

# 不同绿地类型下城市绿化树种 BVOCs 排放特征

张倩, 李洪远, 吕铃钥, 杨佳楠

(南开大学 环境科学与工程学院, 天津 300350)

**摘要:** [目的] 探讨天津市绿化树种在不同绿地生境条件下植物源挥发性有机物(BVOCs)的排放特征, 为城市园林绿地树种的筛选提供依据。[方法] 采用动态顶空套袋法和热脱附-气相色谱/质谱联用技术, 分析了不同绿地类型下对桧柏(*Juniperus chinensis*)、绦柳(*Salix matsudana*)、西府海棠(*Malus micromalus*)和国槐(*Sophora japonica*)4种城市常见绿化树种 BVOCs 排放特征。[结果] (1) 不同生境条件下桧柏、绦柳、西府海棠和国槐释放 BVOCs 数量和成分均不同。4种树种在滨水绿地、道路绿地、公园绿地和校园绿地4种不同绿地类型下分别共鉴定出69种、84种、20种和36种挥发性有机物。4种绿地类型下4种树木释放烯烃类物质的相对含量显著高于其他类型物质, 且其相对含量均按道路绿地>校园绿地>公园绿地>滨水绿地的顺序依次递减, 而酯类和烷烃类物质恰与其相反, 二者相对含量均在滨水绿地类型下显著较高。(2) 绦柳释放的醇类和酮类物质与4种绿地类型下的光照强度, 桧柏释放的烯烃类、烷烃类、醇类、酯类和酮类物质、西府海棠释放的烷烃类和酯类物质、国槐释放的烯烃类和酯类物质与4种绿地类型下的相对湿度, 桧柏和绦柳释放的醇类和酮类物质、国槐释放的烯烃类物质与4种绿地类型下的温度分别呈显著相关。[结论] 绿地生境条件的差异影响绿化树种排放 BVOCs 的成分和含量, 且仅有部分类型挥发物与环境因子呈显著性相关。

**关键词:** 挥发性有机物; 绿化树种; 绿地类型; 环境因子

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2017)03-0022-06

中图分类号: X173, Q948

**文献参数:** 张倩, 李洪远, 吕铃钥, 等. 不同绿地类型下城市绿化树种 BVOCs 排放特征[J]. 水土保持通报, 2017, 37(3): 22-27. DOI: 10. 13961/j. cnki. stbctb. 2017. 03. 004; Zhang Qian, Li Hongyuan, Lü Lingyue, et al. Emission characteristics of BVOCs from urban greening tree species in different greenbelt [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(3): 22-27. DOI: 10. 13961/j. cnki. stbctb. 2017. 03. 004

## Emission Characteristics of BVOCs from Urban Greening Tree Species in Different Greenbelt

ZHANG Qian, LI Hongyuan, LÜ Lingyue, YANG Jianan

(College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300350, China)

**Abstract:** [Objective] To explore the emission characteristics of biogenic volatile organic compounds (BVOCs) from greening tree species in different greenbelts in Tianjin City, and to provide the basis for selecting of the green tree species in urban gardens. [Methods] Four urban greening tree species like *Juniperus chinensis*, *Salix matsudana*, *Malus micromalus* and *Sophora japonica* were sampled for collecting and measuring BVOCs by dynamic bagging headspace and the thermal desorption-gas chromatography/mass spectrometry(TDS-GC/MS) technology. [Results] (1) Totally 69, 84, 20 and 36 types of BVOCs were detected respectively from *J. chinensis*, *S. matsudana*, *M. micromalus* and *S. japonica*. But the quantity and composition of the BVOCs released by the four urban greening trees varied in different habitats. For all the species, relative contents of olefin compounds were significantly higher than the corresponding values of other types of components. Relative contents of olefin in the four greenbelts had a rank as: road greenbelt > campus greenbelt > park greenbelt > waterfront greenbelt. On the contrary, for the contents of ester and alkane

收稿日期: 2016-07-18

修回日期: 2016-11-04

资助项目: 国家自然科学基金资助项目“不同生境下城市绿化树种 VOCs 排放影响机制及估算模型研究”(31370700)

第一作者: 张倩(1992—), 女(汉族), 黑龙江省哈尔滨市人, 硕士研究生, 研究方向为环境生态学。E-mail: zhangqian921204@163.com。

通讯作者: 李洪远(1963—), 男(汉族), 天津市武清区人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事恢复生态学与城市绿地生态学研究。E-mail: ecnklee@126.com。

volatiles, their relative content were obviously higher in waterfront greenbelt than the ones in other greenbelts. (2) The contents of alcohols and ketones released by *S. matsudana* were significantly correlated with light intensity. Relative humidity was significantly correlated with the relative contents of olefins, alkanes, alcohols, esters and ketones released by *J. chinensis*, the contents of alkanes and esters released by *M. micromalus*, the contents of olefins and esters released by *S. japonica*; whereas, temperature was significantly correlated with the contents of alcohols and ketones released by both *J. chinensis* and *S. matsudana*, the content of olefins released by *S. japonica*. [Conclusion] Greenbelt habitat condition can influence the composition and content of BVOCs released by greening tree species, but only some types of volatiles were significantly correlated with some environmental factors.

**Keywords:** volatile organic compounds; greening trees; greenbelt habitat; environmental factors

京津冀地区是中国 PM<sub>2.5</sub> 的高发区,而 PM<sub>2.5</sub> 的来源有多种途径,大气中的二次有机气溶胶(SOA)是其重要组成部分,平均占 PM<sub>2.5</sub> 有机组分质量的 20%~50%<sup>[1]</sup>,在光化学烟雾条件下,其含量甚至可达 70%以上<sup>[2]</sup>。而 SOA 主要借助大气中的挥发性有机物(VOCs)形成。VOCs 按其来源可分为天然源(BVOCs)和人为源(AVOCs),并且天然源 VOCs 主要来自植被的排放<sup>[3]</sup>。由于 BVOCs 的反应活性较高,不仅可以与空气中的 NO<sub>x</sub> 经光化学反应产生臭氧<sup>[4]</sup>,同时也可以氧化成二次有机气溶胶和过氧酰基酸酯<sup>[5-6]</sup>。这些对 PM<sub>2.5</sub>,城市光化学烟雾及灰霾的形成都具有重要贡献<sup>[7]</sup>。据统计,全球植物源 VOCs 的释放量约为 1.15 × 10<sup>9</sup> t/a<sup>[8]</sup>,占全球 VOCs 释放总量的 90%以上,远大于人为源 VOCs<sup>[3]</sup>。

近年来,城市空气污染问题随城市化水平的提高而愈发严峻。城市绿地作为城市生态系统中的重要组成部分,在发挥固碳释氧、抑菌滞尘、调节气候等功能的同时,绿地植物也向环境中释放 VOCs。可见,城市绿地作为一把双刃剑,其 VOCs 的排放对大气环境质量造成的负面影响也不容忽视。谢扬颺等<sup>[9]</sup>研究发现北京市园林植物 VOCs 年总排放量约为 3.85 × 10<sup>4</sup> t,与北京市人为源 VOCs 的排放量大体一致。因此,减少绿地 VOCs 的排放在城市园林绿化工作中是非常必要的。

目前对城市绿化树种仅限于不同树种的排放特征和排放速率的研究<sup>[10-12]</sup>。不同绿地生境条件对树种 VOCs 排放影响的研究还很少。本研究拟选取天津市典型的 4 种绿化树种桧柏(*Juniperus chinensis*)、绦柳(*Salix matsudana*)、西府海棠(*Malus micromalus*)和国槐(*Sophora japonica*)作为研究对象,采用动态顶空套袋法和热脱附—气相色谱/质谱联用技术(TDS/GC/MS)分析在不同绿地生境条件下 4 种城市绿化树种挥发性有机物的排放特征及其与不同环境因子的相关性,以期在城市园林绿化树种

的筛选配置及其管理提供新的理论参考依据,实现景观功能和生态功能的统一,并且对区域空气环境质量的改善有重要的现实意义。

## 1 试验地区与试验方法

### 1.1 试验区概况

天津市地理坐标为 116°43′—118°04′E,38°34′—40°15′N,地处中纬度亚欧大陆东岸,属温暖带半湿润季风气候,四季分明,因临近渤海湾,受海洋气候影响明显。年平均气温在 11.4~12.9 °C,平均温差 30.7 °C,极端最高气温 40.3 °C,极端最低气温 -20.3 °C;无霜期 206 d;全年平均降水量为 584.5 mm,主要集中于夏季(6,7,8月),约占全年降水量的 75%,最大日降水量为 240.3 mm;年蒸发量为 1 469.1 mm,是降水量的 2.4 倍,蒸发量以 5 月最大,为 184.6 mm,12 月最小 28.5 mm。

### 1.2 采集方法

采用动态顶空套袋法,于 2015 年 7 月 11 日,选择晴朗无风的天气,分别在天津市水上公园内滨水绿地、南翠屏公园内公园绿地、南开大学校园绿地和复康路两侧道路绿地 4 种绿地生境下选择健康、长势基本相同的桧柏、绦柳、西府海棠和国槐 4 种树种向阳背风面中部健康无缺刻的枝叶进行样品采集。每个树种选取树龄相同、长势一致的 3 个单株作为采样标准株进行 BVOCs 的采集,每次 3 个重复,每次采样 40 min。同时进行空白采样,扣除环境本底浓度。并且利用小气候监测仪监测太阳辐射强度、温度和空气相对湿度 3 个参数,并进行记录。

### 1.3 分析方法

植物挥发性有机物的分析鉴定主要利用热脱附—气相色谱/质谱联用法分析,所使用的仪器型号为 PerkinElmer 生产的 ATD350-Clarus600 GC MS。

(1) TDS 条件。系统压力:20 kPa,干温度:250 °C

(10 min),冷阱温度:260 ℃。

(2) GC 工作条件。DB-5 Low Bleed/MS(60 mm×0.320 mm×0.5 μm)色谱柱,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)。

(3) MS 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 ℃。

#### 1.4 数据分析

通过 TurboMass 软件分析可获得 GC/MS 原始数据总离子流图(TIC),图中各峰所代表的化学信息经计算机检索 NIST 2008 Libraries 确认并筛选,以此对桧柏和绦柳释放的挥发性有机物成分进行定性。通过面积归一化法对各类挥发物的相对含量进行定量。通过 Excel 2010 和 Origin 8.5 进行数据分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同绿地类型下 4 种绿化树种挥发性物质分析

#### 2.1.1 不同绿地类型下桧柏释放 BVOCs 成分分析

桧柏在滨水绿地、道路绿地、公园绿地和校园绿地 4 种不同绿地类型下共鉴定出 69 种挥发性有机物。其中有 17 种化合物均在 4 种绿地类型下释放,包括 3-侧柏烯、蒎烯等 9 种烯烃类化合物,己醛、壬醛、癸醛 3 种醛类化合物,乙酸叶醇酯、乙酸冰片酯 2 种酯类化合物,新薄荷醇、 $\alpha$ -松油醇 2 种醇类化合物和异佛尔酮 1 种酮类化合物。丙烯酸异丙酯、正十三烷、侧柏醇等 11 种化合物仅在滨水绿地类型下释放,脱氢橙花叔醇、氧化石竹烯等 5 种化合物仅在道路绿地类型下释放,波斯菊萜、花生四烯酸甲酯和月桂醛 3 种化合物仅出现在公园绿地,月桂烯、 $\alpha$ -水芹烯、柠檬烯等 10 种化合物仅在校园绿地释放。但不同生境下桧柏释放 BVOCs 成分不同。桧柏在校园绿地类型下释放的挥发物种类远大于公园绿地。

不同绿地类型下桧柏释放 BVOCs 中各类物质相对含量存在一定差异(图 1)。桧柏释放 BVOCs 中烯烃类和醇类物质相对含量的变化趋势相同,均表现为道路绿地>校园绿地>公园绿地>滨水绿地,滨水绿地下烯烃类物质相对含量与其他生境差别较大。烷烃类和酯类物质相对含量的变化趋势与烯烃类和醇类物质相反,但烷烃类物质在道路绿地类型下的相对含量远低于其他绿地类型。醛类物质在滨水绿地类型下的相对含量显著较高,表现为:滨水绿地>道路绿地>公园绿地>校园绿地。酮类物质在不同绿地类型下的相对含量则表现为:滨水绿地>校园绿地>公园绿地>道路绿地。

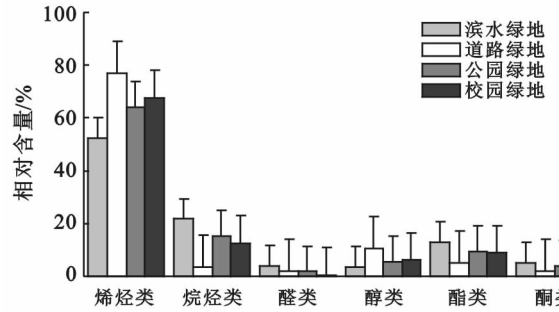


图 1 天津市桧柏不同挥发物种类相对含量的生境差异

#### 2.1.2 不同绿地类型下绦柳释放 BVOCs 成分分析

绦柳在 4 种不同绿地类型下共鉴定出 84 种挥发性有机物。其中有 19 种化合物均在 4 种绿地类型下释放,包括异戊二烯、丁酸丁酯等化合物。己醛、月桂烯等 9 种化合物仅在滨水绿地类型下释放,萜品油烯、乙酸庚酯等 13 种化合物仅在道路绿地类型下释放,茉莉酮、侧柏醇等 13 种仅在公园绿地下释放,正辛醛、罗勒烯等 11 种化合物仅在校园绿地下释放。绦柳在滨水绿地和道路绿地类型下释放的挥发物种类最多,与释放挥发物种类最少的公园绿地差异较小。

不同绿地类型下绦柳释放 BVOCs 中各类物质相对含量存在一定差异(图 2)。不同绿地类型下绦柳释放 BVOCs 中烯烃类物质相对含量按:道路绿地>校园绿地>公园绿地>滨水绿地的顺序依次递减,滨水绿地类型下烯烃类物质的相对含量显著较低。烷烃类和酯类物质相对含量在不同绿地类型下的变化趋势与烯烃类物质相反。醛类物质相对含量在公园绿地类型下最高,道路绿地下最低,其极差较大。而醇类物质的相对含量的变化趋势表现为:道路绿地>公园绿地>校园绿地>滨水绿地。酮类物质相对含量的变化趋势与醇类物质相反。

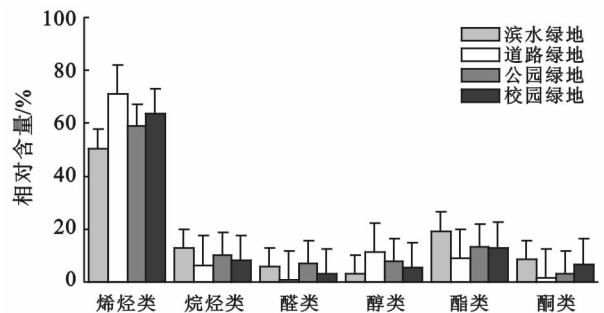


图 2 天津市绦柳不同挥发物种类相对含量的生境差异

#### 2.1.3 不同绿地类型下西府海棠释放 BVOCs 成分分析

西府海棠在 4 种不同绿地类型下共鉴定出 20 种挥发性有机物。与桧柏、绦柳和国槐相比,其在 4 种绿地类型下鉴定出的挥发性有机物最少。其中有

10种化合物均在4种绿地类型下释放,包括 $\alpha$ -法尼烯、 $\alpha$ -松油醇等化合物。梨醇酯、1-庚烯-3-酮、3,3,5-三甲基环己酮3种化合物仅在道路绿地类型下释放;顺-3-己烯醛、1-己基乙酸萘酯2种化合物仅在公园绿地类型下释放。但相比于桧柏和绦柳,西府海棠在4种绿地类型下释放的挥发性有机物种类明显较少,其在道路绿地类型下释放的挥发物种类最多,但也仅为17种。

西府海棠在不同绿地类型下释放的BVOCs中各类物质相对含量不同(图3)。烯烃类物质的相对含量较其他类型物质的相对含量显著较高。且其相对含量按道路绿地>校园绿地>公园绿地>滨水绿地的顺序依次递减,而烷烃类和酯类物质的变化趋势则与之相反。二者在公园绿地和校园绿地下的相对含量差异较小,但酯类物质在滨水绿地类型下的相对含量明显高于其他绿地类型。而醛类物质的相对含量的变化趋势表现为:道路绿地>滨水绿地>校园绿地>公园绿地。醇类和酮类物质相对含量均在公园绿地出现最高值,道路绿地出现最低值。

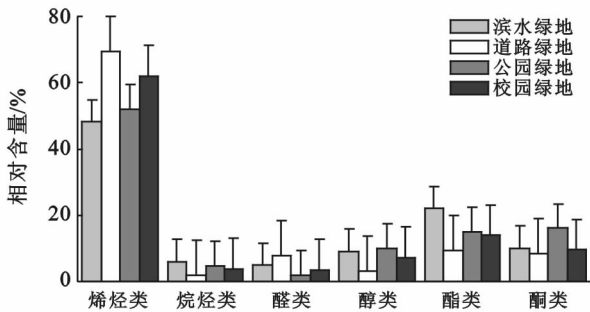


图3 天津市西府海棠不同挥发物种类相对含量的生境差异

#### 2.1.4 不同绿地类型下国槐释放 BVOCs 成分分析

国槐在4种不同绿地类型下共鉴定出36种挥发性有机物。有8种化合物均在4种绿地类型下释放,大多数为如异戊二烯、 $\alpha$ -蒎烯等烯烃类化合物。丙酸丁酯、二氢月桂烯醇、乙酸异龙脑酯3种化合物仅在道路绿地类型下释放,(Z)-丁酸-3-己烯酯、丙酸异戊酯、酞酸二甲酯3种化合物仅在公园绿地类型下释放。

此外,国槐释放挥发性有机物种类的数量在道路绿地和公园绿地类型下出现最大值和最小值,分别为26,20种。

国槐在不同绿地类型下释放的BVOCs中各类物质相对含量差异显著(图4)。在不同绿地类型下国槐释放BVOCs中烯烃类物质相对含量按道路绿地>校园绿地>公园绿地>滨水绿地的顺序依次递减,其在滨水绿地类型下的相对含量显著较低。烷烃

类和酯类物质相对含量的变化趋势恰与烯烃类物质相反。二者在滨水绿地类型下的相对含量与其它绿地类型差异显著。醛类物质相对含量的变化趋势则表现为:滨水绿地>校园绿地>道路绿地>公园绿地,道路绿地和公园绿地类型下的相对含量差异甚小。醇类物质的相对含量则按:公园绿地>滨水绿地>道路绿地>校园绿地的顺序递减。酮类物质在校园绿地类型下的相对含量最高,在道路绿地类型下最低。

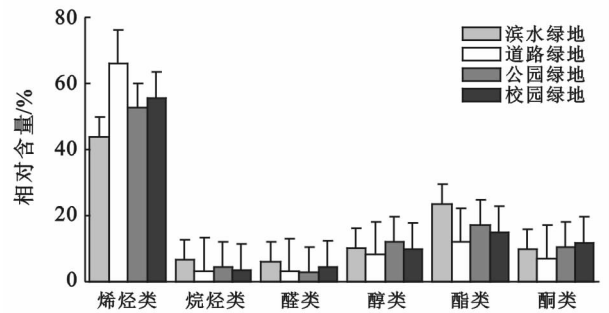


图4 天津市国槐不同挥发物种类相对含量的生境差异

## 2.2 不同绿地类型下环境因子对4种绿化树种 VOCs 排放的影响

在植物生活的小生境中,任何环境因子都可导致BVOCs的排放发生变化<sup>[13]</sup>。对不同绿地类型下太阳辐射、温度、空气相对湿度等环境因子对两树种释放各类挥发性有机物相对含量的影响进行分析。表1为不同绿地类型下环境因子的差异。

表1 天津市不同绿地类型下环境因子差异

绿地类型	太阳辐射强度/ ( $W \cdot m^{-2}$ )	温度/ $^{\circ}C$	空气相对湿度/%
滨水绿地	598	29.55	67.5
公园绿地	602	30.43	60.2
校园绿地	639	31.37	59.3
道路绿地	687	33.28	53.7

不同绿地类型下桧柏释放的醇类和酮类挥发性有机物相对含量与温度呈显著相关,但酮类物质相对含量随温度的升高而降低。而烯烃类和酯类相对含量与空气相对湿度呈极显著相关,烷烃类、醇类和酮类与相对湿度呈显著相关,但随空气相对湿度增加,烯烃类和醇类物质相对含量降低。绦柳释放的醇类挥发性有机物相对含量与太阳辐射强度和温度均呈显著正相关,而酮类则与其相反,随太阳辐射强度和温度的升高而降低。西府海棠释放烷烃类和酯类挥发物均与空气相对湿度呈显著相关,但酯类与相对湿度的相关性较高,其相对含量对相对湿度的变化更为

敏感。国槐释放的烯烃类挥发物与温度和相对湿度的相关性均较高,但其相对含量随温度的升高而增加,随相对湿度的升高而降低。而酯类物质相对含量与空气相对湿度呈显著正相关。4种乔木释放的其余各类型挥发性有机物与环境因子间相关性较弱,无

显著相关性(表 2)。可能由于不同生境下,影响植物释放挥发性有机物的外界环境因素和植物本身的内部因素较多,从而导致 4 种树种释放的某些挥发性有机物种类相对含量与不同生境下的环境因子相关性不显著。

表 2 天津市不同绿地类型下 4 种树种释放各类挥发性有机物相对含量与环境因子的相关性

树种	环境因子	挥发物种类相对含量					
		烯烃类	烷烃类	醛类	醇类	酯类	酮类
桧柏	太阳辐射强度	0.899	-0.947	-0.367	0.937	-0.908	-0.897
	温度	0.942	-0.931	-0.453	0.986*	-0.921	-0.968*
	空气相对湿度	-0.997**	0.981*	0.618	-0.962*	0.994**	0.964*
绦柳	太阳辐射强度	0.928	-0.907	-0.938	0.975*	-0.831	-0.984*
	温度	0.936	-0.942	-0.909	0.97*	-0.920	-0.963*
	空气相对湿度	-0.925	0.949	0.743	-0.935	0.947	0.842
西府海棠	太阳辐射强度	0.918	-0.929	0.774	-0.949	-0.863	-0.632
	温度	0.939	-0.927	0.677	-0.929	-0.940	-0.475
	空气相对湿度	-0.913	0.965*	-0.424	0.76	0.999**	0.182
国槐	太阳辐射强度	0.935	-0.786	-0.467	-0.861	-0.844	-0.620
	温度	0.985*	-0.859	-0.625	-0.751	-0.917	-0.596
	空气相对湿度	-0.988*	0.940	0.834	0.500	0.983*	0.448

注: \* 表示在 0.05 水平上差异显著; \*\* 表示在 0.01 水平上差异显著。

### 3 讨论

不同植物释放的挥发性有机物组成成分具有显著的差异性和时间变化特征。外界环境条件的改变直接影响植物的生理代谢活动,进而影响植物挥发性有机物的形成和释放。桧柏、绦柳、西府海棠和国槐在 4 种绿地类型下释放烯烃类物质的相对含量均较高,原因在于温度和植物叶绿体内 ATP 或 DMAPP 的浓度可直接或间接控制挥发性成分合成酶的活性,异戊二烯的释放速率与温度和光合有效辐射有关,而单萜释放速率与温度变化呈较好的指数关系<sup>[14]</sup>,夏季温度升高,植物的单萜释放速率会迅速增大。另外,对 BVOCs 的释放机制所提出的碳素/营养平衡(CNB)假说认为植物以碳为基础的次生代谢物质与植物体内的 C/N 比呈正相关<sup>[15]</sup>。而在光照充足条件下,光合作用增强,植物体内 C/N 比升高,将直接导致萜烯类、酚类等不含 N 的次生代谢物质含量增加。这也是 4 种城市绿化树种释放萜烯类物质在夏季含量较高的原因之一。值得注意的是,滨水绿地空气相对湿度明显高于其他 3 种绿地类型,桧柏和西府海棠释放的酯类物质与相对湿度呈极显著正相关,桧柏释放的烯烃类物质与相对湿度呈极显著负相关。且桧柏和西府海棠释放酯类物质的相对含量在滨水绿地

类型中最高;桧柏释放烯烃类物质的相对含量在滨水绿地类型中最低。这一现象可说明相对湿度也是影响植物 VOCs 释放的主要因素之一,且不同树种 BVOCs 浓度对相对湿度的敏感性不同。相关研究也表明,增加周围环境湿度可以加快挪威云杉(*Picea abies*)和欧洲赤松(*Pinus sylvestris*) BVOCs 的释放,也可改变树木释放的 VOCs 组分<sup>[16]</sup>。陈静等<sup>[17]</sup>研究指出,油松释放的单萜烯浓度与温度呈极显著正相关,与相对湿度及光合有效辐射相关性不显著。对于挥发量较大的  $\alpha$ -蒎烯,其与温度和相对湿度相关性显著,而柠檬烯则与温度相关性极显著。而侧柏释放的单萜烯、 $\alpha$ -蒎烯、柠檬烯均与温度呈极显著正相关,单萜烯、 $\alpha$ -蒎烯与相对湿度呈显著负相关。这与本研究中桧柏和绦柳在不同绿地类型下释放的烯烃类物质浓度与环境因子间的相关性存在相似之处。对于特定的烯烃类化合物与环境因子之间的相关性可在今后做进一步研究。除了光照、温度和相对湿度外,CO<sub>2</sub> 浓度、O<sub>3</sub> 浓度等环境因子和 N 素、树龄、叶龄、发育部位、胁迫等非环境因子也同样影响 BVOCs 的释放<sup>[18-21]</sup>。

BVOCs 排放随着气候及环境条件的不同会有显著的空间差异<sup>[22-23]</sup>。不同绿地类型下的植物种类和种植密度等因素会造成较大的不同绿地生境下

BVOCs 的排放差异<sup>[24]</sup>,使本研究中桧柏、绦柳、西府海棠和国槐在不同生境下释放 BVOCs 数量和成分均不同。常杰等<sup>[25]</sup>研究表明,由于台州街道及河道旁种植了大量高 BVOCs 排放潜力树种且种植密度大于公园及居民区绿地,故前者 BVOCs 排放总量约为后者的 2 倍左右。另外,从景观类型的角度而言,杭州市区块状绿地的 BVOCs 排放强度较带状绿地大,带状绿地有较大的植被面积和更好的光照,总排放量较大<sup>[26]</sup>。因此,在城市绿化树种的选择上应尽量选用排放量少的树种。

此外,植物挥发性有机物有多种生理功能。植物释放的酯类、萜烯类化合物有利于缓解紧张情绪<sup>[27]</sup>,适量吸入醇类化合物使人感到清新和振奋<sup>[28]</sup>。单萜烯可使周围空气增加清新感,并且具有抑制空气微生物生长和促进支气管和肾脏系统活动的功能<sup>[29]</sup>。而单萜类与倍半萜类化合物的相对峰面积之和可作为衡量植物保健作用的指标<sup>[30]</sup>。本研究中的 4 种树种释放的 BVOCs 主要为萜烯类化合物,说明桧柏、绦柳、西府海棠和国槐均是理想的保健树种。并且长叶烯、芳樟醇等 10 余种具有抑菌作用物质均在 4 种树木中被检测到,因此可多种植于环境质量较差的道路绿地,进而改善道路环境。

## 4 结论

(1) 不同生境条件下桧柏、绦柳、西府海棠和国槐释放 BVOCs 数量和成分均不同。4 种树种在滨水绿地、道路绿地、公园绿地和校园绿地 4 种不同绿地类型下分别共鉴定出 69,84,20 和 36 种挥发性有机物。4 种绿地类型下桧柏、绦柳、西府海棠和国槐释放萜烯类物质的相对含量均较其他类型物质显著较高,且其相对含量均按道路绿地 > 校园绿地 > 公园绿地 > 滨水绿地的顺序依次递减,而酯类和烷烃类物质与其相反,二者相对含量均在滨水绿地类型下显著较高。而 4 种树种释放的醇类、醛类和酮类物质在不同绿地类型下相对含量的大小顺序不尽相同。

(2) 绦柳释放的醇类和酮类物质与 4 种绿地类型下的光照强度,桧柏释放的萜烯类、烷烃类、醇类、酯类和酮类物质、西府海棠释放的烷烃类和酯类物质、国槐释放的萜烯类和酯类物质与 4 种绿地类型下的相对湿度,桧柏和绦柳释放的醇类和酮类物质、国槐释放的萜烯类物质与 4 种绿地类型下的温度分别呈显著相关。其余各类型挥发物与这 3 种环境因子的相关性均较差。

### [ 参 考 文 献 ]

[1] Turpin B J, Huntzicker J J. Identification of secondary

organic aerosol episodes and quantization of primary and secondary organic aerosol concentrations during SCAQS [J]. *Atmospheric Environment*, 1995, 29 (23): 3527-3544.

[2] Pandis S N, Harley R A, Cass G R, et al. Secondary organic aerosol formation and transport[J]. *Atmospheric Environment*, 1992, 26(13): 2269-2282.

[3] Guenther A, Hewitt C, Erickson D, et al. A global model of natural volatile organic compound emissions [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1995, 100(D5): 8873-8892.

[4] Lee Binsun, Wang Jialin. Concentration variation of isoprene and its implications for peak ozone concentration [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, 40(28): 5486-5495.

[5] Sartelet K N, Couvidat F, Seigneur C, et al. Impact of biogenic emissions on air quality over Europe and North America[J]. *Atmospheric Environment*, 2012, 53: 131-141.

[6] Wang Jialin, Chew C, Chang Chihyuan, et al. Biogenic isoprene in subtropical urban settings and implications for air quality[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 79: 369-379.

[7] Wang X M, Fu Chun, Liang Guixiong. Study on the ozone concentration in urban areas[J]. *Research of Environmental Science*, 2001, 14(5): 1-4.

[8] Corchnoy S B, Arey J, Atkinson R. Hydrocarbon emissions from twelve urban shade trees of the Los Angeles, California, Air Basin [J]. *Atmospheric Environment*, 1992, 26(3): 339-348.

[9] 谢扬飏, 邵敏, 陆思华, 等. 北京市园林绿地植被挥发性有机物排放的估算[J]. *中国环境科学*, 2007, 27(4): 498-502.

[10] 王金凤, 陈卓梅, 韩素芳, 等. 四个彩叶树种挥发性有机物成分分析[J]. *浙江林业科技*, 2015, 35(4): 35-40.

[11] 宁平, 郭霞, 田森林, 等. 昆明地区典型乔木主要挥发性有机物释放规律[J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2013, 44(3): 1290-1296.

[12] 陈颖, 史奕, 何兴元. 沈阳市四种乔木树种 BVOCs 排放特征[J]. *生态学杂志*, 2009, 28(12): 2410-2416.

[13] Kesselmeier J, Staudt M. Biogenic volatile organic compounds(VOC): An overview on emission, physiology and ecology [J]. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 1999, 33(1): 23-88.

[14] 李洪远, 王芳, 熊善高, 等. 植物挥发性有机物的作用与释放影响因素研究进展[J]. *安全与环境学报*, 2015, 15(2): 292-296.

[15] 孔垂华, 徐涛, 胡飞, 等. 环境胁迫下植物的化感作用及其诱导机制[J]. *生态学报*, 2000, 20(5): 849-854.

(下转第 34 页)

- [9] 杨涵,熊黑钢,陈学刚. 石河子市土壤环境磁学特征及空间分布研究[J]. 环境科学, 2014, 35(9): 3537-3545.
- [10] 姜琪,胡雪峰,李珊,等. 上海宝山和青浦区表土磁性特征的差异及环境指示意义[J]. 土壤通报, 2012, 43(4): 774-780.
- [11] 李珊,胡雪峰,杜艳,等. 上海嘉定区表土磁性强度的空间分异及环境指示意义[J]. 土壤学报, 2012, 49(1): 9-17.
- [12] 陈轶楠,张永清,张希云,等. 晋南某钢厂周边土壤重金属与磁化率分布规律及其相关性研究[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(1): 85-91.
- [13] 毛应明,桑树勋,王学松,等. 公路边土壤的磁化率特征及其对污染的指示意义[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(35): 144-156.
- [14] Dearing J A. Environment Magnetic Susceptibility, Using the Bartington MS2 System[M]. Second edition England; Chi-Publishing, 1999.
- [15] 旺罗,刘东生,吕厚远,等. 污染土壤的磁化率特征[J]. 科学通报, 2000, 45(10): 1091-109.
- [16] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990: 339-483.
- [17] 于瑞莲,胡恭任,林燕萍,等. 泉州城市表层土壤中金属元素来源分析[J]. 矿物学报, 2012, 32(1): 156-164.
- [18] Olson K W, Skogerboe R K. Identification of soil lead compounds from automobile sources[J]. Environmental Science Technology, 2002, 9(3): 227-230.
- [19] 章明奎. 浙江省城市汽车站点地表灰尘中重金属含量及其来源研究[J]. 环境科学学报, 2010, 30(11): 2294-2304.
- [20] Zoller W H, Gladney E S, Duce R A. Atmospheric concentrations and sources of trace metals at the South Pole[J]. Science, 1974, 183(4121): 198-200.
- [21] Angulo E. The Tomlinson pollution load index applied to heavy metal "Mussel-Watch" data: A useful index to assess coastal pollution[J]. Science Total Environment, 1996, 187(1): 19-56.
- [22] Shi R, Cioppa M T. Magnetic survey of topsoils in Windsor-Essex County, Canada[J]. Journal of Applied Geophysics, 2006, 60(3): 201-212.
- [23] Hu Xuefeng, Su Yu, Ye Rong, et al. Magnetic properties of the urban soils in Shanghai and their environmental implications[J]. Catena, 2007, 70: 428-436.
- [24] Heller F, Strzyszczyk Z, Magiera T. Magnetic record of industrial pollution in forest soils of Upper Silesia, Poland[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1998, 103(B8): 17767-17774.
- [25] Cornell R M, Schwertmann U. The Iron Oxides: Structure, Properties, Reactions, Occurrences and uses [M]. John Wiley & Sons, 2003.

(上接第 27 页)

- [16] Janson R W. Monoterpene emissions from Scots pine and Norwegian Spruce[J]. Journal of Geophysical Research, 1993, 98(D2): 2839-2850.
- [17] 陈静,陈丽华,余新晓,等. 夏季油松及侧柏单萜烯变化规律及二次有机气溶胶生成潜势的估算[J]. 水土保持学报, 2016, 30(1): 331-344.
- [18] Owen S, Harley P, Guenther A. Light dependency of VOC emissions from selected Mediterranean plant species[J]. Atmosphere Environment, 2002, 36(19): 3147-3159.
- [19] Estell R E, James D K, Fredrickson E L, et al. Within-plant distribution of volatile compounds on the leaf surface of *Flourensia cernua*[J]. Biochemical Systematics and Ecology, 2003, 48: 144-150.
- [20] 黄娟,莫江明,孔国辉,等. 植物源挥发性有机物对氮沉降响应研究展望[J]. 生态学报, 2011, 31(21): 6616-6623.
- [21] Loreto F, Schnitzler J. Abiotic stresses and induced BVOCs[J]. Trend in Plant Science, 2010, 15(3): 154-166.
- [22] 司徒淑婷,王雪梅, Guenther A, 等. 典型夏季珠江三角洲地区植被的异戊二烯排放[J]. 环境科学学报, 2009, 29(4): 822-829.
- [23] Tie Xuexi, Li Guohui, Ying Z M, et al. Biogenic emissions of isoprenoids and NO in China and comparison to anthropogenic emissions[J]. Science of The Total Environment, 2006, 371, 238-251.
- [24] 吕铃钥,李洪远,杨佳楠. 中国植物挥发性有机化合物排放估算研究进展[J]. 环境污染与防治, 2015, 37(11): 83-89.
- [25] 常杰,任远,史琰,等. 亚热带城乡复合系统 BVOC 排放清单: 以台州地区为例[J]. 生态学报, 2012, 32(2): 641-649.
- [26] 朱轶梅. 亚热带城乡区域植物源 VOC 排放的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- [27] 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.
- [28] 孙宝国,何坚. 香精概论[M]. 北京: 化学工业出版社, 1996.
- [29] 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.
- [30] 只木良也. 森林はなぜ必要か(環境と人間)[M]. 东京: 小峰書店, 1992.