

文章编号: 1001-7380(2015)03-0006-06

金桂释放挥发性有机物的日动态分析

陈霞^{1,2}, 郭立春³, 刘海燕², 肖文娅², 关庆伟^{2*}

(1. 中山陵园管理局, 江苏 南京 210014; 2. 南京林业大学生物与环境学院, 江苏 南京 210037;
3. 中山园林集团公司梅研中心, 江苏 南京 210014)

摘要: 采用动态顶空吸附法和热脱附-气相色谱-质谱联用法(TCT-GC/MS), 在紫金山国家森林公园灵谷寺景区, 于10月对金桂日释放的挥发性有机物进行测定分析, 对含花朵和不含花朵的枝叶释放含量进行比较, 分析其日变化, 并初步探讨与环境因素的关系。结果表明: 金桂花期时共释放出73种挥发性有机物, 以醇类、烯类化合物为主, 占83.57%, 主要是1- β -辛烯-3-醇、2-呋喃甲醇和 β -水芹烯。1/3的挥发物(主要是18.58%的醇类化合物和小部分芳烃类化合物)是由金桂的花朵中挥发出来的。醇类化合物日变化先升后降, 烯类化合物先降后升。

关键词: 金桂; 挥发性有机物; 日动态

中图分类号: S685.13 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1001-7380.2015.03.002

Daily dynamic analysis of volatile organic compounds released of *Osmanthus fragrans* var *thunbergii*

CHEN Xia^{1,2}, Guo Li-chun³, LIU Hai-yan², XIAO Wen-ya², GUAN Qing-wei^{2*}

(1. The Administration of Dr Sun Yatsen's Mausoleum, Nanjing 210014, China; 2. College of Biology and Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 3. Plum Research Center, Nanjing Zhongshan Garden Group Co., Nanjing 210014, China)

Abstract: Using a dynamic headspace adsorption and thermal desorption cold trapping-gas chromatography-mass spectrometry (TCT-GC/MS), we investigated VOCs (volatile organic compounds) released of *Osmanthus fragrans* var *thunbergii* in Linggu Temple area on Purple Mountain National Forest Park in October, and discussed the relationship between emissions and environmental factors. The results showed that 73 kinds of VOCs in total were released during the flowering period. Most of them were alcohols, vinyl compounds, accounting for 83.57% (mainly 1,6-octene-3-ol, 2-furan methanol and β -phellandrene). One third of volatiles (mainly 18.58% of the alcohol compound and a small portion of aromatic compounds) were from the flowers. Diurnal variation featured that alcohol compounds decreased after increase, and the amount of vinyl compounds increased firstly and then dropped. Our purpose is to guide forest planting to make a choice, and provide a reference to the implementation of refined management of scenic forest.

Key words: *Osmanthus fragrans* var *thunbergii*; VOCs; Diurnal variation

近年来,以植物精气为保健资源的森林浴在世界各地纷纷开展^[1]。植物在生理过程中释放出生物活性有机挥发物(Biogenic volatile organic compounds, BVOCs),包括烃类、醇类、醛类、酮类、酯类、有机酸以及一些含氮化合物等,大多具有芳香气味,

被称为植物精气和芬多精(Phytoncides),是旅游区保健功能和空气清洁程度的重要指标^[2]。

桂花(*Osmanthus fragrans*)为木樨科木樨属的一种常见栽培植物,为食、药、观赏、绿化等多用植物,对其资源的开发正日益受到重视^[3],而金桂(*Os-*

收稿日期: 2015-03-26; 修回日期: 2015-04-28

基金项目: 南京市建设委员会课题“中山陵园风景区不同森林群落类型释放生物挥发物(BVOC)规律的研究”

作者简介: 陈霞(1975-),女,硕士,高级工程师,研究方向: 城市生态与城市林业。E-mail: 157168037@qq.com。

* 通信作者: 关庆伟(1964-),男,教授,研究方向: 城市森林生态与经营。E-mail: guanqian@163.com。

manthus fragrans var *thunbergii*) 是桂花的主要栽培品种。目前,对金桂的研究主要集中于其芳香成分^[4]、色素稳定性和提取^[5]、栽培技术^[6]及遗传表现^[7]等,但对其花期释放 BVOCs 的研究相对较少。

紫金山国家森林公园自 1993 年至 1999 年充实扩建的灵谷寺桂园,已建成全园面积 89 hm²,桂花 16 000 株以上,品种 30 种以上^[8]。灵谷寺景区桂花规模越来越大,因此,从指导游客赏桂的角度出发,开展研究很有必要。

1 材料与方法

1.1 供试材料

选取灵谷寺景区马尾松+金桂+荇草群落中的桂花^[9],树高 3.5 m、冠幅 2.5 m×2 m、树龄 15 a,占景区内 70% 左右的金桂,作为该研究的供试材料。

1.2 气体成分的收集

于 2010 年 10 月 9 日,晴朗,无风,从 7:00 ~ 18:00,每隔 2 h 取 1 次金桂带花朵和不带花朵的样本。使用动态顶空吸附采样法^[10-12](Dynamic Headspace Collection)进行采集。对植物挥发性物质的采集坚持活体采集的原则,保持植株正常生理状态,避免由机械损伤等因素导致的试验误差。具体步骤为(1)用塑料袋(美国 Reynolds 生产的微波炉袋)套住适量枝条后,立即用气泵抽尽塑料袋内空气;(2)用气泵泵入通过活性炭和 GDX-51 过滤的净化空气,并密闭系统;(3)充气至塑料袋内体积 2/3 时,开始循环收集,时间 40 min;(4)收集完成后,取下样品管。为了减少大气干扰,收集大气挥发性物质作为试验本底。每次收集设重复 3 个(同一种植物不同个体植株),取 3 次重复平均值。

1.3 气体成分的分析条件

植物 VOCs 组成分析采用的是热脱附/气相色谱/质谱联用法(Thermal desorption Cold Trapping-Gas Chromatography/Mass Spectrum,TCT/GC/MS)分析技术。本试验所用的 TCT 装置是珀金埃尔默公司(PerkinElmer)生产的 TurboMatrix 650 ATD-Clarus 600 GC-MS 全自动热脱附-气质联用仪。

TCT 的主要条件:系统压力:20 kPa,杆温度:250 ℃(10 min),冷阱温度:260 ℃。

GC 的工作条件:色谱柱:DB-5 Low Bleed/MS 柱(60 m×0.32 mm×0.5 μm),通过液氮脱附进样,

He 载气。程序升温:40 ℃(3 min)→6 ℃/min→270 ℃(5 min)→280 ℃(5 min)。

MS 的工作条件:电离方式:EI;离子能:70 eV;质量范围:29~350 amu;接口温度:250 ℃,离子源温度:200 ℃,发射电流:150 μA,全扫描,每次扫描所用时间 0.4 s,质谱扫描范围:m/z 19~435。

1.4 气体的鉴定与含量测定

GC/MS 质量数据从 Xcalibur 软件(Thermo-Finnigan; LesUllis, France)获得。通过 GC/MS 分析可获得 GC/MS 原始数据-总离子流图(TIC),图中各峰所代表的化学信息采用 Xcalibur 2 版本软件,经计算机检索 NIST98 谱图库,兼颜色谱保留时间确认及筛选,以此对各种挥发物成分进行鉴定。通过面积归一化法定量各类挥发物的相对含量。

1.5 气体的数据分析

对金桂挥发物日变化进行定量分析(包括各种成分的有无、含量的百分比等),比较不同时间、不同环境条件对其组成和含量的影响。把采样过程中进入惰性袋内并起到循环流动载气作用的过滤空气组分作为挥发物分析的空白本底,其化学成分种类及相对含量、强度等是确定植物挥发性组分的参照。

2 结果与分析

分析显示,惰性袋内对照空气组分的主要化学成分为对二氯苯、丙苯、三环萜醇、甲苯、苯、丁醚、苯酚、己内酰胺、甲酸乙酸酐、三氯甲烷、乙酸乙酯、丙酮、十一烷、1,3-二甲基苯、癸醛等。在各金桂品种挥发物的谱图中如果出现上述成分,必须严格甄别,如果数量级相同,则应予以剔除。

金桂挥发性有机物的组成以萜类为主,为便于区分和通俗易懂,本结果未采用专业的(为单萜、环烯醚萜、倍半萜、芳香族、脂肪族等)分类方法^[13],而是以分子结构中有有机功能团的类型来分为醇、醛、酮、酯、烃等及其氧化物。

2.1 金桂释放挥发性有机物的组成与含量

10 月 9 日,共检测到金桂释放出 73 种挥发性有机物,检出的化合物成分与相对含量具体情况如表 1 所示,其中 16 种醇类化合物,23 种烯类化合物,9 种酮类化合物,7 种酯类化合物,8 种醛类化合物,10 种烃类和杂环类化合物,这 6 类物质含量之和占离子流的 99.87%。

表 1 金桂挥发性有机物的组成与相对含量

%

化合物名称			测定时间					
中文名称	英文名称	分子式	7:00 ~ 8:00	9:00 ~ 10:00	11:00 ~ 12:00	13:00 ~ 14:00	15:00 ~ 16:00	17:00 ~ 18:00
醇类化合物								
3,7-二甲基-1,6-环辛二烯-3-醇	Dioceten-3-ol	C ₁₀ H ₁₆ O	—	—	0.09	0.1	0.16	0.21
3,7-二甲基-1,6-辛二烯-3-醇	3,7-Dimethyl-1,6-octadien-3-ol	C ₁₀ H ₁₈ O	49.42	52.48	53.43	54.67	44.54	25.03
3-环己烯-1-甲醇	3-Cyclohexene-1-methanol	C ₁₀ H ₁₈ O	0.33	0.26	0.14	0.13	0.17	0.08
吡喃醇	2h-Pyran-3-ol	C ₁₀ H ₁₈ O ₂	0.67	0.35	0.28	0.91	1.23	2.3
二甲基乙基戊醇	Dimethylpentanol	C ₇ H ₁₆ O	0.1	0.1	0.38	—	0.17	0.22
2-乙基-1-己醇	1-Hexanol 2-ethyl	C ₈ H ₁₈ O	0.56	0.63	0.8	0.65	0.67	0.73
反式芳樟醇氧化物	Linalool oxide <i>trans</i>	C ₁₀ H ₁₈ O ₂	0.23	0.19	—	—	—	—
呋喃甲醇	Furfurylcohol	C ₁₀ H ₁₈ O ₂	3.16	4.52	7.36	10.77	18.45	31.66
环己醇	Cyclohexanol	C ₁₂ H ₂₄ O	0.06	0.04	0.03	0.02	0.01	0.01
檀香脑	Santalol	C ₁₅ H ₂₄ O	—	—	0.07	0.06	0.07	0.11
反松香芹醇	L-Pinocarveol	C ₁₅ H ₂₄ O	0.13	0.08	0.07	0.02	—	—
香柠檬醇	Bergamotol	C ₁₅ H ₂₄ O	—	—	—	—	0.14	0.27
香叶醇	Trans-geraniol	C ₁₀ H ₁₈ O	0.05	0.07	0.08	0.06	0.07	0.08
1,6,10-癸烯-3-醇	1,6,10-Dodecatrien-3-ol	C ₁₅ H ₂₆ O	—	—	—	0.2	0.38	0.46
α-没药醇	α-Bisabolol	C ₁₅ H ₂₆ O	0.01	0.02	0.05	—	0.01	—
植醇	Phytol	C ₂₀ H ₄₀ O	0.34	0.21	0.1	0.1	0.15	0.06
烯类化合物								
2,6-二甲基辛四烯(E)	2,6-Dimethyl-1,3,5,7-Octatetraene(E)	C ₁₀ H ₁₄	0.71	0.59	0.51	0.07	0.43	0.47
1,3-环戊二烯	1,3-Cyclopentadiene	C ₁₀ H ₁₄	0.23	0.12	0.06	—	—	—
1,3,8-薄荷三烯	1,3,8-Menthatriene	C ₁₀ H ₁₄	0.39	0.32	0.06	0.1	0.02	0.05
α-蒎烯	α-Pinene	C ₁₀ H ₁₆	0.71	0.55	0.23	0.87	0.47	0.16
α-水芹烯	α-Phellandrene	C ₁₀ H ₁₆	0.42	0.49	0.5	0.15	0.2	0.32
β-蒎烯	β-Pinene	C ₁₀ H ₁₆	0.68	0.52	0.51	0.34	0.26	0.2
(+)-4-萜烯	(+)-4-Carene	C ₁₀ H ₁₆	0.67	0.52	0.43	0.16	0.25	0.27
β-水芹烯	β-Phellandrene	C ₁₀ H ₁₆	11.34	11.63	11.95	6.04	6.23	7.68
柠檬烯	Limonene	C ₁₀ H ₁₆	0.85	0.78	0.73	0.41	0.62	0.65
檀紫素三烯	Santolina triene	C ₁₀ H ₁₆	—	—	—	0.08	0.07	0.06
β-月桂烯	β-Myrcene	C ₁₀ H ₁₆	0.84	0.93	1.21	0.79	0.63	0.46
1,3,6-辛三烯	1,3,6-Octatriene	C ₁₀ H ₁₆	5.95	5.48	4.42	6.52	6.23	6.21
1,4-环己二烯	1,4-Cyclohexadiene	C ₁₀ H ₁₆	0.34	0.36	0.42	0.4	0.35	0.29
α-金合欢烯	α-Farnesene	C ₁₅ H ₂₄	0.22	0.24	0.31	0.01	0.08	0.27
柏木烯	Cedrene	C ₁₅ H ₂₄	0.43	0.2	0.19	0.12	0.11	0.17
石竹烯	Caryophyllene	C ₁₅ H ₂₄	0.77	0.5	0.17	0.11	0.2	0.16
别香枝烯	Alloaromadendrene	C ₁₅ H ₂₄ O	—	—	—	0.01	0.02	0.02
氧化柠檬烯	Limonene oxide	C ₁₀ H ₁₆ O	0.16	0.09	0.07	0.22	0.35	0.38
氧化金合欢烯	Farnesene epoxide E-	C ₁₅ H ₂₄ O	—	—	0.08	0.02	0.04	0.1
氧化红没药烯	Bisabolene epoxide	C ₁₅ H ₂₄ O	—	—	0.1	0.08	0.09	0.11

续表 1

化合物名称		分子式	测定时间					
中文名称	英文名称		7:00 ~ 8:00	9:00 ~ 10:00	11:00 ~ 12:00	13:00 ~ 14:00	15:00 ~ 16:00	17:00 ~ 18:00
环己二烯	Cyclohexadiene	C ₁₄ H ₂₀ O ₂	0.67	0.78	0.81	—	—	—
酮类化合物								
1,7-辛二烯-3-酮	1,7-Octadien-3-one	C ₁₀ H ₁₈ O	0.08	0.05	0.14	0.05	1.65	0.09
吡喃-3-酮	2h-Pyran-3-one	C ₁₀ H ₁₆ O ₂	0.21	0.23	0.28	—	0.25	3.13
2-香豆酮	2-Benzofuranone	C ₁₁ H ₁₆ O ₂	—	—	—	—	0.04	0.09
3-丁烯-2-酮	3-Buten-2-one	C ₁₃ H ₂₀ O	2.29	3.08	4.12	6.29	6.59	8.54
3,4-己二烯-2-酮	3,4-Hexadiene-2-one	C ₁₃ H ₂₂ O	—	—	—	0.27	0.22	0.1
2,5-环己二烯-1,4-二酮	2,5-Cyclohexadiene-1,4-dione	C ₁₄ H ₂₀ O ₂	1.02	0.91	0.17	0.63	0.72	0.71
2,4A-甲基萘-7-酮	2,4A-methanonaphthalen-7-one	C ₁₅ H ₂₂ O	0.51	0.48	0.29	0.09	0.2	0.27
α-紫罗兰酮	α-Ionone	C ₁₅ H ₂₂ O ₂	0.05	0.04	0.04	—	—	0.05
卡西酮	Cathinone	C ₉ H ₁₁ ON	—	—	—	0.15	0.07	0.09
酯类化合物								
乙酸己酯	Acetic acid hexyl ester	C ₁₀ H ₂₀ O ₂	0.9	0.1	0.11	0.19	0.1	0.06
草酸辛酯	Oxalic acid octyl ester	C ₁₃ H ₂₂ O ₄	0.17	0.13	0.09	0.18	0.21	0.29
乙酸叶醇酯	3-Hexen-1-ol acetate	C ₈ H ₁₄ O ₂	3.72	2.93	1.38	0.13	0.19	0.24
苯丙酸苯乙基酯	Phenethyl phenylpropionate	C ₁₇ H ₁₈ O ₂	0.76	0.5	0.2	0.27	0.16	0.21
棕榈酸甲酯	Hexadecanoic acid methyl ester	C ₁₇ H ₃₂ O ₃	—	—	—	—	0.07	0.03
苯二甲酸二丙酯	Benzenedicarboxylic acid propyl ester	C ₁₄ H ₁₈ O ₄	0.08	0.07	0.05	0.56	0.3	0.2
丁酸丁脂	Butanoic acid butylester	C ₈ H ₁₆ O ₂	0.08	0.08	0.18	0.16	0.11	0.09
醛类化合物								
异环柠檬醛	Isocyclocitral	C ₁₀ H ₁₆ O	1.32	0.99	0.71	0.56	0.74	0.86
癸醛	Decanal	C ₁₀ H ₂₀ O	0.05	0.03	0.02	0.02	0.35	0.39
安息香醛	Benzaldehyde	C ₇ H ₆ O	1.83	1.45	1.06	0.07	0.83	1.31
棕榈醛	Hexaecanal	C ₁₆ H ₃₂ O	0.15	0.06	—	—	—	—
3-甲基戊醛	Pentanal 3-methyl	C ₆ H ₁₂ O	0.21	0.15	0.1	0.09	0.11	0.15
己醛	Hexanal	C ₆ H ₁₂ O	0.58	0.16	0.11	0.75	0.62	0.31
庚醛	Heptanal	C ₇ H ₁₄ O	—	—	0.37	0.31	0.28	0.19
壬醛	Nonanal	C ₉ H ₁₈ O	1.13	1.01	0.98	0.98	0.04	0.03
烷烃、芳烃类和杂环类化合物								
2-甲基萘	Naphthalene 2-methyl	C ₁₁ H ₁₀	0.31	0.39	0.44	0.2	0.23	0.27
天蓝烃	Azulene	C ₁₅ H ₂₄	1.56	1.39	0.87	0.6	1.02	1.36
1,1-二甲基-3-亚甲基-2-乙烯基环己烷	Cyclohexane 2-ethenyl-1,1-dimethyl-3-methylene-	C ₁₁ H ₁₈	1.12	0.97	0.91	0.41	0.46	0.48
吡啶吲哚	Pyrido indole	C ₁₁ H ₈ N ₂	0.15	0.16	—	0.09	0.1	0.12
癸烷	Decane	C ₁₄ H ₃₀	0.06	0.07	0.21	—	—	—
十三烷	Tridecane	C ₁₃ H ₂₈	—	—	0.1	0.06	0.11	0.06
十六烷	Hexadecane	C ₁₆ H ₃₄	0.27	0.23	0.09	0.08	0.08	0.03
二十一烷	Heneicosane	C ₂₁ H ₄₄	0.72	0.67	0.48	0.39	0.66	0.71
丁化羟甲基苯	Butylated hydroxytoluene	C ₁₅ H ₂₄ O	0.19	0.59	0.84	2.48	0.69	0.4
邻苄基丝氨酸	L - Serine , O-(phenyl-methyl) -	C ₁₀ H ₁₃ NO ₃	—	—	0.08	0.06	0.06	0.07
苯丙噻唑	Benzothiazole	C ₇ H ₅ NS	0.04	0.03	0.03	0.01	0.03	0.03

在对金桂测得的 73 种挥发性有机物中,从表 1 和表 2 的日变化含量、平均含量可以看出,醇类化合物含量最高,达到了 61.9%,烯类化合物其次,为 21.67%,这 2 类化合物为金桂最主要的挥发物。酮类化合物居 3,为 7.39%,酯类化合物、醛类化合物、烃类和杂环类化合物含量相差不大。从同样是金桂 9:00~10:00(见图 1)的测定中,含花朵的和不含花朵的挥发性有机物中,醇类化合物增加了 18.58%,最为明显,其次为芳烃类化合物,这说明有 1/3 的挥发物是由金桂的花朵中挥发出来的,主要为 2-己烯醇、呋喃甲醇、吡喃-3-醇、 α -蒎烯、环柠檬醛、酮等,特别是吡喃,为花朵独有。对于金桂精油的研究目前已经有很多,说明金桂花朵及枝叶的挥发物确实对人体健康有利,金桂花期赏桂值得推崇。

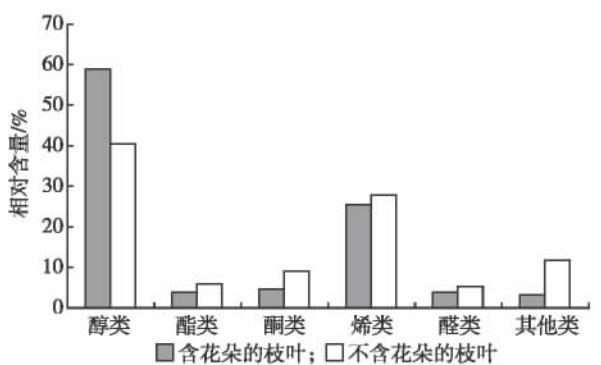


图 1 10 月 9 日挥发性有机物 9:00~10:00 的相对含量

2.2 金桂释放挥发性有机物的日动态变化

各类化合物都有各自的变化规律,且各有差异(见表 2)。金桂释放的挥发性有机物以醇类和烯类为主,各类物质有着各自的变化规律。

醇类化合物是金秋十月金桂释放的主要化合物,从表 2 中还可以看出,醇类化合物含量占到了 50% 以上,从早晨的 55.06% 逐渐上升,13:00~14:00 时达到了最高值 67.54%,然后逐渐下降至 61.03%,这其中的主要成分是 1- β -辛烯-3-醇和 2-呋喃甲醇,所占比例超过了 90%。1- β -辛烯-3-醇的变化规律是先升后降,13:00~14:00 时达到最高值,早晨释放量是傍晚释放量的 2 倍。2-呋喃甲醇的变化规律是一直升高,早晨只有 3.36%,17:00~18:00 时达到最高值 31.66%,变化幅度非常大,接近早晨的 10 倍。2 者变化趋势截然不同。其余的醇类化合物变化也不同,吡喃醇先降后升,植醇一直下降,2-乙基-1-己醇先升后降再升。因此,醇类化合物的日变化较大。

烯类化合物在金桂释放的 VOCs 总量中仅次于醇类化合物,虽然不足醇类 1/2,但其化合物种类最多,共鉴定出 21 种,其中单萜 10 种,含量超过一半,尤以 β -水芹烯和 1,3,6-辛三烯为主。4-蒎烯、 α -蒎烯、 β -蒎烯、 β -月桂烯、柠檬烯、氧化柠檬烯释放量相似;倍半萜 4 种,甘菊环含量最高。烯类化合物在早晨的含量最高,占 26.96%,随着温度升高逐渐降低,在 13:00~14:00 为 16.98%,14:00 后释放量开始回升,傍晚时达到 19.38%。大多数烯类化合物都以这样的趋势被释放,但也有在 13:00~14:00 时释放量达到最高值,如 1,3,6-辛三烯和 α -蒎烯。单萜氧化物在上午能检测到,倍半萜氧化物则只在中午前后才开始检测到。

表 2 10 月 9 日金桂挥发性有机物日变化相对含量

%

时间	醇类	酯类	酮类	烯类	醛类	烷烃、芳烃类和杂环类
7:00~8:00	55.06	5.71	4.16	26.94	5.27	2.96
9:00~10:00	58.95	3.81	4.79	25.49	3.85	3.11
11:00~12:00	62.79	2.01	5.04	23.63	3.35	3.18
13:00~14:00	67.54	1.49	7.53	16.88	2.78	3.77
15:00~16:00	66.06	1.14	9.74	17.67	2.97	2.42
17:00~18:00	61.01	1.12	13.07	19.39	3.24	2.19
平均含量	61.90	2.55	7.39	21.67	3.58	2.93

从表 2 可以看出,金桂释放的酮类化合物与酯类化合物的变化正好相反。酮类化合物在早晨时只有 4.16%,一直上升至傍晚时的 13.07%,主要以 3-

丁烯-2-酮的释放量不断增加为主。酯类化合物从早晨的 4.81% 一直下降至傍晚的 1.09%,主要以 3-己烯-1-醇酯的释放量不断下降为主,棕榈酸甲酯只

有傍晚才有释放。

醛类化合物释放量先降后升,13:00~14:00 时最低,只有 2.58%,早晨(5.4%)比傍晚(3.24%)释放量高,主要以苯甲醛和 3-甲基戊醛为主。烷烃、芳烃类和杂环类化合物的释放量与醛类化合物正好相反,先升后降,13:00~14:00 时最高,为 3.77%,早晨(2.96%)比傍晚(2.18%)释放量高,以 1,1-二甲基-3-亚甲基-2-乙烯基环己烷释放量最高。

2.3 金桂释放挥发性有机物的环境条件日变化

通过 10 月 9 日对金桂叶片各项生理指标的测试(表 3)可以看出,金桂的日生长曲线呈单峰状态,在 9:00 多时达到最高,这可能是金桂叶片的自身生理结构决定的,金桂叶片比较肥厚,叶色较深,叶绿素含量高,对光比较敏感,虽然中午时分光强最强,但是中午前已达到光饱和,有短暂的午休现象,即使

温度在升高,但是气孔导度下降,胞间 CO₂ 浓度在升高,导致光合速率一直下降。但是随着温度的升高,蒸腾速率也在升高,样本室和参比室水分差距增大,说明水分蒸发增强,植物通过蒸腾降低叶面温度,环境温度比叶面温度高 0.4℃左右。相对湿度早晨最高,一直下降后,到傍晚时分有所上升,和相对湿度一样,胞间 CO₂ 浓度在傍晚时也升高,这是因为呼吸作用强于光合作用,CO₂ 浓度太大已导致气孔导度下降,挥发性有机物的释放强度也下降。

对照金桂释放的各类挥发性有机物,可以得出温度是其最大的影响因子,60% 的醇类化合物日变化总趋势与温度日变化趋势相同。另外,醛类化合物的释放趋势与相对湿度的变化趋势相同,烷烃、芳烃类和杂环类化合物的释放趋势与光照度的变化趋势相同,其余的环境条件影响较小。

表 3 10 月 9 日金桂叶片各项生理指标

时间	光合速率/ [μmolCO ₂ / (m ² ·s ⁻¹)]	气孔导度 [molH ₂ O / (m ² ·s ⁻¹)]	胞间 CO ₂ 浓度/ μmol	蒸腾速率/ [mmolH ₂ O / (m ² ·s ⁻¹)]	叶片温度/ ℃	CO ₂ 变化量 (样本-参比) /μmol	H ₂ O 变化量 (样本-参比) / mmol	样本室 相对湿度/ %
7:15:18	6.45	0.16	353.90	2.12	22.16	-3.11	0.22	85.64
9:27:41	17.16	0.51	396.46	2.39	22.39	-7.3	0.93	77.12
11:45:05	13.52	0.38	367.56	4.41	26.21	-6.18	1.73	61.07
13:46:51	9.51	0.20	385.8	2.56	26.26	-4.29	1.01	59.67
15:45:36	4.35	0.19	404.81	2.44	25.85	-2.18	0.96	58.04
17:40:37	-2.45	0.12	469.44	1.00	23.68	0.8	0.39	68.92

3 讨论与结论

树种差异是决定树木 VOCs 释放的首要因素,树木的基本特征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^[9]。BVOCs 是植物本身在生理过程中挥发出来的,日含量变化主要取决于植物本身的生理代谢、气候环境因素以及与空气中其他气体的化学反应^[2]。温、湿度及光照是影响 BVOCs 释放的 3 个主要因素^[1]。

金桂花期时共释放出 73 种挥发性有机物,以醇类化合物、烯类化合物、酮类化合物为主,占化合物含量的 90.96%,主要以 1,6-辛烯-3-醇、2-呋喃甲醇、β-水芹烯、1,3,6-辛三烯和 3-丁烯-2-酮为主,其中 1/3 的挥发物是由金桂的花朵中挥发出来的。日变化中,醇类化合物先升后降,烯类化合物先降后升,酮类化合物一直上升。金桂的日生长曲线呈单峰状态,醇类化合物日变化总趋势与温度日变化趋

势相同,烯类、醛类化合物的释放趋势与相对湿度的变化趋势相同。

参考文献:

[1] 王 成. 城市森林建设中的植源性污染[J]. 生态学杂志, 2003, 22(3): 32-37.
[2] 郭二果,王 成,鄢光发,等. 城市森林生态保健功能表征因子之间的关系[J]. 生态学杂志, 2013, 32(11): 2893-2903.
[3] 辞海编辑委员会. 辞海生物分册[M]. 上海: 上海辞书出版社, 1975: 299.
[4] 杨雪云,赵博光,刘秀华,等. 金桂银桂鲜花挥发性成分的顶空固相微萃取 GC-MS 分析[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2008, 32(4): 86-90.
[5] 储 敏. 金桂与丹桂醇溶性色素的提取及其稳定性比较[J]. 氨基酸和生物资源, 2007, 29(1): 1-3.
[6] 李大明,杜 丽. 单干型潢川金桂培育技术与园林应用[J]. 福建林业科技, 2011, 38(2): 141-143.
[7] 唐 丽,唐 芳,段经华,等. 金桂芳樟醇合成酶基因的克隆与序列分析[J]. 林业科学, 2009, 45(5): 11-19.

(下转第 16 页)

位生理测定加以佐证。另外,挥发性化合物有效成分的比例对昆虫的趋性也有很大影响^[13]。虽然花绒寄甲的视觉退化严重,但视觉因素也有可能对昆虫在定位寄主和交配时产生影响^[14]。随着单细胞记录技术(SCR)^[15]和分子生物学的发展,笔者认为对于花绒寄甲搜索寄主行为和化学通讯的研究,应继续从超微结构、电生理反应及化学感受基因^[16]等层面进行更深入探讨。

参考文献:

- [1] Nina E F, Gabriella B K, Lucas A K, et al. Oviposition-induced plant cues: do they arrest *Trichogramma* wasps during host location? [J]. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 2005, 115 (1): 207-215.
- [2] Paré P W, Tumlinson J H. Induced synthesis of plant volatiles [J]. *Nature*, 1997, 385(2): 30-31.
- [3] Vet L E M, Dicke M. Ecology of infochemical use by natural enemies in a tritrophic context [J]. *Annual Review of Entomology*, 1992(37): 141-172.
- [4] 杨忠岐,李建庆,梅增霞,等.释放花绒寄甲防治危害白蜡的云斑天牛[J]. *林业科学*, 2011, 47(12): 78-84.
- [5] 高悦,解春霞,刘云鹏,等.花绒寄甲对柳树光肩星天牛的防治效果及寄生能力[J]. *西南林业大学学报*, 2013, 33(5): 104-106.
- [6] 高悦,解春霞,刘云鹏,等.花绒寄甲松褐天牛生物型人工繁育替代寄主的筛选研究[J]. *中国生物防治学报*, 2015, 31(2): 264-267.
- [7] 万方浩,仝赞华,陶淑霞,等.引诱赤眼蜂产卵的他感化合物活性物质的提取及分析[J]. *中国农业科学*, 2001, 34(3): 277-282.
- [8] 白树雄,王振营,何康来,等.玉米螟赤眼蜂对亚洲玉米螟益它素的嗅觉反应[J]. *昆虫学报*, 2004, 47(1): 48-54.
- [9] 王勇,肖铁光,何忠,等.马尾松树脂挥发性化学物质对松毛虫赤眼蜂嗅觉及寄生行为的影响[J]. *昆虫知识*, 2008, 45(6): 944-949.
- [10] Vinson S B. The general host selection behavior of parasitoid *Hy-menoptera* and a comparison of initial strategies utilized by *Larvaphagous* and *Oophagous* species [J]. *Biological Control*, 1998, 11(2): 79-96.
- [11] 练永国,王素琴,白树雄,等.挥发性信息化合物对玉米螟赤眼蜂寄生选择行为的影响[J]. *昆虫学报*, 2007, 50(5): 448-453.
- [12] Wei J R, Yang Z Q, Hao H L, et al. (R)-(+)-limonene, kairomone for *Dastarcus helophoroides*, a natural enemy of longhorned beetle [J]. *Agricultural and Forest Entomology*, 2008, 10(4): 323-330.
- [13] 罗永松,肖活生,孙江华,等.利用 α -Pinene等引诱剂诱杀松瘤象的研究[J]. *江西植保*, 2004, 27(1): 26-27.
- [14] 刘博,徐华潮,孟俊国,等.视觉因素在松墨天牛定位寄主和交配中的作用[J]. *浙江农林大学学报*, 2012, 29(4): 617-620.
- [15] 陶瑞松.昆虫触角感受器电位的研究进展[J]. *安徽农业科学*, 2012, 40(16): 8944-8946.
- [16] 阎雄飞,刘博,刘永华,等.植食性昆虫寄主识别的化学感受分子机理[J]. *榆林学院学报*, 2013, 23(2): 5-10.

(上接第 11 页)

- [8] 王鹏善. 钟山志[M]. 南京: 南京出版社, 2009.
- [9] 梁珍海,刘海燕,陈霞,等.南京紫金山不同植物群落中VOCs的组成[J]. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2011, 35(1): 34-38.
- [10] 李美娟. 鹭峰国家森林公园大气—植物VOCs的研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2007.
- [11] 陈华君,洪蓉,金幼菊,等.近自然状态下植株挥发物的采集和热脱附-GC-MS分析[J]. *分析测试学报*, 2003, 22: 226-228.
- [12] 盛国英,傅家漠,成玉,等.粤港澳地区大气中有机污染物初步研究[J]. *环境科学*, 1999, 20(4): 6-11.
- [13] 何兰,姜志宏.天然产物资源化学[M]. 北京: 科学出版社, 2008, 220-273.