DOI:10.12441/spyswjs.20240423001 [文章编号] 1673-1689(2025)01-0013-11

溶菌酶在食品保鲜及贮藏中的应用研究进展

陈启蓉[1,2,3] 王 武[1,2,3] 白 瑜[1,2,3*]

(1. 陕西理工大学生物科学与工程学院,陕西 汉中 723001; 2. 陕西理工大学陕南秦巴山区生物资源综合开发协同创新中心,陕西 汉中 723001; 3. 陕西理工大学陕西省资源生物重点实验室,陕西 汉中 723001)

摘要:溶菌酶是一种分布广泛的天然抗菌酶,能选择性水解细菌细胞壁,并使其失去活性。在食品工业,溶菌酶可作为一种安全的食品防腐剂应用于食品保鲜。作者介绍了溶菌酶的理化性质、抑菌作用机理以及各种因素对其抑菌活性的影响,并综述了溶菌酶在各类食品保鲜、贮藏过程中的应用进展,以及与高压超声波处理技术、控释包装技术、气调包装技术等保鲜技术结合的应用进展,为开发新颖、绿色、安全的防腐剂提供参考。

关键词:溶菌酶;抑菌活性;天然食品防腐剂;保鲜

Research Progress on the Application of Lysozyme in Food Preservation and Storage

CHEN Qirong[1,2,3] *WANG Wu*[1,2,3] *BAI Yu*[1,2,3*]

(1. College of Biological Sciences and Engineering, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723001, China; 2. Collaborative Innovation Center for Comprehensive Development of Bioresources in Qinba Mountain Area, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723001, China; 3. Shaanxi Key Laboratory of Bio-resources, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723001, China)

Abstract: Lysozyme, a natural antibacterial enzyme widely existing in nature, can selectively hydrolyze the bacterial cell wall to make it inactive. Lysozyme could be used as a safe food preservative in the food industry. Lysozyme was introduced from physicochemical properties, antibacterial mechanism, and influences of various factors on the antibacterial activity. The application progress of lysozyme in the fresh-keeping and storage of various food products, as well as the application progress of lysozyme in combination with high-pressure ultrasonic treatment, controlled release packaging, and air-conditioned packaging, was reviewed, which provided a basis for the development of new, green, and safe preservatives.

Keywords: lysozyme; antibacterial activity; natural food preservative; preservation

1922 年,亚历山大·弗莱明(Alexander Fleming)在一次感冒时首次发现了溶菌酶,他意外地发现鼻腔黏液可以溶解培养基上的细菌,经对比发现,鼻腔黏液中含有溶菌作用因子,进一步的试验证实了该溶菌作用因子是一种有抗菌活性的酶,故称其为溶菌酶(lysozyme,EC 3.2.1.17)[1]。研究表明,溶菌酶是一种天然抗菌蛋白质,大量存在于眼泪、唾液、血清、牛奶、禽类蛋清、某些细菌和噬菌体中[2-3]。溶菌酶通过水解革兰氏阳性细菌细胞壁肽聚糖多糖骨架中的N-乙酰胞壁酸(N-acetylmuramic acid,NAM)和N-乙酰氨基葡萄糖(N-acetylglucosamine,NAG)之间的β-1,4-糖苷键来发挥作用[2,4]。溶菌酶作为天然防腐剂已广泛应用于医疗和制药工业,在食品工业中广泛应用

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(31702206);陕西理工大学研究生创新基金项目(SLGYCX2446)。

通信作者:白瑜(1980—),女,博士,副教授,硕士研究生导师,主要从事溶菌酶的改造及抑菌作用研究。E-mail:baiu@snut.edu.cn

收稿日期:2024-04-23 **修回日期:**2024-09-20

于食品的保鲜。例如鸡蛋清溶菌酶（hen egg white lysozyme，HEWL），它是从鸡蛋清中提取的天然溶菌酶，因HEWL来源丰富可靠，已广泛应用于水果、蔬菜、肉类、饮料和乳制品等食品的保鲜防腐领域。

1 溶菌酶的结构、种类及性质

溶菌酶即胞壁质酶或N-乙酰胞壁质聚糖水解酶，属于葡萄糖苷酶。溶菌酶是一种单肽链碱性球蛋白，其分子结构的稳定性主要依赖于肽链的8个半胱氨酸残基中的4个二硫键[5]。Phillips等[6]在1965年使用X射线晶体结构分析法阐明了溶菌酶的三维结构。溶菌酶内部几乎都为非极性，疏水力是溶菌酶构象折叠中的重要驱动力[3]。溶菌酶的活性位点由谷氨酸35（Glu35）和天冬氨酸52（Asp52）组成，该活性位点在溶菌酶催化活性中起着重要作用[4]。

溶菌酶广泛分布于病毒、细菌、真菌、植物（如木瓜）、鸟类和哺乳动物的各种组织和体液（如禽蛋和动物分泌物，包括眼泪、唾液、呼吸道和宫颈分泌物）中[5]。根据氨基酸序列、结构、理化和免疫学特性的差异，溶菌酶分为3种主要类型：c型（包括鸡型溶菌酶和人溶菌酶）、g型（鹅型溶菌酶）和i型（无脊椎动物型溶菌酶）[7]。此外，还有噬菌体型、细菌型和植物型溶菌酶[8]。c型溶菌酶是用于酶学和结构生物学研究的模型蛋白质，其中人溶菌酶和HEWL的研究最为广泛。HEWL含有129个氨基酸，相对分子质量为14 300；人溶菌酶由130个氨基酸残基组成，相对分子质量为14 600。人溶菌酶的溶菌活性比HEWL高3倍[9]，但人溶菌酶的来源有限，导致其在食品工业中的实际应用受到限制。

蛋清溶菌酶是目前结构研究较为深入的一种溶菌酶，占蛋清蛋白总量的3.4%~5.8%[9]。其纯品为白色或微黄色的结晶体或无定形粉末，无特殊气味，口感微甜，易溶于水，不溶于丙酮、乙醚[10]。HEWL等电点为11.1，最适温度为50 ℃，最适pH为6.0~7.0，分子内129个氨基酸通过4个不同位置的二硫键交联[11]，因此溶菌酶稳定性较好。

2 溶菌酶抑菌机理

细菌细胞壁由重复二糖基序NAM和NAG组成的肽聚糖链组成，包裹细菌使其结构完整，并具有良好的细胞膨胀压力保护。溶菌酶通过水解NAM和NAG之间的β-1，4-糖苷键来分解细菌细胞壁，导致其完整性丧失、细菌细胞裂解并死亡[4]。革兰氏阳性菌细胞壁由肽聚糖层（约40层）组成，无外膜[12]，但革兰氏阴性菌细胞壁外层是由脂多糖、脂双层和脂蛋白等构成的外膜包裹，阻碍了溶菌酶对肽聚糖的裂解，因此溶菌酶对革兰氏阴性菌的杀菌效果不明显。

溶菌酶除了通过水解酶作用来发挥其抑菌活性外，还具有非酶抑菌活性。在改良的蛋清溶菌酶中，酶活性的丧失表明抗菌活性的作用机制不依赖于酶活性[13]，蛋清溶菌酶的热变性使构象发生变化，导致其表面疏水性氨基酸残基增加，并具有阳离子特性，增强了溶菌酶对革兰氏阴性菌的抑菌活性。溶菌酶作为一种阳离子蛋白质，可以通过蛋白质与细菌细胞膜成分（磷脂）之间的静电相互作用在细菌细胞膜上形成孔隙，并在不水解肽聚糖的情况下诱导细胞膜发生渗漏而导致细胞裂解[14]。

3 影响溶菌酶活性的因素

3.1 温度

周钦育等[15]研究表明，溶菌酶在20~60 ℃时具有很好的热稳定性，酶活力在78%以上，且随温度的升高而提高，在60 ℃时达到最高值，当温度高于60 ℃时，酶活力会随温度的升高而下降。王涵等[16]也发现，当温度升高至72 ℃时，驴乳溶菌酶的酶活力开始显著下降。在低温范围内，随着温度的上升，分子运动加快，反应速度提高，而当温度过高时，随着反应温度的升高，溶菌酶开始变性失活，使得酶活力下降。然而，温度的升高可破坏酶分子内的非共价键相互作用力（氢键、范德华力和疏水作用力等），导致酶分子结构发生变化，从而表现出增强的抑菌活性。Vilcacundo等[13]研究发现，在120 ℃、pH 6.0的条件下，对蛋清溶菌酶进行变性处理可提高其对革兰氏阴性菌的抑菌活性。

3.2 pH

溶菌酶在偏酸性及中性的环境下稳定性较好，而在碱性环境下不稳定。周钦育等[15]研究发现，溶菌酶在pH为4.0~7.0时的酶活力保持在88%以上；在pH 8.0的生理盐水中处理90 min后，其酶活力降低至80%；在pH 9.0的生理盐水中处理90 min后，其酶活力降低至65%。以溶壁微球菌

（*Micrococcus lysodeikticus*）为底物，溶菌酶的酶活力随pH的升高呈先升后降的趋势，在pH为7.0时，溶菌酶的酶活力最高。pH的改变容易引起溶菌酶带电状态的改变，从而导致溶菌酶的酶活力发生变化。在强酸条件下，溶菌酶可形成淀粉样纤维，且与细菌的静电相互作用增强，从而提高了抑菌活性[17]。李颖等[18-19]发现，在pH 2.0的条件下，蛋清溶菌酶形成的淀粉样纤维对革兰氏阳性菌和革兰氏阴性菌均有较强的抑菌效果。

3.3　压力

溶菌酶的空间结构会在压力作用下发生改变，促使活性中心暴露，从而提高了酶活力。但是，当压力进一步增加时，破坏了酶活性中心或使溶菌酶变性，则酶活力降低。Tribst等[20]发现，在300~400 MPa的压力下处理溶菌酶，可诱导溶菌酶的酶活力增加；而当压力为600 MPa时，溶菌酶的酶活力急剧降低。

3.4　加工过程

加工过程中的热处理可导致溶菌酶变性或聚集，影响其活性和稳定性。非热加工技术中高压冷大气等离子体（high-voltage cold atmospheric plasma，HV-CAP）处理和超声波处理也会改变溶菌酶的酶活力[21]。等离子体产生的反应物质、离子、电子、中性物质、带电粒子和光子等会导致溶菌酶失活；超声诱导的空化效应可产生物理剪切力、湍流和微流化等作用，影响了溶菌酶的活性和结构。

3.5　化学物质

化学物质会使蛋清溶菌酶的酶活力降低，但有助于革兰氏阴性菌的抑菌活性提高。Ooi等[22]研究表明，ClO_2可以通过改变蛋白质的构象和降解蛋白质导致溶菌酶失活。在ClO_2气体环境下，溶菌酶的酶活力随着时间的延长逐渐下降，且随着ClO_2浓度的升高，下降幅度逐渐增加。Levashov等[23]发现，经苯甲醛和茴香醛修饰的蛋清溶菌酶对革兰氏阴性菌的抑菌活性较高。

3.6　金属离子

溶菌酶是一种带正电荷的阳离子蛋白质，其活性受离子强度的影响，且随着离子强度的增加而增强。刘亚楠[24]和周钦育等[15]研究表明，Na^+、Ca^{2+}能够显著提高溶菌酶的酶活力；K^+对提高溶菌酶的酶活力作用较弱；而Zn^{2+}能够显著降低溶菌酶的酶活力；其他金属离子（Mg^{2+}、Mn^{2+}）对溶菌酶的酶活力无明显影响。Wawer等[25]研究发现，Al^{3+}可促进蛋清溶菌酶纤维化。不同因素对溶菌酶的活性影响见表1。温度、pH和压力在一定范围内使溶菌酶的活性表现出先升后降的趋势，温度和pH超过该范围后酶活力降低。另外，加工过程和某些化学物质会使酶活力降低，但在一定条件下溶菌酶的抑菌活性提高，如一些物质会改变酶结构使抑菌活性提高。此外，不同金属离子对酶活力的影响不同。

表1　不同因素对溶菌酶的活性影响

Table 1　Influence of different factors on the activity of lysozyme

影响因素		抑菌活性/酶活力	参考文献
温度	20~60 ℃	酶活力随温度的升高而提高	[15]
	>60 ℃	酶活力降低，抑菌活性提高	[13,15-16]
pH	pH 2.0	形成淀粉样纤维，抑菌活性提高	[17-19]
	pH 4.0~7.0	酶活力随pH的升高而提高	[15]
	pH>7.0	酶活力降低	[15]
压力	300~400 MPa	酶活力随压力的增加而提高	[20]
	600 MPa	酶活力降低	[20]
加工过程	HV-CAP	酶活力降低	[21]
	超声波处理	酶活力降低	[21]
化学物质	ClO_2	酶活力降低	[22]
	苯甲醛和茴香醛	抑菌活性提高	[23]
金属离子	Na^+、Ca^{2+}、K^+	酶活力提高	[15,24]
	Zn^{2+}	酶活力降低	[15,24]

4 溶菌酶在食品保鲜中的应用

由于溶菌酶较优的生物安全性和较强的抑菌活性，目前已被纳入欧盟食品添加剂标准（E1105），且被美国食品药品监督管理局（Food and Drug Administration，FDA）认证为公认安全（generally recognized as safe，GRAS）的食品成分。中华人民共和国国家卫生健康委员会在2010年根据《中华人民共和国食品安全法》和《食品添加剂新品种管理办法》的规定，批准溶菌酶为食品添加剂。GB 1886.257—2016《食品安全国家标准 食品添加剂 溶菌酶》对食品添加剂溶菌酶的感官要求、理化指标和微生物指标做了规定。GB 2760—2024《食品安全国家标准 食品添加剂使用标准》对溶菌酶的适用范围和用量也做了相应的规定。溶菌酶是天然生物防腐剂，在食品保鲜中具有一定的优势。溶菌酶有良好的防腐保鲜效果，可有效提高食品品质，且无毒性、天然无污染、使用量较少，有利于降低成本。溶菌酶是一种稳定性强的蛋白质，溶于水后也能保持稳定的酶活力，并且食品的冷冻或干燥处理不影响其酶活力。溶菌酶可在不破坏食品中其他物质成分的基础上抑制细菌生长。研究表明，溶菌酶在肉制品、乳制品、水产品、低度酒及饮料、果蔬和食品包装材料等多个领域的应用研究中均展现出较好的抑菌活性。

4.1 溶菌酶在肉制品中的应用

周典[26]将溶菌酶-百里香精油脂质体应用于牛肉保鲜中，发现其可延缓牛肉后熟及脂肪氧化，降低了牛肉中挥发性盐基氮（total volatile base nitrogen，TVB-N）的含量，保鲜效果较好。朱亚等[27]将质量分数1.5%的溶菌酶和质量分数0.5%的茶多酚复合作用于肉类保鲜，有效抑制了微生物生长以及抑制TVB-N含量和过氧化值的上升，延缓了鲜肉的腐败变质，使鲜肉保质期延长了3~6 d。刘琨毅等[28]将不同浓度的溶菌酶与乳铁蛋白混合，制成可食性涂膜液，将其对冷却牦牛肉进行涂膜保鲜处理。结果表明，当溶菌酶质量分数为0.371%、乳铁蛋白质量分数为0.492%时，在pH 6.01、处理时间28.68 min的条件下，该涂膜液保鲜效果较好。刘娜等[29]用质量分数0.08%的溶菌酶、质量分数1.5%的壳聚糖和质量分数1.5%的海藻酸钠浸渍切片腌腊肉，沥干并包装后于低温条件下贮藏，发现其菌落总数降低，杀菌效果显著。杨琴[30]研究发现，将397 mg/L的溶菌酶、66.8 mg/L的山梨酸钾、2 470 mg/L的脱氢乙酸钠和392 mg/L的乳酸链球菌素进行复配，可有效抑制引起泡椒凤爪胀袋的兼性厌氧产气微生物。

4.2 溶菌酶在乳制品中的应用

溶菌酶是一种非特异性免疫因子，人乳中溶菌酶含量极高，而牛乳中含量较少。因此，将溶菌酶添加到牛乳及其相关产品中，可使牛乳更接近于人乳。该方法不仅可以促进肠道内双歧杆菌的增殖，还可抑制肠道中腐败微生物的生长，促进肠道菌群正常化。将溶菌酶添加到婴幼儿乳粉中，不仅能延长保质期，还能促进婴幼儿胃肠内的乳酪蛋白形成微细凝乳，提高婴幼儿消化吸收的效率，预防消化器官疾病，增强机体免疫力[31]。

Sozbilen等[32]研究表明，溶菌酶与乳酸链球菌素联合使用可有效灭活牛奶中的李斯特菌，提高牛奶的安全性。Lopes等[33]将溶菌酶与乳酸链球菌素封装在果胶包被的磷脂酰胆碱（phosphatidyl cholines，PC）脂质体中，在37 ℃下使全脂牛奶中的李斯特菌减少了2 lg（CFU/mL），脱脂牛奶中减少了5 lg（CFU/mL）。此外，该脂质体的处理后的脱脂牛奶在冷藏温度下的李斯特菌数量可降低到检测限以下，且持续时间长达25 d。

在乳制品工业中，溶菌酶可应用于奶酪制作，以抑制腐败细菌的生长。有研究者[34]用溶菌酶和乳过氧化物酶系统来延长印度尼西亚软乳奶酪保质期，结果表明，与浸泡在无菌纯水中的奶酪样品相比，经溶菌酶处理的奶酪样品的微生物生长受到抑制，细菌总数最少。Mehyar等[35]发现含有质量分数60%溶菌酶的壳聚糖涂层延长了哈洛米奶酪的保质期。Jalilzadeh等[36]将溶菌酶-黄原胶添加至乳清蛋白基食用薄膜中，研究其对超滤白奶酪保质期的影响，结果发现，该食用薄膜可显著抑制产黄青霉菌、大肠杆菌（O157∶H7）和金黄色葡萄球菌的生长。

4.3 溶菌酶在水产品中的应用

溶菌酶对引起水产品污染的枯草杆菌、耐辐射微球菌、大肠杆菌、普通变形菌和副溶血性弧菌有良好的抑制效果，可作为水产品的防腐保鲜剂。Sun等[37]发现溶菌酶处理显著降低了草鱼片中希瓦氏菌和不动杆菌的占比，溶菌酶与植酸联合处

理显著降低了草鱼片中假单胞菌的占比。吕艳霞等[38]发现质量分数4%的溶菌酶、质量分数0.75%的丁香酚和质量分数2%的乳酸链球菌素复合生物保鲜剂在pH 5.5、浸泡60 min时，可有效延长蒸煮贻贝的保藏期。Ding等[39]也发现，溶菌酶与丁香酚复配使用可有效抑制调味鱼片肌原纤维蛋白的变性和氧化分解，延长了鱼片的货架期。刘通[40]用含有0.5 g/kg溶菌酶、0.25 g/kg ε-聚赖氨酸和0.45 g/kg茶多酚的复配生物防腐剂处理黄颡鱼，发现该方法能有效抑制黄颡鱼的优势腐败菌（腐败希瓦氏菌、嗜水气单胞菌），且冷藏保鲜期由6~8 d延长至10~12 d。周枫等[41]用质量分数0.40%的溶菌酶、质量分数0.25%的原花青素和质量分数0.025%的VC复合防腐剂处理鳙鱼鱼糜，使鱼糜在4 ℃贮藏条件下的保鲜期长达9 d。

张泽凌等[42]为了能更好地保持海捕鱼在冷链运输中的鱼体鲜度，延长鱼体僵硬期，使用生物保鲜剂对白姑鱼进行保鲜试验，结果表明0.3 g/L溶菌酶、3.0 g/L茶多酚和10.0 g/L壳聚糖能有效抑制细菌生长，抑制TVB-N和硫代巴比妥酸（thiobarbituric acid，TBA）含量增长。Xu等[43]用溶菌酶联合肉桂醛处理橄榄比目鱼片，于4 ℃冷藏20 d，发现溶菌酶联合肉桂醛保鲜处理增强了溶菌酶对腐烂链球菌和荧光假单胞菌的抗菌活性，显著抑制了微生物的生长及蛋白质的降解，并具有良好的抗氧化作用，延缓了脂质氧化。武娇等[44]以溶菌酶和茶多酚为添加剂，制备出原位合成纳米SiO_x/壳聚糖涂膜，对海鲈鱼片进行涂膜处理，有效抑制了微生物的生长繁殖，使货架期延长了8~10 d，延缓了脂肪氧化和蛋白质降解。凌泽兴等[45]发现，235.0 mg/kg溶菌酶、367.5 mg/kg ε-聚赖氨酸和375.0 mg/kg乳酸链球菌素的复合保鲜剂能够显著抑制引起海鲶鱼肉腐败的枯草芽孢杆菌的生长，在4 ℃可使海鲶鱼肉的货架期延长1倍。姜晨[46]研究发现，0.6 g/L溶菌酶、4.9 g/L乙酸钠和6.4 g/L甘氨酸的复配液对三文鱼中主要致病菌（李斯特菌）的抑制效果较强，能防止三文鱼腐败变质，延长货架期。Palotás等[47]用酸性电解氧化水（acidic electrolyzed-oxidizing water，AEO）和质量分数0.5%的溶菌酶处理鲤鱼片，有效延长了样品的保质期。Khodanazary[48]将溶菌酶和石榴皮提取物（pomegranatepeel extract，PPE）与明胶-聚己内酯（gelatin-polycaprolactone，G-PCL）复合膜结合，该复合膜显著延缓了鲭鱼片中的细菌生长，降低了冷藏鲭鱼的硫代巴比妥酸反应物（thiobarbituric acid reactive substances，TBARS）值和游离脂肪酸（free fatty acid，FFA）值，使鲭鱼片保质期延长至9 d。

4.4 溶菌酶在低度酒与饮料中的应用

溶菌酶在饮料保鲜中具有一定的防腐效果。在发酵饮料生产中，溶菌酶可有效调节各种微生物的生长、发酵以及抑制有害微生物的增殖。将溶菌酶用于葡萄酒生产中，可调节乳酸菌的发酵，有利于高质量产品的持续生产，也可增加葡萄酒的起泡性，并使一些葡萄酒（特别是红葡萄酒）更加澄清。鲜啤酒是未经巴氏灭菌就直接灌装的生啤酒，保质期短。付博等[49]在鲜啤酒中添加0.3 g/L溶菌酶，有效抑制了鲜啤酒中的大肠菌群生长，能在保证鲜啤酒感官质量的同时有效延长其保质期。Sozbilen等[50]在土耳其发酵饮料Boza中添加了溶菌酶和乳酸链球菌素，在不影响其特征香气和风味的情况下，有效控制了乳酸菌的生长，延缓了酸性腐败过程。

在果酒的生产中，SO_2可用于抑制不良微生物的生长繁殖以及控制酒体的氧化变质，但过量的SO_2不仅会影响果酒的质量和口感，还会危害人体健康[51]。溶菌酶因其抗菌、抗氧化作用，可成为SO_2的有效替代物，减少SO_2在果酒中的使用量，并且溶菌酶与SO_2联合使用有利于形成果酒香气成分，使果酒口感更加丰富。李蜜月[52]研究表明，在罗汉果酒的制备过程中，用溶菌酶替代SO_2加入罗汉果酒中，不会抑制酵母的活力，还能促进果酒发酵。质量分数0.04%的溶菌酶还可将罗汉果浆中的纤维素降解成发酵所需的葡萄糖，增加果酒中的乙醇产量。

4.5 溶菌酶在果蔬中的应用

溶菌酶可有效抑制果蔬表皮微生物的生长，防止果蔬腐烂变质，保证果蔬的风味品质，延长货架期。张自森[53]用浸涂法对红提进行溶菌酶涂层处理，处理后的红提在22 ℃、相对湿度38%的条件下可保存半个月。李卉[54]研究发现，质量分数0.05%的溶菌酶与1 g/L植酸复配使用能抑制水蜜桃果实的采后呼吸作用，较好地保持采后品质。Niu等[55]使用溶菌酶、琥珀酸酐和壳聚糖制备出溶

菌酶-N-琥珀酰壳聚糖（lysozyme-N-succinyl chitosan，LSZ-NSC）复合物，使溶菌酶的活性提高了256%。将LSZ-NSC应用于草莓保鲜中，草莓保质期延长了3 d。程江双[56]以没食子酸作为改性剂，对溶菌酶进行化学改性，显著增强了其对大肠杆菌、沙门氏菌、金黄色葡萄球菌和枯草芽孢杆菌的抑制效果，将改性后的溶菌酶应用于草莓保鲜，效果良好。付亮等[57]将溶菌酶和纳米包装材料结合，显著提高了猕猴桃果实的贮藏品质。刘荣[58]利用溶菌酶与半胱氨酸之间的还原反应制备出了一种相转变溶液，将果胶加入该相转变溶液中来浸涂鲜切水果，有效降低了鲜切水果的呼吸作用和褐变程度，延长了鲜切水果的保存期，且细胞毒性试验和动物试验的安全性评价表明其没有毒性作用。

4.6 溶菌酶在其他食品中的应用

邓杰[59]将0.25 g/L溶菌酶应用于活体螺旋藻的保鲜，螺旋藻中过氧化氢酶（CAT）、过氧化物酶（POD）的活性和叶绿素浓度均较高，菌落总数较少，保鲜9 d后，重新接种的螺旋藻生长状况较好。赵迪等[60]在面包生产中添加溶菌酶来提高面包的保藏效果，结果表明，质量分数0.08%~0.16%的溶菌酶能抑制微生物生长，延长面包的货架期。马荣琨等[61]发现，面包中添加质量分数0.12%的溶菌酶、质量分数0.11%的地茶多酚、质量分数0.08%的纳他霉素和质量分数0.15%的地鱼精蛋白后在37 ℃下可保存7 d，在25 ℃下可保存17 d。刘巧等[62]用0.03 g/dL溶菌酶与9 g/dL聚乙烯醇的复合涂膜剂对清洗后的鸡蛋进行涂膜保鲜，于常温储藏45 d，鸡蛋的蛋黄指数高、失重率低，且新鲜度较高。Hashemi等[63]通过美拉德反应制备了溶菌酶-阿拉伯胶复合物和溶菌酶-黄原胶复合物，2种复合物均有效杀灭了蛋黄酱中的金黄色葡萄球菌和大肠杆菌。贺燕等[64]用含有0.185 2 g/kg溶菌酶、0.054 1 g/kg ε-聚赖氨酸和0.066 3 g/kg乳酸链球菌素的复配防腐剂处理鸡蛋干，有效抑制了鸡蛋干中的腐败菌，使菌落总数减少了99.07%。

4.7 溶菌酶在食品包装材料中的应用

抗菌包装可避免抗菌剂与食品成分直接接触，能有效抑制病原微生物的生长、延缓食品腐败和延长产品的保质期，更好地保持食品质量和安全性。张自森[53]利用溶菌酶与三（2-羧乙基）膦盐酸盐之间的还原反应，使溶菌酶在中性缓冲液中通过自组装相转变黏附在常用包装膜的表面形成溶菌酶涂层，将其应用于鲜奶包装，可快速抑制鲜奶中大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的生长。Silva等[65]利用支链淀粉和溶菌酶纳米纤维组成均匀、透明、有光泽的纳米复合薄膜，当溶菌酶纳米纤维质量分数为15.0%时，对金黄色葡萄球菌的抗菌效果最强。Li等[66]制备了掺入溶菌酶的壳聚糖-海藻酸钠可食用双层膜，该膜对鱼类腐败细菌（荧光假单胞菌、腐烂希瓦氏菌）的抗菌性能较好。

5 溶菌酶与其他技术结合的应用

5.1 溶菌酶与超高压技术

超高压技术是一种安全有效的物理冷杀菌技术，具有良好的减菌钝酶作用，但是在维持产品感官品质方面具有一定的局限性。邹小欠等[67]将天然保鲜剂与超高压技术相结合，用质量分数0.005%的溶菌酶、质量分数0.05%的茶多酚、质量分数0.005%的乳酸链球菌素和质量分数0.005%的ε-聚赖氨酸复合保鲜液联合300 MPa超高压处理腌制生食泥螺，该方法显著降低了腌制生食泥螺在冷藏期间的菌落总数，并延缓了TVB-N值和TBARS值的上升。

5.2 溶菌酶与智能控释包装技术

智能控释包装技术通过包装材料对包装内部环境和食品质量进行感应，包括与微生物生长相关的食品特性、包装顶空或储存环境条件，以此控制抗菌剂等活性物质的释放，从而优化抗菌效果、保证食品质量，是一项食品保鲜领域的新兴技术。Ozer等[68]将溶菌酶-聚丙烯酸复合物加入亲水性乳清蛋白分离物基质中，形成活性食品包装薄膜，该方法可通过pH变化释放溶菌酶，达到持久抗菌的效果。

5.3 溶菌酶与气调包装技术

气调包装技术通过调节包装内部环境中的气体组分来抑制食品腐败变质。Ajourloo等[69]评估了溶菌酶和野姜精油（*Zingiber cassumunar* essential oil，ZCEO）对巴尔干式新鲜香肠的保鲜效果，将含有溶菌酶和ZCEO的新鲜香肠在气调包装下冷藏13 d。结果表明，含有400 μg/g溶菌酶和体积分数0.3% ZCEO的香肠在冷藏期间的微生物增长速度慢于对照组，且在贮藏期结束时，样品

中的李斯特菌数量显著降低。有研究者[70]在高温酸性环境下对溶菌酶进行热化学改性，发现改性溶菌酶结合气调包装显著延长了猪肉的保质期。

5.4 溶菌酶与酶固定化技术

酶固定化技术是通过物理或化学手段将酶与不溶于水的大分子载体相连接，或将酶包裹于载体内部，从而降低酶的流动性，该方法可提高酶的稳定性和活性，并使其具有重复使用性。李慧等[71]以还原氧化石墨烯（reduced graphene oxide，RGO）作为载体，对溶菌酶进行固定化，结果表明，固定化酶的抑菌性、热稳定性、耐酸碱性和贮存稳定性均有提高。孙玥[72]用改性山药淀粉固载溶菌酶，以此为原料制备可食性抑菌膜，结果表明，该抑菌膜可抑制草莓表面微生物繁殖，有效延长了草莓的贮藏期。张道瑞[73]以新型二维纳米材料MXene固载溶菌酶，构建抗菌纳米复合物，并联合光热效应研究其在25 ℃条件下对贮藏牛奶和熟猪肉的抗菌保鲜效果。研究结果表明，联合808 nm激光照射可以有效杀灭牛奶中的耐甲氧西林金黄色葡萄球菌（methicillin-resistant *Staphylococcus aureus*，MRSA），延缓牛奶品质恶化。将该抗菌纳米复合物与海藻酸钠溶液混合制成涂膜保鲜液，将其涂抹于熟猪肉表面，激光照射后可以显著降低MRSA的菌落数，延缓熟猪肉的腐败变质。

5.5 溶菌酶的修饰与改性

溶菌酶作为天然防腐剂，对革兰氏阳性菌的抑菌效果显著，而对革兰氏阴性菌几乎没有抑菌效果。为提高溶菌酶的抑菌效果，常通过物理、化学和生物方法对其进行修饰与改性。物理改性主要通过热[74]、高压等处理，改变蛋白质二级结构和聚集状态，通过暴露更多活性位点来提高溶菌酶的抑菌活性。化学修饰通过利用小分子或大分子化合物，对酶分子的侧链氨基酸基团进行改造[75]，如乙酰化、磷酸化、糖基化、酯化和琥珀酰化等。生物改性直接将疏水肽或抗菌肽引入酶分子结构中，增强抑菌活性。修饰与改性有助于增强溶菌酶对革兰氏阴性菌的抑菌活性，但其食用安全性有待进一步研究。

6 展望

食品防腐技术是食品工业中的重点，制备安全且抑菌作用强的防腐剂是食品工业研究的热点。溶菌酶由于其独特的生物学性质，在代替化学防腐剂方面有较好的开发前景，很多研究证实，将溶菌酶与其他防腐剂复配使用具有较好的保鲜效果。然而，溶菌酶在使用中也存在缺点：一方面，溶菌酶是从鸡蛋蛋清中提取获得，提取和制备方法（盐结晶、超滤和层析等）会影响溶菌酶的纯度，进而会影响其稳定性；另一方面，蛋清溶菌酶可能会引起蛋类过敏人群的过敏症状。近年来，越来越多的研究聚焦于溶菌酶的改性或修饰，旨在提高其抗菌性能。然而，目前对于改性或修饰溶菌酶的安全性评价研究较少。未来研究应加强安全性评估，深入研究改性或修饰溶菌酶在体内的残留情况、细胞毒性及其对人类健康的潜在风险，为溶菌酶在食品领域的应用提供理论依据。

参考文献

[1] FLEMING A. On a remarkable bacteriolytic element found in tissues and secretions[J]. Proceedings of the Royal Society of London Series B, 1922, 93(653): 306-317.

[2] SYNGAI G G, AHMED G. Lysozyme: a natural antimicrobial enzyme of interest in food applications[M]. London: Academic Press, 2019: 169-179.

[3] LESNIEROWSKI G, STANGIERSKI J. What's new in chicken egg research and technology for human health promotion?: a review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2018, 71: 46-51.

[4] PRIMO E D, OTERO L H, RUIZ F, et al. The disruptive effect of lysozyme on the bacterial cell wall explored by an in-silico structural outlook[J]. Biochemistry and Molecular Biology Education, 2018, 46(1): 83-90.

[5] WU T T, JIANG Q Q, WU D, et al. What is new in lysozyme research and its application in food industry? A review[J]. Food Chemistry, 2019, 274: 698-709.

[6] PHILLIPS D C. The three-dimensional structure of an enzyme molecule[J]. Scientific American, 1966, 215(5): 78-90.

[7] RAGLAND S A, CRISS A K. From bacterial killing to immune modulation: recent insights into the functions of lysozyme[J]. PLoS Pathogens, 2017, 13(9): e1006512.

[8] NAWAZ N, WEN S, WANG F H, et al. Lysozyme and its application as antibacterial agent in food industry[J]. Molecules, 2022, 27(19): 6305.

[9] FERRABOSCHI P, CICERI S, GRISENTI P. Applications of lysozyme, an innate immune defense factor, as an alternative antibiotic[J]. Antibiotics, 2021, 10(12):1534.

[10] 魏稚彤,付彤,刘瑞宏,等. 溶菌酶的生物学功能与作用机制及其在畜禽绿色生产中的应用研究进展[J]. 动物营养学报,2023,35(7):4224-4230.
WEI Z T, FU T, LIU R H, et al. Research progress on biological function and mechanisms of lysozyme and its application in green production of livestock and poultry[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2023,35(7):4224-4230.(in Chinese)

[11] 陈艳,武涌,陈红兵,等. 鸭蛋清溶菌酶的分离纯化及致敏性评估[J]. 食品与生物技术学报,2023,42(4):69-74.
CHEN Y, WU Y, CHEN H B, et al. Purification and allergenicity of lysozyme from duck egg white[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2023, 42(4): 69-74.(in Chinese)

[12] GUTIÉRREZ D, BRIERS Y. Lysins breaking down the walls of Gram-negative bacteria, no longer a no-go[J]. Current Opinion in Biotechnology, 2021, 68: 15-22.

[13] VILCACUNDO R, MÉNDEZ P, REYES W, et al. Antibacterial activity of hen egg white lysozyme denatured by thermal and chemical treatments[J]. Scientia Pharmaceutica, 2018, 86(4):48.

[14] TAYLOR T M, DAVIDSON P M, DAVID J R D. Antimicrobials in food[M]. Boca Raton: CRC Press, 2020.

[15] 周钦育,黄燕燕,赵珊,等. 蛋清溶菌酶的提取及其酶学性质探究[J]. 中国食品学报,2021,21(4):148-158.
ZHOU Q Y, HUANG Y Y, ZHAO S, et al. Studies on extraction and enzymatic properties of egg white lysozyme[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2021, 21(4):148-158.(in Chinese)

[16] 王涵,胡玉玲,赵晨坤,等. 泌乳阶段和处理温度对驴乳中溶菌酶活性的影响[J]. 畜牧兽医学报,2022,53(4):1089-1095.
WANG H, HU Y L, ZHAO C K, et al. Effects of lactation stages and heat treatment temperature on lysozyme activity in donkey milk[J]. Acta Veterinaria et Zootechnica Sinica, 2022, 53(4):1089-1095.(in Chinese)

[17] WEI Z X, WU S H, XIA J J, et al. Enhanced antibacterial activity of hen egg-white lysozyme against *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli* due to protein fibrillation[J]. Biomacromolecules, 2021, 22(2):890-897.

[18] 李颖,白瑜,冯自立. 不同pH对蛋清溶菌酶形成淀粉样纤维的影响[J]. 中国畜牧兽医,2021,48(4):1466-1471.
LI Y, BAI Y, FENG Z L. Effect of different pH conditions on amyloid fibrils formation of hen egg-white lysozyme[J]. China Animal Husbandry & Veterinary Medicine, 2021, 48(4): 1466-1471.(in Chinese)

[19] 李颖,冯自立,白瑜,等. 蛋清溶菌酶的改造及其抑菌活性[J]. 畜牧兽医学报,2021,52(4):1094-1102.
LI Y, FENG Z L, BAI Y, et al. The modification of hen egg-white lysozyme and its antibacterial activity[J]. Acta Veterinaria et Zootechnica Sinica, 2021, 52(4): 1094-1102.(in Chinese)

[20] TRIBST A A L, RIBEIRO L R, CRISTIANINI M. Comparison of the effects of high pressure homogenization and high pressure processing on the enzyme activity and antimicrobial profile of lysozyme[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2017, 43:60-67.

[21] NASIRU M M, BOATENG E F, WANG Z B, et al. Ultrasound-assisted high-voltage cold atmospheric plasma treatment on the inactivation and structure of lysozyme: effect of treatment voltage[J]. Food and Bioprocess Technology, 2022, 15(8):1866-1880.

[22] OOI B G, BRANNING S A. Correlation of conformational changes and protein degradation with loss of lysozyme activity due to chlorine dioxide treatment[J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2017, 182(2): 782-791.

[23] LEVASHOV P A, MATOLYGINA D A, DMITRIEVA O A, et al. Covalently immobilized chemically modified lysozyme as a sorbent for bacterial endotoxins (lipopolysaccharides)[J]. Biotechnology Reports, 2019, 24:e00381.

[24] 刘亚楠. 蛋清中溶菌酶的改性及酶活作用机理研究[D]. 天津:天津科技大学,2020.

[25] WAWER J, SZOCIŃSKI M, OLSZEWSKI M, et al. Influence of the ionic strength on the amyloid fibrillogenesis of hen egg white lysozyme[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 121:63-70.

[26] 周典. 溶菌酶修饰的百里香精油脂质体的制备及其在

牛肉保鲜中的应用[D]. 成都：成都大学，2023.

[27] 朱亚，刘晨. 茶多酚和溶菌酶复配对冷鲜肉保鲜效果的影响[J]. 山西农业科学，2018，46(10)：1722-1725.
ZHU Y，LIU C. Effect of tea polyphenols and lysozyme combination on the fresh keeping of chilled meat[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences，2018，46(10)：1722-1725.(in Chinese)

[28] 刘琨毅，王琪，吉莉莉，等. 溶菌酶和乳铁蛋白在冷却牦牛肉涂膜保鲜中的应用[J]. 食品工业，2020，41(1)：100-105.
LIU K Y，WANG Q，JI L L，et al. Application of lysozyme and lactoferrin in coating preservation of chilled yak beef[J]. The Food Industry，2020，41(1)：100-105.(in Chinese)

[29] 刘娜，梁美莲，谭媛元，等. 天然涂膜液对切片腌腊肉品质及货架期的影响[J]. 肉类研究，2017，31(8)：12-17.
LIU N，LIANG M L，TAN Y Y，et al. Effect of natural coating on the quality and shelf life of sliced cured meat[J]. Meat Research，2017，31(8)：12-17.(in Chinese)

[30] 杨琴. 泡椒凤爪中兼性厌氧产气微生物的分离、鉴定与控制研究[D]. 南昌：江西农业大学，2016.

[31] 姜怡彤，接伟光，于海洋，等. 乳制品中常见食源性致病菌及抑菌物质的研究现状[J]. 食品研究与开发，2018，39(16)：195-199.
JIANG Y T，JIE W G，YU H Y，et al. Research status of common foodborne pathogenic bacteria and antimicrobial substances in dairy products[J]. Food Research and Development，2018，39(16)：195-199.(in Chinese)

[32] SOZBILEN G S，YEMENICIOĞLU A. Antilisterial effects of lysozyme-nisin combination at temperature and pH ranges optimal for lysozyme activity：test of key findings to inactivate *Listeria* in raw milk[J]. LWT-Food Science and Technology ，2021，137：110447.

[33] LOPES N A，PINILLA C M B，BRANDELLI A. Antimicrobial activity of lysozyme-nisin co-encapsulated in liposomes coated with polysaccharides[J]. Food Hydrocolloids，2019，93：1-9.

[34] AL-BAARRI A N，LEGOWO A M，ARUM S K，et al. Extending shelf life of Indonesian soft milk cheese (dangke) by lactoperoxidase system and lysozyme[J]. International Journal of Food Science，2018，2018：4305395.

[35] MEHYAR G F，NABULSI A A，SALEH M，et al. Effects of chitosan coating containing lysozyme or natamycin on shelf-life，microbial quality，and sensory properties of Halloumi cheese brined in normal and reduced salt solutions[J]. Journal of Food Processing and Preservation，2018，42(1)：e13324.

[36] JALILZADEH A，HESARI J，PEIGHAMBARDOUST S H，et al. The effect of whey protein-based edible coating containing natamycin and lysozyme-xanthan gum conjugate on the shelf life of ultrafiltrated white cheese[J]. Journal of Food and Bioprocess Engineering，2020，3(2)：168-177.

[37] SUN X H，HONG H，JIA S L，et al. Effects of phytic acid and lysozyme on microbial composition and quality of grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) fillets stored at 4 ℃[J]. Food Microbiology，2020，86：103313.

[38] 吕艳霞，吴越，王汉，等. 蒸煮贻贝冰温贮藏保鲜剂的筛选、优化及评价[J]. 食品安全质量检测学报，2022，13(22)：7391-7398.
LYU Y X，WU Y，WANG H，et al. Screening，optimization and evaluation of ice temperature preservation agents for steamed mussels[J]. Journal of Food Safety and Quality，2022，13(22)：7391-7398.(in Chinese)

[39] DING J，WANG M，WU J，et al. Preservation properties of eugenol and its compound on seasoned *Lateolabrax japonicus* fillets[J]. Journal of Food Measurement and Characterization，2023，17：1264-1278.

[40] 刘通. 黄颡鱼保鲜技术的研究[D]. 南昌：南昌大学，2022.

[41] 周枫，曹蒙，任梦茹，等. 基于原花青素-溶菌酶复合保鲜剂对南湾鳙鱼鱼糜贮藏特性分析[J]. 食品科技，2023，48(3)：155-161.
ZHOU F，CAO M，REN M R，et al. Analysis of storage characteristics of nobilis surimi based on proanthocyanidin-lysozyme compound preservative[J]. Food Science and Technology，2023，48(3)：155-161.(in Chinese)

[42] 张泽凌，朱亚珠，陈雁平. 不同生物保鲜剂对白姑鱼(*Argyrosomus argentatus*)品质变化规律的研究[J]. 河北渔业，2019(11)：49-52.
ZHANG Z L，ZHU Y Z，CHEN Y P. Quality changes of *Argyrosomus argentatus* under complex biological fresh-

keeping agents[J]. Hebei Fisheries, 2019(11): 49-52. (in Chinese)

[43] XU Y X, YIN Y M, LI T, et al. Effects of lysozyme combined with cinnamaldehyde on storage quality of olive flounder (*Paralichthys olivaceus*) fillets[J]. Journal of Food Science, 2020, 85(4): 1037-1044.

[44] 武娇,杨华,张家涛,等. 原位合成纳米 SiO_x/溶菌酶/茶多酚/壳聚糖复合保鲜涂膜对海鲈鱼鱼片保鲜性能的影响[J]. 食品科学,2020,41(23):181-189.
WU J, YANG H, ZHANG J T, et al. Preservation effect of *in situ* synthetic nano-SiO_x/lysozyme/teapolyphenols/chitosan composite coatings on sea bass fillets[J]. Food Science, 2020, 41(23): 181-189. (in Chinese)

[45] 凌泽兴,孙曼钰,钟成,等. 复配生物防腐剂延长海鲶鱼肉的贮藏时间[J]. 现代食品科技,2017,33(10):192-200.
LING Z X, SUN M Y, ZHONG C, et al. Prolonging shelf life of fish (sea catfish) by the additions of combined bio-preservatives [J]. Modern Food Science and Technology, 2017, 33(10): 192-200. (in Chinese)

[46] 姜晨. 复配抑菌剂对单增李斯特菌的抑制作用及其对三文鱼保鲜效果[D]. 上海:上海海洋大学,2017.

[47] PALOTÁS P, PALOTÁS P, JÓNÁS G, et al. Preservative effect of novel combined treatment with electrolyzed active water and lysozyme enzyme to increase the storage life of vacuum-packaged carp[J]. Journal of Food Quality, 2020, 2020: 4861471.

[48] KHODANAZARY A. Quality characteristics of refrigerated mackerel *Scomberomorus commerson* using gelatin-polycaprolactone composite film incorporated with lysozyme and pomegranate peel extract [J]. International Journal of Food Properties, 2019, 22(1): 2057-2071.

[49] 付博,陈锰珊. 天然保鲜剂在鲜啤酒中的应用研究[J]. 轻工科技,2023,39(6):1-4.
FU B, CHEN M S. Research on the application of natural preservatives in fresh beer[J]. Light Industry Science and Technology, 2023, 39(6): 1-4. (in Chinese)

[50] SOZBILEN G S, KOREL F, YEMENICIOĞLU A. Control of lactic acid bacteria in fermented beverages using lysozyme and nisin: test of traditional beverage boza as a model food system[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2018, 53(10): 2357-2368.

[51] 刘洁,史红梅,王咏梅,等. 果酒生产工艺研究进展[J]. 南方农业,2019,13(30):191-193.
LIU J, SHI H M, WANG Y M, et al. Research progress on fruit wine production technology[J]. South China Agriculture, 2019, 13(30): 191-193. (in Chinese)

[52] 李蜜月. 罗汉果发酵饮品的制备与罗汉果甜苷风味研究[D]. 无锡:江南大学,2021.

[53] 张自森. 溶菌酶抗菌包装及其在葡萄保鲜上的应用[D]. 西安:西安理工大学,2018.

[54] 李卉. 凤凰水蜜桃生物保鲜产品研发及其效果分析[D]. 南京:南京大学,2016.

[55] NIU X D, ZHU L, XI L J, et al. An antimicrobial agent prepared by N-succinyl chitosan immobilized lysozyme and its application in strawberry preservation[J]. Food Control, 2020, 108: 106829.

[56] 程江双. 鸡蛋清溶菌酶的提取、改性及应用研究[D]. 武汉:华中农业大学,2022.

[57] 付亮,张迪,单秀峰,等. 溶菌酶结合纳米包装对猕猴桃贮藏品质的影响[J]. 沈阳师范大学学报(自然科学版),2018,36(3):285-288.
FU L, ZHANG D, SHAN X F, et al. Effectiveness of treatment with lysozyme and nano-packaging on storage quality in kiwifruit[J]. Journal of Shenyang Normal University (Natural Science Edition), 2018, 36(3): 285-288. (in Chinese)

[58] 刘荣. 多功能生物蛋白涂层的制备及其在鲜切水果上的应用研究[D]. 西安:长安大学,2020.

[59] 邓杰. 鲜活螺旋藻的保鲜技术研究[D]. 南京:南京农业大学,2016.

[60] 赵迪,王茜茜,李佳伟,等. 天然保鲜剂对食品保鲜作用的研究与应用[J]. 现代食品,2022,28(1):108-111.
ZHAO D, WANG Q Q, LI J W, et al. Study and application of natural preservative on food preservation[J]. Modern Food, 2022, 28(1): 108-111. (in Chinese)

[61] 马荣琨,侯东丽,苏东民. 天然保鲜剂在面包保藏中的应用[J]. 食品工业,2019,40(6):114-117.
MA R K, HOU D L, SU D M. Application of natural preservatives in bread preservation [J]. The Food Industry, 2019, 40(6): 114-117. (in Chinese)

[62] 刘巧,罗进旭,付星,等. 基于聚乙烯醇-溶菌酶复合抗菌涂膜剂的鸡蛋保鲜研究[J]. 食品工业科技,2018,39(8):251-256,308.
LIU Q, LUO J X, FU X, et al. Application of polyvinyl

alcohol-chitosan composite antimicrobial coating agent in preservation of fresh eggs[J]. Science and Technology of Food Industry,2018,39(8):251-256,308.(in Chinese)

[63] HASHEMI M, AMINLARI M, FOROUZAN M, et al. Production and application of lysozyme-gum Arabic conjugate in mayonnaise as a natural preservative and emulsifier[J]. Polish Journal of Food and Nutrition Sciences,2018,68(1):33-43.

[64] 贺燕,谭纯良,李娜,等. 复配防腐剂抑制鸡蛋干腐败菌效果研究[J]. 食品与机械,2019,35(11):159-164.
HE Y, TAN C L, LI N, et al. Study on the effect of compound preservatives on inhibiting spoilage of egg curd [J]. Food & Machinery, 2019, 35(11): 159-164.(in Chinese)

[65] SILVA N H C S, VILELA C, ALMEIDA A, et al. Pullulan-based nanocomposite films for functional food packaging: exploiting lysozyme nanofibers as antibacterial and antioxidant reinforcing additives [J]. Food Hydrocolloids,2018,77:921-930.

[66] LI Q Y, XU J X, ZHANG D D, et al. Preparation of a bilayer edible film incorporated with lysozyme and its effect on fish spoilage bacteria[J]. Journal of Food Safety,2020,40(5):e12832.

[67] 邹小欠,李成,余炬波,等. 超高压结合天然保鲜剂处理对腌制生食泥螺品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报,2019,10(8):2268-2275.
ZOU X Q, LI C, YU J B, et al. Combined effects of natural chemicals and ultra-high pressure on quality of pickled raw *Bullacta exarata*[J]. Journal of Food Safety and Quality,2019,10(8):2268-2275.(in Chinese)

[68] OZER B B P, UZ M, OYMACI P, et al. Development of a novel strategy for controlled release of lysozyme from whey protein isolate based active food packaging films [J]. Food Hydrocolloids,2016,61:877-886.

[69] AJOURLOO M, KHANJARI A, MISAGHI A, et al. Combined effects of *Ziziphora clinopodioides* essential oil and lysozyme to extend shelf life and control *Listeria monocytogenes* in Balkan-style fresh sausage[J]. Food Science & Nutrition, 2021, 9(3): 1665-1675.

[70] CEGIELSKA-RADZIEJEWSKA R, SZABLEWSKI T, RADZIEJEWSKA-KUBZDELA E, et al. The effect of modified lysozyme treatment on the microflora, physicochemical and sensory characteristics of pork packaged in preservative gas atmospheres[J]. Coatings, 2021,11(5):488.

[71] 李慧,庞姗姗,田家瑶,等. 还原氧化石墨烯固定化溶菌酶的研究[J]. 现代化工,2023,43(8):175-179,184.
LI H, PANG S S, TIAN J Y, et al. Research on immobilization of lysozyme by reduced graphene oxide [J]. Modern Chemical Industry, 2023, 43(8): 175-179, 184.(in Chinese)

[72] 孙玥. 改性淀粉固载溶菌酶抑菌膜的制备、性能及应用研究[D]. 长春:吉林大学,2020.

[73] 张道瑞. 固定溶菌酶的MXene二维光热纳米材料制备及在MRSA抗菌中应用研究[D]. 广州:华南理工大学,2022.

[74] FENG Z L, LI Y, BAI Y. Elevated temperatures accelerate the formation of toxic amyloid fibrils of hen egg-white lysozyme [J]. Veterinary Medicine and Science,2021,7(5):1938-1947.

[75] 王武,王碧,白瑜,等. 改造溶菌酶抑菌活性研究进展[J]. 中国畜牧兽医,2023,50(3):942-951.
WANG W, WANG B, BAI Y, et al. Research progress on antibacterial activity of modified lysozyme[J]. China Animal Husbandry & Veterinary Medicine, 2023, 50(3): 942-951.(in Chinese)

（责任编辑：闫林红）