

# 微生物源天然食品防腐剂的研究进展

邢海丽<sup>1</sup>, 辛嘉英<sup>1,2\*</sup>, 王艳<sup>1</sup>, 郑洛昀<sup>1</sup>, 夏春谷<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨商业大学食品科学与工程重点实验室, 哈尔滨 150076;

2. 中国科学院兰州化学物理研究所羧基合成与选择氧化国家重点实验室, 兰州 730000)

**摘要:**天然食品防腐剂按其来源不同可分为植物源天然防腐剂、动物源天然防腐剂和微生物源天然防腐剂。微生物源天然食品防腐剂由于其本身的优越性,越来越受到人们的青睐。本文主要介绍了微生物来源的天然食品防腐剂乳酸链球菌素、 $\epsilon$ -聚赖氨酸、曲酸、溶菌酶和甲烷氧化菌素的最新研究进展,阐述了它们的理化性质、抑菌机制和应用现状,同时简单介绍了纳他霉素、抗菌肽、罗伊氏菌素和嗜杀酵母等微生物源天然食品防腐剂的应用现状,旨在为高效、无毒、天然食品防腐剂的研究提供参考。天然食品防腐剂最有发展的可能是将几种来源不同的天然食品防腐剂复配,或者将一种天然防腐剂与其他化学防腐剂复配使用,不仅可以减少防腐剂在食品中的用量,同时还可以使食品的杀菌或抑菌条件更加温和化,对人们的饮食健康非常有利。

**关键词:**微生物源;天然食品防腐剂;抗菌机制

## Research progress of natural food preservatives from microbial source

XING Hai-Li<sup>1</sup>, XIN Jia-Ying<sup>1,2\*</sup>, WANG Yan<sup>1</sup>, ZHENG Luo-Yun<sup>1</sup>, XIA Chun-Gu<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory for Food Science and Engineering, Harbin University of Commerce, Harbin 150076, China; 2. State Key Laboratory for Oxo Synthesis and Selective Oxidation, Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

**ABSTRACT:** Natural food preservatives can be classified into botanic, animal and microbial source food preservatives. The microbial preservatives are favored more and more because of their superiority such as strong antibacterial, safe, non-toxic, water-soluble, good thermal stability, and wide range of functions, etc. This paper reviewed the latest progress in natural food preservatives of the nisin,  $\epsilon$ -Poly-L-lysine, kojic acid, lysozyme and methanobactin, focusing on the physical and chemical properties, antibacterial mechanism and application, and the application of natamycin, antibacterial peptide, reuterin and Killer Yeast, with an aim to provide a reference for researches on natural food preservatives with non-toxic and high activity. The most likely development of natural food preservatives are combination of different sources of natural food preservatives or use of a natural preservative and other chemical preservatives. These methods not only can reduce the amount of preservatives in the food, but also can make the sterilization or antibacterial conditions more moderate of food, which are very good for people's health.

**KEY WORDS:** microbial source; natural food preservatives; mechanism of antimicrobial

基金项目: 国家自然科学基金项目(21573055, 21073050)

**Fund:** Supported by the National Natural Science Foundation of China (21573055, 21073050)

\*通讯作者: 辛嘉英, 博士, 龙江学者特聘教授, 博士生导师, 主要研究方向为生物催化。E-mail: xinjiayingvip@163.com

\*Corresponding author: XIN Jia-Ying, Distinguished Professor of Longjiang scholar, Doctoral Supervisor, Key Laboratory for Food Science and Engineering, Harbin University of Commerce, Harbin 150076, China. E-mail: xinjiayingvip@163.com

## 1 引言

几个世纪以来,食品添加剂已用于调味、着色、延长食品的保质期、以及食品安全宣传<sup>[1]</sup>,是食品加工生产中不可缺少的一部分<sup>[2]</sup>。食品防腐剂一般分为合成防腐剂和天然防腐剂,目前我国大量使用的还是苯甲酸及其盐、山梨酸及其盐、对羟基苯甲酸酯类等化学合成防腐剂,已有研究表明化学合成的添加剂对人体的肝、脾、肺均有不利影响,甚至会诱发恶性肿瘤等诸多副作用<sup>[3]</sup>,因此,近年来天然防腐剂的开发受到广泛重视。天然防腐剂具有化学合成防腐剂无法比拟的优点,如:抗菌性强、安全无毒、水溶性好、热稳定性好、作用范围广等。目前天然食品防腐剂按其来源可分为植物源、动物源和微生物源天然防腐剂。本文主要介绍了几种天然微生物源天然防腐剂的理化性质、抑菌机制和应用现状,旨在为高效、无毒、微生物源天然食品防腐剂应用于食品工业的研究提供参考。

## 2 乳酸链球菌素

乳酸链球菌素(Nisin)是一类由乳酸乳球菌乳酸亚种(*Lactococcus lactis subsp. Lactis*)<sup>[4]</sup>在代谢过程中通过核糖体合成机制产生的具有抑菌或杀菌效果的多肽或蛋白,具有高效、无毒、无残留、不产生耐药性等特点,已经成为食品防腐剂研究重点,同时被认为是最有希望代替抗生素的天然产物。许多研究表明<sup>[5]</sup>,乳酸链球菌素生物合成过程受周围环境以及物理化学因素影响很大,在酸性条件下极为稳定,而在中性或碱性条件下即发生失活,对温度的耐受性很强,在 pH 为 2.0 条件下可耐受高温处理(121 °C, 15 min),无活力损失。

大多研究表明,它能有效抑制引起食品腐败的大范围的革兰氏阳性细菌<sup>[6]</sup>(尤其是亲缘性较近的细菌),如乳杆菌、明串珠菌、小球菌、肉毒梭状芽孢杆菌、金黄色葡萄球菌、溶血链球菌、利斯特氏菌、嗜热脂肪芽孢杆菌等,尤其对产生芽孢的革兰氏阳性细菌有特效,而对革兰氏阴性菌作用不大,对酵母菌和霉菌没有作用<sup>[7]</sup>,但是,牟光庆等<sup>[8]</sup>筛选出了能抑制革兰氏阴性菌如大肠杆菌的产广谱乳酸链球菌素的菌株。Khan等<sup>[9]</sup>研究发现,当pH值为5~6、125~150 µg/mL的nisin与20~30 mmol/L的Na-EDTA结合时,可以抑制大肠杆菌、沙门氏菌和李斯特氏菌的生长。乳酸链球菌素是杀死菌体而不是抑制菌体生长,作用目标为细胞膜<sup>[10]</sup>,主要是通过干扰细胞膜的正常功能、造成细胞膜的渗漏、养分流失和膜电位下降,从而导致致病菌和腐败菌细胞死亡。Field等<sup>[11]</sup>发明了一个新型的乳酸链球菌素衍生物,新的乳酸链球菌素衍生物能提高抑制金黄色葡萄球菌的活性,增强了损害生物膜形成的能力并且降低了生物膜的密度。Liu等<sup>[12]</sup>以大肠杆菌、金黄色葡萄球菌和

枯草芽孢杆菌为指示菌,发现nisin和ε-聚赖氨酸结合能够损坏指示菌细胞、增大细胞膜的通透性。

1969年,联合国粮食及农业组织/世界卫生组织(FAO/WHO)食品添加剂联合专家委员会将乳酸链球菌肽批准为推荐的高效安全天然食品防腐剂。1990年,我国卫生部食品监督司签发了在国内使用乳酸链球菌素作为食品保藏剂的使用合格证明书。它对人体基本无毒性,也不与医用抗生素产生交叉抗药性,能在肠道中降解,对肠道无害,已有学者对乳酸链球菌素进行毒理学和生物学的研究,都证明对人体无毒。目前,它因安全高效、作用广谱在食品领域获得广泛的应用<sup>[13]</sup>。Chollet等<sup>[14]</sup>研究表明,提高乳酪中NaCl的浓度,nisin的抑菌活性也会随着提高,而乳酪中的蛋白酶对nisin的抑菌活性没有影响。Oliveira等<sup>[15]</sup>研究发现,在室温或冷藏温度下,将nisin加入到果汁中,至少30d果汁的理化性质没有明显的变化,尤其对含有维生素C的果汁防腐效果更好。徐歆等<sup>[16]</sup>将nisin与其他防腐剂复配应用于西式火腿肠中,得出最佳配方为0.225%Nisin、0.225%柠檬酸和0.195%溶菌酶。Nisin除了应用于乳制品、肉制品和果汁中之外,还应用于罐头制品、酱菜、酒精以及焙烤食品中,可以减少其他防腐剂的用量以及残留,能减弱需经热处理食品中热处理的强度、降低成本,可显著降低食品中的细菌总数以及杂菌的生长<sup>[17,18]</sup>,有效延长食品的保质期,而且不影响食品的感官质量,具有很好的开发价值与应用前景。

## 3 ε-聚赖氨酸

ε-聚赖氨酸(ε-Poly-L-lysine, ε-PL)是一种白色链霉菌*Streptomyces albulus* 346的发酵产物。ε-PL抑菌的最适pH值为5~8,也就是说其在中性和微酸性环境中有较强的抑菌性,而在酸性和碱性条件下,抑菌效果不太理想<sup>[19]</sup>,这可能由于ε-PL是作为赖氨酸的聚合物,在过酸性和过碱性条件下易分解等原因造成的。ε-PL能耐高温,在121 °C处理60 min后抑菌效果基本不变<sup>[20]</sup>,可以添加到需要热处理的食品中,达到延长食品保质期的目的。

ε-PL作为一种新型食品防腐剂,它能有效的抑制G<sup>+</sup>、G<sup>-</sup>、酵母菌和霉菌等,对生长的细菌其最小抑菌浓度在100 µg/mL以下<sup>[21]</sup>,具有更好的水溶性、更强的热稳定性和更广的pH适用范围等优点;与此同时,ε-PL添加到各类食品中只需要微量就可以起到很好的抑菌效果,基本不会影响食品原有的风味且具有较高的安全性<sup>[22]</sup>。研究显示,ε-PL的α氨基对它的抗菌活性至关重要。然而,ε-PL的抗菌活性受离子强度和阴离子化合物的影响也很大。Muto发现<sup>[23]</sup>,ε-PL能够诱导大肠杆菌中细胞质苹果酸脱氢酶的泄露,并且泄露量和细胞的存活率有很好的相关性。Chang等<sup>[24]</sup>研究ε-PL对大肠杆菌O157:H7、鼠伤寒沙门氏菌、产单核细胞李斯特菌的抑菌效果,发现对大肠杆菌的抑制效果最

好。Yamanaka 和 Hamano 报导  $\epsilon$ -PL 的抑菌活性是由作用在细胞质膜上的物理作用引起的, 并且它的抗菌机制是细胞表面的静电相互作用, 接着是细胞质膜非正态分布的分裂, 最后导致微生物细胞生理损伤<sup>[25]</sup>。Tao 等<sup>[26]</sup>报道, 聚赖氨酸浓度低时通过破坏细胞膜导致细胞内代谢失衡来实现对酵母菌的抑菌效果; 当加入更高浓度的聚赖氨酸时, 导致细胞膜的渗透性明显增加, 在细胞膜上形成胶束, 磷脂双分子层弯曲并穿孔, 最后导致细胞死亡, 通过代谢组分析显示聚赖氨酸通过抑制三羧酸循环和糖酵解来抑制初级代谢途径。到目前为止,  $\epsilon$ -PL 的抗菌机制依然不很清楚。

作为新型的天然防腐剂,  $\epsilon$ -PL 已于 2003 年 10 月被 FDA 批准为安全食品保鲜剂, 美国、日本和韩国已经允许  $\epsilon$ -PL 作为食品防腐剂使用<sup>[23]</sup>, 现在已被广泛应用于食品防腐中。李维娜等<sup>[27]</sup>研究发现  $\epsilon$ -PL 的浸泡液对即食湿面条的防腐效果较好, 最适浓度为 0.15%, 而当 0.1% $\epsilon$ -PL 和 0.25% 醋酸助剂复配时, 10 d 之内即食湿面条的品质较好, 复配效果最佳。张全景等<sup>[28]</sup>把  $\epsilon$ -PL 应用到到鲜猪肉中, 当  $\epsilon$ -PL 质量浓度为 400 mg/L 时, 能显著抑制鲜猪肉感官品质的下降、微生物的生长繁殖、pH 值的上升和 TVB-N 的积累, 再加入 0.2% 的乙酸为助剂, 浸泡 5 min 后鲜猪肉保质期从对照组 2 d 延长至 8 d。除了主要应用于肉类之外,  $\epsilon$ -PL 还应用于水产类、淀粉类食品、饮料、调味品、乳制品中。

## 4 曲酸

曲酸是由微生物有氧发酵产生的一种有杀菌作用的有机酸, 是由许多曲霉属和青霉属产生的一种真菌代谢产物<sup>[29]</sup>, 是一种黑色素专属性抑制剂。曲酸的优点是易溶于水, 但在高温下长期贮藏不稳定, 增加其稳定性可以通过修改 C-5 羟基形成羟基苯基醚或酯, 或通过使用这些基团形成苷或肽衍生物<sup>[30]</sup>。Kim 等<sup>[31]</sup>研究发现, 曲酸衍生物比曲酸稳定 15 倍, 并且比曲酸的毒性更小, 抗菌谱广, 对细菌、酵母菌及霉菌都有很强的抑制作用, 而且抑菌效果不受 pH 值的影响, 受热稳定, 是一种优良的食品防腐剂<sup>[32,33]</sup>, 同时还有抗氧化<sup>[34]</sup>和护色作用, 对人体无害, 无环境污染、食用安全<sup>[35]</sup>。Liu 等<sup>[36]</sup>研究了曲酸接枝壳聚糖寡糖对革兰氏阳性菌和革兰氏阴性菌的抑制活性, 得出抑菌活性高于未改性的壳聚糖, 并且细菌悬浮液的导电性增加, SDS-PAGE 结果显示, 细菌的可溶性蛋白明显降低。

曲酸的应用比较广泛, 李庆鹏等<sup>[37]</sup>研究曲酸处理对鲜切西兰花品质及生理变化的影响, 得出曲酸处理可有效减少鲜切西兰花贮藏期间水分的散失, 延缓 TA、VC 和叶绿素含量的下降, 减缓 MDA 的积累, 抑制 PPO 的活性, 曲酸浸泡处理可显著提高鲜切西兰花的贮藏品质。何世微等<sup>[38]</sup>研究曲酸对菠萝蜜的抑菌实验, 得知菠萝蜜果肉经 0.10% 曲酸浸泡后 6 d 内具有较好的抑菌效果。曲酸作为一

种新型的食品添加剂, 在食品防腐、果蔬保鲜、肉制品与水产品的护色保鲜方面有着极为广阔的应用, 相信曲酸将会有广阔的前景。

## 5 溶菌酶

溶菌酶(Lysozyme)是一种专门作用于微生物细胞壁的水解酶, 又称细胞壁溶解酶。溶菌酶是一种碱性蛋白质, 在酸性环境下, 溶菌酶对热的稳定性很强, pH 值 3.0 时 96 °C 加热处理 15 min 仍能保持 87% 的酶活性。在自然条件下, 大多数溶菌酶化学性质稳定, 即使当 pH 值在 1.2~11.3 范围内剧烈变化, 其酶结构仍维持不变, 活性也不受影响。食盐对它起活化作用<sup>[39]</sup>, 而在碱性范围时溶菌酶的稳定性就很差<sup>[40]</sup>。

溶菌酶对革兰氏阳性菌、好气性孢子形成菌、枯草杆菌、耐辐射微球菌均有良好的分解作用, 在革兰氏阳性菌细胞壁内, 它可以透过胞壁酸酶并且可以水解细胞壁内层, 以此来破坏食品中的有害细菌<sup>[41]</sup>, 对大肠杆菌、普通变球菌和副溶血性弧菌等革兰氏阴性菌也有一定程度的溶解作用。溶菌酶具有分解细菌细胞壁中肽聚糖的特殊作用, 溶菌酶主要通过切断细胞壁肽聚糖中的 N-乙酰胞壁酸(NAG)和 N-乙酰葡萄糖胺(NAM)之间的  $\beta$ -1,4 糖苷键<sup>[42]</sup>, 使细胞壁不溶性黏多糖分解成可溶性糖肽, 导致细胞壁破裂, 细菌裂解而起到杀死细菌(尤其是球菌)的目的。

溶菌酶本身是一种无毒、无害、安全性很高的蛋白质, 且具有一定的保健作用, 又具有一定的溶菌作用, 可以选择性地、有目的地杀灭微生物而不作用于食品中的其他物质, 保证食品原有营养成分不受损失, 现在已广泛应用于水产品、肉食品、食品软包装、乳制品、奶油糕点、低度酒及饮料中的防腐。冯叙桥等<sup>[43]</sup>研究溶菌酶涂膜对鲜切寒富苹果的贮藏保鲜效果, 发现 0.08% 溶菌酶溶液涂膜保鲜效果最好, 并且在 4 °C 冷库中贮藏 8 d 后, 溶菌酶处理鲜切苹果的感官评价、硬度、色泽、可溶性固形物和抗坏血酸含量都处于较高的水平, 对鲜切苹果的护色效果较好。研究发现, 溶菌酶与一些生物保鲜剂复合使用、与保鲜技术结合应用都可提高保鲜效果<sup>[44]</sup>。张璟晶等<sup>[45]</sup>将溶菌酶、nisin 和壳聚糖制成复合保鲜剂, 研究其对冰鲜银鲳的保鲜效果, 得出在溶菌酶 0.4 g/L、壳聚糖 5 g/L、Nisin 0.4 g/L 为复合保鲜剂的最佳配比下, 银鲳鱼感官评分、细菌总数、TVB-N、硫代巴比总酸(TBA)值均优于对照组, 在冷藏条件下能使银鲳的一级长 2~3 d, 二级鲜度延长 6~7 d。溶菌酶以杀菌效率高、耐药性低、不污染环境、无腐蚀性、稳定性强、生物相容性好的优点正在得到越来越广泛的应用。

## 6 甲烷氧化菌素

甲烷氧化菌素(methanobactin, Mb)是由甲烷氧化细菌分泌的, 它能够以分泌物的形式存在于细胞外, 又可以

颗粒型甲烷的加氧酶组成结构成分存在于细胞内膜上,是一种小分子的荧光肽,对铜具有较强的亲和性<sup>[46]</sup>。而甲烷氧化菌是参与全球碳循环的一个重要微生物,也由于其易于培养,已经被用于生产单细胞蛋白及虾青素等。甲烷氧化菌素具有抗氧化活性、抗菌性以及金属螯合性。

2004年,基于甲烷氧化菌素结构的确立, Kim发现连着 Gly 和 ser 的硫代氨基这一结构曾在具有抗菌性的含硫环状多肽和链霉菌产的硫链丝菌素中发现过<sup>[47]</sup>。另外,产甲烷古细菌中含镍的甲基辅酶还原酶中也存在这种特殊的结构,这说明甲烷氧化菌素还可能具备抗革兰氏阳性菌的特性。2006年, Alan等<sup>[48]</sup>亦发现 Mb 具有抗菌性,它们对金黄色葡萄球菌 X920 系中抗万古霉素类、杆状菌和粪肠球菌等革兰氏阳性菌和其他类致病菌进行研究,发现 Mb 对革兰氏阳性菌具有抗菌作用,如果和金属螯合剂并用(如 EDTA), Mb 对革兰氏阴性菌也有抗菌性。目前关于 Mb 的抗菌性国内还未见报导,国外报导的也较少。Johnson CL 研究了 Mb 和 Cu 结合后对食品中常见的致病菌 *Listeria monocytogenes* 的抑制作用,得到单增李斯特氏菌在 pH 6.0 时对 Mb-Cu 最敏感,此时最小抑制浓度是 4.11 mmol/L,并且致病菌在数量上的减少随着 Mb-Cu 浓度的增加而增加,当 Mb-Cu 的浓度大于最低抑制浓度时,持续检测不到单增李斯特氏菌,说明 Mb 是一种天然的抗菌肽,能够杀死单增李斯特氏菌<sup>[49]</sup>。甲烷氧化菌素作为一种新型的食品防腐剂,以其安全无毒、易于培养和提取、成本低将会得到越来越多研究者的关注,得到更加广泛的发展。

## 7 其他微生物源天然防腐剂

纳他霉素是一种多烯大环内酯类抗真菌剂<sup>[50]</sup>,能够专性的抑制酵母菌和霉菌并具有良好的理化稳定性<sup>[51]</sup>,对细菌没有作用,目前已成为30多个国家广泛使用的一种天然生物性食品防腐剂和抗菌添加剂,应用于干酪、肉制品、果汁、果蔬和焙烤食品等中,一般用于食品的表面杀菌;抗菌肽对食品中的多种革兰氏阴性细菌和革兰氏阳性细菌都有很强的杀灭作用,利用基因工程重组技术异源表达系统来生产抗菌肽是一种新模式<sup>[52]</sup>,其中,大肠杆菌是生产抗菌肽良好的表达系统, Shudan等<sup>[53]</sup>研究天蚕素抗菌肽 AD 对断奶仔猪大肠埃希氏菌性能和肠道健康的影响发现,抗菌肽 AD 是通过增加免疫状况和氮和能量保留以及降低断奶仔猪肠道致病菌来提高猪的生产性能。食品中添加抗菌肽可用来制作各种功能性食品,也可以制成口服型药品、保健营养品等;罗伊氏菌素是由罗伊氏乳杆菌 (*Lactobacillus reuteri*) 产生的具有广谱抗菌作用的化合物,对革兰氏染色阴性和革兰氏染色阳性细菌、酵母和丝状真菌有杀菌作用<sup>[54]</sup>;自然界有一类嗜杀酵母(kill yeast)能向体外分泌一种毒蛋白(也称嗜杀毒素),杀死同族及亲缘酵母<sup>[55]</sup>,目前,研究最深入的是来自酿酒酵母的 K1 毒素。

## 8 展望

近年来,根据人们对食品添加剂的营养性、安全性和特殊功能方面给予更多的关注,绿色、无害的天然食品防腐剂必将有一个可观的未来;由于很多添加剂在功能和应用方面具有局限性,将几种来源不同的天然食品防腐剂复配,或者将一种天然防腐剂与其他化学防腐剂复配使用,复配防腐剂具有协同或互补作用,不仅可以减少防腐剂在食品中的用量,同时还可以使食品的杀菌或抑菌条件更加温和化,对人们的饮食健康非常有利。基于以上,微生物源食品防腐剂必将得到更加广泛的应用。

### 参考文献

- [1] Rangan C, Barceloux DG. Food additives and sensitivities [J]. Disease-a-month, 2009, 55(5): 292-311.
- [2] Shim SM, Seo SH, Lee Y, et al. Consumers' knowledge and safety perceptions of food additives: Evaluation on the effectiveness of transmitting information on preservatives [J]. Food Cont, 2011, 22: 1054-1060.
- [3] 黄晓冬, 庄勋, 仇梁林, 等. BHT 亚急性毒性及致肺巨噬细胞凋亡作用 [J]. 中国公共卫生, 2006, 22(10): 1216-1218. Huang XD, Zhuang X, Chou LL, et al. Apoptosis effect on pulmonary macrophage induced by butylhydroxytoluene under subacute toxic exposure in rats [J]. Chin J Public Health, 2006, 22(10): 1216-1218.
- [4] Al-Holy M, Al-Nabulsi A, Osaili T M, et al. Inactivation of *Listeria innocua* in brined white cheese by a combination of nisin and heat [J]. Food Cont, 2012, 23(1): 48-53.
- [5] 孙来华, 张志强. 乳酸链球菌素的特性及其在食品中的应用 [J]. 食品研究与开发, 2008, 29(10): 119-123. Sun LH, Zhang ZQ. The application of nisin in food processing [J]. Food Res Devel, 2008, 29(10): 119-123.
- [6] Martins J, Cerqueira M, Souza B, et al. Shelf life extension of ricotta cheese using coatings of galactomannans from nonconventional sources incorporating nisin against *Listeria monocytogenes* [J]. J Agric Food Chem, 2010, 58(3): 1884-1891.
- [7] Jaquette CB, Beuchat LR. Combined effects of pH, nisin, and temperature on growth and survival of Psychrotrophic *Bacillus cereus* [J]. Food Prot, 1998, 61(5): 563-570.
- [8] 牟光庆, 李霞, 李慧, 等. 广谱乳酸菌素的研究 [J]. 食品科学, 2008, 29(11): 469-472. Mou GQ, Li X, Li H, et al. Research on the broad spectrum of lactobacillus [J]. Food Sci, 2008, 29(11): 469-472.
- [9] Khan A, Vu K D, Riedl B, et al. Optimization of the antimicrobial activity of nisin, Na-EDTA and pH against gram-negative and gram-positive bacteria [J]. LWT-Food Sci Technol, 2015, 61: 124-129.
- [10] Chung HJ, Montville TJ, Chikindas ML. Nisin depletes ATP and proton motive force in mycobacteria [J]. Lett Appl Microbiol, 2000, 31: 416-420.
- [11] Field D, Gaudin N, Lyons F, et al. A Bioengineered nisin derivative to control biofilms of taphylococcus pseudintermedius [J]. PLOS ONE, 2015, 10(3): e0119684.
- [12] Liu HX, Pei HB, Han ZN, et al. The antimicrobial effects and synergistic antibacterial mechanism of the combination of  $\epsilon$ -Polylysine and nisin

- against *Bacillus subtilis* [J]. *Food Cont*, 2015(47): 444–450.
- [13] Ghanbari M, Jami M, Domig KJ, *et al.* Seafood biopreservation by lactic acid bacteria—a review [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2013, 54(2): 315–324.
- [14] Chollet E, Sebti I, Gros AM, *et al.* Nisin preliminary study as a potential preservative for sliced ripened cheese: NaCl, fat and enzymes influence on nisin concentration and its antimicrobial activity [J]. *Food Cont*, 2008, (19): 982–989.
- [15] Oliveira Junior AA, Araújo Couto HGS, Barbosa AAT, *et al.* Stability, antimicrobial activity, and effect of nisin on the physico-chemical properties of fruit juices [J]. *Int J Food Microbiol*, 2015, (211): 38–43.
- [16] 徐歆, 黄琴, 阎永贞, 等. 西式火腿肠复配防腐剂的研制[J]. *食品科学*, 2011, 32(14): 356–360.
- Xu X, Huang Q, Yan YZ, *et al.* Development of compound preservatives for western-style ham-sausages [J]. *Food Sci*, 2011, 32(14): 356–360.
- [17] Wakil SM, Osamwonyi UO. Isolation and screening of antimicrobial producing lactic acid bacteria from fermentating millet gruel [J]. *Int Res J Microbiol*, 2012, 3(2): 72–79.
- [18] Malik DK, Bhatia D, Kumar AN. Lactic acid bacteria and bacteriocin: A review [J]. *J Pharm Res*, 2012, 5(5): 2510–2513.
- [19] 李诚, 石磊.  $\epsilon$ -聚赖氨酸抑菌性能研究[J]. *食品与发酵工业*, 2009, 35(2): 39–43.
- Li C, Shi L. Study on the antimicrobial activity of  $\epsilon$ -Polylysine [J]. *Food Ferment Ind*, 2009, 35(2): 39–43.
- [20] 韩晴, 冯建岭, 韩浩, 等.  $\epsilon$ -聚赖氨酸在食品应用的研究进展[J]. *山东食品发酵*, 2014, 3(174): 45–48.
- Han Q, Feng JL, Han H, *et al.* Advance in food applications of  $\epsilon$ -Polylysine [J]. *Shandong Food Ferment*, 2014, 3(174): 45–48.
- [21] Shima S, Matsuoka H, Iwamoto T, *et al.* Antimicrobial action of  $\epsilon$ -poly-L-lysine [J]. *Antibiotics*, 1984, 37: 1449–1455.
- [22] Hiraki J, Ichikawa T, Ninomiya S, *et al.* Use of ADME studies to confirm the safety of  $\epsilon$ -polylysine as a preservative in food [J]. *Regul Toxicol Pharm*, 2003, 37(2): 328–340.
- [23] Muto M. Chemical technology for preservation of food products; food preservative,  $\epsilon$ -poly-L-lysine [J]. *Boukin Boubai*, 2009, 37: 765–772.
- [24] Chang SS, Lu WYW, Park SH. Control of foodborne pathogens on ready-to-eat roast beef slurry by  $\epsilon$ -polylysine [J]. *Int J Food Microbiol*, 2010, 141: 236–241.
- [25] Yamanaka K, Hamano Y. Biotechnological production of poly- $\epsilon$ -L-lysine for food and medical applications [J]. *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, 2010, 15:61–75.
- [26] Tao B, Liu M, Zhong C, *et al.* Metabolomic analysis of antimicrobial mechanisms of  $\epsilon$ -poly-L-lysine on *saccharomyces cerevisiae* [J]. *Agric Food Chem*, 2014, 10(1021): A–L.
- [27] 李维娜, 贾士儒, 谭之磊, 等.  $\epsilon$ -聚赖氨酸在即食湿面条防腐中的应用[J]. *中国食品添加剂*, 2011, 06: 177–181.
- Li WN, Jia SR, Tan ZL, *et al.* The antiseptic application of  $\epsilon$ -Poly-L-lysine in wet ready-to-eat noodles [J]. *Chin Food Add*, 2011, 06: 177–181.
- [28] 张全景, 冯小海, 徐虹, 等.  $\epsilon$ -聚赖氨酸在冷鲜猪肉保鲜中的应用[J]. *食品科学*, 2011, 32(2): 290–296.
- Zhang QJ, Feng XH, Xu H, *et al.* Application of  $\epsilon$ -Polylysine to keep chilled pork fresh [J]. *Food Sci*, 2011, 32(2): 290–296.
- [29] Rosfarizan M, Mohamed MS, Nurashikin S, *et al.* Kojic acid: applications and development of fermentation process for production [J]. *Acad J*, 2010, 5: 24–37.
- [30] El-Boulifi N, Ashari SE, Serrano M. Solvent-free lipase-catalyzed synthesis of a novel hydroxyl-fatty acid derivative of kojic acid [J]. *Enzy Microb Technol*, 2014, 55: 128–132.
- [31] Kim H, Choi J, Cho J K, *et al.* Solid-phase synthesis of kojic acid-tripeptides and their tyrosinase inhibitory activity, storage stability, and toxicity [J]. *Bioorg Med Chem Lett*, 2004, 14(11): 2843–2846.
- [32] Emami S, Ghafouri E, Faramarzi MA, *et al.* Mannich bases of 7-piperazinyloquinolones and kojic acid derivatives: synthesis, in vitro antibacterial activity and in silico study [J]. *Eu J Med Chem*, 2013, 68(C): 185–191 .
- [33] Ytemir MD, Özçelik B. A study of cytotoxicity of novel chlorokojic acid derivatives with their antimicrobial and antiviral activities [J]. *Eu J Med Chem*, 2010, 45(9): 4089–4095.
- [34] Rho HS, Lee CS, Ahn SM, *et al.* Studies on tyrosinase inhibitory and antioxidant activities of benzoic acid derivatives containing kojic acid moiety [J]. *Bull Korean Chem Soc*, 2011, 32(12): 4411–4414 .
- [35] Fickova M, Pravdova E, Rondhal L, *et al.* *In vitro* antiproliferative and cytotoxic activities of novel kojic acid derivatives: 5 -benzyloxy-2-selenocyanatomethyl and 5-methoxy-2-selenocyanatomethyl-4-pyranone [J]. *J Appl Toxicol*, 2008, 28(4): 554–559.
- [36] Liu XL, Xia WS, Jiang QX, *et al.* Effect of kojic acid-grafted-chitosan oligosaccharides as a novel antibacterial agent on cell membrane of gram-positive and gram-negative bacteria [J]. *J Biosci Bioeng*, 2015, 120(3): 335–339.
- [37] 李庆鹏, 崔文慧, 郭芹, 等. 曲酸处理对鲜切西兰花品质及生理变化的影响[J]. *核农学报*, 2014, 28(9): 1664–1668.
- Li QP, Cui WH, Guo Q, *et al.* Effects of kojic acid treatment on the quality and physiological changes of fresh-cut broccolis [J]. *J Nucl Agric*, 2014, 28(9): 1664–1668.
- [38] 何世微, 陶毅明, 王贵平, 等. 曲酸对菠萝蜜多酚氧化酶的抑制作用和抑菌实验[J]. *食品工业科技*, 2015, 36(11): 159–161, 166.
- He SW, Tao YM, Wang GP, *et al.* Inhibitory effect of kojic acid on polyphenol oxidase from jackfruit and its antibacterial experiment [J]. *Food Ind Sci Technol*, 2015, 36(11): 159–161, 166.
- [39] 李鹤, 马力, 王维香. 溶菌酶的研究现状[J]. *食品研究与开发*, 2008, 29(1): 182–185.
- Li H, Ma L, Wang WX. Utilization of lysozyme research [J]. *Food Res Devel*, 2008, 29(1): 182–185.
- [40] Laurents DV, Baldwin RL. Characterization of the unfolding pathway of hen egg white lysozyme [J]. *Biochemistry*, 1997, 36(6): 1496–1504.
- [41] Abdou AM, Higashiguchi S, Abouelein AM, *et al.* Antimicrobial peptides derived from hen egg lysozyme with inhibitory effect against *Bacillus species* [J]. *Food Cont*, 2007, 18(2): 173–178.
- [42] Jolles P. Lysozymes: A chapter of molecular biology [J]. *Angewandte Chem*, 1969, 8(4): 227–239.
- [43] 冯叙桥, 范林林, 韩鹏祥, 等. 溶菌酶涂膜对鲜切“寒富”苹果的贮藏保鲜作用研究[J]. *现代食品科技*, 2014, 30(11): 125–132.
- Feng XQ, Fan LL, Han PX, *et al.* Effect of lysozyme coatings on the storage and preservation of fresh-cut “Hanfu” apples [J]. *Mod Food Sci Technol*, 2014, 30(11): 125–132.
- [44] 任西营, 胡亚芹, 胡庆兰, 等. 溶菌酶在水产品防腐保鲜中的应用[J]. *食品工业科技*, 2013, 8(34): 390–394.

- Ren XY, Hu YQ, Hu QL, *et al.* Application of lysozyme in preservation of aquatic products [J]. *Food Ind Sci Technol*, 2013, 8(34): 390–394.
- [45] 张璟晶, 唐劲松, 王海波, 等. 溶菌酶、Nisin、壳聚糖复合保鲜剂对冰鲜银鲳保鲜效果的研究[J]. *食品工业科技*, 2014, 35(4): 323–326.
- Zhang JJ, Tang JS, Wang HB, *et al.* The combined use of lysozyme, nisin and chitosan for the preservation of iced pomfret [J]. *Food Ind Sci Technol*, 2014, 35(4): 323–326.
- [46] Xin JY, Cheng DD, Zhang LX, *et al.* Methanobactin-mediated one-step synthesis of gold nanoparticles [J]. *Int J Molecul Sci*, 2014, 14(11): 21676–21688.
- [47] Kim HJ, Graham DW, DiSpirito AA, *et al.* Methanobactin, a copper-acquisition compound from methane-oxidizing bacteria [J]. *Science*, 2004, 305: 1612–1615.
- [48] Alan A, Zahn JA, Graham DW, *et al.* Methanobactin: a copper-binding compound having antibiotic and antioxidant activity isolated from methanotrophic bacteria [P]. USA, 2006-07.
- [49] Johnson CL. Methanobactin: a potential novel biopreservative for use against the foodborne pathogen *Listeria monocytogenes* [D]. Ames: Iowa State University, 2006: 85–86.
- [50] 岳昊博, 岳喜庆, 李靖, 等. 纳他霉素(Natamycin)的特性、应用及生产和研究状况[J]. *食品科技*, 2007, 32(3):162–166.
- Yue HB, Yue XQ, Li J, *et al.* The properties and application of natamycin and its production and advanced research [J]. *Food Sci Technol*, 2007, 32(3):162–166.
- [51] Delves-broughton J, Thomas I V, Williams G. Natamycin as an antimycotic preservative on cheese and fermented sausages [J]. *Food Aust*, 2006, 58: 19–21.
- [52] 魏泉德, 余新炳. 抗菌肽的原核表达及应用前景[J]. *国际医学寄生虫病杂志*, 2006, 33(4): 206–211.
- Wei QD, Yu XB. Prokaryotic expression of antimicrobial peptides and its potential applications [J]. *Int J Med Parasit Dis*, 2006, 33(4): 206–211.
- [53] Shudan W, Fengrui Z, Zhimin H, *et al.* Effects of the antimicrobial peptide cecropin AD on performance and intestinal health in weaned piglets challenged with *Escherichia coli* [J]. *Peptides*, 2012, 35: 225–230.
- [54] Talarico TL, Casas IA, Chung TC, *et al.* Production and isolation of reuterin, a growth inhibitor produced by *Lactobacillus reuteri* [J]. *Antimicrob Agent Chem*, 1988, 32(12): 1854–1858.
- [55] 黄廷钰. 嗜杀酵母 Killer Yeast 的杀伤性质和酵母的病毒假说[J]. *微生物学杂志*, 1992, 12(1): 67–69.
- Huang TY. Killing properties of Killer Yeast and the viral hypothesis of yeast [J]. *J Microbiol*, 1992, 12(1): 67–69.

(责任编辑: 杨翠娜)

### 作者简介



邢海丽, 硕士研究生, 主要研究方向为食品化学。

E-mail: 841084208@qq.com



辛嘉英, 博士, 龙江学者特聘教授, 博士生导师, 主要研究方向为生物催化。

E-mail: xinjiayingvip@163.com