

# 深圳市显著排放 VOCs 的园林植物调查与分析

黄爱葵<sup>1</sup> 李楠<sup>2\*</sup> , Alex Guenther<sup>3</sup> , Jim Greenberg<sup>3</sup> , Brad Baker<sup>4</sup> , Michael Graessli<sup>4</sup> , 白建辉<sup>5</sup>

(1. 深圳市光明新区城市建设局 ,深圳 518107; 2. 深圳市中国科学院仙湖植物园 ,深圳 518004; 3. 美国大气研究中心 ,波士顿 80307; 4. 美国加利福尼亚州立大学 ,洛杉矶 95819; 5. 中国科学院大气物理研究所 ,北京 100029)

**摘要:**对深圳地区的主要园林树种、地带性植被的代表种共计 158 种植物释放的生物源的挥发性有机物 (biogenic volatile organic compounds ,BVOCs) 采用流动式、封闭式采样法采样 ,运至美国进行 GC-MS 分析测量. 结果表明 ,短穗鱼尾葵 (*Caryota mitis*)、海红豆 (*Adenanthera pavonina* var. *microsperma*)、芒果 (*Mangifera indica*)、海漆 (*Excoecoria agalloch*) 等 31 种植物具有释放异戊二烯的能力; 另有鸡蛋果 (*Passiflora edulis*)、小琴丝竹 (*Bambusa glaucescens* cv. *silverstripe*)、山苍子 (*Litsea cubeba*)、大型双子铁 (*Dioon spinulosum*) 等 52 种植物具有释放单萜烯类化合物的能力. 对红树植物的测量表明 ,该类植物普遍具有释放单萜烯的能力. 上述结果为建立深圳及周边地区的环境质量模型提供了重要数据 ,同时也可为我国热带亚热带城市大面积绿化以及经济林、生态林和防护林等的树种选择提供参考.

**关键词:** 园林植物; 挥发性有机物; 异戊二烯; 单萜烯; 释放; 亚热带地区

中图分类号: X173 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)12-3555-05

## Investigation on Emission Properties of Biogenic VOCs of Landscape Plants in Shenzhen

HUANG Ai-kui<sup>1</sup> , LI Nan<sup>2</sup> , Alex Guenther<sup>3</sup> , Jim Greenberg<sup>3</sup> , Brad Baker<sup>4</sup> , Michael Graessli<sup>4</sup> , BAI Jian-hui<sup>5</sup>

(1. Shenzhen Guangming New District City Construction Bureau , Shenzhen 518107 , China; 2. Shenzhen Fairy Lake Botanical Garden , Chinese Academy of Sciences , Shenzhen 518004 , China; 3. National Center for Atmospheric Research , Boston 80307 , USA; 4. Department of Chemistry California State University , Los Angeles 95819 , USA; 5. Institute of Atmospheric Physics , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100029 , China)

**Abstract:** Isoprene and monoterpene emissions were characterized using flow and enclosure sampling method and GC-MS in USA for 158 species of plants growing in Shenzhen , China. This survey was designed to include all of the dominant plants within the Shenzhen region as well as unique plants such as Cycads. These are the first measurements in a subtropical Asian metropolis. Substantial isoprene emissions were observed from thirty-one species , including *Caryota mitis* , *Adenanthera pavonina* var. *microsperma* , *Mangifera indica* and *Excoecoria agalloch*. Monoterpene emissions were observed from fifty-two species , including *Passiflora edulis* , *Bambusa glaucescens* cv. *silverstripe* as well as some primitive and rare Cycadaceae and Cyatheaceae plants. For the first time some of red plants have been measured , most of them have the ability of releasing terpene. These results will be used to develop biogenic emission model estimates for Shenzhen and the surrounding region that can be used as inputs for regional air quality models.

**Key words:** landscape plant; volatile organic compounds; isoprene; terpene; release; subtropical region

植物在生长过程中除了通过根系分泌或雨水淋洗叶片向土壤中增加他感化合物外 ,还通过叶片的气孔向大气中释放挥发性有机物 (biogenic volatile organic compounds ,BVOCs) ,植物产生的 BVOCs 种类数以万计 ,包括异戊二烯、萜烯类、乙醇、和醚类等. 其中 2 类化合物占到一半以上 ,一类是含有 5 个碳原子的异戊二烯 (isoprene , $C_5H_{10}$ ) ,另一类是含有 10 个碳原子的单萜类化合物 (monoterpenes , $C_{10}H_x$ )<sup>[1-4]</sup>. 植物释放的 BVOCs 占全球 VOCs 的 90% 以上<sup>[5]</sup> ,在对流层大气中通过一系列的氧化还原反应 ,改变了大气的化学组成 ,对臭氧的合成、一氧化碳的生成、甲烷的氧化有重要作用 ,其氧化物质对区域乃至全球的环境和气候都会产生一定的影

响<sup>[6-9]</sup> ,尤其是对对流层臭氧的生成有着重要作用 ,对城市光化学烟雾的生成有重要影响<sup>[10-12]</sup>. 工业化国家对城市森林释放的 BVOCs 关注仅有十余年的历史 ,但主要研究在北美进行<sup>[13-17]</sup> ,对欧洲城市森林释放的 VOCs 的首项研究报道发表于 2003 年<sup>[10]</sup>. 国内对城市园林植物释放 VOCs 研究的较少 ,已见报道的有北京地区<sup>[3,18]</sup>、太湖流域<sup>[19]</sup>、西双版纳地区<sup>[20]</sup>等 ,而亚热带地区城市尚属空白. 文章首次报道了亚热带城市释放 VOCs 的园林植物种类 ,对我

收稿日期: 2011-06-13; 修订日期: 2011-07-20

基金项目: 深圳市城市管理局科研项目

作者简介: 黄爱葵 (1979 ~) ,女 ,硕士 ,工程师 ,主要研究方向为园林植物应用 ,E-mail: huangaikui@126.com

\* 通讯联系人 ,E-mail: linan@szum.gov.cn

国华南地区城市绿化的树种选择具有重要的参考价值,以期为进一步准确测算全国范围内的 BVOCs 排放量提供区域性数据.

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

深圳位于北回归线以南,东经  $113^{\circ}46' \sim 114^{\circ}37'$ ,北纬  $22^{\circ}27' \sim 22^{\circ}52'$ . 毗邻香港,地处广东省南部,珠江口东岸,东临大亚湾和大鹏湾;西濒珠江口和伶仃洋;南边深圳河与香港相联;北部与东莞、惠州两城市接壤. 属亚热带海洋性气候,湿润宜人,降水丰富,常年平均气温  $22.4^{\circ}\text{C}$ . 本研究选取了深圳城市绿地系统中主要的乔灌木园林植物、地带性植被中的建群种及深圳红树林自然保护区中部分红树植物共计 158 种. 选取生长情况良好的健壮植株,测量完整健康、未受到外伤的叶片.

### 1.2 试验方法

试验先后采用 2 种方法取样. 方法一是用 Teflon 袋封闭式采样,所用 Teflon 袋①两端开口,将枝条套在里面,将一条采样管插于 Teflon 袋①中,然后两端扎紧,将伸出的采样管一端接另一密封良好的 Teflon 袋②中,待 Teflon 袋②饱满时取下. Teflon 袋如图 1. 采集样品立即带回实验室,用配备质量选择性探测器的气相色谱仪做定量分析. 同时剪下袋中包裹的树叶,测量叶面积,并烘干称重. 此方法可快速地检测出植物是否释放 VOCs 气体及其种类,但结果较为粗略,可用于大量快速的甄别式测量.

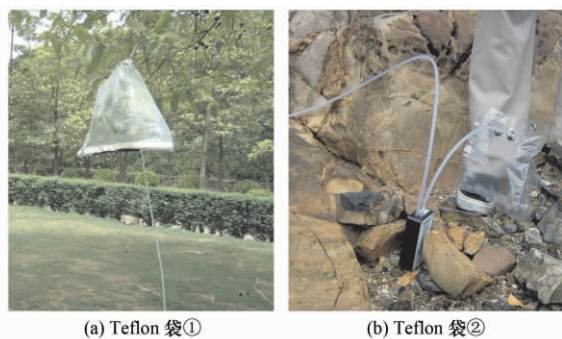


图 1 采集气体样品的 Teflon 袋  
Fig. 1 Teflon sealed bags used for gas collection

方法二是改装 Li-6400 光合仪叶室系统的封闭式取样法,在气流经过的叶室打开一个抽样端口,连接装有吸附剂 (Carbotrap 200 g、Carbotrap C300 g、Carbosieve S-III 200 g) 的铜质采样管,采样管另一端接小型的可以控制气流速度的定量抽气筒. 流经采

样管的气流速度为  $1 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ , 采样 5 min, 光合有效辐射 (PAR) 设为  $1000 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ . 采样后将铜制采样管放置在便携式冰箱内,回实验室保存于  $-20^{\circ}\text{C}$  冰箱中,运至美国进行 GC-MS 分析. 采样同时用 Li-6400 光合仪同步测出植物的光照强度、植物叶表温度、湿度、蒸腾强度、气孔导度等指标,并记录环境温度、湿度,以确定植物排放 VOCs 时的生理生态条件. 采集气体样品后,将叶室内的叶片剪下并装入密封袋,用于测量叶面积,然后在  $60^{\circ}\text{C}$  恒温箱中烘 48 h,称量其干重. 此方法可以准确地检测出释放 VOCs 的量以及具体种类,表 1、表 2 均为方法一测量的数据.

2 种采样方法均采集对照气样: 方法一只抽取大气气体作为对照; 方法二的对照取样是叶室内不放叶片,其余步骤相同. 每种植物采用方法二测量 3 次后取均值.

## 2 结果与讨论

### 2.1 排放异戊二烯的植物种类

在所测量的 158 种植物中有 31 种植物具有显著排放异戊二烯的能力,如表 1 所示. 温度和光照对 VOCs 的排放速率影响很大,因此同一植物在不同的温度和光照下 VOCs 的释放量会有所不同,为了比较植物释放 VOCs 的能力,按照文献 [21] 提出的计算方法,表 1 及表 2 数据均已经换算为  $\text{PAR} = 1000 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ ,  $T = 303 \text{ K}$  时的标准排放速率,该方法在测算北京地区植物 VOCs 亦有使用 [3].

由表 1 可知,从种的水平来看,不同物种的排放量存在很大的差异. 其中短穗鱼尾葵、芒果、海红豆、海漆 4 个种明显高于其他种. 从科属水平来看棕榈科 (Palmae)、桃金娘科 (Myrtaceae)、桑科 (Moraceae)、豆科 (Leguminosae) 的植物具有较强的释放异戊二烯的能力,这与李庆军等 [20] 在西双版纳等地的研究结果一致. 其中在所测棕榈科植物中,排放异戊二烯的占 7/15,而棕榈科植物在深圳的道路绿地和公园绿地中应用率很高,不容忽视. 另外黄牛木、大叶榕、乌墨、银柴等排放速率虽然不是很高,但在深圳分布极广,其数量之多对排放总量的影响是不容忽视的.

### 2.2 排放单萜烯的植物种类

所测的 158 种植物中,有 52 种植物具有显著释放单萜烯的能力,如表 2 所示. 从表 2 可知,从种的水平来看排放量差异比异戊二烯小. 从科水平看大戟科 (Euphorbiaceae) 植物具有较高排放单萜烯的能

表 1 所测植物中显著释放异戊二烯的种类

Table 1 Species with isoprene emission among all sampled plants

种类	科	异戊二烯排放速率/ $\mu\text{g}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$
苏铁蕨 <i>Brainea insignis</i>	乌毛蕨科 Blechnaceae	2.81
美丽波温铁 <i>Bowenia spectabilis</i>	苏铁科 Cycadaceae	4.27
南天竹 <i>Nandina domestica</i>	小檗科 Berberidaceae	3.27
柠檬桉 <i>Eucalyptus citrodora</i>	桃金娘科 Myrtaceae	17.10
白千层 <i>Melaleuca leucadendra</i>	桃金娘科 Myrtaceae	12.80
乌墨 <i>Syzygium cumini</i>	桃金娘科 Myrtaceae	9.66
黄牛木 <i>Cratogeomys cochinchinenses</i>	藤黄科 Guttiferae	5.15
长芒杜英 <i>Elaeocarpus apiculatus</i>	杜英科 Elaeocarpaceae	13.48
水石榕 <i>Elaeocarpus hainanensis</i>	杜英科 Elaeocarpaceae	2.61
海漆 <i>Excoecoria Agalloch</i>	大戟科 Euphorbiaceae	29.90
银柴 <i>Aporosa dioica</i>	大戟科 Euphorbiaceae	1.72
南洋楹 <i>Albizia falcataria</i>	豆科 Leguminosae	8.58
马占相思 <i>Acacia mangium</i>	豆科 Leguminosae	5.09
海红豆 <i>Adenanthera pavonina</i> var. <i>microsperma</i>	豆科 Leguminosae	33.45
藜蒴 <i>Castanopsis fissa</i>	壳斗科 Fagaceae	3.56
木麻黄 <i>Casuarina equisetifolia</i>	木麻黄科 Casuarinaceae	1.46
大叶榕 <i>Ficus virens</i> var. <i>sublanceolata</i>	桑科 Moraceae	6.28
金叶榕 <i>Ficus microcarpa</i> 'Golden Leaves'	桑科 Moraceae	5.39
复羽叶栎 <i>Koelreuteria bipinnata</i>	无患子科 Sapindaceae	2.10
芒果 <i>Mangifera indica</i>	漆树科 Anacardiaceae	57.74
鸭脚木 <i>Schefflera octophylla</i>	五加科 Araliaceae	7.50
夹竹桃 <i>Nerium oleander</i>	夹竹桃科 Araliaceae	4.88
散尾葵 <i>Chrysalidocarpus lutescens</i>	棕榈科 Palmaceae	15.97
假槟榔 <i>Archontophoenix alexandrae</i>	棕榈科 Palmaceae	17.05
软枝刺葵 <i>Phoenix roebelenii</i>	棕榈科 Palmaceae	4.90
棕竹 <i>Rhapis excelsa</i>	棕榈科 Palmaceae	3.68
短穗鱼尾葵 <i>Caryotamitis</i>	棕榈科 Palmaceae	147.96
鱼尾葵 <i>Caryota ochlandra</i>	棕榈科 Palmaceae	1.88
酒瓶椰子 <i>Raphia vinifera</i>	棕榈科 Palmaceae	1.40
青皮竹 <i>Bambusa textiles</i>	禾本科 Graminae	2.67
大佛肚竹 <i>Bambusa vulgaris</i>	禾本科 Graminae	4.50

力,占所测大戟科植物的 5/8。亚热带和热带沿海地区特有的红树林植物无瓣海桑 (*Sonneratia apetala*)、白骨壤 (*Avicennia marina*)、桐花树 (*Aegiceras corniculatum*)、木榄 (*Bruguiera gymnorrhiza*)、海桑 (*Sonneratia caseolaris*)、秋茄 (*Kandelia candel*) 均为首次测量,排放量均较高,占所测量红树林植物的 6/7。以往对植物释放 BVOCs 的研究多集中于木本植物,对草本植物研究较少<sup>[13]</sup>,本研究中草本蚌花 (*Rhoeo discolor*)、花叶艳山姜 (*Alpinia zerumbet* cv. *variegata*)、紫雪萼花 (*Cuphea* sp.)、小琴丝竹 (*Bambusa glaucescens* cv. *silverstripe*)、藤本的鸡蛋果 (*Passiflora edulis*)、黄花马缨丹 (*Lantana camara*

var. *flava*) 排放量也较高。本研究首次对热带、亚热带沿海特有的红树林植物进行了测量,涉及红树科、大戟科、马鞭草科 (*Verbenaceae*)、紫金牛科 (*Myrsinaceae*)、海桑科等红树林植物,发现其普遍具有较强的排放单萜烯的能力。古老而珍稀的苏铁类植物大型双子铁 (*Dioon spinulosum*)、石山苏铁 (*Cycas miquelii*)、美丽波温铁 (*Bowenia spectabilis*)、鳞秕泽米 (*Zamia forfuracea*)、蕨类植物黑桫欏 (*Gymnosphaera podophylla*)、苏铁蕨 (*Brainea insignis*) 排放量也较高。在华南地区危害严重的入侵性杂草薇甘菊 (*Mikania micrantha*) 也有一定的排放。

表 2 所测植物中显著释放单萜烯的植物种类

Table 2 Species with terpene emission among all sampled plants

种类	科	单萜烯排放速率/ $\mu\text{g}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$
黑桫欏 <i>Gymnosphaera podophylla</i>	桫欏科 Cyatheaceae	13.34
苏铁蕨 <i>Brainea insignis</i>	乌毛蕨科 Blechnaceae	4.79
美丽波温铁 <i>Bowenia spectabilis</i>	苏铁科 Cycadaceae	3.67
大型双子铁 <i>Dioon spinulosum</i>	苏铁科 Cycadaceae	15.87
石山苏铁 <i>Cycas miquelii</i>	苏铁科 Cycadaceae	5.56
鳞秕泽米 <i>Zamia forficata</i>	苏铁科 Cycadaceae	1.42
马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	松科 Pinaceae	1.39
落羽杉 <i>Taxodium distichum</i>	杉科 Taxodiaceae	1.05
小叶买麻藤 <i>Gnetum parvifolium</i>	买麻藤科 Gnetaceae	5.14
山苍子 <i>Litsea cubeba</i>	樟科 Lauraceae	17.75
紫雪萼花 <i>Cuphea</i> sp.	千屈菜科 Lythraceae	10.92
海桑 <i>Sonneratia caseolaris</i>	海桑科 Sonneratiaceae	6.77
无瓣海桑 <i>Sonneratia apetala</i>	海桑科 Sonneratiaceae	10.79
鸡蛋果 <i>Passiflora edulis</i>	西番莲科 Passifloraceae	68.77
乌墨 <i>Syzygium cumini</i>	桃金娘科 Myrtaceae	13.46
柠檬桉 <i>Eucalyptus citrodora</i>	桃金娘科 Myrtaceae	2.90
阿江榄仁 <i>Terminalis arjuna</i>	使君子科 Combretaceae	1.48
木榄 <i>Bruguiera gymnorrhiza</i>	红树科 Rhizophoraceae	5.25
秋茄 <i>Kandelia candel</i>	红树科 Rhizophoraceae	2.72
假萍婆 <i>Sterculia lanceolata</i>	梧桐科 Sterculiaceae	1.37
石栗 <i>Aleurites moluccana</i>	大戟科 Euphorbiaceae	9.81
蝴蝶果 <i>Cleidocarpon cavaleriei</i>	大戟科 Euphorbiaceae	5.7
红桑 <i>Acalypha wilkesiana</i>	大戟科 Euphorbiaceae	5.02
山乌桕 <i>Sapium discolor</i>	大戟科 Euphorbiaceae	2.79
秋枫 <i>Bischofia javanica</i>	大戟科 Euphorbiaceae	1.98
南洋楹 <i>Albizia falcataria</i>	豆科 Leguminosae	13.37
黄槐决明 <i>Cassia surattensis</i>	豆科 Leguminosae	4.92
猴耳环 <i>Pithecellobium lucidum</i>	豆科 Leguminosae	1.90
鸡冠刺桐 <i>Erythrina crista-galli</i>	豆科 Leguminosae	1.51
青果榕 <i>Ficus variegata</i> var. <i>chlorocarpa</i>	桑科 Moraceae	1.06
藜蒴 <i>Castanopsis fissa</i>	壳斗科 Fagaceae	2.78
非洲楝 <i>Khaya senegalensis</i>	楝科 Meliaceae	5.97
荔枝 <i>Litchi chinensis</i>	无患子科 Sapindaceae	15.32
复羽叶栲 <i>Koelreuteria bipinnata</i>	无患子科 Sapindaceae	6.33
海芒果 <i>Cerbera manghas</i>	漆树科 Anacardiaceae	1.61
鸭脚木 <i>Schefflera octophylla</i>	五加科 Araliaceae	7.74
杜鹃 <i>Rhodo dendron pulchrum</i>	杜鹃花科 Ericaceae	2.78
桐花树 <i>Aegiceras corniculatum</i>	紫金牛科 Myrsinaceae	10.88
黄蝉 <i>Allamanda schottii</i>	夹竹桃科 Araliaceae	2.21
希茉莉 <i>Hamelia patens</i>	茜草科 Rubiaceae	1.74
龙船花 <i>Ixora chinensis</i>	茜草科 Rubiaceae	1.59
福建茶 <i>Carmona microphylla</i>	紫草科 Boraginaceae	10.64
薇甘菊 <i>Mikania micrantha</i>	菊科 Compositae	2.92
白骨壤 <i>Avicennia marina</i>	马鞭草科 Verbenaceae	12.69
黄花马缨丹 <i>Lantana camara</i> var. <i>flava</i>	马鞭草科 Verbenaceae	8.51
蚌花 <i>Rhoeo discolor</i>	鸭跖草科 Commelinaceae	2.44
花叶艳山姜 <i>Alpinia zerumbet</i> cv. <i>variegata</i>	姜科 Zingiberaceae	4.21
假槟榔 <i>Archontophoenix alexandrae</i>	棕榈科 Palmaceae	3.53
海枣 <i>Phoenix dactylifera</i>	棕榈科 Palmaceae	3.26
椰子 <i>Cocos nucifera</i>	棕榈科 Palmaceae	1.31
小琴丝竹 <i>Bambusa glaucescens</i> cv. <i>silverstripe</i>	禾本科 Graminae	56.37

### 3 结论

(1) 从具有显著排放 VOCs 能力的树种数量来看, 大部分为深圳园林植物的优势种或丰富种, 如散尾葵、鱼尾葵等棕榈科植物, 黄牛木、大叶榕、乌墨、银柴等, 因此对整个深圳 VOCs 排放总量贡献很大, 是不容忽视的。笔者建议在进行大面积绿化以及经济林、防护林及水源涵养林等的树种选择时应结合将其 BVOCs 释放情况作为考虑因素之一, 尽量选用排放量少或不排放 BVOCs 的树种, 这将有利于减少城市发生光化学污染的机会。

(2) 研究首次对热带、亚热带沿海特有的红树林植物进行了测量, 涉及红树科、大戟科、马鞭草科 (Verbenaceae)、紫金牛科 (Myrsinaceae)、海桑科等红树林植物, 发现其普遍具有较强的排放单萜烯的能力, 建议大面积园林绿化中少采用或不采用该类植物。

#### 参考文献:

- [ 1 ] Singh H B , Zimmerman P R. Atmospheric distribution and sources of nonmethane hydrocarbons [ A ]. In: Nriagu J O. Gaseous pollutants: characterization and cycling [ M ]. New York: John Wiley and Sons , 1992. 177-235.
- [ 2 ] 牟玉静, 宋文质, 张晓山, 等. 落叶阔叶树异戊二烯排放研究 [ J ]. 环境化学, 1999, 18( 2 ): 21-27.
- [ 3 ] 王志辉, 张树宇, 陆思华, 等. 北京地区植物 VOCs 排放速率的测定 [ J ]. 环境科学, 2003, 24( 2 ): 7-12.
- [ 4 ] Roselle S J , Pierce T E , Schere K L. The sensitivity of regional ozone modeling to biogenic hydrocarbons [ J ]. Journal of Geophysical Research , 1991, 96( D4 ): 7371-7394.
- [ 5 ] Guenther A , Hewitt C N , Erickson D , et al. A global model of natural volatile organic compound emissions [ J ]. Journal of Geophysical Research , 1995, 100( D5 ): 8873-8892.
- [ 6 ] Constable J V H , Guenther A B , Schimel D S , et al. Modeling changes in VOC emission in response to climate change in the continental United States [ J ]. Global Change Biology , 1999, 5( 7 ): 791-806.
- [ 7 ] Klinger L F , Li Q J , Guenther A B , et al. Assessment of volatile organic compound emissions from ecosystems of China [ J ]. Journal of Geophysical Research , 2002, 107( D21 ): 4603.
- [ 8 ] Lamb B , Pierce T , Baldocchi D , et al. Evaluation of forest canopy models for estimating isoprene emissions [ J ]. Journal of Geophysical Research , 1996, 101( D17 ): 22787-22797.
- [ 9 ] Peterson W. A survey of biogenic VOCs [ J ]. Paint & Coatings Industry , 1999, 15( 5 ): 82-89.
- [ 10 ] Owen S M , Mackenzie A R , Stewart H , et al. Biogenic volatile organic compound ( VOC ) emission estimates from an urban tree canopy [ J ]. Ecological Applications , 2003, 13( 4 ): 927-938.
- [ 11 ] Centritto M , Liu S R , Loreto F. Biogenic emission of volatile organic compounds by urban forests [ J ]. Chinese Forestry Science and Technology , 2005, 4( 1 ): 20-26.
- [ 12 ] 谢旻, 王体健, 江飞, 等. NO<sub>x</sub> 和 VOC 自然源排放及其对中国地区对流层光化学特性影响的数值模拟研究 [ J ]. 环境科学, 2007, 28( 1 ): 32-40.
- [ 13 ] Karlika J F , McKaya A H , Welcha J M , et al. A survey of California plant species with a portable VOC analyzer for biogenic emission inventory development [ J ]. Atmospheric Environment , 2002, 36( 33 ): 5221-5233.
- [ 14 ] 崔骁勇, 赵广东, 刘世荣. 植物源异戊二烯及其生态意义 [ J ]. 应用生态学报, 2002, 13( 4 ): 505-509.
- [ 15 ] Fesenfeld F , Calvert J , Fall R , et al. Emission of volatile organic compounds from vegetation and the implications for atmospheric chemistry [ J ]. Global Biogeochemical Cycles , 1992, 6( 4 ): 389-430.
- [ 16 ] Benjamin M T , Winer A M. Estimating the ozone-forming potential of urban trees and shrubs [ J ]. Atmospheric Environment , 1998, 32( 1 ): 53-68.
- [ 17 ] Karlik J F , Winer A M. Plant species composition , calculated leaf masses and estimated biogenic emissions of urban landscape types from a field survey in Phoenix , Arizona [ J ]. Landscape and Urban Planning , 2001, 53( 1-4 ): 123-134.
- [ 18 ] 谢扬颺, 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.
- [ 19 ] 王效科, 牟玉静, 欧阳志云, 等. 太湖流域主要植物异戊二烯排放研究 [ J ]. 植物学通报, 2002, 19( 2 ): 224-230.
- [ 20 ] 李庆军, Klinger L F. 中国不同气候带植被挥发性有机化合物通量与生态系统演替的相关性 [ J ]. 植物学报, 2001, 43( 10 ): 1065-1071.
- [ 21 ] Guenther A , Zimmerman P , Harley P , et al. Isoprene and monoterpene emission rate variability: Model evaluation and sensitivity analyses [ J ]. Journal of Geophysical Research , 1993, 98( D7 ): 12609-12617.