

植物挥发性有机物的研究进展

蒋冬月¹, 李永红²

(1. 北京林业大学 园林学院, 北京 100083; 2. 深圳职业技术学院, 广东 深圳 518055)

摘要:植物挥发物在生态系统中起着重要的作用, 且与人们健康息息相关。在对大量国内外文献资料研究的基础上, 从挥发性有机物的概念、合成代谢、影响因素和研究方法等方面, 分别阐述了目前国内外研究进展, 并在此基础上提出今后的研究方向。

关键词:植物; 挥发性化合物; 作用; 收集

中图分类号: S718.43

文献标识码: A

文章编号: 1002-2767(2011)11-0143-07

植物挥发性有机物具有杀菌抑菌、改变环境的氧化还原状态、改变空气对流层化学成分和全球碳循环的作用; 且与人体健康密切相关, 因而在现代园林绿化中, 人们开始重视植物挥发性有机物的作用, 并关注“植物-环境-人体”之间奇妙的化学生态效应。目前人们对植物挥发物的研究主要集中在挥发物成分鉴定及其保健作用。

1 植物挥发性有机物的定义、分类和合成

1.1 挥发性有机物的定义

植物挥发性有机物 (Volatile organic compounds; VOCs) 是通过植物体内的次生代谢途径合成的低沸点、易挥发的小分子化合物^[1-2]。主要包括烃、醇、醛、酮、酯和有机酸等, 含量虽低, 但化学活性很高。

1.2 挥发性有机物的分类

植物在其生理过程中释放的挥发性物质, 是由多种化学性质不同的成分组成的混合物^[3-4]。在自然界中, 植物 VOCs 的组成大约有 30 000 多种化合物^[5], 根据其合成途径、代谢类型和功能可分为 3 大类: 萜类 (异戊二烯、单萜和倍半萜)^[6]; 苯基/苯丙烷类; 脂肪酸衍生物^[7]。

1.3 植物挥发性有机物的合成部位

植物 VOCs 的合成是在不同组织器官的生理代谢过程中产生的, 主要是通过植物叶片散发到空气中, 不同植物中释放的 VOCs 组成成分有

明显的差异。按照植物 VOCs 的合成和释放部位的不同分为: (1) 在花和果实中合成释放的植物 VOCs, 主要包括芳香族化合物、萜类化合物和酯类化合物; (2) 在营养组织 (如叶片等) 中合成和释放的植物 VOCs, 包括萜类和脂肪酸衍生物 (如挥发性的醛类和醇类化合物), 此外还有一些特殊物质如含氮化合物吲哚等^[8]。

1.4 植物挥发性有机物的合成途径

在高等植物体内, 植物 VOCs 合成途径主要包括 3 条: (1) 类异戊二烯合成途径, 主要合成萜类化合物 (如单萜、倍半萜和二萜)。萜类合成共同的前体是异戊烯基二磷酸和二甲基烯丙基二磷酸^[9]; (2) 脂肪酸合成途径, 主要合成脂肪酸衍生物包括小分子的醇类和醛类, 其合成途径的主要调控酶是脂肪氧化酶; (3) 莽草酸合成途径, 主要是合成芳香族化合物, 主要调控酶为苯丙氨酸裂解酶^[7,10]。植物莽草酸代谢途径也产生许多具有生理和生态功能的化合物, 如吲哚、水杨酸和水杨酸甲酯。

1.5 挥发性有机物化学成分的鉴定

色谱法是俄国植物学家 Tswett 在 1906 年研究植物色素时创建的, 随后利用此原理创建了各种色谱仪。气相色谱法是色谱法的一种, 以气体做流动相, 以固体或液体做固定相, 可以对化合物分离并进行定性和定量分析。气相色谱/质谱联用仪是目前分析 VOCs 最有效的方法, 可以对样品中全部或指定成分作定性和定量分析, 是一种有效确定化合物分子结构的方法, 并且具有灵敏度高的特点, 灵敏度可达到 $1 \times 10^{-10} \sim 1 \times 10^{-14} \text{ g}^{[11]}$ 。

收稿日期: 2011-06-18

基金项目: 深圳市建筑水务署资助项目 (SCZG2010025750)

第一作者简介: 蒋冬月 (1988-), 女, 山东省泰安市人, 在读硕士, 从事园林植物应用研究。E-mail: jiangdy_2009@163.com。

通讯作者: 李永红 (1971-), 男, 湖南省岳阳县人, 博士, 教授, 从事园林植物研究。E-mail: liyonghong_03@163.com。

2 植物释放挥发性有机物的影响因素

2.1 影响植物释放挥发性有机物的内因

植物释放挥发性有机物种类和多少不仅与植物本身有关,且与植物所处的生理状态和发育阶段相关联。

植物 VOCs 的释放速率和成分组成在不同属植物及同属不同种植物之间有较大差别。Benjamin^[12]、Owen^[13]等人研究发现,不同属植物间 VOCs 的释放情况相差很大。如槭树属、白蜡树属和梨属植物的 VOCs 释放速率很低,甚至有许多树木种类没有单萜和异戊二烯的释放;松科的云杉属大多释放异戊二烯,而其它属不释放异戊二烯;而杨属、栎属和柳属树木种类的 VOCs 释放速率较高。同属的不同树种之间的 VOCs 释放速率也会有很大差异。Benjamin 对 26 种栎属植物的测试,结果释放速率最大可相差 22 倍。可见,树种差异是决定树木 VOCs 释放的首要因素,是树木的基本特征,它决定了不同树种所释放的 VOCs 的成分差异和释放速率的大小。

植物的树龄和发育状态的差异都对 VOCs 的释放具有十分重要的影响。许多有关树龄和树木 VOCs 释放关系的研究都表明,幼树具有更高的 VOCs 释放速率。Street 等人发现,在同样生境下的松树幼树枝叶的萜烯释放速率要比成年松树高出 2~3 倍^[14]。有研究表明四年生湿地松的萜烯释放速率是七年生湿地松的 8 倍^[15]。然而,Janzon 却发现,四十年生和一百四十年生欧洲赤松的 VOCs 释放速率没有明显的差异^[16]。Kuzma 和 Fall 报道,植物叶的年龄对异戊二烯的释放有较大的影响,幼叶的释放量要少于成熟叶片^[17]。Fall 从鹿茸叶中检测到类异戊二烯的发育调控,当叶子发育时,类异戊二烯的散发和类异戊二烯合成酶的活性都提高了 100 倍,叶子出现约 14 d 时达到峰值,之后逐渐衰落。树木发育部位的差异和所处发育阶段的不同也会影响 VOCs 的释放特征。一般,芽期和花期的 VOCs 释放速率要明显高于叶生长期,并且 VOCs 组分也有明显不同。

2.2 影响植物释放挥发性有机物的环境因子

外界环境条件的改变也会直接影响植物的代谢活动,从而影响植物 VOCs 的合成和释放。影响其合成和释放的环境因子包括生物因子(植物、昆虫和机械损伤等)和非生物因子(光照、温度、水

分、营养、CO₂ 浓度和空气湿度等)。赵美萍等人研究表明,温度越高,光强越大,植物排放 VOCs 的速率也越大^[18]。Sharkey 和 Loreto 发现葛藤在低温条件下(低于 19℃)异戊二烯的释放量消失,当温度升高时(如 26℃),完全展开的叶片才能被诱导产生异戊二烯,并且温度每升高 10℃ 异戊二烯的释放量增加 8 倍^[19]。Loreto 等研究地中海石砾发现,在光照和温度恒定的条件下,当 CO₂ 浓度从 350 $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ 升到 700 $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,石砾叶片的光合作用被刺激,3 种单萜(α -蒎烯、 β -蒎烯、桉烯)释放明显受到抑制,释放量降低了 68%。

3 挥发性有机化合物的作用

植物 VOCs 是重要的化学信息传递物质,在调节植物的生长、发育和繁衍^[20]、抵御环境胁迫以及预防动物和昆虫的危害等方面具有重要作用^[21];植物 VOCs 还具有抑制空气微生物的生长、改变环境的氧化还原状态、改变空气对流层化学成分和全球碳循环的作用,且与人体健康密切相关^[22]。

3.1 植物的挥发物具有杀菌抑菌的作用

远古时代,人们就已认识到植物的杀菌作用,常用植物汁液作为外科手术的消毒剂。随着科学的发展,人们开始对植物的杀菌作用进行科学研究。1928~1929 年,托金研究了洋葱、大蒜、芥和辣根菜等植物的新鲜碎糊所散发的挥发性物质,发现这些物质具有杀死葡萄球菌、链球菌及其它细菌的作用。M. H. 阿尔特米耶娃研究证明:松科、柏科、槭树科、木兰科、忍冬科、桃金娘科等很多植物对结核杆菌有抑制作用。Viljoen 等对南非药用香草植物精油进行了微生物抑菌试验,发现 1,8-桉叶油、樟脑可以抑制白色念珠菌、葡萄状球菌等细菌和真菌的繁殖^[23]。Delaquis 报道芫荽精油能够显著抑制细菌、酵母菌生长^[24]。

国内对于植物挥发物的杀菌作用已有许多报道,如褚泓阳、花晓梅^[25]、郭阿君^[3]和王发松^[26]等人的研究都表明树木具有杀菌作用;谢慧玲等报道了植物挥发性分泌物对空气微生物有杀灭作用^[27],并探索了城市绿化对减少空气含菌量的重要作用^[28]。郑林森、庞名瑜等报道了 47 种园林植物保健性挥发性物质抑菌作用的测定结果,指出不同植物种 VOCs 组分具有明显的差异,对空气中微生物具有不同的抑制效果^[29]。张庆费等

对上海主要园林树种抑菌物质和芳香成分进行定量测定,比较不同树种之间的气体挥发物种类含量,为绿化树种的合理选择和配置提供科学依据^[30]。

3.2 植物的挥发物对人体健康的影响

随着对植物挥发物生态意义的认识,人们开始研究植物挥发物与人体健康之间的关系。其实,早在 100 多年前,发达国家就提出“芳香疗法”“花香疗法”和“森林浴”等概念,发现植物体散发出的香气具有调节精神、解除疲劳、祛病保健的功效^[31]。近十几年,植物 VOCs 收集、分离和鉴定方法等方面取得的突破性进展,从机理上证实了这些保健功效主要得益于植物体散发的某些挥发性成分。因而在园林绿化中开始重视植物 VOCs 的作用,关注“植物-环境-人体”之间奇妙的化学生态效应。

人体生活周围的气味可以影响人的创造性、情绪、感知性能和身体健康^[32],当人们在工作中处于疲劳和紧张时,到林地或花园闻闻花香、深呼吸植物放出的香草气味,使人马上赶到精神振奋、头脑清醒和心情愉悦。通过心理学和数学心理学实验测定得出不同工作类型人员对香气的反应不同^[33]。Ilmberger 等研究发现,茉莉精油、薄荷精油、1,8-桉叶油、依兰精油可影响人体的注意过程,茉莉精油可使人体缓解紧张;薄荷精油、1,8-桉叶油可使人体精神振奋^[34]。日本在研究花香与工作效率时发现办公室的花香可以提高工作效率,打字员嗅闻花香后打字速度提高,出错率减少,当闻到柠檬香味的空气时,出错率竟然可减少 54%^[35]。Kikuchi 利用体积描记法研究香料对人体心率的影响发现,玫瑰油能够促使心率加快;相反,柠檬油具有镇静作用,则降低心率;雪松醇、龙脑和 1,8-桉叶油也能够降低心率和血压^[36]。Sugano 研究人体脑电波与香气之间的关系,发现薰衣草油和檀香油均能够提高 α -波活动;而茉莉精油提高 β -波活动^[37]。

郑华试验证明,在嗅闻月季花、菊花、雪松、侧柏等过程中,被试人的情绪趋向松弛;而嗅闻珍珠梅 VOCs 被试人的情绪趋向紧张和焦躁^[38]。黄建武等人研究发现森林环境中的芬多精、萜烯类等芳香物质能引起人体精神生理的愉悦舒畅感^[39]。孙宝国等人试验发现:香气清雅的萜烯类化合物对人体有松弛镇静作用;醇类化合物虽然

是绿叶及花果香气的重要组成成分,适量吸入可使人感到清新和振奋^[40]。王艳英等人利用多导电生理技术手段,从嗅觉的角度研究侧柏和香樟挥发物对人体的影响。结果表明侧柏环境中情绪趋于放松状态,感觉清新、舒爽、愉悦;而在香樟气味环境中人表现出紧张、不快及厌恶情绪^[41]。

3.3 对昆虫的影响

植物挥发物,尤其是遭受机械损伤或植食昆虫的侵害后释放的一系列复杂的挥发性物质为植物、植食性昆虫及其天敌提供有价值的信息^[42]。植物通过释放 VOCs 表明身份,吸引传粉昆虫和植食性昆虫。如烟草、地樱桃叶子浸提液中的挥发物能刺激烟芽夜蛾产卵,黑麦草的挥发物能有效地吸引蝗虫的若虫和成虫。植食性昆虫依靠健康或虫害植株释放的挥发物来区分是否是寄主植物^[43]。已有的研究表明,虫害诱导的挥发物会对同种昆虫个体产生排斥或引诱作用。如菜豆在受到二点叶螨严重为害时释放的挥发物,能驱避其它二点叶螨个体。

3.4 植物与植物的相互作用

许多研究者试验发现,植物间也通过某些挥发物进行“信息交流”。埃及车轴草释放的挥发物能抑制洋葱、胡萝卜和番茄种子的萌发;葡萄与紫罗兰释放的气体相互促进生长。Farmer、Karban^[44]等研究发现,将番茄和北美艾灌丛密闭在一起,健康番茄植株会大量积累能抑制昆虫取食的蛋白酶抑制素。黎华寿等人研究表明,香茅草挥发物对玉米和稗草幼苗的生物量、根长及苗高均产生显著抑制影响^[45]。

4 植物挥发物的收集方法

4.1 溶剂提取法

溶剂提取法是直接将产生气味的植物组织或者器官用有机溶剂浸泡一段时间后,取浸提液进行过滤和浓缩至一定体积的粗提物^[46]。其基本原理根据“相似相溶”原理,选择适当溶剂是溶剂提取法的关键。Robigvet 在 1835 年首先用溶剂法对挥发油浸提成功,并逐步实现了工业化。孙晓玲选用不同的有机溶剂对小叶榆和白桦的韧皮部进行了萃取,发现提取出的挥发物不同^[47]。董道青用正己烷、甲醇和乙醇等 5 种有机溶剂对夹竹桃叶进行提取,发现正己烷提取物对福寿螺的毒杀活性最高^[48]。

4.2 水蒸气蒸馏法

水蒸气蒸馏法是用水蒸气将目的物质从与其与水组成的混合体系中提取出来的过程。水蒸气蒸馏法适用于难溶或不溶于水的成分的提取,此类成分的沸点多在 100℃ 以上,且在约 100℃ 时存在一定的蒸气压,水蒸气将挥发性物质一并带出,然后经冷凝、萃取和浓缩^[49]。杜广钊^[50]、刘亚敏^[51]、巩江^[52]、李宗波^[53]和刘灏^[54]等人采用常规水蒸气蒸馏法提取不同植物的挥发油,利用 GC/MS 技术,分离鉴定出其中的成分。

4.3 超临界流体提取法

超临界液体 CO₂ 萃取技术是将 CO₂ 压缩调温到超临界状态,用以萃取分离各种有用物质。它已经广泛用于天然产物有效成分的提取分离上。例如:提取土荆芥精油,对组成成分进行分析,并应用于小菜蛾生物活性的研究^[55]。

4.4 顶空采集法

顶空吸附收集是目前能应用于活体植物挥发成分采集的主要方法,该方法源于分析固体或液体顶部蒸气相中的有机挥发性物质。现代顶空分析法已形成了一个相对完善的分析体系,主要分为 2 大类:静态顶空分析和动态顶空分析^[56]。

4.4.1 静态顶空 静态顶空分析法是顶空分析法发展中出现的最早形态。即将样品放置于有一定顶端空间的密闭容器中,在一定温度下放置一段时间,两相达到动态平衡后取气相部分进行色谱分析,它特别适用于低分子量易挥发化合物的测定。任雪冬^[57]、杨再波^[58]、孙印石^[59]等人分别采用顶空萃取 GC/MS 分析鉴定出香雪兰、马鞭草、玉兰中香气成分。

4.4.2 动态顶空采集法 包括吸附剂、吸附法和利用不锈钢罐采集法。

(1) 吸附剂吸附法:1972 年, Jennings 等提出用多孔高聚物树脂做吸附剂的吸附收集法,用于收集芳香型天然植物的挥发性成分。在半封闭容器中放入待测样品,利用惰性气体或空气在密闭气路中流动,带出容器内样品的挥发性成分,通过吸附管时被吸附剂吸附而分离出来。

(2) 利用不锈钢罐采集法:用惰性袋套住待采物后,用气泵抽去袋内杂质空气,使袋内瞬时达到近真空状态,然后立即冲入经过活性炭等单级或多级过滤介质过滤过的纯净空气。在采样室出口处连接的收集管将收集的气体导入真空的不锈钢

罐,然后即可进行分析。

金荷仙等人采用活体植株动态顶空套袋采集法与 TCT-GC/MS 联用分析技术相结合,采集分析梅花、桂花香气的化学成分^[60-61]。李娟^[62]、杨伟伟^[63]等人采用动态顶空采集吸附法分别监测四季和每天不同时段侧柏释放挥发物成分的变化。Dong Sik Yang 等人采用动态顶空采集和热吸附气相质谱方法分析白掌、虎尾兰、垂叶榕散尾葵挥发物的白昼变化,发现夜间植物挥发速率减少,其中白掌的挥发率最高^[64]。

4.5 电子鼻采样法

1998 年电子鼻问世,它可用于检测空气、土壤、水以及其它物质中所释放的气体。主要包括一个可移动的采样装置、一根短的气相色谱柱和一个表面声波检测器。电子鼻是一台小型气相色谱仪,因此它不能像 GC-MS 那样通过质谱图和保留时间的配合进行定性分析,并且由于某些化学标准品很难获得以及很多物质的保留时间十分接近甚至相同,所以不适合直接应用电子鼻对未知样品进行定性分析^[65]。

4.6 固相微萃取

SPME 由 Paw lisyn 首创,由手柄和萃取头两部分构成^[66]。其关键部位是一根涂不同色谱固定相或吸附剂的熔融石英纤维萃取头,采样时将熔融石英纤维推出针头,置于样品上层的顶空气体中,让植物 VOCs 富集于固定液上,萃取完毕后通过不锈钢毛细导管将熔融石英纤维注到气相色谱进样口,吸附在固定液中的 VOCs 借助于 GC 进样口高温快速进行解吸附,随后气化,进入色谱柱分离。

目前固相微萃取已得到较为广泛的应用。Potter 等用 SPME 与 GC-MS 相结合,分析了水中的苯、甲苯、乙苯、二甲苯,其检测结果优于美国环保局所规定的检测限^[67]。Page 等测定了食品中 VOCs,并讨论了影响该方法灵敏度和准确度的各种因素^[68]。Winkler^[69]、Miller^[70]、Schaffer^[71]和 An^[72]等使用 HS-SPME-GC-MS 法快速、准确地萃取和测定了不同植物叶片中的挥发物成分,且检测到了一些微量组分。

4.7 液空采集法

液空采集法的理论依据是用加湿的空气为载体,使植物长期保持新鲜的状态,采集到的成分应该更接近于植物散发到空气中的挥发物构成。其

装置由加湿部、样品室和挥发性气体浓缩部构成。空气由空气泵经活性炭过滤后,泵入一个装有水的容器,经加湿后的空气进入样品室,带有植物挥发性成分的气体经冰水冷阱、干冰乙醇冷阱冷凝收集,有时也可和吸附剂并用。由液空采集法获得的挥发性精油,其芳香的自然逼真度得到很高的评价^[73]。

4.8 冷阱收集法

20 世纪 80 年代初,刑其毅、张晓林等提出了冷冻收集法,并成功地应用于白兰鲜花的挥发性成分收集^[74]。此以吹气的方式从选定盛放预测天然植物的容器内带出其中的挥发性成分,使其依序通过冰盐浴、冷温冷阱,挥发性成分中的水分及沸点较高部分首先在冰盐浴中冷凝为低浓度的水溶液,然后其余部分在低温冷阱中冷凝为挥发油。

4.9 微波辐照诱导萃取法

微波辐照诱导萃取法是近年发展的从植物中提取香料的新技术。它利用一种波长极短、频率很高的辐射能来加热植物叶片,使细胞破裂,腺胞系统中所含的精油从细胞壁中自由流出、传递、转移至周围萃取介质^[75]。

目前,国内外搜集提取植物挥发性信息化合物的途径有很多,各有利弊。溶剂提取法提取时使用大量的溶剂,并将溶剂中的微量杂质沉积在产品中,造成提取物纯度不高。水蒸汽蒸馏法简单易行,但非活体提取会使某些挥发性物质受到破坏;蒸馏萃取法缩短了蒸煮时间,提取效果增强,但存在溶剂选择及干扰的问题。超临界流体提取法整个提取过程在低温条件下进行,具有防止氧化热解及提高品质等突出优势,萃取产品能够真实反映活体植物气味。动态顶空套袋采集法装置简单,便于室外操作,相对真实、准确,但在实施富集和洗脱过程中仍会受到不同程度的污染和损失。固相微萃取所需样品量少,操作方便、快捷,已在鲜花的香气成分分析中得到应用,但对于微量植物 VOCs 的成分分析和定量困难。液空收集法可以得到挥发性成分的浓缩物,其气味的自然逼真度得到很高评价,但其样品成分沸点范围较宽。综合各方面的考虑,顶空取样和固相微萃取还是目前应用最广的收集植物挥发物的方法,但在实际应用中还要根据取样的目的和用途选择最合适的方法。

5 展望

植物挥发性有机物的研究在世界范围内已成为关注的热点,相关科学研究在我国处于起步阶段,尚有诸多方面有待进一步探索和研究。今后植物挥发性有机物的研究重点是:(1)植物挥发物抑菌效果的研究中,提取出的物质均为有机混合物,应深入研究其抑菌机理和作用方式,找出其主导作用的化学结构和其相应官能团;(2)在植物挥发物与人体保健研究方面,缺少统一、明确的整体评价指标体系,应建立一套最有评价指标体系,且鉴定出挥发物中特异性保健成分;(3)目前对于植物挥发性有机物的研究多集中在成分鉴定上,对植物挥发物的释放情况及动态变化研究较少,应加大对植物挥发物季节性变化和日变化的动态研究,为园林应用和游人选择合适的游憩时间提供一定的指导。

参考文献:

- [1] Theis N, Lerdan M. The ecology and evolution of plant secondary metabolites[J]. *Plant Sci.*, 2003, 164(3): 92-102.
- [2] Benthley R. Secondary metabolites play primary roles in human affairs[J]. *Prospect Biol. Me.*, 1997, 40: 197-221.
- [3] 郭阿君, 岳桦. 观赏植物挥发物的研究[J]. *北方园艺*, 2003(6): 36-37.
- [4] 孙启祥, 彭镇华, 张齐生. 自然状态下杉木木材挥发物成分及其对人体身心健康的影响[J]. *安徽农业大学学报*, 2004, 31(2): 158-163.
- [5] Penuelas J, Llusia J. Plant VOC emissions: making use of the unavoidable[J]. *UTRENDS in Ecology and Evolution*, 2004, 19(8): 402-404.
- [6] Schreier P. Chromatographic studies of biogenesis of plant volatiles[M]. New York: Huthig Press, 1984.
- [7] Dixon R. Natural products and plant disease resistance[J]. *Nature*, 2001, 411: 843-847.
- [8] Pichersky E, Jonathan G. The formation and function of plant volatiles: perfumes for pollinator attraction and defense[J]. *Curr Opin Plant Biol.*, 2002, 5: 237-243.
- [9] Trapp S, Croteau R. Genomic organization of plant terpene synthases and molecular evolution implication[J]. *Genetics*, 2001, 158: 811-832.
- [10] 邓晓军, 陈晓亚, 杜家纬. 植物挥发性物质及其代谢工程[J]. *植物生理与分子生物学报*, 2004, 30(1): 11-18.
- [11] 阎凤鸣. 化学生态学[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [12] Benjamin M, Winer A. Estimating the ozone-forming potential of urban trees and shrubs[J]. *Atmos Environ*, 1998, 32(1): 53-68.
- [13] Owen S, Harley P, Guenther A. Light dependency of VOC emissions from selected Mediterranean plant species[J]. *Atmos Environ*, 2002, 36(19): 3147-3159.

- [14] Street R, Owen S, Duckham S. Effect of habitat and age on variations in volatile organic compound (VOC) emissions from *Quercus ilex* and *Pinus pinea* [J]. Atmos Environ, 1997, 31(1):89-100.
- [15] Kim J. Factors controlling natural VOC emissions in a southeastern US pine forest[J]. Atmos Environ, 2001, 35: 3279-3292.
- [16] Janson R. Monoterpene emissions from Scots pine and Norwegian Spruce [J]. J Geophys Res., 1993, 98: 2839-2850.
- [17] Kuzma J, Fall R. Leaf isoprene emission rate is dependent on leaf development and the level of isoprene synthesis[J]. Plant Physiology, 1993, 101:435-440.
- [18] 赵美萍, 邵敏, 白郁华. 我国几种典型树种非甲烷烃类的排放特征[J]. 环境化学, 1996, 15(1):69-75.
- [19] Loreto F, Thomas D, Sharkey. Water stress, temperature, and light effects on the capacity for isoprene emission and photosynthesis of kudzu leaves[J]. Oecologia, 1993, 95: 328-333.
- [20] 孔垂华, 徐涛, 胡飞, 等. 环境胁迫下植物化感作用及其诱导机制[J]. 生态学报, 2000, 20(5):849-854.
- [21] Dudareva N, Pichersky E, Gershenzon J. Biochemistry of Plant Volatiles [J]. Plant Physiology, 2004, 135: 1893-1902.
- [22] Heuberger E, Hongratanaworakit T, Bohm C, et al. Effects of Chiral Fragrances on Human Autonomic Nervous System Parameters and Self-evaluation [J]. Chem. Senses, 2001, 26(3):281-292.
- [23] Viljoen A, Vuurman S, Emst E, et al. Osmotopsis asteriscoides (Asteraceae)-the antimicrobial activity and essential oil composition of a Cape~Dutch remedy[J]. Journal of Ethnopharmacology, 2003, 88(2/3):137-143.
- [24] Delaquis P, Stanich K, Girard B, et al. Antimicrobial activity of individual and mixed fractions of dill, cilantro, coriander and eucalyptus essential oils[J]. International Journal of Food Microbiology, 2002, 74(1/2):101-109.
- [25] 花晓梅. 树木杀菌作用研究初报[J]. 林业科学, 1980, 16(3):236-240.
- [26] 王发松. 川桂叶挥发油的化学成分与抗菌活性研究[J]. 武汉植物学研究, 2000, 18(4):321-324.
- [27] 谢慧玲, 李树人, 阎志平, 等. 植物杀菌作用及其应用研究[J]. 河南农业大学学报, 1997, 31(4):397-402.
- [28] 谢慧玲, 李树人, 袁秀云, 等. 植物挥发性分泌物对空气微生物杀灭作用的研究[J]. 郑州:河南农业大学学报, 1999, 33(2):127-133.
- [29] 郑林森, 庞名瑜, 姜义华, 等. 47种园林植物保健型挥发性物质的测定[C]. 北京:中国科协2002年学术年会第22分会场论文集, 2002.
- [30] 张庆费. 上海主要绿化树种的抑菌物质和芳香成分分析[J]. 植物资源与环境学报, 2000, 9(2):62-64.
- [31] 刘志强. 芳香疗法在园林中的应用研究[J]. 林业调查规划, 2005, 30(6):91-93.
- [32] Angioy A, Desongus A, Barbarossa I, et al. Extreme Sensitivity in an Olfactory System[J]. Chem. Senses, 2003, 28: 279-284.
- [33] Hongratanaworakit T, Buchbauer G. Evaluation of the harmonizing effect of ylang-ylang oil on humans after inhalation[J]. Planta Medica, 2004, 70(7):632-636.
- [34] Ilmberger J, Heuberger E, Mahrhofer C, et al. The influence of essential oils on human attention [J]. Chemical Senses, 2001, 26(3):239-245.
- [35] 王有江, 朱新华. 香草指南[M]. 长春:吉林科学技术出版社, 2004.
- [36] Kikuchi A, Tanida M, Veboyama S, et al. Effect of odors on cardiac response patterns in reaction time task [J]. Chem Senses, 1991, 16:183.
- [37] Sugano H. Effects of odors on mental function[J]. Chem Senses, 1989, 14:303.
- [38] 郑华. 北京市绿色嗅觉环境质量评价研究[D]. 北京:北京林业大学, 2002.
- [39] 黄建武, 陶家元. 空气负离子资源开发与生态旅游[J]. 华中师范大学学报, 2002, 36(6):257-260.
- [40] 孙宝国, 何坚. 香精概论[M]. 北京:化学工业出版社, 1996.
- [41] 王艳英, 王成, 蒋继宏, 等. 侧柏——香樟枝叶挥发物对人体生理的影响[J]. 城市环境与城市生态, 2010, 23(3): 30-32.
- [42] Paire P, Tumlinson J. Plant volatiles as a defense against insect herbivores[J]. Plant Physiol, 1999, 121:325-331.
- [43] Bolter C, Dicke D, Loon J. Attraction of Colorado potato beetle to herbivore-damaged plants during herbivory and after its termination [J]. Cheml Ecol., 1997, 23: 1003-1023.
- [44] Karban R, Baldwin I, Baxter K. Communication between plants induced resistance in wild tobacco plants following clipping of neighboring sagebrush [J]. Oecologia, 2000, 125:66-71.
- [45] 黎华寿, 黄京华, 张修玉, 等. 香茅天然挥发物的化感作用及其化学成分分析[J]. 应用生态学报, 2005, 16(4): 763-767.
- [46] Shaver T, Lingren P, Marshall H. Night time variation in volatile content of flowers the night bloom plant, *Gaura drummondii* [J]. Chem. Ecol, 1997, 25(12):2673-2683.
- [47] 孙晓玲. 云杉八齿小蠹信息化学物质的研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学, 2006.
- [48] 董道青, 陈建明, 俞晓平. 夹竹桃不同溶剂提取物对福寿螺的毒杀作用评价 [J]. 浙江农业学报, 2009, 21(2): 154-158.
- [49] 高锦明. 植物化学[M]. 北京:科学出版社, 2003.
- [50] 杜广钊, 白冰, 李慧, 等. 广玉兰叶精油化学成分的 GC-MS 分析[J]. 湖北农业科学, 2010, 49(7):1707-1711.
- [51] 刘亚敏, 胥耀平, 高锦明, 等. GC-MS 法分析核桃叶挥发油化学成分[J]. 西北植物学报, 2004, 24(6):1100-1102.
- [52] 巩江, 倪士峰, 刘阳子, 等. 濒危植物蜡实叶挥发物的气相

- 色谱-质谱研究[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(20): 10665-10666.
- [53] 李宗波, 陈辉, 陈霞. 华山松树脂挥发油化学成分分析[J]. 西北林学院学报, 2006, 21(2): 138-141.
- [54] 刘灏, 陈晓阳. 西藏雪层杜鹃挥发油化学成分分析[J]. 华南农业大学学报, 2008, 29(4): 117-118.
- [55] 李兵. 土荆芥精油提取、成分分析及其对小菜蛾生物活性的研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2007.
- [56] 王吴阳, 郭寅, 张正. 顶空-气相色谱法进展[J]. 分析测试技术与仪器, 2003, 9(3): 129-135.
- [57] 任雪冬, 程光荣, 王永明. 顶空萃取气相色谱质谱法分析香雪兰的挥发性成分[J]. 质谱学报, 2007, 28(2): 83-86.
- [58] 杨再波. 顶空萃取气相色谱质谱法分析马鞭草的挥发油组分[J]. 理化检验, 2008, 44(6): 514-516.
- [59] 孙印石, 王建华, 程秀珍, 等. 静态顶空进样气质联用法测定白玉兰花和紫玉兰的头香成分[J]. 时珍国医国药, 2010, 21(6): 1386-1387.
- [60] 金荷仙, 陈俊愉, 金幼菊, 等. 南京晚粉——梅花香气成分的初步研究[J]. 北京林业大学学报, 2003, 25: 49-51.
- [61] 金荷仙, 郑华, 金幼菊, 等. 杭州满陇桂雨公园 4 个桂花品种香气组分的研究[J]. 林业科学研究, 2006, 19(5): 612-615.
- [62] 李娟, 王成, 彭镇华. 侧柏挥发物变化规律[J]. 东北林业大学学报, 2010, 38(3): 52-56.
- [63] 杨伟伟, 王成, 鄧光发, 等. 北京西山春季侧柏游憩林内挥发物成分及其日变化规律[J]. 林业科学研究, 2010(3): 462-466.
- [64] Dong S Y, Ki-Cheol S, Stanley J K. Volatile Organic Compounds Emanating from Indoor Ornamental Plants[J]. Hort Science, 2009, 44: 396-400.
- [65] 蔡晓明, 孙晓玲, 董文霞. 应用 zNoseTM 分析被害茶树的挥发物[J]. 生态学报, 2009, 29(1): 169-177.
- [66] Arthur C, Paw L. Solid phase microextraction with thermal desorption using fused silica optical fibers[J]. Anal Chem., 1990, 62: 2145-2148.
- [67] Potter D, Paw L J. Detection of substituted benzene in water and gas chromatography-ion trap mass spectrometry[J]. J. Chromatogr., 1992, 625: 247-255.
- [68] Page B, Lacroix G. Application of solid-phase microextraction on the headspace gas chromatographic analysis of halogenated volatiles in selected foods[J]. J. Chromatogr., 1993, 648: 199-211.
- [69] Winkler M, Headley J, Peru K. Optimization of solid phase microextraction for the gas chromatographic-mass spectrometric determination of synthetic musk fragrances in water samples[J]. J. Chromatogr A, 2000, 903(122): 203.
- [70] Miller K, Poole C, Pawlowski T. Classification of the botanical origin of Cinnamon by solid-phase microextraction and gas chromatography[J]. Chromatographia, 1996, 42(11/12): 639.
- [71] Schafer B, Hennig P, Engewald W. Analysis of monoterpenes from conifer needles using solid phase microextraction[J]. J. High Resolut Chromatogr., 1995, 18: 587.
- [72] An M, Haig T, Hatfield P. On-site field sampling and analysis of fragrance from living lavender flowers by solid-phase microextraction coupled to gas chromatography and ion-trap mass spectrometry[J]. J. Chromatogr A, 2001, 917(122): 245.
- [73] Senjiro I. Attending the 42nd Symposium on Terpenes, Essential Oils and Aromatic Chemicals (TEAC)[J]. Aroma Research, 1999, 201: 123-128.
- [74] 邢其毅, 王显仑, 林祖铭. 白兰花香气的化学成分研究[J]. 化学通报, 1981(9): 9.
- [75] 李娟. 侧柏和油松挥发物动态变化规律研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2009.

Review on Volatile Organic Compounds of Plant

JIANG Dong-yue¹, LI Yong-hong²

(1. Landscape Architecture College of Beijing Forestry University, Beijing 100083; 2. Shenzhen Polytechnic, Shenzhen, Guangdong 518055)

Abstract: Volatile organic compounds of plant play an important role in the ecosystem, and which are closely bound up with people's health. Based on abundant literatures, the concepts, anabolism and influencing factors of VOCs, the function, the recent methods and theories mainly applied, the present development both domestic and abroad were discussed. On the basis of it, the research directions were put forward to VOCs in the future.

Key words: plant; volatile organic compounds; function; collection