留兰香挥发油熏蒸抑菌活性研究

陈利军[1,2*]， 智亚楠[1,2]， 陈思宇[1]， 马宇明[1]， 黄草娜[1]

(1. 信阳农林学院农学院，信阳 464000；2. 豫南植物有害生物绿色防控院士工作站，信阳 464000)

摘要 为了确定留兰香挥发油对植物病原真菌的生防效果，进一步探讨其抑菌机制，以明确其在植物真菌病害防控方面的应用前景，本研究采用菌丝生长速率法测定了留兰香挥发油对番茄灰霉病菌 *Botrytis cinerea*、小麦赤霉病菌 *Fusarium graminearum*、水稻纹枯病菌 *Rhizoctonia solani* 和莴苣菌核病菌 *Sclerotinia sclerotiorum* 4 种植物病原真菌的熏蒸抑制作用，并利用 GC-MS 分析了留兰香挥发油的化学组分。结果显示，留兰香挥发油对 4 种供试真菌均有强烈的熏蒸抑制作用，EC_{50} 均低于 7.0 μL/L。挥发油处理后番茄灰霉病菌菌丝畸变、表面塌陷，细胞膜被破坏、原生质泄漏，细胞质结构呈消解状，线粒体受损。通过 GC-MS 从留兰香挥发油中分离出 30 个组分，鉴定出其中 24 个组分，占挥发油总量的 94.918%，其主要成分有 *L*-香芹酮(57.468%)、*D*-柠檬烯(8.976%)等。研究表明，留兰香挥发油是理想的绿色熏蒸杀菌资源。

关键词 留兰香； 熏蒸抑菌活性； 挥发油； 抑菌机制； *L*-香芹酮

中图分类号： S 482.292 **文献标识码**： A **DOI**： 10.16688/j.zwbh.2018176

Fumigant antifungal activities of essential oils from *Mentha spicata*

CHEN Lijun[1,2]， ZHI Yanan[1,2]， CHEN Siyu[1]， MA Yuming[1]， HUANG Caona[1]

(1. *College of Agriculture, Xinyang Agricultural and Forestry University, Xinyang* 464000, *China*; 2. *Academician Workstation of Green Prevention and Control of Plant Pests in Southern Henan, Xinyang* 464000, *China*)

Abstract The biocontrol potential of essential oils from *Mentha spicata* against plant pathogenic fungi was investigated to explore their applications in the prevention and control of plant fungal diseases. In this study, the fumigant antifungal activities of essential oils from *M. spicata* against four plant pathogenic fungi including *Botrytis cinerea*, *Fusarium graminearum*, *Rhizoctonia solani* and *Sclerotinia sclerotiorum* were determined by mycelial growth rate method; the influences of essential oils on mycelia of *B. cinerea* were observed, and chemical constituents of essential oils were analyzed by GC-MS. The results showed that the essential oils from *M. spicata* had strong fumigation activities against all tested pathogenic fungi and EC_{50} values were lower than 7.0 μL/L. After treatment with essential oils, aberration and surface depression in mycelia of *B. cinerea*, cell membrane destruction and cytoplasmic exosmosis, cytoplasmic structure digestion, and mitochondrial damage were observed. Totally 30 constituents were isolated, and 24 were identified by GC-MS, accounting for 94.918% of the total essential oils. The main chemical constituents included *L*-carvone (57.468%), *D*-limonene (8.976%) and so on. In conclusion, the essential oils from *M. spicata* were ideal green fumigant antifungal resources.

Key words *Mentha spicata*; fumigation antifungal activity; essential oil; antifungal mechanism; *L*-carvone

植物挥发油又称精油，是从植物中分离提取的有特征香气的一类次生代谢物质，为具有挥发性的油状液体[1]。植物挥发油具有抗菌消炎、抗癌抑瘤、抗氧化、延缓衰老、抗病毒等多种生物活性，被广泛应用于医疗保健、食品工业、生态旅游、果蔬保鲜、病虫害防控、日化产品等领域[2]。一些植物的挥发油对植物病原菌具有显著的抑制作用，这些挥发油易挥发的特性使其可以作为仓储、设施农业、土壤等的熏蒸剂防控病害，因来源于植物，具有低毒、环保等特点，因此是理想的绿色生物熏蒸剂[3]。富含挥发油的植物在田间释放的挥发物是植物与其他生物交流的复杂的高级“语言”，能直接或间接地影响病原

收稿日期： 2018-04-23 **修订日期**： 2018-05-16
基金项目： 国家自然科学基金(31401798)；河南省自然科学基金(182300410074)
* 通信作者 E-mail：chlijun1980@163.com

菌的生长[4-5]，通过化感作用以生态调控方式防控植物病害。因此植物挥发油是作物病害重要的绿色防控资源。

留兰香 *Mentha spicata* Linn. 为唇形科薄荷属多年生草本植物，是我国多地栽培的药食同源作物，全草入药可治感冒发热、虚劳咳嗽、胃肠胀气等，嫩枝、叶常作调味香料食用[6]。留兰香全草含丰富的挥发油，其挥发油在食品、日化、制药等行业有广泛的应用。目前对留兰香挥发油的抑菌活性已有较多的研究，但所试菌株多为食源性细菌或临床细菌[7-11]，以及采后果蔬霉腐真菌[12-13]，而对植物病原真菌的抑制作用鲜有报道[14]。本文通过测定留兰香挥发油对几株植物病原真菌的熏蒸抑制活性，分析其化学组分，并观察其抑菌机制，以期为留兰香在植物病害防控中的应用提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料

植物病原真菌：番茄灰霉病菌 *Botrytis cinerea*、小麦赤霉病菌 *Fusarium graminearum*、水稻纹枯病菌 *Rhizoctonia solani* 和莴苣菌核病菌 *Sclerotinia sclerotiorum* 菌株均由信阳农林学院植物病理实验室分离保存。

留兰香挥发油：新鲜的留兰香全草于 2016 年 6 月采自信阳农林学院校园，带至实验室，剪成 1 cm 左右的小段，水蒸气蒸馏法提取挥发油[15]，得淡黄色油状液体，密封后 4℃冰箱保存备用。

供试培养基：马铃薯葡萄糖琼脂(PDA)培养基：马铃薯 200 g，葡萄糖 18 g，琼脂 17 g，水 1 000 mL。

试剂及仪器：标准品 *L*-香芹酮和 *D*-柠檬烯购自阿拉丁试剂公司(中国上海)；电镜用锇酸、Spurr 包埋剂为 SPI-CHEM 公司；其余试剂为国产分析纯。6850/5975 型气质联用仪 GC-MS，美国 Agilent 公司，谱图库为 NIST14；SU-8010 型扫描电镜和 H-7650 型透射电镜，均为日本 Hitachi 公司；UC7 型超薄切片机，德国 Leica 公司。

1.2 方法

1.2.1 留兰香挥发油熏蒸抑菌作用测定

熏蒸抑菌活性测定采用菌丝生长速率法[16]。在直径 120 mm 的培养皿中加入 25 mL 融化的 PDA 培养基(约 60℃)，制成厚薄均匀平板，平板中央接种一块直径为 5 mm 的植物病原真菌菌饼。然后在皿盖上放置一张灭菌的直径 11 mm 圆形滤纸片，滤纸片上滴加留兰香挥发油。皿底皿盖对扣后，parafilm 封口膜密封，22℃倒置培养，72 h 后观察真菌的生长情况，并采用十字交叉法测量菌落直径，计算抑菌率。不同病原真菌的挥发油剂量根据预试验设置，以仅放滤纸片不滴加挥发油为对照。重复 3 次。

1.2.2 留兰香挥发油化学组分分析

留兰香挥发油的化学组分采用 GC-MS 进行分析。GC 分析条件：色谱柱为 HP-5ms 毛细管柱(30 m×0.25 mm×0.25 μm)；进样口温度 260℃；程序升温，初始柱温为 60℃，保持 2 min，以 10℃/min 升温速率升至 230℃，保持 1 min；载气 He 纯度为 99.999%，流速为 1.0 mL/min，进样量为 1.0 μL，不分流，进样前挥发油用乙醚稀释 200 倍。MS 条件：EI 离子源，电子能量 70 eV，离子阱温度 220℃，传输线温度 280℃，溶剂延迟时间为 2 min，全扫描方式，扫描范围 33～350 amu。主要组分 *L*-香芹酮和 *D*-柠檬烯经标准品确认。

1.2.3 留兰香挥发油熏蒸抑菌作用观察

取培养 36 h 的番茄灰霉病菌平板，皿盖滤纸片上添加挥发油，剂量为留兰香挥发油对番茄灰霉病菌菌丝生长熏蒸抑制作用的 EC_{90}，封口膜密封后，22℃倒置培养，以滤纸片不滴加挥发油为对照，其他同 1.2.1。24 h 后观察菌落形态和显微观察菌落边缘菌丝形态[16]，并用单面刀片从菌落边缘切取 PDA 培养基(约 5 mm×5 mm)，2.5%戊二醛固定样品，4℃过夜，参照康振生[17]的方法进行扫描电镜和透射电镜制样，观察菌丝形态和细胞结构的变化。

1.3 数据分析

利用 SPSS 19.0 统计分析软件建立毒力回归方程，并计算 EC_{50} 和 EC_{90}。

2 结果与分析

2.1 留兰香挥发油对植物病原真菌的熏蒸抑制作用

根据预试验设置留兰香挥发油对 4 种植物病原真菌的熏蒸抑制剂量梯度，72 h 后观察统计抑菌率，并建立毒力回归方程，计算 EC_{50} 和 EC_{90}(表 1)。结果显示，留兰香挥发油对供试的 4 种植物病原真菌均具有强烈的熏蒸抑制作用，熏蒸抑制作用随着挥发油剂量的增加而增强。在本试验所采用的直径为

120 mm 培养皿空间内,留兰香挥发油对供试的 4 种植物病原真菌 EC_{50} 均低于 7.0 μL/L,其中对莴苣灰霉病菌的 EC_{50} 最低,仅为 1.332 μL/L。留兰香挥发油对小麦赤霉病菌的 EC_{90} 最大,也仅为 38.591 μL/L。

表 1　留兰香挥发油对 4 种植物病原真菌的熏蒸抑制作用毒力测定结果

Table 1　Determination of fumigant antifungal activities of essential oils from *Mentha spicata* on the mycelial growth of 4 plant pathogenic fungi

植物病原真菌 Plant pathogenic fungus	毒力回归方程 Regression equation	相关系数(r) Correlation coefficient	EC_{50}/μL·L^{-1}	95%置信限/μL·L^{-1} 95% confidence interval	EC_{90}/μL·L^{-1}	95%置信限/μL·L^{-1} 95% confidence interval
番茄灰霉病菌 *B. cinerea*	$y=-1.877+2.273x$	0.954	6.696	4.567～9.288	24.534	15.638～68.179
小麦赤霉病菌 *F. graminearum*	$y=-1.394+1.687x$	0.992	6.710	5.136～8.105	38.591	29.183～59.967
水稻纹枯病菌 *R. solani*	$y=-0.741+1.730x$	0.931	2.681	1.940～3.314	14.763	11.447～22.184
莴苣菌核病菌 *S. sclerotiorum*	$y=-0.127+1.018x$	0.914	1.332	0.398～2.203	24.195	14.723～79.525

2.2　留兰香挥发油的化学组分分析

GC-MS 分析留兰香挥发油化学组分的总离子流图见图 1。利用色谱峰面积归一法测得各组分的相对含量,所得质谱图经 NIST14 质谱数据库检索,与标准图谱核对,并结合 CAS 号分析鉴定各组分。从留兰香挥发油中共分离出 30 个组分(表 2),鉴定出其中 24 个组分,占挥发油总量的 94.918%。

从表 2 中可以看出,其挥发油中含量最高的化合物是 *L*-香芹酮,相对含量达 57.468%;其次是 *D*-柠檬烯,占挥发油总量的 8.976%;其他相对含量较高的化合物分别是大牻牛儿烯 D、桉树脑、石竹烯等,其相对含量分别为 5.464%、3.789%、3.115%。

表 2　留兰香挥发油化学组分

Table 2　Chemical constituents of essential oils from *Mentha spicata*

峰号 No.	保留时间/min Retention time	化合物 Compound	分子式 Formula	相对含量/% Relative content
1	2.887	未鉴定 Unknown	—	1.329
2	3.369	未鉴定 Unknown	—	0.918
3	5.891	4-亚甲基-1-(1-甲基乙基)-二环[3.1.0]己烷 Bicyclo[3.1.0]hexane, 4-methylene-1-(1-methylethyl)	$C_{10}H_{16}$	0.379
4	5.942	β-蒎烯 β-Pinene	$C_{10}H_{16}$	0.454
5	6.115	β-月桂烯 β-Myrcene	$C_{10}H_{16}$	1.561
6	6.792	*D*-柠檬烯 *D*-Limonene	$C_{10}H_{16}$	8.976
7	6.843	桉树脑 Eucalyptol	$C_{10}H_{18}O$	3.789
8	7.887	芳樟醇 Linalool	$C_{10}H_{18}O$	0.296
9	8.349	(E,Z)-2, 6-二甲基-2, 4, 6-辛三烯 2,4,6-Octatriene,2,6-dimethyl-,(E,Z)	$C_{10}H_{16}$	0.305
10	9.012	内-龙脑 endo-Borneol	$C_{10}H_{18}O$	0.989
11	9.458	反-二氢香芹酮 *trans*-Dihydrocarvone	$C_{10}H_{16}O$	1.887
12	9.775	未鉴定 Unknown	—	0.543
13	9.898	顺-香芹醇 *cis*-Carveol	$C_{10}H_{16}O$	1.834
14	10.330	*L*-香芹酮 *L*-Carvone	$C_{10}H_{14}O$	57.468
15	11.505	γ-檀紫三烯. gamma-Pyronene	$C_{10}H_{16}$	0.429
16	12.204	(-)-β-波旁烯 (-)-β-Bourbonene	$C_{15}H_{24}$	0.656
17	12.254	(-)-β-榄香烯 (-)-β-Elemene	$C_{15}H_{24}$	0.645
18	12.535	α-古芸烯 α-Gurjunene	$C_{15}H_{24}$	0.353
19	12.694	石竹烯 Caryophyllene	$C_{15}H_{24}$	3.115
20	12.795	顺-β-古巴烯 *cis*-beta-Copaene	$C_{15}H_{24}$	0.329
21	13.018	(1S, 4S, 4aS)-1-异丙基-4, 7-二甲基-1, 2, 3, 4, 4a, 5-六氢萘 (1S, 4S, 4aS)-1-Isopropyl-4, 7-dimethyl-1, 2, 3, 4, 4a, 5-hexahydronaphthalene	$C_{15}H_{24}$	1.996
22	13.133	蛇麻烯 Humulene	$C_{15}H_{24}$	0.615
23	13.256	未鉴定 Unknown	—	1.433
24	13.508	大牻牛儿烯 D Germacrene D	$C_{15}H_{24}$	5.464
25	13.695	双环大牻牛儿烯 Bicyclogermacrene	$C_{15}H_{24}$	0.974
26	14.005	反-菖蒲烯 *trans*-Calamenene	$C_{15}H_{22}$	0.952
27	14.762	未鉴定 Unknown	—	0.438
28	15.288	表菉澄茄油烯醇 Epicubenol	$C_{15}H_{26}O$	0.736
29	15.922	α-杜松醇 α-Cadinol	$C_{15}H_{26}O$	0.716
30	16.369	未鉴定 Unknown	—	0.422

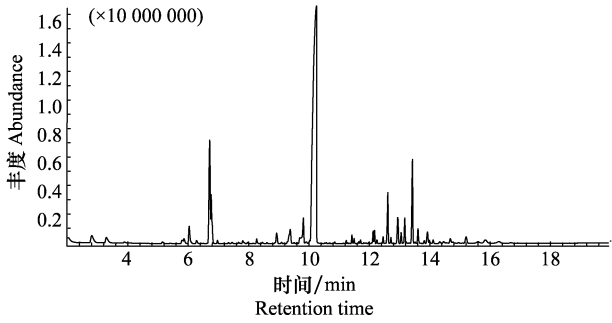
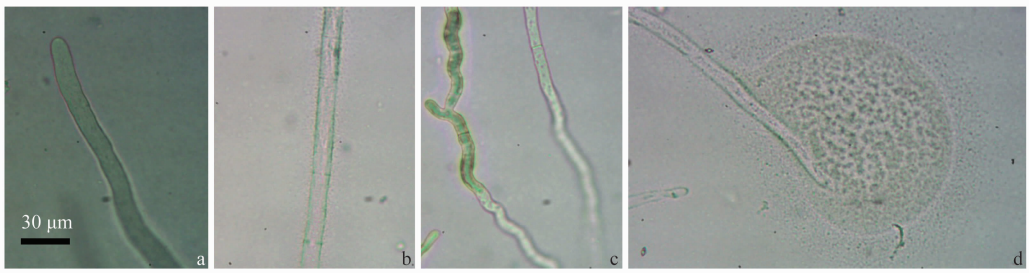


图 1 留兰香挥发油的 GC-MS 总离子流图

Fig. 1 Total ion chromatogram of essential oils from *Mentha spicata* by GC-MS

2.3 留兰香挥发油对番茄灰霉病菌菌丝熏蒸作用观察

24 h 后观察，对照菌落正常生长，边缘菌丝较稀疏，产孢正常，量较少；显微观察菌丝粗细均匀，形态饱满，纤细直长，表面光滑（图 2a）。EC_{90} 剂量处理 24 h 后，菌落几乎没有生长，边缘菌丝致密，少有菌丝产孢；部分菌丝出现畸形，甚至扭曲、严重畸变，光学显微镜下多数菌丝出现原生质分布不均、空腔增多增大等现象，边缘和中央的菌丝均出现大量原生质泄漏，有些在菌丝顶端聚集，有些菌丝周围密布泄漏的原生质，表明整个菌丝细胞膜受损（图 2b～d）。

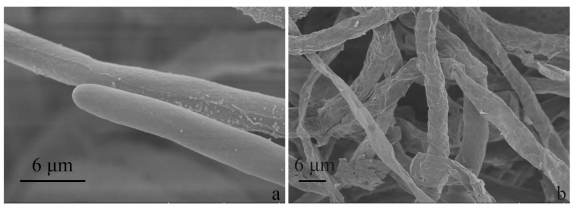


a: 对照; b~d: EC_{90}剂量处理
a: CK; b–d: Treatment at EC_{90}

图 2 留兰香挥发油对番茄灰霉病菌菌丝作用显微观察

Fig. 2 Fumigation activity of essential oils from *Mentha spicata* against the mycelia of *Botrytis cinerea* by optical microscope

扫描电镜观察，对照菌丝正常（图 3a）。EC_{90} 剂量处理，菌丝表面塌陷、甚至干瘪、严重扭曲皱缩，部分菌丝表面出现溶解状（图 3b）。透射电镜观察，对照菌丝细胞饱满，结构清晰，细胞壁及细胞膜连续完整，细胞质均匀，空腔较少，细胞器丰富完整，细胞核、核仁等清晰可见，且核膜连续完整（图 4a～b）。EC_{90} 剂量处理后，细胞膜出现加厚、结构模糊，细胞质中空腔增大，数量增多，细胞质有消解趋势，线粒体数量增加，部分线粒体的嵴变得不明显，核仁不明显（图 4c～d）。



a: 对照; b: EC_{90}剂量处理
a: CK; b: Treatment at EC_{90}

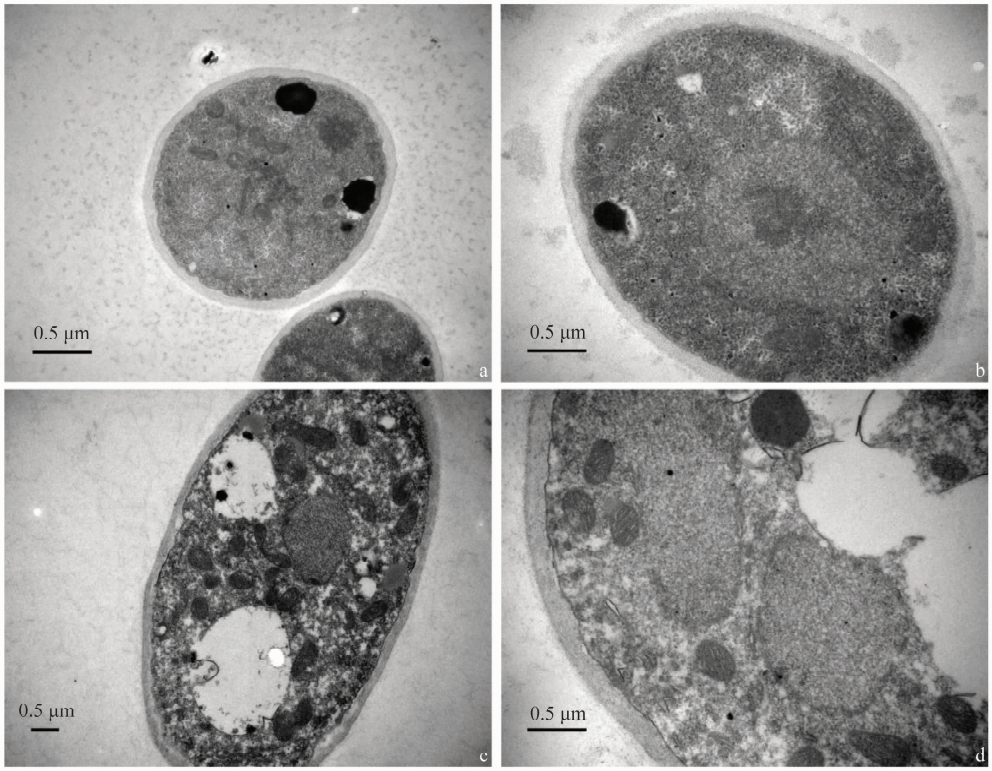
图 3 留兰香挥发油对番茄灰霉病菌菌丝作用扫描电镜图

Fig. 3 Fumigation activity of essential oils from *Mentha spicata* against the mycelia of *Botrytis cinerea* by scanning electron microscope

3 讨论

前人分析结果显示留兰香挥发油的主要成分为香芹酮、柠檬烯等[8,10-11,13]，香芹酮是莳萝籽、葛缕子等多种植物挥发油的主要成分[18]，有 2 种异构体，*L*-香芹酮和 *S*-香芹酮。潘旭迟等[9]分析留兰香挥发油的主要成分为 *L*-香芹酮。本试验中新鲜留兰香挥发油的主要组分是 *L*-香芹酮，其次是 *D*-柠檬烯，与前人的分析结果基本相同。*L*-香芹酮即左旋香芹酮，对食源性细菌有强烈的抑制作用[9]，在病原真菌方面，Regnier 等[19]研究发现 *L*-香芹酮对胶孢炭疽菌 *Colletotrichum gloeosporioides*、可可毛色二孢 *Lasiodiplodia theobromae* 及链格孢 *Alternaria* sp. 等鳄梨采后病原真菌抑制效果优于 *D*-柠檬烯、*S*-香芹酮、桉树脑等几种单体及 *Lippia scaberrima* 挥发油，可替代化学杀菌剂用于果蔬采后保鲜；Boonruang 等[20]将麝香草酚和 *L*-香芹酮添加到 PLA 膜中，有很好的杀菌效果，有望作为果蔬杀菌保鲜膜。*D*-柠檬烯为广泛存在于柑橘、蔬菜等植物的挥发油中的一种天然单环单萜烯，为食品中允许使用的香料，具有广谱抗菌性，可显著

抑制真菌及细菌[21]。本试验中 *L*-香芹酮和 *D*-柠檬烯在留兰香挥发油中的相对含量达 66.444%,因此留兰香挥发油对所试的植物病原真菌表现显著的熏蒸抑制活性,对番茄灰霉病菌和小麦赤霉病菌的 EC_{50} 仅为 6.696 μL/L 和 6.710 μL/L,远低于本实验室之前发现熏蒸抑菌效果显著的土荆芥挥发油[15-16]。留兰香挥发油来源于食用植物,具有安全、丰富、抑菌效果强等优势,因此是理想的绿色熏蒸杀菌资源。



a~b: 对照; c~d: EC_{90}剂量处理
a-b: CK; c-d: Treatment at EC_{90}

图 4　留兰香挥发油对番茄灰霉病菌菌丝作用透射电镜图

Fig. 4　Fumigation activity of essential oils from *Mentha spicata* against the mycelia of *Botrytis cinerea* by transmission electron microscope

植物挥发油组分复杂,抑菌活性由其主要成分或多种成分协同作用,不同成分的抑菌机理可能不尽相同,因此植物挥发油的抑菌机制通常是多种方式、包括作用于细胞壁、细胞膜、核酸、蛋白质等造成不可逆的损失,作用于能量系统或代谢系统诱导活性氧(ROS)积累介导细胞凋亡等[2, 22-24]。初步的研究发现经过留兰香挥发油处理,番茄灰霉病菌菌丝形态和结构遭到破坏,细胞膜通透性增加,原生质外渗,细胞质结构呈消解状,线粒体受损,表明留兰香抑菌作用位点具有多样性。多项研究[25-26]表明挥发油对细胞的破坏为首先作用于细胞膜、破坏通透性,进而侵入细胞内部引起细胞器损伤,从而影响细胞的生理功能。留兰香挥发油的熏蒸抑菌作用可能也是类似的作用过程。

通过间作利用作物物种多样性,借助挥发物以诱集、驱避、化感等方式控制病虫害,可以减少化学农药的使用量,是作物绿色防控技术的一项重要方法,在害虫防治方面有较多的研究和应用[27]。在病害防控方面,利用间作作物的挥发物,水稻与水芹间作能有效控制包括稻瘟病在内的病虫草害的发生[28],辣椒与韭菜的间作可以有效控制辣椒疫病的扩展与蔓延[29]。留兰香含丰富的挥发油,奚同行和何长高[30]的研究表明,果园套种留兰香对潜叶蛾、柑橘凤蝶和桃蚜等果树害虫有明显的生防效果,并促进果树生长、提高产量。留兰香挥发油的主要组分为抑菌活性显著的 *L*-香芹酮、*D*-柠檬烯等,在本试验中留兰香挥发油对供试的 4 种植物病原真菌具有强烈的熏蒸活性,且留兰香易栽培种植,因此留兰香也有望用于通过与作物间作实现对作物病害的生态防控,其间作模式及作用机制有待进一步研究。

参考文献

[1] 徐汉虹. 杀虫植物与植物杀虫剂[M]. 北京:中国农业出版社,2001:107.

[2] 陈建烟,李永裕,吴少华. 植物精油生物活性作用机理研究进展[J]. 天然产物研究与开发,2012,24(9):1312-1318.

[3] 陈利军,陈月华,周巍,等. 河南鸡公山小鱼仙草挥发油的抑菌作用及组分分析[J]. 南方农业学报,2016(11):1875-1879.

[4] 高宇,孙晓玲,金珊,等. 绿叶挥发物及其生态功能研究进展[J]. 农学学报,2012,2(4):11-23.

[5] TUMLINSON H. The importance of volatile organic compounds in ecosystem functioning [J]. Journal of Chemical Ecology, 2014, 40(3): 212-213.

[6] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志 第66卷[M]. 北京: 科学出版社, 1977: 271.

[7] ZAIDI S, DAHIYA P. *In vitro* antimicrobial activity, phytochemical analysis and total phenolic content of essential oil from *Mentha spicata* and *Mentha piperit*a[J]. International Food Research Journal, 2015, 22(6): 2440-2445.

[8] SHAHBAZI Y. Chemical composition and *in vitro* antibacterial activity of *Mentha spicata* essential oil against common foodborne pathogenic bacteria[J]. Journal of Pathogens, 2015, 2015(2): 916305-916310.

[9] 潘旭迟,徐剑锋,傅昱晟,等. 3种植物挥发油抑制食源性细菌生长活性成分及机理[J]. 食品科学,2017,38(13):143-149.

[10] CHRYSARGYRIS A, XYLIA P, BOTSARIS G, et al. Antioxidant and antibacterial activities, mineral and essential oil composition of spearmint (*Mentha spicata* L.) affected by the potassium levels [J]. Industrial Crops and Products, 2017, 103(10): 202-212.

[11] SNOUSSI M, NOUMI E, TRABELSI N, et al. *Mentha spicata* essential oil: chemical composition, antioxidant and antibacterial activities against planktonic and biofilm cultures of *Vibrio* spp. strains [J]. Molecules, 2015, 20: 14402-14424.

[12] KEDIA A, DWIVEDY A K, JHA D K, et al. Efficacy of *Mentha spicata* essential oil in suppression of *Aspergillus flavus* and aflatoxin contamination in chickpea with particular emphasis to mode of antifungal action[J]. Protoplasma, 2016, 253(3): 647-653.

[13] OJEWUMI M E, ADEDOKUM S O, OMODARA O J, et al. Phytochemical and antimicrobial of the leaf oil extract of *Mentha spicata* and its efficacy in repelling mosquito [J]. International Journal of Pharmaceutical Research and Allied Sciences, 2017, 6(4): 17-27.

[14] 邹正耀,张红英,王学兵,等. 留兰香挥发油提取及其体外抗植物真菌研究[J]. 中国农学通报,2011,27(7):262-265.

[15] 陈利军,智亚楠,王国君,等. 土荆芥花序和叶挥发油的抑菌作用及组分分析[J]. 植物保护,2014,40(5):40-43.

[16] 陈利军,智亚楠,王国君,等. 土荆芥果实挥发油的抑菌活性及其组分分析[J]. 河南农业科学,2015,44(1):70-76.

[17] 康振生. 植物病原真菌的超微结构[M]. 北京:中国科学技术出版社,1995:1-29.

[18] 付磊磊,李双阳,何军,等. 香芹酮和薄荷醇手性异构体对淡色库蚊熏蒸及趋避活性[J]. 昆虫学报,2016,59(7):732-738.

[19] REGNIER T, COMBRINCK S, PLOOY W D, et al. Evaluation of *Lippia scaberrima* essential oil and some pure terpenoid constituents as postharvest mycobiocides for avocado fruit [J]. Postharvest Bioloby and Technology,2010,57(3):176-182.

[20] BOONRUANG K, KERDDONFAG N, CHINSIRIKUL W, et al. Antifungal effect of poly(lactic acid) films containing thymol and R-(-)-carvone against anthracnose pathogens isolated from avocado and citrus [J]. Food Control,2017,78(2):85-93.

[21] 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.

[22] 李亚茹,周林燕,李淑荣,等. 植物精油对果蔬中微生物的抑菌效果及作用机理研究进展[J]. 食品科学,2014,35(11):325-329.

[23] 李文茹,施庆珊,谢小保,等. 植物精油化学成分及其抗菌活性的研究进展[J]. 微生物学报,2016,43(6):1339-1344.

[24] 李燕君,孔维军,李梦华,等. 植物精油抑制真菌及真菌毒素的研究进展[J]. 中草药,2016,47(11):2011-2018.

[25] 丁月,叶仁凤,欧昌荣,等. 加拿大一枝黄花精油的提取及对灰霉菌抑制作用的研究[J]. 食品工业科技,2015,36(6):153-156.

[26] SHAO X F, CHENG S, WANG H F, et al. The possible mechanism of antifungal action of tea tree oil on *Botrytis cinerea* [J]. Journal of Applied Microbiology,2013,114(6):1642-1649.

[27] 王一,杨雅婷,杨静,等. 物种多样性与病虫草害管理研究进展[J]. 中国生物防治学报,2015,31(5):801-810.

[28] 向慧敏,章家恩,罗明珠,等. 水稻与水芹间作栽培对水稻病虫草害和产量的影响[J]. 生态与农村环境学报,2013,29(1):58-63.

[29] 江兵兵,张彧,郭存武,等. 韭菜和辣椒间作对辣椒疫病的防治效果及其化感机理[J]. 植物保护学报,2017,44(1):145-151.

[30] 奚同行,何长高. 果园套种留兰香的生物防治作用与生态效益分析[J]. 南昌水专学报,1999,18(1):41-46.

(责任编辑:田 喆)