

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw201902003

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.
ZHOU Q, WANG JF, XU YQ, et al. Seasonal and diurnal change laws of volatile organic compounds from leaves of *Cinnamomum camphora* [J]. *Guihaia*, 2020, 40(7): 1021–1032.

樟树叶片挥发性有机物释放季节动态和日动态变化规律

周琦¹, 王金凤¹, 徐永勤², 夏淑芳¹, 沈凤强², 徐卢雨², 陈卓梅^{1*}

(1. 浙江省林业科学研究院, 杭州 310023; 2. 浙江物产长乐实业有限公司, 杭州 310023)

摘要: 采用动态顶空采集法和热脱附-气质联用技术, 对不同季节和一天内不同时间点樟树叶片释放的挥发性有机物 (VOCs) 成分含量及其变化规律进行了分析。结果表明: 全年樟树叶片释放的 VOCs 共计 78 种, 其中萜烯类 (19 种) 和烷烃类 (18 种) 化合物种类较多; 32 种樟树叶片释放的挥发性成分相对含量在不同季节存在显著差异 ($P < 0.05$); 3 月份释放的 VOCs 种类最为丰富, 萜烯类化合物相对含量最高 (43.49%), 主要为 1-石竹烯、D-柠檬烯和 α -蒎烯, 其他月份释放的 VOCs 则以烷烃类和醇类为主; 春季, 樟树叶片在绝大多数时间点释放 VOCs 以萜烯类化合物为主, 且早上 8:00 释放的萜烯类化合物相对含量最大。综上所述认为, 樟树是营造保健型生态园林的理想树种, 其叶片释放的 VOCs 中富含多种对人体健康有益的萜烯类化合物, 春季的早晨是进行森林康养活动的最佳时间。

关键词: 樟树, 叶片, 挥发性有机物, 季节动态, 日动态

中图分类号: Q945 文献标识码: A

文章编号: 1000-3142(2020)07-1021-12

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Seasonal and diurnal change laws of volatile organic compounds from leaves of *Cinnamomum camphora*

ZHOU Qi¹, WANG Jinfeng¹, XU Yongqin², XIA Shufang¹,
SHEN Fengqiang², XU Luyu², CHEN Zhuomei^{1*}

(1. Zhejiang Academy of Forestry, Hangzhou 310023, China; 2. Zhejiang Wuchan Changle Industries Co., Ltd., Hangzhou 310023, China)

Abstract: Volatile organic compounds (VOCs) were collected in different seasons and different times of the day by dynamic headspace air-circulation method, and the relative contents and the change laws were also analyzed using the thermal desorption system gas chromatography/mass spectrum (GC-MS). The results were as follows: *Cinnamomum camphora* leaves released 78 types of VOCs during the whole year, and the types of terpenes (19) and alkanes (18) were more abundant than those of other compounds; The relative contents of 32 types of VOCs had significant differences ($P < 0.05$) among different seasons; The number of types in March was the most abundant, and the relative contents of terpenes

收稿日期: 2019-04-03

基金项目: 浙江省科技厅院所专项项目 (2016F50023) [Supported by Special Program for Academy and Institution of Science and Technology Department of Zhejiang Province (2016F50023)]。

作者简介: 周琦 (1990-), 男, 江苏徐州人, 博士, 助理研究员, 主要从事林木遗传育种研究, (E-mail) qizhou36@hotmail.com。

*通信作者: 陈卓梅, 博士, 研究员, 主要从事园林植物育种和挥发性有机物释放特性研究, (E-mail) zhuomeichen@163.com。

reached 43.49%, including 1-Caryophyllene, D-Limonene and α -pinene, and the types of VOCs released from *C. camphora* leaves in other months were mainly of alkanes and alcohols; In spring, the relative contents of VOCs released at most of the time were all mainly of terpenes, and the relative contents of terpenes released at 8:00 am were the highest. Therefore, *C. camphora* is an ideal species for ecological and healthy landscape, and the VOCs released from *C. camphora* leaves are rich in kinds of terpenes compounds, which are beneficial for human health, and spring and morning are the best time for forest recreation.

Key words: *Cinnamomum camphora*, leaves, volatile organic compounds(VOCs), seasonal change, diurnal change

植物挥发性有机物(volatile organic compounds, VOCs)是一种由植物次生代谢产生,且在常温下主要以液态形式存在的有机物质(陈洪伟等,2001;陈静,2016)。不同植物的合成与释放部位有所不同,对于绝大多数开花植物而言,花释放出 VOCs 的量最大、种类最为丰富(Knudsen et al., 2006),营养组织(如叶和茎)是针叶树、草本植物的 VOCs 主要来源(McConkey et al., 2000; Vassão et al., 2006)。自然界中的 VOCs 组成十分丰富,种类在 10 000 种以上(杨小琴,2006),按结构特点大致可分为萜烯类、烷烃类、芳香烃类、醛类、酮类、醇类、酯类、有机酸类和其他类型(Atkinson & Arey, 2003; Chen & Cao, 2005)。这些植物源 VOCs 不仅具有吸引传粉者(Raguso, 2008)、防御天敌(Degenhardt et al., 2009; Unsicker et al., 2009; Ali et al., 2012)、杀菌抑菌(Huang et al., 2012)、抵御非生物胁迫(Dudareva et al., 2006; Vickers et al., 2009)、促进植物间信息交流(Cojocariu et al., 2004; Baldwin et al., 2006)、改变大气组成(洪蓉, 2002; Kaplan et al., 2006; Bao et al., 2010)等重要生物生态学作用,而且具有缓解疲劳、强身健体(房城等, 2010; Zhang et al., 2015)、调节精神(Cruz-López et al., 2001; 佟琴琴和姚雷, 2009; Papiiez et al., 2009)等保健作用。此外,一些 VOCs 会对环境造成一定负面影响(Renner & Münzenberg, 2003)。由于温度、湿度、光照等环境因子以及植物自身的生理状态均会对部分 VOCs 释放产生影响,使得植物源 VOCs 的释放具有较强的季节和日变化动态性(Padhy & Varshney, 2005; 邓小勇, 2009)。深入研究植物 VOCs 释放特征和变化规律,可为大气环境质量预报提供科学的参考数据,对合理的园林植物配置及其保健效果的

预测具有重要意义。

樟树(*Cinnamomum camphora*)是樟科(Lauraceae)樟属(*Cinnamomum*)常绿乔木,为亚热带常绿阔叶林的代表树种;其枝叶繁茂,树冠广展,是优良的绿化树、行道树、庭荫树及保健树(李勇鹏等,2015)。樟树各部位均具有不同的应用价值,木材、根、枝、叶可提取樟脑和樟油,用于医疗与香料工业;果核富含的天然色素和精油可供纺织品染色等工业用;同时,根、果、枝和叶可入药,有祛风散寒、强心镇痉和杀虫等功效。近些年,对樟树的研究主要集中在组织培养快繁体系(杜丽, 2005)、精油提取技术(黄婷, 2016)、杀虫抑菌特性(Liu et al., 2006)、分子生物学(Yang et al., 2002; Kameyama, 2012)等领域。作为含有大量具特殊香味有机物的樟树,吴楚材等(2006)和邓小勇(2009)对其离体叶片释放的 VOCs 成分进行研究,任露洁等(2012)对以樟树为主的典型群落中 VOCs 释放日动态进行探究。然而,樟树叶片 VOCs 释放的季节动态和日动态变化可以为人们选择适宜的季节和时间开展森林康养提供依据,但该部分的研究却尚未见报道。本研究采用动态顶空采集法对樟树叶片不同季节和一天内不同时间释放的 VOCs 进行采集,结合热脱附-气质联用技术对其组成和相对含量进行检测与分析,揭示樟树叶片 VOCs 释放的年动态变化和日动态变化规律,为合理利用樟树的园林绿化与保健功能提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 材料

试验样地是浙江省杭州市余杭区国营长乐林

场(119°50' E, 30°22' N)。该林场位于浙江省杭州市,属亚热带季风气候,全年平均气温 15.8 °C,年降雨量 1 350 mm,无霜期 232 d。试验植株来自林场内的天然樟树林,生长健康,无病虫害。

1.2 VOCs 采集

分别在 2017 年 3 月、6 月、9 月和 12 月选择晴朗无风的天气,于上午 8:00—16:00 间每 2 h 取一次样,选择同一位置生长健康、枝叶繁茂且向阳的枝条。利用 ZC-Q 便携式双泵大气采样器(浙江恒达),采用动态顶空气体循环采集法进行样品采集。采气袋容积为 0.1 m³,流量 0.1 m³·min⁻¹,采集时间为 30 min,重复 3 次。同时,每季节所取样品中增加 3 个空白对照,不进行 VOCs 采集,其他均为相同处理,用于校正本底影响。

1.3 VOCs 成分测定

采用热脱附-气相色谱/质谱联用法(Thermo Desorption System/Gas Chromatography/Mass Spectrometry, TDS-GC/MS)完成植物 VOCs 成分的测定。

色谱条件(7890A 型,Agilent 公司):HP-5MS 弹性石英毛细管柱(30 m × 250 μm × 0.25 μm);载气为高纯氦气;进样不分流;体积流量为 1.0 mL·min⁻¹;色谱柱初始温度为 40 °C,保持 3 min,先以 6 °C·min⁻¹的速率升至 112 °C,保持 3 min,再依次以 6 °C·min⁻¹的速率升至 250 °C 和以 10 °C·min⁻¹的速率升至 270 °C,保持 5 min。

质谱条件(5975A 型,Agilent 公司):电子轰击(EI)离子源,电子能量为 70 eV;扫描质量数范围为 29~400 amu;离子源温度为 230 °C;接口温度为 280 °C;四级杆温度为 150 °C。

热脱附条件(TD3 型,德国 Gerstel 公司):系统载气压力 20 kPa;进样口温度 250 °C;脱附温度 250 °C,保持 10 min;冷阱温度 -100 °C,保持 3 min;冷阱进样时温度迅速升温至 260 °C。

1.4 数据分析

对于 GC/MS 分析所获得的 VOCs 成分 GC/MS 原始数据总离子流图(TIC),其各峰对应的化学物质信息利用 Xcalibur 1.2 软件,经检索质谱数据库(NIST2008 谱库)后,结合人工校对和解析,最终确定各 VOCs 成分。最后,采用面积归一法计算各成分的相对含量。

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

利用 SPSS 22.0 软件对不同季节检测到各成分相对含量进行单因素方差分析和 Duncan 多重比较($P<0.05$),未检测到的成分分析时以 0 表示。方差分析前,先对数据进行正态分布(Shapiro-Wilk W test)和方差齐性(Levene's test)检验,对非正态的数据集进行 Z-score 标准化。利用 Excel 2013 和 Origin 8.5 软件完成图表的绘制。

2 结果与分析

2.1 樟树叶 VOCs 成分和相对含量的季节动态变化

从樟树叶片不同季节释放的 VOCs 中鉴定出 78 种化合物(表 1)。其中,检测到的萜烯类和烷烃类化合物的种类最多,分别为 19 种、18 种,共占检测到所有化合物种类的 47.44%;而检测到的芳烃类、醛类、酮类、醇类、酯类、有机酸类和其他类化合物的种类为 4~9 种不等。各类化合物在不同季节的释放情况有所不同,其中 32 种化合物在不同季节的相对释放量存在显著差异($P<0.05$),烷烃类 13 种、萜烯类 4 种、芳烃类 3 种、醛类 3 种、酯类 2 种、酮类 2 种、醇类 2 种、有机酸类 2 种和其他类化合物 1 种。

对上述 32 种化合物的相对含量进行 Duncan 多重比较,结果表明樟树叶片所释放的萜烯类化合物中, α -蒎烯、蒎烯和樟脑在 3 月份的相对含量均显著高于其他月份;L-薄荷醇仅在 9 月份检测到,但相对含量较低(2.30%)。樟树叶片的烷烃类化合物释放量在不同季节间变化最大,共 13 种化合物的相对含量差异达到显著水平;壬烷在 12 月份的相对含量显著低于其他月份,癸烷在 12 月份的相对含量同样显著高于其他月份;2,2,4,4-四甲基辛烷和 2,2,4,6,6-五甲基庚烷在 6 月和 9 月的相对含量显著高于其他 2 个月份;此外,3 月、9 月和 12 月分别检测到 6 种(2,4-二甲基庚烷、2,5-二甲基壬烷、4-甲基辛烷、4-甲基壬烷、2,6-二甲基壬烷、4-甲基癸烷)、2 种(2,7,10-三甲基十二烷、3,5-二甲基辛烷)和 1 种(萘烷)特有的烷烃类化合物。芳烃类化合物在 9 月份的释放量较为丰富,

表 1 不同季节樟树叶片释放的 VOCs 成分和相对含量

Table 1 Compounds and relative contents of VOCs released from leaves of *Cinnamomum camphora* in different seasons

序号 No.	化合物 Compound	CAS 号 CAS No.	分子式 Formula	相对含量 Relative content (%)				显著性 Significance
				3 月 March	6 月 June	9 月 September	12 月 December	
1	乙醇 Ethanol	64-17-5	C ₂ H ₆ O	0.03	0.08	0	0	
2	叔丁醇 Tert-Butano	75-65-0	C ₄ H ₁₀ O	0	0.23	0	0	
3	三氯甲烷 Chloroform	67-66-3	CHCl ₃	0	0	0	0.98	
4	丁醇 Butanol	71-36-3	C ₄ H ₁₀ O	4.26	3.44	8.40	10.46	
5	戊醛 Valeraldehyde	110-62-3	C ₅ H ₁₀ O	0	0	0	0.93	
6	1-戊醇 1-Pentanol	71-41-0	C ₅ H ₁₂ O	1.05a	0b	0.93ab	0b	**
7	己醛 Hexanal	66-25-1	C ₆ H ₁₂ O	3.97	2.20	8.26	3.90	
8	醋酸丁酯 Butyl acetate	123-86-4	C ₆ H ₁₂ O ₂	1.46a	0b	0b	0.39b	**
9	2,4-二甲基庚烷 2,4-Dimethyl-heptane	2213-23-2	C ₉ H ₂₀	1.51a	0b	0b	0b	*
10	2,4-二甲基-1-庚烯 1-Heptene, 2,4-dimethyl-	19549-87-2	C ₉ H ₁₈	6.03a	0b	0b	0b	**
11	4-甲基辛烷 Octane, 4-methyl-	2216-34-4	C ₉ H ₂₀	1.54a	0b	0b	0b	**
12	正己醇 Hexyl alcohol	203-852-3	C ₆ H ₁₄ O	0.95a	0b	0b	0b	**
13	3-庚酮 3-Heptanone	106-35-4	C ₇ H ₁₄ O	0.18	0	0	0	
14	壬烷 n-Nonane	111-84-2	C ₉ H ₂₀	1.16ab	0.81bc	2.08a	0c	**
15	庚醛 Heptaldehyde	111-71-7	C ₇ H ₁₄ O	0.51a	0b	0.38ab	0b	*
16	异丙苯 Benzene, (1-methylethyl)-	98-82-8	C ₉ H ₁₂	0c	2.30b	6.72a	0c	**
17	α-蒎烯 α-Pinene	80-56-8	C ₁₀ H ₁₆	10.70a	3.46b	2.88b	2.36b	**
18	4-甲基-2-庚酮 2-Heptanone, 4-methyl-	6137-06-0	C ₈ H ₁₆ O	0.30	0	0	0	
19	莰烯 Camphene	79-92-5	C ₁₀ H ₁₆	1.52a	0b	0.32b	0b	**
20	正丙苯 n-Propylbenzene	103-65-1	C ₉ H ₁₂	0b	0b	0.65a	0b	*
21	苯甲醛 Benzaldehyde	100-52-7	C ₇ H ₆ O	0	1.12	1.14	0	
22	4-甲基壬烷 Nonane, 4-methyl-	17301-94-9	C ₁₀ H ₂₂	2.13a	0b	0b	0b	**
23	1,3,5-三甲基苯 Mesitylene	108-67-8	C ₉ H ₁₂	0.20	0	0	0	
24	左旋-β-蒎烯 (1S)-(1)-Beta-Pinene	18172-67-3	C ₁₀ H ₁₆	0.38	0	0.56	0	
25	苯胺 Aniline	62-53-3	C ₆ H ₇ N	0	13.02	1.28	0	
26	α-甲基苯乙烯 Isopropenyl benzene	98-83-9	C ₉ H ₁₀	0b	0b	3.92a	0b	**
27	2,2,4,4,6,6-五甲基庚烷 2,2,4,4,6,6-Pentamethyl-Heptan	13475-82-6	C ₁₂ H ₂₆	0b	26.23a	28.45a	0b	**

续表 1

序号 No.	化合物 Compound	CAS 号 CAS No.	分子式 Formula	相对含量 Relative content (%)				显著性 Significance
				3 月 March	6 月 June	9 月 September	12 月 December	
28	1,2,3-三甲基苯 1,2,3-Trimethylbenzene	526-73-8	C ₉ H ₁₂	0.28	0	0	1.21	
29	甲基庚烯酮 6-Methyl-5-hepten-2-one	110-93-0	C ₈ H ₁₄ O	0.42	0	0	0	
30	2-正戊基呋喃 2-Pentylfuran	3777-69-3	C ₉ H ₁₄ O	0	0	1.33	0	
31	癸烷 Decane	124-18-5	C ₁₀ H ₂₂	0.76b	0b	0b	12.56a	**
32	2,6-二甲基壬烷 2,6-Dimethylnonane	17302-28-2	C ₁₁ H ₂₄	3.27a	0b	0b	0b	**
33	2,5-二甲基壬烷 2,5-Dimethylnonane	17302-27-1	C ₁₁ H ₂₄	0.66a	0b	0b	0b	*
34	2,2,4,4-四甲基辛烷 2,2,4,4-Tetramethyloctane	62183-79-3	C ₁₂ H ₂₆	0b	1.05a	3.36a	0b	*
35	邻异丙基甲苯 1-Isopropyl-2-methyl-benzene	527-84-4	C ₁₀ H ₁₄	1.38	0	0	0	
36	D-柠檬烯 D-Limonene	5138-86-3	C ₁₀ H ₁₆	7.25	0	0	5.45	
37	2-乙基己醇 2-Ethylhexanol	104-76-7	C ₈ H ₁₈ O	8.21	15.41	10.74	26.95	
38	2,7,10-三甲基十二烷 Dodecane, 2,7,10-trimethyl-	74645-98-0	C ₁₅ H ₃₂	0b	0b	0.92a	0b	*
39	5-乙基-2,2,3-三甲基庚烷 5-Ethyl-2,2,3-trimethylheptane	62199-06-8	C ₁₂ H ₂₆	0	0.23	0	0	
40	3,5-二甲基辛烷 Octane, 3,5-dimethyl-	15869-93-9	C ₁₀ H ₂₂	0b	0b	1.55a	0b	**
41	3,6-二甲基癸烷 Decane, 3,6-dimethyl-	17312-53-7	C ₁₂ H ₂₆	0	0.91	0	0	
42	萘烷 Naphthalene, decahydro-, cis-	493-01-6	C ₁₀ H ₁₈	0b	0b	0b	2.37a	*
43	4-甲基癸烷 Decane, 4-methyl-	2847-72-5	C ₁₁ H ₂₄	0.68a	0b	0b	0b	**
44	苯乙酮 Acetophenone	98-86-2	C ₈ H ₈ O	1.85a	0b	0b	0b	**
45	2,4-二甲基苯乙烯 1-Methyl-4-(1-methylethenyl)-Benzene	1195-32-0	C ₁₀ H ₁₂	1.20	0	0	0	
46	N-甲基苯胺 N-Methylaniline	100-61-8	C ₇ H ₉ N	0	5.97	0	4.06	
47	壬醛 1-Nonanal	124-19-6	C ₉ H ₁₈ O	2.01a	1.81a	0b	1.19a	**
48	异佛尔酮 Isophorone	78-59-1	C ₉ H ₁₄ O	0.39	2.89	0.53	1.48	
49	磷酸三乙酯 Triethyl phosphate	78-40-0	C ₆ H ₁₅ O ₄ P	1.31a	2.16a	0b	0b	**
50	樟脑 DL-Camphor	21368-68-3	C ₁₀ H ₁₆ O	3.68a	0.52b	1.66b	1.23b	**
51	龙脑 DL-2-Bornanol	6627-72-1	C ₁₀ H ₁₈ O	0.94	0.67	0.28	0.35	
52	L-薄荷醇 L-Menthol	2216-51-5	C ₁₀ H ₂₀ O	0b	0b	2.30a	0b	*
53	苯甲酸 Benzoic acid	65-85-0	C ₇ H ₆ O ₂	3.89	1.26	3.76	10.30	
54	萘 Naphthalene	91-20-3	C ₁₀ H ₈	0	0	0	2.32	
55	十二烷 Dodecane	112-40-3	C ₁₂ H ₂₆	0	0	0	1.30	

续表 1

序号 No.	化合物 Compound	CAS 号 CAS No.	分子式 Formula	相对含量 Relative content (%)				显著性 Significance
				3 月 March	6 月 June	9 月 September	12 月 December	
56	癸醛 Decanal	112-31-2	C ₁₀ H ₂₀ O	0.82a	0.32a	0b	0b	**
57	4,6-二甲基十二烷 Dodecane, 4,6-dimethyl-	61141-72-8	C ₁₄ H ₃₀	0.28	0	0	0	
58	壬酸 Nonanoic Acid	112-05-0	C ₉ H ₁₈ O ₂	0.95b	0b	0b	2.04a	*
59	左旋乙酸冰片酯 l-Bornyl acetate	5655-61-8	C ₁₂ H ₂₀ O ₂	0.82	0	0	0	
60	2-甲基萘 2-Methylnaphthalene	91-57-6	C ₁₁ H ₁₀	0	0	0	0.71	
61	十三烷 Tridecane	629-50-5	C ₁₃ H ₂₈	0	0	0	0.65	
62	二乙酸甘油酯 Diacetin	25395-31-7	C ₇ H ₁₂ O ₅	1.59	1.43	0.97	0	
63	正癸酸 Decanoic acid	334-376-4	C ₁₀ H ₂₀ O ₂	0.22	0	0	0.22	
64	衣兰烯 Ylangene	14912-44-8	C ₁₅ H ₂₄	0.40	0	0	0	
65	(?)-α-蒎烯 α-Copaene	3856-25-5	C ₁₅ H ₂₄	0.25	0	0	0	
66	β-榄香烯 Elemene	33880-83-0	C ₁₅ H ₂₄	0.58	0	0	0	
67	长叶环烯 Longicyclene	1137-12-8	C ₁₅ H ₂₄	0.70	1.54	0.72	0	
68	苜蓿烯 (+)-Cyclosativene	22469-52-9	C ₁₅ H ₂₄	0	0.39	0	0	
69	长叶烯 D-Longifolene	475-20-7	C ₁₅ H ₂₄	2.88	10.24	5.89	3.04	
70	雪松烯 Cedrene	11028-42-5	C ₁₅ H ₂₄	0.19	0	0	0	
71	1-石竹烯 1-Caryophyllene	87-44-5	C ₁₅ H ₂₄	11.66	0.31	0	0	
72	(+)-喇叭烯 1H-Cycloprop [e] azulene, 1a, 2, 3, 5, 6, 7, 7a, 7b-octahydro- 1, 1, 4, 7-tetramethyl-, (1aR, 7R, 7aS, 7bR)-	21747-46-6	C ₁₅ H ₂₄	0.76	0	0	0	
73	佛术烯 Naphthalene, 1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 8a-octahydro-1, 8a-dimethyl-7- (1-methylethenyl)-, (1S, 7R, 8aR)-	10219-75-7	C ₁₅ H ₂₄	0.53	0	0	0	
74	香叶基丙酮 Geranylacetone	689-67-8	C ₁₃ H ₂₂ O	0.24a	0b	0b	0b	*
75	α-衣兰油烯 α-Muurolene	10208-80-7	C ₁₅ H ₂₄	0.25	0	0	0	
76	月桂酸 Lauric acid	143-07-7	C ₁₂ H ₂₄ O ₂	0.55a	0b	0b	0b	*
77	2-甲基-1-叔丁基-1,3-丙二醇 二异丁酸酯 Propanoic acid, 2-methyl-, 1- (1, 1-dimethylethyl)-2-methyl- 1,3-propanediyl ester	74381-40-1	C ₁₆ H ₃₀ O ₄	0	0	0	3.44	
78	二苯甲酮 Benzophenone	119-61-9	C ₁₃ H ₁₀ O	0.24	0	0	0	

注: * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$; 同行内不同小写字母表示存在显著差异 ($P < 0.05$)。

Note: * means $P < 0.05$, ** means $P < 0.01$; Different lowercase letters within the same line indicate significant differences ($P < 0.05$).

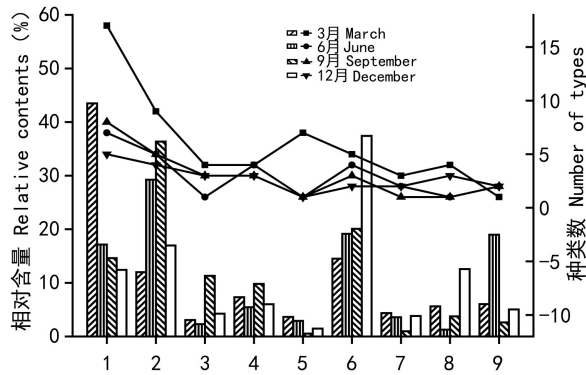


图1 不同季节樟树叶片释放 VOCs 种类(折线图)和相对含量(柱状图)

Fig. 1 Types (line chart) and relative contents (histogram) of VOCs released from leaves of *Cinnamomum camphora* in different seasons

有 3 种芳烃类化合物(正丙苯、异丙苯、 α -甲基苯乙烯)的相对含量显著高于其他月份。同样,樟树叶片所释放的 3 种醛类、2 种酮类、2 种醇类和 1 种其他类化合物在 3 月份的相对含量均要高于其他月份,且多数情况下达显著水平。2 种酯类化合物的相对含量则分别在 3 月(醋酸丁酯)、6 月最高(磷酸三乙酯)。

各季节检测到的樟树叶片释放的 VOCs 种类和相对含量变化情况如图 1 所示。从图 1 可以看出,4 个季节释放的 VOCs 种类均以萜烯类为主,其次是烷烃类。3 月份检测到的 VOCs 种类最多(54 种),其中萜烯类化合物有 17 种,占种类总数的 31.48%;6 月、9 月和 12 月分别检测到 27 种、27 种和 25 种 VOCs,萜烯类化合物种类数分别占总数的 25.93%(7 种)、29.63%(8 种)和 20.00%(5 种)。此外,3 月份检测到的烷烃类和酮类化合物种类明显多于其他月份,其中酮类化合物在 3 月份共检测到 7 种,而其他月份仅检测到 1 种。

樟树叶片释放的各类 VOCs 相对含量的季节间变化规律与种类变化规律有所不同。总体来看,3 月—12 月,萜烯类和酮类化合物的相对含量有降低趋势,醇类化合物的相对含量有升高趋势;烷烃类、芳烃类和其他类化合物的相对含量则总体呈先升高后降低的趋势,酯类和有机酸类化合物的相对含量则总体呈先降低后升高的趋势。3

月份的 VOCs 中相对含量最高的为萜烯类化合物,占总量的 43.39%,远高于其他 8 类化合物,其主要物质为 1-石竹烯(11.66%)、 α -蒎烯(10.70%)和 D-柠檬烯(7.25%);其次是醇类和烷烃类化合物,分别占 14.51%、11.99%。6 月和 9 月检测到的 VOCs 中,烷烃类化合物的相对含量均为当月最高,分别为 29.23%、36.35%,其主要化合物均为 2,2,4,6,6-五甲基庚烷。12 月检测到的 VOCs 中,最高的为醇类化合物,占当季节检测到挥发物总量的 37.41%,主要为 2-乙基己醇(26.95%)和丁醇(10.46%)。

2.2 樟树叶 VOCs 成分和相对含量的日动态变化

3 月份检测到的 VOCs 种类总数最多(54 种),为其他季节检测到挥发物种类总数的 2.00~2.16 倍,且除其他类化合物种类数略低于其他季节外,其他 8 类化合物种类均多余其他季节,故以该月份所得挥发物数据集为基础进行樟树叶 VOCs 的日动态变化研究。结果显示,54 种 VOCs 中,包括萜烯类化合物 17 种,烷烃类化合物 9 种,酮类化合物 7 种,醇类化合物 5 种,芳烃类、醛类和有机酸类化合物各 4 种,酯类化合物 3 种,以及其他类化合物 1 种(表 2)。从总体来看,萜烯类化合物 α -蒎烯、D-柠檬烯和 1-石竹烯、醇类化合物 2-乙基己醇、有机酸类化合物苯甲酸和其他类化合物 2,4-二甲基-1-庚烯的相对含量较高。

一天中,各时间点的 VOCs 种类数量和相对含量如图 2 所示。从总体来看,8:00 至 12:00, VOCs 种类先减少后增多,12:00 检测到的 VOCs 种类明显少于其他时间点(34~39 种),仅 25 种。5 个时间点检测到的萜烯类和烷烃类化合物种类高于其他类化合物,分别随时间变化而呈现“高-低-高-低”和“低-高-低-高”的变化趋势,且萜烯类化合物种类数在不同时间点的波动幅度要大于烷烃类。8:00 和 14:00 检测到的 VOCs 种类最多的为萜烯类,其次是烷烃类,且 8:00 的萜烯类化合物种类数量占该时间点种类总数的 36.11%,而 10:00、12:00 和 16:00 检测到的 VOCs 种类最多的则为烷烃类,其次是萜烯类。14:00 和 16:00 检测到的酮类化合物种类数要明显多于其他时间点,而 8:00 和 12:00 检测到的有机酸类化合物种

表 2 樟树叶片释放 VOCs 成分和相对含量的日动态

Table 2 Diurnal changes of compounds and relative contents of VOCs released from leaves of *Cinnamomum camphora*

序号 No.	化合物 Compound	相对含量 Relative content (%)				
		8:00	10:00	12:00	14:00	16:00
1	乙醇 Ethanol	—	—	—	0.12	0.04
2	丁醇 Butanol	4.68	6.75	4.01	2.47	3.85
3	1-戊醇 1-Pentanol	0.87	1.68	2.09	1.65	—
4	己醛 Hexanal	3.36	4.90	6.57	3.55	4.00
5	醋酸丁酯 Butyl acetate	0.44	2.72	3.42	2.49	0.66
6	2,4-二甲基庚烷 2,4-Dimethyl-heptane	0.98	0.90	—	0.81	4.13
7	2,4-二甲基-1-庚烯 1-Heptene, 2,4-dimethyl-	3.91	4.50	7.47	3.85	12.56
8	4-甲基辛烷 Octane, 4-methyl-	1.36	0.66	0.96	0.69	3.54
9	正己醇 Hexyl alcohol	1.10	1.69	—	1.46	—
10	3-庚酮 3-Heptanone	—	—	—	0.44	0.42
11	壬烷 n-Nonane	0.51	1.73	1.93	1.49	1.32
12	庚醛 Heptaldehyde	0.38	0.64	—	0.66	0.66
13	α -蒎烯 α -Pinene	5.16	7.92	18.71	12.63	17.55
14	4-甲基-2-庚酮 2-Heptanone, 4-methyl-	0.33	—	—	—	0.85
15	莰烯 Camphene	1.79	—	1.95	1.37	2.02
16	4-甲基壬烷 Nonane, 4-methyl-	1.52	2.90	4.11	—	4.24
17	1,3,5-三甲基苯 Mesitylene	—	—	—	0.47	0.49
18	左旋- β -蒎烯 (1S)-(1)-Beta-Pinene	—	—	—	0.63	1.19
19	1,2,3-三甲基苯 1,2,3-Trimethylbenzene	—	1.31	1.37	—	—
20	甲基庚烯酮 6-Methyl-5-hepten-2-one	0.67	—	—	—	0.82
21	癸烷 Decane	0.46	0.91	1.00	0.66	1.20
22	2,6-二甲基壬烷 2,6-Dimethylnonane	1.10	2.48	4.39	2.28	8.25
23	2,5-二甲基壬烷 2,5-Dimethylnonane	—	—	1.35	0.76	1.90
24	邻异丙基甲苯 1-Isopropyl-2-methylbenzene	3.04	0.70	—	0.79	—
25	D-柠檬烯 D-Limonene	17.58	1.78	—	1.50	1.06
26	2-乙基己醇 2-Ethylhexanol	—	19.02	12.58	14.81	7.27
27	4-甲基癸烷 Decane, 4-methyl-	0.49	0.55	0.92	0.54	1.15
28	苯乙酮 Acetophenone	0.38	4.88	0.37	2.57	2.23
29	2,4-二甲基苯乙烯 1-Methyl-4-(1-methylethenyl)-Benzene	2.83	1.17	—	—	—

续表 2

序号 No.	化合物 Compound	相对含量 Relative content (%)				
		8:00	10:00	12:00	14:00	16:00
30	壬醛 1-Nonanal	1.66	1.85	3.13	2.15	2.19
31	异佛尔酮 Isophorone	—	—	0.77	1.56	—
32	磷酸三乙酯 Triethyl phosphate		1.62	4.44	1.58	2.09
33	樟脑 DL-Camphor	1.12	4.32	7.46	5.48	4.60
34	龙脑 DL-2-Bornanol	0.97	0.73	—	1.31	0.98
35	苯甲酸 Benzoic acid	—	8.15	—	12.82	—
36	癸醛 Decanal	0.39	0.84	0.29	1.36	1.20
37	4,6-二甲基十二烷 Dodecane, 4,6-dimethyl-	0.29	—	—	—	0.86
38	壬酸 Nonanoic acid	—	1.62	1.87	1.58	1.22
39	左旋乙酸冰片酯 l-Bornyl acetate	2.24	—	—	—	—
40	二乙酸甘油酯 Diacetin	1.13	2.69	5.09	2.04	—
41	正癸酸 Decanoic acid	—	1.59	—	—	0.02
42	衣兰烯 Ylangene	1.10	—	—	—	—
43	(?)- α -蒎烯 α -Copaene	0.69	—	—	—	—
44	β -榄香烯 Elemene	1.57	—	—	—	—
45	长叶环烯 Longicyclene	—	—	—	2.61	0.65
46	长叶烯 D-Longifolene	—	4.62	3.75	5.80	3.48
47	雪松烯 Cedrene	—	0.53	—	0.53	—
48	1-石竹烯 1-Caryophyllene	31.72	—	—	—	—
49	(+)-喇叭烯 1H-Cycloprop [e] azulene, 1a, 2, 3, 5, 6, 7, 7a, 7b-octahydro-1, 1, 4, 7-tetramethyl-, (1aR, 7R, 7aS, 7bR) -	2.07	—	—	—	—
50	佛术烯 Naphthalene, 1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 8a-octahydro-1, 8a-dimethyl-7-(1-methylethenyl) -, (1S, 7R, 8aR) -	1.44	—	—	—	—
51	香叶基丙酮 Geranylacetone		0.51		0.54	0.28
52	α -衣兰油烯 α -Muurolene	0.67	—	—	—	—
53	月桂酸 Lauric acid	—	1.14	—	1.41	0.43
54	二苯甲酮 Benzophenone	—	—	—	0.54	0.60

注: “—”表示未检测到。

Note: “—” means no detected.

类要明显少于其他时间点。

不同时间点检测到的各类化合物相对含量有所不同。从 8:00 到 16:00, 芳烃类化合物相对含量呈逐渐减少的趋势, 醇类、酯类和醛类化合物相对含量则呈先升高后降低的趋势。8:00 检测到的各类 VOCs 相对含量以萜烯类为主 (68.11%), 是其他 8 类化合物相对含量的 10.99 倍以上, 其主要包括 1-石竹烯 (31.72%) 和 D-柠檬烯 (17.58%), 其次是烷烃类 (6.72%) 和醇类 (6.65%)。12:00、14:00 和 16:00 检测到的 VOCs 同样以萜烯类化合物相对含量为最高 (31.87%、31.87%、31.52%), 且均以 α -蒎烯为主, 其相对含量分别为 18.71%、12.63% 和 17.55%。10:00 所检测到的 VOCs 与其他时间点有所不同, 相对含量最高的为醇类化合物 (29.14%), 主要是 2-乙基己醇 (19.02%), 其次为萜烯类化合物 (19.89%)。

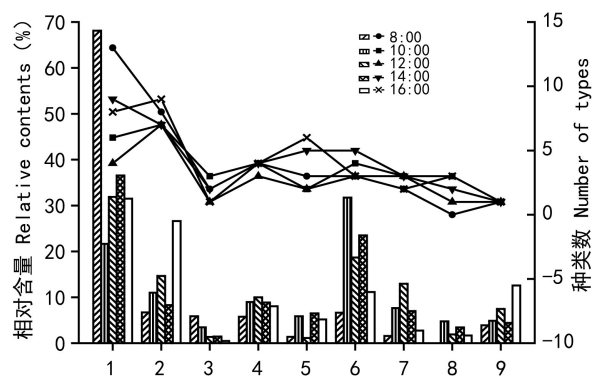


图 2 樟树叶片释放 VOCs 种类 (折线图) 和相对含量 (柱状图) 的日动态

Fig. 2 Diurnal changes of types (line chart) and relative contents (histogram) of VOCs resreleased from leaves of *Cinnamomum camphora*

3 讨论与结论

植物 VOCs 的释放情况变化多样, 季节和日变化特征十分明显。本研究显示, 樟树 4 个季节共检测出 78 种 VOCs, 其释放种类最多的时期为春季 (3 月)。3 月份释放的 VOCs 以萜烯类为主 (43.39%), 其中 α -蒎烯、蒎烯和樟脑的相对含量显著高于其他季节。吴楚材等 (2006) 对 4 月份樟

树叶片释放 VOCs 成分进行的研究表明樟脑和 α -蒎烯释放量所占比例最大, 与本研究结果相似。温度是影响植物单萜类物质释放的一个主要因素, 在一定范围内一些植物的单萜类释放量随温度升高而增加 (郟光发等, 2005); 但当温度增加到 30 °C 以上时, 单萜类物质的释放速率会下降 (马楠, 2012)。春季气温较冬季有所回升, 可一定程度上增加植物单萜类物质的释放; 夏季, 植物为适应较高温度而产生一定的生理变化, 如叶内贮存细胞间阻力和气孔阻力增加等, 从而影响了植物单萜类物质的释放 (蔡志全和秦秀英, 2002)。因此, 推测温度是造成上述樟树叶片 VOCs 释放季节动态的一个主要因素。6 月和 9 月份的 VOCs 以烷烃类为主, 这可能是因为萜烯类物质释放量较少, 从而使烷烃类物质的相对含量增加; 12 月份的 VOCs 则以醇类为主, 有机酸类物质释放量也明显高于其他季节, 这可能是因为冬季较为干燥, 水分供应不足可增加醇类和酸类物质的释放量 (郭阿君, 2007)。邓小勇 (2009) 利用顶空固相微萃取法和 SPME-GC/MS 技术对深圳市 8 月份樟树叶片 VOCs 成分进行了分析, 共检测到 34 种化合物, 其中烃类最多 (12 种), 其次是萜烯类 (10 种), 且萜烯类化合物中主要以芹子烯、 β -愈创木烯和桉叶素为主。与本研究相比, 其化合物种类和相对含量存在一定差异, 分析原因有两方面: 一方面, 可能是由于采样方法的不同, 前者采用的固相微萃取法是将摘下叶片剪碎后收集其 VOCs, 而本研究所选动态顶空采集法是一种采集活体植物释放 VOCs 的方法; 另一方面, 则可能是植株的生境特点和取样时间的差异。春季的一天中, 绝大多数时间点释放 VOCs 以萜烯类为主, 且早上 8 点释放的萜烯类物质相对含量最大, 这可能与环境湿度有关, 即部分植物的萜烯类物质的释放量随湿度的升高而增多 (郟光发等, 2005)。这与任露洁等 (2012) 利用动态顶空和自动热脱附-气质联用技术对樟树群落释放的 VOCs 日动态变化研究结果相似。

随着对植物 VOCs 研究的深入, 各成分的生理功效和药用保健作用日益受到人们的重视。研究发现, 植物所释放的部分萜烯类化合物有着缓解

紧张、调节心情、抗菌抗炎等作用 (Cruz-López, et al., 2001; Papiez et al., 2009; Zhang et al., 2015)。本研究中,共检测到 19 种萜烯类化合物,包括多种对人体健康有益的萜烯类化合物;同时,各有益的萜烯类化合物相对含量也多数较高。由此可见,樟树是一种非常理想的保健型生态树种。此外,春季早上 8:00 的萜烯类化合物种类和相对含量较为丰富,是人们进行森林康养活动的最佳时间。今后可以充分利用该树种有益 VOCs 释放的动态规律,合理地进行园林配置及森林康养活动。

参考文献:

- ALI JG, ALBORN HT, CAMPOS-HERRERA R, et al., 2012. Subterranean, herbivore-induced plant volatile increases biological control activity of multiple beneficial nematode species in distinct habitats [J]. *PLoS ONE*, 7(6): e38146.
- ATKINSON R, AREY J, 2003. Gas-phase tropospheric chemistry of biogenic volatile organic compounds: A review [J]. *Atmos Environ*, 37(Suppl. 2): 197-219.
- BALDWIN IT, HALITSCHKE R, PASCHOLD A, et al., 2006. Volatile signaling in plant-plant interactions: “talking trees” in the genomics era [J]. *Science*, 311 (5762): 812-815.
- BAO H, SHRESTHA KL, KONDO A, et al., 2010. Modeling the influence of biogenic volatile organic compound emissions on ozone concentration during summer season in the Kinki region of Japan [J]. *Atmos Environ*, 44(3): 421-431.
- CAI ZQ, QIN XY, 2002. Advances in the studies on plant production and emission of volatile organic compounds [J]. *Ecol Sci*, (1): 86-90. [蔡志全, 秦秀英, 2002. 植物释放挥发性有机物 (VOCs) 的研究进展 [J]. *生态科学*, (1): 86-90.]
- CHEN HW, LI GK, LI H, et al., 2001. Determination of volatile organic compounds in atmospheric environment [J]. *Chin J Chromatogr*, 19(6): 544-548. [陈洪伟, 李攻科, 李核, 等, 2001. 大气环境中挥发性有机化合物的测定 [J]. *色谱*, 19(6): 544-548.]
- CHEN J, 2016. Analysis on volatile organic compounds of four species of trees and effects on SOA [D]. Beijing: Beijing Forestry University: 7-10. [陈静, 2016. 4 种树种挥发物分析及对 SOA 的影响研究 [D]. 北京:北京林业大学: 7-10.]
- CHEN JW, CAO KF, 2005. Plant VOCs emission: A new strategy of thermotolerance [J]. *J For Res*, 16(4): 323-326.
- COJOCARIU C, KREUZWIESER J, RENNENBERG H, 2004. Correlation of short-chained carbonyls emitted from *Picea abies* with physiological and environmental parameters [J]. *New Phytol*, 162(3): 717-727.
- CRUZ-LOPEZ L, JIMENEZ-ZUNIGA JA, SANTIESTEBAN-HERNANDEZ A, et al., 2001. Response of *Epitragus sallaei* (Champion) (Coleoptera: Tenebrionidae) to the odor of *Mangifera indica* flowers [J]. *SW Entomol*, 26 (2): 165-170.
- DEGENHARDT J, HILTPOLD I, KOLLNER TG, et al., 2009. Restoring a maize root signal that attracts insect-killing nematodes to control a major pest [J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 106: 13213-13218.
- DENG XY, 2009. Study on the dynamic releasing characteristics of plants volatile of the common fragrant plant in Shenzhen [D]. Chongqing: Southwest University: 43-48. [邓小勇, 2009. 深圳市常见芳香植物挥发性有机物释放特性研究 [D]. 重庆:西南大学:43-48.]
- DU L, 2005. Preliminary studies on plant regeneration via somatic embryogenesis and *Agrobacterium*-mediated transformation of camphor tree (*Cinnamomum comphora* L.) [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University: 1-3. [杜丽, 2005. 香樟体胚发生途径的植株再生体系的建立以及农杆菌介导遗传转化的初步研究 [D]. 武汉:华中农业大学:1-3.]
- DUDAREVA N, NEGRE F, NAGEGOWDA DA, et al., 2006. Plant volatiles: Recent advances and future perspectives [J]. *Crit Rev Plant Sci*, 25(5): 417-440.
- FANG C, WANG C, GUO EG, et al., 2010. Relationship between recreation in suburban forest park and tourists' physiological health: A case study of Baiwang mountain forest park, Beijing [J]. *J NE For Univ*, 38(3): 87-88. [房城, 王成, 郭二果, 等, 2010. 城郊森林公园游憩与游人健康关系-以北京百望山森林公园为例 [J]. *东北林业大学学报*, 38(3): 87-88.]
- GUO AJ, 2007. Study on the dynamic releasing characteristics and bacteriostasis of VOCs of four garden trees [D]. Harbin: Northeast Forestry University: 14. [郭阿君, 2007. 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:14.]
- HONG R, 2002. Characteristics and evaluation on health-protecting effects of VOCs in Beijing Botanical Garden [D]. Beijing: Beijing Forestry University: 1-2. [洪蓉, 2002. 北京植物园有机挥发物的构成及其保健作用 [D]. 北京:北京林业大学:1-2.]
- HUANG M, SANCHEZ-MOREIRAS AM, ABEL C, et al., 2012. The major volatile organic compound emitted from *Arabidopsis thaliana* flowers, the sesquiterpene (E)- β -caryophyllene, is a defense against a bacterial pathogen [J]. *New Phytol*, 193(4): 997-1008.
- HUANG T, 2016. Chemical composition, antioxidant capacity and larvicidal activity against the malaria vector *Anopheles sinensis* (Diptera: Culicidae) of essential oils from four *Cin-*

- namomum* plants [D]. Chongqing: Chongqing Normal University: 1-2. [黄婷, 2016. 四种樟属植物精油的成分分析、抗氧化活性及对中华按蚊幼虫的毒杀活性测定 [D]. 重庆:重庆师范大学:1-2.]
- KAMEYAMA Y, 2012. Development of microsatellite markers for *Cinnamomum camphora* (Lauraceae) [J]. *Am J Bot*, 99(1): e1-e3.
- KAPLAN JO, FOLVERTH G, HAUGLUSTAINE DA, 2006. Role of methane and biogenic volatile organic compound sources in late glacial and Holocene fluctuations of atmospheric methane concentrations [J]. *Glob Biogeochem Cycle*, 20(2): 1-16.
- KNUDSEN JT, ERIKSSON R, GERSHENZON J, et al., 2006. Diversity and distribution of floral scent [J]. *Bot Rev*, 72(1): 1.
- LI YP, ZHANG LW, ZHANG JJ, et al., 2016. Cloning and expression profiling of *CcCBFs* genes in *Cinnamomum camphora* [J]. *J NE For Univ*, 44(8): 34-40. [李勇鹏, 张力维, 张佳佳, 等, 2016. 香樟 *CcCBFs* 基因的克隆及表达模式 [J]. 东北林业大学学报, 44(8):34-40.]
- LIU CH, MISHRA AK, TAN RX, et al., 2006. Repellent and insecticidal activities of essential oils from *Artemisia princeps* and *Cinnamomum camphora* and their effects on seed germination of wheat and broad bean [J]. *Bioresour Technol*, 97(15): 1969-1973.
- MA N, 2012. The research on 16 common landscape plants VOCs and AHP evaluation [D]. Hangzhou: Zhejiang Agriculture & Forestry University: 3. [马楠, 2012. 16种常用园林植物 VOCs 成分研究及 AHP 评价 [D]. 杭州:浙江农林大学:3.]
- MCCONKEY ME, GERSHENZON J, CROTEAU RB, 2000. Developmental regulation of monoterpene biosynthesis in the glandular trichomes of peppermint [J]. *Plant Physiol*, 122(1): 215-224.
- PADHY PK, VARSHNEY CK, 2005. Emission of volatile organic compounds (VOC) from tropical plant species in India [J]. *Chemosphere*, 59(11): 1643-1653.
- PAPIEZ MR, POTOSNAK MJ, GOLIFF WS, et al., 2009. The impacts of reactive terpene emissions from plants on air quality in Las Vegas, Nevada [J]. *Atmos Environ*, 43(27): 4109-4123.
- QIE GF, WANG C, PENG ZH, 2005. Research advances on BVOCs emission from forest [J]. *Chin J Appl Ecol*, (6): 1151-1155. [邝光发, 王成, 彭镇华, 2005. 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, (6): 1151-1155.]
- RAGUSO RA, 2008. Wake up and smell the roses: The ecology and evolution of floral scent [J]. *Ann Rev Ecol Evol Syst*, 39: 549-569.
- REN LJ, WANG C, GU L, et al., 2012. VOCs components in *Cinnamomum camphora* forest and their variation in Hui Mountain Forest Park, Wuxi [J]. *J Chin Urban For*, 10(3): 8-11. [任露洁, 王成, 古琳, 等, 2012. 无锡惠山森林公园香樟林内挥发物成分及其变化研究 [J]. 中国城市林业, 10(3):8-11.]
- RENNER E, MUNZENBERG A, 2003. Impact of biogenic terpene emissions from *Brassica napus* on tropospheric ozone over saxony (Germany) [J]. *Environ Sci Poll Res*, 10(3): 147-153.
- TONG SS, YAO L, 2009. Antidepressant effect of the essential oil and the volatile organic compounds in air from rosemary and lemongrass [J]. *J Shanghai Jiaotong Univ (Agric Sci Ed)*, 27(1): 82-85. [佟琴琴, 姚雷, 2009. 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), 27(1):82-85.]
- UNSICKER SB, KUNERT G, GERSHENZON J, 2009. Protective perfumes: The role of vegetative volatiles in plant defense against herbivores [J]. *Curr Opin Plant Biol*, 12(4): 479-485.
- VASSAO DG, GANG DR, KOEDUKA T, et al., 2006. Chavicol formation in sweet basil (*Ocimum basilicum*): Cleavage of an esterified C9 hydroxyl group with NAD (P) H-dependent reduction [J]. *Org Biomol Chem*, 4(14): 2733-2744.
- VICKERS CE, GERSHENZON J, LERDAU MT, et al., 2009. A unified mechanism of action for volatile isoprenoids in plant abiotic stress [J]. *Nat Chem Biol*, 5(5): 283.
- WU CC, WU ZW, LUO JB, 2006. Research on phytoncides [M]. Beijing: China Forestry Publishing House: 117-120. [吴楚材, 吴章文, 罗江滨, 2006. 植物精气研究 [M]. 北京:中国林业出版社:117-120.]
- YANG Q, LIU R, GONG Z, et al., 2002. Studies of three genes encoding Cinnamomin (a type II RIP) isolated from the seeds of camphor tree and their expression patterns [J]. *Gene*, 284(1): 215-223.
- YANG XQ, 2006. A review on volatile organic compounds emitted from vegetation and their contribution to the environment [J]. *J Hunan City Univ (Nat Sci Ed)*, 15(4): 57-60. [杨小琴, 2006. 植物挥发性有机物 (VOCs) 释放及其环境净化效应概述 [J]. 湖南城市学院学报(自然科学版), 15(4):57-60.]
- ZHANG Z, GUO S, LIU X, et al., 2015. Synergistic antitumor effect of α -pinene and β -pinene with paclitaxel against non-small-cell lung carcinoma (NSCLC) [J]. *Drug Res*, 65(4): 214-218.