

# 微生物源挥发性物质及其生物防治作用研究进展

张清华<sup>1,2</sup> 黄丽丽<sup>1</sup> 连鑫坤<sup>1</sup> 詹振亮<sup>1</sup> 冯丽贞<sup>1,2\*</sup>

(<sup>1</sup>福建农林大学林学院, 福州 350002; <sup>2</sup>福建农林大学森林保护研究所, 福州 350002)

**摘要** 近年来,人们对微生物源挥发性有机物的研究日益感兴趣,不仅因为释放挥发性物质的微生物种类超出人们现有的认识,而且这些微生物挥发性物质成分复杂、功能多样。本文从现有微生物挥发性物质收集、分析方法以及微生物挥发性物质在植物病害生物防治方面的研究进展进行综述。针对释放挥发性物质真菌和细菌的种类多样性、抗菌挥发性物质成分的多样性以及在生物防治中的应用进行了系统阐述。此外,作者还对产生挥发性物质的微生物新种类,特殊生物活性物质结构、功能、作用机制以及应用前景等研究方面提出了展望。

**关键词** 挥发性物质; 真菌; 细菌; 放线菌; 植物病害

**Research advances in microbial volatiles and their biocontrol potential.** ZHANG Qing-hua<sup>1,2</sup>, HUNG Li-li<sup>1</sup>, LIAN Xin-kun<sup>1</sup>, ZHAN Zhen-liang<sup>1</sup>, FENG Li-zhen<sup>1,2\*</sup> (<sup>1</sup> Forestry College of Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; <sup>2</sup> Institute of Forest Protection in Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China).

**Abstract:** In recent years, increasing attention has been paid on the study of microbial volatile organic compounds (MVOCs) not only because of the species diversity of MVOCs-emitted microbes, but also the complexity and versatility of MVOCs. This review summarized the methods for MVOCs collection and analysis, diversity of MVOCs-emitted fungal and bacterial species, diversity of antimicrobial MVOCs substances and its application in the biological control of plant diseases. Microbial volatiles represent a new frontier in bioprospecting. The discovery of new MVOCs-emitted microbial species and the specific biological activity, function, action mechanism and application of MVOCs should be considered as important research areas.

**Key words:** microbial volatiles; fungi; bacteria; actinomyces; plant disease.

挥发性有机物是以碳为基本元素的固体或液体,能够在 20 °C 和 0.01 kPa 环境下快速地挥发,进入气相状态 (Morath *et al.*, 2012), 这些有机物绝大多数是亲脂性的物质,水溶性低。人们已经发现超过 1700 种由植物产生的挥发性有机物 (Kreuzwieser, 2015)。在生态系统中,植物可以通过向空气中和(或)土壤中释放挥发性物质,达到信息传递、相互作用等目的,以弥补植物不能移动的缺陷。同样,微生物也能产生大量种类丰富、功能多样的挥发性物质 (microbial volatile organic compounds, MVOCs)。

据统计,已经发现细菌产生的挥发性有机物超过 346 种,主要有烯烃、醇、酮、萜、苯、吡嗪、酸、酯等物质;而已鉴定的 250 种由真菌产生的挥发性有机物主要是醇、苯、醛、烯烃、酸、酯、酮等物质 (Morath *et al.*, 2012; Lemfack *et al.*, 2014)。研究表明, MVOCs 作用主要有: (1) 作为群落内和群落间的信号物质; (2) 细胞与细胞间信号物质; (3) 可能的碳释放通道; (4) 生长促进或抑制因子 (Kai *et al.*, 2009)。

若作为抑制因子起作用,相互作用的微生物中被抑制的是植物病原微生物,那么释放 MVOCs 的微生物就具有应用于植物病害生物防治的潜力。MVOCs 凭借其良好的细胞膜穿透性和在空气、土壤空隙中高效率的扩散能力,能快速扩大挥发性物质的作用范围,从病原菌防治角度看,也能提高对靶标

福建农林大学林学院青年基金项目 (61201400823)、福建省教育厅中青年基金项目 (JAT160149) 和福建省财政厅项目 (K8113001A、K81MKA02A) 资助。

收稿日期: 2016-11-24 接受日期: 2017-02-17

\* 通讯作者 E-mail: fjflz@126.com

微生物的抑制率。历年来,水溶性抗菌物质得到较为广泛且深入的研究,但是在过去的15年,尤其在植物内生真菌 *Muscodor albus* 的发现以及成功商品化后 (Strobel *et al.*, 2003), 越来越多能够释放抑菌性 MVOCs 的微生物菌株被发现。

鉴于挥发性物质种类及其功能的多样性和复杂性,本文将仅从 MVOCs 的研究方法、释放 MVOCs 微生物的多样性、MVOCs 成分多样性及 MVOCs 在植物病害生物防治方面的潜力方面进行综述。

## 1 挥发性有机物的收集分析方法

### 1.1 收集方法

因为 MVOCs 的特性,其相关研究都是在封闭的环境中进行的。MVOCs 成分较为复杂,往往含有不同化学结构、不同极性的多种物质。研究 MVOCs 至关重要的第一步是在微生物新陈代谢过程中尽可能多且全面地获取挥发性物质成分。因此,所期望的 MVOCs 取样技术应该是高效的、适用于收集不同化学结构、不同极性的 MVOCs 成分,而且还要避免样品污染。到目前为止,曾在 MVOCs 取样中使用过的技术主要有液液萃取 (liquid-liquid extraction, LLE) (Pandit *et al.*, 2009)、汽馏 (steam distillation, SD) (Siani *et al.*, 2004)、同时蒸馏萃取 (simultaneous distillation extraction, SDE) (Chaintreau, 2001)、吹扫捕集 (purge and trap, P&T) (Webster *et al.*, 2010)、超临界流体萃取 (supercritical fluid extraction, SFE) (Duarte *et al.*, 2004) 和固相微萃取 (solid phase microextraction, SPME) (Mills *et al.*, 2000)。其中, LLE、SD 和 SDE 是经典的 VOC 收集技术,但是这些技术不仅需要多个步骤,使用有机溶剂量大,费时长,而且一些不稳定的 VOC 成分,如烯、酯和不饱和 VOC 成分在加热萃取或蒸馏的过程中会分解或降解。如今, P&T、SFE 和 SPME 被认为是技术先进、环境友好型的 VOC 收集技术,尤其是 SPME, 因高灵敏性、准备时间短、采集速度快等特点,已快速地成为最受欢迎的采集技术 (Zhang *et al.*, 2010)。

### 1.2 分析方法

挥发性有机物样品收集后,要对挥发性成分进行分析鉴定。气相-质谱联用 (GC-MS) 得益于其高效地分离能力和高灵敏的检测能力,成为现在监测和分析挥发性有机物成分的主要技术手段 (Matysik *et al.*, 2009), 但是,电子轰击电离造成多种离子碎片,使质谱复杂化,加大了分析难度。近年来,基于

质谱高灵敏检测特性的仪器,如选择离子流动管质谱法 (SIFT-MS) 和质子转移反应质谱法 (PTR-MS) 因采用化学电离源技术避免了过多离子碎片的产生,成分变化少,分析相对容易。

SIFT-MS 是一种快速、广谱、灵敏度极高 (可检出浓度为  $10^{-9}$ ) 的挥发性物质分析技术。此方法样品无需进行预处理,避免损失和成分变化,特别适用于测定难分离、热稳性差的痕量挥发性物质的分析。这项技术曾用于曲霉 (*Aspergillus*)、假丝酵母 (*Candida*)、*Muscodor*、镰刀菌 (*Fusarium*) 和隐球酵母 (*Cryptococcus*) 产生的挥发性物质成分的分析 (Scotter *et al.*, 2005)。

PTR-MS 具有无需预先收集准备样品,可实时进行分析,不仅具有测量分析速度快,灵敏度高的特点,而且无需定标,能够测量 VOC 成分的绝对含量。应用该项技术, Ezra 等 (2004) 对由 *Muscodor albus* 产生的 MVOCs 进行了定量分析。

电子鼻 (E-nose) 在检测 MVOCs 方面是一种有前景的新设备。典型的电子鼻系统由多传感器阵列、信息处理单元、模式识别软件及参考数据库组成 (邹慧琴等, 2011)。当传感器阵列暴露在 VOC 当中,可将不同物质分子在其表面的作用转化为可测量的电信号,由信号处理单元和模式识别软件进行识别,产生“电子指纹图谱”。真菌的 MVOCs 指纹图谱可以用于无创伤地鉴定医学相关的真菌,并确定抗真菌药物的有效性和真菌的抗性 (郑哲洲等, 2012)。在食品安全行业,这种技术提供了早期检测谷物,水果和肉类产品中产真菌毒素真菌的有效手段 (纪飞等, 2014)。此外,电子鼻在农业应用上可测定土壤在应对环境因素或土壤输入物时土壤的整体健康 (Bastos *et al.*, 2007)。

但是,不论是 GC-MS、SIFT-MS 还是 PTR-MS,它们对成分的鉴定都依赖于现有的物质数据库,而数据库并不包含所有的物质信息。因此,新物质还得需要例如核磁共振 (Nuclear Magnetic Resonance, NMR) 等技术进行鉴定。但常用的 MVOCs 收集方式往往不能获得足够的 MVOCs 量以满足 NMR 实验要求。Booth 等 (2011) 描述了一项技术,将 Carbotrap A 和 B (美国 Supelco 生产) 和膨润土页岩装进一个不锈钢柱子,这个装置能快速的捕捉并吸附真菌产生的 MVOCs。通过可控的加热然后随即通过液氮冷却,可达到 65%~70% 的恢复,收集到重量以 mg 计的物质,再通过进一步分离具有用于核磁

共振进行新化合物鉴定的潜力。

## 2 释放抗菌活性 MVOCs 的微生物种类丰富

MVOCs 在生态环境中都起着重要的作用,在植物生产方面,人们对 MVOCs 的兴趣在于它们既可以促进植物的生长又可作为植物病害生物防治因子,通过减少化肥和化学农药的施用,有助于形成环境友好型植物生产和有害生物防治可持续发展策略。

最早报道细菌产生的抗菌性 MVOCs 的是 McCain (1966)。他在 1966 年就证明灰色链霉菌 (*Streptomyces griseus*) 产生的 MVOCs 能够抑制 *Gleosporium aridum* 孢子的形成 (McCain, 1966)。链霉菌是著名的 MVOCs 释放微生物。现在已证明,多种链霉菌产生的 MVOCs 能够有效抑制植物病原菌的生长从而有效防治植物病害。万明国 (2008) 发现,普特拉链霉菌 F-1 产生的 MVOCs 能够很好地防治储藏期草莓的灰霉病和辣椒储藏期的腐烂;李其利 (2011) 也证明,链霉菌 JK-1 产生的 MVOCs 能够导致灰霉菌分生孢子异常,并能有效控制储藏期番茄的灰霉病,不仅如此,JK-1 还能通过释放 MVOCs 防治储藏期柑橘的青霉病;芽孢杆菌 (*Bacillus* spp.) 作为最著名的植物病害生物防治因子之一,人们对它的可溶性的抗菌物质有着广泛和深入的研究。早在

1993 年, Fiddaman 等 (1993) 报道, *Bacillus subtilis* NCIMB 12376 菌株通过释放抗菌 MVOCs 抑制立枯丝核菌 (*Rhizoctonia solani*) 和终级腐霉 (*Pythium ultimum*)。现在越来越多研究发现,多种芽孢杆菌属细菌能够释放 MVOCs, 并对植物病原菌有抑制作用,具有生物防治潜力 (表 1)。

但除链霉菌和芽孢杆菌外,人们还发现其他属细菌同样可以产生抗菌性 MVOCs。一项研究报告显示,随机选取的 1018 株细菌,有 32% 的菌株能够释放抗真菌 MVOCs,而这 328 个细菌菌株属于 5 个类群:产碱杆菌科 (Alcaligenaceae)、芽孢杆菌目 (Bacillales)、细球菌科 (Micrococcaceae)、根瘤菌科 (Rhizobiaceae) 和黄单胞菌科 (Xanthomonadaceae) (Zou *et al.*, 2007)。到目前,人们发现农杆菌属 (*Agrobacterium*)、节杆菌属 (*Arthrobacter*)、芽孢杆菌属 (*Bacillus*)、伯克氏菌属 (*Burkholderia*)、溶杆菌属 (*Lysobacter*)、果胶杆菌属 (*Pectobacterium*)、假单胞菌属 (*Pseudomonas*)、沙雷氏菌属 (*Serratia*)、芽胞八叠球菌属 (*Sporosarcina*)、黄单胞菌属 (*Xanthomonas*) 等细菌拥有释放抗菌性 MVOCs 的能力 (Kai *et al.*, 2009)。尽管越来越多的细菌被发现能够释放抗菌活性的 MVOCs,但这仅是其中的极少数,随着分离和培养技术的进步,更多人们意想不到的细菌或许

表 1 能够释放抗菌性 MVOCs 的芽孢杆菌属菌株

Table 1 *Bacillus* strains emitting antifungal MVOCs and the plant pathogens inhibited by the MVOCs

芽孢杆菌菌株	病原菌	参考文献
解淀粉芽孢杆菌 <i>Bacillus amyloliquefaciens</i> NJN-6	尖孢镰刀菌古巴专化型 <i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. <i>cubense</i>	Yuan <i>et al.</i> , 2012
解淀粉芽孢杆菌 <i>Bacillus amyloliquefaciens</i> PPCB004	指状青霉 <i>Penicillium digitatum</i> 意大利青霉 <i>Penicillium italicum</i> 皮落青霉 <i>Penicillium crustosum</i>	Arrebola <i>et al.</i> , 2010
解淀粉芽孢杆菌 <i>Bacillus amyloliquefaciens</i> SQR-9	青枯劳尔氏菌 <i>Ralstonia solanacearum</i>	Raza <i>et al.</i> , 2016
解淀粉芽孢杆菌 <i>Bacillus amyloliquefaciens</i> subsp. <i>Plantarum</i> UCMB5113	灰葡萄孢 <i>Botrytis cinerea</i> 甘蓝链格孢 <i>Alternaria brassicicola</i> 芸薹链格孢 <i>Alternaria brassicae</i> 核盘菌 <i>Sclerotinia sclerotiorum</i> 青枯劳尔氏菌 <i>Ralstonia solanacearum</i>	Shashidar <i>et al.</i> , 2016
解淀粉芽孢杆菌 <i>Bacillus amyloliquefaciens</i> T-5	灰葡萄孢 <i>Botrytis cinerea</i>	Raza <i>et al.</i> , 2016
萎缩芽孢杆菌 <i>Bacillus atrophaeus</i> CAB-1	灰葡萄孢 <i>Botrytis cinerea</i>	Zhang <i>et al.</i> , 2013
短小芽孢杆菌 <i>Bacillus pumilus</i> TB09	胶孢炭疽菌 <i>Colletotrichum gloeosporioides</i>	Zheng <i>et al.</i> , 2013
枯草芽孢杆菌 <i>Bacillus subtilis</i> BAB-1	灰葡萄孢 <i>Botrytis cinerea</i>	李宝庆等, 2010
枯草芽孢杆菌 <i>Bacillus subtilis</i> B2g	立枯丝核菌 <i>Rhizoctonia solani</i>	Kai <i>et al.</i> , 2007
枯草芽孢杆菌 <i>Bacillus subtilis</i> C9	胶孢炭疽菌 <i>Colletotrichum loeosporioides</i> 球毛壳菌 <i>Chaetomium globosum</i> 苹果炭疽病菌 <i>Glomerella cingulata</i> 尖孢镰刀菌 <i>Fusarium oxysporum</i> 黑曲霉 <i>Aspergillus niger</i> 多主棒孢霉 <i>Corynespora cassiicola</i>	Islam <i>et al.</i> , 2012
枯草芽孢杆菌 <i>Bacillus subtilis</i> G8	立枯丝核菌 <i>Rhizoctonia solani</i>	Liu <i>et al.</i> , 2008
枯草芽孢杆菌 <i>Bacillus subtilis</i> PPCB001	核盘菌 <i>Sclerotinia sclerotiorum</i> 指状青霉 <i>Penicillium digitatum</i> 意大利青霉 <i>Penicillium italicum</i> 皮落青霉 <i>Penicillium crustosum</i>	Arrebola <i>et al.</i> , 2010
苏云金杆菌 <i>Bacillus thuringiensis</i> TB72	胶孢炭疽菌 <i>Colletotrichum gloeosporioides</i>	Zheng <i>et al.</i> , 2013

会被发现。

相对细菌 MVOCs 的研究,真菌产生抗菌 MVOCs 的报道较晚,但由内生真菌产生的挥发性抗菌物质引起了众多研究者的兴趣,尤其是在植物内生真菌 *Muscordor albus* 发现以后。*M. albus* 是 Strobel 从肉桂中分离到的,并鉴定为新属新种。同时他们发现 *M. albus* 产生 MVOCs 能够抑制甚至杀死多种植物病原菌 (Strobel *et al.*, 2001)。不仅是 *M. albus*, *Muscordor* 属的其他种, *M. crispans*, *M. fengyangensis*, *M. roseus* 也能够产生抗菌活性的 MVOCs (Mitchell *et al.*, 2010; Stinson *et al.*, 2003; Zhang *et al.*, 2010)。当 *M. albus* 施用到土壤中能保持存活,它们产生的 MVOCs 表现出对多种由土居植物病原,例如黑腐丝囊霉 (*Aphanomyces cochlioides*), 南方根结线虫 (*Meloidogyne incognita*), 终极腐霉 (*P. ultimum*), 辣椒疫霉 (*P. capsici*), 立枯丝核菌 (*R. solani*) 和大丽轮枝菌 (*Verticillium dahlia*) (Stinson *et al.*, 2003; Grimme *et al.*, 2007; Camp *et al.*, 2008)。不仅在土壤中的作用, *M. albus* 产生的 MVOCs 同样能对储藏期果蔬的腐烂起到高效的抑制作用。*M. albus* 产生的 MVOCs 可以防治由 *Penicillium expansum* 引起的苹果青霉病和 *Botrytis cinerea* 引起的苹果灰霉病以及 *Monilinia fruticola* 引起的桃子的褐腐病 (Mercier *et al.*, 2004; Schnabel *et al.*, 2006)。然而,产生抗菌 MVOCs 并不是 *Muscordor* 真菌的特定能力,多种植物内生真菌可以产生具有抗菌作用的 MVOCs (表 2)。迄今为止,这些产生抗菌 MVOCs 的丝状真菌大多数属于子囊菌门炭角菌目 (Xylariales) 及归属于粪壳菌纲、座囊菌纲、锤舌菌纲的子囊菌。另外,担子菌少数种类也能释放抗菌 MVOCs, 其中 *Schizophyllum commune* 较为引人关注,因为与其他真菌来源不同,它是从腐朽的金属上分离的,在自然界中营腐生生活。还有一类不能忽视的释放抗菌 MVOCs 的微生物——酵母。已报道出芽短梗霉 (*Aureobasidium pullulans*)、酿酒酵母 (*Saccharomyces cerevisiae*)、间型假丝酵母 (*Candida intermedia*)、*Wickerhamomyces anomalus* 和 *Metschnikowia pulcherrima* 释放的抗菌 MVOCs 能够抑制水果和蔬菜的储藏期腐烂病 (Stinson *et al.*, 2003; Huang *et al.*, 2011; Parafati *et al.*, 2015)。

### 3 抗菌 MVOCs 的活性成分多样

研究发现,微生物产生的 MVOCs 是成分复杂的

混合物,目前,已鉴定超过 250 种来自真菌、346 种来自细菌的 MVOCs 成分 (Schulz *et al.*, 2007; Morath *et al.*, 2012)。这些挥发性物质包括醇类、酯类、烃、萜、酮、含硫化合物和羧酸类物质。一个确定的种类或菌株产生的 MVOCs 成分是会随着培养基质、培养时间、温度和其他环境参数的变化而有所不同 (Korpi *et al.*, 2009; Morath *et al.*, 2012)。Minerdi 等 (2009) 和 Zhang 等 (2015) 分别报道了尖孢镰刀菌 (*F. oxysporum*) WT MSA35 菌株和 CanR-46 菌株能够释放抗菌 MVOCs。但两个菌株产生的 MVOCs 成分并不完全相同。两个菌株均能产生  $\beta$ -石竹烯,但在 WT MSA 35 菌株释放的 MVOCs 中起抗菌作用的是  $\alpha$ -葎草烯;而在 CanR-46 释放的抗菌 MVOCs 中却没有  $\alpha$ -葎草烯,起主要作用的是 5-己烯酸。

某一特定种类微生物释放的抗菌物质,其抑菌谱会因菌株的不同而有所差异。多项研究证明, *Muscordor* 属真菌的不同种释放的 MVOCs 成分多样性的,其抑菌谱也是多样的 (Strobel *et al.*, 2001; Stinson *et al.*, 2003; Ezra *et al.*, 2004; Mitchell *et al.*, 2010; Zhang *et al.*, 2010)。通过检测 WT MSA35 释放的 MVOCs 对不同种类、致病型的镰刀菌属真菌的抑制作用,结果发现 WT MSA35 对致病性 *F. oxysporum* 抑制明显 (Minerdi *et al.*, 2009), 而 CanR-46 对 *F. oxysporum* 的抑菌作用却远不如对核盘菌属 (*Sclerotinia*) 真菌的抑菌作用 (Zhang *et al.*, 2015)。

抗菌性 MVOCs 表现出的抑菌活性往往是由混合物中的多种成分共同起作用,单独一种成分往往不能表现出与 MVOCs 混合物相当的抗菌效果。植物内生真菌 *M. albus* 释放的 MVOCs 成分主要有五类物质:醇、酯、酮、酸和脂。每一类物质单独抑制供试微生物的生长,但是不能导致供试病原微生物的死亡。然而,混合五类物质则会杀死多种供试的植物和人类病原菌 (Strobel *et al.*, 2001)。即便如此,人们还是通过仪器分析、购买或合成相关物质成分,通过生物活性检测,确定了一些在微生物 MVOCs 中起到抗菌作用的单物质成分 (表 3)。

### 4 微生物抗菌挥发性物质的应用

在农业、工业和制药方面, MVOCs 都有应用潜力,在农业生产方面, MVOCs 的应用在于: MVOCs 作为生物防治剂来控制植物病原,可以减少化学杀菌剂使用,是更无害环境的病害管理策略。鉴于微生物挥发性物质抗菌物质的特性,释放抗菌性

表2 产生挥发性抗菌物质的内生真菌菌株以及防治病原菌种类

Table 2 The endophytic fungal strains which can produce MVOCs and the plant pathogens inhibited by the MVOCs

MVOCs 产生真菌	MVOCs 抑制对象	参考文献
白囊耙齿菌 <i>Irpex lacteus</i>	白粉菌 <i>Oidium</i> spp.	Koitabashi <i>et al.</i> , 2004
<i>Myrothecium inudatum</i>	终极腐霉 <i>Pythium ultimum</i>	Banerjee <i>et al.</i> , 2010
多节孢属 <i>Nodulisporium</i> sp.	核盘菌 <i>Sclerotinia sclerotiorum</i>	
	葱链格孢菌 <i>Alternaria porri</i>	
	茄链格孢 <i>Alternaria solani</i>	
	辣椒炭疽病菌 <i>Colletotrichum capsici</i>	
	香蕉炭疽病 <i>Colletotrichum musae</i>	
	胶孢炭疽菌 <i>Colletotrichum gloeosporioides</i>	
	尖孢镰刀菌 <i>Fusarium oxysporum</i>	Suwannarach <i>et al.</i> , 2013
	茄镰刀菌 <i>Fusarium solani</i>	
	稻黑孢 <i>Nigrospora oryzae</i>	
	指状青霉 <i>Penicillium digitatum</i>	
	扩展青霉 <i>Penicillium expansum</i>	
	立枯丝核菌 <i>Rhizoctonia solani</i>	
	齐整小核菌 <i>Sclerotium rolfsii</i>	
<i>Oxyporus latemarginatus</i>	链格孢 <i>Alternaria alternata</i>	Lee <i>et al.</i> , 2009
	灰葡萄孢 <i>Botrytis cinerea</i>	
	胶孢炭疽菌 <i>Colletotrichum gloeosporioides</i>	
	尖孢镰刀菌 <i>Fusarium oxysporum</i>	
	立枯丝核菌 <i>Rhizoctonia solani</i>	
扩展青霉 <i>Penicillium expansum</i>	灰葡萄孢 <i>Botrytis cinerea</i>	Rouissi <i>et al.</i> , 2013
	尖孢炭疽菌 <i>Colletotrichum acutatum</i>	
	核果褐腐病菌 <i>Monilinia laxa</i>	
	扩展青霉 <i>Penicillium expansum</i>	
<i>Phoma</i> sp. 茎点霉属	玉蜀黍长蠕孢 <i>Ceratocystis ulmi</i>	Strobel <i>et al.</i> , 2011
	甜菜生尾孢 <i>Cercospora beticola</i>	
	棕榈疫霉 <i>Phytophthora palmivora</i>	
	核盘菌 <i>Sclerotinia sclerotiorum</i>	
	大丽轮枝菌 <i>Verticillium dahliae</i>	
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	<i>Guignardia citricarpa</i>	Fialho <i>et al.</i> , 2010
<i>Sporidiobolus pararoseus</i>	灰葡萄孢 <i>Botrytis cinerea</i>	Huang <i>et al.</i> , 2012
<i>Trichoderma</i> spp. 木霉	尖孢镰刀菌 <i>Fusarium oxysporum</i>	Amin <i>et al.</i> , 2010
	立枯丝核菌 <i>Rhizoctonia solani</i>	
	白绢病菌 <i>Sclerotium rolfsii</i>	
	核盘菌 <i>Sclerotinia sclerotiorum</i>	
	辣椒炭疽病 <i>Colletotrichum capsici</i>	
	稻长蠕孢 <i>Helminthosporium oryzae</i>	
	甘蓝链格孢 <i>Alternaria brassicicola</i>	
	镰刀菌 <i>Fusarium</i> spp.	Minerdi <i>et al.</i> , 2009
尖孢镰刀菌 <i>Fusarium oxysporum</i>		
尖孢镰刀菌 <i>Fusarium oxysporum</i>	大丽轮枝菌 <i>Verticillium dahliae</i>	Zhang <i>et al.</i> , 2015
炭角菌属 <i>Xylaria</i> sp.	瓜果腐霉 <i>Pythium aphanidermatum</i>	Sánchez-Ortiz <i>et al.</i> , 2016
	辣椒疫霉 <i>Phytophthora capsici</i>	
<i>Nodulisporium</i> sp.	瓜果腐霉 <i>Pythium aphanidermatum</i>	Sánchez-Fernández <i>et al.</i> , 2016

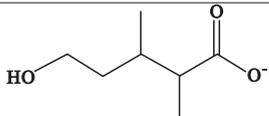
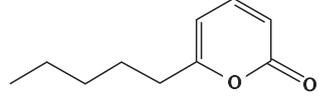
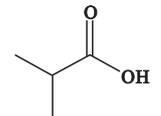
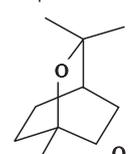
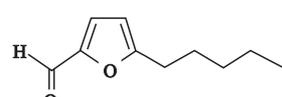
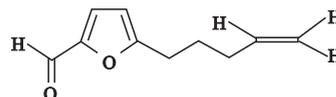
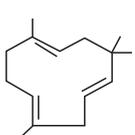
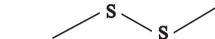
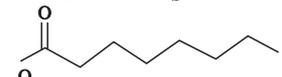
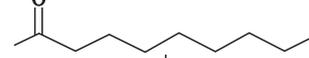
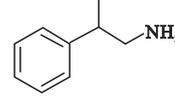
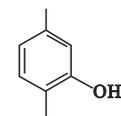
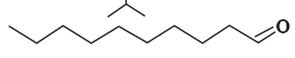
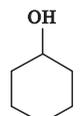
MVOCs 菌株的使用一般是在相对密封的环境中。据现有的报道, MVOCs 主要在土壤(地下)和气相(地上)环境中使用。

土壤抑菌作用, 指在有利的温度和湿度条件下真菌繁殖体未能萌发或真菌菌丝生长受到抑制, 其作用方式有多种, 抑制性化合物的释放是重要的方面(Morath *et al.*, 2012)。微生物释放的 MVOCs, 凭借自身的特性, 很好地充满土壤孔隙并在土壤中渗透、传播较远的距离(Aochi *et al.*, 2005)。例如, 从土壤中分离的野生型 *F. oxysporum* 菌株 WT MSA35 和它的伴生细菌释放的 MVOCs 可以致病性 *F. oxys-*

*porum* 的生长(Minerdi *et al.*, 2009)。内生真菌 *M. albus* 同样可以用于防治土传病害。当向土壤中施入 *M. albus* 可以防治由立枯丝核菌(*R. solani*)引起的西兰花猝倒病和由辣椒疫霉(*P. capsici*)引起的灯笼椒根腐病(Mercier *et al.*, 2005), 研究者将 *M. albus* 的黑麦培养物超过  $15 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  (营养土体积) 加入到营养土中, 5 d 后, 仅接种病原菌的处理 100% 死亡, 而接种 *M. albus* 的处理, 健苗数 ( $47 \pm 3$ ) 与未接种病原菌的处理健苗数 ( $49 \pm 3$ ) 相当 ( $P = 0.05$ )。当然, 细菌产生的 MVOCs 也具有防治土传病害的潜力(Kai *et al.*, 2009)。抑菌作用是针对病原菌的一种

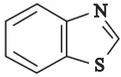
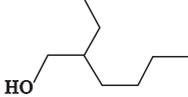
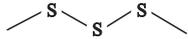
表 3 部分由微生物释放的抗菌 MVOCs 成分

Table 3 Selected antimicrobial volatile compound produced by fungi or bacteria

物质名称	化学式	来源	参考文献
1-Butanol-3-, methyl-, acetate		炭角菌属 <i>Xylaria</i> sp. PB3f3	Sánchez-Ortiz <i>et al.</i> , 2016
6-Pentyl- $\alpha$ -pyrone		木霉属 <i>Trichoderma</i> sp.	Dodd <i>et al.</i> , 2000
Isobutyric acid		<i>Muscodor albus</i>	Mercier <i>et al.</i> , 2007
1,8-Cineole		炭角菌属 <i>Hypoxyylon</i> sp.	Shaw <i>et al.</i> , 2015
5-Hexenoic acid		尖孢镰刀菌 <i>Fusarium oxysporum</i>	Zhang <i>et al.</i> , 2015
5-Pentyl-2-furaldehyde		白囊耙齿菌 <i>Irpex lacteus</i>	Koitaishi <i>et al.</i> , 2004
5-(4-Pentenyl)-2-furaldehyde			
$\alpha$ -Humulene		尖孢镰刀菌 <i>Fusarium oxysporum</i>	Minerdi <i>et al.</i> , 2009
1,3,5,7 Cyclooctatetraene		胶枝霉属 <i>Gliocladium</i> sp.	Stinson <i>et al.</i> , 2003
Dimethyl disulfide		<i>Streptomyces alboflavus</i>	Wang <i>et al.</i> , 2013
2-Nonanone			
2-Decanone			
$\beta$ -Benzeneethanamine			
Thymol		芽孢杆菌属 <i>Bacillus</i>	Zheng <i>et al.</i> , 2013
Decanal		桔黄假单胞菌 <i>Pseudomonas aurantiaca</i> 绿针假单胞菌 <i>Pseudomonas chlororaphis</i>	Fernando <i>et al.</i> , 2005
Cyclohexanol		绿针假单胞菌 <i>Pseudomonas chlororaphis</i>	

续表 3

Table 3 Continued

物质名称	化学式	来源	参考文献
Benzothiazole		绿针假单胞菌 <i>Pseudomonas chlororaphis</i>	
2-Ethyl, 1-hexanol		荧光假单胞菌 <i>Pseudomonas fluorescens</i> 皱纹假单胞菌 <i>Pseudomonas corrugate</i> 绿针假单胞菌 <i>Pseudomonas chlororaphis</i> 桔黄假单胞菌 <i>Pseudomonas aurantiaca</i>	
Dimethyl trisulfide		绿针假单胞菌 <i>Pseudomonas chlororaphis</i>	

病害防治机制,除此之外, MVOCs 与植物之间也存在互作, MVOCs 对植物有益的作用之一是诱导植物的防卫反应以抵抗病原菌的侵入。Ryu 等(2004)研究发现,将拟南芥暴露于枯草芽孢杆菌(*B. subtilis*) GB03 和解淀粉芽孢杆菌(*B. amyloliquefaciens*) IN937a 产生的 MVOCs 中,能够诱导拟南芥乙烯介导的抗病途径,降低由胡萝卜软腐欧文氏杆菌(*Erwinia carotovora* subsp. *carotovora*)引起的腐烂病。这是 MVOCs 防治植物病害的另一作用机制。

与土壤环境不同,地上环境中应用 MVOCs 需要一个相对密封的环境,而果蔬采收后的储存与运输提供了这样的环境。目前,关于利用 MVOCs 的熏蒸也主要集中在这个领域(Gomes *et al.*, 2015)。微生物熏蒸成为替代化学农药用以防治采收后果蔬真菌病害的良好选择。相比较传统的防治方法,微生物熏蒸有独特的优点:微生物熏蒸不需要拮抗体(释放 MVOCs 的微生物)与植物产品直接接触;抗菌 MVOC 在密封环境中很容易扩散至整个环境;抗菌 MVOCs 不会在植物产品表面留下残留物。虽然人们通过研究发现了多种具有应用前景的微生物菌株,但目前真正正在使用的微生物制剂屈指可数。如何将实验室内取得的良好效果转移到实际生产中,还面临很多的挑战。

## 5 展望

本文从挥发性有机物的收集、分析方法、释放抗菌 MVOCs 的微生物种类多样性、抗菌 MVOCs 的活性成分多样性和微生物抗菌 MVOCs 的应用五个方面进行了综述。从中可以证明,释放 MVOC 的微生物种类多样性和 MVOCs 成分的多样性,而且这种多样性在过去很可能被低估。对于植物病害生物防治而言,微生物熏蒸是替代化学药剂进行土传病害和储藏期果蔬病害防治的良好选择,虽然人们在实验

室内获得了大量效果良好的微生物菌株,但是实际应用却非常少。目前,关于抗菌性 MVOCs 的抑菌机理鲜有报道,可能是因为抗菌性 MVOCs 抗菌成分的复杂性。因此,作者认为今后可以进行 4 个方面的研究:一是能够加快具有特殊生物活性和功能的新代谢产物的结构解析,从目前的研究论文来看,人们所能收集到的 MVOCs 量很少,仅能依靠质谱数据库对 VOC 成分进行分析,而这种分析将会错过新化合物;二是 MVOC 功能分析,应该明确 MVOCs 在微生物互作、群落的作用且分析它们在生态平衡的重要性;第三,探究抗菌性 MVOCs 的作用机制;第四,便捷有效的使用技术开发将是产抗菌 MVOC 的微生物在植物病害生物防治应用研究的重要方向。

## 参考文献

- 纪飞,李静,李臻峰,等. 2014. 电子鼻在食品领域的应用. *安徽农业科学*, **42**(25): 8747-8748.
- 李宝庆,鹿秀云,郭庆港,等. 2010. 枯草芽孢杆菌 BAB-1 产脂肽类及挥发性物质的分离和鉴定. *中国农业科学*, **43**(17): 3547-3554.
- 李其利. 2011. 链霉菌 JK-1 的鉴定及其防病潜能和防病机制的研究(博士学位论文). 武汉:华中农业大学.
- 万明国. 2008. 源于水稻的链霉菌菌株 F-1 的鉴定及其防病潜力和防病机制研究(博士学位论文). 武汉:华中农业大学.
- 郑哲洲,林雪娟. 2012. 电子鼻在医学诊断中的应用研究. *世界科学技术:中医药现代化*, **14**(6): 2115-2119.
- 邹慧琴,刘勇,林辉,等. 2011. 电子鼻技术及应用研究进展. *传感器世界*, **17**(11): 4-5.
- Amin F, Razdan VK, Mohiddin FA, *et al.* 2010. Potential of *Trichoderma* species as biocontrol agents of soil borne fungal propagules. *Journal of Phytotherapy*, **2**: 38-41.
- Aochi YO, Farmer WJ. 2005. Impact of soil microstructure on the molecular transport dynamics of 1, 2-dichloroethane. *Geoderma*, **127**: 137-153.
- Arrebola E, Sivakumar D, Korsten L. 2010. Effect of volatile compounds produced by *Bacillus* strains on postharvest decay in citrus. *Biological Control*, **53**: 122-128.
- Banerjee D, Strobel GA, Booth E, *et al.* 2010. An endophytic

- Myrothecium inundatum* producing volatile organic compounds. *Mycosphere*, **1**: 229–240.
- Bastos AC, Magan N. 2007. Soil volatile fingerprints: Use for discrimination between soil types under different environmental conditions. *Sensors and Actuators B Chemical*, **125**: 556–562.
- Booth E, Strobel G, Knighton B, *et al.* 2011. A rapid column technique for trapping and collecting of volatile fungal hydrocarbons and hydrocarbon derivatives. *Biotechnology Letters*, **33**: 1963–1972.
- Camp AR, Dillard HR, Smart CD. 2008. Efficacy of *Muscodor albus* for the control of phytophthora blight of sweet pepper and butternut squash. *Plant Disease*, **92**: 1488–1492.
- Chaintreau A. 2001. Simultaneous distillation-extraction: From birth to maturity-Review. *Flavour & Fragrance Journal*, **16**: 136–148.
- Dodd SL, Hill RA, Stewart A. 2000. Control of *Athelia rolfsii* disease on lentil seedlings using 6-pentyl- $\alpha$ -pyrone. *Soil Biology and Biochemistry*, **32**: 1033–1034.
- Duarte C, Moldão-Martins M, Gouveia AF, *et al.* 2004. Supercritical fluid extraction of red pepper (*Capsicum frutescens* L.). *Journal of Supercritical Fluids*, **30**: 155–161.
- Ezra D, Jasper J, Rogers T, *et al.* 2004. Proton transfer reaction-mass spectrometry as a technique to measure volatile emissions of *Muscodor albus*. *Plant Science*, **166**: 1471–1477.
- Fernando WGD, Ramarathnam R, Krishnamoorthy AS, *et al.* 2005. Identification and use of potential bacterial organic antifungal volatiles in biocontrol. *Soil Biology and Biochemistry*, **37**: 955–964.
- Fialho MB, Toffano L, Pedroso MP, *et al.* 2010. Volatile organic compounds produced by *Saccharomyces cerevisiae* inhibit the in vitro development of *Guignardia citricarpa* the causal agent of citrus black spot. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, **26**: 925–932.
- Fiddaman PJ, Rossall S. 1993. The production of antifungal volatiles by *Bacillus subtilis*. *Journal of Applied Bacteriology*, **74**: 119–126.
- Gomes AAM, Queiroz MV, Pereira OL. 2015. Mycofumigation for the biological control of post-harvest diseases in fruits and vegetables; A Review. *Austin Journal of Biotechnology and Bioengineering*, **2**: 1051.
- Grimme E, Zidack NK, Sikora RA, *et al.* 2007. Comparison of *Muscodor albus* volatiles with a biorational mixture for control of seedling diseases of sugar beet and root-knot nematode on tomato. *Plant Disease*, **91**: 220–225.
- Huang R, Che HJ, Zhang J, *et al.* 2012. Evaluation of *Sporidiobolus pararoseus*, strain YCXT3 as biocontrol agent of *Botrytis cinerea*, on post-harvest strawberry fruits. *Biological Control*, **62**: 53–63.
- Huang R, Li GQ, Zhang J, *et al.* 2011. Control of postharvest *Botrytis* fruit rot of strawberry by volatile organic compounds of *Candida intermedia*. *Phytopathology*, **101**: 859–869.
- Islam MR, Jeong YT, Lee YS, *et al.* 2012. Isolation and identification of antifungal compounds from *Bacillus subtilis* C9 inhibiting the growth of plant pathogenic fungi. *Mycobiology*, **40**: 59–66.
- Kai M, Effmert U, Berg G, *et al.* 2007. Volatiles of bacterial antagonists inhibit mycelial growth of the plant pathogen *Rhizoctonia solani*. *Archives of Microbiology*, **187**: 351–360.
- Kai M, Hausteim M, Molina F, *et al.* 2009. Bacterial volatiles and their action potential. *Applied Microbiology and Biotechnology*, **81**: 1001–1012.
- Koitabashi M, Kajitani Y, Hirashima K. 2004. Antifungal substances produced by fungal strain Kyu-W63 from wheat leaf and its taxonomic position. *Journal of General Plant Pathology*, **70**: 124–130.
- Korpi A, Järnberg J, Pasanen AL. 2009. Microbial volatile organic compounds. *Critical Reviews in Toxicology*, **39**: 139–193.
- Kreuzwieser J. 2015. The Venus flytrap attracts insects by the release of volatile organic compounds. *Journal of Experimental Botany*, **65**: 755–766.
- Lee SO, Kim HY, Choi GJ, *et al.* 2009. Mycofumigation with *Oxyporus latemarginatus* EF069 for control of postharvest apple decay and *Rhizoctonia* root rot on moth orchid. *Journal of Applied Microbiology*, **106**: 1213–1219.
- Lemfack MC, Nickel J, Dunkel M, *et al.* 2014. mVOC: A database of microbial volatiles. *Nucleic Acids Research*, **42**: 744–748.
- Liu W, Wei M, Zhu B, *et al.* 2008. Antifungal activities and components of VOCs produced by *Bacillus subtilis* G8. *Current Research in Bacteriology*, **28**: 28–34.
- Matysik S, Herbarth O, Mueller A. 2009. Determination of microbial volatile organic compounds (MVOCs) by passive sampling onto charcoal sorbents. *Chemosphere*, **76**: 114–119.
- McCain AH. 1966. A volatile antibiotic by *Streptomyces griseus*. *Phytopathology*, **56**: 150.
- Mercier J, Jiménez JI. 2004. Control of fungal decay of apples and peaches by the biofumigant fungus *Muscodor albus*. *Postharvest Biology and Technology*, **31**: 1–8.
- Mercier J, Jiménez JI. 2007. Potential of the volatile-producing fungus *Muscodor albus* for control of building molds. *Canadian Journal of Microbiology*, **53**: 404–410.
- Mercier J, Manker DC. 2005. Biocontrol of soil-borne diseases and plant growth enhancement in greenhouse soilless mix by the volatile-producing fungus *Muscodor albus*. *Crop Protection*, **24**: 355–362.
- Mills GA, Walker V. 2000. Headspace solid-phase microextraction procedures for gas chromatographic analysis of biological fluids and materials. *Journal of Chromatography A*, **902**: 267–287.
- Minerdi D, Bossi S, Gullino ML, *et al.* 2009. Volatile organic compounds: A potential direct long-distance mechanism for antagonistic action of *Fusarium oxysporum* strain MSA35. *Environmental Microbiology*, **11**: 844–854.
- Mitchell AM, Strobel GA, Moore E, *et al.* 2010. Volatile antimicrobials from *Muscodor crispans*, a novel endophytic fungus. *Microbiology*, **156**: 270–277.
- Morath SU, Hung R, Bennett JW. 2012. Fungal volatile organic compounds: A review with emphasis on their biotechnological potential. *Fungal Biology Reviews*, **26**: 73–83.

- Pandit SS, Chidley HG, Kulkarni RS, *et al.* 2009. Cultivar relationships in mango based on fruit volatile profiles. *Food Chemistry*, **114**: 363–372.
- Parafati L, Vitale A, Restuccia C, *et al.* 2015. Biocontrol ability and action mechanism of food-isolated yeast strains against *Botrytis cinerea*, causing post-harvest bunch rot of table grape. *Food Microbiology*, **47**: 85–92.
- Raza W, Wang J, Wu Y, *et al.* 2016. Effects of volatile organic compounds produced by *Bacillus amyloliquefaciens* on the growth and virulence traits of tomato bacterial wilt pathogen *Ralstonia solanacearum*. *Applied Microbiology and Biotechnology*, **100**: 7639–7650.
- Rouissi W, Ugolini L, Martini C, *et al.* 2013. Control of post-harvest fungal pathogens by antifungal compounds from *Penicillium expansum*. *Journal of Food Protection*, **76**: 1879–1886.
- Ryu CM, Farag MA, Hu CH, *et al.* 2004. Bacterial volatiles induce systemic resistance in *Arabidopsis*. *Plant Physiology*, **134**: 1017–1026.
- Sánchez-Fernández RE, Diaz D, Duarte G, *et al.* 2016. Antifungal volatile organic compounds from the endophyte *Nodulisporium* sp. strain GS4d2IIIa: A qualitative change in the intraspecific and interspecific interactions with *Pythium aphanidermatum*. *Microbial Ecology*, **71**: 347–364.
- Sánchez-Ortiz BL, Duarte G, Lappe-Oliveras P, *et al.* 2016. Antifungal, antioomycete and phytotoxic effects of volatile organic compounds from the endophytic fungus *Xylaria* sp. strain PB3f3 isolated from *Haematoxylon brasiletto*. *Journal of Applied Microbiology*, **120**: 1313–1325.
- Schnabel G, Mercier J. 2006. Use of a *Muscodor albus*, pad delivery system for the management of brown rot of peach in shipping cartons. *Postharvest Biology and Technology*, **42**: 121–123.
- Schulz S, Dickschat JS. 2007. Bacterial volatiles: The smell of small organisms. *Natural Product Reports*, **24**: 814–842.
- Scotter JM, Langford VS, Wilson PF. 2005. Real-time detection of common microbial volatile organic compounds from medically important fungi by Selected Ion Flow Tube-Mass Spectrometry (SIFT-MS). *Journal of Microbiological Methods*, **63**: 127–134.
- Shashidar A, Staffan M, Agerlin PM, *et al.* 2016. Multiple effects of *Bacillus amyloliquefaciens* volatile compounds: Plant growth promotion and growth inhibition of phytopathogens. *FEMS Microbiology Ecology*, **92**: fiw070.
- Shaw JJ, Berbasova T, Sasaki T, *et al.* 2015. Identification of a fungal 1,8-cineole synthase from *Hypoxylon* sp. with specificity determinants in common with the plant synthases. *The Journal of Biological Chemistry*, **290**: 8511–8526.
- Siani AC, Garrido IS, Monteiro SS, *et al.* 2004. *Protiumicari-ba*, as a source of volatile essences. *Biochemical Systematics and Ecology*, **32**: 477–489.
- Stinson AM, Zidack NK, Strobel GA, *et al.* 2003. Mycofumigation with *Muscodor albus* and *Muscodor roseus* for control of seedling diseases of sugar beet and *Verticillium wilt* of eggplant. *Plant Disease*, **87**: 1349–1354.
- Stinson M, Ezra D, Hess WM, *et al.* 2003. An endophytic *Gliocladium* sp. of *Eucryphia cordifolia*, producing selective volatile antimicrobial compounds. *Plant Science*, **165**: 913–922.
- Strobel G, Manker DC, Mercier J. 2003. Novel endophytic fungi and methods of use. USA; US 20030186425A1.
- Strobel G, Singh SK, Riyaz-Ul-Hassan S, *et al.* 2011. An endophytic/pathogenic *Phoma* sp. from creosote bush producing biologically active volatile compounds having fuel potential. *FEMS Microbiology Letters*, **320**: 87–94.
- Strobel GA, Dirkse E, Sears J, *et al.* 2001. Volatile antimicrobials from *Muscodor albus*, a novel endophytic fungus. *Microbiology*, **147**: 2943–2950.
- Suwannarach N, Kumla J, Bussaban B, *et al.* 2013. Biofumigation with the endophytic fungus *Nodulisporium* spp. CMU-UPE34 to control postharvest decay of citrus fruit. *Crop Protection*, **45**: 63–70.
- Wang C, Wang Z, Qiao X, *et al.* 2013. Antifungal activity of volatile organic compounds from *Streptomyces alboflavus* td1. *FEMS Microbiology Letters*, **341**: 45–51.
- Webster B, Gezan S, Bruce T, *et al.* 2010. Between plant and diurnal variation in quantities and ratios of volatile compounds emitted by *Vicia faba*, plants. *Phytochemistry*, **71**: 81–89.
- Yuan J, Raza W, Shen Q, *et al.* 2012. Antifungal activity of *Bacillus amyloliquefaciens* NJN-6 volatile compounds against *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*. *Applied & Environmental Microbiology*, **78**: 5942–5944.
- Zhang CL, Wang GP, Mao LJ, *et al.* 2010. *Muscodorfengyan-gensis* sp. nov. from southeast China; Morphology, physiology and production of volatile compounds. *Fungal Biology*, **114**: 797–808.
- Zhang Q, Yang L, Zhang J, *et al.* 2015. Production of anti-fungal volatiles by non-pathogenic *Fusarium oxysporum* and its efficacy in suppression of *Verticillium wilt* of cotton. *Plant and Soil*, **392**: 101–114.
- Zhang X, Li B, Wang Y, *et al.* 2013. Lipopeptides, a novel protein, and volatile compounds contribute to the antifungal activity of the biocontrol agent *Bacillus atrophaeus* CAB-1. *Applied Microbiology & Biotechnology*, **97**: 9525–9534.
- Zhang Z, Li G. 2010. A review of advances and new developments in the analysis of biological volatile organic compounds. *Microchemical Journal*, **95**: 127–139.
- Zheng M, Shi J, Shi J, *et al.* 2013. Antimicrobial effects of volatiles produced by two antagonistic *Bacillus* strains on the anthracnose pathogen in postharvest mangos. *Biological Control*, **65**: 200–206.
- Zou CS, Mo MH, Gu YQ, *et al.* 2007. Possible contributions of volatile-producing bacteria to soil fungistasis. *Soil Biology & Biochemistry*, **39**: 2371–2379.

作者简介 张清华,男,1986年生,博士,讲师,从事森林病理学相关研究。E-mail: zhangqinghua@fafu.edu.cn  
责任编辑 魏中青