

植物精油及其活性成分的抗菌机理

高永生¹, 金斐¹, 朱丽云^{1,2*}, 赵前¹, 徐晓晖¹
(¹中国计量大学生命科学学院 芳香工程技术研发中心 杭州 310018
²安徽汉芳生物科技有限公司 安徽淮北 235000)

摘要 芳香植物精油普遍具有良好的抗菌能力,是潜在天然抗菌剂。本文概述山苍子、肉桂、丁香、辣木、百里香、鼠尾草、孜然、八角茴香、牛至、花椒、大蒜等 24 种精油的主要化学成分、抗菌作用对象和抗菌机理,并对香芹酚、肉桂醛、百里香酚、丁香酚、柠檬醛、柠檬烯等 6 种精油单体成分对不同微生物的抗菌作用进行分析。

关键词 植物精油; 活性成分; 抗菌机理

文章编号 1009-7848(2022)01-0376-13 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2022.01.041

食品安全是全球范围内的一个重大问题,食品中的某些微生物是影响食品安全和质量的主要因素。1996 年,日本东京、福岛等 40 多个都、府、县 9 000 余人因食用大肠杆菌 O157:H7 污染的食品患病,近千人住院,11 人死亡;2000 年,日本 14 000 多人因食用受金黄色葡萄球菌污染的“雪印”牛奶制品,产生呕吐、腹痛、腹泻等中毒症状。2010 年,因食用污染沙门氏菌的鸡蛋,美国沙门氏菌疫情从加利福尼亚州开始迅速向其它州蔓延,期间超过 1 000 人得病。对食品的抗菌处理是食品生产、加工、运输中不可缺少的环节。冷冻、加热、酸化、干燥和添加抗菌剂是常用的抗菌方法,然而这些方法均有一定的局限性。为满足人们对食品口感、风味和安全的要求,寻求一种天然、安全、且广谱抗菌的植物源抗菌剂,成为研究者关注的热点之一。精油是一种植物次级代谢产物,具有穿透力强,抑菌效率高,分子质量小、易吸收和成分复杂、不易产生耐药性等特点,在食品、化妆品、医药等行业有广泛的应用前景。

1 抗菌植物精油的作用对象及机理

微生物作为影响食品安全的一大重要因素,

在食品生产、运输、贮藏的过程中都需得到有效控制。植物精油是存在于植物体内的一类具有芳香气味的次生代谢产物,大多具有良好的抗菌效果,是一种来源广泛、安全环保、不易产生耐药性的天然抗菌剂,具有广阔的市场前景。据报道,山苍子、鼠尾草、孜然、草果、丁香、肉桂、辣木、牛至、竹叶、白扣等植物精油对多种微生物具有一定的抑制作用,有利于食品防腐保质。具有抗菌活性的植物精油的种类、主要成分、作用对象及机理如表 1 所示。

从表中可知,植物精油成分复杂,主要可分为萜烯(如石竹烯、蒎烯、柠檬烯、松油烯、葑草烯、大牛儿烯 D、月桂烯、姜黄烯、D-愈创木烯、 α -蛇床烯、香附烯、可巴烯等)、醇(如马鞭草烯醇、桉叶醇、芳樟醇、金合欢醇、松油醇、喇叭茶醇、植物醇、鲨肌醇等)、酚(如丁香酚、乙酰基丁香酚、胡椒酚、百里香酚等)、醛(如柠檬醛、十六醛、肉桂醛、枯茗醛、2-萜烯-10-醛、香茅醛等)、酮(如 4-羟基-2-甲基苯乙酮、葑酮、 α -香附酮等)、酯(如水杨酸甲酯、乙酸芳樟酯、乙酸香叶酯、醋酸酯、癸酸乙酯、巴西菊内酯、邻苯二甲酸二丁酯、邻苯二甲酸二乙酯等)和其它复杂的碳氢化合物(如石竹烯氧化物、反式茴香脑、去甲基氟西洋等),这些单体成分具有众多生理活性,是发展前景良好的研究材料。植物精油的抗菌机理主要可分为以下几点:1)破坏细胞壁,改变菌体形状,细胞内外浓度差较大时,细胞胀破死亡。如丁香精油^[5]、牛至精油^[5]、神农香菊精油^[18]等能破坏枯草芽孢杆菌细胞壁,鼠尾草精油^[6]、佩兰精油^[17]等能使金黄色葡萄球菌细胞

收稿日期: 2021-01-24

基金项目: 浙江省自然科学基金项目(LY20C200004);国家市场监督管理总局科技计划项目(S2020MK990)

作者简介: 高永生(1968—),男,博士,副教授

通信作者: 朱丽云 E-mail: zly@cjlu.edu.cn

表 1 植物精油对不同微生物的抗菌作用及机理

Table 1 Antibacterial effect and mechanism of plant essential oils on different microorganisms

序号	精油来源	精油主要成分	作用对象	抗菌机理	参考文献
1	山苍子	β -柠檬醛(39.249%)、 α -柠檬醛(30.894%)、柠檬烯(8.283%)、Trans-马鞭草烯醇(4.181%)、桉叶醇(3.357%)	大肠杆菌 O157:H7	破坏菌体细胞膜导致细胞膜通透性变大,使胞内大分子物质流出;抑制呼吸代谢;影响细胞能量代谢,抑制菌体生理代谢水平;抑制 DNA 拓扑异构酶的活性,减少胞内 DNA 含量;抑制菌体主要毒力基因 <i>stx1</i> , <i>stx2</i> , <i>ehxA</i> , <i>eae</i> 的转录水平	[1]
2	辣木	棕榈酸(38.67%)、十六醛(4.74%)、二十七烷(4.35%)、二十五烷(3.86%)	单核增生李斯特菌	抑制能量代谢,抑制菌体生理代谢水平;抑制呼吸代谢;抑制拓扑异构酶 I/II 活性,与 DNA 发生嵌入结合作用,减少胞内 DNA 含量;抑制菌体 LPI-1 毒力岛(<i>prfA</i> , <i>plcA</i> , <i>hly</i> , <i>actA</i> , <i>plcB</i>) 和 LPI-2 毒力岛(<i>inlA</i> , <i>inlB</i>)	[2]
3	丁香	丁香酚(83.73%)、乙酰基丁香酚(11.37%)、 β -石竹烯(3.47%)、 α -葑烯(0.42%)、水杨酸甲酯(0.28%)、石竹烯氧化物(0.27%)、胡椒酚(0.1%)	大肠杆菌、金黄色葡萄球菌	破坏细菌结构完整性,细胞膜通透性增加,导致胞内大分子物质泄漏,胞内 ATP、核酸、DNA 和蛋白质含量减少,引起细菌菌体的死亡	[3]
			单核增生李斯特菌	破坏菌体细胞膜,抑制 ATP 合成,抑制菌体内核酸合成,影响细菌生长繁殖,最终使细菌死亡	[4]
4	鼠尾草	乙酸芳樟酯(74.562%)、芳樟醇(12.326%)、大牛儿烯 D(1.913%)、柠檬烯(1.797%)、乙酸香叶酯(1.608%)	枯草芽孢杆菌	破坏菌体细胞壁和细胞膜,诱导细胞裂解	[5]
			大肠杆菌、金黄色葡萄球菌	细菌细胞壁和细胞膜受到一定程度的溶解、凹陷、变形,细胞的形态、结构等遭到破坏,细胞膜通透性增强,胞内 ATP、核酸含量减少	[6], [7]
5	苹果	1,8-桉叶素(13.37%)、(E)-金合欢醇(9.67%)、肉桂醛(7.71%)、2,3-二氢-1H-茛-4-甲醛(7.14%)、乙酸香叶醇酯(6.67%)	大肠杆菌	破坏菌体细胞壁和细胞膜,使菌体塌陷,细胞膜通透性增加,胞质溢出,DNA、RNA 和蛋白质泄漏严重时大肠杆菌死亡	[8]
6	孜然	2-萜烯-10-醛(40.239%)、枯茗醛(26.144%)、3-萜烯-10-醛(16.882%)、 γ -松油烯(5.606%)、 α -蒎烯(3.161%)	金黄色葡萄球菌	破坏细胞膜完整性,抑制菌体生长和孢子萌发;使菌体形态和超微结构发生较大变化,菌丝体表面畸形且出现扭曲断裂,细胞器形状不规则,胞体内形成致密的电子云结构和大的空泡	[9]
7	肉桂	丁香酚(75.61%)、醋酸酯(5.03%)、3-烯丙醇-6-甲氧基苯酚(3.33%)	蜡芽芽孢杆菌	破坏菌体细胞膜完整性,细胞通透性增加,细胞内容物(蛋白质、DNA、ATP)大量流失,可能影响菌体遗传物质 DNA 的合成	[10]
8	黄檗果实	β -蒎烯(26.456%)、月桂烯(19.287%)、 α -松油醇(11.488%)、 α -蒎烯(9.291%)、香茅醛(6.776%)、D-柠檬烯(4.086%)	沙门氏菌	破坏细胞结构,使细胞表面粗糙无光泽、皱缩、干瘪、突起、扭曲变形,细胞壁缺损,细胞膜破裂,细胞质固缩凝集成块,出现缺损、凹陷甚至空腔,使菌体失去自身的完整性;影响能量代谢;对菌体产生氧化损伤	[11]

(续表 1)

序号	精油来源	精油主要成分	作用对象	抗菌机理	参考文献
9	八角茴香	反式茴香脑(80.76%)、柠檬烯(6.93%)、草蒿脑(2.07%)、 β -石竹烯(1.45%)	大肠杆菌	破坏菌体细胞结构,小分子物质以及还原糖和蛋白质等大分子物质泄漏,致使菌体死亡	[12], [13]
10	牛至	香芹酚(63.35%)、 <i>p</i> -伞花烃(9.35%)、芳樟醇(4.7%)、 γ -松油烯(3.88%)、癸酸乙酯(2.71%)	大肠杆菌、枯草芽孢杆菌	破坏菌体细胞壁和细胞膜,诱导细胞裂解	[5], [14]
11	花椒	2,6,9,11-十二烯-1-羧酸甲酯(12.43%)、乙酸-4-萜烯酯(11.25%)、氧化石竹烯(8.77%)	大肠杆菌	破坏细胞完整结构,使细胞膜破裂,细胞内容物渗出,导致菌体死亡	[15]
12	竹叶	棕榈酸(19.35%)、植物醇(10.54%)、二十五烷(9.89%)、月桂酸(4.65%)、4-羟基-2-甲基苯乙酮(4.27%)、三十四烷(4.16%)	枯草芽孢杆菌、金黄色葡萄球菌、大肠杆菌、酿酒酵母	抑制微生物对营养物质的吸收利用,进而抑制其生长繁殖;通过破坏细胞膜或引起膜结构的变化,增加细胞膜通透性,使细胞内容物外泄,导致菌体死亡	[16]
13	佩兰	石竹烯(39.18%)、十八-9-烯醇(6.15%)、桉树脑(5.76%)	金黄色葡萄球菌、痢疾杆菌	使菌体形态发生变化,细胞壁膜发生皱缩、破损,细胞内容物溢出,细胞器模糊不清,胞内形成大的空泡	[17]
14	木香	巴西菊内酯(12.74%)、 <i>D</i> -愈创木烯(6.26%)、柏木烯醇(6.16%)、 α -姜黄烯(5.4%)	痢疾杆菌、伤寒杆菌	使菌体形态发生变化,细胞壁膜发生皱缩、破损,细胞内容物溢出,细胞器模糊不清,胞内形成大的空泡	[17]
15	神农香菊	反式氧化芳樟醇(9.94%)、 γ -谷甾醇(4.48%)、正三十五烷(3.47%)、邻苯二甲酸二丁酯(3.35%)	大肠杆菌、枯草芽孢杆菌	破坏菌体细胞壁,引起细胞变形;增加细胞膜通透性,破坏细胞膜完整性,引起细胞裂解,细胞内容物溢出,导致细胞死亡	[18]
16	博落回叶	十六醛(20.63%)、植物醇(18.51%)、9,12,15-十八碳三烯醛(13.51%)、4-乙烯-2-甲氧基苯酚(8.72%)	茄青枯菌	破坏菌体细胞膜完整性,增加细胞膜通透性,细胞内容物(K^+ , Ca^{2+} , Na^+ 电解质、蛋白质等)泄漏,导致细胞死亡	[19]
18	白扣	1,8-桉叶素(68.42%)、 α -蒎烯(5.71%)、 α -松油烯(2.63%)、 β -蒎烯(2.41%)	大肠杆菌、枯草芽孢杆菌	破坏细胞壁和细胞膜通透性,使菌体细胞内成分渗漏,导致细胞死亡	[20]
19	香早芹香菜	百里香酚(46.22%)、 γ -松油烯(22.41%)、对伞花烃(19.03%)、 β -蒎烯(3.23%)	大肠杆菌	破坏细胞膜结构,使菌体内细胞成分、蛋白质、钾离子大量泄漏	[21]
20	茴香籽	反式茴香脑(68.53%)、4-烯丙基苯甲醚(10.42%)、柠檬烯(6.24%)、葑酮(5.45%)	痢疾志贺菌	破坏菌体细胞膜完整性,电解质和细胞内容物(蛋白质、还原糖、260 nm 吸光材料)泄漏,致使细胞死亡	[22]
21	杜松	石竹烯(13.11%)、 α -石竹烯(11.72%)、氧化石竹烯(10.34%)、反式橙花叔醇(6.57%)	肺炎克雷伯菌	破坏细胞壁和细胞膜,导致蛋白质和 260 nm 吸收材料(DNA 和 RNA)泄漏,致使细胞死亡	[23]
22	香附	α -香附酮(28.15%)、 α -蛇床烯(19.99%)、香附烯(17.73%)、氧化- α -依兰烯(3%)、邻苯二甲酸二异丁酯(2.48%)	金黄色葡萄球菌、枯草芽孢杆菌	破坏细胞壁、细胞膜,使内容物泄漏;抑制细菌蛋白及 DNA 合成;抑制细菌生长,促进细胞凋亡	[24]

(续表 1)

序号	精油来源	精油主要成分	作用对象	抗菌机理	参考文献
23	大蒜	邻苯二甲酸二乙酯 (37.97%)、鲨肌醇 (15.52%)、去甲基氟西泮 (7.74%)、硼酸 (7.73%)	蜡样芽孢杆菌、大肠杆菌	细胞壁发生形态学改变,破坏细胞膜完整性,影响细胞膜渗透性,使得 5'-三磷酸腺苷、260 nm 吸光材料(DNA 和 RNA)和钾离子外排	[25], [26]
24	罗勒	丁香酚 (83.91%)、 β -石竹烯 (12.02%)、丁香烯 (1.45%)	金黄色葡萄球菌	不可逆破坏细胞质膜,破坏细胞完整性,导致细胞成分缺失	[27]

壁受到一定程度的溶解,导致菌体凹陷、变形,细胞的形态、结构等遭到破坏。草果精油^[7]、牛至精油^[5]、鼠尾草精油^[6]等可以破坏大肠杆菌细胞壁,使菌体形态发生变化,出现皱缩、破损甚至塌陷。黄檗果实精油^[11]能破坏沙门氏菌的细胞结构,使细胞表面粗糙无光泽、皱缩、干瘪、突起、扭曲变形; 2)破坏细胞膜,增强细胞膜通透性,使细胞内容物大量泄漏,导致菌体死亡。如丁香精油^[3]、鼠尾草精油^[6]、竹叶精油^[16]等可以破坏大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的细胞膜完整性,使细胞膜通透性增加,导致胞内大分子物质(核酸、DNA 和蛋白质)泄漏。草果精油^[8]、白扣精油^[20]、香早芹香菜精油^[21]等能增加大肠杆菌细胞膜通透性,使胞质溢出,DNA、RNA 和蛋白质泄漏严重时大肠杆菌死亡。肉桂精油^[10]可以破坏蜡样芽孢杆菌细胞膜完整性,增加细胞通透性,细胞内容物(蛋白质、DNA、ATP)大量流失; 3)影响能量代谢,抑制菌体生命活动。如辣木精油^[2]抑制单核增生李斯特菌糖酵解途径的 3 个关键酶(己糖激酶、果糖磷酸激酶和丙酮酸激酶)活性,山苍子精油^[1]抑制三羧酸循环途径的 3 个关键酶(α -酮戊二酸脱氢酶、柠檬酸合酶和线粒体异柠檬酸脱氢酶)活性来抑制大肠杆菌 O157:H7 的呼吸代谢。山苍子精油^[1]、辣木精油^[2]等还可以通过减少菌体内 ATP 含量,降低 ATP 酶活性影响细胞能量代谢,丁香精油^[4]能抑制单核增生李斯特菌的 ATP 合成; 4)抑制 DNA 合成或损伤 DNA,从而抑制菌体生长繁殖。如山苍子精油^[1]能抑制大肠杆菌 O157:H7 的 DNA 拓扑异构酶活性,减少胞内 DNA 含量。辣木精油^[2]能抑制单核增生李斯特菌拓扑异构酶 I/II 的活性,与 DNA 发生嵌入结合作用,减少胞内 DNA 含量。丁香精油^[4]可以抑制单核增生李斯特菌体内核酸合成,影响细菌生长

繁殖,最终使细菌死亡。肉桂精油^[10]可能影响蜡样芽孢杆菌遗传物质 DNA 合成。香附精油^[24]可以抑制金黄色葡萄球菌和枯草芽孢杆菌 DNA 合成; 5)抑制细菌毒力基因转录与表达。如山苍子精油^[1]能抑制大肠杆菌 O157:H7 主要毒力基因 *stx1*, *stx2*, *ehxA*, *eae* 的转录水平,辣木精油^[2]能抑制单核增生李斯特菌 LPI-1 毒力岛 (*prfA*, *plcA*, *hly*, *actA*, *plcB*) 和 LPI-2 毒力岛 (*inlA*, *inlB*) 转录表达。

2 精油单体成分及其抗菌机理

植物精油的化学成分极其复杂,主要包含萜烯类衍生物、芳香族化合物、脂肪族化合物、含氮含硫化合物等。其中,萜类化合物是精油中最为常见、含量最多的成分,如月桂烯、柠檬烯等;芳香族是植物精油中的第二大类化合物,主要是一些酚类、醛类、酮类、酯类、萜源衍生物及苯丙环类衍生物,如百里酚、丁香酚、柠檬醛等。据国内外研究报告,植物精油中香芹酚、丁香酚、百里酚、柠檬醛、肉桂醛等活性成分对一些食源性腐败菌、致病菌具有一定的抑制作用,以下将这些成分对腐败菌或致病菌的抑制机理做简单介绍。

2.1 香芹酚

香芹酚又名 2-甲基-5-异丙基苯酚,是牛至、百里香、肉桂等许多植物的天然有效成分,也是植物精油中具有抗菌活性的单体成分之一,由于其有益的生物活性,尤其是止痛、抑菌、抗氧化活性而备受关注,表 2 列举了香芹酚对部分微生物的抗菌机理。

香芹酚能改变禽分枝副结核杆菌膜磷脂分子的分子堆积特性直接导致细胞流态化,从而使微生物死亡,达到食品防腐抗菌的目的。还可以通过降低金黄色葡萄球菌、大肠杆菌 O157:H7 等微生

表2 香芹酚对不同微生物的抗菌作用及机理

Table 2 Antibacterial effect and mechanism of carvacrol on different microorganisms

序号	微生物	抗菌机理	参考文献
1	蜡样芽孢杆菌	影响细胞膜上的阴阳离子,破坏离子梯度,从而破坏了细胞最基本的代谢过程,最终导致细胞死亡	[28]-[30]
2	禽分枝副结核杆菌亚种	改变膜磷脂分子的分子堆积特性,导致流态化	[31]
3	单核增生李斯特菌	抑制细菌的运动,抑制ATP酶活性,抑制ATP的生成,破坏细菌细胞膜完整性	[32],[33]
4	大肠杆菌	抑制ATP酶活性,抑制ATP的生成,破坏细菌细胞膜完整性,使细菌膜去极化,使细胞质泄漏,升高活性氧水平	[32]-[34]
5	大肠杆菌 O157:H7	使细胞膜中不饱和脂肪酸(UFAs)含量降低,膜结构发生变化而受损,破坏细胞膜完整性,增加其通透性,使质子与钾离子渗漏,导致膜电位丧失,降低细胞内ATP的水平,抑制鞭毛蛋白合成,使细菌无鞭毛,不能运动	[35]-[38]
6	酵母菌	抑制酵母菌生长,破坏细胞膜结构,使细胞质泄漏,麦角固醇含量减少	[39]
7	匍枝根霉	增强细胞膜通透性,导致细胞质、核酸和蛋白质泄漏,减少细胞膜麦角固醇含量,破坏细胞质膜	[40]
8	金黄色葡萄球菌	使细胞膜中不饱和脂肪酸(UFAs)含量降低,膜结构发生变化而受损	[35]

物细胞膜中不饱和脂肪酸(UFAs)含量^[35],减少匍枝根霉等微生物细胞膜中麦角固醇含量^[40],使膜结构发生变化而受损,也能直接破坏蜡样芽孢杆菌、大肠杆菌、单核增生李斯特菌、酵母菌、匍枝根霉等微生物的细胞膜完整性,增加其通透性,胞内质子和钾离子外泄影响细胞膜上的阴阳离子,破坏离子梯度或导致膜电位的丧失^[28,33,36-37,39-40],核酸、蛋白质等生物大分子渗漏破坏细胞最基本的代谢过程,导致微生物死亡。不仅如此,香芹酚还能抑制单核增生李斯特菌和大肠杆菌的ATP酶活性,从而抑制ATP生成,使得细菌生命活动缺乏能量^[32-33],可使蜡样芽孢杆菌产生剂量相关生长抑制^[29],在pH值为4.5~8.5的范围内,蜡样芽孢杆

菌在pH 7.0时对香芹酚的敏感性最低,30℃的暴露温度下细胞死亡率最高^[30],在pH 7.0、30℃下香芹酚对蜡样芽孢杆菌的抗菌效果较好。

2.2 肉桂醛

肉桂醛又叫桂皮醛,天然存在于肉桂油(桂皮、桂枝、桂叶中均有存在)、藿香油、风信子油和玫瑰油等精油中,具有杀菌、消毒、防腐、抗溃疡、抗病毒、抗癌等生物活性。在食品工业中,肉桂醛是很好的调味油,可用来改善食品的口感风味,因具有较强的抗霉菌、抗细菌能力,常作为食品保鲜防腐防霉剂,其作用对象和可能的作用机制见表3。

表3 肉桂醛对不同微生物的抗菌作用及机理

Table 3 Antibacterial effect and mechanism of cinnamaldehyde on different microorganisms

序号	微生物	抗菌机理	参考文献
1	大肠杆菌	破坏细胞膜完整性,抑制ATP的生成,破坏细菌细胞代谢和能量生产,抑制细菌运动	[32],[33],[41]
2	单核增生李斯特菌	抑制ATP的生成,破坏细菌细胞膜的完整性,抑制细菌运动	[32],[33]
3	黄曲霉	损伤细胞质膜进入细胞内,改变胞内大分子空间结构,破坏有序的新陈代谢,抑制黄曲霉的生长	[42]
4	大肠杆菌 O157:H7	使细胞膜中不饱和脂肪酸(UFAs)含量降低,膜结构发生变化而受损,细胞结构破坏,细胞内容物泄漏	[35],[43]
5	不动杆菌	破坏细胞膜,破坏细菌的细胞代谢和能量生产,使细胞死亡	[41]

肉桂醛可以通过降低大肠杆菌 O157:H7、金黄色葡萄球菌、荧光假单胞菌等微生物细胞膜中不饱和脂肪酸(UFAs)含量,使膜结构发生变化而受损^[35],也能直接破坏不动杆菌、大肠杆菌、黄曲霉、单核增生李斯特菌等微生物的细胞膜完整性,使胞内物质发生泄漏^[43],从而破坏其物质代谢^[41],能改变黄曲霉胞内大分子空间结构,破坏微生物胞内有序的新陈代谢从而抑制生长^[42]。不仅如此,肉桂醛还可以抑制胞内 ATP 的生成来破坏微生物细胞内能量代谢^[33],使细胞死亡以达到抗菌效

果。

2.3 百里香酚

百里香酚又叫麝香草酚,化学名为 2-异丙基-5-甲基苯酚,有芳香气味,属于一种单萜酚类,香芹酚是其同分异构体。百里香酚主要来源于唇形科植物百里香、麝香草、牛至等,具有抗菌、抗氧化、驱虫、抗癌等生物活性。百里香酚常被用作食品香料,是中国食品行业允许使用的添加剂,其抗菌机理见表 4。

表 4 百里香酚对不同微生物的抗菌作用及机理

Table 4 Antibacterial effect and mechanism of thymol on different microorganisms

序号	微生物	抗菌机理	参考文献
1	金黄色葡萄球菌	使细胞膜中不饱和脂肪酸(UFAs)含量降低,膜结构发生变化;破坏细胞膜的完整性,降低细胞活力;与 DNA 小沟结合,使 DNA 二级结构发生轻度失稳,从而使 DNA 分子聚集	[44]
2	大肠杆菌	破坏细胞膜,抑制外排泵,破坏预先形成的生物膜,抑制细菌运动,抑制膜 ATP 酶活性	[45]
3	酵母菌	抑制酵母菌生长,减少细胞膜麦角固醇含量,破坏细胞膜结构,使细胞质泄漏	[39]
4	枯草芽孢杆菌	破坏菌体细胞壁和细胞膜,诱导细胞裂解	[5]
5	弗氏柠檬酸杆菌	抑制生物膜的形成	[46]
6	嗜水气单胞菌	抑制生物膜的形成	[46]

百里香酚可通过改变金黄色葡萄球菌的膜脂脂肪酸组成,如降低 12-甲基十四酸和 14-甲基十六烷酸的比例(分别从 22.4%和 17.3%降至 7.9%和 10.3%)^[44],以减少酵母菌细胞膜中麦角固醇含量^[39]破坏细胞膜结构。还可以直接破坏大肠杆菌、枯草芽孢杆菌等微生物细胞膜的完整性,抑制嗜水气单胞菌等微生物生物膜的形成^[46],使胞内物质泄漏,影响微生物正常生理代谢活动。能通过抑制膜 ATP 酶活性,抑制外排泵使细胞活力降低,抑制细菌运动^[45]影响微生物物质能量代谢,使菌死亡。且百里香酚还可以使 DNA 二级结构发生轻度失稳。综上所述,百里香酚可以通过破坏细胞结构,损伤遗传物质 DNA,影响微生物物质代谢和能量代谢等机理达到抗菌的目的。

2.4 丁香酚

丁香酚又名子丁香酚,学名为 2-甲氧基-4-烯丙基苯酚,天然存在于唇形科、月桂科、桃金娘

科和肉豆蔻科的几种植物的精油中。在传统医学研究中,丁香酚对人体健康产生有益作用,具有抗氧化、抗炎、抗癌等生物活性。在食品工业中,丁香酚作为潜在有价值的防腐剂,在抗菌、芳香性和安全性等方面具有优势,对导致食物腐败变质的微生物更是有广谱抑菌活性^[47]。其抗菌活性及作用机理如表 5 所示。

丁香酚可以分解破坏白色念珠菌、大肠杆菌、枯草芽孢杆菌等微生物的细胞壁^[5,50],改变菌体形态。还能通过增强溶菌酶、TritonX-100 和 SDS 对细菌细胞膜的损伤作用^[49],使细胞膜中大分子变形^[51]或减少细胞膜中麦角固醇、不饱和脂肪酸(UFAs)含量^[35,40]来破坏伤寒沙门氏菌、匍枝根霉、大肠杆菌 O157:H7 等微生物的细胞膜。可增加匍枝根霉、白色念珠菌等微生物的细胞膜通透性,使胞内物质(核酸、蛋白质等)大量泄漏,导致菌体死亡^[40,50]。且丁香酚还能抑制嗜水气单胞菌、弗氏柠

表5 丁香酚对不同微生物的抗菌作用及机理

Table 5 Antibacterial effect and mechanism of eugenol on different microorganisms

序号	微生物	抗菌机理	参考文献
1	匍枝根霉	增强细胞膜通透性,导致细胞质、核酸和蛋白质泄漏,麦角固醇含量减少,破坏细胞质膜	[40]
2	金黄色葡萄球菌	使细胞膜中不饱和脂肪酸(UFAs)含量降低,膜结构发生变化而受损,抑制菌体三羧酸循环和电子链传递中相关关键酶(苹果酸脱氢酶和琥珀酸脱氢酶)活性	[35], [48]
3	革兰氏阴性菌	破坏细胞膜,增强溶菌酶、TritonX-100和SDS对细菌细胞膜的损伤作用	[49]
4	白色念珠菌	分解细胞壁,增加细胞通透性,促进细胞渗漏,直接导致细胞死亡	[50]
5	伤寒沙门氏菌	增加细胞膜通透性,使细胞膜中大分子变形从而破坏细胞膜	[51]
6	嗜水气单胞菌、弗氏柠檬酸杆菌	抑制生物膜的形成	[46]
7	枯草芽孢杆菌、大肠杆菌	破坏菌体细胞壁和细胞膜,诱导细胞裂解	[5]
8	大肠杆菌 O157:H7、荧光假单胞菌、热杀索丝菌	使细胞膜中不饱和脂肪酸(UFAs)含量降低,膜结构发生变化而受损	[35]

柠檬酸杆菌等微生物的生物膜形成,影响其正常生理功能,抑制菌体苹果酸脱氢酶和琥珀酸脱氢酶影响微生物能量代谢,以此达到抗菌目的。除此之外,丁香酚可以与链霉素等10种不同的抗生素进行协同作用^[35],由于丁香酚具有膜破坏性质,1 mmol/L浓度的丁香酚能够破坏近50%的细菌膜,与抗生素联合后的最小抑菌浓度(MIC)比其单个MIC降低5~1 000倍,因此可减少抗生素的使用量,减缓抗生素耐药性的发生^[49]。

2.5 柠檬醛

柠檬醛,化学名为3,7-二甲基-2,6-辛二烯-1-醛,是无色或微黄色液体,呈浓郁柠檬香味。天然柠檬醛是两种单萜类异构体的混合物,普遍存在于柠檬草、马鞭草、山苍子等植物中,具有防腐抗菌、杀虫、消炎、抗癌、抗氧化等生物活性。在食品行业,柠檬醛表现出的明显抗细菌活性以及抗真菌活性^[52]使其备受关注,其抗菌活性及作用机理列于表6。

表6 柠檬醛对不同微生物的抗菌作用及机理

Table 6 Antibacterial effect and mechanism of citral on different microorganisms

序号	微生物	抗菌机理	参考文献
1	耐甲氧西林金黄色葡萄球菌	破坏细胞膜;戊糖磷酸途径及关键酶活性受到抑制,减少了生命活动所需物质与能量生成;以嵌合体的形式与DNA发生反应	[53]
2	大肠杆菌	破坏细胞膜结构	[54]
3	阪崎克罗诺杆菌	降低细胞内ATP浓度,细胞膜超极化	[55]
4	链孢霉	影响细胞完整性,不可逆转地破坏真菌孢子,扰乱氧化应激的平衡,下调真菌毒素生物合成基因	[56]
5	大肠杆菌 O157:H7	与菌体DNA发生嵌入结合作用,破坏DNA结构	[1]
6	黄曲霉	破坏线粒体结构,破坏氧化还原反应系统,琥珀酸脱氢酶(SDH)、苹果酸脱氢酶(MDH)活性不可逆下降,减少能量合成与利用,抑制菌体DNA、RNA、脂类和蛋白质等生物合成,促进细胞死亡	[57]

柠檬醛可通过使细胞膜超极化^[55],破坏细胞膜结构^[54]来影响破坏阪崎克罗诺杆菌、大肠杆菌

等微生物的细胞完整性,使胞内物质大量泄漏,从而影响其正常生理活动,导致细胞破裂死亡。还能

与耐甲氧西林金黄色葡萄球菌、大肠杆菌 O157:H7 等微生物的 DNA 发生反应,影响其复制、转录,抑制微生物的生长繁殖^[1,53]。除此之外,柠檬醛能抑制黄曲霉中 DNA、RNA、脂类和蛋白质等生物合成^[57],也能通过抑制耐甲氧西林金黄色葡萄球菌的戊糖磷酸途径关键酶活性^[53]、黄曲霉的三羧酸循环和电子传递链关键酶(琥珀酸脱氢酶和苹果酸脱氢酶)活性^[57]来抑制 ATP 生成,减少细胞生命活动所需物质与能量产生。Wang 等^[56]研究发现,柠檬醛可通过紊乱基因表达影响细胞完整性,

还能扰乱链孢霉的氧化应激平衡,降低总抗氧化能力,下调真菌毒素生物合成基因(*pksI* 和 *omtI*)。

2.6 柠檬烯

柠檬烯,化学名为 1-甲基-4-异丙基环己烯,属于单环单萜烯,广泛存在于天然植物精油中,具有良好的抗菌、抗氧化、抗肿瘤、消炎等活性,且食用安全性得到国际认同,是有广阔前景的食品抗菌剂、防腐剂,其对部分微生物的抗菌机理见表 7。

表 7 柠檬烯对不同微生物的抗菌作用及机理

Table 7 Antibacterial effect and mechanism of limonene on different microorganisms

序号	微生物	抗菌机理	参考文献
1	单核增生李斯特菌	破坏细胞壁、细胞膜,破坏菌体细胞完整性,影响细胞膜通透性,细胞内生物大分子(核酸和蛋白质)泄漏;抑制呼吸复合物和 ATP 酶活性,阻碍 ATP 合成;抑制呼吸链复合体功能,影响呼吸和能量代谢	[58]
2	荧光假单胞菌	使细胞膜中不饱和脂肪酸(UFAs)含量降低,破坏细胞形态与结构,使细胞出现严重的破裂、塌陷和孔洞,引起菌体胞内蛋白质含量和 ATP 含量降低,膜电位下降,SDH 酶活性下降	[35], [59]
3	大肠杆菌	破坏菌体细胞结构,小分子物质、还原糖和蛋白质等大分子物质泄漏,致使菌体死亡	[12]
4	铜绿假单胞菌	改变细胞膜通透性,降低菌体膜电位,破坏其正常细胞形态结构及完整性,干扰细胞正常代谢活动	[60]

柠檬烯能破坏细胞壁,使单核增生李斯特菌、铜绿假单胞菌、荧光假单胞菌等微生物的细胞形态与结构发生改变^[35,58,60],可以通过降低细胞膜中不饱和脂肪酸(UFAs)含量,使大肠杆菌 O157:H7、鼠伤寒沙门氏菌、金黄色葡萄球菌、荧光假单胞菌等微生物的膜结构发生变化,从而破坏细胞膜^[35],干扰细胞正常代谢活动,影响细胞膜通透性,使细胞内容物(小分子物质、还原糖和蛋白质等)大量泄漏^[12,58],致使菌体死亡。柠檬醛还可以抑制呼吸链复合体功能、ATP 酶活性和 SDH 酶活性,影响单核增生李斯特菌^[58]、荧光假单胞菌^[59]等微生物的呼吸和能量代谢,从而达到抗菌目的。

2.7 其它

石超峰等^[61]试验发现 α -松油醇可明显增强大肠杆菌胞外碱性磷酸酶和 β -半乳糖苷酶活性,增强细胞膜通透性,还能抑制细菌的核酸合成和可溶性蛋白表达以达到抗菌效果。棕榈酸是植物精油中常见的油酸,可以通过抑制微生物(如枯草芽

孢杆菌、金黄色葡萄球菌、大肠杆菌和酿酒酵母等)对营养物质的吸收利用进而抑制其生长繁殖,影响菌体能量代谢,使菌体生长缓慢^[10],还能破坏细胞膜或引起膜结构的变化,抑制生物膜的合成^[62],增加细胞膜的通透性,使细胞内容物外泄,致使菌体死亡^[15]。芳樟醇属于链状萜烯醇类,兼具醇和烯烃类化合物的通性和特征,主要存在于芳樟、白玉兰、伽罗木等植物的挥发油中,具有抗菌活性。据报道,芳樟醇能穿透肠道沙门氏菌细胞膜,增加细胞膜通透性,使胞内重要物质大量渗漏,还能抑制细胞运动,使细菌聚集^[63]以达到抗菌目的。

3 结语

综上所述,国内外对精油抗菌机理的研究主要集中在破坏细胞壁,增加细胞膜渗透性,使细胞内容物渗漏,影响菌体物质能量代谢,抑制菌体对营养物质的吸收利用,抑制 DNA 合成或损害

DNA 和降低细菌毒力等方面。Di 等^[35]研究了百里酚、香芹酚、柠檬烯、丁香酚和肉桂醛等精油中的单体成分对大肠杆菌、荧光假单胞菌、热杀索丝菌、金黄色葡萄球菌、鼠伤寒沙门氏菌等几种条件致病菌细胞膜的影响, 结果发现细胞膜中不饱和脂肪酸(UFAs)含量均出现不同程度降低, 膜结构发生变化, 这几种单体可能是精油抗菌的关键活性成分之一。植物精油的挥发性、小分子、脂溶性等特点, 使精油成分容易通过细胞壁、细胞膜进入到微生物细胞内, 在细胞膜上破坏膜结构, 增加渗透性, 并进一步在细胞体内干扰糖酵解和 TCA 循环等关键代谢及抑制 DNA 合成等发挥抗菌作用。

参 考 文 献

- [1] 戴锦铭. 山苍子精油对大肠杆菌 O157:H7 抗菌机制研究及在果蔬汁中的应用[D]. 镇江: 江苏大学, 2019.
DAI J M. Antibacterial mechanism of *Litsea cubeba* essential oil against *Escherichia coli* O157:H7 and its application in vegetable juice[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2019.
- [2] 顾玉磊. 辣木精油对单核增生李斯特菌的抗菌机制研究及其在奶酪储藏保鲜中的应用[D]. 镇江: 江苏大学, 2019.
GU Y L. The antibacterial mechanism of Moringa Oil against *Listeria monocytogenes* and its application on cheese preservations[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2019.
- [3] 赵呈婷. 刺激响应型丁香精油脂质体对金黄色葡萄球菌的抑制作用及其在豆制品中的应用研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2016.
ZHAO C T. The antibacterial activity of stimuli responsive liposome-encapsulated clove oil against *Staphylococcus aureus* and its application on soy products[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2016.
- [4] 崔海英, 周慧, 宋方平, 等. 丁香精油对单核细胞增生性李斯特菌的抗菌性能及杀菌机制研究[J]. 中国食品添加剂, 2015(12): 65-69.
CUI H Y, ZHOU H, SONG F P, et al. Antibacterial activity and mechanism of clove oil against *Listeria monocytogenes*[J]. China Food Additives, 2015, 2015(12): 65-69.
- [5] RHAYOUR K, BOUCHIKHI T, TANTAOUI -E-LARAKI A, et al. The mechanism of bactericidal action of oregano and clove essential oils and of their phenolic major components on *Escherichia coli* and *Bacillus subtilis*[J]. Journal of Essential Oil Research, 2003, 15(4): 286-292.
- [6] 周慧. 鼠尾草精油纳米脂质体对金黄色葡萄球菌生物膜的控制释放研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2016.
ZHOU H. The specific antibacterial effect of the Salvia oil nanoliposomes against *Staphylococcus aureus* biofilms[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2016.
- [7] CUI H Y, ZHANG X J, ZHOU H, et al. Antimicrobial activity and mechanisms of *Salvia sclarea* essential oil[J]. Botanical Studies, 2015, 56(1): 16-23.
- [8] 郭娜. 草果精油壳聚糖微球的制备、表征及抗菌活性评价[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2017.
GUO N. The preparation, characterization and antibacterial activity evaluation of *Amomum tsaoko* essential oil chitosan microparticles[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2017.
- [9] 李大强. 孜然精油的成分分析、抗菌和抗氧化活性评价[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2012.
LI D Q. Component analysis on essential oil from *Cuminum cyminum* and its antimicrobial and antioxidant activities[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2012.
- [10] 李伟. 肉桂精油/ β -环糊精蛋白脂质体纤维膜的制备及在牛肉保鲜中的应用[D]. 镇江: 江苏大学, 2017.
LI W. The preparation of fibrous membranes containing cinnamon essential oil/ β -cyclodextrin proteoliposomes and its application in beef[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2017.
- [11] 郭崇婷. 黄檗果实精油抑菌活性及机理研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2016.
GUO C T. Research on inhibition action and antibacterial mechanism of phellodendron fruit oils[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2016.
- [12] 李祖光, 许丹倩, 徐振元. 八角茴香挥发性风味成分的研究[J]. 中国调味品, 2003(10): 13-15.
LI Z G, XU D Q, XU Z Y. Study on the aroma compounds released from star anise fruits[J]. China Condiment, 2003, 2003(10): 13-15.
- [13] 张赞彬, 郭媛, 江娟, 等. 八角茴香精油及其主要单体成分抑菌机理的研究[J]. 中国调味品, 2011, 36(2): 28-33.
ZHANG Y B, GUO Y, JIANG J, et al. Research

- on antibacterial mechanism of essential oils and dominant monomer components of star anise[J]. China Condiment, 2011, 36(2): 28-33.
- [14] 崔绮嫦. 芳香食用植物精油抗菌活性及其在中药健康饮品中的应用[D]. 广州: 广东工业大学, 2016.
CUI Q C. Research on antibacterial effect of edible plant essential oils and its application in healthy drink of Chinese herbal medicine [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2016.
- [15] 吴静. 花椒精油的提取工艺、化学成分分析与抗菌活性研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.
WU J. Research on extraction and chemical composition of *Zanthoxylum Bungeanum* essential oil and its antibacterial activity [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2017.
- [16] 王媛媛. 竹叶精油的复配及其抑菌机理研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2016.
WANG Y Y. Antimicrobial mechanism of essential oil from *Phyllostachys pubescens* leaf and its combination [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2016.
- [17] 黄德峰. 5种菊科中草药植物精油的抑菌作用及抗氧化活性研究[D]. 临汾: 山西师范大学, 2015.
HUANG D F. Study on antibacterial activity and antioxidation of five kinds of feverfew essential oil [D]. Linfen: Shanxi Normal University, 2015.
- [18] 吴慧娟, 黄杨名, 陈科廷, 等. 神农香菊全草精油的化学成分及抑菌机理研究[J]. 食品科学, 2012, 33(17): 35-39.
WU H J, HUANG Y M, CHEN K T, et al. Chemical composition and antimicrobial mechanism of essential oil from *Dendranthema indicum* var. *aromaticum* [J]. Food Science, 2012, 33(17): 35-39.
- [19] LI C M, YU J P. Chemical composition, antimicrobial activity and mechanism of action of essential oil from the leaves of *Macleaya cordata* (Willd.) R. Br [J]. Journal of Food Safety, 2015, 35(2): 227-236.
- [20] DIAO W R, ZHANG L L, FENG S S, et al. Chemical composition, antibacterial activity, and mechanism of action of the essential oil from *Amomum kravanh* [J]. Journal of Food Protection, 2014, 77(10): 1740-1746.
- [21] HUANG W, WANG J Q, SONG H Y, et al. Chemical analysis and *in vitro* antimicrobial effects and mechanism of action of *Trachyspermum coticum* essential oil against *Escherichia coli* [J]. Asian Pacific Journal of Tropical Medicine, 2017, 10(7): 663-669.
- [22] DIAO W R, HU Q P, ZHANG H, et al. Chemical composition, antibacterial activity and mechanism of action of essential oil from seeds of fennel (*Foeniculum vulgare* Mill.) [J]. Food Control, 2014, 35(1): 109-116.
- [23] MENG X X, LI D W, ZHOU D, et al. Chemical composition, antibacterial activity and related mechanism of the essential oil from the leaves of *Juniperus rigida* Sieb. et Zucc against *Klebsiella pneumoniae* [J]. Journal of Ethnopharmacology, 2016, 194: 698-705.
- [24] 郝董林. 香附精油的抗氧化、抑菌活性及抑菌机理研究[D]. 临汾: 山西师范大学, 2016.
HAO D L. Antioxidant activity, antibacterial activity and mechanism of action of the essential oil from cyperus [D]. Linfen: Shanxi Normal University, 2016.
- [25] SHARMA A, BAJPAI V K, BAEK K-H. Determination of antibacterial mode of action of *Allium sativum* essential oil against foodborne pathogens using membrane permeability and surface characteristic parameters [J]. Journal of Food Safety, 2013, 33(2): 197-208.
- [26] BAJPAIA V K, SHARMAB A, KIM S H, et al. Chemical composition, antioxidant, lipid peroxidation inhibition and free radical scavenging activities of microwave extracted essential oil from *Allium sativum* [J]. Journal of Essential Oil Bearing Plants, 2015, 18(2): 300-313.
- [27] 丁华, 王建清, 王玉峰, 等. 罗勒精油成分分析及抑菌性研究[J]. 中国调味品, 2017, 42(2): 43-48.
DING H, WANG J Q, WANG Y F, et al. Component analysis and antibacterial activity of basil essential oil [J]. China Condiment, 2017, 42(2): 43-48.
- [28] ULTEE A, KETS E P, SMID E J. Mechanisms of action of carvacrol on the food-borne pathogen *Bacillus cereus* [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1999, 65(10): 4606-4610.
- [29] ULTEE A, KETS E P W, ALBERDA M, et al. Adaptation of the food-borne pathogen *Bacillus cereus* to carvacrol [J]. Archives of Microbiology, 2000, 174(4): 233-238.
- [30] ULTEE A, GORRIS L G, SMID E J. Bactericidal activity of carvacrol towards the food-borne pathogen

- Bacillus cereus*[J]. Journal of Applied Microbiology, 1998, 85(2): 211–218.
- [31] NOWOTARSKA S W, NOWOTARSKI K, GRANT I R, et al. Mechanisms of antimicrobial action of cinnamon and oregano oils, cinnamaldehyde, carvacrol, 2,5 -dihydroxybenzaldehyde, and 2 -hydroxy -5 -methoxybenzaldehyde against *Mycobacterium avium* subsp. *paratuberculosis* (Map)[J]. Foods, 2017, 6(9): 72–87.
- [32] GILL A O, HOLLEY R A. Disruption of *Escherichia coli*, *Listeria monocytogenes* and *Lactobacillus sakei* cellular membranes by plant oil aromatics[J]. International Journal of Food Microbiology, 2006, 108(1): 1–9.
- [33] GILL A O, HOLLEY R A. Mechanisms of bactericidal action of cinnamaldehyde against *Listeria monocytogenes* and of eugenol against *L. monocytogenes* and *Lactobacillus sakei*[J]. Applied & Environmental Microbiology, 2004, 70(10): 5750–5755.
- [34] KHAN I, BAHUGUNA A, KUMAR P, et al. Antimicrobial potential of carvacrol against uropathogenic *Escherichia coli* via membrane disruption, depolarization, and reactive oxygen species generation[J]. Front Microbiol, 2017, 8: 2421–2429.
- [35] DI PASQUA R, BETTS G, HOSKINS N, et al. Membrane toxicity of antimicrobial compounds from essential oils[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2007, 55(12): 4863–4870.
- [36] XU J, ZHOU F, JI B P, et al. The antibacterial mechanism of carvacrol and thymol against *Escherichia coli* [J]. Letters in Applied Microbiology, 2008, 47(3): 174–179.
- [37] STRATAKOS A C, SIMA F, WARD P, et al. The *in vitro* effect of carvacrol, a food additive, on the pathogenicity of O157 and non-O157 Shiga-toxin producing *Escherichia coli*[J]. Food Control, 2018, 84: 290–296.
- [38] BURT S A, VAN DER ZEE R, KOETS A P, et al. Carvacrol induces heat shock protein 60 and inhibits synthesis of flagellin in *Escherichia coli* O157:H7[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2007, 73(14): 4484–4490.
- [39] CHAVAN P S, TUPE S G. Antifungal activity and mechanism of action of carvacrol and thymol against vineyard and wine spoilage yeasts[J]. Food Control, 2014, 46: 115–120.
- [40] ZHOU D D, WANG Z, LI M Y, et al. Carvacrol and eugenol effectively inhibit *Rhizopus stolonifer* and control postharvest soft rot decay in peaches[J]. Journal of Applied Microbiology, 2018, 124(1): 166–178.
- [41] CHAN A C, AGER D, THOMPSON I P. Resolving the mechanism of bacterial inhibition by plant secondary metabolites employing a combination of whole-cell biosensors[J]. Journal of Microbiological Methods, 2013, 93(3): 209–217.
- [42] 戴向荣, 蒋立科, 罗曼. 肉桂醛抑制黄曲霉机理初探[J]. 食品科学, 2008, 29(1): 36–40.
- DAI X R, JIANG L K, LUO M. Preliminary study of cinnamaldehyde inhibition on *Aspergillus flavus* [J]. Food Science, 2008, 29(1): 36–40.
- [43] YOSSA N, PATEL J, MACARISIN D, et al. Antibacterial activity of cinnamaldehyde and sporin against *Escherichia coli* O157:H7 and *Salmonella*[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2012, 38(3): 749–757.
- [44] WANG L H, ZHANG Z H, ZENG X A, et al. Combination of microbiological, spectroscopic and molecular docking techniques to study the antibacterial mechanism of thymol against *Staphylococcus aureus*: Membrane damage and genomic DNA binding [J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2016, 409(6): 1615–1625.
- [45] KACHUR K, SUNTRES Z. The antibacterial properties of phenolic isomers, carvacrol and thymol[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2019, 60: 1–12.
- [46] BANDEIRA J G, SUTILI F J, GRESSLER L T, et al. Antibacterial potential of phytochemicals alone or in combination with antimicrobials against fish pathogenic bacteria[J]. Journal of Applied Microbiology, 2018, 125(3): 655–665.
- [47] MARCHESE A, BARBIERI R, COPPO E, et al. Antibacterial activity of eugenol and essential oils containing eugenol: A mechanistic viewpoint[J]. Critical Reviews in Microbiology, 2017, 43(6): 668–689.
- [48] 马艳玲, 李海贤, 曾荣, 等. 丁香酚对金黄色葡萄球菌抗菌作用的探究[J]. 中国酿造, 2017, 36(8): 130–133.
- MA Y L, LI H X, ZENG R, et al. Investigation of antibacterial effect of eugenol on *Staphylococcus aureus*[J]. China Brewing, 2017, 36(8): 130–133.

- [49] HEMAISWARYA S, DOBLE M. Synergistic interaction of eugenol with antibiotics against Gram negative bacteria[J]. *Phytomedicine International Journal of Phytotherapy and Phytopharmacology*, 2009, 16(11): 997–1005.
- [50] LATIFAH –MUNIRAH B, HIMRATUL –AZNITAW H, MOHD Z N. Eugenol, an essential oil of clove, causes disruption to the cell wall of *Candida albicans* (ATCC 14053)[J]. *Frontiers in Life Science*, 2015, 8(3): 231–240.
- [51] 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.
- [52] ONAWUNMI G O. Evaluation of the antimicrobial activity of citral[J]. *Letters in Applied Microbiology*, 1989, 9(3): 105–108.
- [53] HU W, LI C Z, DAI J M, et al. Antibacterial activity and mechanism of *Litsea cubeba* essential oil against methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* (MRSA)[J]. *Industrial Crops and Products*, 2019, 130: 34–41.
- [54] SOMOLINOS M, GARCIA D, CONDON S, et al. Inactivation of *Escherichia coli* by citral[J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2009, 108(6): 1928–1939.
- [55] SHI C, SONG K K, ZHANG X R, et al. Antimicrobial activity and possible mechanism of action of citral against *Cronobacter sakazakii*[J]. *Plos One*, 2016, 11(7): e0159006–e0159017.
- [56] WANG L Q, JIANG N, WANG D, et al. Effects of essential oil citral on the growth, mycotoxin biosynthesis and transcriptomic profile of *Alternaria alternata*[J]. *Toxins (Basel)*, 2019, 11(10): 553–570.
- [57] 罗曼, 蒋立科. 柠檬醛损伤黄曲霉线粒体生化机理的研究[J]. *微生物学报*, 2002, 42(2): 226–231.
- LUO M, JIANG L K. Study on mitochondrial biochemical mechanism of *Aspergillus flavus* damaged by citral[J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2002, 42(2): 226–231.
- [58] HAN Y J, SUN Z C, CHEN W X. Antimicrobial susceptibility and antibacterial mechanism of limonene against *Listeria monocytogenes*[J]. *Molecules*, 2019, 25(1): 33–47.
- [59] 舒慧珍, 唐志凌, 刘雪, 等. 柠檬烯对荧光假单胞菌抑菌活性及机理研究[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(12): 134–140.
- SHU H Z, TANG Z L, LIU X, et al. Antibacterial activity and mechanism of limonene against *Pseudomonas fluorescens*[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2019, 40(12): 134–140.
- [60] 刘雪, 王静楠, 陈文学, 等. 柠檬烯对铜绿假单胞菌的抑菌活性及其机理[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(7): 1–5.
- LIU X, WANG J N, CHEN W X, et al. Antibacterial activity and mechanism of limonene against *Pseudomonas aeruginosa*[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2018, 39(7): 1–5.
- [61] 石超峰, 殷中琼, 魏琴, 等. α -松油醇对大肠杆菌的抑菌作用及其机理研究[J]. *畜牧兽医学报*, 2013, 44(5): 796–801.
- SHI C F, YIN Z Q, WEI Q, et al. Bacteriostatic action and mechanism of α -terpineol on *Escherichia coli*[J]. *Acta Veterinaria et Zootechnica Sinica*, 2013, 44(5): 796–801.
- [62] LEWIS OSCAR F, NITHYA C, ALHARBI S A, et al. Microfouling inhibition of human nosocomial pathogen *Pseudomonas aeruginosa* using marine cyanobacteria[J]. *Microbial Pathogenesis*, 2018, 114: 107–115.
- [63] KALILY E, HOLLANDER A, KORIN B, et al. Mechanisms of resistance to linalool in *Salmonella* Senftenberg and their role in survival on basil[J]. *Environmental Microbiology*, 2016, 18(11): 3673–3688.

Antimicrobial Mechanism of Plant Essential Oils and Its Active Ingredients

Gao Yongsheng¹, Jin Fei¹, Zhu Liyun^{1,2*}, Zhao Qian¹, Xu Xiaohui¹

(¹College of Life Science, China Jiliang University, Aromatic Engineering Technology Research and Development Center, Hangzhou 310018

²Anhui Hanfang Bionotechnology Co., Ltd., Huaibei 235000, Anhui)

Abstract Aromatic plant essential oils generally have good antibacterial properties and are potential natural antibacterial agents. The article reviews the main chemical components, antibacterial objects and antibacterial mechanism of 24 essential oils including *Litsea cubeba* (Lour.) Pers, *Cinnamomum cassia* Presl, *Syringa* Linn, *Moringa oleifera* Lam, *Thymus mongolicus* Ronn, *Salvia japonica* Thunb, *Cuminum cyminum* L, *Illicium verum*, *Origanum vulgare* L., *Zanthoxylum bungeanum* Maxim, *Allium sativum* L., etc. Detailed analysis of the antibacterial mechanism of 6 essential oil monomer components including carvacrol, cinnamaldehyde, thymol, eugenol, citral, and limonene were carried out against different microorganisms.

Keywords plant essential oils; active components; antimicrobial mechanism