

DOI: 10.12161/j.issn.1005-6521.2025.03.025

# 萜类化合物抗菌性的研究进展

秦荣<sup>1,2</sup>, 付彬<sup>1,2</sup>, 刘枣<sup>1,2</sup>, 祁勇刚<sup>1,2</sup>, 吴勇康<sup>2,3</sup>, 柳志杰<sup>1,2\*</sup>

(1. 湖北工业大学 生命科学与健康工程学院 湖北省食品发酵工程技术研究中心, 湖北 武汉 430068;

2. 湖北省发酵蔬菜企校联合创新中心, 湖北 荆门 431821; 3. 湖北聚汇农业开发有限公司, 湖北 荆门 431821)

**摘要:** 萜类化合物是广泛存在于自然界中的次生代谢物, 种类繁多, 并拥有多种生理活性。萜类化合物表现出显著的抗菌活性和生物安全性, 在食品行业中具有良好的应用前景。该文综述萜类化合物对食源性病原菌的抑制作用、抑菌机理、应用及研究进展, 为开发萜类化合物成为新型食品抗菌剂提供新思路。

**关键词:** 萜类化合物; 食源性病原菌; 抗菌性; 抗菌机制; 食品保鲜

## Research Progress on Antibacterial Activity of Terpenoids

QIN Rong<sup>1,2</sup>, FU Bin<sup>1,2</sup>, LIU Zao<sup>1,2</sup>, QI Yonggang<sup>1,2</sup>, WU Yongkang<sup>2,3</sup>, LIU Zhijie<sup>1,2\*</sup>

(1. Research Center of Food Fermentation Engineering and Technology of Hubei, School of Life and Health Sciences, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, Hubei, China; 2. Hubei Enterprise-University Joint Innovation Center for Fermented Vegetables, Jingmen 431821, Hubei, China; 3. Hubei Juhui Agricultural Co., Ltd., Jingmen 431821, Hubei, China)

**Abstract:** Terpenoids are secondary metabolites widely found in nature, characterized by their diverse varieties and various physiological activities. With significant antimicrobial activity and biosafety, terpenoids present promising application prospects in the food industry. This paper reviewed the antibacterial effect, the antibacterial mechanism, and the application and research progress of terpenoids on food-borne pathogens, providing new insights for developing terpenoids as novel food antimicrobial agents.

**Key words:** terpenoid; food-borne pathogen; antimicrobial activity; antimicrobial mechanism; food preservation

引文格式:

秦荣, 付彬, 刘枣, 等. 萜类化合物抗菌性的研究进展[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(3): 197-202.

QIN Rong, FU Bin, LIU Zao, et al. Research Progress on Antibacterial Activity of Terpenoids[J]. Food Research and Development, 2025, 46(3): 197-202.

食源性致病菌引起的疾病是全球范围内的一个重要公共卫生问题, 据世界卫生组织统计, 每年约有 6 亿例食源性疾病病例, 其中约 420 000 人死亡<sup>[1]</sup>。目前, 常见的食源性致病菌包括大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、沙门氏菌、单增李斯特菌等<sup>[2]</sup>。大多数食源性疾病是由受到微生物污染的食品引起的, 其中某些大肠杆菌菌株可引发严重的腹泻, 甚至导致肠胃炎<sup>[3]</sup>。金黄色葡萄球菌可引发肺炎、败血症等疾病, 而某些金黄色葡萄球菌则会产生毒素, 导致食物中毒<sup>[4]</sup>。沙门氏菌可

引发肠热病、胃肠炎、败血症、局部感染、中毒等疾病症状<sup>[5]</sup>。人类感染单增李斯特菌则可能造成脑膜炎、败血症、中枢神经感染等疾病<sup>[6-7]</sup>。由微生物引起的食源性污染已然成为威胁食品安全的最大问题之一。目前, 常用食品防腐剂来抑制微生物的生长, 并延长食品保质期, 但化学防腐剂存在安全性低和致癌性的问题, 使得人们对天然食品防腐剂更加关注。因此, 开发并使用绿色、安全的天然物质作为食品中的抗菌剂, 从而有效地控制食源性致病菌的污染, 对于保障人体健康

基金项目: 国家自然科学基金项目(22007031); 湖北省重点研发计划项目(2023BBB010); 湖北省自然科学基金项目(2023AFB927)

作者简介: 秦荣(1998—), 女(汉), 硕士, 研究方向: 代谢工程。

\*通信作者: 柳志杰(1988—), 男(汉), 教授, 研究方向: 代谢工程。

具有重要的意义。

萜类化合物是天然产物中含量最丰富的一类化合物,属于植物的次生代谢产物<sup>[8]</sup>。它们通常存在于植物的芳香物质中,并具有广泛的生物活性<sup>[9]</sup>。其中许多萜类化合物表现出显著的抗细菌<sup>[10-11]</sup>、抗病毒和抗真菌<sup>[12]</sup>活性,使其可以在食品中发挥抑菌作用。适量添加萜类化合物可以延长食品的保质期,并减少食品中微生物的污染,这对于解决全球食品安全问题具有重要意义。开发天然的萜类化合物作为抗菌剂不仅能够提高食品安全性,还能够减少化学防腐剂的使用,符合绿色环保的理念。

本文综述萜类化合物对常见食源性致病菌的抑菌活性、作用机制及其应用,以期萜类化合物作为抗菌剂在食品领域的应用提供参考和理论支持。

## 1 抑菌活性试验方法

萜类化合物的抑菌活性可以通过多种评价方法来

进行测定,例如牛津杯法、纸片扩散法、肉汤稀释法、琼脂稀释法等。其抑菌强度可以通过最小抑菌浓度(minimum inhibitory concentration, MIC)、最小杀菌浓度(minimum bactericidal concentration, MBC)以及抑菌圈的大小进行评价。大多数研究都利用MIC评估物质的抑菌活性<sup>[13]</sup>,并利用时间杀菌曲线来描述其杀菌效果。

## 2 萜类化合物抑菌机制

越来越多的研究证明了萜类化合物可以抑制细菌生长,尤其是金黄色葡萄球菌、大肠杆菌和单增李斯特菌等食源性致病菌。不同的萜类化合物的抑菌活性如表1所示。萜类化合物通过作用于细胞膜、细胞壁、酶、蛋白质和核酸等多个靶点发挥抑菌作用。

### 2.1 破坏微生物细胞膜结构

萜类化合物作用于细菌细胞膜,使其形态改变,甚至破坏细胞膜的完整性。这使细菌细胞膜的通透性增

表1 萜类化合物的抑菌活性  
Table 1 Antimicrobial activity of terpenoids

名称	抑制菌种	抑菌强度	参考文献
α-松油醇	单增李斯特菌、金黄色葡萄球菌、大肠杆菌 O157:H7、鼠伤寒沙门氏菌	MIC(体积分数)分别为 0.5%、0.7%、0.2%、0.7%	[14-16]
α-松油醇	大肠杆菌、福氏志贺菌、肠道沙门氏菌	MIC 分别为 1.531、0.766、1.531 mg/mL, MBC 分别为 1.531、1.531、3.063 mg/mL	[17]
δ-松油醇	大肠杆菌、福氏志贺菌、肠道沙门氏菌	MIC 分别为 1.563、0.780、1.563 mg/mL, MBC 分别为 1.563、3.125、3.125 mg/mL	[17]
松油醇	大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、肠道沙门氏菌	MIC 分别为 0.747、0.747、0.467 mg/mL, MBC 分别为 1.868、1.868、0.747 mg/mL	[18]
(+)-α-蒎烯	大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、铜绿假单胞菌	MIC 分别为 512、≥1 024、≥1 024 μg/mL	[19]
α-蒎烯	大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、肠道沙门氏菌	MIC 为 0.686、0.420、0.686 mg/mL, MBC 分别为 3.432、1.716、1.716 mg/mL	[18]
β-蒎烯	金黄色葡萄球菌 ATCC 25923、大肠杆菌 O157:H7、肠道沙门氏菌 ATCC 13076、铜绿假单胞菌 ATCC 27855、单增李斯特菌	MIC 分别为 6.0、8.0、9.0、10.0、9.0 μg/mL, MBC 分别为 7.5、10.0、9.0、13.0、10.0 μg/mL	[20]
反式香叶醇	金黄色葡萄球菌、沙门氏菌、大肠杆菌 O157:H7、蜡样芽孢杆菌	MIC 分别为 0.07、0.03、0.06、0.03 mg/mL	[21]
香叶醇	大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、肠道沙门氏菌	MIC 为 0.445 mg/mL, MBC 分别为 1.778、1.778、0.711 mg/mL	[18]
橙花醇	大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、肠道沙门氏菌	MIC 为 0.441 mg/mL, MBC 分别为 1.762、0.705、1.762 mg/mL	[18]
月桂烯	大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、肠道沙门氏菌	MIC 分别为 0.635、0.635、1.598 mg/mL, MBC 为 3.176 mg/mL	[18]
柠檬烯	大肠杆菌 ATCC 25922、金黄色葡萄球菌、肠道沙门氏菌	MIC 分别为 0.016、0.421、0.421 mg/mL, MBC 分别为 0.032、0.673、1.682 mg/mL	[18]
柠檬烯	单增李斯特菌	MIC 为 20 mL/L	[22]
芳樟醇	大肠杆菌(ATCC8739)、蜡样芽孢杆菌、铜绿假单胞菌 ATCC9027	MIC 分别为 0.25、5 mg/L、0.5 μL/mL	[21, 23-24]
芳樟醇	金黄色葡萄球菌 ATCC 25923、大肠杆菌 O157:H7、肠道沙门氏菌 ATCC 13076、铜绿假单胞菌 ATCC 27854、单增李斯特菌	MIC 分别为 5.0、6.0、5.0、7.0、5.0 μg/mL, MBC 分别为 5.0、7.0、6.0、9.0、6.0 μg/mL	[25]
乙酸芳樟酯	金黄色葡萄球菌 ATCC 25923、大肠杆菌 O157:H7、肠道沙门氏菌 ATCC 13076、铜绿假单胞菌 ATCC 27853、单增李斯特菌	MIC 分别为 8.0、10.0、9.0、10.0、9.0 μg/mL, MBC 分别为 9.0、12.0、10.0、15.0、10.0 μg/mL	[20]

续表 1 萜类化合物的抑菌活性  
Continue table 1 Antimicrobial activity of terpenoids

名称	抑制菌种	抑菌强度	参考文献
香芹酚	金黄色葡萄球菌 ATCC 6538P、金黄色葡萄球菌 ATCC13565、大肠杆菌 ATCC15221、大肠杆菌 EPEP055、大肠杆菌 ATCC35218、沙门氏菌	MIC 分别为 1.25、0.38、2.5、0.38、250、0.156 mg/mL	[26-29]
香芹酮	大肠杆菌 EPEP055、金黄色葡萄球菌 ATCC13568	MIC 为 1.50 μg/mL, MBC 为 1.50 μg/mL	[29]
麝香草酚	金黄色葡萄球菌、沙门氏菌、大肠杆菌 O157:H7、蜡样芽孢杆菌、大肠杆菌 ATCC15221	MIC 分别为 0.007、0.003、0.007、0.007、5.0 mg/mL	[21, 28]
p-伞花烃	金黄色葡萄球菌 ATCC 6538P、大肠杆菌 ATCC15221	MIC 分别为 1.25、2.5 mg/mL	[28]
γ-萜烯	金黄色葡萄球菌 ATCC 6538P、大肠杆菌 ATCC15221	MIC 分别为 2.5、5.0 mg/mL	[28]
γ-萜烯	单增李斯特菌、大肠杆菌	MIC(体积分数)为 0.5%	[14]
β-石竹烯	蜡样芽孢杆菌 ATCC 14579	MIC(体积分数)为 2.5%	[30]
β-石竹烯	金黄色葡萄球菌 ATCC25923、大肠杆菌 ATCC8739、鼠伤寒沙门氏菌 ATCC14028	MIC 分别为 1.0、1.0、0.5 mg/mL, MBC 分别为 4.0、2.0、2.0 mg/mL	[31]
薄荷脑	金黄色葡萄球菌 ATCC 25923、大肠杆菌 O157:H7、肠道沙门氏菌 ATCC 13076、铜绿假单胞菌 ATCC 27857、单增李斯特菌	MIC 分别为 1.0、1.0、1.0、3.0、2.0 μg/mL, MBC 分别为 1.0、2.0、1.5、4.0、2.0 μg/mL	[20]
(+)薄荷醇	金黄色葡萄球菌 ATCC 6538P、大肠杆菌 ATCC15222	MIC 分别为 0.62、2.5 mg/mL	[32]
熊果酸	蜡样芽孢杆菌 ATCC 14579、猪霍乱沙门氏菌 ATCC 10708	MIC 分别为 0.02、1.0 mg/mL	[33]
齐墩果酸	蜡样芽孢杆菌 ATCC 14579、猪霍乱沙门氏菌 ATCC 10709	MIC 分别为 0.08、1.0 mg/mL	[33]
反式肉桂醛	大肠杆菌 EPEP055、金黄色葡萄球菌 ATCC13566	MIC 为 0.41 μg/mL, MBC 分别为 0.41、1.64 μg/mL	[29]
丁香酚	大肠杆菌 EPEP055、金黄色葡萄球菌 ATCC13567	MIC 为 0.84 μg/mL, MBC 分别为 0.84、1.67 μg/mL	[29]
丁香酚	伤寒沙门氏菌 733、单增李斯特菌、大肠杆菌	MIC(体积分数)分别为 0.0125%、0.5%、0.25%	[14, 34]
樟脑	金黄色葡萄球菌 ATCC 25923、大肠杆菌 O157:H7、肠道沙门氏菌 ATCC 13076、铜绿假单胞菌 ATCC 27856、单增李斯特菌	MIC 分别为 6.0、7.0、6.0、7.0、7.0 μg/mL, MBC 分别为 6.5、8.0、7.0、10.0、7.0 μg/mL	[20]
(-)-冰片	大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、铜绿假单胞菌	MIC 分别为 512、≥1 024、≥1 024 μg/mL	[19, 35]
桉树脑	金黄色葡萄球菌、大肠杆菌 O157:H9、鼠伤寒沙门氏菌、单增李斯特菌	MIC 分别为 2%、0.7%、0.8%(体积分数)、(66.25 ± 3.91) μg/mL	[16, 36]
6β-hydroxy betunolic acid	金黄色葡萄球菌 ATCC 25923、大肠杆菌 ATCC 35218	MIC 分别为 16、≥1024 mg/L	[37]
emindole SB	大肠杆菌、金黄色葡萄球菌	MIC 均为 6.25 μg/mL	[38]
cladosporine A	金黄色葡萄球菌	MIC 为 4 μg/mL	[39]
eutypellenoid B	大肠杆菌、金黄色葡萄球菌	MIC 均为 8 μg/mL	[40]
heterophylline A	大肠杆菌、金黄色葡萄球菌	MIC 分别为 1.3、2.1 μg/mL	[41]

加,导致细胞内的内容物泄漏以及膜电位的改变,进而影响了细菌的生长和繁殖,甚至可能导致细菌死亡。

研究发现单萜类香芹酚会对大肠杆菌和沙门氏菌的生物膜和细胞膜产生影响。当香芹酚作用于这些细菌时,金黄色葡萄球菌的生物膜形成量减少,并且大肠杆菌的生物膜形成受到抑制。扫描电子显微镜观察显示,香芹酚会改变菌体细胞膜形态,并破坏细胞完整性。通过实时荧光定量聚合酶链式反应(real-time

quantitative polymerase chain reaction, RT-qPCR)分析发现,香芹酚显著降低了大肠杆菌中群体感应系统(quorum sensing, QS)相关基因 *luxS* 和 *pfs* 的表达,从而抑制大肠杆菌生物膜的形成<sup>[26-27]</sup>。3种异构体松油醇能抑制肠道沙门氏菌、志贺氏菌和大肠杆菌的生长,通过扫描电镜观察发现松油醇会引起菌体的细胞膜破损,导致细胞边界模糊,甚至有的细菌细胞发生凹陷和溶解,并导致细胞内物质(碱性磷酸酶、蛋白质和核酸)发



生泄漏,细胞膜电位发生去极化,表明3种异构体松油醇通过破坏细胞膜的完整性和增加细胞膜的通透性来抑制细菌的生长<sup>[17]</sup>。

## 2.2 影响微生物能量代谢

能量代谢是维持生物体生命活动和促进其生长发育的基础,同时也是生物细胞代谢中的重要组成部分。生物体利用多种呼吸代谢途径为生命活动提供所需的能量,如果能量代谢发生异常,可能会导致微生物增长速度减慢或停滞,并有可能导致微生物死亡。

一些萜类化合物通过影响微生物的细胞膜通透性和膜电位,使细胞发生去极化,干扰细胞能量三磷酸腺苷(adenosine triphosphate, ATP)生成系统,导致ATP的含量和ATP酶活性降低,细胞代谢功能发生异常,细胞膜的渗透性增加,细胞生长和繁殖所需的能量和关键物质不能及时合成,最终导致细胞死亡<sup>[42]</sup>。例如,有研究发现添加 $\alpha$ -松油醇后细菌呼吸代谢的损伤和质子动力的消散减少了ATP的产生。并且细胞膜破坏使ATP从细胞中泄漏,使得细胞中能量不足,影响细菌的生长代谢<sup>[15]</sup>;柠檬烯可以通过抑制单增李斯特菌呼吸链复合物蛋白的增殖,影响单增李斯特菌的呼吸功能和能量水平,从而导致细菌死亡<sup>[22]</sup>;柠檬烯还可以通过干扰三羧酸和糖酵解途径中的酶系统功能,降低关键酶(ATP酶、琥珀酸脱氢酶、苹果酸脱氢酶和丙酮酸激酶等)的活性,阻碍金黄色葡萄球菌的细菌呼吸和能量代谢途径,抑制ATP的合成与分解,从而导致细菌死亡<sup>[43]</sup>。

## 2.3 抑制微生物体内酶活性

萜类化合物可以抑制细菌的关键酶活性。它们通过与酶结合或调控酶的活性,抑制细胞内的酶活性,干扰细菌的代谢和生物合成过程,从而抑制细菌的正常生长和繁殖。研究发现芳樟醇对莓实假单胞菌呼吸代谢活力和呼吸链脱氢酶产生了影响。这是由于细菌呼吸链位于细胞膜上,而芳樟醇会对细菌的细胞膜造成破坏,进而抑制呼吸链脱氢酶活性,对细菌的呼吸链产生了不利影响,导致了细菌细胞内呼吸代谢活力下降,使细胞内代谢发生紊乱,进而阻碍了菌体的正常生长和繁殖<sup>[24]</sup>。此外,柠檬醛和香叶醇能够有效抑制葡萄糖基转移酶活性,减少葡聚糖的产生,从而阻止生物膜的形成<sup>[44]</sup>。

## 2.4 损伤微生物遗传物质功能

脱氧核糖核酸(deoxyribonucleic acid, DNA)或核糖核酸(ribonucleic acid, RNA)是所有生物的遗传物质,在生命的生长、发育、繁殖和突变中起着重要作用。并且DNA可以控制蛋白质的合成和代谢<sup>[45]</sup>。而萜类化合物可以与细菌的DNA结合,阻止DNA的复制和转录过程,从而阻碍细菌的生长和繁殖<sup>[46]</sup>。萜烯和酚类可以通过抑制大肠杆菌细胞内的氧化反应来抑制

DNA修复过程<sup>[45, 47-48]</sup>。柠檬烯与DNA的相互作用引起了各种结构和构象的变化,抑制了DNA转录和翻译过程,导致DNA损伤,从而阻碍细菌的生长<sup>[49-50]</sup>。

## 3 萜类化合物官能团对抗菌性的影响

萜类化合物通过多种机制抑制细菌的生长,值得注意的是,这种抗菌效果会受到官能团的影响,不同的官能团对不同的菌株具有不同的抑制效果。

### 3.1 羟基官能团

羟基官能团对某些菌株的抑菌作用具有显著的影响,并且苯环的存在会强化羟基的抗菌性<sup>[51]</sup>。羟基官能团是一种具有亲水性的极性官能团,可以与细菌细胞膜中的磷脂分子相互作用,破坏其脂质双层结构,从而导致细胞膜的破裂,细胞内部溶解,最终导致菌死亡。研究发现 $\alpha$ -松油醇的羟基与碳水化合物—COO—之间会相互作用形成糖苷键,可能导致细胞核和细胞壁的破裂;并且研究还发现 $\alpha$ -松油醇的羟基与细菌之间发生相互作用会影响膜的功能,从而导致细菌死亡<sup>[15]</sup>。此外,萜类化合物中羟基基团在不同位置对菌株的抑制作用也有差异,酚羟基基团对膜的损伤效率更高,并且具有更强的抗真菌活性<sup>[52]</sup>。在香芹酚、百里香酚和丁香酚中,由于酚羟基位置不同,香芹酚对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌和蜡样芽孢杆菌的抑菌活性均高于百里香酚和丁香酚<sup>[53]</sup>。

### 3.2 羰基官能团

羰基官能团是一种极性很强的官能团,可以与蛋白质中的氨基酸相互作用,干扰蛋白质的结构和功能,从而抑制细菌的代谢活动,达到抑菌的目的<sup>[13]</sup>。在五环三萜中,C-3羰基和C-28羧酸基团的存在可以增强其抗菌活性。特别是在6 $\beta$ -hydroxy betunolic acid中,C-3位的羰基和C-28位的羧基的存在对抗菌性起到重要作用。并且羧酸基团可作为细菌膜的破坏剂,穿过细胞膜导致质子泄漏,降低细胞质的pH值,抑制细菌的营养运输和酶活性,从而抑制细菌的生长<sup>[37]</sup>。

### 3.3 碳环官能团

碳环官能团是一种具有较强的杀菌活性的有机环状结构。其中常见的芳香族环和萜环结构具有很高的亲脂性,能够渗透到细胞膜内部,影响细菌细胞膜的结构和功能,从而抑制其生长繁殖。此外,碳环官能团还可以与DNA发生相互作用,阻断DNA的复制和细胞分裂,进而抑制细菌的生长。芳环结构具备的疏水性能渗透和破坏质膜,从而实现高抗菌性<sup>[52]</sup>。

## 4 萜类化合物的应用

萜类化合物具有很好的抗菌性,在食品领域具有广泛的应用。目前,它们可以用作食品保鲜剂来抑制微生物的生长,从而延长其保质期。

单萜类化合物主要通过破坏细胞膜、影响酶活性和干扰代谢等方式来发挥抗菌作用<sup>[23,43,49]</sup>。由于其具有天然和低毒的特点,它们可用于食品保鲜和食品安全等领域。例如, $\alpha$ -松油醇和柠檬烯作为食品添加剂,具有抗菌和保鲜作用<sup>[15,49]</sup>。倍半萜具有广谱的抗菌活性,已被广泛用于各种抗菌剂的研发和生产中。某些倍半萜可以通过干扰菌体细胞膜的结构和功能来抑制其生长和繁殖<sup>[30,54-55]</sup>。雪松醇通过抑制微生物的生长来发挥抗菌作用,且被作为食品添加剂用于食品防腐<sup>[56]</sup>。另外,香紫苏毛状根中提取的二萜类化合物萨匹松通过抑制生物膜的形成来抑制金黄色葡萄球菌的生长,从而起到抗菌作用<sup>[8]</sup>。

## 5 结论与展望

萜类化合物是一类广泛存在于自然界中的物质,对不同的菌种具有一定的抑制作用。目前,在萜类化合物的合成方面已经进行了很多研究,但对其抗菌性能的研究还处于初步阶段,并且对抑菌机制的研究还不够深入。尽管萜类化合物在抗菌性方面显示出潜力,但仍面临一些挑战。一方面是萜类化合物的稳定性和溶解度问题,这限制了它们在食品开发中的应用。另一方面,还需要对萜类化合物的毒性和安全性进行评价,才能将其作为抗菌剂应用于食品领域。虽然还有一些困难需要克服,但萜类化合物是一类具有潜力的天然抗菌物质,在未来将持续关注其抗菌机制,并探索如何最大限度地发挥它们在食品行业中的作用。

## 参考文献:

- [1] ZHANG J B, WANG Y X, LU X N. Molecular imprinting technology for sensing foodborne pathogenic bacteria[J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2021, 413(18): 4581-4598.
- [2] DONG S X, YANG X S, ZHAO L, et al. Antibacterial activity and mechanism of action saponins from *Chenopodium quinoa* Willd. husks against foodborne pathogenic bacteria[J]. Industrial Crops and Products, 2020, 149: 112350.
- [3] GAYTÁN M O, MARTÍNEZ-SANTOS V I, SOTO E, et al. Type three secretion system in attaching and effacing pathogens[J]. Frontiers in Cellular and Infection Microbiology, 2016, 6: 129.
- [4] KOZAJDA A, JEŽAK K, KAPSA A. Airborne *Staphylococcus aureus* in different environments-A review[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2019, 26(34): 34741-34753.
- [5] AGBAJE M, BEGUM R H, OYEKUNLE M A, et al. Evolution of *Salmonella* nomenclature: A critical note[J]. Folia Microbiologica, 2011, 56(6): 497-503.
- [6] CAI Y Y, ZOU G M, XI M H, et al. Juglone inhibits *Listeria monocytogenes* ATCC 19115 by targeting cell membrane and protein[J]. Foods, 2022, 11(17): 2558.
- [7] GUO J J, GAO Z P, LI G Y, et al. Antimicrobial and antibiofilm efficacy and mechanism of essential oil from *Citrus Changshan-huyou* Y. B. Chang against *Listeria monocytogenes*[J]. Food Control, 2019, 105: 256-264.
- [8] KUŹMA Ł, RÓZALSKI M, WALENCKA E, et al. Antimicrobial activity of diterpenoids from hairy roots of *Salvia sclarea* L.: Salviposone as a potential anti-biofilm agent active against antibiotic resistant staphylococci[J]. Phytomedicine: International Journal of Phytotherapy and Phytopharmacology, 2007, 14(1): 31-35.
- [9] ZHANG C B, LI M, ZHAO G R, et al. Alpha-Terpeneol production from an engineered *Saccharomyces cerevisiae* cell factory[J]. Microbial Cell Factories, 2019, 18(1): 160.
- [10] SHU H Z, PENG C, BU L, et al. Bisabolane-type sesquiterpenoids: Structural diversity and biological activity[J]. Phytochemistry, 2021, 192: 112927.
- [11] GRIFFIN S G, WYLLIE S G, MARKHAM J L, et al. The role of structure and molecular properties of terpenoids in determining their antimicrobial activity[J]. Flavour and Fragrance Journal, 1999, 14(5): 322-332.
- [12] SAHA P, RAHMAN F I, HUSSAIN F, et al. Antimicrobial diterpenes: Recent development from natural sources[J]. Frontiers in Pharmacology, 2022, 12: 820312.
- [13] BURT S. Essential oils: Their antibacterial properties and potential applications in foods-A review[J]. International Journal of Food Microbiology, 2004, 94(3): 223-253.
- [14] OYEDEMI S, OKOH A, MABINYA L, et al. The proposed mechanism of bactericidal action of eugenol,  $\alpha$ -terpineol and g-terpinene against *Listeria monocytogenes*, *Streptococcus pyogenes*, *Proteus vulgaris* and *Escherichia coli*[J]. African Journal of Biotechnology, 2009, 8: 1280-1286.
- [15] YANG X L, ZHAO S N, DENG Y, et al. Antibacterial activity and mechanisms of  $\alpha$ -terpineol against foodborne pathogenic bacteria[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2023, 107(21): 6641-6653.
- [16] ZENGIN H, BAYSAL A H. Antibacterial and antioxidant activity of essential oil terpenes against pathogenic and spoilage-forming bacteria and cell structure-activity relationships evaluated by SEM microscopy[J]. Molecules, 2014, 19(11): 17773-17798.
- [17] HUANG J F, YANG L Y, ZOU Y, et al. Antibacterial activity and mechanism of three isomeric terpineols of *Cinnamomum longepaniculatum* leaf oil[J]. Folia Microbiologica, 2021, 66(1): 59-67.
- [18] WANG C Y, CHEN Y W, HOU C Y. Antioxidant and antibacterial activity of seven predominant terpenoids[J]. International Journal of Food Properties, 2019, 22(1): 230-238.
- [19] LEITE-SAMPAIO N F, GONDIM C N F L, MARTINS R A A, et al. Potentiation of the activity of antibiotics against ATCC and MDR bacterial strains with (+)- $\alpha$ -pinene and (-)-borneol[J]. BioMed Research International, 2022, 2022: 8217380.
- [20] SOKOVIĆ M, GLAMOČLIJA J, MARIN P D, et al. Antibacterial effects of the essential oils of commonly consumed medicinal herbs using an *in vitro* model[J]. Molecules, 2010, 15(11): 7532-7546.
- [21] GUIMARÃES A C, MEIRELES L M, LEMOS M F, et al. Antibacterial activity of terpenes and terpenoids present in essential oils[J]. Molecules, 2019, 24(13): 2471.
- [22] HAN Y J, SUN Z C, CHEN W X. Antimicrobial susceptibility and antibacterial mechanism of limonene against *Listeria monocytogenes*[J]. Molecules, 2019, 25(1): 33.
- [23] 郭俸钰, 陈文学, 陈海明, 等. 芳樟醇对大肠杆菌的抑菌作用机制[J]. 现代食品科技, 2020, 36(4): 113-118. GUO Fengyu, CHEN Wenxue, CHEN Haiming, et al. Antibacterial mechanism of linalool against *Escherichia coli*[J]. Modern Food Science and Technology, 2020, 36(4): 113-118.
- [24] LIU X, CAI J X, CHEN H M, et al. Antibacterial activity and mechanism of linalool against *Pseudomonas aeruginosa*[J]. Microbial Pathogenesis, 2020, 141: 103980.
- [25] MAĆCZKA W, DUDA-MADEJ A, GRABARCZYK M, et al. Natural

- compounds in the battle against microorganisms - linalool[J]. *Molecules*, 2022, 27(20): 6928.
- [26] AMARAL V C S, SANTOS P R, DA SILVA A F, et al. Effect of carvacrol and thymol on *Salmonella* spp. biofilms on polypropylene[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2015, 50(12): 2639-2643.
- [27] ASADI S, NAYERI-FASAEI B, ZAHRAEI-SALEHI T, et al. Antibacterial and anti-biofilm properties of carvacrol alone and in combination with cefixime against *Escherichia coli*[J]. *BMC Microbiology*, 2023, 23(1): 55.
- [28] CRISTANI M, D'ARRIGO M, MANDALARI G, et al. Interaction of four monoterpenes contained in essential oils with model membranes: Implications for their antibacterial activity[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2007, 55(15): 6300-6308.
- [29] NOGUEIRA J O E, CAMPOLINA G A, BATISTA L R, et al. Mechanism of action of various terpenes and phenylpropanoids against *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus*[J]. *FEMS Microbiology Letters*, 2021, 368(9): fnab052.
- [30] MOO C L, YANG S K, OSMAN M A, et al. Antibacterial activity and mode of action of  $\beta$ -caryophyllene on *Bacillus cereus*[J]. *Polish Journal of Microbiology*, 2020, 69(1): 1-6.
- [31] SELESTINO NETA M C, VITTORAZZI C, GUIMARÃES A C, et al. Effects of  $\beta$ -caryophyllene and *Murraya paniculata* essential oil in the murine hepatoma cells and in the bacteria and fungi 24-h time-kill curve studies[J]. *Pharmaceutical Biology*, 2017, 55(1): 190-197.
- [32] TROMBETTA D, CASTELLI F, SARPIETRO M G, et al. Mechanisms of antibacterial action of three monoterpenes[J]. *Antimicrobial Agents and Chemotherapy*, 2005, 49(6): 2474-2478.
- [33] CUNHA W R, DE MATOS G X, SOUZA M G M, et al. Evaluation of the antibacterial activity of the methylene chloride extract of *Miconia ligustroides*, isolated triterpene acids, and ursolic acid derivatives[J]. *Pharmaceutical Biology*, 2010, 48(2): 166-169.
- [34] DEVI K P, NISHA S A, SAKTHIVEL R, et al. Eugenol (an essential oil of clove) acts as an antibacterial agent against *Salmonella typhi* by disrupting the cellular membrane[J]. *Journal of Ethnopharmacology*, 2010, 130(1): 107-115.
- [35] TOMASELLI S, BERTINI F, CIFARELLI A, et al. Antibacterial properties of polyurethane foams additivated with terpenes from a bio-based polyol[J]. *Molecules*, 2023, 28(4): 1966.
- [36] LI D Y, WANG R, YOU M, et al. The antimicrobial effect and mechanism of the *Artemisia argyi* essential oil against bacteria and fungus[J]. *Brazilian Journal of Microbiology*, 2024, 55(1): 727-735.
- [37] WICKRAMASINGHA W G D, JAYASINGHE S, KARUNARATNE D N, et al. Antibacterial and synergistic activity of 6 $\beta$ -hydroxy-3-oxolup-20(29)-en-28-oic acid (6 $\beta$ -hydroxy betunolic acid) isolated from *Schumacheria castaneifolia* vahl[J]. *Bioorganic & Medicinal Chemistry*, 2021, 38: 116142.
- [38] LIANG Z Y, SHEN N X, ZHOU X J, et al. Bioactive indole diterpenoids and polyketides from the marine-derived fungus *Penicillium javanicum*[J]. *Chemistry of Natural Compounds*, 2020, 56(2): 379-382.
- [39] HAN X, BAO X F, WANG C X, et al. Cladosporine A, a new indole diterpenoid alkaloid with antimicrobial activities from *Cladosporium* sp[J]. *Natural Product Research*, 2021, 35(7): 1115-1121.
- [40] YU H B, WANG X L, XU W H, et al. Eutypellenoids A-C, new pimarane diterpenes from the Arctic fungus *Eutypella* sp. D-1[J]. *Marine Drugs*, 2018, 16(8): 284.
- [41] OBAIDULLAH, AHMAD M N, AHMAD W, et al. Isolation and characterization of C19-diterpenoid alkaloids from the roots of *Aconitum heterophyllum*[J]. *Medicinal chemistry*, 2018, 1: 101.
- [42] GILL A O, HOLLEY R A. Inhibition of membrane bound ATPases of *Escherichia coli* and *Listeria monocytogenes* by plant oil aromatics[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2006, 111(2): 170-174.
- [43] HAN Y J, CHEN W X, SUN Z C. Antimicrobial activity and mechanism of limonene against *Staphylococcus aureus*[J]. *Journal of Food Safety*, 2021, 41(5): e12918.
- [44] PALOMARES-NAVARRO J J, BERNAL-MERCADO A T, GONZÁLEZ-AGUILAR G A, et al. Antibiofilm action of plant terpenes in *Salmonella* strains: Potential inhibitors of the synthesis of extracellular polymeric substances[J]. *Pathogens*, 2022, 12(1): 35.
- [45] JU J, SANTANA DE OLIVEIRA M, QIAO Y. Inhibitory mechanism of cinnamon essential oil and its active components against bacteria[M]// *Cinnamon: A Medicinal Plant and A Functional Food Systems*. Cham: Springer, 2023: 85-105.
- [46] 郝静梅, 盛冉, 孙志高, 等. 柠檬烯抗菌性研究进展[J]. *食品与发酵工业*, 2017, 43(2): 274-278.
- HAO Jingmei, SHENG Ran, SUN Zhigao, et al. Research progress in antimicrobial activity of limonene[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2017, 43(2): 274-278.
- [47] CETIN-KARACA H, NEWMAN M C. Antimicrobial efficacy of plant phenolic compounds against *Salmonella* and *Escherichia coli*[J]. *Food Bioscience*, 2015, 11: 8-16.
- [48] 郭映雪, 孙墨珑. 核桃楸外果皮三萜类物质的提取及抑菌活性[J]. *森林工程*, 2020, 36(3): 37-43.
- GUO Yingxue, SUN Molong. Extraction of triterpenoids from the green peel of *Juglans mandshurica* maxim and its antibacterial activity[J]. *Forest Engineering*, 2020, 36(3): 37-43.
- [49] GUPTA A, JEYAKUMAR E, LAWRENCE R. Strategic approach of multifaceted antibacterial mechanism of limonene traced in *Escherichia coli*[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 13816.
- [50] ÖZTÜRK F, AÇIK L, ŞENER İ, et al. Antimicrobial properties and DNA interactions studies of 3-hetarylazoquinoline-2, 4-diol compounds[J]. *Turkish Journal of Chemistry*, 2012, 36(2): 293-302.
- [51] RAO J J, CHEN B C, MCCLEMENTS D J. Improving the efficacy of essential oils as antimicrobials in foods: Mechanisms of action[J]. *Annual Review of Food Science and Technology*, 2019, 10: 365-387.
- [52] KONUK H B, ERGÜDEN B. Phenolic-OH group is crucial for the antifungal activity of terpenoids via disruption of cell membrane integrity[J]. *Folia Microbiologica*, 2020, 65(4): 775-783.
- [53] GALLUCCI M N, OLIVA M, CASERO C, et al. Antimicrobial combined action of terpenes against the food-borne microorganisms *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus* and *Bacillus cereus*[J]. *Flavour and Fragrance Journal*, 2009, 24(6): 348-354.
- [54] DAHHAM S S, TABANA Y M, IQBAL M A, et al. The anticancer, antioxidant and antimicrobial properties of the sesquiterpene  $\beta$ -caryophyllene from the essential oil of *Aquilaria crassna*[J]. *Molecules*, 2015, 20(7): 11808-11829.
- [55] JABRA -RIZK M A, MEILLER T F, JAMES C E, et al. Effect of farnesol on *Staphylococcus aureus* biofilm formation and antimicrobial susceptibility[J]. *Antimicrobial Agents and Chemotherapy*, 2006, 50(4): 1463-1469.
- [56] OH I, YANG W Y, PARK J, et al. *In vitro* Na<sup>+</sup>/K<sup>+</sup>-ATPase inhibitory activity and antimicrobial activity of sesquiterpenes isolated from *Thujopsis dolabrata*[J]. *Archives of Pharmacal Research*, 2011, 34(12): 2141-2147.