

中南林业科技大学学报

Journal of Central South University of Forestry & Technology

ISSN 1673-923X，CN 43-1470/S

《中南林业科技大学学报》2026年第8期

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923X.2026.08.002

论文标题： 植物精油对单增李斯特菌的抑制作用及抑菌机制研究进展

作　　者： 彭湘莲，陈天洋

收稿日期： 2026-01-27

引文格式： 彭湘莲,陈天洋.植物精油对单增李斯特菌的抑制作用及抑菌机制研究进展[J].中南林业科技大学学报,2026,46(8):14-25.

Peng X L, Chen T Y. Research progress on the inhibitory effect and antibacterial mechanism of plant essential oils against *Listeria monocytogenes*[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(8):14-25.

相关论文推荐

Recommended articles

杜松精油对樟子松松球壳孢菌抑菌活性分析

Analysis of the antibacterial activity of juniper essential oil against the *Sphaeropsis sapinea* of *Pinus sylvestris* var. *mongolica*

4种植物精油对肉源致病菌和腐败菌的抑菌活性及其有效抑菌成分分析

Antimicrobial activity of four plant essential oils against meat-derived pathogenic and spoilage bacteria and analysis of their effective antimicrobial components

2株拮抗生防菌对油茶炭疽病多种病原菌的抑菌活性及防效

Antibacterial activity and control effect of two antagonistic biocontrol bacteria against various pathogens of *Camellia oleifera* anthracnose

生物炭配施对芳樟精油产量及品质的影响

Effects of biochar application on the yield and quality of *Cinnamomum camphora* essential oil

红松不同部位精油的成分分析及抑菌活性

Phytochemical composition and antibacterial activity of the essential oils from different parts of Korean pine

植物精油对木材霉变菌的抑菌效力研究

Antifungal efficacy of plant essential oils against wood mould and stain fungi

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923x.2026.08.002 http: //qks.csuft.edu.cn

植物精油对单增李斯特菌的抑制作用及抑菌机制研究进展

彭湘莲，陈天洋

（中南林业科技大学，湖南 长沙 410004）

摘　要：单增李斯特菌是一种革兰氏阳性短杆菌，作为主要食源性致病菌之一，会污染生产、加工和储存过程中的食品，导致潜在的食品安全问题，进而引起李斯特菌病，导致肠胃炎、败血症、脑膜炎、流产甚至死亡，死亡率高达 20% ～ 30%，严重威胁公众健康与食品安全。近年来，植物精油因无毒无害、成分天然的优势，被认定为天然食品保鲜剂，已成为抑制单增李斯特菌的研究热点。已有研究主要集中在抑菌效果评价、抑菌机制解析以及其在食品中的应用效果等方面，目前关于其抑菌机制的研究仍不够深入。本研究系统论述单增李斯特菌的生物学特征及致病机理，阐明关键毒力因子在细菌黏附、入侵、增殖等致病环节中的核心作用；阐述不同植物精油对单增李斯特菌的抑制活性及其在食品工业中的应用现状，分析植物精油抑制单增李斯特菌的潜在作用机制，明确其可通过破坏细胞膜结构、阻断核酸与蛋白质合成、干扰代谢途径以及调节毒力因子表达等多种方式发挥抑菌作用；归纳转录组学技术在植物精油抑菌机制研究领域的应用成果，强调该技术在阐明分子层面抑菌机制中的关键作用，展现其在相关研究应用中的独特优势，为后续开发高效、安全的天然食品防腐剂，推动植物精油在食品安全领域的产业化应用提供理论参考。

关键词：单增李斯特菌；植物精油；抑菌机理；转录组学

中图分类号：S763.18；TS201.3　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1673-923X(2026)08-0014-12

Research progress on the inhibitory effect and antibacterial mechanism of plant essential oils against *Listeria monocytogenes*

Peng Xianglian, Chen Tianyang

(Central South University of Forestry & Technology, Changsha 410004, Hunan, China)

Abstract: *Listeria monocytogenes* is a gram-positive brachy bacteria that can contaminate food during production, processing and storage, leading to potential food safety issues and listeriosis. The disease can cause gastroenteritis, sepsis, meningitis, abortion and even death, with a mortality rate of 20%-30%, seriously threatening public health and food safety. In recent years, plant essential oils have been known as natural food preservatives due to their non-toxic and harmless advantages and natural ingredients, and are a research hotspot for inhibiting *Listeria monocytogenes*. The research on the inhibition of *Listeria monocytogenes* by plant essential oils mainly focuses on the evaluation of antibacterial effect, the analysis of antibacterial mechanism and its application effect in food, but the in-depth analysis of its antibacterial mechanism is still insufficient. This review systematically discusses the biological characteristics and pathogenesis of *Listeria monocytogenes*, and clarifies the central role of key virulence factors in bacterial adhesion, invasion, proliferation and other pathogenic links. The inhibitory activity of different plant essential oils against *Listeria monocytogenes* and their application status in the food industry were summarized, and the potential mechanism of plant essential oils to inhibit *Listeria monocytogenes* was analyzed. It was clarified that it could play a bacteriostatic effect by destroying cell membrane structure, blocking nucleic acid and protein synthesis, interfering with metabolic pathways, and regulating the expression of virulence factors. At the same time, the application results of transcriptomics technology in this field are summarized for the above-mentioned antibacterial mechanisms, and its role in elucidating the antibacterial mechanism at the molecular level is emphasized, and the unique advantages of this technology in research and application are demonstrated. It provides a theoretical reference for the subsequent development of efficient and safe natural food preservatives and the industrial application of plant essential oils in the field of food safety.

Keywords: *Listeria monocytogenes*; plant essential oils; antibacterial mechanism; transcriptomics

收稿日期（Received）：2026-01-27　　**修订日期**（Revised）：2026-04-03

基金项目：湖南省林业科技攻关与创新资金项目（XLK202626）。

第一作者：彭湘莲（XianglianPeng@csuft.edu.cn），教授，博士，硕士研究生导师。

引文格式：彭湘莲 , 陈天洋 . 植物精油对单增李斯特菌的抑制作用及抑菌机制研究进展 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2026,46(8):14-25.

Peng X L, Chen T Y. Research progress on the inhibitory effect and antibacterial mechanism of plant essential oils against *Listeria monocytogenes*[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(8):14-25.

单核细胞增生李斯特菌 *Listeria monocytogenes*，简称单增李斯特菌（LM）[1]，是革兰氏阳性嗜冷菌，兼性厌氧，一般呈短杆状，偶尔有球状。目前，在李斯特菌属中已鉴定出 29 种李斯特菌，其中伊氏李斯特菌 *Listeria ivanovii* 和单增李斯特菌对动物有致病性，伊氏李斯特菌多出现在牛羊等动物中，很少出现对人类致病的病例 [2]，而单增李斯特菌对人和动物均有致病性 [3]。20 世纪 90 年代，世界卫生组织就将单增李斯特菌与大肠杆菌 O157:H7、金黄色葡萄球菌和沙门氏菌并列为四大食源性致病菌。人体感染单增李斯特菌后会导致肠胃炎、败血症、脑膜炎、流产甚至死亡 [4]。据报道，最易感染李斯特菌的人群为儿童、老年人、免疫功能低下者和孕妇，死亡率高达 20% ～ 30%[5]。单增李斯特菌生存范围广，对各类理化因素抵抗力强，在低温、低 pH 值和高盐浓度下均可生长 [6]。单增李斯特菌极易在食品加工环境中残留，对低温条件下的肉类产品容易造成安全隐患 [7]。植物精油不同于传统化学合成杀菌剂，具有生物可降解性、安全性和环境友好等优势，可有效抑制多种微生物，且不会对生态系统造成影响，这类源自植物的天然产物在食品保鲜、加工及公共卫生健康等实际应用场景中具有广阔发展潜力。本研究旨在阐明单增李斯特菌的基本概况，系统梳理单增李斯特菌在食品中的应用及致病机理，探究植物精油的抑菌活性及其抑菌机理，运用转录组技术对抑菌机制进行分析，以期为未来开展植物精油抑制单增李斯特菌的相关研究提供理论参考。

1　单增李斯特菌概述

1.1　单增李斯特菌在食品中的危害

单增李斯特菌广泛存在于低温肉制品中，在新鲜果蔬、速食产品、液态奶制品及食品接触表面也均有检出，该菌对食品的污染已成为备受关注的公共卫生问题。其在自然环境中分布广泛，土壤、各类水体及动物排泄物中均有存在。即食食品如三明治、沙拉、熟肉制品等，在生产加工过程中若操作不当或储存温度控制不佳，也极易滋生单增李斯特菌。乳制品方面，未经巴氏杀菌的生牛奶、奶酪（尤其是软质奶酪）等产品因营养丰富且酸度较低，为单增李斯特菌提供了理想的生长环境。单增李斯特菌作为典型的嗜冷菌，具有极强的低温适应能力，在 0 ～ 45 ℃可维持正常的生理活动，即便在冷藏条件下也无法将其彻底杀灭，这使得其在各类食品中的污染风险持续存在，给食品安全带来了严峻挑战，同时也受到监管部门和公众的高度关注 [8]。食源性李斯特菌病已在全球范围内多次引发大规模疫情，加拿大凉拌卷心菜 [9]、美国哈密瓜 [10]、南非即食加工肉类“polony”[11] 及瑞士酵母制品 [12] 等均检出单增李斯特菌，相关疫情累计报告病例最高达 937 例，病死率最高达 20.6%。由此可见，单增李斯特菌对公共卫生安全的威胁不可忽视，其引发的食源性疾病危害十分严重。

1.2　单增李斯特菌的致病机理

如图 1 所示，人体摄入单增李斯特菌污染的食物后，该菌可穿越肠道上皮屏障，通过淋巴系统进入血液循环并扩散至肝脾等重要器官，尤其是对儿童、老年人、免疫缺陷人群及孕妇等易感群体，还可穿透血脑屏障或胎盘屏障引发严重的全身性感染，进而出现脑膜炎、败血症、早产或流产等危及生命安全的症状 [1]。

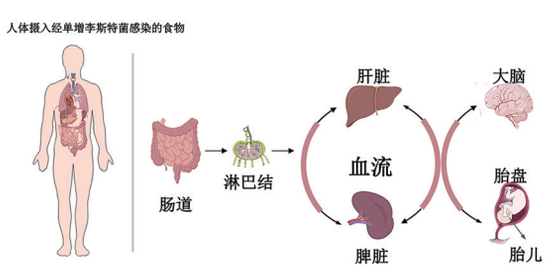


图 1　单增李斯特菌感染人体概况
Fig. 1　Overview of human infection by *Listeria monocytogenes*

单增李斯特菌的致病机制主要源于其产生的毒素及毒力因子，这些病原体均携带毒力岛 1（*Listeria* pathoge-nicity island 1，LIPI-1），是单增李斯特菌毒性基因调控的中枢区域 [13]。毒力岛 1 包含 *prfA*、*plcA*、*plcB*、*hly*、*mpl* 和 *actA* 共 6 个关键编码基因 [14]，*plcA* 和 *plcB* 分别指导磷脂酰肌醇磷脂酶 C（PI-PLC）与磷脂酰胆碱磷脂酶 C（PC-PLC）的合成，并且这 2 种酶可帮助单增李斯特菌抵抗宿主吞噬细胞的清除作用，从而增强该菌在细胞间的扩散与裂解能力。*hly* 基因负责编码主要毒力因子李斯特菌溶血素 O（LLO），且该毒素可识别并结合靶细胞膜上的胆固醇，随后发生构象变化，在细胞膜上形成穿孔复合体，最终导致细胞内成分外泄。LM 入侵宿主细胞后，LLO 还可介导细菌从初级和次级吞噬体中释放，*actA* 基因调控细菌表面肌动蛋白聚集蛋白（ActA）

的表达，且该蛋白赋予 LM 利用宿主肌动蛋白运动的特性，从而推动细菌在细胞内移动并促进其直接扩散至邻近细胞。

LM 的毒力特性不仅源自 LIPI-1 基因编码的致病蛋白，LIPI-2 毒力岛基因簇产生的毒素同样在决定其致病潜能与宿主损伤程度中发挥着不可或缺的作用。单增李斯特菌中最早被发现的内化素家族成员是由 *inlA-inlB* 操纵子编码的内化素 A（InlA）与内化素 B（InlB），这 2 种蛋白可介导病原体黏附并入侵非吞噬细胞，其 N 端存在的亮氨酸重复序列（LRRs）结构域能够识别宿主细胞表面受体，其中 InlA 可与 E- 钙黏蛋白（E-cadherin）结合，InlB 可与肝细胞生长因子受体 Met 的胞外段发生相互作用，配体与受体的特异性识别会触发宿主细胞局部肌动蛋白骨架发生重排与聚合，进而实现细菌的宿主细胞内化 [15]。

单增李斯特菌 LIPI-3 毒力岛仅在其Ⅰ谱系菌株的分离样本中被检出 [16]。LIPI-3 基因簇由 8 个基因组成，与李斯特菌溶血素 S（Listeriolysin S，LLS）的合成及菌株高致病性直接相关 [17]。LLS 是经翻译后修饰的溶血素，不诱导宿主产生特异性免疫反应，无真核细胞直接杀伤作用，对单增李斯特菌入侵宿主细胞的能力无显著影响，可通过重塑宿主肠道微生物群落结构促进病原体肠道定植与感染扩散 [18]。

Maury 等 [19] 通过整合基因组学与流行病学数据，解析获得 1 组与单增李斯特菌致病相关的新型基因模块，并将其命名为 LIPI-4，该基因簇编码纤维二糖家族磷酸转移酶系统 [20]，可作为超毒力因子参与母婴感染与中枢神经系统病变过程。现有研究已证实 LIPI-4 与菌株高致病力存在密切关联，但具体的分子调控机制仍有待深入研究。近年来，携带 LIPI-4 的高致病性单增李斯特菌在即食食品、乳制品及加工环境中被频繁检出 [21-23]，此类菌株的流行对我国食品安全监管体系与公共卫生安全都构成了直接威胁。

综上所述，单增李斯特菌可通过受体介导的内吞机制入侵上皮细胞等非吞噬细胞，且通常能迅速从液泡中逃逸；该菌在杯状细胞中可能以囊泡形态完成跨细胞转运，还有一部分会滞留在巨噬细胞内的含李斯特菌吞噬小体（Spacious Listeria-containing phagosomes，SLAPs）中，并完成增殖。该病原菌依靠多种强毒力因子对宿主细胞产生多层面作用，李斯特菌溶血素 O（Listeriolysin O，LLO）、磷脂酶 A（PlcA）及磷脂酶 B（PlcB）共同介导其逃逸囊泡限制。LLO 还可在胞外以成孔方式引发组蛋白修饰改变、去小泛素化、线粒体分裂、内质网应激及溶酶体膜透性增强等细胞生理反应。核靶向蛋白 A（Listeria nuclear targeted protein A，LntA）可与溴相邻同源结构域 1 蛋白（Bromo adjacent homology domain-containing 1，BAHD1）复合体相互作用，解除对干扰素刺激基因（Interferon-stimulated genes，ISGs）的抑制。NAD 依赖型去乙酰酶 sirtuin-2 能够进入细胞核，介导组蛋白 H3 第 18 位赖氨酸去乙酰化，进而调控染色质堆积状态变化与相关基因的表达水平。单增李斯特菌感染还可能诱发宿主细胞 DNA 损伤，宿主细胞会通过上调多种抗菌因子的表达来应对这一威胁；其中增强的 ISG15 蛋白及其介导的 ISG 化修饰，可以通过改变内质网与高尔基体蛋白的共价修饰状态，调控细胞因子释放，进而影响免疫反应的整体走向 [1]（图 2）。

2 植物精油概述

2.1 植物精油简介

植物精油是源自植物、具有特殊芳香气味的天然次生代谢产物 [24]。它是由多种化学成分构成的复杂混合物，组分构成极为多样，单一精油中可检测出数十甚至数百种不同化合物，大多数精油的主要成分为单萜及其含氧衍生物。植物精油包含酚类、单宁等多种生物活性物质，拥有很强的抑菌活性，且来源广泛、品种丰富，具备抗菌、抗炎、抗氧化等多重生物学活性 [25]。此外，植物精油挥发性强，兼具长效广谱抑菌性、优异的生物降解性能以及良好的食品稳定性等优势，目前已成为抑菌剂的优质替代品 [26]。

2.2 植物精油的抑菌活性及其对单增李斯特菌的抑制作用

植物精油是一种由多个不同种类的芳香化合物组成的混合物，其抑菌活性源于其特定的化学组分构成。其中，酚类、醛类是主要的抑菌活性组分；其次为萜类、酮类，其抑菌效果相对较弱 [27]。已有研究表明，同种植物精油的成分也会有较大差别，这与遗传变异、地理位置、气候、采收时间及萃取技术有关 [28]。如表 1 所示，不同植物精油主要抑菌活性成分、含量及对单增李斯特菌的抑制效果不同。

单增李斯特菌易污染肉类、果蔬、水产品及乳制品等多种食品，并在冷藏条件下仍可生长繁殖，给食品安全带来较大隐患。近年来，利用植物精油防治生鲜食品腐败的问题引起了国内外的

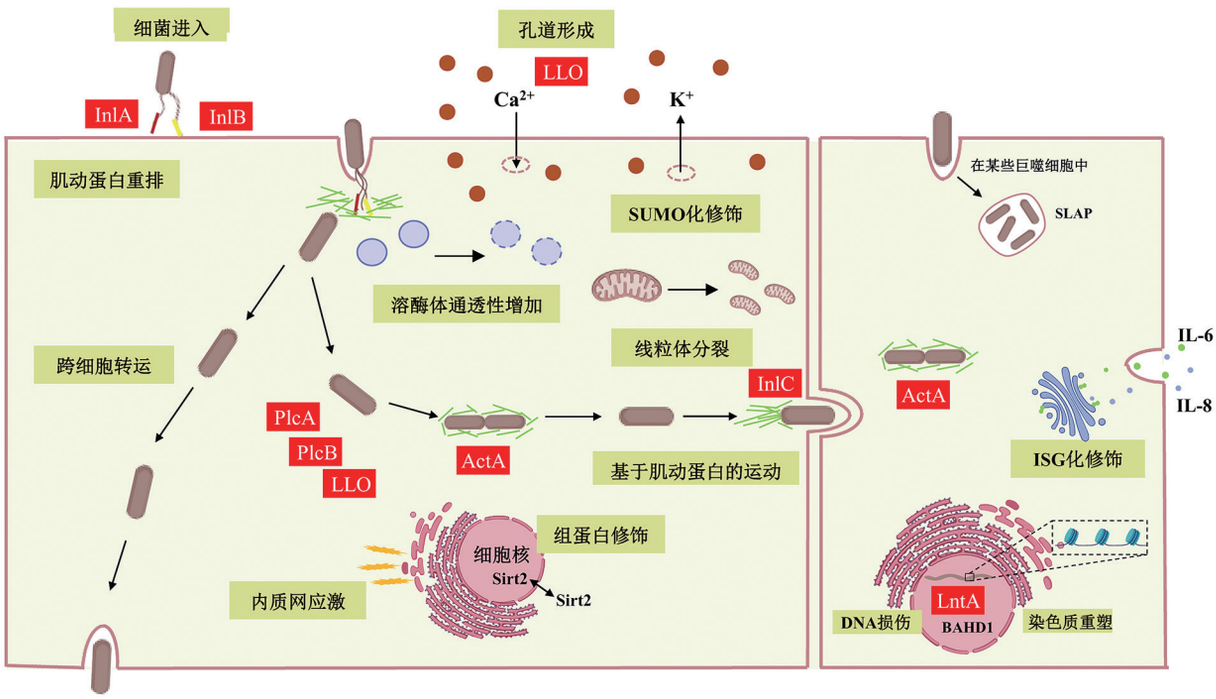


图 2　单增李斯特菌感染概述

Fig. 2　Overview of *Listeria monocytogenes* infection

表 1　不同植物精油的主要活性成分及其体外抗单增李斯特菌活性

Table 1　Major active components of different plant essential oils and their antilisterial activity against *Listeria monocytogenes* in vitro

精油名称 Essential oil name	主要抑菌成分 Main bacteriostatic ingredients	抑菌成分含量 Content of bacteriostatic ingredients /%	抑菌效果 Bacteriostatic effect
百里香精油 Thyme essential oil	百里香酚	13 ～ 55	百里香精油对单增李斯特菌的最小抑菌浓度为 1 g/L[29]。
牛至精油 Oregano essential oil	香芹酚	10 ～ 43	牛至精油对单增李斯特菌的最小抑菌浓度为 0.25 μL/mL[30]。
肉桂精油 Cinnamon essential oil	肉桂醛	52 ～ 87	肉桂精油对单增李斯特菌的最小抑菌浓度为 0.2 mg/mL，最小杀菌浓度为 1.6 mg/mL[31]。
丁香精油 Clove essential oil	丁香酚	56 ～ 90	丁香精油对单增李斯特菌的最小抑菌浓度为 0.5 mg/mL，最小杀菌浓度为 1.0 mg/mL[32-33]。
茶树精油 Tea tree essential oil	松油烯 -4- 醇 [34]	60 ～ 80	茶树精油对单增李斯特菌存在明显抑制作用，最小抑菌浓度为 4 mg/mL，最小杀菌浓度为 8 mg/mL[35]。

关注。植物精油对食品中的单增李斯特菌具有较强的抑菌活性 [36]，且不同植物精油的抑菌效果存在显著差异。

冷藏的肉类与肉制品极易受李斯特菌这类食源性致病菌的污染 [37]。Bukvički 等 [38] 采用藿香薄荷精油对猪肉中的单增李斯特菌进行试验，当精油浓度达到 0.6 mg/mL 时即可观察到抑菌效果，浓度为 10 mg/mL 时，抑菌效果最强。Gouveia 等 [39] 将 0.1 mL 百里香与迷迭香复合精油添加到 10 g 牛肉中，28 d 后测定菌落总数，结果证明该复合精油的抑菌作用十分显著。

果蔬产品在加工和贮藏过程中，容易受到病原菌侵染而发生腐败变质 [40]。植物精油凭借其良好的抗氧化性能，可有效延缓果蔬品质劣变进程，同时抑制腐败性微生物的增殖，并抵御害虫的侵害，因此被视为一种极具潜力的天然防腐保鲜剂 [41]。Krásniewska 等 [42] 开发了西班牙马郁兰精油纳米乳剂，在菠菜叶上施用最小抑菌浓度 7.8 mg/L 和 2 倍最小抑菌浓度的西班牙马郁兰精油纳米乳剂，4 ℃下放置 10 d 后，菠菜叶上的单增李斯特菌存活数显著低于水处理组和对照组。Corrêa 等 [43] 研究发现，在 25 ℃时牛至精油对单增李斯特菌的最低抑菌浓度为 0.781 μg/mL，延缓了草莓的劣变进程。

单增李斯特菌也是水产品加工过程中最容易滋生的细菌之一，会导致水产品风味劣变，进而引起严重经济损失 [44]。Öztürk 等 [45] 研究发现，添加香菜精油能有效抑制真空低温烹调鳟鱼中的单增李斯特菌。Dogruyol 等 [46] 研究指出，牛至精油与柠檬酸可以降低真空低温烹调熟鲑鱼中单增李斯特菌的耐热性。Pouryousef 等 [47] 的研究结果表

明，普列薄荷精油可抑制单增李斯特菌，延长鱼类的货架期。

张艺林 [48] 研究发现，在冷藏条件下向牛乳中添加肉桂精油可使脱脂乳与全脂乳中单增李斯特菌活菌数持续降低，贮藏期（6 d）结束后，该处理对脱脂牛乳中单增李斯特菌表现出抑菌效果。还有研究发现，肉桂精油与百里香精油的组合，在番茄汁和实验室培养基中均呈现出显著的协同抑菌效果 [49]。

3 植物精油对单增李斯特菌的抑菌机理

植物精油的抑菌活性会因关键化学成分的分子结构与构型不同而存在显著差异 [50]。植物精油的抗菌活性与其化学组分密切相关，各组分之间存在一定的协同抑菌效应，其中酚类成分抑菌效果最好，烃类成分抑菌效果最差 [51]。植物精油可通过改变微生物细胞膜表面的电荷，或是直接作用于细菌的细胞壁与细胞膜，引发膜功能失衡，造成细胞内外物质的异常流动（图 3）。

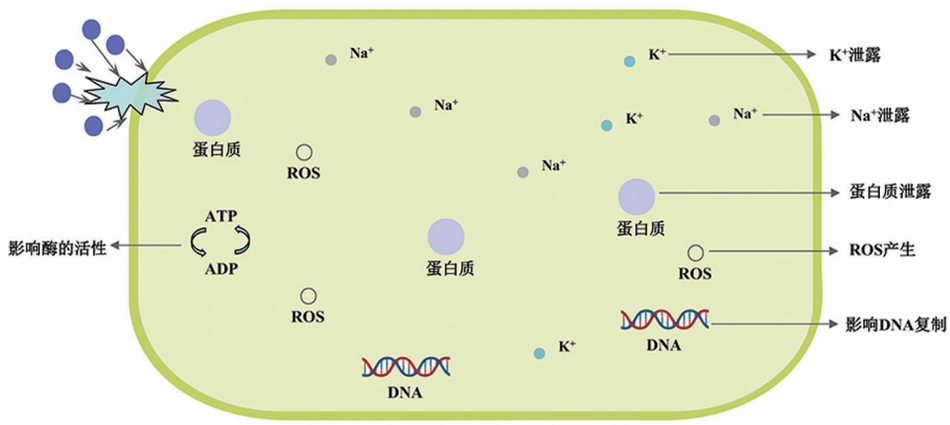


图 3 植物精油对细菌的抑菌机制

Fig. 3 Antibacterial mechanism of plant essential oils against pathogenic bacteria

3.1 植物精油影响单增李斯特菌细胞膜的结构和功能

植物精油可作用于单增李斯特菌的细胞壁与细胞膜，破坏其结构完整性与正常生理功能。细菌的细胞膜参与渗透压调节、呼吸代谢、物质运输、肽聚糖合成交联及脂质生成等重要生命过程，膜结构完整是上述功能正常执行的基础，膜损伤会直接造成细菌代谢紊乱并引发细胞死亡 [52]。扫描电镜结果显示，精油处理可使细菌出现体积缩小、表面皱缩、局部凹陷及整体形态塌陷等明显畸变，直观证明膜结构受损 [53-54]。Guo 等 [55] 研究证实，牛至精油可提高单增李斯特菌胞内活性氧水平，加剧脂质过氧化，降低腺嘌呤核苷三磷酸（Adenosine triphosphate，ATP）含量并引起膜电位超极化，表明精油可造成细菌细胞膜不可逆损伤与胞内稳态失衡，进而发挥高效抑菌作用。Liu 等 [56] 通过分析细胞内必需物质（核酸、蛋白质和 ATP）的流失情况得出结论：大蒜精油可显著改变单增李斯特菌的细胞膜通透性，SYTO 9 绿色荧光核酸染料（Green fluorescent nucleic acid stain）与碘化丙啶（Propidium iodide，PI）的染色结果可以证实该精油对菌体细胞膜完整性存在破坏作用。

3.2 植物精油影响单增李斯特菌酶的活性和代谢

植物精油对微生物体内物质代谢的调控作用表现为促进或抑制其生理活动，进而导致代谢途径受到干扰 [57]。微生物体内酶在三羧酸循环中的活性会被植物精油中的酚类物质携带的羟基抑制。Kang 等 [58] 通过蛋白质组学研究发现，经香茅精油处理后，单增李斯特菌体内的 UDP-N- 乙酰氨基葡萄糖烯醇丙酮基转移酶与 N- 乙酰氨基葡萄糖 -6- 磷酸脱乙酰酶（Q8Y4C4 和 Q8Y5L9）表达量上调。蛋白质组学分析结果显示，丙酮酸代谢通路相关蛋白即甲酸乙酰转移酶与酰基磷酸酶（Q8Y786 和 Q8Y7A）的表达量分别上调了 1.000 倍和 1.657 倍。此外，2 种细胞形状决定蛋白（Q8Y6H3 和 Q8YY3）在处理组中呈现高表达状态，该变化可能会诱导单增李斯特菌发生细胞损伤。胡璇等 [59] 研究发现，采用最小抑菌浓度的益智精油处理单增李斯特菌 6 h 后，单增李斯特菌的生长仅受到轻度抑制，多数菌体仍可维持完整结构，部分菌体出现形态改变与表面轻微皱缩，细胞膜局部存在细微凹陷，菌毛大量脱落使得菌体表面趋于光滑，并形成了少量孔隙，膜外黏液的附着状态分布不均。

3.3　植物精油调控单增李斯特菌相关毒力基因

植物精油可以调控单增李斯特菌相关基因的表达，从而抑制生物膜的形成以及降低毒力水平。Zhang 等 [60] 研究发现，丁香精油可通过调节 *sigB* 和 *prfA* 的转录水平来影响生物膜的形成。Cui 等 [61] 研究证实，辣木精油处理可抑制单增李斯特菌活性，并下调 *prfA*、*plcA*、*hly*、*actA*、*plcB*、*inlA*、*inlB* 等多种毒力基因的转录水平，胡心怡 [62] 发现百里香酚与肉桂醛胁迫可显著抑制目标菌株 *ung1* 与 *ung2* 基因的表达。朱玉林 [63] 通过选取单增李斯特菌内部 5 种具有代表性的毒力基因 *plcA*、*plcB*、*hly*、*actA* 及 *mpl*，探究罗勒精油对该病原体毒力基因表达的调控作用。试验结果表明，经罗勒精油处理后，单增李斯特菌的溶血活性显著降低，单增李斯特菌溶血素的产生与分泌过程均受到干扰，其分子机制与罗勒精油调控单增李斯特菌相关毒力基因 *plcA*、*plcB*、*hly*、*actA* 和 *mpl* 的表达有关。

4　转录组学在植物精油抑制单增李斯特菌研究中的应用进展

转录组是特定细胞或组织在某一时间或生理状态下表达的全部 RNA 集合，涵盖信使 RNA（mRNA）与各类非编码 RNA 分子 [64-65]。原核转录组学在 RNA 水平研究原核生物在不同环境条件下的基因表达变化，以此阐明宿主与外部环境条件对原核生物的影响。该方法通过系统鉴定不同处理条件下的差异表达基因，解析基因组的功能元件，进一步揭示细胞的分子构成 [66]。转录组学研究主要包括基因芯片与测序两大技术方向，其中 RNA-seq 作为第二代测序的主流技术，凭借高通量、高精度、重复性好与成本可控的优势，已成为当前转录组分析领域的主要技术 [67]。转录组学技术已被广泛应用于抑菌机制研究。当微生物处于精油处理的胁迫环境中时，其基因组表达模式会发生适应性改变，通过系统性分析相关基因的转录水平变化，可以精准定位精油分子的作用靶标，进而阐明其抑菌作用的分子机制 [68]。基于转录组学分析的抑菌机制如图 4 所示。

4.1　转录组学对单增李斯特菌的毒力机制探索

李斯特菌的致病性与其毒力因子密切相关 [69]。利用转录组学研究，可以分析病原菌感染宿主细胞过程中毒力因子基因的转录变化情况 [70]。单增李斯特菌可在吞噬细胞与特定非吞噬细胞内完成入侵、存活与增殖过程，通过细胞间直接转移实现扩散，且具备逃避宿主免疫应答的能力 [71]。已有研究发现，李斯特菌在进入宿主细胞后，利用一系列毒力因子参与感染宿主细胞的过程，毒力因子相关基因的转录水平会发生显著变化，这些变化有助于理解细菌如何在宿主细胞内生存、繁殖和扩散，从而揭示其毒力机制 [72-73]。LM 主要的侵袭蛋白 InlA 和 InlB 分别通过与表面受体 E- 钙黏蛋白和 c-Met 相互作用促进细菌进入非吞噬细胞 [74]，分泌的李斯特溶血素 O 和磷脂酶（PlcA 和 PlcB）破坏了初级和次级液泡，并帮助细菌逃逸到细胞质 [75]。ActA 蛋白通过模拟宿主细胞内肌动蛋白的聚集方式，促进细菌在宿主细胞之间扩散，帮助单增李斯特菌逃避宿主的自噬清除 [76-77]，这类毒力因子的表达主要受转录调控因子 PrfA 的正向调控，以保障单增李斯特菌在感染过程中正常发挥致病作用。

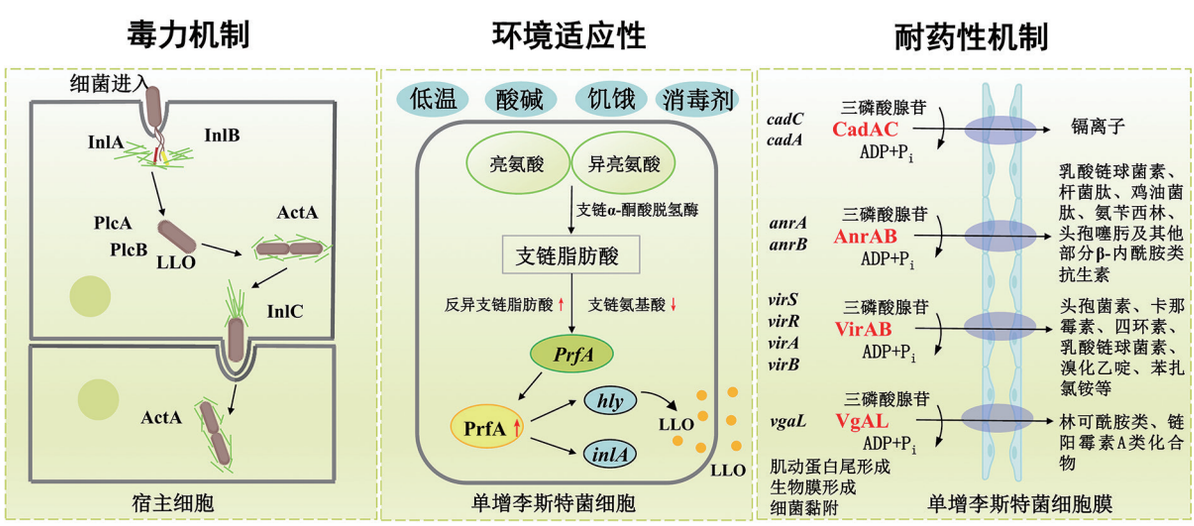


图 4　转录组学分析抑制单增李斯特菌机制概况

Fig. 4　Transcriptomics analysis of the mechanism of inhibition of *Listeria monocytogenes*

4.2 转录组学对单增李斯特菌的环境适应性研究

单增李斯特菌与耐酸性、耐热性等其他表型相关的基因有 *argR*、*arcA*、*sigB*、*clpL*、*clpB*，以及应激生存岛 1（Stress survival islet 1，SSI-1）和应激生存岛 2（Stress survival islet 2，SSI-2）等[78-79]。多项研究证实，*sigB* 基因的表达水平是单增李斯特菌在酸性胁迫环境中维持存活的核心因素[80-82]。*argR* 基因能够编码具有生物活性的 ArgR 蛋白，该蛋白归属于 ArgR/AhrC 精氨酸抑制家族的转录调控因子，可对 *arcA* 与 *sigB* 基因的转录及表达过程产生显著的抑制效应[83]。

目前，已在单增李斯特菌中鉴定出多种与消毒剂耐受能力相关的基因，包括 *lde*、*mdrL*、*bcrABC*、*qacH* 及 *ermC*。负责编码外排泵转运蛋白的 *lde* 基因与 *mdrL* 基因，已在多株单增李斯特菌中被反复检出，对该菌抵御苯扎氯铵的能力发挥着关键调控作用[84]。*bcrABC* 基因最早发现于 1998—1999 年美国李斯特菌病暴发疫情相关分离株 H7550 的质粒（pLM80）上，可介导菌株对苯扎氯铵产生高水平耐受性[85]。Møretrø 等[86] 从挪威 9 家肉类及鲑鱼加工厂分离出的 101 株单增李斯特菌中，检测到了 *qacH* 与 *bcrABC* 基因。结果表明，携带这 2 种抗性基因的菌株，在季铵盐类消毒剂的亚致死浓度环境中，拥有更强的生长竞争力。

单增李斯特菌凭借独特的生理机制，对低温等多种环境胁迫形成极强的适应性[87]。*csp4*、*cspB*、*cspD* 基因编码的冷休克蛋白（Cold shock proteins，CSPs）可维持细胞基本功能、减轻低温损伤，在细菌低温适应过程中发挥着关键作用[88]。鞭毛系统相关蛋白 Fla、FlhA、MotA 以及肉碱转运蛋白 OpuCA，都是单增李斯特菌抵御低温胁迫的重要功能组分[89]。转录组学技术能够系统解析低温适应性基因的表达特征，可通过比较不同温度条件下基因转录水平的差异，揭示菌株适应环境的潜在调控机制。

4.3 转录组学对单增李斯特菌的耐药性机制研究

单增李斯特菌的耐药性主要通过多途径协同作用产生，以此抵御抗生素及外界抗菌压力，其耐药机制复杂多样，主要包括可移动元件介导的耐药基因转移、药物作用靶点改变、药物外排作用、钝化酶或灭活酶产生以及生物被膜等[90]。

可移动元件（转座子、整合子、质粒等）介导的耐药基因转移是其获得耐药性的重要途径[91]。研究发现，Tn916/Tn1545 家族转座子可携带 *tet*（*M*）等耐药基因在不同菌株间转移[92-93]，质粒 plm1686 则可介导氯霉素类、大环内酯类等多种抗生素的耐药性传递[94]。药物作用靶点发生改变后，可降低细菌对抗生素的敏感性，例如 *tet*（*M*）、*tet*（*S*）基因编码的核糖体保护蛋白能够阻断四环素对蛋白质合成的抑制作用[95]，*ermB*、*ermC* 基因编码的甲基化酶可以降低核糖体与红霉素的结合能力[96]，青霉素结合蛋白数量减少或结构改变，会导致细菌对 *β*- 内酰胺类抗生素产生耐药性[97]。细胞膜上的外排泵系统（MdrL、Lde）能够主动将细胞内的抗菌物质排出，降低细胞内的药物浓度，其中 MdrL 可外排大环内酯类、头孢噻肟等抗菌药物，Lde 则与喹诺酮类耐药性的产生密切相关[98]。病原菌产生的钝化酶或灭活酶能够直接破坏抗生素的结构使其失去活性，例如 *β*- 内酰胺酶可水解 *β*- 内酰胺环，氨基糖苷类修饰酶可通过共价修饰降低氨基糖苷类药物的活性[99]。此外，生物被膜可通过屏障作用减少抗菌药物渗透以及诱导细菌进入低代谢状态等方式增强细菌耐药性，其形成过程受鞭毛糖蛋白、胞外 DNA、群体感应系统等多种因子调控，且处于生物被膜状态的细菌更易摄取外源耐药基因，进一步强化耐药表型[100]。这些机制相互关联、协同作用，共同推动单增李斯特菌耐药菌株不断出现，给该菌的防控工作带来了严峻挑战。Guo 等[101] 研究证实，佛手香精油对单增李斯特菌具有显著的抑制活性，揭示了单增李斯特菌在佛手香精油胁迫下的基因表达响应，发现该菌的鞭毛组装、趋化行为、运动能力以及部分碳水化合物和金属阳离子的转运过程均发生了明显波动。随着各类抑菌制剂被广泛应用，单增李斯特菌的耐药问题日益受到关注，转录组学技术能够有效探究抑菌环境下该菌的基因转录水平变化[102]。

5 结语与展望

植物精油凭借优异的抑菌、抗氧化能力以及绿色安全的特性，在食品工业中拥有广阔的应用前景[103]。目前已有研究从多种植物中分离得到具有抑菌活性的精油，并对其作用机理开展了系统研究。同时，精油在抗氧化领域的突出表现，使其成为合成抗氧化剂的理想替代材料，相关试验与理论研究体系正不断得到完善。本研究系统阐述了单增李斯特菌的生物学特性与致病机制，综述了植物精油对该菌的抑菌活性及植物精油在食品工业中的实际应用，探讨了植物精油对单增李斯特菌的作用机理，梳理了利用转录组学技术

解析该抑菌机制的最新研究进展，可为未来开展植物精油抑制单增李斯特菌的相关研究提供理论参考。

目前，针对植物精油抑制单增李斯特菌作用机制的研究已取得显著成果，但对该菌致病过程的分子层面解析仍相对薄弱。单增李斯特菌形成的生物膜可显著增强自身在环境中的持久性与抗逆能力，给食品加工行业带来了严峻考验。后续研究可依托转录组技术，深入剖析植物精油作用条件下李斯特菌细胞内的蛋白质表达谱变化、代谢产物动态演变以及基因转录调控网络的响应特征，系统揭示植物精油抑菌作用的潜在靶位与关键信号途径，为开发新型食品抑菌剂奠定科学基础。

参考文献：

[1] Radoshevich L, Cossart P. *Listeria monocytogenes*: towards a complete picture of its physiology and pathogenesis[J]. Nature Reviews Microbiology,2018,16:32-46.

[2] Orsi R H, Liao J Q, Carlin C R, et al. Taxonomy, ecology, and relevance to food safety of the genus *Listeria* with a particular consideration of new *Listeria* species described between 2010 and 2022[J]. mBio,2024,15(2):e00938-23.

[3] 刘夏雨 . 甘露糖赤藓糖醇脂对单增李斯特菌的抑菌活性及作用机制研究 [D]. 杭州 : 浙江大学 ,2023:1.
Liu X Y. Antibacterial effect and mechanism of mannosylerythritol lipid-A on *Listeria monocytogenes*[D]. Hangzhou: Zhejiang University,2023:1.

[4] Stratakos A C, Ijaz U Z, Ward P, et al. In vitro and in vivo characterisation of *Listeria monocytogenes* outbreak isolates[J]. Food Control,2020,107:106784.

[5] Allen K J, Wałecka-Zacharska E, Chen J C, et al. *Listeria monocytogenes*: an examination of food chain factors potentially contributing to antimicrobial resistance[J]. Food Microbiology, 2016,54:178-189.

[6] Davis M L, Ricke S C, Donaldson J R. Establishment of *Listeria monocytogenes* in the gastrointestinal tract[J]. Microorganisms, 2019,7:75.

[7] Kocot A M, Olszewska M A. Biofilm formation and microscopic analysis of biofilms formed by *Listeria monocytogenes* in a food processing context[J]. LWT - Food Science and Technology, 2017,84:47-57.

[8] 韩迎洁 . 柠檬烯对单增李斯特菌抑菌活性和机制研究及其应用 [D]. 海口 : 海南大学 ,2021:4-5.
Han Y J. Antibacterial activity and mechanism of limonene against *Listeria monocytogenes* and its application[D]. Haikou: Hainan University,2021:4-5.

[9] Schlech W F, Lavigne P M, Bortolussi R A, et al. Epidemic listeriosis-evidence for transmission by food[J]. The New England Journal of Medicine,1983,308(4):203-206.

[10] Mccollum J T, Cronquist A B, Silk B J, et al. Multistate outbreak of listeriosis associated with cantaloupe[J]. The New England Journal of Medicine,2013,369(10):944-953.

[11] Thomas J, Govender N, Mccarthy K M, et al. Outbreak of listeriosis in South Africa associated with processed meat[J]. The New England Journal of Medicine,2020,382(7):632-643.

[12] Stephan R, Horlbog J A, Nüesch-Inderbinen M, et al. Outbreak of listeriosis likely associated with baker's yeast products, Switzerland, 2022-2024[J]. Emerging Infectious Diseases,2024, 30(11):2424-2426.

[13] Morón Á, Ortiz-Miravalles L, Peñalver M, et al. Rli51 Attenuates transcription of the *Listeria* pathogenicity island 1 gene *mpl* and functions as a *trans*-acting sRNA in intracellular bacteria[J]. International Journal of Molecular Sciences,2024, 25:9380.

[14] 郝民 , 阮明捷 , 王恒伟 , 等 . 北京市朝阳区单核细胞增生李斯特菌关键毒力基因缺失与致病性关联性研究 [J]. 中国食品卫生杂志 ,2022,34(1):75-81.
Hao M, Ruan M J, Wang H W, et al. Study of association between deletion of key virulence genes and pathogenicity of *Listeria monocytogenes* in Chaoyang district of Beijing[J]. China Journal of Food Hygiene,2022,34(1):75-81.

[15] 冯莹颖 , 张强 , 黄兰红 , 等 . InlA 和 InlB 介导单核细胞增生李斯特菌入侵宿主细胞分子机制的研究进展 [J]. 微生物学通报 , 2009,36(12):1894-1900.
Feng Y Y, Zhang Q, Huang L H, et al. A review: the molecular mechanisms of InlA- and InlB- mediated invasion of *Listeria monocytogenes* into host cell[J]. Microbiology,2009,36(12): 1894-1900.

[16] 李钊 , 刘阳泰 , 李卓思 , 等 . 单增李斯特菌毒力因子及调控机制研究进展 [J]. 食品与发酵工业 ,2024,50(11):327-335.
Li Z, Liu Y T, Li Z S, et al. Research progress on virulence factors and regulatory mechanisms of *Listeria monocytogenes*[J]. Food & Fermentation Industry,2024,50(11):327-335.

[17] Vilchis-Rangel R E, Espinoza-Mellado M D R, Salinas-Jaramillo I J, et al. Association of *Listeria monocytogenes* LIPI-1 and LIPI-3 marker *llsX* with invasiveness[J]. Current Microbiology, 2019,76:637-643.

[18] Quereda J J, Meza-Torres J, Cossaert P, et al. Listeriolysin S: a bacteriocin from epidemic *Listeria monocytogenes* strains that targets the gut microbiota[J]. Gut Microbes,2017,8(4):384-391.

[19] Maury M M, Tsai Y H, Caroline C, et al. Uncovering *Listeria monocytogenes* hypervirulence by harnessing its biodiversity[J].

Nature genetics,2016,48:308-313.

[20] Li R D, Liang Q, Tian S C, et al. Hemolysin function of *Listeria* is related to biofilm formation: transcriptomics analysis[J]. Veterinary Research,2022,53:113.

[21] Li W W, Guo Y C, Cui Q P, et al. Whole-genome sequencing-based characterization of clinical *Listeria monocytogenes* isolates in China, 2013-2019[J]. Foodborne Pathogens and Disease, 2023,20(4):158-168.

[22] Zhang P, Ji L, Wu X F, et al. Prevalence, genotypic characteristics and antibiotic resistance of *Listeria monocytogenes* from retail foods in Huzhou, China[J]. Journal of Food Protection, 2024,87:100307.

[23] Zhang H Z, Chen W J, Wang J, et al. 10-year molecular surveillance of *Listeria monocytogenes* using whole-genome sequencing in Shanghai, China, 2009-2019[J]. Frontiers in Microbiology,2020,11:551020.

[24] 张莉睿 , 毕洁 . 植物精油对储藏物害虫防治作用的研究进展 [J]. 中国粮油学报 ,2023,38(3):20-27.
Zhang L R, Bi J. Progress in research on effects of plant essential oils for storage pest control[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association,2023,38(3):20-27.

[25] 马腾 , 贺澳门 , 廖诗贤 , 等 . 杜松精油对樟子松松球壳孢菌抑菌活性分析 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2025,45(7):164-173.
Ma T, He A M, Liao S X, et al. Analysis of the antibacterial activity of juniper essential oil against the *Sphaeropsis sapinea* of *Pinus sylvestris* var. *mongolica*[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2025,45(7):164-173.

[26] Wang H W, Yang Z X, Ying G Y, et al. Antifungal evaluation of plant essential oils and their major components against toxigenic fungi[J]. Industrial Crops & Products,2018,120:180-186.

[27] Bhavaniramya S, Vanajothi R, Vishnupriya S, et al. Computational characterization of deleterious SNPs in Toll-like receptor gene that potentially cause mastitis in dairy cattle[J]. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology,2019,19:101151.

[28] Liu G F, Song H Y, Zhang Q, et al. Cellulose-based absorbent pad loaded with *Carum copticum* essential oil for shelf life extension of refrigerated chicken meat[J]. Packaging Technology and Science,2022,35:425-433.

[29] 赵亚珠 , 刘光发 , 魏娜 , 等 . 基于植物精油的抗菌活性包装在食品保鲜中的研究进展 [J]. 包装工程 ,2023,44(11):55-63.
Zhao Y Z, Liu G F, Wei N, et al. A review of antimicrobial active packaging based on plant essential oils and its application in food preservation[J]. Packaging Engineering,2023,44(11): 55-63.

[30] Vukić V, Degenek J, Kanurić K, et al. The effect of *Thymus serpyllum* L. and its preparations on reduction of *L. monocytogenes* and *S. aureus* in kombucha fresh cheese[J]. Processes,2024, 12:1187.

[31] Luo K Y, Li Y Z, Wang C, et al. Synergistic bactericidal effect of ultrasound combined with oregano essential oil nanoemulsion on *Listeria monocytogenes* and its application in blueberry preservation[J]. Food Control,2024,165:110619.

[32] 洪小利 , 严媛 , 林玲淼 , 等 . 肉桂精油对食源性肠炎沙门氏菌和单增李斯特菌的抑菌作用 [J]. 食品与发酵工业 ,2021,47(17): 54-60.
Hong X L, Yan Y, Lin L M, et al. Antibacterial activity of cinnamon essential oil against foodborne *Salmonella enteritidis* and *Listeria monocytogenes*[J]. Food and Fermentation Industries,2021,47(17):54-60.

[33] 张承慧 . 丁香精油对单核细胞增生李斯特菌及其生物膜的抑制研究 [D]. 镇江 : 江苏大学 ,2020:22.
Zhang C H. Inhibition of clove essential oil on *Literia monocytogeness* and its biofilm[D]. Zhenjiang: Jiangsu University,2020:22.

[34] Somrani M, Debbabi H, Palop A. Antibacterial and antibiofilm activity of essential oil of clove against *Listeria monocytogenes* and *Salmonella enteritidis*[J]. Food Science and Technology International, 2022,28(4):331-339.

[35] 程峰 , 尚若锋 , 杨珍 , 等 . 茶树精油抗微生物作用机理研究进展 [J]. 食品工业科技 ,2021,42(3):331-337.
Cheng F, Shang R F, Yang Z, et al. Advances in antimicrobial mechanism of tea tree oil[J]. Science and Technology of Food Industry,2021,42(3):331-337.

[36] 王清瑶 , 肖性龙 , 刘媛媛 , 等 . 茶树精油对单增李斯特菌的抑制作用及其在冷鲜猪肉中的应用 [J]. 现代食品科技 ,2025, 41(3):175-183.
Wang Q Y, Xiao X L, Liu Y Y, et al. The inhibitory effect of tea tree essential oil on *Listeria monocytogenes* and its application in chilled fresh pork[J]. Modern Food Science and Technology, 2025,41(3):175-183.

[37] 崔莹 , 戚浩彧 , 张濛 , 等 . 河南省市售调理肉制品中食源性致病菌污染状况调查分析 [J]. 中国卫生检验杂志 ,2021,31(24): 3021-3023,3027.
Cui Y, Qi H Y, Zhang M, et al. Surveillance and analysis of food-borne pathogens in prepared meat products in Henan Province[J]. Chinese Journal of Health Laboratory Technology, 2021,31(24):3021-3023,3027.

[38] Bukvički D, Stojković D, Soković M, et al. Satureja horvatii essential oil: *In vitro* antimicrobial and antiradical properties and *in situ* control of *Listeria monocytogenes* in pork meat[J]. Meat Science,2014,96:1355-1360.

[39] Gouveia A R, Alves M, Silva J A, et al. The antimicrobial effect of rosemary and thyme essential oils against *Listeria monocytogenes* in *sous vide* cook-chill beef during storage[J]. Procedia Food Science,2016,7:173-176.

[40] 吴秀兰 , 任诗欣 , 何俊杰 , 等 . 果蔬保鲜技术现状及展望 [J]. 山东化工 ,2022,51(12):111-114.
Wu X L, Ren S X, He J J, et al. Current status and future trends of postharvest technology on fruits and vegetables[J]. Shandong Chemical Industry,2022,51(12):111-114.

[41] 姜美茹 , 王颖 , 杜易潼 , 等 . 植物精油的递送体系及其在果蔬保鲜中应用的研究进展 [J]. 食品科学 ,2024,45(9):293-305.
Jiang M R, Wang Y, Du Y T, et al. Research progress on delivery systems of plant essential oils and applications in fruit and vegetable preservation[J]. Food Science,2024,45(9):293-305.

[42] Kraśniewska K, Gniewosz M, Adhikari A. Nanoemulsion enhances antimicrobial efficacy of Spanish marjoram essential oil against *Listeria monocytogenes* and *E. coli* O157:H7 on spinach leaves[J]. International Journal of Food Microbiology,2026,444: 111466.

[43] Corrêa A N R, Weimer P, Rossi R C, et al. Antibacterial activity of essential oils for strawberry storage: oregano, thyme, mint, lime, and orange as potential agents for decontamination[J]. International Journal of Vegetable Science,2025,31(6):850-864.

[44] 吕盛寒 , 陈飞雄 , 周洲 , 等 . 植物精油在水产品中的应用研究进展 [J]. 农技服务 ,2023,40(8):49-51.
Lyu S H, Chen F X, Zhou Z, et al. Research progress on application of plant essential oil in aquatic products[J]. Agricultural Technology Service,2023,40(8):49-51.

[45] Öztürk F, Gündüz H, Sürengil G. The effects of essential oils on inactivation of *Listeria monocytogenes* in rainbow trout cooked with sous-vide[J]. Journal of Food Processing and Preservation,2021,45:e15878.

[46] Dogruyol H, Mol S, Cosansu S. Increased thermal sensitivity of *Listeria monocytogenes* in sous-vide salmon by oregano essential oil and citric acid[J]. Food Microbiology,2020,90:103496.

[47] Pouryousef N, Ahmady M, Sharitifar N, et al. The effects of essential oil *Mentha pulegium* L. and nisin (free and nanoliposome forms) on inoculated bacterial in minced silver carp fish (*Hypophthalmichthys molitrix*)[J]. Journal of Food Measurement and Characterization,2022,16:3935-3945.

[48] 张艺林 . 微高压 CO_2 联合肉桂精油的协同抗菌作用及在牛乳杀菌中的应用研究 [D]. 郑州 : 郑州轻工业大学 ,2022:62-66.
Zhang Y L. Synergistic antibacterial effect of petit-high pressure CO_2 combined with cinnamon essential oil and its application in milk pasteurization[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University of Light Industry,2022:62-66.

[49] Kim J, Kim H, Beuchat L R, et al. Synergistic antimicrobial activities of plant essential oils against *Listeria monocytogenes* in organic tomato juice[J]. Food Control,2021,125:108000.

[50] Da Silua B D, Do Rosário D K A, Weitz D A, et al. Essential oil nanoemulsions: properties, development, and application in meat and meat products[J]. Trends in Food Science & Technology, 2022,121:1-13.

[51] Marinelli L, Di Stefano A D, Cacciatore I. Carvacrol and its derivatives as antibacterial agents[J]. Phytochemistry Reviews, 2018,17:903-921.

[52] 胡竞月 , 吴斌 , 时小东 , 等 .4 种植物精油对肉源致病菌和腐败菌的抑菌活性及其有效抑菌成分分析 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2025,45(5):166-174.
Hu J Y, Wu B, Shi X D, et al. Antimicrobial activity of four plant essential oils against meat-derived pathogenic and spoilage bacteria and analysis of their effective antimicrobial components[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2025,45(5):166-174.

[53] Peng J M, Chen G W, Guo S X, et al. Anti-bacterial and anti-biofilm activities of essential oil from *Citrus reticulata* Blanco cv. Tankan peel against *Listeria monocytogenes*[J]. Foods, 2024,13:3841.

[54] Liao H X, Liu S S, Hu W, et al. Phenotypic and transcriptomic analysis reveals the antibiofilm mechanism of *Litsea cubeba* essential oil against *Bacillus cereus* and its application in pork preservation[J]. Current Research in Food Science,2025,11: 101164.

[55] Guo P, Li Z Y, Cai T, et al. Inhibitory effect and mechanism of oregano essential oil on *Listeria monocytogenes* cells, toxins and biofilms[J]. Microbial Pathogenesis,2024,194:106801.

[56] Liu M M, Guo W, Feng M X, et al. Antibacterial, anti-biofilm activity and underlying mechanism of garlic essential oil in water nanoemulsion against *Listeria monocytogenes*[J]. LWT-Food Science and Technology,2024,196:115847.

[57] Falleh H. Demystifying the power of essential oils: a review of their antibacterial properties and potential as natural food preservatives[J]. EXCLI Journal,2025,24:828-850.

[58] Kang K, Liu X S, Li P Y, et al. Exploring Citronella's inhibitory mechanism against *Listeria monocytogenes* and its utilization in preserving cheese[J]. Food Microbiology,2024,122:104550.

[59] 胡璇 , 黄英 , 王凯 , 等 . 益智精油化学成分分析及其对单核细胞增生李斯特氏菌的抑菌机理 [J]. 食品科学 ,2024,45(16): 140-150.
Hu X, Huang Y, Wang K, et al. Chemical component analysis of *Alpinia oxyphylla* Miq. essential oil and its antimicrobial mechanism against *Listeria monocytogenes*[J]. Food Science,2024,45(16): 140-150.

[60] Zhang C H, Li C Z, Abdel-Samie M A, et al. Unraveling the inhibitory mechanism of clove essential oil against *Listeria monocytogenes* biofilm and applying it to vegetable surfaces[J]. LWT-Food Science and Technology,2020,134:110210.

[61] Cui H Y, Li H, Li C Z, et al. Inhibition effect of moringa oil on

the cheese preservation and its impact on the viability, virulence and genes expression of *Listeria monocytogenes*[J]. LWT-Food Science and Technology,2020,134:110163.

[62] 胡心怡 . 百里香酚和肉桂醛协同处理对盐焗鸡保鲜效果及其抑菌机制的研究 [D]. 广州 : 华南理工大学 ,2021:43-46.
Hu X Y. Study on effect of synergistic treatment of thymol and cinnamaldehyde on preservation of salt-baked chicken and its antibacterial mechanism[D]. Guangzhou: South China University of Technology,2021:43-46.

[63] 朱玉林 . 罗勒精油对李斯特菌的抗菌机制及其纳米纤维在猪肉中的应用研究 [D]. 镇江 : 江苏大学 ,2021:54-56.
Zhu Y L. Study on the antibacterial mechanism of basil essential oil against *Listeria monocytogenes* and application of its nanofibers in pork preservation[D]. Zhenjiang: Jiangsu University,2021:54-56.

[64] 蒋费涛 , 王书平 , 祁俊生 , 等 . 转录组学技术及其在植物系统学上的研究进展 [J]. 现代盐化工 ,2020,47(4):14-17.
Jiang F T, Wang S P, Qi J S, et al. Research progress of transcriptional technology and its advances in plant phylogeny[J]. Modern Salt and Chemical Industry,2020,47(4):14-17.

[65] 许沛冬 , 易剑锋 , 陈迪 , 等 . 组学技术在生防芽孢杆菌的应用进展 [J]. 生物技术通报 ,2024,40(10):208-220.
Xu P D, Yi J F, Chen D, et al. Progress in the application of omics technology in biocontrol *Bacillus*[J]. Biotechnology Bulletin,2024,40(10):208-220.

[66] Agregán R, Echegaray N, Nawaz A, et al. Foodomic-based approach for the control and quality improvement of dairy products[J]. Metabolites,2021,11:818.

[67] 赵圣明 , 赵岩岩 , 马汉军 , 等 . 转录组学在抑菌机制中的应用研究进展 [J]. 食品与发酵工业 ,2017,43(7):259-264.
Zhao S M, Zhao Y Y, Ma H J, et al. Applications of transcriptomics in research of antimicrobial mechanism[J]. Food and Fermentation Industries,2017,43(7):259-264.

[68] 王亚哲 , 赵永强 , 王迪 , 等 . 多组学视角下植物精油抑菌机理的研究进展 [J]. 食品科学 ,2024,45(17):348-356.
Wang Y Z, Zhao Y Q, Wang D, et al. Research progress in antibacterial mechanism of plant essential oils from the perspective of multi-omics[J]. Food Science,2024,45(17): 348-356.

[69] Meireles D, Pombinho R, Cabanes D. Signals behind *Listeria monocytogenes* virulence mechanisms[J]. Gut Microbes, 2024,16(1):2369564.

[70] D'onofrio F, Butler F, Krasteva I, et al. Integrative analysis of transcriptomic and immunoproteomic data reveals stress response mechanisms in *Listeria monocytogenes*[J]. Heliyon,2024,10:e39832.

[71] Khan S A, Han Y S. *Listeria monocytogenes*: host-pathogen interactions and innate immune response[J]. Research in Microbiology, 2025,176(8):104342.

[72] Zhang Z, Yang H X, Zhang B, et al. Mechanisms of resveratrol affecting *Listeria monocytogenes* biofilm and in vivo virulence: implications for preventing contamination on meat surfaces[J]. Food Research International,2026,231:118551.

[73] Pang X Y, Wang Y T, Feng Z Y, et al. Quorum sensing in *Listeria monocytogenes* and control strategies for its inhibition in the food industry[J]. International Journal of food Microbiology,2025,447:111518.

[74] Drolia R, Bryant D B, Tenguria S, et al. *Listeria* adhesion protein orchestrates caveolae-mediated apical junctional remodeling of epithelial barrier for *Listeria monocytogenes* translocation[J]. mBio,2024,15(3):e02821-23.

[75] Gouin E, Balestrino D, Rasid O, et al. Ubiquitination of *Listeria virulence* factor InlC contributes to the host response to infection[J]. mBio,2019,10(6):e02778-19.

[76] Reniere M L, Whiteley A T, Hamilton K L, et al. Glutathione activates virulence gene expression of an intracellular pathogen[J]. Nature,2015,517:170-173.

[77] Yoshikawa Y, Ogawa M, Hain T, et al. *Listeria monocytogenes* ActA-mediated escape from autophagic recognition[J]. Nature Cell Biology,2009,11:1233-1240.

[78] Bohl V, Hollmann N M, Melzer T, et al. The *Listeria monocytogenes* persistence factor ClpL is a potent stand-alone disaggregase[J]. eLife,2024,12:RP92746.

[79] Poutou-Piñales R A, Rincón-Gamboa S M, Carrascal-Camacho A K. Persistence of *Listeria monocytogenes*: an integrative narrative review[J]. Frontiers in Microbiology,2026,17:1721836.

[80] Hafner L, Gadin E, Huang L, et al. Differential stress responsiveness determines intraspecies virulence heterogeneity and host adaptation in *Listeria monocytogenes*[J]. Nature Microbiology,2024,9:3345-3361.

[81] Lobanovska M, Feng Y, Zhang J, et al. Stress-dependent activation of the *Listeria monocytogenes* virulence program ensures bacterial resilience during infection[J]. mBio, 2025,16(6):e00719-25.

[82] Wiktorczyk-Kapischke N, Skowron K, Wałecka-Zacharska E. Genomic and pathogenicity islands of *Listeria monocytogenes*-overview of selected aspects[J]. Frontiers in Molecular Biosciences,2023,10:1161486.

[83] Lambrechts K, Gouws P, Rip D. Genetic diversity of *Listeria monocytogenes* from seafood products, its processing environment, and clinical origin in the Western Cape, South Africa using whole genome sequencing[J]. AIMS Microbiology, 2024,10(3):608-643.

[84] Popowska M, Krawczyk-Balska A, Ostrowski R, et al. InlL

from *Listeria monocytogenes* is involved in biofilm formation and adhesion to mucin[J]. Frontiers in Microbiology, 2017,8:660.

[85] Elhanafi D, Dutta V, Kathariou S. Genetic characterization of plasmid-associated benzalkonium chloride resistance determinants in a *Listeria monocytogenes* train from the 1998-1999 outbreak[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2010,76(24):8231-8238.

[86] Møretrø T, Schirmer B C T, Heir E, et al. Tolerance to quaternary ammonium compound disinfectants may enhance growth of *Listeria monocytogenes* in the food industry[J]. International Journal of Food Microbiology,2017,241:215-224.

[87] Choi Y, Yeom W, Yang H, et al. Inactivation of *Listeria monocytogenes* on a laboratory medium and enoki mushrooms using organic acid and essential oil vapors[J]. Food Control,2024, 164:110553.

[88] Eshwar A K, Guldimann C, Oevermann A, et al. Cold-shock domain family proteins (CSPs) are involved in regulation of virulence, cellular aggregation, and flagella-based motility in *Listeria monocytogenes*[J]. Frontiers in Cellular and Infection Microbiology,2017,7:453.

[89] 孙海磊 , 董鹏程 , 毛衍伟 , 等 . 单核细胞增生李斯特菌对食品加工中的胁迫响应及其机制研究进展 [J]. 食品科学 , 2021,42(17):317-324.
Sun H L, Dong P C, Mao Y W, et al. A review on stress response and underlying mechanisms in *Listeria monocytogenes* during food processing[J]. Food Science,2021,42(17):317-324.

[90] 冯有为 , 潘佳栋 , 陈思思 , 等 . 单核细胞增生李斯特菌的耐药特征及机制 [J]. 中国人兽共患病学报 ,2019,35(2):158-163.
Feng Y W, Pan J D, Chen S S, et al. Antibiotic resistance characteristics and mechanism of *Listeria monocytogenes*[J]. Chinese Journal of Zoonoses,2019,35(2):158-163.

[91] Muller H, Ikhimiukor O O, Montoya-Giraldo M, et al. Genetic exchange networks bridge mobile DNA vehicles in the bacterial pathogen *Listeria monocytogenes*[J]. Nature Communications, 2025,16:9723.

[92] Goh Y X, Anupoju S M B, Nguyen A, et al. Evidence of horizontal gene transfer and environmental selection impacting antibiotic resistance evolution in soil-dwelling *Listeria*[J]. Nature Communications,2024,15:10034.

[93] Wiśniewski P, Adamski P, Trymers M, et al. Predicting antibiotic resistance in *Listeria monocytogenes* from food and food-processing environments using next-generation sequencing: a systematic review[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2025,26:10112.

[94] Mao P, Wang Y, Gan L, et al. Function and distribution of the conjugative plasmid pLM1686 in foodborne *Listeria monocytogenes* in China[J]. International Journal of Food Microbiology,2021,352:109261.

[95] Connell S R, Tracz D M, Nierhaus K H, et al. Ribosomal protection proteins and their mechanism of tetracycline resistance[J]. Antimicrobial Agents and Chemotherapy,2003, 47(12):3675-3681.

[96] Stsiapanava A, Selmer M. Crystal structure of ErmE-23S rRNA methyltransferase in macrolide resistance[J]. Scientific Reports,2019,9:14607.

[97] Wamp S, Wagner R, Schuler F, et al. A *pbpB1* mutation causing reduced *β*-lactam susceptibility in clinical *Listeria monocytogenes* isolates[J]. Emerging Microbes & Infections, 2026,15:2616949.

[98] 夏菁 , 罗亚如 , 宋厚辉 , 等 . 单增李斯特菌耐药外排泵研究进展 [J]. 微生物学报 ,2024,64(5):1331-1347.
Xia J, Luo Y R, Song H H, et al. Advances in efflux pump-mediated multidrug resistance of *Listeria monocytogenes*[J]. Acta Microbiologica Sinica,2024,64(5):1331-1347.

[99] Paiva J, Silva V, Poeta P, et al. Antimicrobial resistance profile and biofilm formation of *Listeria monocytogenes* isolated from meat[J]. Antibiotics,2025,14:454.

[100] 孙露 , 李云 , 王少飞 , 等 . 生物被膜增强食源性致病菌耐药性和毒力的研究进展 [J]. 食品科学 ,2025,46(8):363-371.
Sun L, Li Y, Wang S F, et al. Research progress on the role of biofilms in enhancing antibiotic resistance and virulence in foodborne pathogens[J]. Food Science,2025,46(8):363-371.

[101] Guo J J, Hu X, Gao Z P, et al. Global transcriptomic response of *Listeria monocytogenes* exposed to Fingered Citron (*Citrus medica* L. var. *sarcodactylis* Swingle) essential oil[J]. Food Research International,2021,143:110274.

[102] 刘朱东 . 刺糖多孢菌转录组学研究以及影响多杀菌素合成关键基因的挖掘 [D]. 长沙 : 湖南师范大学 ,2021:12-15.
Liu Z D. The transcriptomics analysis and mining of key genes affecting spinosad biosynthesis in *Saccharopolyspora spinosa*[D]. Changsha: Hunan Normal University,2021:12-15.

[103] Kačániová M, Čmiková N, Ban Z, et al. Enhancing the shelf life of sous-vide red deer meat with *Piper nigrum* essential oil: a study on antimicrobial efficacy against *Listeria monocytogenes*[J]. Molecules,2024,29:4179.

[本文编校：戴欧琳]