水产品杀菌保鲜中的研究进展[J]. 食品工业科技, 2016, 37(22): 369-373.
- [55] 黄锦炉, 李爱华, 钱雪桥, 等. 允饲植物源复方制剂对草鱼 (*Ctenopharyngodon idellus*) 的免疫增强作用研究[J]. 海洋与湖沼, 2017, 48(3): 576-582.
- [56] 刘唤明, 张文滔, 吴燕燕, 等. 脂肽和茶多酚对副溶血弧菌的协同抑菌效应和机理[J]. 食品科学, 2017, 38(13): 14-19.
- [57] 蓝蔚青, 谢晶, 侯伟峰, 等. 复合生物保鲜剂对腐败希瓦氏菌的抑菌机理[J]. 江苏农业学报, 2012, 28(1): 186-192.
- [58] 蓝蔚青, 谢晶, 毛锋, 等. 复合生物保鲜剂对金黄色葡萄球菌的抑菌作用研究[J]. 食品与生物技术学报, 2014, 33(8): 814-820.
- [59] 蓝蔚青, 车旭, 谢晶, 等. 复合生物保鲜剂对荧光假单胞菌的抑菌活性及作用机理[J]. 中国食品学报, 2016, 16(8): 159-165.
- [60] AURELIA Magdalena Pisoschi, ANETA Pop, CECILIA Georgescu, et al. An overview of natural antimicrobials role in food[J]. European Journal of Medicinal Chemistry, 2018, 143: 922-935.

(上接第 190 页)

- [62] LEE W C, CHEN Tian-Chi. Functional characteristics of egg white solids obtained from papain treated albumen[J]. J Food Eng, 2002, 51(4): 263-266.
- [63] HAMMERSHØJ M, NEBEL C, CARSTENS J H. Enzymatic hydrolysis of ovomucin and effect on foaming properties[J]. Food Research International, 2008, 41(5): 522-531.
- [64] 王然, 迟玉杰. 转谷氨酰胺酶提高蛋清粉凝胶性能的研究[J]. 食品与发酵工业, 2010, 36(2): 109-113.
- [65] 雷明辉, 叶劲松, 张铭容, 等. 谷氨酰胺转氨酶对鸡蛋蛋白热凝固性的影响[J]. 食品工业科技, 2015, 36(13): 143-149.
- [66] SAKAMOTO H, KUMAZAWA Y, MOTOKI M. Strength of protein gels prepared with microbial transglutaminase as related to reaction conditions[J]. J Food Sci, 1994, 59(4): 866-871.
- [67] 徐东红. 酶法制备高特性蛋清蛋白粉工艺研究[D]. 南昌: 江西农业大学, 2013: 20.
- [68] 徐雅琴. 鸡蛋白粉的凝胶性质改性研究[D]. 无锡: 江南大学, 2005: 16.
- [69] PILAR T, REYES P. Synergistic action of transglutaminase and high pressure on chicken meat and egg gels in absence of phosphates [J]. Food Chemistry, 2007, 104(4): 1 718-1 727.