

4种木兰科景观树种挥发性有机物 (VOCs) 排放清单及其保健作用评价*

王金凤 周琦 陈卓梅
(浙江省林业科学研究院, 浙江 杭州 310023)

摘要 以深山含笑 *Michelia maudiae*、乐昌含笑 *Michelia chapensis*、广玉兰 *Magnolia grandiflora* 及玉兰 *Magnolia denudata* 4种园林绿化中常用的木兰科景观乔木树种为研究对象, 采用动态顶空气体循环采集法和 TDU — GC — MS (thermo desorption unit- gas chromatography- mass spectrum) 联用技术, 对这4种植物枝叶释放的 VOCs (volatile organic compounds) 成分进行测定分析, 并评价其对环境的保健作用。结果表明, 4个树种枝叶释放的 VOCs 均以萜烯类化合物为主要成分。其中深山含笑、乐昌含笑、广玉兰释放的萜烯类化合物的相对含量分别为 75.70%、66.44%、60.81%, 为各自释放有毒有害污染物相对含量的 13.02 倍、8.38 倍、9.04 倍, 均具有净化空气、抗炎解毒、调节人体神经系统的作用, 深山含笑及乐昌含笑释放的萜烯类化合物成分还有益于心血管系统功能, 故3个树种均为优良的营建保健型生态景观园林树种。玉兰释放的萜烯类化合物的相对含量为 32.25%, 仅为其释放有毒有害污染物相对含量的 2.48 倍, 虽然也具有一定的保健作用, 但对区域大气质量存在潜在影响, 不建议在人口密集活动区域作为绿化树种配置。

关键词 深山含笑; 乐昌含笑; 广玉兰; 玉兰; 挥发性有机物; 有毒有害污染物

中图分类号: S713 文献标志码: A 文章编号: 2096-2053 (2022) 03-0101-10

Volatile Organic Compounds Inventory and Healthcare Evaluation of Four Landscape Trees in Magnoliaceae

WANG Jinfeng ZHOU Qi CHEN Zhuomei
(Zhejiang Academy of Forestry, Hangzhou, Zhejiang 310023, China)

Abstract *Michelia maudiae*, *M. chapensis*, *M. grandiflora* and *M. denudata* are Magnoliaceae trees which are frequently used in landscape. To evaluate the healthcare effect of these four trees, the volatile organic compounds (VOCs) in branches and leaves of which were analyzed by using the dynamic headspace air-circulation method and TDU — GC — MS technique. The results show that the relative contents of terpenes are the highest among VOCs from branches and leaves of the 4 trees. The relative contents of terpenes emitted by *M. maudiae*, *M. chapensis* and *M. grandiflora* are 75.70%, 66.44% and 60.81% respectively, which are as much as 13.02, 8.38 and 9.04 times of the relative contents of HAPs emitted by the corresponding trees. The terpenes emitted by all the three trees have the ability of cleaning air, killing insects, resisting microorganism, and improving the nervous system of humans. Besides, some terpenes emitted by *M. maudiae* and *M. chapensis* are beneficial to blood circulation. So all the three trees can be used as healthcare garden landscape tree species.

* 基金项目: 浙江省省院合作林业科技项目 (2020SY10)。

第一作者: 王金凤 (1981—), 女, 副研究员, 主要从事森林康养与森林培育研究, E-mail: shutongnn@163.com。

通信作者: 陈卓梅 (1973—), 女, 研究员, 主要从事森林康养与森林培育研究, E-mail: zhuomeichen@163.com。

But the relative contents of terpenes emitted by branches and leaves of *M. denudata* are 32.25%, which are only 2.48 times of the relative contents of HAPs. Though the VOCs of *M. denudata* are more or less beneficial to the environment and humans, the species is not suggested to be applied in the places with frequent population activity in consideration of its potential risk of polluting the air. This study provides the basic data for enriching the VOCs database, as well as for evaluating the environment effects of Magnoliaceae species.

Key words *M. maudiae*; *M. chapensis*; *M. grandiflora*; *M. denudata*; volatile organic compounds; hazardous air pollutants

随着城市化进程的快速推进,城市居民人口不断增加,城市空间变得狭小、拥挤,环境污染和生活压力给人们身心健康带来的负面影响日益突出。而森林环境对人体健康有良好的疗养保健与促进作用^[1-4],但在城市中不易实现。城市绿地因其距离近、易到达,可在城市中替代森林起到一定的保健、疗养作用^[5-6]。因此,城市绿地的定位也随之由绿化、彩化、美化发展到具备一定保健作用的功能型绿地,从而对城市绿地景观树种的评价及配置提出了更高的要求。

植物挥发性有机物(Volatile Organic Compounds, VOCs)是指植物次生代谢产生的、室温条件下饱和蒸气压超过 133 kPa 且沸点介于 50 ~ 260 °C 的易挥发小分子化合物^[7-8]。植物 VOCs 的组成十分丰富,主要包括异戊二烯、单萜、倍半萜、醛类、酮类、醇类、酯类等^[9-10]。研究表明,植物 VOCs 在自然界中具有十分重要的作用,除了可以增强植物自我防御^[11-12]、促进植物间信息交流外^[13-14],其中许多成分还在改善空气质量和提高人类身体健康方面有积极作用^[15]。郭阿君^[16]对 10 种室内观叶植物进行挥发性气体除菌试验,结果表明不同植物对不同细菌的抑制效果不同。赵亚红等^[17]对杨梅 *Myrica rubra*、青梅 *Vatica mangachapoi* 及茶 *Camellia sinensis* 3 种常绿树挥发性成分的研究发现,3 个树种对空气微生物的生长均有抑制作用,同时具有促进空气负离子形成和改善空气质量的作用。此外,其他具有除菌作用的园林树种还有七叶树 *Aesulus chinensis*、合欢 *Albizia julibrissin*、女贞 *Chionanthus retusus*、栾树 *Koelreuteria paniculata* 等,且不同植物配置类型的除菌效果也不同。植物释放的 VOCs 还具有调节人体免疫系统、神经系统、缓解疲劳等作用。Li 等^[1-2]通过森林浴研究发现,受试人员进行森林浴后,人体的 NK 细胞活性及总 B 细胞含量增

加,细胞内抗癌蛋白的水平提升,说明人体的免疫力增强。Mao 等^[3]研究发现,森林植物释放的 VOCs 可以改善慢性心衰患者的氧化应激水平和炎症状态。佟琴琴等^[19]采用两种抑郁模型小鼠尾悬挂试验和小鼠强迫游泳试验对迷迭香 *Rosmarinus officinalis* 和柠檬草 *Cymbopogon citrates* 精油以及活体香气的抗抑郁作用研究结果表明:两种植物的精油以及活体香气都具有一定的抗抑郁作用。但是另一方面,植物释放的 VOCs 也会对环境产生部分负面影响^[20-21]。植物释放的异戊二烯氧化后会改变臭氧浓度^[20];同时植物释放的 VOCs 中也发现了可能对区域大气质量存在潜在影响的萘、菲和蒽等有毒有害大气污染物^[21]。综上所述,植物所释放的 VOCs 是评价植物康养保健作用的重要因子之一,对其 VOCs 的排放清单进行研究不但可以为大气环境质量监测提供参考数据,而且对园林绿化树种配置及保健作用评估提供数据支持,具有十分重要的意义。

深山含笑 *Michelia maudiae*、乐昌含笑 *Michelia chapensis*、广玉兰 *Magnolia grandiflora* 及玉兰 *Magnolia denudata* 4 种木兰科乔木树种,因其树形优美、枝繁叶茂、花大而美丽,是园林绿化中常用的景观树种,然而对其保健功能方面的相关研究不多。现有研究或采用固相微萃取法^[5]、或采用蒸馏法^[22-24]、或采用超临界萃取的方式^[25],对这 4 种乔木树种的叶片或花的化合物成分进行了初步分析。然而,植物不同部位合成与释放的 VOCs 有所不同,且采样后进行离体研究与植物自然状态下释放的 VOCs 存在较大差异^[26-28]。鉴于此,本研究采用动态顶空气体循环采集法^[29]对乐昌含笑、广玉兰及玉兰 4 种木兰科常用景观树种的枝叶在活体状态下自然释放的 VOCs 成分进行测定分析,并评价其对环境的保健作用及可能存在的潜在风险,以期为未来保健型园林绿地树种的评价

价与配置提供理论依据及支持。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试植株深山含笑、乐昌含笑、广玉兰及玉兰均为树龄 15 年以上的大树, 散生种植于浙江省杭州市浙江省林科院苗圃试验地内 (20°1.514' E、30°13.033' N), 采用相同的管理措施。试验地海拔 31 m, 属亚热带季风气候, 四季分明, 雨量充沛, 夏季高温多雨, 冬季寒冷干燥。年平均温度 15.0~17.7 °C, 年平均降水量 1 100~1 600 mm, 平均相对湿度 70.3%, 年日照时数 1 765 h。土壤为红壤, 肥力中等, 排水良好。

1.2 试验方法

1.2.1 VOCs 采集方法 采样选择在晴朗无风的夏季上午 (2016 年 8 月 1 日) 进行, 用 ZC-Q 便携式双泵大气采样器 (浙江恒达) 进行样品采集。每个树种各选取 1 株生长健康、无病虫害的植株, 每株分别选择树冠中部同一生长高度不同生长角度且长势茂盛、向阳的 3 个枝条, 作为 3 个重复。用 Reynolds 微波炉袋采样袋 (0.1 m³, Rennolds Metals Company, 美国) 将活体植株的枝条套住后, 立即用大气采样器把袋内空气抽尽, 形成瞬时真空; 随后采用动态顶空气体循环采集法进行样品采集^[29]。采样器流量 0.1 m³/min, 采气时间 30 min。同时, 设空白对照用于校正本底影响, 即采样管不进行 VOCs 采集, 其他处理相同。

1.2.2 挥发性有机物的测定 植物 VOCs 采用热脱附—气相色谱—质谱联用法 (TDS—GC—MS) 分析。各仪器工作条件如下。TDS: 系统压力 20 kPa; 进样口温度 250 °C; 脱附温度 250 °C (10 min); 冷阱温度 -100 °C (3 min); 冷阱进样时温度骤然升温至 260 °C; GC: 色谱柱为 HP-5MS (30 m × 250 μm × 0.25 μm); 程序升温: 40 °C (3 min) → 6 °C/min → 112 °C (3 min) → 6 °C/min → 250 °C → 10 °C/min → 270 °C (5min)。MS: EI 源, 电子能量为 70 eV; 质量范围 29 ~ 400 m/z; 接口温度 280 °C; 离子源温度 230 °C; 四级杆温度 150 °C。

1.3 数据分析

利用 Xcalibur1.2 软件通过检索 NIST 2008 谱库, 根据色谱保留时间与匹配度确定 4 个树种枝叶挥发性物质的化学成分。挥发性成分确定之后,

根据离子流峰面积归一化法, 计算各成分的相对含量^[29-30]。即:

相对含量 = (某物质峰面积 / 样品中所有物质的峰面积总和) × 100%。

参照美国国家环境保护局 (US EPA) 制定的《清洁空气法》(Clean air act section 112b)^[31] 中所列 HAPs (Hazardous Air Pollutants) 清单, 对 4 个树种枝叶释放的 VOCs 进行筛选, 建立其有毒有害 VOCs 排放名录。

利用 Excel 2013 及 Origin 8.0 软件进行数据分析及图形绘制。

2 结果与分析

2.1 4 个木兰科树种释放 VOCs 成分分析

深山含笑枝叶释放的 VOCs 种类最少 (图 1, 表 1), 共 20 种。其中 12 种为萜烯类化合物, 相对含量为 75.50%, 主要成分为长叶烯 (45.93%)、α-蒎烯 (13.74%)、龙脑 (3.09%); 2 种有机酸的相对含量次之 (13.69%), 主要成分为乙酸 (9.05%); 其余类别化合物中, 无论 VOCs 种类及相对含量均较低, 包括烷烃类化合物 (0.43%)、酮类化合物 (0.54%)、醇类化合物 (2.92%)、酯类化合物 (1.12%) 各 1 种, 芳烃类化合物 (5.80%) 2 种。

乐昌含笑枝叶中共检测出 25 种 VOCs (图 1, 表 1), 以萜烯类化合物的种类最多 (10 种), 相对含量 (66.44%) 最高, 主要成分为长叶烯 (40.99%)、长叶环烯 (8.26%)、α-长叶蒎烯 (4.48%); 酯类化合物种类 (4 种) 及相对含量 (9.38%) 均居第二位; 其余类别化合物中, 无论 VOCs 种类及相对含量均较低, 包括芳烃类化合物 (6.67%) 4 种, 其他类化合物 (4.02%) 及酮类化合物各 2 种 (3.48%), 烷烃类 (1.07%)、醇类 (6.81%) 及有机酸类 (2.12%) 化合物各 1 种。

广玉兰枝叶中共检测出 24 种 VOCs (图 1, 表 1), 以萜烯类化合物的种类 (10 种) 最多, 相对含量 (60.81%) 最高, 主要成分为长叶烯 (37.57%)、长叶环烯 (6.13%)、α-长叶蒎烯 (4.08%); 2 种醇类化合物相对含量 (13.11%) 次之, 主要成分为 2-乙基-1-己醇 (11.47%); 其余类别化合物中, 无论 VOCs 种类及相对含量均较低, 包括酯类化合物 (5.96%)、烷烃类化合物 (4.04%) 及其他类化合物各 3 种, 芳烃类化合物

(3.78%)、酮类化合物(2.84%)及有机酸类化合物(2.71%)各1种。

玉兰枝叶释放的VOCs种类最为丰富(图1,表1),共40种。其中萜烯类化合物的种类(12种)及相对含量(32.25%)均最高,主要成分为长叶烯(14.78%);5种其他类化合物(17.35%)、12种芳烃类化合物(16.60%)、3种醇类化合物

(16.90%)及4种酯类化合物(12.71%),尽管种类成分差异较大,然而相对含量比较接近,各类主要成分分别为N-甲基苯胺(10.63%)、 α -甲基苯乙烯(3.12%)、2-乙基-1-己醇(14.18%)、丙烯酸-2-乙基己酯(8.44%);其余2种烷烃类化合物(0.97%)、1种酮类化合物(2.18%)及1种有机酸类化合物(1.04%)的相对含量均较低。

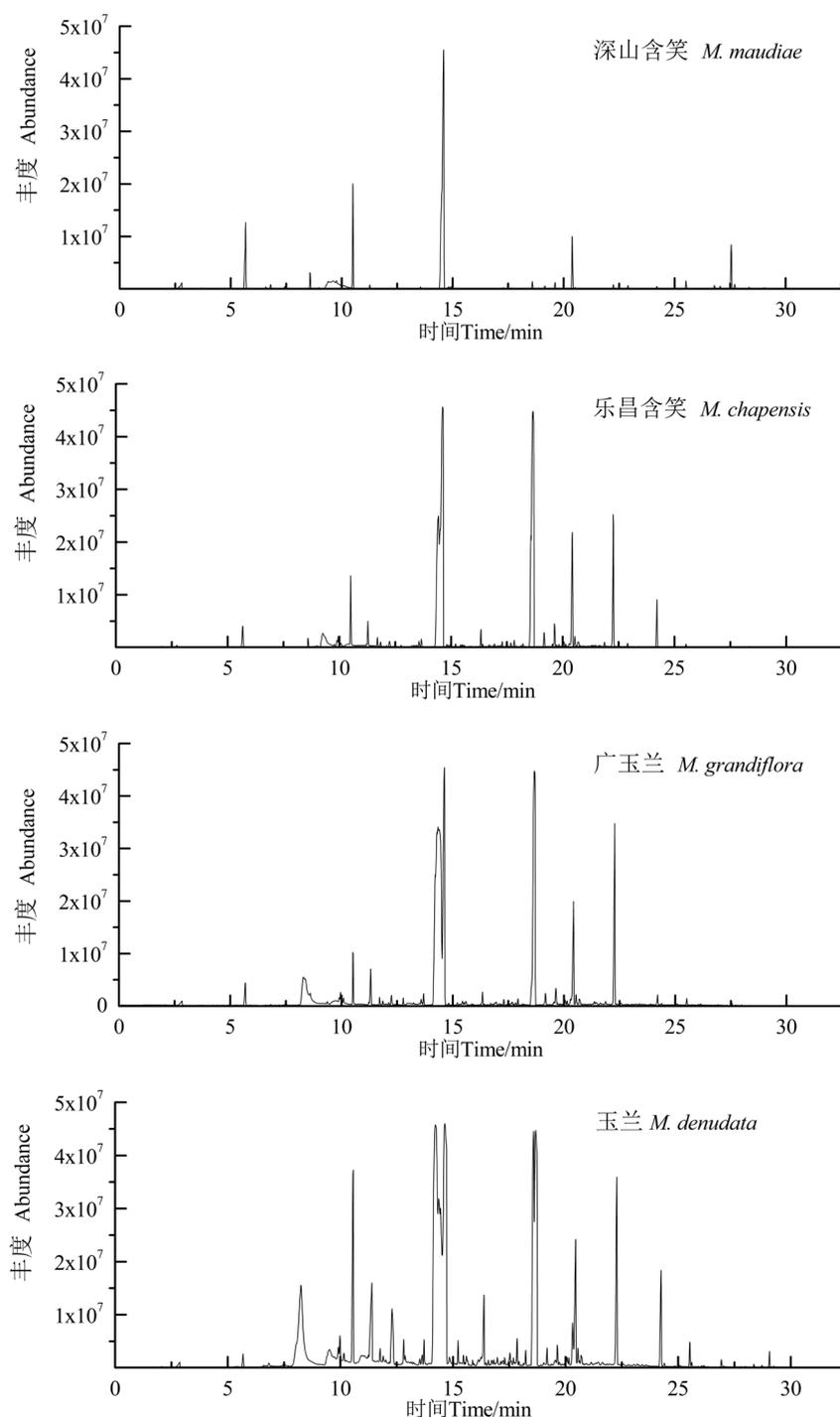


图1 4个木兰科树种释放VOCs的GC-MS总离子流
Fig.1 Total ion chromatograms of VOCs of the four Magnoliaceae trees

2.2 4个木兰科树种挥发性成分比较

4种木兰科乔木景观树种中共鉴定出56种VOCs(表1),分别为21种萜烯类化合物、5种烷烃类化合物、12种芳烃类化合物、酮类及醇类化合物各3种、4种酯类化合物、2种有机酸类化合物及6种其他类化合物,4个树种中均未检测到醛类化合物。由表1可见4种木兰科树种枝叶释放的VOCs均以萜烯类化合物为主,以深山含笑枝叶释放的萜烯类化合物相对含量最高(75.50%),其次为乐昌含笑(66.44%)及广玉兰(60.81%),玉兰枝叶释放的萜烯类化合物相对含量最低(32.25%)。4个树种共有的VOCs有5种,分别为长叶烯、长叶环烯、 α -长叶蒎烯、可巴烯及2-乙基-1-己醇,其中前4种为萜烯类化合物。3个树种共有的VCOs有13种,其中马兜铃烯、石竹烯、 α -甲基苯乙烯、异佛尔酮、2-羟丙基异丁烯酸酯、2-丁烯酸甲酯、丙烯酸-2-乙基己酯、苯胺、N-甲基苯胺为乐昌含笑、广玉兰及玉兰共

有成分;龙脑、乙酸异龙脑酯为深山含笑、乐昌含笑及玉兰共有成分;乙酸为深山含笑、广玉兰、玉兰共有成分;(+)-环苜蓿烯为深山含笑、乐昌含笑、广玉兰共有成分。4个树种均含特有VOCs。其中玉兰的特有VOCs种类最多(14种),单个成分相对含量大于1%的有佛术烯(5.05%)、连四甲苯(1.13%)、1-乙基-2,4,5-三甲基苯(1.54%)、五甲基苯(2.33%)、二甲基苯胺(1.30%);深山含笑特有VOCs为9种,单个成分相对含量大于1%的有茨烯(1.21%)、乙苯(1.71%)、间二甲苯(4.09%);乐昌含笑及广玉兰均含2种特有VOCs,其累计相对含量较低,分别为2.10%及2.03%。

2.3 4个木兰科树种保健作用评估

由表2及图2可知,对照HAPs清单,4个树种共释放8种HAPs,其中深山含笑释放2种,相对含量占其VOCs总量的5.80%;乐昌含笑释放5种HAPs,相对含量占其VOCs总量的7.93%;广玉兰释放3种HAPs,相对含量占其VOCs总

表1 4种木兰科树种释放的VOCs成分及相对含量

Table 1 Constituents and relative contents of VOCs released from branches and leaves of the four Magnoliaceae trees

类别 Type	序号 No.	成分 Constituent	相对含量 / %Relative content			
			深山含笑 <i>M. maudiae</i>	乐昌含笑 <i>M. chapensis</i>	广玉兰 <i>M. grandiflora</i>	玉兰 <i>M. denudata</i>
萜烯类 Terpenes	1	α -Pinene α -蒎烯	13.74	2.40	0.00	0.00
	2	Camphene 莜烯	1.21	0.00	0.00	0.00
	3	p-Cymene 对伞花烃	0.36	0.00	0.00	0.00
	4	D-Limonene D-柠檬烯	0.00	0.00	0.59	0.00
	5	Carveol 香芹醇	0.00	0.00	0.00	0.66
	6	D-Camphor 右旋樟脑	0.47	0.00	0.00	0.00
	7	Borneol 龙脑	3.09	1.19	0.00	1.61
	8	α -Terpineol α -松油醇	0.00	0.00	0.97	0.92
	9	Thujopsene 罗汉柏烯	0.00	0.00	0.00	0.45
	10	α -Longipinene α -长叶蒎烯	2.56	4.48	4.08	1.50
	11	(+)-Cyclosativene (+)-环苜蓿烯	0.68	0.79	1.28	0.00
	12	Longicyclene 长叶环烯	5.02	8.26	6.13	1.86
	13	α -Cedrene α -柏木烯	0.77	0.00	0.00	0.00
	14	Aristolene 马兜铃烯	0.00	1.70	1.98	1.35
	15	Eremophilene 佛术烯	0.00	0.00	0.00	5.05
	16	Longifolene 长叶烯	45.93	40.99	37.57	14.78
	17	Copaene 可巴烯	1.39	3.00	3.70	2.00
	18	Caryophyllene 石竹烯	0.00	2.04	2.97	1.70
	19	(-)-Isosativene (-)-异洒别烯	0.28	0.00	0.00	0.00
	20	Isolongifolene 异长叶烯	0.00	1.59	1.52	0.00
	21	Cedrol 雪松醇	0.00	0.00	0.00	0.38

类别 Type	序号 No.	成分 Constituent	相对含量 / %Relative content			
			深山含笑 <i>M. maudiae</i>	乐昌含笑 <i>M. chapensis</i>	广玉兰 <i>M. grandiflora</i>	玉兰 <i>M. denudata</i>
烷烃类 Alkanes	22	Decane, 3,6-dimethyl- 3,6 二甲基 - 癸烷	0.43	0.00	0.00	0.00
	23	Dodecane 十二烷	0.00	0.00	1.44	0.00
	24	Cyclohexane, propyl- 丙基环己烷	0.00	1.07	0.00	0.00
	25	Tridecane 十三烷	0.00	0.00	1.53	0.33
	26	Tetradecane 十四烷	0.00	0.00	1.07	0.64
芳烃类 Aromatics	27	Ethylbenzene 乙苯	1.71	0.00	0.00	0.00
	28	m-Xylene 间二甲苯	4.09	0.00	0.00	0.63
	29	α -Methylstyrene α - 甲基苯乙烯	0.00	3.05	3.78	3.12
	30	Benzene, 1,2,3,4-tetramethyl- 连四甲苯	0.00	0.00	0.00	1.13
	31	Benzene, 1-methyl-4-(1-methylpropyl)- 1- 甲基 -4-(1- 甲基丙基) - 苯	0.00	0.00	0.00	0.71
	32	Naphthalene 萘	0.00	0.89	0.00	2.08
	33	Benzene, 1-ethyl-2,4,5-trimethyl- 1- 乙基 -2,4,5- 三甲基苯	0.00	0.00	0.00	1.54
	34	Benzene, 1,3-dimethyl-5-(1-methylethyl)- 5- 异丙基间二甲苯	0.00	0.00	0.00	0.42
	35	1H-Indene, 2,3-dihydro-4,7-dimethyl- 4,7- 二甲基 -2,3- 二氢茚	0.00	0.00	0.00	0.57
	36	1H-Indene, 2,3-dihydro-1,2-dimethyl- 1,2- 二甲基 -2,3- 二氢茚	0.00	0.00	0.00	0.44
	37	Benzene, pentamethyl- 五甲基苯	0.00	0.00	0.00	2.33
	38	Naphthalene, 1-methyl- 1- 甲基萘	0.00	1.93	0.00	2.39
	39	Naphthalene, 2-methyl- 2- 甲基萘	0.00	0.80	0.00	1.24
酮类 Ketones	40	Acetophenone 苯乙酮	0.54	0.00	0.00	0.00
	41	Isophorone 异佛尔酮	0.00	2.46	2.84	2.18
醇类 Alcohols	42	4-Hepten-3-one, 2,6-dimethyl- 2,6- 二甲基 -4- 庚烯 -3- 酮	0.00	1.02	0.00	0.00
	43	1-Hexanol, 2-ethyl- 2- 乙基 -1- 己醇	2.92	6.81	11.47	14.18
	44	α , α -dimethyl-benzyl alcohol α , α - 二甲基苄醇	0.00	0.00	1.64	2.24
酯类 Esters	45	1-Dodecanol,3,7,11-trimethyl- 3,7,11- 三甲基 -1- 十二醇	0.00	0.00	0.00	0.48
	46	2-Propenoic acid, 2-methyl-, 2-hydroxypro- pyl ester 2- 羟丙基异丁烯酸酯	0.00	2.16	1.64	2.14
	47	2-Butenoic acid, methyl ester 2- 丁烯酸甲酯	0.00	1.19	0.82	1.23
	48	2-Ethylhexyl acrylate 丙烯酸 -2- 乙基己酯	0.00	4.80	3.49	8.44
	49	Bornyl acetate 乙酸异龙脑酯	1.12	1.23	0.00	0.90
有机酸类 Organic acids	50	Acetic acid 乙酸	9.05	0.00	2.71	1.04
	51	Benzoic acid 苯甲酸	4.64	2.12	0.00	0.00
其他 Others	52	Aniline 苯胺	0.00	1.85	1.90	2.72
	53	Phenol 苯酚	0.00	0.00	1.99	1.78
	54	Aniline, N-methyl- N- 甲基苯胺	0.00	2.17	2.86	10.63
	55	Benzenamine, N,N-dimethyl- 二甲基苯胺	0.00	0.00	0.00	1.30
	56	Pyridine, 5-ethenyl-2-methyl- 2- 甲基 -5- 乙烯基吡啶	0.00	0.00	0.00	0.93

量的6.73%；玉兰释放7种HAPs，相对含量占其VOCs总量的13.01%。

研究证明，萜烯类化合物具有很强的生理功效，并将其相对峰面积之和作为衡量植物保健作用的指标^[32-33]。因此我们将各个树种释放的HAPs种类及相对含量与其释放的萜烯类化合物进行了对照分析，深山含笑枝叶释放的12种萜烯类化合物的相对含量为2种HAPs相对含量的13.02倍；乐昌含笑枝叶释放的10种萜烯类化合物的相对含量为5种HAPs相对含量的8.38倍；广玉兰枝叶释放的10种萜烯类化合物的相对含量为4种HAPs相对含量的9.04倍；玉兰枝叶释放的12种萜烯类化合物的相对含量为7种HAPs相对含量的2.48倍。

3 讨论与结论

植物的花、叶等器官的油腺可以分泌出大量的被称为芬多精（phytoncides）的挥发性有机

物^[28]。这些物质具有多种生理功效，不但能起到杀菌抑菌、净化环境的作用^[18, 34-36]，还能对人体健康产生许多有益的影响^[2-3, 6, 19, 37]。其中起主要作用的是萜烯类化合物，大多数具有镇痛、抗炎性、抗风湿、抗肿瘤、降血压、镇静等作用^[28, 33]。如 α -蒎烯不但具有抗菌、抗病毒、驱虫等功效^[38-42]，同时具有镇咳祛痰^[43]、调节人体神经系统的作用^[5]；马兜铃烯和石竹烯具有抗炎作用^[44-45]，石竹烯还具有净化空气、镇痛镇静、保护神经、抗焦虑、抗抑郁、抗肿瘤的作用^[45-48]；龙脑能够降低心率和血压^[49]；长叶烯、长叶蒎烯、长叶环烯等倍半萜除具有芳香气味^[50-51]外，长叶烯还具有抗菌、驱虫作用^[38, 52]，长叶蒎烯则具有抗炎解毒、抑制乙型肝炎的作用^[53]；可巴烯具有抑菌驱虫^[54]的作用。现代科学家通过水蒸气蒸馏法、冷压榨法或溶剂萃取法等将这些物质从植物器官大量地提取出来即得到植物油（挥发油）^[55-56]。然而这些经过提炼的挥发油在植物自然状态下不一定

表2 4个木兰科树种释放的有毒有害大气污染物名录
Table 2 List of HAPS emitted by four Magnoliaceae trees

保留时间 /min Remain time	化合物 Compound	相对含量 /%Relative content			
		深山含笑 <i>M. maudiae</i>	乐昌含笑 <i>M. chapensis</i>	广玉兰 <i>M. grandiflora</i>	玉兰 <i>M. denudata</i>
6.582	Ethylbenzene 乙苯	1.71	0.00	0.00	0.00
6.803	m-Xylene 间二甲苯	4.09	0.00	0.00	0.63
9.900	Aniline 苯胺	0.00	1.85	1.90	2.72
10.096	Phenol 苯酚	0.00	0.00	1.99	1.78
13.668	Isophorone 异佛尔酮	0.00	2.46	2.84	2.18
15.205	Naphthalene 萘	0.00	0.89	0.00	2.08
17.828	Naphthalene, 1-methyl- 1- 甲基萘	0.00	1.93	0.00	2.39
18.221	Naphthalene, 2-methyl- 2- 甲基萘	0.00	0.80	0.00	1.24
	合计	5.80	7.93	6.73	13.01

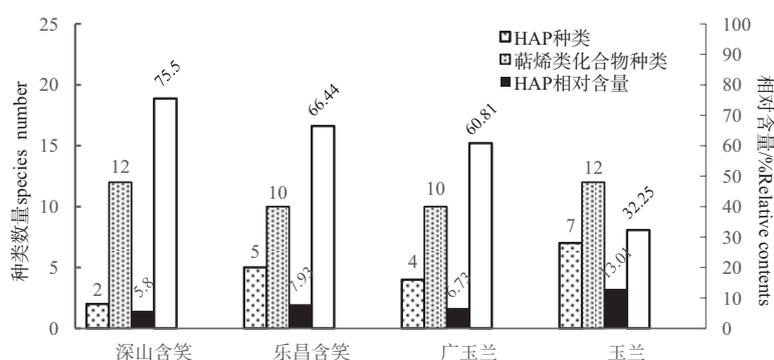


图2 4个木兰科树种释放的萜烯类化合物及有毒有害污染物种类与相对含量对比

Fig. 2 The comparison of kinds and relative contents between terpenes and HAPs emitted by the four Magnoliaceae trees

释放^[5, 28], 因此将植物的器官和组织在自然状态下释放出的挥发性有机物称为植物精气^[28]。本研究通过动态顶空气体循环采集法对深山含笑、乐昌含笑、广玉兰及玉兰4个木兰科植物活体植株的枝叶进行VOCs的采集与测定, 最大程度还原了植株自然状态下VOCs的释放情况。

研究结果表明, 尽管深山含笑枝叶释放的VOCs种类最少(20种), 但其枝叶释放的萜烯类化合物相对含量最高(75.50%), 主要包括 α -蒎烯、龙脑、 α -长叶蒎烯、长叶环烯、长叶烯、可巴烯, 还包括蒎烯、 α -柏木烯等5种含量低但特有的萜烯类化合物。这与已报道的关于深山含笑的挥发油研究在成分和含量上均有不同。孙延军等^[5]用固相微萃取的方法, 从深山含笑的叶片中检测出24种VOCs, 其中单个物质含量大于5%的所有萜烯类含量就高达94.08%, 包括柠檬烯、蒎烯、 α -蒎烯、 β -蒎烯、月桂烯、 β -石竹烯等。操璟璟等^[22]及刘超祥等^[57]用蒸馏法从深山含笑的叶片水提物分别鉴定出37及34种化合物, 其萜烯类相对含量分别为77.75%及97.57%。尽管几个研究中由于研究方法、采样部位及植株年龄等的差异导致研究结果有所不同, 但均表明, 深山含笑可释放(或含有)大量的对人体有益的萜烯类物质, 不仅可以清新空气^[46, 50-51], 对环境起到抗菌、驱虫作用^[38, 52], 还具有抗肿瘤、调节人体的神经系统、呼吸系统、心血管系统的作用^[5, 22, 45, 47-49]。对深山含笑HAPs分析结果表明, 该树种仅释放2种HAPs, 相对含量仅占总VOCs的5.80%, 萜烯类化合物的相对含量是其13.02倍, 因此综合来看, 作为国家珍稀优良二级景观绿化树种的深山含笑也具有十分重要的保健功能, 是兼具景观与保健功能的优良绿化树种。

乐昌含笑枝叶中共检测出25种VOCs, 萜烯类化合物的相对含量(66.44%)仅次于深山含笑, 主要包括 α -蒎烯、龙脑、 α -长叶蒎烯、长叶环烯、马兜铃烯、长叶烯、可巴烯、石竹烯、异长叶烯等, 无特有萜烯类化合物。孙延军等^[5]用固相微萃取的方法、刘群^[23]用蒸馏法, 分别从乐昌含笑的叶片中检测出28种和23种化合物, 其中萜烯类化合物的相对含量分别为49.47%和15.55%, 均低于本研究结果, 主要包括 β -石竹烯、莜术烯、 β -榄香烯、顺式- β -金合欢烯和马兜铃烯、 β -丁香烯、 β -榄香烯等; 同时刘群

等的研究发现乐昌含笑叶提取物具有很高的抗肿瘤活性^[23]。可见各研究结果间存在较大差异。但从本研究结果来看, 乐昌含笑同深山含笑具有同样的改善环境及人体保健作用。尽管乐昌含笑释放5种HAPs, 但相对含量仅占其VOCs总量的7.93%, 萜烯类化合物的相对含量是其8.38倍, 故乐昌含笑也是一个兼具景观与保健作用的观赏绿化树种。

广玉兰枝叶中共检测出24种VOCs, 萜烯类化合物的相对含量为60.81%, 主要包括 α -长叶蒎烯、(+)-环苜蓿烯、长叶环烯、马兜铃烯、长叶烯、可巴烯、石竹烯、异长叶烯, 结合各萜烯类化合物的作用分析, 该树种具有清新空气、抗菌驱虫及调节人体神经系统的作用^[46, 50-51], 这与张树祥^[58]等对广玉兰叶片药用研究的结论相一致。刘艳清等用超临界萃取的方式对于干燥广玉兰叶片的挥发油成分进行研究, 共鉴定出28种化合物, 其中萜烯类化合物的相对含量为55.22%, 主要包括 β -榄香烯、大根香叶D、大根香叶烯B、 β -丁香烯^[25], 与本研究在化合物组成上有所不同, 但同样含有较高含量的萜烯类化合物。HAPs分析结果表明广玉兰释放3种HAPs, 相对含量占其VOCs总量的6.73%; 萜烯类化合物的相对含量是其9.04倍, 可见广玉兰也是营建保健型景观园林的优良绿化树种之一。

尽管玉兰枝叶释放的VOCs种类在4个树种中最为丰富(40种), 但其萜烯类化合物的相对含量(32.25%)却最低, 主要成分为 α -长叶蒎烯、长叶环烯、佛术烯、长叶烯、可巴烯、石竹烯、龙脑等, 其中佛术烯为玉兰特有。李军集等^[24]用蒸馏法分别提取了玉兰的干叶及鲜叶挥发油, 分别鉴定出48及40种化合物, 但其主要成分均为香樟醇, 单个物质相对含量在60%以上, 与本研究明显不同, 但也鉴定出可巴烯、石竹烯、龙脑等本研究中出现的化合物。尽管玉兰也释放出一定含量的净化环境及人体保健作用的萜烯类化合物, 但同时也检测出7种HAPs, 相对含量占其VOCs总量的13.01%, 萜烯类化合物的相对含量仅为其2.48倍, 可能对区域环境空气质量带来一定的风险影响。因此, 在园林绿化营建中, 特别是公园、城市道路等人口密集活动的区域, 不建议配置玉兰, 而是寻找具有相同景观效果的替代树种。

由上述分析可见, 深山含笑、乐昌含笑、广玉兰释放的 VOCs 均有净化空气、抗炎解毒、调节人体神经系统的作用, 深山含笑及乐昌含笑释放的 VOCs 还有益于心血管系统功能, 且这 3 个树种的 HAPs 含量均较低, 对大气质量不具有潜在风险或风险极低, 是兼具景观与保健作用的优良观赏绿化树种, 建议作为保健型景观园林树种应用。而玉兰释放的 VOCs 尽管也具有一定的保健作用, 但 HAPs 含量相对较高, 对区域环境空气质量存在潜在风险影响, 不建议在人口密集活动区域作为绿化树种配置。此外, 本研究还发现两个含笑属(深山含笑、乐昌含笑)排放的 VOCs 与两个木兰属(广玉兰、玉兰)排放的 VOCs 在属水平上没有明显差异, 4 个树种共有的 VOCs 仅有 5 种, 3 个树种共有的 VOCs 有 13 种, 除此之外, 仅深山含笑与乐昌含笑共有的物质只有 1 种, 仅广玉兰与玉兰共有的物质有 5 种, 说明 4 个树种 VOCs 排在属水平没有明显的规律, 在保健型园林绿地树种的筛选研究中暂不能以树种之间的科属关系作为参照对 VOCs 排放进行风险评估。

参考文献

- [1] LI Q, MORIMOTO K, KOBAYASHI M, et al. A forest bathing trip increases human natural killer activity and expression of anti-cancer proteins in female subjects[J]. *Journal of Biological Regulators & Homeostatic Agents*, 2008, 22 (1): 45-55.
- [2] LI Q. Effect of forest bathing trips on human immune function[J]. *Environmental Health & Preventive Medicine*, 2010, 15: 9-17.
- [3] MAO G X, CAO Y B, WANG B Z, et al. The salutary influence of forest bathing on elderly patients with chronic heart failure[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2017, 14 (4): 368-380.
- [4] 胡彩丽, 朱自飘, 张华, 等. 森林康养游客满意度影响因素研究[J]. *林业与环境科学*, 2022, 38(1): 35-42.
- [5] 孙延军, 张伟, 王一钦, 等. 深圳地区8种常见生态公益林树种VOCs测定及其保健作用[J]. *林业与环境科学*, 2019, 35 (2): 67-74.
- [6] 高岩. 北京市绿化树木挥发性有机物释放动态及其对人体健康的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2005.
- [7] BENTLEY R. Secondary metabolites play primary roles in human affairs[J]. *Perspectives in Biology and Medicine*, 1997, 40 (2): 197-221.
- [8] 贾晓轩. 北京地区银杏, 红松纯林挥发性有机物释放研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2016.
- [9] ATKINSON R, AREY J. Gas-phase tropospheric chemistry of biogenic volatile organic compounds: a review[J]. *Atmospheric Environment*, 2003, 37 (suppl. 2): 197-219.
- [10] CHEN J W, CAO K F. Plant VOCs emission: a new strategy of thermotolerance[J]. *Journal of Forest Research*, 2005, 16 (4): 323-326.
- [11] ALI J G, ALBORN H T, CAMPOS-HERRERA R, et al. Subterranean, herbivore-induced plant volatile increases biological control activity of multiple beneficial nematode species in distinct habitats[J]. *Plos One*, 2012, 7 (6): e38146.
- [12] 李继泉, 樊慧, 金幼菊, 等. 光肩星天牛取食后复叶槭挥发物的释放机制[J]. *北京林业大学学报*, 2002, 24 (5): 170-174.
- [13] 彭少麟, 邵华. 化感作用的研究意义及发展前景[J]. *应用生态学报*, 2001, 12 (5): 780-786.
- [14] BALDWIN I T, HALITSCHKE R, PASCHOLD A, et al. Volatile signaling in plant-plant interactions: "talking trees" in the genomics era[J]. *Science*, 2006, 311 (5762): 812-815.
- [15] ILMBERGER J, HEUBERGER E, MAHRHOFER C, et al. The influence of essential oils on human attention. I: alertness[J]. *Chemical Senses*, 2001, 26 (3): 239-245.
- [16] 郭阿君. 10种室内观叶植物固碳释氧、蒸腾、抑菌特性的研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2004.
- [17] 赵亚红, 徐翠霞, 马玲, 等. 3种常绿树挥发物成分对空气负离子及微生物的影响[J]. *浙江农林大学学报*, 2020, 37 (4): 654-663.
- [18] 朱霁琪, 彭尽晖, 李艳香, 等. 园林植物挥发性气体除菌作用国内研究进展[J]. *广东林业科技*, 2008, 24 (4): 92-95.
- [19] 佟琴琴, 姚雷. 迷迭香和柠檬草的精油以及活体香气的抗抑郁作用的研究[J]. *上海交通大学学报(农业科学版)*, 2009, 27 (1): 82-85.
- [20] RENNER E, MUNZENBERG A. Impact of biogenic terpene emissions from *Brassica napus* on tropospheric ozone over Saxony (Germany): numerical investigation[J]. *Environmental Science & Pollution Research*, 2003, 10 (3): 147-153.
- [21] 李双江, 袁相洋, 李琦, 等. 12种常见落叶果树BVOCs排放清单和排放特征[J]. *环境科学*, 2019, 40 (5): 2078-2085.
- [22] 操璟璟, 陈凤美, 龚玉霞, 等. 深山含笑叶片的挥发油成分及其生物活性研究[J]. *植物资源与环境学报*, 2007, 16 (3): 27-30.
- [23] 刘群, 姜自见, 张文慧, 等. 乐昌含笑叶挥发油GC-MS

- 及其活性初步测定[J]. 中国城市林业, 2008, 6 (5): 58-60.
- [24] 李军集, 孟忠磊, 黎贵卿. 广西白玉兰花和叶片挥发油化学成分的GC/MS分析[J]. 西南林业大学学报, 2012, 32 (6): 102-106.
- [25] 刘艳清, 汪洪武. 超临界萃取荷花玉兰叶挥发油及其成分分析[J]. 精细化工, 2008, 25 (6): 573-576.
- [26] NIINEMETS Ü, KUHN U, HARLEY P C, et al. Estimations of isoprenoid emission capacity from enclosure studies: measurements, data processing, quality and standardized measurement protocols [J]. Biogeosciences, 2011, 8 (8): 2209-2246.
- [27] 郟光发, 王成, 彭镇华. 森林生物挥发性有机物释放速率研究进展[J]. 应用生态学报, 2005, 16 (6): 1151-1155.
- [28] 吴楚材, 吴章文, 罗江滨. 植物精气研究[M]. 北京: 中国林业出版社, 2006.
- [29] 王金凤, 周琦, 潘柏青, 等. 永嘉四海山黄山松林挥发性有机物成分及变化研究[J]. 浙江林业科技, 2019, 39 (2): 75-80.
- [30] 周琦, 王金凤, 徐永勤, 等. 樟树叶片挥发性有机物释放季节动态和日动态变化规律[J]. 广西植物, 2020, 40 (7): 1021-1032.
- [31] US EPA. US Clean air act section 112 (b) [M]. Washing DC: US EPA, 1990.
- [32] 吴楚材, 郑群明. 植物精气研究[J]. 中国城市林业, 2006 (4): 61-63.
- [33] 只木良也, 吉良龙夫. 人与森林-森林调节环境的作用[M]. 北京: 中国林业出版社, 1992.
- [34] 杨敏, 梅馨月, 廖静静, 等. 3种葱属作物挥发物和提取液对植物病原真菌和卵菌的抑菌活性[J]. 植物保护, 2013, 39 (3): 36-44.
- [35] 郭阿君, 王志英, 邹丽, 等. 樟子松挥发性有机物释放动态及其抑菌作用[J]. 东北林业大学学报, 2014, 42 (4): 115-118.
- [36] PAPIEZ M R, POTOSNAK M J, GOLIFF W S, et al. The impacts of reactive terpene emissions from plants on air quality in Las Vegas, Nevada[J]. Atmospheric Environment, 2009, 43 (27): 4109-4123.
- [37] ZHANG Z, GUO S, LIU X, et al. Synergistic antitumor effect of α -pinene and β -pinene with paclitaxel against non-small-cell lung carcinoma (NSCLC) [J]. Drug Research, 2015, 65 (4): 214-218.
- [38] 郭阿君. 4种园林树木挥发性有机物释放动态及其抑菌作用的研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2007.
- [39] 曾春晖, 杨柯, 韦建华, 等. 广西山油柑不同部位挥发油成分及抗菌作用的研究[J]. 中成药, 2012, 34 (4): 747-750.
- [40] 魏凤香, 商蕾, 高虹, 等. α -蒎烯抗腺病毒作用机制研究[J]. 哈尔滨医科大学学报, 2020, 54 (3): 248-252.
- [41] 夏忠弟, 毛学政, 罗映辉. α -蒎烯抗真菌机制的研究[J]. 湖南医科大学学报, 1999, 24 (6): 507-509.
- [42] 刘振凯, 崔晶, 理永霞, 等. α 和 β -蒎烯胁迫下松材线虫转录组特征[J]. 东北林业大学学报, 2020, 48 (5): 93-98.
- [43] 倪娜, 赵君. GC-MS法分析红毛五加皮中挥发油的化学成分[J]. 中国科技论文在线, 2007, 2 (11): 852-855.
- [44] 王世永. 吴茱萸挥发油的提取分离, 鉴定及抗氧化和抗菌活性研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2008.
- [45] 张季林, 魏惠珍, 张洁. β -石竹烯生物学功能的研究进展[J]. 山东医药, 2018, 58 (38): 110-112.
- [46] PARSHINTSEV J, NURMI J, KILPELAINEN I, et al. Preparation of β -caryophyllene oxidation products and their determination in ambient aerosol samples[J]. Analytical & Bioanalytical Chemistry, 2008, 390 (3): 913-919.
- [47] GHELARDINI C, GALEOTTI N, MANNELLI L, et al. Local anaesthetic activity of beta-caryophyllene[J]. Farmaco, 2001, 56 (5-7): 387-389.
- [48] 陈旭冰, 仝诚, 陈光勇. β -石竹烯的研究进展[J]. 山东化工, 2011, 40 (7): 34-36.
- [49] KIKUCHI A, YAMAGUCHI H, TANIDA M, et al. Effects of odors on cardiac response patterns and subjective states in a reaction time task[J]. Tohoku Psychologica Folia, 1992, 51: 74-82.
- [50] 刘盼盼, 郑鹏程, 龚自明, 等. 青砖茶的香气成分分析[J]. 食品科学, 2017, 38 (8): 164-170.
- [51] 李冲. 椴柑果酒酿造工艺及其香气成分与货架期研究[D]. 吉首: 吉首大学, 2018.
- [52] MUKAI A, TAKAHASHI K, ASHITANI T. Natural autoxidation of longifolene and anti-termite activities of the products[J]. Journal of wood science, 2017, 63 (4): 1-9.
- [53] 王丽, 董刚, 苏航, 等. 乙肝解毒丸中挥发性成分的GC-MS分析[J]. 特产研究, 2013(2): 57-60.
- [54] 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, 15 (3): 183-187.
- [55] 牛小杰, 孙鲁阳. 植物精油化学成分的研究进展[J]. 生物化工, 2021, 7 (5): 160-162.
- [56] 苏铁, 林智熠, 侯政杰, 等. 木本植物精油研究进展[J]. 世界林业研究, 2021, 34 (4): 61-66.
- [57] 刘超祥, 姜自见, 朱峰, 等. 深山含笑叶挥发油的化学成分及生物活性测定[J]. 安徽农业科学, 2008, 36 (17): 7292-7293; 7351.
- [58] 张树祥, 熊国裕. 广玉兰叶挥发油在制药上的应用: CN 200710175656[P]. 2009-04-15.