

· 综述 ·

中医“芳香辟秽”理论指导下芳香精油在农业生态种植中的应用潜力[△]

董鲜¹, 李晴晴¹, 霍莹莹¹, 陈传娇¹, 曾子盈^{1,2}, 段素素^{1,2}, 马玉楠¹, 程永现^{1,2*}

1. 云南中医药大学 中药学院, 云南 昆明 650500;

2. 深圳大学 医学部药学院, 广东 深圳 518060

[摘要] 为防治病虫害的高发, 实现农业种植中作物的高产, 大量化学农药的施用已成常规, 由此造成严重的土壤环境污染、农药残留和不可预估的栽培作物品质和商品价值的降低。在人们日益关注食品安全和环境保护的当今时代, 从自然界中寻求具有较强天然抗菌活性、低毒和较低环境不良反应的天然产物对于作物病害管理至关重要。如何高效寻找此类物质, 研究其对病原菌的作用机制, 并将之应用于农业种植领域是研究的重点。芳香药物自古就被认为具有“辟秽”“除恶”作用, 芳香所辟之“秽”是各种无形、有形之秽, 芳香辟秽理论在医学方面针对抗病原微生物实际应用历史悠久。那么, 该理论在农用微生物上是否依然奏效? 挥发油, 又称为芳香精油, 是具有芳香气味的植物次生代谢产物。鉴于挥发油中具有复杂多样的对多种致病菌有抑菌活性的化学物质, 在自然界中能降解成为非毒性物质, 因此对环境保护及农业生态系统可持续发展更为有利, 故提出“芳香辟秽”理论指导下的中医农业发展理念, 并结合前期研究, 对不同来源植物的挥发油及其主要活性成分、作用机制及在农业生态系统中的应用进行总结, 以期使挥发油真正为农业生态种植保驾护航。

[关键词] 芳香辟秽; 挥发油; 天然抗菌活性; 次生代谢产物; 环境友好型杀菌剂; 农业生态种植

[中图分类号] R282; S157.4 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1673-4890(2020)09-1562-14

doi:10.13313/j.issn.1673-4890.20190607003

Application Potential of Aromatic Essential Oil in Agroecological Planting under Guidance of "Filth Avoidance by Aromatic" Theory of Traditional Chinese Medicine

DONG Xian¹, LI Qing-qing¹, HUO Ying-ying¹, CHEN Chuan-jiao¹, ZENG Zi-ying^{1,2},DUAN Su-su^{1,2}, MA Yu-nan¹, CHENG Yong-xian^{1,2*}

1. College of Traditional Chinese Pharmacy, Yunnan University of Chinese Medicine, Kunming 650500, China;

2. School of Pharmaceutical Sciences, Health Science Center, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China

[Abstract] In order to control the high incidence of diseases and insect pests and realize the high yield of crops in agricultural cultivation, the application of a large number of chemical pesticides has become routine, resulting in serious soil environmental pollution, pesticide residues and the reduction of unpredictable cultivated crop quality and commodity value. At a time when people pay more and more attention to food safety and environmental protection, it is of importance for crop disease management to seek natural products with strong natural antibacterial activity, low toxicity and low environmental side effects on nature. How to find these kinds of substance efficiently, study their inhibitory mechanisms to pathogen, and apply it to the field of agricultural planting are the focus of our research. Aromatic drugs have been considered to have the function of 'dispel filth' and 'eliminate evil' since ancient times. 'filth' in 'filth avoidance by aromatic' is a variety of invisible and tangible filth. This theory has a long history of practical application in medicine for anti-medical pathogenic microorganisms. Then, whether the theory is still effective in agricultural microbes? Volatile oil, also known as aromatic essential oil, is a plant secondary metabolite with aromatic smell. In this paper, more than 100 kinds of aromatic essential oils were extracted, and their antifungal activity against important pathogen in *Panax notoginseng* was tested. From the obtained results, the broad-spectrum

[△] **[基金项目]** 国家重点研发计划项目(2017YFD0201402); 国家自然科学基金项目(81660626); 云南省应用基础研究项目[2019FF002(-003), 2017FF116(-014)]; 云南应用基础研究计划项目(2018FB139)

* **[通信作者]** 程永现, 教授, 研究方向: 中药药效物质; E-mail: yxcheng@szu.edu.cn

antifungal activity of volatile oil against agricultural pathogenic pathogen were found. In view of the fact that volatile oil has complex and diverse chemicals with bacteriostatic activity against a variety of pathogen. Also, they can be degraded into non-toxic substances in nature. Therefore, it is more beneficial to environmental protection and the sustainable development of agricultural ecosystems. According to the findings, the author puts forward the concept of agricultural development of traditional Chinese medicine under the guidance of the theory of 'filth avoidance by aromatic'. Based on the authors' previous study, the volatile oil and its main active components from different sources of plants, the mechanism of action and its application in agricultural ecosystem were summarized in order to put the volatile oil into practice for agricultural ecological planting.

[**Keywords**] filth avoidance by aromatic; essential oil; natural antibacterial activity; plant secondary metabolites; environmentally friendly fungicides; agroecological planting

植物与动物不同,动物当面临不利环境时可以直接逃走,也正因此,植物进化出独特的防御策略,以应对不良环境对其造成的威胁。对于植物来说,为了弥补其的不动性,能与生物环境相互作用,形成了不同的防御机制^[1],包括主动和被动防御机制^[2]。植物为保护自己免受食草动物和病原体的侵害,能产生大量的次生化学物质,其中一些化学物质一直被用于病虫害防治^[3]。植物形成的“抗生素”得到最多关注的是植保素^[4]。

植物病害严重威胁着农业的良性发展。在现代农业生产中,为保证栽培作物的产量,大量化学杀菌剂的施用已成一种常规^[5]。虽然短期内能提高经济效益,但由此引发的更为严重的问题不可忽视,如:土壤污染、农药残留、致病菌抗性增强、新的突变菌株产生、有益微生物被毒杀、微生态失衡等。尽管公众普遍关注合成农药对健康和环境的长期影响,但由于天然生物农药生产成本高、开发周期长等瓶颈问题,其尚未在市场上占据较大份额。植物源杀菌剂的毒性和残留量都很低,对环境、动物和人类大多是友好的。植物源农药由植物在胁迫环境中不断进化所产生的化学物质组成,可用于防御病原微生物^[6]。其中,挥发性有机化合物的释放自1980年以来一直受到关注^[7]。植物挥发油是植物次生代谢中有气味、易挥发的产物,广泛应用于传统医药、食品调味保鲜剂、香料工业和农业^[8]。挥发油从天然植物和香料中提取出来,以其良好的抗菌和抗氧化性能而闻名,也因其挥发性而不会产生任何残留效应而引起关注^[9]。本研究就挥发油的植物资源、抗菌活性、活性成分、可能的抗微生物机制及其在农业领域中的应用作一综述。

1 植物资源

大多数挥发油广泛存在于各种芳香植物中。到

目前为止,已经确认了近3000种挥发油,其中300种具有重要商业价值,特别是在制药、农艺、食品、卫生、化妆品和香水行业^[10]。我国约有56科136属300种芳香植物,主要分布于温带至中温带,特别分布于菊科、柳科、乌梅科、唇形科、姜科、樟科、木兰科、马兜铃科、马鞭科、禾本科、缬草科等科中^[11]。挥发油可以由所有植物器官,即芽、花、叶、茎、枝、种子、果实、根、木材或树皮合成,并储存在分泌细胞、表皮细胞或腺毛等植物组织中。挥发油含量在植物中一般小于1%,少数在10%以上。其含量随植物种类、植物器官或生长阶段的不同而变化。由于分析方法和设备的限制,多数研究对植物挥发油的化学成分只进行了鉴定。随着毛细管气相色谱的应用和完善,可以识别出数十种甚至数百种化学物质,这将有利于香料资源的深入开发和寻找,也有利于优良芳香植物品种的选育。从植物中提取挥发油的方法有多种,目前主要采用沸水或水蒸汽蒸馏法、冷压萃取法、液体二氧化碳法或微波法^[10]。采用水蒸气蒸馏法和超临界流体萃取法,挥发油的提取率和纯度均高于其他方法。

2 挥发油抗菌活性及其主要活性成分

挥发油的抗菌价值在于其所具有的生物活性成分及其对病原菌的特殊作用机制。对各种挥发油的化学成分初步定性研究表明,其存在醇、醛、酮和酚类等化合物^[11],含量可能因季节或存在部位而异^[12]。这些挥发性化合物被认为是“绿色农药”概念的一部分,是有利于环境保护的天然抗菌物质^[13]。据报道,挥发油的抑菌活性成分一般由1,8-桉叶酚、香茅醛、香茅醇、乙酸香茅酯、柠檬烯、芳樟醇、 β -蒎烯、 γ -松油烯、 α -松油醇和芳香烃等组分组成。芳香植物中的主要生物活性成分被认为是次生代谢物的组合^[14]。多种挥发油都具有抗氧化、

抗真菌、抗毒素等活性,可用于抑制农产品变质所涉及的病原菌,并可作为合成化学品的生态替代物,用于治疗多种细菌和真菌病害。此外,挥发油也被认为是一种有效的消除玉米烯酮(1种镰刀菌毒素)污染和/或解毒的手段^[13]。

笔者就具有农用抑菌活性的挥发油且研究较为集中的8个科(姜科、樟科、伞形科、菊科、唇形科、芸香科、禾本科和马鞭草科)以及对病原菌有较强抑菌活性的主要活性成分进行分类总结。

萜烯类是精油的主要成分。萜烯类化合物来源于许多异戊二烯单元(C_5H_8),其连接在一个链中,该链可能是环状的,也可能不是环状的^[15]。根据分子中异戊二烯基的数量,萜烯可分为单萜烯类、倍半萜烯或二萜衍生物。单萜烯类由2个异戊二烯单元组成,如柠檬烯、没药烯、 α -蒎烯和 β -蒎烯,它们主要存在于柑橘、姜花、锡兰肉桂、香樟、月桂、芫荽中(见表1)。倍半萜烯由3个异戊二烯单元组成。 β -石竹烯是1种天然的双环倍半萜,是许多精油的主要成分,特别是在丁香、肉桂、黄花蒿、胜红蓟、百里香的精油中(见表1)。本团队前期研究以及已发表文献表明,佛手挥发油、*D*-柠檬烯和 γ -松油烯对三七的3种病原菌(尖孢镰刀菌、腐皮镰刀菌和毁灭柱孢霉)均有效,最低抑菌浓度(MIC)为 $0.12 \sim 12.05 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ ^[16]。其中,*D*-柠檬烯和 γ -松油烯抗菌活性均强于完整精油。黄花蒿挥发油的主要成分 β -石竹烯,烯对尖孢镰刀菌和腐皮镰刀菌抗菌活性强于完整精油^[17]。

萜类化合物是一大类天然存在的化合物,在精油中是从异戊二烯单位衍生出来的。但与萜烯不同,萜类化合物中的异戊二烯单元是以许多方式组装和修饰的,例如添加或除去甲基或在异戊二烯单元中加入氧原子^[18]。类似地,萜类化合物可以根据异戊二烯单位的数量分为单萜类、倍半萜类或二萜类,也可以根据其所包含的循环结构的数量进行分类。萜类化合物是一大类抗菌成分,对微生物具有广谱活性。常见的抗菌萜类化合物有1,8-丁烯醚、芳樟醇、樟脑、乙酸香叶酯、香叶醇、神经醇、萜烯-4-醇和肉桂醛(见表1)。萜类化合物比萜烯类化合物具有更高的抗菌活性,如黄花蒿精油及其萜类成分对尖孢镰刀菌、腐皮镰刀菌抑菌活性均高于佛手挥发油中的萜烯类化合物^[16-17]。大多数萜类化合物的抗菌活性与其官能团有关^[19]。

酚类化合物是指一类由羟基直接与芳香环结合而成的化合物。酚类包括百里香酚、丁香酚和香芹酚,可在百里香、丁香、肉桂和牛至油中找到(见表1)。许多研究报道,含有高含量酚类物质的精油具有广泛的抗菌功效^[20],如丁香酚对25种不同细菌的抗菌活性结果表明,只有1株细菌活性未被抑制^[19]。本团队研究表明,丁香挥发油主成分丁香酚对导致三七根腐病的5种病原真菌(尖孢镰刀菌、腐皮镰刀菌、毁灭柱孢霉、腐霉病菌、立枯丝核菌)和2种导致地上部病害的病原真菌(炭疽病菌、灰霉病菌)具有广谱抑菌活性^[21]。其他研究表明,沙丁氏百里香精油的抗菌性能主要与其高含量的香芹酚和百里香酚有关^[22]。同样,2种化学型冬凌草精油对6株革兰氏阴性菌和3种革兰氏阳性菌生长的抑菌活性的研究表明,以香芹酚为主的挥发油(75%)的抗菌活性最高,而另一种主要成分为4-萜烯醇(25%)的化学型活性较弱^[23]。苯酚的抗菌活性与其羟基有关,苯环的存在增强了酚类化合物的抗菌活性。例如,对伞花烃(*p*-cymene)有1个不具有羟基的苯环,单独使用并不是一种有效的抗菌成分^[24-25],抑菌活性差异可能是由于缺乏1个自由的羟基来交换质子,从而抑制了其改变细菌细胞膜完整性的能力。此外,羟基在酚醛环上的相对位置也会影响抗菌效果。如香芹酚比百里香酚和丁香酚对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌和蜡状芽孢杆菌具有更强的抑菌作用^[26]。

不同精油的组合或精油的化学成分组合可以产生4种可能的抗菌效果:协同作用、加和作用、无关作用或拮抗作用^[27]。因此,有研究对精油组合的有效性进行评估,以提高其抗菌效果,降低农业中农药的使用水平。混合精油的协同或拮抗作用取决于所测试的精油类型和微生物菌株。笔者前期研究表明,将佛手挥发油与化学农药恶霉灵进行复配,发现恶霉灵与佛手挥发油具有较高的协同效应,分级抑菌浓度指数(FICI)较低($FICI = 0.31 \sim 2.00$)^[16]。当公丁香挥发油与恶霉灵联合使用时,对腐霉、灰霉病菌和炭疽菌有协同作用。母丁香挥发油与恶霉灵的组合对镰刀菌、腐霉菌和灰霉病菌均表现出加和效应^[21]。因此,目前很难预测精油混合物的抗菌效果。精油是由多种化合物组成的复杂混合物,各成分之间的相互作用可能会产生协同或拮抗的抗菌作用。总的来说,多项研究得出的结论是,将精油主成分按比例混合时,精油的抗菌活

性大于所使用主要成分^[28-29]，这表明精油中的次要成分由于具有协同作用，可能对抗菌活性至关重要。

表 1 中列出了常用的具有抗菌性能的精油的主

要成分，大多数具有高抗菌效果的成分是酚类，其次是含氧萜类化合物。精油中的萜烯和其他成分，包括酮和酯类，如香叶烯醋酸牻牛儿酯显示出较酚类和萜类化合物偏弱的抗菌活性。

表 1 不同科属来源代表性植物抑菌活性

科属	代表性植物	主/活性成分	测试微生物和抗菌活性	参考文献
姜科姜属	生姜 <i>Zingiber officinale</i>	桉油精 eucalyptol (35.33%) ; α -松油醇 α -terpineol (11.02%) ; 蒾烯 camphene (4.11%) ; α -法尼烯 α -farnesene (3.47%)	半数抑制浓度 (IC ₅₀) : 尖孢镰刀菌 <i>Fusarium oxysporum</i> (79.04 mg·mL ⁻¹) ; 腐皮镰刀菌 <i>F. solani</i> (69.28 mg·mL ⁻¹) ; 毁灭柱孢霉 <i>Cylindrocarpon destrutans</i> (94.34 mg·mL ⁻¹)	[30]
姜科姜黄属	姜黄 <i>Curcuma longa</i>	α -姜黄酮 α -turmerone (42.6%) ; β -姜黄酮 β -turmerone (16.0%) ; 芳姜黄酮 ar-turmerone (12.9%) ; α -水芹烯 α -phellandrene (6.5%) ; 1,8-桉叶素 1,8-cineole (3.2%)	MIC 和最低杀菌浓度 (MFC) : 串珠镰刀菌 <i>F. verticillioides</i> (73.7 μ g·mL ⁻¹)	[31]
姜科姜花属	姜花 <i>Hedychium coronarium</i>	β -蒎烯 β -pinene (11.07% ~ 42.74%) ; 桉油精 eucalyptol (11.48% ~ 40.59%) ; 芳樟醇 linalool (1.56% ~ 45.11%) ; coronarin-E (1.01% ~ 39.57%) ; α -蒎烯 α -pinene (3.80% ~ 16.60%)	MIC : 尖孢镰刀菌 <i>F. oxysporum</i> (6.25 ~ 100 μ g·mL ⁻¹)	[32]
姜科豆蔻属	草果 <i>Amomum tsaoko</i>	蒾烯 camphene (13.80%) ; 姜烯 zingerene (13.18%) ; 香叶醛 geranial (11.05%) ; 桉油精 eucalyptol (9.37%) ; 柠檬醛 cis-citral (8.60%)	IC ₅₀ : 尖孢镰刀菌 <i>F. oxysporum</i> (5.37 mg·mL ⁻¹) ; 腐皮镰刀菌 <i>F. solani</i> (55.42 mg·mL ⁻¹) ; 毁灭柱孢霉 <i>C. destrutans</i> (109.27 mg·mL ⁻¹)	[33]
姜科山姜属	高良姜 <i>Alpinia officinarum</i>	芳樟醇 linalool (20.25%) ; 石竹烯 caryophyllene (12.80%) ; 癸酸酯 decyl ester (7.03%) ; 正癸醇 1-decanol (5.02%)	IC ₅₀ : 尖孢镰刀菌 <i>F. oxysporum</i> (33.16 mg·mL ⁻¹) ; 腐皮镰刀菌 <i>F. solani</i> (54.78 mg·mL ⁻¹) ; 毁灭柱孢霉 <i>C. destrutans</i> (64.13 mg·mL ⁻¹)	[33]
姜科山姜属	草豆蔻 <i>Alpinia katsumadai</i>	桉油精 eucalyptol (30.03%) ; 醋酸牻牛儿酯 geranyl acetate (13.56%) ; 香叶醇 geraniol (6.67%) ; (<i>E</i>)-2-decenylacetate (6.42%) , α -phellandrene (4.84%)	IC ₅₀ : 尖孢镰刀菌 <i>F. oxysporum</i> (21.86 mg·mL ⁻¹) ; 腐皮镰刀菌 <i>F. solani</i> (109.96 mg·mL ⁻¹) ; 毁灭柱孢霉 <i>C. destrutans</i> (84.82 mg·mL ⁻¹)	[30]
禾本科香茅属	香茅草 <i>Cymbopogon citratus</i>	香叶醛 geranial (41.42%) ; 芳樟醇 linalool (29.96%) ; β -蒎烯 (6.11%) ; 柠檬醛 neral (2.87%) ; 2-十一烷酮 2-undecanone (1.01%)	褐斑病菌 <i>Pseudocercospora viti</i> ; 霜霉病菌 <i>Plasmopara viticola</i>	[34]
马鞭草科过江藤属	墨西哥牛至 <i>Lippia graveolens</i>	香芹酚 carvacrol (37.84%) ; 乙酸松油酯 α -terpinyl acetate (22.35%) ; 异丙基甲苯 <i>m</i> -cymene (20.42%) ; 百里香酚 thymol (6.72%) ; β -蒎烯 β -pinene (2.54%)	IC ₅₀ : 孢子丝镰刀菌 <i>F. sporotrichum</i> (90 μ g·mL ⁻¹) ; 串珠镰刀菌 <i>F. moniliforme</i> (50 μ g·mL ⁻¹)	[35]
马鞭草科马缨丹属	马缨丹 <i>Lantana achyranthifolia</i>	香芹酚 carvacrol (30.64%) ; 没药醇 α -bisabolol (11.23%) ; 异石竹烯 isocaryophyllene (10.73%) ; 甜没药烯 β -bisabolene (5.68%) ; 桉树脑 1,8-cineole (5.03%)	IC ₅₀ : 孢子丝镰刀菌 <i>F. sporotrichum</i> (130 μ g·mL ⁻¹) ; 串珠镰刀菌 <i>F. moniliforme</i> (100 μ g·mL ⁻¹)	
樟科樟属	香樟 <i>Cinnamomum camphora</i>	(1 <i>R</i>)-(+)樟脑 (1 <i>R</i>)-(+)camphor ; (1 <i>S</i>)-(-)樟脑 (1 <i>S</i>)-(-)camphor ; (<i>R</i>)-(+)柠檬烯 (<i>R</i>)-(+)limonene ; (<i>S</i>)-(-)柠檬烯 (<i>S</i>)-(-)limonene ; (-)- α -蒎烯 (-)- α -pinene ; (1 <i>R</i>)-(+) - α -蒎烯 (1 <i>R</i>)-(+) - α -pinene	褐腐病菌 <i>Choanephora cucurbitarum</i>	[36]

续表 1

科属	代表性植物	主/活性成分	测试微生物和抗菌活性	参考文献
	锡兰肉桂 <i>C. zeylanicum</i>	肉桂醛 cinnamaldehyde	链格孢菌 <i>Alternaria alternata</i> ; 串珠镰刀菌 <i>F. moniliforme</i> ; 尖孢镰刀菌 <i>F. oxysporum</i> ; 粉白镰刀霉 <i>F. pallidoroseum</i> ; 潮湿镰孢菌 <i>F. udum</i> ; 高粱茎点霉 <i>Phoma sorghina</i> ; 立枯丝核菌 <i>Rhizoctonia bataticola</i>	[37]
		肉桂醛 cinnamaldehyde (68.95%); 苯甲醛 benzaldehyde (9.94%); (<i>E</i>)-乙酸肉桂酯(<i>E</i>)-cinnamyl acetate (7.44%); 柠檬烯 limonene (4.42%); 丁子香酚 eugenol (2.77%)	IC ₅₀ : 灰霉菌 <i>Botrytis cinerea</i> (0.087%)	[38]
樟科月桂属	月桂 <i>Laurus nobilis</i>	1, 8-桉叶素 1, 8-cineole (49.6%); 香桉烯 sabinene (7.8%); α -蒎烯 α -pinene (6.0%); 丁子香酚 eugenole (5.6%); α -乙酸松油酯 α -terpinyl acetate (5.2%); β -蒎烯 β -pinene (5.1%)	沙漠球囊霉 <i>Glomus deserticola</i> ; AM 真菌 <i>G. intraradices</i>	[39]
樟科木姜子属	木姜子 <i>Litsea cubeba</i>	β -紫罗兰酮 β -ionone; 柠檬烯 lemonile; 鸢尾酮 irone	半数有效量 (ED ₅₀): 胶孢炭疽菌 <i>Colletotrichum gloeosporioides</i> (β -紫罗兰酮 β -ionone 31.53 mg · L ⁻¹); 稻瘟菌 <i>C. gloeosporioides</i> (柠檬烯 lemonile 37.63 mg · L ⁻¹); 尖孢镰刀菌 <i>F. oxysporum</i> ; <i>Pyricularia grisea</i> (鸢尾酮 irone 133.60 mg · L ⁻¹)	[40]
伞形科茴香属	小茴香 <i>Foeniculum vulgare</i>	茴香脑 anethole (82.09%); 柠檬烯 limonene (8.60%)	ED ₅₀ : 蜡蚧轮枝菌 <i>Lecanicillium fungicola</i> var. <i>fungicola</i> (933.28 μ L · L ⁻¹); 双孢蘑菇病毒 <i>Agaricus bisporus</i> (436.07 μ L · L ⁻¹); MIC: 蜡蚧轮枝菌 <i>L. fungicola</i> var. <i>fungicola</i> (2000 ~ 2500 μ L · L ⁻¹); 双孢蘑菇病毒 <i>A. bisporus</i> (1500 ~ 2000 μ L · L ⁻¹)	[41]
伞形科独活属	仙鹤草 <i>Heracleum persicum</i>	己基酯 hexyl ester (32.32%); 辛酯 octyl ester (10%); 长叶薄荷酮 pulegone (9.53%); 乙酸辛酯 <i>n</i> -octyl acetate (9.16%)	禾谷镰刀菌 <i>F. graminearum</i> ; 亚洲镰刀菌 <i>F. asiaticum</i> ; 石竹镰刀菌 <i>F. redolens</i> f. sp. <i>Dianthus</i> ; 串珠镰刀菌 <i>F. verticillioides</i> ; 扁豆尖孢镰刀菌 <i>F. oxysporum</i> f. sp. <i>Lentis</i> ; 菌核菌 <i>Sclerotinia sclerotiorum</i> ; 黄曲霉 <i>Aspergillus flavus</i> ; 塔宾曲霉 <i>A. tubingensis</i> ; 灰霉病菌 <i>B. cinerea</i> ; 枝孢霉菌 <i>Cladosporium cladosporioides</i>	[42]
伞形科孜然属	孜然芹 <i>Cuminum cyminum</i>	β -蒎烯 β -pinene (23%); γ -松油烯 γ -terpinene (19%); 枯茗醛 cuminaldehyde (18%)	灰霉菌 <i>B. cinerea</i> ; 尖孢镰刀菌 <i>F. oxysporum</i> ; 腐霉菌 <i>Pythium ultimum</i> ; 立枯丝核菌 <i>Rhizoctonia solani</i>	[43]
菊科菊属	野菊花 <i>Chrysanthemum indicum</i>	桉油精 eucalyptol (5.64%); 樟脑 camphor (11.40%); 冰片 camphanol (3.87%); 7, 11-dimethyl-3-methylene-16, 10-dodecatriene (9.44%); 2-(hexa-2, 4-dien-1-ylidene)-1, 6-dioxaspiro [4, 4] non-3-ene (17.93%)	菌核菌 <i>S. sclerotiorum</i> ; 烟草赤星病菌 <i>A. longipes</i> ; 胶孢炭疽菌 <i>C. gloeosporioides</i> ; 灰霉菌 <i>B. cinerea</i>	[44]
菊科蒿属	青蒿 <i>Artemisia caruifolia</i>	carbenene; cycloheptadiene; 苯吡喃 benzopyran; 二十八烷 octacosane; 4-amino-anisole	MIC: 黑曲霉 <i>A. niger</i> (1.25%); 菌刺孢属 <i>Mycocentrospora</i> sp. (1.25%); 青霉属 <i>Penicillium</i> sp. (5%)	[40]
菊科蒿属	黄花蒿 <i>Artemisia annua</i>	樟脑 camphor (23.48%); 大根香叶烯 germacrene D (9.06%); 石竹烯 β -caryophyllene (5.39%); 坎烯 camphene (4.42%)	挥发油 MIC: 尖孢镰刀菌 <i>F. oxysporum</i> (0.22 mg · mL ⁻¹); 腐皮镰刀菌 <i>F. solani</i> (0.37 mg · mL ⁻¹); <i>L</i> -Camphor 的 MIC: 尖孢镰刀菌 <i>F. oxysporum</i> (0.11 mg · mL ⁻¹); 腐皮镰刀菌 <i>F. solani</i> (0.31 mg · mL ⁻¹); <i>DL</i> -camphor 的 MIC: 尖孢镰刀菌 <i>F. oxysporum</i> (0.14 mg · mL ⁻¹); 腐皮镰刀菌 <i>F. solani</i> (0.16 mg · mL ⁻¹); caryophyllene 的 MIC: 尖孢镰刀菌 <i>F. oxysporum</i> (0.13 mg · mL ⁻¹); 腐皮镰刀菌 <i>F. solani</i> (0.23 mg · mL ⁻¹)	[17]

续表 1

科属	代表性植物	主/活性成分	测试微生物和抗菌活性	参考文献
菊科蒿属	艾 <i>Artemisia argyi</i>	桉油精 eucalyptol (22.71%); 石竹烯 caryophyllene (13.2%); β -檀香醇 β -santalwood alcohol (7.49%); 4-萜烯醇 terpinen-4-ol (7.34%); 冰片 borneol (5.82%)	MIC: 疫霉菌 <i>P. capsici</i> ($50 \mu\text{L} \cdot \text{mL}^{-1}$); 黑曲霉 <i>A. niger</i> ($50 \mu\text{L} \cdot \text{mL}^{-1}$); 粉红单端孢 <i>Trichothecium roseum</i> ($50 \mu\text{L} \cdot \text{mL}^{-1}$); 青霉 <i>Bgbfngnb. nhg</i> ($50 \mu\text{L} \cdot \text{mL}^{-1}$); 链格孢属 <i>Alternaria</i> ($100 \mu\text{L} \cdot \text{mL}^{-1}$)	[45]
菊科菊属	胜红蓟 <i>Ageratum conyzoides</i>	β -石竹烯 β -caryophyllene (25.51%); (<i>E</i>)- β -法尼烯 (<i>E</i>)- β -farnesene (5.42%); 早熟素 I precocene I (16.45%); α -红没药烯 α -bisabolene (6.12%); 早熟素 II precocene II (29.67%)	立枯丝核菌 <i>R. solani</i> ; 灰葡萄孢菌 <i>B. cinerea</i> Pers.; 菌核病菌 <i>S. sclerotiorum</i>	[46]
菊科泽兰属	飞机草 <i>Chromolaena odorata</i>	反式-石竹烯 <i>trans</i> -caryophyllene (16.58%); δ -杜松烯 δ -cadinene (15.85%); α -可巴烯 α -copaene (11.58%); 氧化石竹烯 caryophyllene oxide (9.42%); 大根香叶烯 germacrene-D (4.86%); α -律草烯 α -humulene (4.23%)	水稻稻瘟病菌 <i>P. grisea</i> ; 长春花疫病菌 <i>P. nicotianae</i> ; 香蕉枯萎病菌 <i>F. oxysporum</i>	[47]
菊科蟛蜞菊属	三裂叶蟛蜞菊 <i>Wedelia trilobata</i>	2, 6, 6-三甲基-二环 [3.1.1] -2-庚烯 2, 6, 6-trimethyl-bicyclo [3, 1, 1] -2-heptene (25.16%); 2, 7, 7-三甲基-二环 [2.2.1] -2-庚烯 2, 7, 7-trimethyl-bicyclo [2, 2, 1] -2-heptene (22.90%); γ -松油烯 γ -terpinene (8.98%)	水稻稻瘟病菌 <i>Magnaporthe grisea</i> ; 水稻纹枯病菌 <i>R. solani</i> (<i>Oryza sativa</i> L.); 玉米纹枯病菌 <i>R. solani</i> (<i>Zea mays</i>)	[48]
唇形科牛至属	牛至 <i>Origanum vulgare</i>	α -异松油烯 α -terpinolene (1.08%); 对伞花烃 <i>p</i> -cymene (7.38%); γ -松油烯 γ -terpinene (5.31%); 香芹酚 carvacrol (84.54%)	马铃薯炭疽病菌 <i>C. coccodes</i>	[49]
唇形科薄荷属	马齿苋 <i>Satureja hortensis</i>	香芹酚 carvacrol (38%)	ED ₅₀ : 蜡蚧轮枝菌 <i>L. fungicola</i> var. <i>fungicola</i> ($181.1 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$) 双孢蘑菇病毒 <i>A. bisporus</i> ($242.73 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$) MIC: 蜡蚧轮枝菌 <i>L. fungicola</i> var. <i>fungicola</i> ($200 \sim 250 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$); 双孢蘑菇病毒 <i>A. bisporus</i> ($<400 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$)	[41]
		香芹酚 carvacrol (48%); 对伞花烃 <i>p</i> -cymene (11.7%); γ -松油烯 γ -terpinene (24.2%)	MIC: 黑曲霉 <i>A. niger</i> ($600 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$); 指状青霉 <i>P. digitatum</i> ($600 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$); 灰霉 <i>B. cinerea</i> ($300 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$); 匍枝根霉 <i>Rhizopus stolonifer</i> ($300 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$); MFC: 黑曲霉 <i>A. niger</i> ($>1200 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$); 指状青霉 <i>P. digitatum</i> ($1200 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$); 灰霉菌 <i>B. cinerea</i> ($600 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$); 匍枝根霉 <i>R. stolonifer</i> ($300 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$)	
	天南星 <i>S. spicigera</i>	香芹酚 carvacrol (48%); 对伞花烃 <i>p</i> -cymene (18.5%); γ -松油烯 γ -terpinene (11%)	MIC: 黑曲霉 <i>A. niger</i> ($300 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$); 指状青霉 <i>P. digitatum</i> ($600 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$); 灰霉菌 <i>B. cinerea</i> ($300 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$); 匍枝根霉 <i>R. stolonifer</i> ($300 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$); MFC: 黑曲霉 <i>A. niger</i> ($>1200 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$); 指状青霉 <i>P. digitatum</i> ($1200 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$); 灰霉菌 <i>B. cinerea</i> ($1200 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$); 匍枝根霉 <i>R. stolonifer</i> ($1200 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$)	[50]
	小叶紫苏 <i>S. khuzistanica</i>	百里酚 thymol (29.5%); 对伞花烃 <i>p</i> -cymene (23.4%); γ -松油烯 γ -terpinene (15.2%); 香芹酚 carvacrol (9.6%); 香芹酚甲醚 carvacrol methylether (8.5%)	MIC: 黑曲霉 <i>A. niger</i> ($300 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$); 指状青霉 <i>P. digitatum</i> ($600 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$); 灰霉菌 <i>B. cinerea</i> ($300 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$); 匍枝根霉 <i>R. stolonifer</i> ($300 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$); MFC: 黑曲霉 <i>A. niger</i> ($>1200 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$); 指状青霉 <i>P. digitatum</i> ($>1200 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$); 灰霉菌 <i>B. cinerea</i> ($1200 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$); 匍枝根霉 <i>R. stolonifer</i> ($300 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$)	

续表 1

科属	代表性植物	主/活性成分	测试微生物和抗菌活性	参考文献
	香草 <i>S. khuzistanica</i>	香芹酚 carvacrol (71.2%) ; γ -松油烯 γ -terpinene (8.1%) ; 对伞花烃 <i>p</i> -cymene (7.6%)	枸杞炭疽病 <i>C. gloeosporioides</i>	[51]
唇形科薰 衣草属	狭叶薰衣草 <i>Lavandula angustifolia</i>	乙酸芳樟酯 linalyl acetate (43.1%) ; 芳樟醇 linalool (26.3%) ; 乙酸薰衣草酯 lavandulyl acetate (5.7%) ; 1,8-桉叶素 1,8-cineole (4.3%)	枸杞炭疽病 <i>C. gloeosporioides</i>	[51]
唇形科蜜 蜂花属	柠檬香蜂草 <i>Melissa officinalis</i>	<i>p</i> -mentha-1, 2, 3-triol (13.1%) ; <i>p</i> -menth-3-en-8-ol (8.8%) ; 长叶薄荷酮 pulegone (8.8%) ; 哌啶酮氧化物 piperitnone oxide (8.4%) ; 2-哌啶酮氧化物 2-piperitone oxide (7.3%)	灰葡萄孢菌 <i>B. cinerea</i> ; 扩展青霉 <i>P. expansum</i> ; 匍枝根霉 <i>R. stolonifer</i>	[52]
唇形科百 里香属	百里香 <i>Thymus capitatus</i>	香芹酚 carvacrol (81.52%) ; 对伞花烃 <i>p</i> -cymene (4.98%) ; γ -松油烯 γ -terpinene (3.13%) ; β -石竹烯 β -caryophyllene	白腐小核菌 <i>S. cepivorum</i>	[53]
	<i>T. daenensis</i>	百里酚 thymol (73.3%) ; 对伞花烃 <i>p</i> -cymene (5.8%) ; γ -松油烯 γ -terpinene (4.6%)	胶孢炭疽菌 <i>C. gloeosporioides</i>	[51]
	法国百里香 <i>T. vulgaris</i>	百里酚 thymol (40.29%) ; 香芹酚 carvacrol (14.33%) ; 对伞花烃 <i>p</i> -cymene (16.64%) ; 芳樟醇 linalool (4.94%) ; 龙脑 borneol (2.71%)	柑桔链格孢 <i>A. citri</i>	[54]
		百里酚 thymol (38%) ; γ -松油烯 γ -terpinene (6.7%) ; 对伞花烃 <i>p</i> -cymene (30%)	尖孢镰刀菌 <i>F. oxysporum</i> ; 立枯丝核菌 <i>R. solani</i> ; 胶孢炭疽菌 <i>C. gloeosporioides</i>	[55]
唇形科 薄荷属	胡椒薄荷 <i>Mentha piperita</i>	薄荷酮 menthone (33.8%) ; 薄荷醇 menthol (36.1%) ; 1, 8-桉叶素 1,8-cineole (11.4%)	胶孢炭疽菌 <i>C. gloeosporioides</i>	[51]
	唇萼薄荷 <i>Mentha pulegium</i>	长叶薄荷酮 pulegone (68.59%) ; 反式薄荷酮 <i>cis</i> -menthone (7.87%)	ED ₅₀ : 蜡蚧轮枝菌 <i>L. fungicola</i> var. <i>fungicola</i> (407.98 $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$) ; 双孢蘑菇病毒 <i>A. bisporus</i> (334.59 $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$) MIC: 蜡蚧轮枝菌 <i>L. fungicola</i> var. <i>fungicola</i> (1250 ~ 1500 $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$) ; 双孢蘑菇病毒 <i>A. bisporus</i> (500 ~ 750 $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$)	[41]
	辣薄荷 <i>Mentha piperita</i>	薄荷酮 menthone (15.29%) ; 薄荷醇 menthol (39.17%) ; 乙酸薄荷酯 menthyl acetate (20.42%)	EC ₅₀ : 蜡蚧轮枝菌 <i>L. fungicola</i> var. <i>fungicola</i> (402.23 $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$) ; 双孢蘑菇病毒 <i>A. bisporus</i> (155.06 $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$) ; MIC: 蜡蚧轮枝菌 <i>L. fungicola</i> var. <i>fungicola</i> (750 ~ 1000 $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$) ; 双孢蘑菇病毒 <i>A. bisporus</i> (750 ~ 1000 $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$)	[41]
唇形科延 命草属	<i>Plectranthus caninus</i>	樟脑 camphor (22.36%) ; α -侧柏烯 α -thujene (14.48%)	MIC: 黑曲霉 <i>A. niger</i> (1000 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$) ; 青霉 <i>P. notatum</i> (1000 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$) ; 绳状青霉 <i>P. funiculosus</i> (1000 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)	[56]
唇形科 <i>Zhumeria</i>	<i>Zhumeria majdae</i>	芳樟醇 linalool (41.51%) ; 樟脑 camphor (39.09%)	禾谷镰刀菌 <i>F. graminearum</i> ; 亚洲镰刀菌 <i>F. asiaticum</i> ; 芳香镰 孢菌 <i>F. redolens</i> f. sp. <i>dianthus</i> ; 轮枝镰刀菌 <i>F. verticillioides</i> ; 扁 豆尖孢镰刀菌 <i>F. oxysporum</i> f. sp. <i>lentis</i> ; 核盘菌 <i>S. sclerotiorum</i> ; 黄曲霉 <i>A. flavus</i> ; 塔宾曲霉 <i>A. tubingensis</i> ; 灰葡萄孢菌 <i>B. cinerea</i> ; 枝状枝孢菌 <i>C. cladosporioides</i>	[42]

续表 1

科属	代表性植物	主/活性成分	测试微生物和抗菌活性	参考文献
唇形科波斯苏属	<i>Zataria multiflora</i>	百里酚 thymol (42.46%); 香芹酚 carvacrol (16.85%); 对伞花烃 <i>p</i> -cymene (10.62%); γ -松油烯 γ -terpinene (7.26%); α -蒎烯 α -pinene (3.00%)	MIC: 指状青霉菌 <i>P. digitatum</i> (200 $\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$); 黑曲霉 <i>A. niger</i> (200 $\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$); MFC: 指状青霉菌 <i>P. digitatum</i> (6400 $\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$); 黑曲霉 <i>A. niger</i> (6400 $\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$)	[57]
		百里酚 thymol (50.64%); 香芹酚 carvacrol (18.16%); 对伞花烃 <i>p</i> -cymene (10.59%); γ -松油烯 γ -terpinene (6.82%); α -蒎烯 α -pinene (2.93%)	柑桔链格孢 <i>A. citri</i>	[54]
		百里酚 thymol (30.41%); 香芹酚 carvacrol (46.15%)	ED ₅₀ : 蜡蚧轮枝菌 <i>L. fungicola</i> var. <i>fungicola</i> (85.61 $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$); 双孢蘑菇病毒 <i>A. bisporus</i> (148.65 $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$) MIC: 蜡蚧轮枝菌 <i>L. fungicola</i> var. <i>fungicola</i> (100 ~ 125 $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$); 双孢蘑菇病毒 <i>A. bisporus</i> (125 ~ 250 $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$)	[41]
		百秋李醇 patchouli alcohol (27.28%); 广藿香酮 pogostone (21.07%); δ -愈创木烯 α -bulnesene (9.91%); 长叶烯 longifolene (6.94%); 西车烯 seychellene (6.04%)	EC ₅₀ : 橡胶棒孢霉落叶病菌 <i>Corynespora cassicola</i> (0.517 $\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$); 香蕉炭疽病菌 <i>C. musae</i> (0.904 $\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$); 西瓜尖孢镰刀菌 <i>F. oxysporium</i> (1.196 $\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$); 芒果炭疽病菌 <i>C. gloeosporioides</i> (1.225 $\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$)	[58]
唇形科连钱草属	连钱草 <i>Glechoma longituba</i>	β -油烯醇 β -spatulanol (12.27%); 松樟酮 pinocamphone (9.76%); 异松蒎酮 isopinocampone (7.62%); 棕榈酸 palmitic acid (7.50%)	苹果腐烂病菌 <i>Valsa mali</i> (0.474 2 $\text{mg} \cdot \text{mL}^{-1}$); 棉花立枯病 <i>Thanatephorus cucumeris</i> (0.125 5 $\text{mg} \cdot \text{mL}^{-1}$); 黄瓜枯萎病菌 <i>F. oxysporium</i> f. sp. <i>cucumerinum</i> (0.275 2 $\text{mg} \cdot \text{mL}^{-1}$); 番茄灰霉病 <i>B. cinerea</i> (0.211 0 $\text{mg} \cdot \text{mL}^{-1}$);	[59]
芸香科柑橘属	柑橘 <i>Citrus reticulata</i>	—	烟草花叶病毒 tobacco mosaic virus (TMV)	[60]
	柠檬 <i>C. limon</i>	—	烟草花叶病毒 TMV	[60]
	甜橙 <i>C. sinensis</i>	柠檬烯 limonene (84.2%); 芳樟醇 linalool (4.4%); 月桂烯 myrcene (4.1%)	黑曲霉 <i>A. niger</i> ; 蒂腐病菌 <i>B. theobromae</i> ; 链格孢 <i>A. alternata</i> ; 番茄叶霉病菌 <i>C. fulvum</i> ; 灰霉病 <i>B. cinerea</i> ; 青霉菌 <i>P. expansum</i> ; 纸眼枝孢 <i>U. chartarum</i> ; 苹果斑点落叶病 <i>Alternaria mali</i> ; 产黄青霉 <i>P. chrysogenum</i> ; 枝状枝孢菌 <i>C. cladosporioides</i> ; 鹦哥凤梨叶斑病 <i>Myrothecium roridum</i> ; 乌氏菌 <i>Ulocladium</i> sp.	[61]
	柑桔酸橙 <i>C. acida</i> var. <i>sour lime</i>	聚伞花烃 <i>o</i> -cymene (16.62%); α -柏木烯 α -cedrene (10.57%); 癸二烯醛 decadienal (8.043%); 红没药烯 bisabolene (5.066%); β -葎草烯 β -humelene (4.135%)	无花果曲霉 <i>A. ficum</i> ; 黑曲霉 <i>A. niger</i> ; 烟曲霉 <i>A. fumigatus</i> ; 黄曲霉 <i>A. flavus</i> ; 腐皮镰刀菌 <i>F. solani</i> ; 尖孢镰刀菌 <i>F. oxysporum</i> ; 绿霉病 <i>P. digitatum</i>	[62]
	柠檬橙 <i>Citrus limon</i>	柠檬烯 limonene (61.68%); 柠檬醛 neral (21.66%); β -蒎烯 β -pinene (10.23%); γ -松油烯 γ -terpinene (6.42%)	苹果轮纹病菌 <i>Botryosphaeria dothidea</i> ; 地中海嗜蓝孢孔菌 <i>Fomitiporia mediterranea</i>	[63]

续表 1

科属	代表性植物	主/活性成分	测试微生物和抗菌活性	参考文献
	桔 <i>Citrus reticulata</i>	柠檬烯 limonene (46.7%); 香叶醛 geranial (19.0%); 柠檬醛 neral (14.5%); 乙酸香叶酯 geranyl acetate (3.9%); 香叶醇 geraniol (3.5%)	链格孢 <i>A. alternata</i> ; 纹枯病 <i>R. solani</i> ; 新月弯孢霉 <i>Curvularia lunata</i> ; 尖孢镰刀菌 <i>F. oxysporum</i> ; 稻长蠕孢 <i>Helminthosporium oryzae</i>	[64]
	柑橘 <i>C. limonum</i>	柠檬烯 limonene (47.21%); β -蒎烯 β -pinene (16.90%); γ -松油烯 γ -terpinene (13.91%)	ED ₅₀ : 蜡蚧轮枝菌 <i>L. fungicola</i> var. <i>fungicola</i> (2379 $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$); 双孢蘑菇病毒 <i>A. bisporus</i> (1 170.16 $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$); MIC: 蜡蚧轮枝菌 <i>L. fungicola</i> var. <i>fungicola</i> (3500 ~ 4000 $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$); 双孢蘑菇病毒 <i>A. bisporus</i> (2250 ~ 2500 $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$)	[41]
	酸橙 <i>C. aurantium</i>	柠檬烯 limonene (90.42%)	ED ₅₀ : 蜡蚧轮枝菌 <i>L. fungicola</i> var. <i>fungicola</i> (2646 $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$); 双孢蘑菇病毒 <i>A. bisporus</i> (1 453.45 $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$); MIC: 蜡蚧轮枝菌 <i>L. fungicola</i> var. <i>fungicola</i> (6500 ~ 7000 $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$); 双孢蘑菇病毒 <i>A. bisporus</i> (4000 ~ 5000 $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$)	[41]
	佛手 <i>C. medica</i> var. <i>Sarcodactylis</i>	柠檬烯 <i>D</i> -limonene (22.79%); γ -蒎品烯 γ -terpinene (9.71%); 香叶醇 geraniol (5.77%); 橙花醇 nerol (5.54%); α -松油醇 (R)-(+)- α -terpineol (5.10%)	挥发油的 MIC: 尖孢镰刀菌 <i>F. oxysporum</i> (9.38 $\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$); 腐皮镰刀菌 <i>F. solani</i> (12.05 $\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$); 毁坏柱孢霉 <i>C. destrutans</i> (8.44 $\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$); <i>D</i> -limonene 的 MIC: 尖孢镰刀菌 <i>F. oxysporum</i> (0.42 $\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$); 腐皮镰刀菌 <i>F. solani</i> (0.84 $\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$); 毁坏柱孢霉 <i>C. destrutans</i> (0.78 $\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$); γ -terpinene 的 MIC: 尖孢镰刀菌 <i>F. oxysporum</i> (1.37 $\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$); 腐皮镰刀菌 <i>F. solani</i> (1.16 $\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$); 毁坏柱孢霉 <i>C. destrutans</i> (0.71 $\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$).	[16]
芸香科 花椒属	花椒 <i>Zanthoxylum alatum</i>	芳樟醇 linalool (56.10%); 肉桂酸甲酯 methyl cinnamate (19.73%)	黑曲霉 <i>A. niger</i> ; 烟曲霉 <i>A. fumigatus</i> ; 土曲霉 <i>A. terreus</i> ; 链格孢 <i>A. alternata</i> ; 雪腐镰刀菌 <i>F. nivale</i> ; 青霉菌 <i>P. italicum</i> ; 绿色木霉 <i>Trichoderma viride</i> ; 挥发油的 MIC 和 MFC: 烟曲霉 <i>A. fumigatus</i> (1.25 $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$) and (1.25 $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$) linalool 的 MIC 和 MFC: 烟曲霉 <i>A. fumigatus</i> (2.0 $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$) and (5.0 $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$) methyl cinnamate 的 MIC 和 MFC: 烟曲霉 <i>A. fumigatus</i> (0.6 $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$) and (0.6 $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$) benzoic acid 的 MIC 和 MFC: 烟曲霉 <i>A. fumigatus</i> (1.25 $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$) and (2.50 $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$) propionic acid 的 MIC 和 MFC: 烟曲霉 <i>A. fumigatus</i> (1.50 $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$) and (>5.00 $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$) formic acid 的 MIC 和 MFC: 烟曲霉 <i>A. fumigatus</i> (2.00 $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$) and (3.00 $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$) acetic acid 的 MIC 和 MFC: 烟曲霉 <i>A. fumigatus</i> (2.00 $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$) and (4.00 $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$) sorbic acid 的 MIC 和 MFC: 烟曲霉 <i>A. fumigatus</i> (1.00 $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$) and (1.50 $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$)	[65]
	花椒 <i>Zanthoxylum bungeanum</i>	γ -蒎烯 γ -terpene 13.21%; 3-蒎烯 3-carene 10.67%	米曲霉 <i>A. oryzae</i> ; 黑曲霉 <i>A. niger</i> ; 叶点霉 <i>P. maydis</i> ; 刺盘孢霉 <i>C. musae</i>	[66]

续表 1

科属	代表性植物	主/活性成分	测试微生物和抗菌活性	参考文献
桃金娘科 蒲桃属	丁香 <i>Syzygium aromaticum</i>	公丁香: 丁香酚 eugenol 57.95% ; 乙酸丁香酚酯 eugenol acetate (16.49%); β -石竹烯 caryophyllene (15.89%) 母丁香: 2', 3', 4'-三甲氧基苯乙酮 2', 3', 4'-trimethoxyacetophenone(50.45%); 丁香酚 (39.26%)	公丁香挥发油 MIC: 尖孢镰刀菌 <i>F. oxysporum</i> (0.34 mg·mL ⁻¹); 腐皮镰刀菌 <i>F. solani</i> (0.56 mg·mL ⁻¹); 毁灭柱孢霉 <i>C. destructans</i> (0.38 mg·mL ⁻¹); 瓜果腐霉 <i>P. aphanidermatum</i> (1.56 mg·mL ⁻¹); 灰葡萄孢霉 <i>B. cinerea</i> (0.45 mg·mL ⁻¹); 胶孢炭疽菌 <i>C. gloeosporioides</i> (0.88 mg·mL ⁻¹) 母丁香挥发油 MIC: 尖孢镰刀菌 <i>F. oxysporum</i> (0.29 mg·mL ⁻¹); 腐皮镰刀菌 <i>F. solani</i> (0.47 mg·mL ⁻¹); 毁灭柱孢霉 <i>C. destructans</i> (0.29 mg·mL ⁻¹); 瓜果腐霉 <i>P. aphanidermatum</i> (0.92 mg·mL ⁻¹); 灰葡萄孢霉 <i>B. cinerea</i> (0.20 mg·mL ⁻¹); 胶孢炭疽菌 <i>C. gloeosporioides</i> (1.17 mg·mL ⁻¹) eugenol 的 MIC: 尖孢镰刀菌 <i>F. oxysporum</i> (0.05 mg·mL ⁻¹); 腐皮镰刀菌 <i>F. solani</i> (0.16 mg·mL ⁻¹); 毁灭柱孢霉 <i>C. destructans</i> (0.04 mg·mL ⁻¹); 瓜果腐霉 <i>P. aphanidermatum</i> (0.21 mg·mL ⁻¹); 灰葡萄孢霉 <i>B. cinerea</i> (0.20 mg·mL ⁻¹); 胶孢炭疽菌 <i>C. gloeosporioides</i> (0.42 mg·mL ⁻¹) caryophyllene 的 MIC: 尖孢镰刀菌 <i>F. oxysporum</i> (0.02 mg·mL ⁻¹); 腐皮镰刀菌 <i>F. solani</i> (0.34 mg·mL ⁻¹); 毁灭柱孢霉 <i>C. destructans</i> (0.03 mg·mL ⁻¹); 瓜果腐霉 <i>P. aphanidermatum</i> (0.24 mg·mL ⁻¹); 灰葡萄孢霉 <i>B. cinerea</i> (0.52 mg·mL ⁻¹); 胶孢炭疽菌 <i>C. gloeosporioides</i> (1.88 mg·mL ⁻¹) eugenol acetate 的 MIC: 尖孢镰刀菌 <i>F. oxysporum</i> (0.01 mg·mL ⁻¹); 腐皮镰刀菌 <i>F. solani</i> (0.34 mg·mL ⁻¹); 毁灭柱孢霉 <i>C. destructans</i> (0.05 mg·mL ⁻¹); 瓜果腐霉 <i>P. aphanidermatum</i> (0.09 mg·mL ⁻¹); 灰葡萄孢霉 <i>B. cinerea</i> (0.130 mg·mL ⁻¹); 胶孢炭疽菌 <i>C. gloeosporioides</i> (0.34 mg·mL ⁻¹) 2', 3', 4'-trimethoxyacetophenone 的 MIC: 尖孢镰刀菌 <i>F. oxysporum</i> (0.01 mg·mL ⁻¹); 腐皮镰刀菌 <i>F. solani</i> (0.02 mg·mL ⁻¹); 毁灭柱孢霉 <i>C. destructans</i> (0.05 mg·mL ⁻¹); 瓜果腐霉 <i>P. aphanidermatum</i> (0.24 mg·mL ⁻¹); 灰葡萄孢霉 <i>B. cinerea</i> (0.31 mg·mL ⁻¹); 胶孢炭疽菌 <i>C. gloeosporioides</i> (1.36 mg·mL ⁻¹)	[21]

注: —表示未测定。

3 挥发油可能的抑菌机制

精油的抑菌机制主要取决于精油中化学成分的类型。不同的成分可能通过不同的机制运作,同时,由于不同种类的微生物细胞膜组成不同,如革兰阳性菌、革兰阴性菌、真菌,精油的作用机制也有差异,因为精油中不同的成分可能有不同的或多个靶点^[67-68]。因此,很难预测使用精油后微生物的易感程度,以及不同菌株敏感程度不同的原因^[69]。研究者将精油的抑菌机制归因于它们能够通过微生物细胞外膜和细胞质膜渗透到细胞内部,从而分解细胞结构^[69]。此外,精油的某些化学成分特别是酚类,可以作为质子交换剂而具有独特的抑菌机制,降低细胞质膜的 pH 梯度,特别是当被其他成分促进时,由此导致的质子驱动力(PMF)的崩溃和三磷酸腺苷(ATP)的耗尽最终导致细胞死亡^[68]。当微生物细胞接触不

同的精油时,精油的抗菌活性可能涉及细胞外膜和细胞质内的不同作用。当微生物细胞只接触到低浓度或亚致死浓度的精油时,细胞膜仍能通过改变脂肪酸饱和程度、碳链长度、支链位置、顺式/反异构化以及不饱和脂肪酸(UFAs)在细胞膜中转化为环丙烷来保持其流动性^[70-71]。一些研究人员研究了精油成分分子结构对其抗菌活性的影响。萜烯类化合物的抗菌机制发生在细胞膜水平,其抗菌活性被归因于抑制呼吸和其他能量依赖过程的能力^[72]。然而,萜烯类化合物作为单一成分的整体抗菌活性是无效^[67]。

挥发油是一种非常复杂的天然混合物,由于多种成分共同起效,其似乎没有特定的细胞靶点^[73]。目前,对挥发油机理的研究较少,所取得的成果有限。提出的机制主要有以下几个方面:1)影响细胞壁和细胞膜的正常功能。挥发油作为一种典型的亲脂性物质,可通过细胞壁和细胞质膜,破坏其不同

层的多糖、脂肪酸和磷脂的结构,并使其渗透。细胞壁和细胞膜的损伤可导致细胞质膜、细胞质大分子的渗漏和裂解^[74]。通过扫描和透射电镜观察到肿胀、皱缩、空泡、质膜和细胞质的渗漏^[75]。2)改变能量代谢和还原酶系统。由于挥发油作用下细胞渗透性改变,线粒体和过氧化物酶体也会受到影响,可引起线粒体膜和DNA的损伤。挥发油通过降低膜电位和影响 Ca^{2+} 循环,诱导线粒体膜去极化^[76]。其他离子通道、质子泵和ATP库也受到影响。膜的流动性会发生变化,最终导致氧化应激和生物能量失效。然而,从挥发油衍生出的各种生物活性组分的大多数可能的作用模式都是间接证据,缺乏系统的基于验证的研究。由于挥发油是许多分子的复杂混合物,从这个意义上讲,为了生物学的目的,研究挥发油比研究其某些成分更能提供更多的信息,因为协同作用的概念似乎更有意义。因此,有必要进行深入、全面地实验室研究,以确定芳香植物的有效抗菌方式。

4 挥发油系列农药或肥料产品的开发所面临的机遇和挑战

“中医农业”就是将中医原理和方法应用于农业领域,实现现代农业与传统中医的跨界融合、优势互补、集成创新。有农用活性的植物资源虽然在早期就被筛选出来,但受到植物自然资源的限制、国民经济现状和使用者认知水平的影响,到目前为止,工业化生产中的植物农药品种仍然很少。植物挥发油来源于自然界,具有良好的环境相容性,是开发无公害农药的重要资源。目前,植物挥发油在农业抑菌中的应用十分有限,主要应用于医学领域。对这类植物而言,对挥发油的农业抑菌活性的研究将扩大挥发油资源在农业中的应用。前期笔者开展了大量挥发油的活体实验,例如,佛手挥发油在连作土壤中对三七进行了进一步的评价,发现与不加挥发油的三七相比,其发病率和病情严重程度都有所降低^[10]。在公丁香精油喷洒在三七叶片试验中,公丁香精油与恶霉灵联用的防治效果达60.77%^[21]。黄花蒿石油醚提取物(主要成分与挥发油组成相似)在很大程度上抑制了三七根腐病的发生^[17]。生姜挥发油可以显著抑制三七根腐病害发生率且不影响三七植株的生物量积累^[30]。

植物挥发油的化学成分复杂多样,但抑菌化合物可能只是其中的一种或多种。这些物质之间也可能存在复杂的拮抗或协同效应,这意味着挥发油中的活性化合物需要分离和鉴定,以便为开发新的农药提供必要的资

源。精油的化学分子组成对其抗菌效果起着重要的作用。精油的抑菌活性涉及微生物细胞中的几个靶点,其中最重要的是细胞膜,细胞膜通常具有渗透性,从而导致细胞成分的泄漏。微乳、纳米乳液、脂质体和生物膜等给药系统已被用于提高精油的抗菌效果和利用。今后的研究需要侧重于:1)发现和确定更多的抗菌精油;2)评价不同精油的有效性以及与不同化学农药组合的协同效应;3)从分子水平上了解精油的抗菌机制,如蛋白质合成、核糖核酸(RNA)合成、脱氧核糖核酸(DNA)合成和中间代谢;4)开发有效的传递系统,将精油与其他化学农药或生物杀菌剂一起封装,以实现一种协同替代办法,最大限度地减少化学农药使用的负面影响,有助于改进、综合和可持续的病害管理。因此,挥发油具有广阔的市场发展前景,有可能成为发展绿色农业、降低农业生产成本和出口农业创汇的有力武器。

参考文献

- [1] KADDES A, PARISI O, BERHAL C, et al. Evaluation of the effect of two volatile organic compounds on barley pathogens[J]. *Molecules*, 2016,21(9):1124.
- [2] GARCIA-OLMEDO F, MOLINA A, ALAMILLO J M, et al. Plant defense peptides[J]. *Biopolymers*, 1998, 47(6): 479-491.
- [3] MIREMAILLI S, ISMAN M B. Botanical insecticides inspired by plant-herbivore chemical interactions[J]. *Trends Plant Sci*, 2014, 19(1):29-35.
- [4] VANETTEN H D, MANSFIELD J W, BAILEY J A, et al. Two classes of plant antibiotics: phytoalexins versus "phytoanticipins"[J]. *Plant Cell*, 1994, 6(9):1191-1192.
- [5] JIN F, JING W, HUA S, et al. Pesticide use and residue control in China[J]. *J Pestic Sci*, 2010, 35(2):138-142.
- [6] YUAN B, XUE L, ZHANG Q Y, et al. Essential oil from sweet potato vines, a potential new natural preservative, antioxidant on sweet potato tuber: Assessment of the activity and the constitute[J]. *J Agric Food Chem*, 2016, 64(40):7481-7491.
- [7] DONG F, FU X, WATANABE N, et al. Recent advances in the emission and functions of plant vegetative volatiles[J]. *Molecules*, 2016, 21(2):124.
- [8] KALEMBA D, KUNICKA A. Antibacterial and antifungal properties of essential oils[J]. *Curr Med Chem*, 2003, 10(10):813-829.
- [9] VIUDA-MARTOS M, MOHAMADY M A, FERNANDEZ-LOPEZ J, et al. *In vitro* antioxidant and antibacterial activities of essential oils obtained from Egyptian aromatic plants[J]. *Food Control*, 2011, 22(11):1715-1722.
- [10] BAKKALI F, AVERBECK S, AVERBECK D, et al.

- Biological effects of essential oils-A review [J]. Food Chem Toxicol, 2008, 46(2):446-475.
- [11] 胡林峰, 许明录, 朱红霞. 植物精油抑菌活性研究进展[J]. 天然产物研究与开发, 2011, 23(2):384-391.
- [12] EL-SAWI S A, MOHAMED M A. Cumin herb as a new source of essential oils and its response to foliar spray with some micro-elements[J]. Food Chem, 2002, 77(1):75-80.
- [13] PERCZAK A, JUS K, MARCHWINSKA K, et al. Degradation of zearalenone by essential oils under *in vitro* conditions[J]. Front Microbiol, 2016, 7:1224.
- [14] TYAGI A K, MALIK A. Antimicrobial potential and chemical composition of *Eucalyptus globulus* oil in liquid and vapour phase against food spoilage microorganisms[J]. Food Chem, 2011, 126(1):228-235.
- [15] SIKKEMA J, DE-BONT J A, POOLMAN B. Mechanisms of membrane toxicity of hydrocarbons[J]. Microbiol Rev, 1995, 59(2):201-222.
- [16] CHEN C J, LI Q Q, MA Y N, et al. Antifungal effect of essential oils from five kinds of Rutaceae plants-avoiding pesticide residue and resistance [J]. Chem Biodivers, 2019, 16(4):e1800688.
- [17] MA Y N, CHEN C J, LI Q Q, et al. Monitoring antifungal agents of *Artemisia annua* against *Fusarium oxysporum* and *Fusarium solani*, associated with *Panax notoginseng* root-rot disease[J]. Molecules, 2019, 24(1):213.
- [18] BAKKALI F, AVERBECK S, AVERBECK D, et al. Biological effects of essential oils—A review [J]. Food Chem Toxicol, 2008, 46(2):446-475.
- [19] DORMAN H J D, DEANS S G. Antimicrobial agents from plants; Antibacterial activity of plant volatile oils [J]. J Appl Microbiol, 2000, 88(2):308-316.
- [20] BASSOLE I H, JULIANI H R. Essential oils in combination and their antimicrobial properties [J]. Molecules, 2012, 17(4):3989-4006.
- [21] MA Y N, XU F R, CHEN C J, et al. The beneficial use of essential oils from buds and fruit of *Syzygium aromaticum* to combat pathogenic fungi of *Panax notoginseng* [J]. Ind Crops Prod, 2019, 133:185-192.
- [22] COSENTINO S, TUBEROSO C I G, PISANO B, et al. *In-vitro* antimicrobial activity and chemical composition of *Sardinian thymus* essential oils [J]. Lett in Appl Microbiol, 1999, 29(2):130-135.
- [23] ALIGIANNIS N, KALPOUTZAKIS E, MITAKU S, et al. Composition and antimicrobial activity of the essential oils of two *Origanum* species [J]. J Agric Food Chem, 2001, 49(9):4168-4170.
- [24] BAGAMBOULA C F, UYTENDAELE M, DEBEVERE J. Inhibitory effect of thyme and basil essential oils, carvacrol, thymol, estragol, linalool and *p*-cymene towards *Shigella sonnei* and *S. flexneri* [J]. Food Microbiol, 2004, 21(1):33-42.
- [25] CARSON C F, RILEY T V. Antimicrobial activity of the major components of the essential oil of *Melaleuca alternifolia* [J]. J Appl Bacteriol, 1995, 78(3):264-269.
- [26] 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 Fragrance J, 2009, 24(6):348-354.
- [27] DELAQUIS P J, STANICH K, GIRARD B, et al. Antimicrobial activity of individual and mixed fractions of dill, cilantro, coriander and eucalyptus essential oils [J]. Int J Food Microbiol, 2002, 74(1/2):101-109.
- [28] JIANG Y, WU N, FU Y J, et al. Chemical composition and antimicrobial activity of the essential oil of Rosemary [J]. Environ Toxicol Pharmacol, 2011, 32(1):63-68.
- [29] SARRAZIN S L F, OLIVEIRA R B, BARATA L E S, et al. Chemical composition and antimicrobial activity of the essential oil of *Lippia grandis* schauer (verbenaceae) from the western amazon [J]. Food Chem, 2012, 134(3):1474-1478.
- [30] YIN Y J, CHEN C J, GUO S W, et al. The fight against *Panax notoginseng* root-rot disease using Zingiberaceae essential oils as potential weapons [J]. Front Plant Sci, 2018, 9:1346.
- [31] AVANCO G B, FERREIRA F D, BOMFIM N S, et al. *Curcuma longa* L. essential oil composition, antioxidant effect, and effect on *Fusarium verticillioides* and fumonisin production [J]. Food Control, 2016, 73:806-813.
- [32] RAY A, JENA S, DASH B, et al. Chemical diversity, antioxidant and antimicrobial activities of the essential oils from indian populations of *hedychium coronarium* Koen [J]. Ind Crops Prod, 2018, 112:353-362.
- [33] SUN W M, MA Y N, YIN Y J, et al. Effects of essential oils from Zingiberaceae plants on root-rot disease of *Panax notoginseng* [J]. Molecules, 2018, 23(5):1021.
- [34] MAIA A J, OLIVEIRA J S B, SCHWAN-ESTRADA K R F, et al. The control of isariopsis leaf spot and downy mildew in grapevine cv. isabel with the essential oil of lemon grass and the activity of defensive enzymes in response to the essential oil [J]. Crop Prot, 2014, 63:57-67.
- [35] HERNANDEZ T, CANALES M, GARCIA A M, et al. Antifungal activity of the essential oils of two Verbenaceae: *Lantana achyranthifolia* and *Lippia graveolens* of Zapotitlán de las Salinas, Puebla (México) [J]. Bol Latinoam Caribe Plant Med Aromat, 2008, 7(4):202-206.
- [36] PRAGADHEESH V S, SAROJ A, YADAV A, et al. Chemical characterization and antifungal activity of *Cinnamomum*

- camphora essential oil[J]. Ind Crops Prod, 2013, 49: 628-633.
- [37] KISHORE G K, PANDE S, HARISH S. Evaluation of essential oils and their components for broad-spectrum antifungal activity and control of late leaf spot and crown rot diseases in Peanut[J]. Plant Disease, 2007, 91(4): 375-379.
- [38] MOHAMMADI A, HASHEMI M, HOSSEINI S M. The control of Botrytis fruit rot in strawberry using combined treatments of Chitosan with *Zataria multiflora* or *Cinnamomum zeylanicum* essential oil[J]. J Food Sci Technol, 2015, 52(11): 7441-7448.
- [39] HASSIOTIS C N, DINA E I. The effects of laurel (*Laurus nobilis* L.) on development of two mycorrhizal fungi[J]. Int Biodeterior Biodegrad, 2011, 65(4): 628-634.
- [40] 郭丹, 雷潇, 王鹏, 等. 山苍子油主成分及其衍生物对植物病原菌的抑制作用[J]. 江西农业大学学报, 2016, 38(2): 283-289.
- [41] MEHRPARVAR M, GOLTAPPEH E M, SAFAIE N, et al. Antifungal activity of essential oils against mycelial growth of *Lecanicillium fungicola* var. *fungicola* and *Agaricus bisporus*[J]. Ind Crops Prod, 2016, 84: 391-398.
- [42] DAVARI M, EZAZI R. Chemical composition and antifungal activity of the essential oil of *Zhumeria majdae*, *Heracleum persicum* and *Eucalyptus* sp. against some important phytopathogenic fungi[J]. J Mycol Med, 2017, 27(4): 463-468.
- [43] LEE S O, CHOI G J, JANG K S, et al. Antifungal activity of five plant essential oils as fumigant against postharvest and soilborne plant pathogenic fungi[J]. Plant Pathol J, 2007, 23(2): 97-102.
- [44] 刘晓丹, 刘存芳, 赖普辉, 等. 野菊花茎叶挥发油的化学成分及其对植物病原真菌抑制作用[J]. 食品工业科技, 2013, 34(24): 98-100, 104.
- [45] 努尔比耶·奥布力喀斯木, 热娜·卡斯木, 杨璐, 等. 艾叶挥发油化学成分分析和抗真菌活性的研究[J]. 新疆医科大学学报, 2017, 40(9): 1195-1198, 1202.
- [46] 孔垂华, 黄寿山, 胡飞. 胜红蓟化感作用研究 V. 挥发油对真菌、昆虫和植物的生物活性及其化学成分[J]. 生态学报, 2001, 21(4): 584-587.
- [47] 凌冰, 张茂新, 庞雄飞. 飞机草挥发油对真菌和昆虫的生物活性及其化学成分研究[J]. 天然产物研究与开发, 2003(3): 183-187.
- [48] 江贵波, 陈实, 曾任森. 入侵物种三裂叶蟛蜞菊挥发物质的鉴定及其抗菌活性[J]. 中国生态农业学报, 2008(4): 905-908.
- [49] TZORTZAKIS N G. Ethanol, vinegar and *Origanum vulgare* oil vapour suppress the development of anthracnose rot in tomato fruit[J]. Int J Food Microbiol, 2010, 142(1/2): 14-18.
- [50] FARZANEH M, KIANI H, SHARIFI R, et al. Chemical composition and antifungal effects of three species of Satureja (*S. hortensis*, *S. spicigera*, and *S. khuzistanica*) essential oils on the main pathogens of strawberry fruit[J]. Postharvest Biol Technol, 2015, 109: 145-151.
- [51] SARKHOSH A, VARGAS A, SCHAFFER B, et al. Postharvest management of anthracnose in avocado (*Persea americana* Mill.) fruit with plant-extracted oils[J]. Food Packag Shelf, 2017, 12: 16-22.
- [52] YASSIR E, MANSSOURI M, BOUYANZER A, et al. Essential oil composition and antifungal activity of *Melissa officinalis* originating from north-east Morocco, against postharvest phytopathogenic fungi in apples[J]. Microb Pathog, 2017, 107: 321-326.
- [53] RUSSO M, SURACI F, POSTORINO S, et al. Essential oil chemical composition and antifungal effects on *Sclerotium cepivorum* of *Thymus capitatus* L. (Hoff. & Link) wild populations from Calabria, Southern Italy[J]. Rev Bras Farmacogn, 2013, 23(2): 239-248.
- [54] RAMEZANIAN A, AZADI M, MOSTOWFIZADEH-GHALAMFARSA R, et al. Effect of *Zataria multiflora* Boiss and *Thymus vulgaris* L. essential oils on black rot of 'Washington Navel' orange fruit[J]. Postharvest Biol Technol, 2016, 112: 152-158.
- [55] EI-MOHAMEDY R S R, ABD-EI-LATIF F M. Field application of humic acid and thyme essential oil for controlling late blight disease of tomato plants under field conditions[J]. Asian J Plant Pathol, 2015(4): 167-174.
- [56] TADESSE S, MAZUMDER A, BUCAR F, et al. Chemical composition and biological activities of the essential oil of *plectranthus caninus* Roth[J]. Pharmacogn J, 2011, 3(26): 1-7.
- [57] AIDA A, MOHAMADI-SANI A, VAZIRI-BEHROOZ M. Chemical composition and antimicrobial effect of the essential oil of *Zataria multiflora* Boiss endemic in Khorasan-Iran[J]. Asian Pac J Trop Dis, 2015, 5(3): 181-185.
- [58] 李春葵. 广藿香和藿香的种质资源鉴定和挥发油抗菌活性的测定[D]. 海口: 海南大学, 2013.
- [59] 渠云博. 连钱草抑制植物病原菌活性成分的初步研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2012.
- [60] LU M, HAN Z, XU Y, et al. *In vitro* and *in vivo* anti-tobacco mosaic virus activities of essential oils and individual compounds[J]. J Microbiol Biotechnol, 2013, 23(6): 771-778.
- [61] SHARMA N, TRIPATHI A. Fungitoxicity of the essential oil of *Citrus sinensis* on post-harvest pathogens[J]. World J Microbiol Biotechnol, 2006, 22(6): 587-593.
- [62] MAHMUD S, SALEEM M, SIDDIQUE S, et al. Volatile components, antioxidant and antimicrobial activity of *Citrus acida* var. sour lime peel oil[J]. J Saudi Chem Soc, 2009, 13(2): 195-198.

- [63] AMMAD F, MOUMEN O, GASEM A, et al. The potency of lemon (*Citrus limon* L.) essential oil to control some fungal diseases of grapevine wood [J]. C R Biol, 2018, 341(2):97-101.
- [64] CHUTIA M, DEKA-BHUYAN P, PATHAK M G, et al. Antifungal activity and chemical composition of *Citrus reticulata* Blanco essential oil against phytopathogens from North East India [J]. Food Sci Technol, 2009, 42(3):777-780.
- [65] PRAKASH B, SINGH P, MISHRA P K, et al. Safety assessment of *Zanthoxylum alatum* Roxb. essential oil, its antifungal, antiaflatoxin, antioxidant activity and efficacy as antimicrobial in preservation of *Piper nigrum* L. fruits [J]. Int J Food Microbiol, 2012, 153(1/2):183-191.
- [66] 弭向辉, 龚祝南, 张卫明, 等. 花椒挥发油的提取、分离和抗菌实验 [J]. 南京师大学报(自然科学版), 2004, 27(4):63-66.
- [67] HYLDGAARD M, MYGIND T, MEYER R L. Essential oils in food preservation: Mode of action, synergies, and interactions with food matrix components [J]. Front Microbiol, 2012, 3:12.
- [68] ULTEE A, WELLS-BENNIK M, MOEZELAAR R. The phenolic hydroxyl group of carvacrol is essential for action against the food-borne pathogen *Bacillus cereus* [J]. Appl Environ Microb, 2002, 68(4):1561-1568.
- [69] BURT SA. Essential oils: Their antibacterial properties and potential applications in foods—A review [J]. Int J Food Microbiol, 2004, 94(3):223-253.
- [70] ROSANGELA D P. Changes in membrane fatty acids composition of microbial cells induced by addition of thymol, carvacrol, limonene, cinnamaldehyde, and eugenol in the growing media [J]. J Agr Food Chem, 2006, 54(7):2745-2749.
- [71] SIROLI L, PATRIGNANI F, GARDINI F, et al. Effects of sub-lethal concentrations of thyme and oregano essential oils, carvacrol, thymol, citral and trans-2-hexenal on membrane fatty acid composition and volatile molecule profile of *Listeria monocytogenes*, *Escherichia coli* and *Salmonella enteritidis* [J]. Food Chem, 2015, 182:185-192.
- [72] 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 Frag J, 1999, 14(5):322-332.
- [73] CARSON C F, MEE B J, RILEY T V. Mechanism of action of *Melaleuca alternifolia* (tea tree) oil on *Staphylococcus aureus* determined by time-kill, lysis, leakage, and salt tolerance assays and electron microscopy [J]. Antimicrob Agents Ch, 2002, 46(6):1914-1920.
- [74] OUSSALAH M, CAILLET S, LACROIX M. Mechanism of action of Spanish oregano, Chinese cinnamon, and savory essential oils against cell membranes and walls of *Escherichia coli* O157:H7 and *Listeria monocytogenes* [J]. J Food Protect, 2006, 69(5):1046-1055.
- [75] SOYLU E M, SOYLU S, KURT S. Antimicrobial activities of the essential oils of various plants against tomato late blight disease agent *Phytophthora infestans* [J]. Mycopathologia, 2006, 161(2):119-128.
- [76] VERCESI A E, KOWALTOWSKI A J, GRIJALBA M T, et al. The role of reactive oxygen species in mitochondrial permeability transition [J]. Biosci Rep, 1997, 17(1):43-52.

(收稿日期: 2019-06-07 编辑: 王笑辉)

(上接第1548页)

- [4] 崔丹丹, 曾令杰, 黄嘉玲, 等. 基于主成分聚类 and PLS 回归分析的穿心莲质量等级评价研究 [J]. 中草药, 2019, 50(13):3200-3206.
- [5] 黄竞怡, 刘小琳, 周水平, 等. 穿心莲 UPLC-PDA 指纹图谱研究及 4 种内酯类成分含量测定 [J]. 中国中药杂志, 2014, 39(21):4240-4245.
- [6] 程帆, 刘鹏, 刘地发, 等. UPLC 法同时测定穿心莲药材中穿心莲内酯和脱水穿心莲内酯含量 [J]. 江西中医药大学学报, 2014, 26(6):56-58.
- [7] 肖传学, 孙玉侠, 耿晓梅, 等. 不同药用部位及产地穿心莲药材中 4 个二萜内酯类成分的研究 [J]. 中国现代中药, 2017, 19(5):675-678.
- [8] 杨东升, 陈松光, 欧阳惠芳, 等. 穿心莲流膏中穿心莲内酯类成分在烘干过程中的变化 [J]. 中成药, 2003, 25(11):868-870.
- [9] 范文成, 王岳, 韩月芝, 等. 不同提取浓缩干燥工艺对穿心莲内酯类成分的影响 [J]. 中国药业, 2014, 23(2):54-56.
- [10] 褚晨亮, 曾令杰, 翁海鹏. 穿心莲提取液膜浓缩工艺研究 [J]. 中成药, 2012, 34(11):2255-2257.
- [11] 杨冰, 封亮, 贾晓斌. 基于“组分结构”特征的中药制剂质量评价策略 [J]. 中草药, 2019, 50(17):4003-4007.
- [12] 张南平, 余坤子, 魏峰, 等. 中药材质量的本质与评价方法探讨 [J]. 中国药事, 2018, 32(1):48-53.

(收稿日期: 2019-10-14 编辑: 王笑辉)