

天然抗菌剂纳米乳液的制备、抑菌机理及在肉类保鲜中的应用研究进展

赵思琪, 张 浪, 刘 骞, 陈 倩, 孔保华*
(东北农业大学食品学院, 黑龙江 哈尔滨 150030)

摘 要: 肉类富含蛋白质、脂肪等营养物质, 在加工或贮藏过程中易受到微生物的污染而发生腐败变质。天然抗菌剂作为一种肉类保鲜剂, 因具有良好的抑菌活性、安全性及生物可降解性而受到广泛关注。然而, 有些天然抗菌剂具有高挥发性、低水溶性、热不稳定等缺陷, 导致其在肉类保鲜中的应用受到局限。纳米乳液作为一种包埋系统, 能够将天然抗菌剂包埋在其内部, 以提高天然抗菌剂的稳定性和抑菌活性, 并改善天然抗菌剂的释放性能, 从而缓解天然抗菌剂的局限性。本文综述天然抗菌剂纳米乳液的构成和制备方法, 并在此基础上进一步论述天然抗菌剂纳米乳液的抑菌机理与优势以及天然抗菌剂纳米乳液在肉类保鲜中的研究进展, 以期天然抗菌剂纳米乳液在肉类保鲜中的应用提供理论基础和实践指导。

关键词: 纳米乳液; 天然抗菌剂; 制备方法; 抑菌机理; 肉类保鲜

Preparation, Antibacterial Mechanism of Natural Antimicrobial-Loaded Nanoemulsions and Their Application in Meat Preservation: A Literature Review

ZHAO Siqi, ZHANG Lang, LIU Qian, CHEN Qian, KONG Baohua*
(College of Food Science, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: Meat and meat products are rich in nutrients such as protein and fat and prone to spoilage during processing or improper storage due to microbial contamination. Natural antimicrobial agents have been widely used as meat preservatives because of their excellent antibacterial activity, safety, and biodegradability. However, some natural antimicrobial agents are of high volatility, low water solubility, and thermal instability, which limits their application in meat and meat products preservation. Nanoemulsions can allow incorporation of natural antimicrobial agents into their interior to improve the stability, antibacterial activity and release performance of natural antimicrobial agents, thus alleviating their limitations. In this review, the composition, preparation methods, antibacterial mechanism of natural antimicrobial-loaded nanoemulsions are summarized. Furthermore, the recent progress in the application of natural antimicrobial-loaded nanoemulsions in meat preservation is discussed to provide theoretical basis and practical guidance for the application of natural antimicrobial-loaded nanoemulsions in meat and meat product preservation.

Keywords: nanoemulsion; natural antimicrobial; preparation methods; antibacterial mechanism; meat preservation

DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20220117-003

中图分类号: TS251.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-8123 (2022) 04-0048-09

引文格式:

赵思琪, 张浪, 刘骞, 等. 天然抗菌剂纳米乳液的制备、抑菌机理及在肉类保鲜中的应用研究进展[J]. 肉类研究, 2022, 36(4): 48-56. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20220117-003. <http://www.rlyj.net.cn>

ZHAO Siqi, ZHANG Lang, LIU Qian, et al. Preparation, antibacterial mechanism of natural antimicrobial-loaded nanoemulsions and their application in meat preservation: a literature review[J]. Meat Research, 2022, 36(4): 48-56.

DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20220117-003. <http://www.rlyj.net.cn>

收稿日期: 2022-01-17

基金项目: 黑龙江省“百千万”工程重大科技专项(2020ZX07B72; 2019ZX07B03)

第一作者简介: 赵思琪(2000—)(ORCID: 0000-0002-5774-6917), 女, 硕士研究生, 研究方向为畜产品加工。

E-mail: zhaosiqi0121@163.com

*通信作者简介: 孔保华(1963—)(ORCID: 0000-0003-3160-8679), 女, 教授, 博士, 研究方向为畜产品加工。

E-mail: kongbh@163.com

肉类富含蛋白质、脂肪等营养物质,是人体所需营养成分的重要来源,并具有良好的风味,备受消费者喜爱^[1]。然而,在肉类加工或贮藏过程中,这些营养物质会被腐败微生物利用,导致肉类发生腐败变质,出现异味、变色、发黏等现象,严重影响其感官及营养特性^[2]。为了缓解肉类的腐败变质问题,许多保鲜技术应运而生,总体可分为物理保鲜技术和化学保鲜技术^[3]。物理保鲜技术包括低温保藏^[4]、辐照^[5]、高压处理^[6]以及包装技术^[7]等。化学保鲜技术是通过添加抗菌剂达到抑菌或杀菌目的,以延长肉类贮藏期的保鲜技术,抗菌剂可根据来源分为合成抗菌剂和天然抗菌剂^[8]。与合成抗菌剂相比,天然抗菌剂具有安全无毒、生物可降解等优势;而与物理保鲜技术相比,天然抗菌剂具有更加广泛的适用范围,因此天然抗菌剂受到广泛关注,逐渐成为当下的研究热点^[9]。然而,某些天然抗菌剂因具有高挥发性、低水溶性及热不稳定性,并且对环境变化敏感,导致其在实际应用中的利用率较低。此外,这些性质不稳定的天然抗菌剂还易与肉中蛋白质、脂肪等成分相互作用,导致其抑菌活性降低^[10]。

为了解决天然抗菌剂在肉类应用中的局限性,通常采用包埋技术将天然抗菌剂进行封装。纳米乳液是一种由2种互不相溶的相构成的纳米级包埋系统,其平均粒径为20~200 nm^[11]。它能够促进天然抗菌剂与微生物之间的相互作用、增强天然抗菌剂的溶解性和吸收性、提高天然抗菌剂的稳定性并改善天然抗菌剂的释放性能,这为解决天然抗菌剂的局限性提供了一种可能^[12]。目前,天然抗菌剂纳米乳液在食品保鲜领域中已受到比较广泛的关注,但关于天然抗菌剂纳米乳液在肉类保鲜中的应用报道较少,相关综述并不多见。基于此,本文综述天然抗菌剂纳米乳液的构成、制备方法、抑菌机理与抑菌优势,并在此基础上论述天然抗菌剂在肉类保鲜中的应用,旨在为天然抗菌剂纳米乳液在肉类保鲜领域的研究与开发提供理论基础和实践指导。

1 天然抗菌剂纳米乳液的构成与制备

天然抗菌剂纳米乳液主要包括3种类型:水包油型(O/W)、油包水型(W/O)和双连续型(图1)。在食品工业中,关于水包油型和油包水型纳米乳液的应用较多,而双连续型纳米乳液并不常见^[13]。

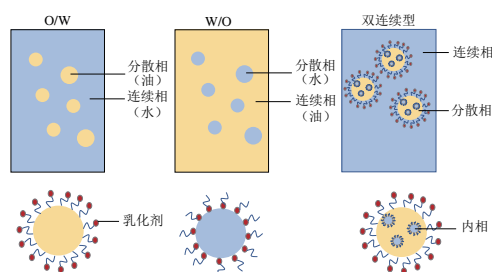


图1 水包油型、油包水型及双连续型纳米乳液

Fig. 1 O/W, W/O and bicontinuous nanoemulsions

1.1 天然抗菌剂纳米乳液的构成

1.1.1 分散相

在水包油型天然抗菌剂纳米乳液中,分散相为脂溶性天然抗菌剂的油溶液。常见的脂溶性天然抗菌剂有植物精油、一些植物提取物等,它们溶于三酰甘油(triacylglycerol, TAG)、中链甘油三酯(medium-chain triglycerides, MCT)等油脂中,构成水包油型天然抗菌剂纳米乳液的分散相^[14]。在油包水型天然抗菌剂纳米乳液中,分散相由水溶性天然抗菌剂的水溶液构成。此外,分散相中通常含有多元醇、无机盐离子及大分子聚合物等,这些物质有助于增强乳化剂的乳化能力并降低分散相表面张力,从而提高天然抗菌剂纳米乳液的稳定性^[15]。

1.1.2 连续相

在水包油型天然抗菌剂纳米乳液中,连续相为水相,其中主要含有壳聚糖、果胶、纤维素、海藻酸盐等生物聚合物,这些聚合物具有一定黏附性和控释能力,有助于天然抗菌剂的靶向释放并延长天然抗菌剂发挥活性的时间^[12]。在油包水型天然抗菌剂纳米乳液中,连续相为油相,主要由一些常见油脂(TAG、MCT等)构成^[16]。

1.1.3 乳化剂

乳化剂也称为中间相,是天然抗菌剂纳米乳液的重要组成部分^[17]。乳化剂能够在水油界面吸附,降低界面张力,从而提高纳米乳液稳定性,防止沉降、絮凝、聚结、奥氏熟化等现象的发生^[18]。此外,乳化剂还影响天然抗菌剂纳米乳液的粒径尺寸、分散相黏度及粒子间电斥力,直接关系到天然抗菌剂纳米乳液的光学和流变学特性^[19]。

乳化剂可分为合成乳化剂和天然乳化剂2种。在食品工业中,吐温、司盘是应用最为广泛的合成乳化剂,这些小分子合成乳化剂能够相对容易地在油水界面展开,具有良好的乳化效果^[20]。然而,合成乳化剂对人体健康具有潜在隐患,因此,研究人员逐渐对安全无害的天然乳化剂加以重视。常见的天然乳化剂可根据其成分分为多糖乳化剂(阿拉伯树胶、果胶、改性淀粉、大豆多糖)、蛋白质乳化剂(明胶、酪蛋白、乳清蛋白)和磷脂乳化剂(卵磷脂)^[21-22]。有研究表明,含小分子合成乳化剂的纳米乳液具有更小的液滴尺寸,而含有天然大分子乳化剂的纳米乳液液滴尺寸较大,在动力学稳定性方面表现更佳^[23]。乳化剂也可根据亲水亲油平衡(hydrophile lipophilic balance, HLB)值进行分类,HLB值是描述乳化剂在水相和油相中相对溶解趋势的重要参数。当HLB值为3~6,乳化剂优先溶于油相,有形成油包水型纳米乳液的趋势;当HLB值为10~18时,乳化剂则优先溶于水中,倾向于形成水包油型纳米乳液^[24]。因此,在实际应用中应根据所需天然抗菌剂纳米乳液的类型选择合适的乳化剂。

1.2 天然抗菌剂纳米乳液的制备

1.2.1 高能制备方法

高能制备方法包括高压均质法、超声乳化法及微射流法,主要涉及到高压均质器、超声均质器、微流化器等机械装置,这些装置会产生过大应力,破坏分散相,使其成为纳米级的液滴^[25]。

1.2.1.1 高压均质法

高压均质法是最常用于制备纳米乳液的高能方法,可制得100 nm以下的乳液液滴。在高压均质过程中,预混的粗乳液在高压均质器施加的10~350 MPa压力条件下通过5~10 nm的狭窄间隙。高压均质器利用粗乳液通过狭窄间隙时受到的高速剪切、高频振荡、对流撞击等机械力作用实现对粗乳液液滴的细化^[26]。将制得的乳液再循环至加料器,使均质过程持续进行,以进一步减小液滴尺寸。一般情况下,经过15~20次高压均质处理后,可得到稳定的乳液液滴。在高压均质过程中,温度、压力及循环次数的增加有利于减小天然抗菌剂纳米乳液的最终液滴尺寸^[27]。

1.2.1.2 超声乳化法

超声乳化法具有能耗低、制备乳液更均匀等优点,目前已广泛用于纳米乳液的制备。超声波发生器尖端接触液体时会产生界面波动,形成空化气泡,同时使分散相形成较大尺寸的液滴。随后,空化气泡破裂产生的高剪切力会将较大的液滴破碎成较小的液滴,从而达到细化和均质的目的^[28]。通常,超声乳化处理15~20 min后,液滴的粒径尺寸基本稳定,它与超声功率、时间以及配方中乳化剂的类型和含量密切相关^[29]。在超声乳化过程中,有效乳化仅发生在波导辐射器附近,因此超声乳化法更适用于小批量生产^[30]。

1.2.1.3 微射流法

微射流法是以高压均质的工业应用为基础开发出来的,具有高效、高能、可控制液滴大小等优点^[26]。其制备过程是使预混的粗乳液通过高压泵送装置进入微流化器中,随后在2条独立微通道中以高速状态加速碰撞,从而产生极强的剪切力和撞击力,使较大的液滴发生破裂。此外,利用微射流法制备天然抗菌剂纳米乳液时,也可直接将分散相和连续相分别从2个入口通过微通道,无需经过预乳化步骤^[31]。

1.2.2 低能制备方法

低能制备方法操作成本和设备投资较低,反应条件温和,对热敏性天然抗菌剂活性影响较小,近年来受到广泛关注^[32-33]。常见的低能制备方法包括自乳化法、相转变法、膜乳化法等。

1.2.2.1 自乳化法

自乳化法制备天然抗菌剂纳米乳液的过程是在连续搅拌下,将含有乳化剂的分散相逐步注入连续相中。纳米乳液是在分散相与连续相混合过程中,由系统内部化学能驱动而形成的,无需外部能量输入^[34]。自乳化过程

中,温度、搅拌充分程度及分散相添加速率都对纳米乳液的粒径和稳定性有重要影响^[35]。

1.2.2.2 相转变组分法

相转变组分法的操作过程是在恒温下通过向一种组分中逐步加入另一组分引发相转变,从而制得所需的纳米乳液。以制备水包油型天然抗菌剂纳米乳液为例,首先向含有亲水性乳化剂的油相中逐步滴加水相,此时会形成油包水型天然抗菌剂微乳液(图2A)。随着水含量增加,乳化剂的自发曲率逐渐趋向于零(图2B),当继续滴加水相,水相和油相组分比例超过一定值时,即发生相转变,形成水包油型天然抗菌剂纳米乳液(图2C)。在制备过程中,水相或油相的滴加速率和搅拌速率会影响乳液的稳定性和最终粒径尺寸^[36-37]。

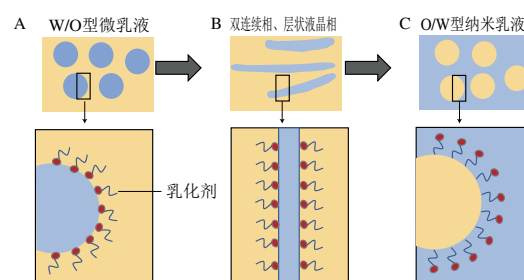


图2 相转变组分法制备水包油型纳米乳液

Fig. 2 Preparation of O/W nanoemulsion by phase inversion composition

1.2.2.3 膜乳化法

膜乳化是一种新型高效节能技术,操作条件温和,适用于制备含有热敏性成分的纳米乳液,并能够有效控制液滴尺寸和分布^[38]。膜乳化法包括直接乳化和预乳化。直接乳化是将分散相直接压入膜,随后分散相在膜另外一侧流动的过程中被挤压成内相液滴(图3A);而预乳化是将预先制备好的粗乳液压入膜,进而形成纳米乳液(图3B、C)^[39]。在预乳化过程中,膜的亲水性或疏水性决定着粗乳液是否发生相转变,当水包油型粗乳液通过疏水膜时,最终会形成油包水型纳米乳液,而通过亲水膜时不发生相转变;当油包水型粗乳液通过亲水膜时,最终会形成水包油型纳米乳液,通过疏水膜时不发生相转变^[40]。

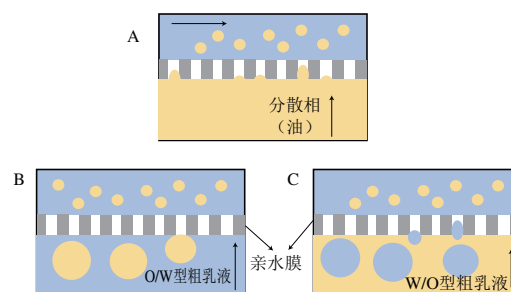


图3 膜乳化法制备水包油型纳米乳液

Fig. 3 Preparation of O/W nanoemulsion by membrane emulsification

2 天然抗菌剂纳米乳液的抑菌机理与抑菌优势

2.1 天然抗菌剂纳米乳液的抑菌机理

天然抗菌剂纳米乳液的抑菌机理取决于所包埋的天然抗菌剂^[14]。天然抗菌剂可根据来源分为植物源性天然抗菌剂、动物源性天然抗菌剂和微生物源性天然抗菌剂。其中，动物源性天然抗菌剂（壳聚糖、溶菌酶、乳铁蛋白等）因性质稳定无需借助纳米乳液包埋系统^[41]。

2.1.1 植物源性天然抗菌剂的抑菌机理

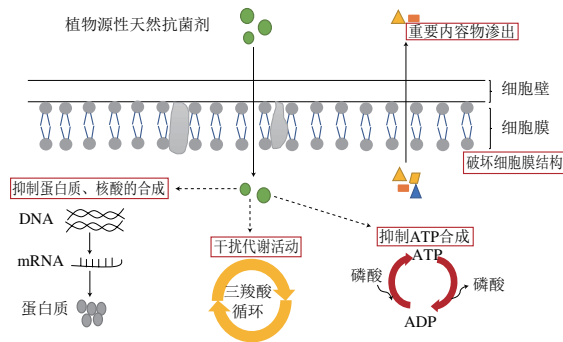
植物精油是最典型的植物源性天然抗菌剂，它是芳香植物和草本植物的次生代谢产物，存在于叶、茎、芽、花、种子和果实中。植物精油成分复杂、来源广泛、种类繁多^[42]。表1列举了几种常见的植物精油及其主要抑菌成分与抑菌对象。此外，酚类、黄酮类、醌类、生物碱类等植物抽提物也是研究较为广泛的植物源性天然抗菌剂。目前已有研究证明了茶多酚、姜黄素、类胡萝卜素、石榴籽提取物等植物抽提物的抗菌活性^[43]。

表1 常见的植物精油及主要抑菌成分与抑菌对象

Table 1 Main antibacterial components of several common essential oils and bacteria that are susceptible to them

植物精油	主要抑菌成分	抑菌对象	参考文献
肉桂精油	肉桂醛、丁香酚	鼠伤寒沙门氏菌、金黄色葡萄球菌	[44]
迷迭香精油	α -萜烯、1,8-桉叶素、樟脑、柠檬烯	大肠杆菌、枯草芽孢杆菌、金黄色葡萄球菌、荧光假单胞菌、肠沙门氏菌、单增李斯特菌	[45-46]
牛至精油	香芹酚、对伞花烃、百里酚、 γ -松油烯	金黄色葡萄球菌、蜡样芽孢杆菌、大肠杆菌、单增李斯特菌、假单胞菌	[45]
连翘精油	α -萜烯、 β -萜烯、桉油	枯草芽孢杆菌、大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、肺炎双球菌、白色念珠菌	[47]
百里香精油	百里酚、香芹酚、 γ -松油烯、 α -萜烯、对伞花烃	蜡样芽孢杆菌、金黄色葡萄球菌、大肠杆菌、黑曲霉	[48]
鼠尾草精油	鼠尾草醛、鼠尾醇	金黄色葡萄球菌、枯草芽孢杆菌、大肠杆菌	[49]
大蒜精油	大蒜辣素、大蒜新素、石竹烯、乙酸肉桂酯	枯草芽孢杆菌、大肠杆菌、白色念珠菌、热带假丝酵母菌	[50]

植物源性天然抗菌剂发挥抑菌活性最主要的方式是破坏微生物细胞膜结构^[51]。植物源性天然抗菌剂可进入细胞膜的磷脂双分子层结构，随后其活性成分与细胞膜蛋白质位点结合，促进细胞膜组织和结构的变化，从而使细胞膜通透性增加，造成细胞重要内容物渗出，导致细胞溶解、死亡。另外，抗菌剂融入细胞后，会对细胞造成以下影响（图4）：1）抑制细胞对营养物质的吸收；2）改变细胞内ATP的含量或降低ATP合成酶活性；3）抑制呼吸链中电子的传递；4）抑制蛋白质和核酸的合成^[52-53]。



ATP: 5'-三磷酸腺苷 (5'-adenosine triphosphate);

ADP: 5'-二磷酸腺苷 (5'-adenosine diphosphate)。

图4 植物源性天然抗菌剂的抑菌机理

Fig. 4 Antibacterial mechanism of plant-derived natural antimicrobial agents

2.1.2 微生物源性天然抗菌剂的抑菌机理

微生物源性天然抗菌剂包括乳酸链球菌素 (nisin)、纳他霉素、 ϵ -聚赖氨酸、片球菌素和罗伊氏细菌素等。其中，Nisin和纳他霉素对环境变化敏感，易与肉中成分相互作用，通常需要借助包埋系统克服其应用局限^[54-55]。

Nisin由某些乳酸链球菌菌株产生，是世界卫生组织允许作为食品防腐剂使用的唯一一种细菌素^[56]。目前，Nisin已被证实对葡萄球菌、李斯特菌等多种细菌具有显著抑制作用^[57]。Nisin有3种抑菌方式。第1种抑菌方式为破坏微生物细胞膜。首先，Nisin分子会附着于细胞膜上的脂质体II，形成Nisin-脂质体II复合物，随后Nisin-脂质体II复合物插入细胞膜，在细胞膜上形成孔洞，引起细胞膜内外渗透压发生改变，从而造成细胞内容物外泄，导致细胞死亡。第2种抑菌方式为抑制微生物细胞壁的合成。由于脂质体II是细胞壁合成的前体物质，因此Nisin分子的附着会抑制肽聚糖网络的生长，从而抑制细胞壁的合成，达到抑菌目的。第3种抑菌方式为通过与蛋白残基的巯基结合使孢子内含有巯基的酶失活，从而抑制孢子向外生长。一般而言，Nisin对革兰氏阳性菌的抑制作用更加明显^[58-59]。

纳他霉素是一种由纳他链霉菌发酵产生的多烯大环内酯类物质，它对青霉菌、根霉菌、曲霉菌等大部分霉菌及酵母菌具有极强抑制作用，目前已被欧洲食品安全局和美国食品药品监督管理局批准作为食品防腐剂使用^[60]。纳他霉素的抑菌机理与真菌细胞中的甾醇类化合物有关。纳他霉素内酯结构中的共轭双键通过范德华力与真菌细胞膜中的麦角甾醇或其他甾醇类基团结合，形成甾醇-纳他霉素复合物，从而影响细胞中甾醇类物质的利用机制，扰乱细胞正常代谢活动^[61-62]。此外，这一复杂复合物的产生会导致细胞膜畸变，引起胞内重要营养物质渗

出,从而达到抑菌效果。由于细菌和病毒不含有甾醇类物质,故纳他霉素对其几乎没有抑菌活性^[63]。

2.2 天然抗菌剂纳米乳液的抑菌优势

2.2.1 具有较强抑菌活性

纳米乳液较小的液滴能够将天然抗菌剂运输到微生物细胞膜表面,增加天然抗菌剂的活性表面积,从而促进天然抗菌剂发挥活性,达到更强的抑菌效果^[64]。Wang Yanbo等^[65]报道,与纯山苍子精油相比,山苍子精油纳米乳液对李斯特菌和海链球菌表现出更强的抑制作用。同样,Maté等^[66]研究发现,与D-柠檬烯相比,D-柠檬烯纳米乳液对李斯特菌的抑制作用更加显著。然而,Liu Xiaoli等^[67]比较肉桂精油与肉桂精油纳米乳液的抑菌活性发现,对于黑曲霉,肉桂精油纳米乳液表现出更强的抑菌作用,而对于大肠杆菌,肉桂精油的抑菌作用更强。

根据上述研究可知,纳米乳液的包埋有助于天然抗菌剂中的活性成分进入微生物细胞内部,此外,还能够增加天然抗菌剂在水介质中的分散性和溶解性,从而使天然抗菌剂与目标微生物更加充分地相互作用,表现出更强的抑菌活性。然而,其抑菌活性会因微生物种类的不同而表现出较大差异。因此,在实际应用中针对不同种类的微生物应选用合适的天然抗菌剂纳米乳液,以达到最佳抑菌效果。

2.2.2 具有较强稳定性

纳米乳液粒径较小,能够通过布朗运动克服重力因素,因此具有较强动力学稳定性。除整个系统具有较强稳定性外,包埋在系统内部的天然抗菌剂因受外界影响较小,相比于游离天然抗菌剂也具有较稳定的稳定性^[37]。根据Kreutz等^[68]报道,对卡尼里拉精油(essential oil of *Aniba canelilla*, EOAC)纳米乳液和EOAC-甲醇溶液进行相同条件的光处理和热处理后,纳米乳液更有利于维持EOAC中主要化合物的含量。Zheng Bingjing等^[69]在评估不同包埋系统(二甲基亚砜水溶液、纳米乳液、水凝胶珠)对姜黄素稳定性的影响时也得出类似的结论。另外,天然抗菌剂的稳定性也会受乳化剂用量和类型的影响。Chen Wenye等^[70]以米糠蛋白作为槲皮素纳米乳液的乳化剂,结果表明,米糠蛋白含量为3%时有助于提高槲皮素的稳定性。Kharat等^[71]研究发现,皂苷对姜黄素的稳定性无积极作用,反而会因其促进过氧化反应的能力而加速姜黄素的降解。

由此可见,天然抗菌剂纳米乳液不仅自身具有较强稳定性,纳米乳液系统同时也能够减少外界环境对天然抗菌剂的影响,从而提高天然抗菌剂的稳定性。但若乳化剂的用量和类型不当,会加速天然抗菌剂的降解。因此,在具体应用中应结合所包埋天然抗菌剂的理化性质,确定恰当的乳化剂用量和类型,进而最大程度提高天然抗菌剂纳米乳液的稳定性。

2.2.3 具有良好释放性能

天然抗菌剂纳米乳液的释放性能体现在两方面:缓慢释放和靶向释放。缓慢释放能够延长天然抗菌剂发挥抑菌活性的时间,以达到持久的抑菌效果^[72]。目前已有研究证明了纳米乳液的缓释作用。Syed等^[73]评估香芹醇、香叶醇精油与香芹醇、香叶醇精油纳米乳液的抑菌作用,结果表明,纳米乳液使香芹醇和香叶醇精油的抑菌效果延长至9 d。这是因为在纳米乳液系统中,用于发挥抑菌作用的精油数量较少,大量精油在纳米乳液中得以长期保留,从而延长抗菌时间。靶向释放能够使天然抗菌剂精准、有效地发挥抑菌活性,提高其利用率。有研究表明,靶向释放与乳化剂有关,当乳化剂液滴与微生物细胞膜的磷脂双分子层结构融合时,会促进天然抗菌剂在特定位置靶向释放,并且这一特性在使用大分子天然乳化剂时更为突出^[74-76]。目前关于天然抗菌剂纳米乳液靶向释放的研究较少,其具体过程和机制仍有待探索。

3 天然抗菌剂纳米乳液在肉类保鲜中的应用

3.1 制备可食性涂膜

可食性涂膜是指将液体直接涂在食品表面后形成的涂层^[77]。目前已有大量研究表明,基于天然抗菌剂纳米乳液的可食性涂膜可应用于肉类保鲜。Xiong Yun等^[78]报道,牛至精油-白藜芦醇纳米乳液可食性涂膜不仅能够显著抑制猪里脊中微生物的生长繁殖,还可保持猪肉的嫩度。同样,Wang Lei等^[79]研究发现,含有百里香精油和百里香酚纳米乳液的可食性涂膜可有效延长猪肉的贮藏期。Abdou等^[80]发现,基于姜黄素纳米乳液的可食性涂膜能够显著抑制鸡肉中嗜冷细菌、酵母菌和霉菌的生长,同时提高鸡肉的感官品质。此外,天然抗菌剂纳米乳液可食性涂膜对鱼肉也显示出较强抑菌作用。Shokri等^[81]研究表明,阿魏精油纳米乳液可食性涂膜对于虹鳟鱼的质地、颜色有积极影响,并能够抑制鱼肉中的腐败菌。综合上述研究结果可知,天然抗菌剂纳米乳液可食性涂膜对不同来源生鲜肉的抑菌作用具有广泛的适用性。

除生鲜肉外,天然抗菌剂纳米乳液可食性涂膜在肉制品中也得到了广泛的应用。根据Huang Mingyuan等^[82]的报道,与迷迭香提取物-ε-聚赖氨酸粗乳液涂膜相比,经过纳米乳液涂膜处理的即食烤鸡在4℃条件下显示出更低水平的活菌数、霉菌和酵母菌数。Sun Yanan等^[83]发现,茴香精油-肉桂醛纳米乳液可食性涂膜能够显著抑制猪肉饼中的大肠杆菌和金黄色葡萄球菌,使其保质期延长6~10 d。此外,该涂膜有助于提高猪肉饼的感官品质。Liu Qiong等^[84]研究表明,含有茴香精油-Nisin-聚赖氨酸复合抗菌剂的纳米乳液涂膜能够有效抑制即食肴肉中总活菌数的增加,并使其贮藏期延长至16 d。综上所述

述, 基于天然抗菌剂纳米乳液的可食性涂膜在生鲜肉及肉制品中均具有良好保鲜效果, 在未来肉类保鲜领域中具有较大发展潜力。

3.2 制备活性包装膜

基于天然抗菌剂纳米乳液的活性包装膜是指将天然抗菌剂纳米乳液加入包装材料后, 通过加热、加压、涂布、挤出等方法制成的薄膜^[85]。现已有研究证实了天然抗菌剂纳米乳液活性包装膜的体外抑菌活性。Zhang Xinhui等^[86]研究发现, 含有百里香精油纳米乳液的活性包装膜呈现出较强的抑菌活性并具有较好的机械柔韧性和防紫外线性能。根据Hasheminya等^[87]的报道, 基于鼠尾草精油纳米乳液的活性包装膜对李斯特菌的抑制能力及对自由基的清除能力均较强。雷凯^[88]研究发现, 香芹酚纳米乳液-羧甲基壳聚糖复合包装膜对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌具有良好的抑菌活性, 抑制率最高分别可达99.9%和99.0%。

含有天然抗菌剂纳米乳液的活性包装膜不仅具有较强的体外抑菌活性, 其应用于肉及肉制品中时良好的抑菌性能也得到了验证。Amiri等^[89]报道, 与仅含有扎塔里亚多花精油的包装膜相比, 含有扎塔里亚多花精油纳米乳液的包装膜对牛肉饼具有更强的抗菌及抗氧化活性。同样, Ansarian等^[90]在最近的研究中发现, 含有白藜芦醇和丁香精油的纳米乳液包装膜对骆驼肉具有较强抗菌抗氧化作用, 并能够改善其感官品质。目前关于天然抗菌剂纳米乳液活性包装膜的研究集中在膜的性能及体外抑菌作用, 对于其在肉类保鲜中的研究和应用较少, 但现有研究均表明, 基于天然抗菌剂纳米乳液的活性包装膜在肉及肉制品中抑菌效果良好, 具有广阔的发展前景。

3.3 用作肉制品加工原料

将天然抗菌剂纳米乳液直接添加到肉制品的加工配方中是一种便捷、有效的应用方法。Feng Xiao等^[91]研究发现, 与生育酚粗乳液相比, 生育酚纳米乳液更加有效地改善了鱼肠在4℃条件下贮藏16 d期间的品质。Moraes-Lovison等^[92]以牛至精油纳米乳液作为原料制作鸡肉饼时发现, 牛至精油纳米乳液对鸡肉饼中大肠杆菌和金黄色葡萄球菌具有较强抑制作用, 并且对鸡肉饼的感官品质无显著影响。同样, Pinelli等^[93]报道, 混合精油(豆蔻精油、肉桂精油、柠檬精油、辣椒精油)纳米乳液的添加能够显著减少熟肉制品中产孢梭菌的营养细胞。由此可见, 将天然抗菌剂纳米乳液作为原料用于肉制品的加工制作能够有效抑制肉制品中腐败微生物的生长, 具有良好保鲜效果, 但该方法并不适用于生鲜肉的保鲜。

4 结 语

纳米乳液作为一种纳米级包埋系统, 能够有效解决

天然抗菌剂在实际应用中的局限性, 增强天然抗菌剂的抑菌活性、提高天然抗菌剂稳定性并改善其释放性能。装载天然抗菌剂的纳米乳液在肉类保鲜中具有广阔的发展前景, 它可以用于制备可食性涂膜和活性包装膜, 还能够作为原料用于肉制品的加工制作。然而, 天然抗菌剂纳米乳液在实际应用中仍面临着一些挑战, 包括以下三方面: 1) 目前大规模制备纳米乳液的技术为高能制备技术, 这些技术操作条件剧烈, 会对性质不稳定的天然抗菌剂造成影响, 而低能制备技术仍处于实验室规模, 尚未投入大规模生产; 2) 用于制备纳米乳液的乳化剂大多为合成乳化剂, 可能对人体健康造成不利影响; 3) 目前对于纳米乳液被人体吸收后的潜在毒性尚不清楚, 需进行更深层次的研究。为使天然抗菌剂纳米乳液更好地应用于肉类保鲜, 应继续深入探索低能制备技术, 以扩大其应用规模。此外, 在今后的研究中, 需要更加注重对天然乳化剂的应用, 使天然抗菌剂纳米乳液在不损害人体健康的同时最大限度地发挥抑菌活性。另外, 针对纳米乳液对人体的潜在毒性应进行深入的体外模拟实验, 以确保天然抗菌剂纳米乳液被人体吸收后的安全性。最后, 将天然抗菌剂纳米乳液与其他保鲜技术联用可能取得更好的抑菌效果, 以实现肉类的高效保鲜。

参考文献:

- [1] 薛佳祺, 王颖, 周辉, 等. 包装技术在肉制品保鲜中的研究进展[J]. 食品工业科技, 2021, 42(16): 367-373. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2020080047.
- [2] ZHOU G H, XU X L, LIU Y, et al. Preservation technologies for fresh meat: a review[J]. Meat Science, 2010, 86(1): 119-128. DOI:10.1016/j.meatsci.2010.04.033.
- [3] 邓钰桢, 张亚迪, 杨晓溪, 等. 纳米技术在肉类保鲜中的应用研究进展[J]. 肉类研究, 2020, 34(12): 87-93. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20201123-276.
- [4] BELLÉS M, ALONSO V, RONCALÉS P, et al. A review of fresh lamb chilling and preservation[J]. Small Ruminant Research, 2017, 146: 41-47. DOI:10.1016/j.smallrumres.2016.12.003.
- [5] BISHT B, BHATNAGAR P, GURURANI P, et al. Food irradiation: effect of ionizing and non-ionizing radiations on preservation of fruits and vegetables: a review[J]. Trends in Food Science and Technology, 2021, 114: 372-385. DOI:10.1016/j.tifs.2021.06.002.
- [6] GUYON C, MEYNIER A, LAMBALLERIE M D. Protein and lipid oxidation in meat: a review with emphasis on high-pressure treatments[J]. Trends in Food Science and Technology, 2016, 50: 131-143. DOI:10.1016/j.tifs.2016.01.026.
- [7] SORO A B, NOORE S, HANNON S, et al. Current sustainable solutions for extending the shelf life of meat and marine products in the packaging process[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2021, 29(9): 100722. DOI:10.1016/j.fpsl.2021.100722.
- [8] MUNEKATA P, ROCCHETTI G, PATEIRO M, et al. Addition of plant extracts to meat and meat products to extend shelf-life and health-promoting attributes: an overview[J]. Current Opinion in Food Science, 2020, 31: 81-87. DOI:10.1016/j.cofs.2020.03.003.

- [9] 朱燕莉, 王正莉, 王卫, 等. 天然食品防腐剂的抑菌机理研究进展[J]. 中国调味品, 2021, 46(9): 176-180. DOI:10.3969/j.issn.1000-9973.2021.09.034.
- [10] SMAOUI S, HLIMA H B, BRAÏEK O B, et al. Recent advancements in encapsulation of bioactive compounds as a promising technique for meat preservation[J]. Meat Science, 2021, 181: 108585. DOI:10.1016/j.meatsci.2021.108585.
- [11] NASEEMA A, LOHITESH K, ALOK K B, et al. A critical review of synthesis procedures, applications and future potential of nanoemulsions[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2021, 287: 102318. DOI:10.1016/j.cis.2020.102318.
- [12] REHMAN A, TONG Q Y, SHARIF H R, et al. Biopolymer based nanoemulsion delivery system: an effective approach to boost the antioxidant potential of essential oil in food products[J]. Carbohydrate Polymer Technologies and Applications, 2021, 2: 100082. DOI:10.1016/j.carpta.2021.100082.
- [13] MCCLEMENTS D J. Advances in edible nanoemulsions: digestion, bioavailability, and potential toxicity[J]. Progress in Lipid Research, 2021, 81: 101081. DOI:10.1016/j.plipres.2020.101081.
- [14] JAMALI S N, ASSADPOUR E, FENG J G, et al. Natural antimicrobial-loaded nanoemulsions for the control of food spoilage/pathogenic microorganisms[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2021, 295: 102504. DOI:10.1016/j.cis.2021.102504.
- [15] 张冉冉, 杜玉兰, 范培浩, 等. 油包水乳化体系稳定性的研究与分析[J]. 日用化学工业, 2020, 50(8): 566-571. DOI:10.3969/j.issn.1001-1803.2020.08.010.
- [16] LIANG Chunxia, QI Dongli, ZHANG Lina, et al. Preparation and evaluation of a water-in-oil nanoemulsion drug delivery system loaded with salidroside[J]. Chinese Journal of Natural Medicines, 2021, 19(3): 231-240. DOI:10.1016/S1875-5364(21)60025-0.
- [17] 陈雯烨, 王志高, 鞠荣兴, 等. 纳米乳的研究进展与潜在局限性[J]. 粮食科技与经济, 2020, 45(3): 79-83. DOI:10.16465/j.gste.cn431252ts.20200322.
- [18] RAVERA F, DZIZA K, SANTINI E, et al. Emulsification and emulsion stability: the role of the interfacial properties[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2021, 288: 102344. DOI:10.1016/j.cis.2020.102344.
- [19] KIM W, WANG Y, SELOMULYA C. Dairy and plant proteins as natural food emulsifiers[J]. Trends in Food Science and Technology, 2020, 105: 261-272. DOI:10.1016/j.tifs.2020.09.012.
- [20] 江连洲, 李佳妮, 姜楠, 等. 纳米乳液制备技术及功能应用研究进展[J]. 中国食物与营养, 2017, 23(6): 33-38. DOI:10.3969/j.issn.1006-9577.2017.06.008.
- [21] TAHA A, AHMED E, ISMAIEL A, et al. Ultrasonic emulsification: an overview on the preparation of different emulsifiers-stabilized emulsions[J]. Trends in Food Science and Technology, 2020, 105: 363-377. DOI:10.1016/j.tifs.2020.09.024.
- [22] LIU Chang, PEI Ruisong, HEINONEN M. Faba bean protein: a promising plant-based emulsifier for improving physical and oxidative stabilities of oil-in-water emulsions[J]. Food Chemistry, 2022, 369: 130879. DOI:10.1016/j.foodchem.2021.130879.
- [23] AKHTAR M, DING R. Covalently cross-linked proteins and polysaccharides: formation, characterisation and potential applications[J]. Current Opinion in Colloid and Interface Science, 2017, 28: 31-36. DOI:10.1016/j.cocis.2017.01.002.
- [24] MARHAMATI M, RANJBAR G, REZAIE M. Effects of emulsifiers on the physicochemical stability of oil-in-water nanoemulsions: a critical review[J]. Journal of Molecular Liquids, 2021, 340: 117218. DOI:10.1016/j.molliq.2021.117218.
- [25] PANDEY A K, CHÁVEZ-GONZÁLEZ M L, SILVA A S, et al. Essential oils from the genus *Thymus* as antimicrobial food preservatives: progress in their use as nanoemulsions: a new paradigm[J]. Trends in Food Science and Technology, 2021, 111: 426-441. DOI:10.1016/j.tifs.2021.02.076.
- [26] 刘伟, 宋弋, 张洁, 等. 高压均质在食品加工中的研究进展[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(24): 213-219. DOI:10.3969/j.issn.1005-6521.2017.24.042.
- [27] SONI G, KALE K, SHETTY S, et al. Quality by design (QbD) approach in processing polymeric nanoparticles loading anticancer drugs by high pressure homogenizer[J]. Heliyon, 2020, 6(4): e03846. DOI:10.1016/j.heliyon.2020.e03846.
- [28] THOMAS S H, LEONG, ZHOU Meifang, et al. Preparation of water-in-oil-in-water emulsions by low frequency ultrasound using skim milk and sunflower oil[J]. Food Hydrocolloids, 2017, 63: 685-695. DOI:10.1016/j.foodhyd.2016.10.017.
- [29] MODARRES-GHEISARI S M M, GAVAGSAZ-GHOACHANI R, MALAKI M, et al. Ultrasonic nano-emulsification: a review[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2019, 52: 88-105. DOI:10.1016/j.ulsonch.2018.11.005.
- [30] KOROLEVA M Y, YURTOV E V. Nanoemulsions: the properties, methods of preparation and promising applications[J]. Russian Chemical Reviews, 2012, 81(1): 21-43. DOI:10.1070/RC2012v081n01ABEH004219.
- [31] 王爽爽. 高压微射流制备杜仲籽油纳米乳液的研究及应用[D]. 郑州: 郑州轻工业大学, 2020: 16-18. DOI:10.27469/d.cnki.gzzqc.2020.000010.
- [32] SOLANS C, SOLÉ I. Nano-emulsions: formation by low-energy methods[J]. Current Opinion in Colloid and Interface Science, 2012, 17(5): 246-254. DOI:10.1016/j.cocis.2012.07.003.
- [33] ZHANG Lin, ZHANG Fang, FAN Zhaokai, et al. DHA and EPA nanoemulsions prepared by the low-energy emulsification method: process factors influencing droplet size and physicochemical stability[J]. Food Research International, 2019, 121: 359-366. DOI:10.1016/j.foodres.2019.03.059.
- [34] SOLANS C, MORALES D, HOMES M. Spontaneous emulsification[J]. Current Opinion in Colloid and Interface Science, 2016, 22: 88-93. DOI:10.1016/j.cocis.2016.03.002.
- [35] DHRITLAHRE R K, RUCHIKA, PADWAD Y, et al. Self-emulsifying formulations to augment therapeutic efficacy of nutraceuticals: from concepts to clinic[J]. Trends in Food Science and Technology, 2021, 115: 347-365. DOI:10.1016/j.tifs.2021.06.046.
- [36] PERAZZO A, PREZIOSI V, GUIDO S. Phase inversion emulsification: current understanding and applications[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2015, 222: 581-599. DOI:10.1016/j.cis.2015.01.001.
- [37] JIANG Tian, LIAO Wei, CHARCOSSET C, et al. Recent advances in encapsulation of curcumin in nanoemulsions: a review of encapsulation technologies, bioaccessibility and applications[J]. Food Research International, 2020, 132: 109035. DOI:10.1016/j.foodres.2020.109035.
- [38] VLADISAVLJEVIĆ G T. Preparation of microemulsions and nanoemulsions by membrane emulsification[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2019, 579: 123709. DOI:10.1016/j.colsurfa.2019.123709.
- [39] JIANG Tian, CHARCOSSET C. Premix membrane emulsification for the preparation of curcumin-loaded nanoemulsions[J]. Journal of Food Engineering, 2022, 316: 110836. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2021.110836.
- [40] NAZIR A, VLADISAVLJEVIĆ G T. Droplet breakup mechanisms in premix membrane emulsification and related microfluidic channels[J].

- Advances in Colloid and Interface Science, 2021, 290: 102393. DOI:10.1016/j.cis.2021.102393.
- [41] BATIHA G E, HUSSEIN D E, ABDELAZEEM M, et al. Application of natural antimicrobials in food preservation: recent views[J]. Food Control, 2021, 126: 108066. DOI:10.1016/j.foodcont.2021.108066.
- [42] CHAUDHARI A K, SINGH V K, DAS S, et al. Nanoencapsulation of essential oils and their bioactive constituents: a novel strategy to control mycotoxin contamination in food system[J]. Food and Chemical Toxicology, 2021, 149: 112019. DOI:10.1016/j.fct.2021.112019.
- [43] 郭娟, 张进, 王佳敏, 等. 天然抗菌剂在食品包装中的研究进展[J]. 食品科学, 2021, 42(9): 336-346. DOI:10.7506/spkx.1002-6630-20200406-066.
- [44] ALMATROODI S A, ALSAHLI M A, ALMATROUDI A, et al. Cinnamon and its active compounds: a potential candidate in disease and tumour management through modulating various genes activity[J]. Gene Reports, 2020, 21(10): 100966. DOI:10.1016/j.genrep.2020.100966.
- [45] ALIREZALU K, PATEIRO M, YAGHOUBI M, et al. Phytochemical constituents, advanced extraction technologies and techno-functional properties of selected Mediterranean plants for use in meat products. A comprehensive review[J]. Trends in Food Science and Technology, 2020, 100: 292-306. DOI:10.1016/j.tifs.2020.04.010.
- [46] DEL PILAR SÁNCHEZ-CAMARGO A, HERRERO M. Rosemary (*Rosmarinus officinalis*) as a functional ingredient: recent scientific evidence[J]. Current Opinion in Food Science, 2017, 14: 13-19. DOI:10.1016/j.cofs.2016.12.003.
- [47] 吴子龙, 赵昕, 耿霄, 等. 连翘精油在食品中应用的研究进展[J]. 农技服务, 2017, 34(1): 9-10. DOI:10.3969/j.issn.1004-8421.2017.01.003.
- [48] RATHOD N B, KULAWIK P, OZOGUL F, et al. Biological activity of plant-based carvacrol and thymol and their impact on human health and food quality[J]. Trends in Food Science and Technology, 2021, 116: 733-748. DOI:10.1016/j.tifs.2021.08.023.
- [49] YAZGAN H. Investigation of antimicrobial properties of sage essential oil and its nanoemulsion as antimicrobial agent[J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 130: 109669. DOI:10.1016/j.lwt.2020.109669.
- [50] 伍燕, 何元琴, 易君明, 等. 不同大蒜精油成分及生物活性对比分析[J]. 现代食品科技, 2020, 36(6): 75-81. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2020.6.1214.
- [51] SILVA B D, BERNARDES P C, PINHEIRO P F, et al. Chemical composition, extraction sources and action mechanisms of essential oils: natural preservative and limitations of use in meat products[J]. Meat Science, 2021, 176: 108463. DOI:10.1016/j.meatsci.2021.108463.
- [52] 唐敏敏, 王虹懿, 刘芳, 等. 植物精油纳米包埋技术的作用机制及其在肉品保鲜中的应用[J]. 食品工业科技, 2020, 41(21): 345-350. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2020020013.
- [53] FALLEH H, JEMAA M B, SAADA M, et al. Essential oils: a promising eco-friendly food preservative[J]. Food Chemistry, 2020, 330: 127268. DOI:10.1016/j.foodchem.2020.127268.
- [54] PISOSCHI A M, POP A, GEORGESCU C, et al. An overview of natural antimicrobials role in food[J]. European Journal of Medicinal Chemistry, 2018, 143: 922-935. DOI:10.1016/j.ejmech.2017.11.095.
- [55] 徐畅, 于基成, 刘秋. 微生物源食品保鲜剂的研究进展[J]. 包装工程, 2021, 42(13): 9-20. DOI:10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.13.002.
- [56] MAŁACZEWSKA J, KACZOREK-ŁUKOWSKA E. Nisin: a lantibiotic with immunomodulatory properties: a review[J]. Peptides, 2021, 137: 170479. DOI:10.1016/j.peptides.2020.170479.
- [57] KHAN I, OH D H. Integration of nisin into nanoparticles for application in foods[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2016, 34: 376-384. DOI:10.1016/j.ifset.2015.12.013.
- [58] BAHRAMI A, DELSHADI R, JAFARI S M, et al. Nanoencapsulated nisin: an engineered natural antimicrobial system for the food industry[J]. Trends in Food Science and Technology, 2019, 94: 20-31. DOI:10.1016/j.tifs.2019.10.002.
- [59] 程琳丽. 乳酸链球菌素的研究现状及在食品中的应用[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(11): 3581-3585. DOI:10.19812/j.cnki.jfsq.11-5956/ts.2020.11.037.
- [60] SHEN Chaoyi, CAO Yang, RAO Jingshan, et al. Application of solution blow spinning to rapidly fabricate natamycin-loaded gelatin/zein/polyurethane antimicrobial nanofibers for food packaging[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2021, 29: 100721. DOI:10.1016/j.fpsl.2021.100721.
- [61] TORRIJOS R, NAZARETH T M, CALPE J, et al. Antifungal activity of natamycin and development of an edible film based on hydroxyethylcellulose to avoid *Penicillium* spp. growth on low-moisture mozzarella cheese[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 154: 112795. DOI:10.1016/j.lwt.2021.112795.
- [62] 陈方圆, 戴久竣, 徐家延, 等. 纳他霉素抑菌机制及在食品保鲜中的应用研究进展[J]. 食品科技, 2021, 46(9): 47-51. DOI:10.13684/j.cnki.spkj.2021.09.010.
- [63] 宋雪健, 张东杰, 王洪江, 等. 天然生物抗菌剂纳他霉素在食品中的应用及研究进展[J]. 保鲜与加工, 2017, 17(5): 129-135. DOI:10.3969/j.issn.1009-6221.2017.05.022.
- [64] DONSI F, FERRARI G. Essential oil nanoemulsions as antimicrobial agents in food[J]. Journal of Biotechnology, 2016, 233: 106-120. DOI:10.1016/j.jbiotec.2016.07.005.
- [65] WANG Yanbo, CEN Congnan, CHEN Jian, et al. Nano-emulsification improves physical properties and bioactivities of *Litsea cubeba* essential oil[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 137: 110361. DOI:10.1016/j.lwt.2020.110361.
- [66] MATÉ J, PERIAGO P M, PALOP A. When nanoemulsified, *D*-limonene reduces *Listeria monocytogenes* heat resistance about one hundred times[J]. Food Control, 2016, 59: 824-828. DOI:10.1016/j.foodcont.2015.07.020.
- [67] LIU Xiaoli, CHEN Liuqing, KANG Yanan, et al. Cinnamon essential oil nanoemulsions by high-pressure homogenization: formulation, stability, and antimicrobial activity[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 147: 111660. DOI:10.1016/j.lwt.2021.111660.
- [68] KREUTZ T, CARNEIRO S B, SOARES K D, et al. *Aniba canelilla* (Kunth) Mez essential oil-loaded nanoemulsion: improved stability of the main constituents and *in vitro* antichemotactic activity[J]. Industrial Crops and Products, 2021, 171: 113949. DOI:10.1016/j.indcrop.2021.113949.
- [69] ZHENG Bingjing, ZHANG Zipei, CHEN Fang, et al. Impact of delivery system type on curcumin stability: comparison of curcumin degradation in aqueous solutions, emulsions, and hydrogel beads[J]. Food Hydrocolloids, 2017, 71: 187-197. DOI:10.1016/j.foodhyd.2017.05.022.
- [70] CHEN Wenye, JU Xingrong, ALUKO R E, et al. Rice bran protein-based nanoemulsion carrier for improving stability and bioavailability of quercetin[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 108: 106042. DOI:10.1016/j.foodhyd.2020.106042.
- [71] KHARAT M, ZHANG Guodong, MCCLEMENTS D J. Stability of curcumin in oil-in-water emulsions: impact of emulsifier type and concentration on chemical degradation[J]. Food Research International, 2018, 111: 178-186. DOI:10.1016/j.foodres.2018.05.021.

- [72] AGRAWAL N, MADDIKERI G L, PANDIT A B. Sustained release formulations of citronella oil nanoemulsion using cavitation techniques[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2017, 36: 367-374. DOI:10.1016/j.ultsonch.2016.11.037.
- [73] SYED I, BANERJEE P, SARKAR P. Oil-in-water emulsions of geraniol and carvacrol improve the antibacterial activity of these compounds on raw goat meat surface during extended storage at 4 °C[J]. Food Control, 2020, 107: 106757. DOI:10.1016/j.foodcont.2019.106757.
- [74] ADJONU R, DORAN G, TORLEY P, et al. Whey protein peptides as components of nanoemulsions: a review of emulsifying and biological functionalities[J]. Journal of Food Engineering, 2014, 122: 15-27. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2013.08.034.
- [75] MAJEED H, LIU Fei, HATEGEKIMANA J, et al. Bactericidal action mechanism of negatively charged food grade clove oil nanoemulsions[J]. Food Chemistry, 2016, 197: 75-83. DOI:10.1016/j.foodchem.2015.10.015.
- [76] CHEN Zhang, SHU Gaofeng, TAARJI N, et al. Gypenosides as natural emulsifiers for oil-in-water nanoemulsions loaded with astaxanthin: insights of formulation, stability and release properties[J]. Food Chemistry, 2018, 261: 322-328. DOI:10.1016/j.foodchem.2018.04.054.
- [77] 李其轩, 扈莹莹, 孔保华. 动物蛋白质可食性涂膜降低深度油炸食品油脂含量的研究进展[J]. 中国食品学报, 2021, 21(4): 384-393. DOI:10.16429/j.1009-7848.2021.04.045.
- [78] XIONG Yun, LI Shumin, WARNER R D, et al. Effect of oregano essential oil and resveratrol nanoemulsion loaded pectin edible coating on the preservation of pork loin in modified atmosphere packaging[J]. Food Control, 2020, 114: 107226. DOI:10.1016/j.foodcont.2020.107226.
- [79] WANG Lei, LIU Ting, LIU Liu, et al. Impacts of chitosan nanoemulsions with thymol or thyme essential oil on volatile compounds and microbial diversity of refrigerated pork meat[J]. Meat Science, 2022, 185: 108706. DOI:10.1016/j.meatsci.2021.108706.
- [80] ABDOL E S, GALHOUM G F, MOHAMED E N. Curcumin loaded nanoemulsions/pectin coatings for refrigerated chicken fillets[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 83: 445-453. DOI:10.1016/j.foodhyd.2018.05.026.
- [81] SHOKRI S, PARASTOUEI K, TAGHDIR M, et al. Application an edible active coating based on chitosan-*Ferulago angulata* essential oil nanoemulsion to shelf life extension of rainbow trout fillets stored at 4 °C[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 153: 846-854. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2020.03.080.
- [82] HUANG Mingyuan, WANG Huhu, XU Xinglian, et al. Effects of nanoemulsion-based edible coatings with composite mixture of rosemary extract and ϵ -poly-L-lysine on the shelf life of ready-to-eat carbonado chicken[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 102: 105576. DOI:10.1016/j.foodhyd.2019.105576.
- [83] SUN Yanan, ZHANG Min, BHANDARI B, et al. Nanoemulsion-based edible coatings loaded with fennel essential oil/cinnamaldehyde: characterization, antimicrobial property and advantages in pork meat patties application[J]. Food Control, 2021, 127: 108151. DOI:10.1016/j.foodcont.2021.108151.
- [84] LIU Qiong, ZHANG Min, BHANDARI B, et al. Effects of nanoemulsion-based active coatings with composite mixture of star anise essential oil, polylysine, and nisin on the quality and shelf life of ready-to-eat Yao meat products[J]. Food Control, 2020, 107: 106771. DOI:10.1016/j.foodcont.2019.106771.
- [85] 侯晓阳. 新型食品包装材料的发展概况及趋势[J]. 食品安全质量检测学报, 2018, 9(24): 6400-6405. DOI:10.3969/j.issn.2095-0381.2018.24.010.
- [86] ZHANG Xinhui, LIU Donghong, JIN T Z, et al. Preparation and characterization of gellan gum-chitosan polyelectrolyte complex films with the incorporation of thyme essential oil nanoemulsion[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 114(1): 106570. DOI:10.1016/j.foodhyd.2020.106570.
- [87] HASHEMINYA S M, DEGHANNYA J. Development and characterization of novel edible films based on *Cordia dichotoma* gum incorporated with *Salvia mirzayanii* essential oil nanoemulsion[J]. Carbohydrate Polymers, 2021, 257: 117606. DOI:10.1016/j.carbpol.2020.117606.
- [88] 雷凯. 香芹酚纳米乳-羧甲基壳聚糖复合食品包装膜的制备与性能研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019: 20-21.
- [89] AMIRI E, AMINZARE M, AZAR H H, et al. Combined antioxidant and sensory effects of corn starch films with nanoemulsion of *Zataria multiflora* essential oil fortified with cinnamaldehyde on fresh ground beef patties[J]. Meat Science, 2019, 153: 66-74. DOI:10.1016/j.meatsci.2019.03.004.
- [90] ANSARIAN E, AMINZARE M, AZAR H H, et al. Nanoemulsion-based basil seed gum edible film containing resveratrol and clove essential oil: *in vitro* antioxidant properties and its effect on oxidative stability and sensory characteristic of camel meat during refrigeration storage[J]. Meat Science, 2022, 185: 108716. DOI:10.1016/j.meatsci.2021.108716.
- [91] FENG Xiao, TJIA J Y Y, ZHOU Yige, et al. Effects of tocopherol nanoemulsion addition on fish sausage properties and fatty acid oxidation[J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 118: 108737. DOI:10.1016/j.lwt.2019.108737.
- [92] MORAES-LOVISON M, MAROSTEGAN L, PERES M S, et al. Nanoemulsions encapsulating oregano essential oil: production, stability, antibacterial activity and incorporation in chicken pâté[J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 77: 233-240. DOI:10.1016/j.lwt.2016.11.061.
- [93] PINELLI J J, MARTINS H, GUIMARÃES A S, et al. Essential oil nanoemulsions for the control of *Clostridium sporogenes* in cooked meat product: an alternative?[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 143: 111123. DOI:10.1016/j.lwt.2021.111123.