

北京市园林绿地植被挥发性有机物排放的估算

谢扬飏,邵敏*,陆思华,刘莹 (北京大学环境学院,环境模拟与污染控制国家重点联合实验室,北京 100871)

摘要: 根据北京市 2000 年城市园林绿化普查结果,对北京市园林绿地植被挥发性有机物(VOCs)的排放情况进行研究,建立了北京市园林绿地天然源 VOCs 排放清单。结果表明,2000 年北京市园林绿地 VOCs 的年总排放量(以 C 计)约为 3.85 万 t,其中异戊二烯为 3.09 万 t,单萜烯为 0.59 万 t,其他 VOCs(OVOC)为 0.16 万 t。排放具有明显的季节依赖性,其中夏季排放量最大,为 2.49 万 t,占全年的 64.7%;冬季最少,为 0.0086 万 t,占全年的 0.2%。城八区总排放量比远郊区县高,排放量最高的是朝阳区,为 1.37 万 t,占全市的 36.0%,其次为海淀、丰台、石景山区,分别占 16.2%、13.8%、4.7%。

关键词: 天然源排放;挥发性有机物(VOCs);城市绿地;排放清单

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2007)04-0498-05

The estimation of volatile organic compounds emission from landscape plants in Beijing. XIE Yang-yang, SHAO Min*, LU Si-hua, LIU Ying (State Joint Key Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, College of Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China). *China Environmental Science*, 2007,27(4): 498~502

Abstract: Based on the general survey results of urban garden of Beijing City in 2000, the VOC emission condition of urban garden greenland plants in Beijing City was studied, the natural emission inventory of VOCs in the garden greenland in Beijing City was established. The 2000 annual total emission amount was about 3.85×10^4 C, in which isoprene was 3.09×10^4 C, monoterpenes was 0.59×10^4 C and other VOCs(OVOC) was 0.16×10^4 C. The emissions possessed distinct seasonal dependence in which the emission amount in summer was the largest, being 2.49×10^4 C, occupying 64.7% of annual emission; in winter was the lowest, being 0.0086×10^4 C, occupying 0.2% of annual emission. The total emission amount in urban areas were higher than that in sub-urban areas, the highest was in Chaoyang district, being 1.37×10^4 C, occupying 36.0% of the entire city, followed by the emissions in Haidian, Fengtai and Shijingshan districts, occupying 16.2%, 13.8%, 4.7% respectively.

Key words: natural emission; volatile organic compounds(VOCs); urban greenlands; emission inventory

挥发性有机物(VOCs)在大气对流层臭氧产生的光化学过程与二次颗粒有机物(SOA)的形成过程中,均发挥着重要作用^[1]。VOCs 的来源分为天然源和人为源。植物叶排放是天然源 VOCs 的主要来源^[1]。城市绿地系统是由城市中不同类型、性质和规模的各种绿地共同构成的环境体系。城市绿地植物的增加可以减菌、减噪、滞尘,改善城市热岛效应,吸收部分有害气体。但是植物排放 VOCs 的增加,也应该引起高度的重视。

国外学者针对 VOCs 天然源清单已经进行了大量的工作,从采样技术、分析方法到利用模式数学计算,从各种植物碳氢化合物排放的测定到区域天然源排放通量的推算,都取得了很大进展^[1-6]。在我国,该领域的研究工作从 20 世纪 90 年

代初开始起步。目前有关国内各地天然源排放研究的报道不多^[7-8],多是针对山区森林植被排放量的估算^[8],但涉及城市园林绿地植物排放清单的很少。本研究根据北京市 2000 年城市园林绿化普查结果,对北京市园林绿地植被 VOCs 的排放情况进行研究,建立北京市园林绿地天然源 VOCs 排放清单,为进一步研究北京市园林绿地的变化可能造成的空气质量影响提供基础资料。

1 天然源 VOCs 排放量的计算模型

植被排放的 VOCs 种类很多,目前研究较多

收稿日期: 2006-12-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40575059,20637001)

* 责任作者, 教授, mshao@pku.edu.cn

的是异戊二烯和单萜烯,这主要是由于它们排放量大,化学活性强^[6]。本研究将植被排放的 VOCs 划分为异戊二烯、单萜烯和除此之外的所有其他 VOCs(醇、醛、酮、有机酸、低碳烷烃和烯烃等多种)3 类。先分别计算各单种植物的排放量,然后将各种植物排放量相加。单种植物的排放量计算公式依据 Guenther 等^[9-10]提出的算法来确定。植物主要通过 7 种不同途径释放 VOCs。这其中仅有 2 种过程的具体行为是最重要也是目前比较了解的,即 CHL(叶绿体)和 DST(防御专属组织)^[3]。VOCs 排放量的算法可归纳为 CHL 算法和 DST 算法 2 类。前者排放量主要受温度、辐射和叶龄影响;后者主要受温度影响。异戊二烯属于叶绿体排放类型,故采用 CHL 法计算;单萜烯和其他 VOCs 则采用 DST 法计算。

1.1 CHL 算法

$$E_{\text{ISOP}} = [\varepsilon][M][\gamma_p\gamma_t\gamma_a][\rho][N][t] \quad (1)$$

式中: E_{ISOP} 为一段时间内的异戊二烯排放量; N 为植物数量; t 为时间; ε 为标准状态下[温度为 30℃,PAR 为 1000 $\mu\text{mol photon}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$]基本排放速率, $\mu\text{g C}/(\text{g}\cdot\text{h})$; M 为单株植物平均叶生物量, $\text{kg}/\text{株}$; ρ 为逸出效率(即排放总量中逸入树冠上方大气中部分所占的比例); γ_p 、 γ_t 、 γ_a 为环境校正因子,分别为光合有效辐射影响因子、温度影响因子、叶龄影响因子,本研究只考虑 γ_p 及 γ_t 。由于基础数据不可得,没有考虑 γ_a 的影响,令 $\gamma_a=1$ 。

γ_p 及 γ_t 校正因子计算如下:

$$\gamma_t = \exp[C_{T1}(T-T_s)/RT_sT/(1+\exp[C_{T2}(T-T_M)/RT_sT])] \quad (2)$$

式中: T 为当前叶表面温度(K),简单等于树冠外的气温; $T_s=303\text{K}$; R 为气体常数(8.314J/K); C_{T1} 、 C_{T2} 、 T_M 为经验常数, $C_{T1}=95000\text{J/mol}$; $C_{T2}=230000\text{J/mol}$, $T_M=314\text{K}$ 。

$$\gamma_p = (aC_LQ)/[(1+a^2Q^2)^{0.5}] \quad (3)$$

式中: a 、 C_L 为经验参数,可取为 0.0027 和 1.066; Q 为当前的光合量子密度[PPFD, $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$],来源于太阳辐射数据。

1.2 DST 类型算法

$$E_{\text{TMT}}, E_{\text{OVOC}} = [\varepsilon][M][\gamma_t][\rho][N][t] \quad (4)$$

式中: E_{TMT} 、 E_{OVOC} 分别为一段时间内单萜烯和

其他 VOCs 排放量。

环境校正因子计算方法如下:由于单萜烯和其他 VOCs 排放量仅与温度相关,故仅考虑 γ_t ; $\gamma_t = \exp[\beta(T-T_s)]$,经验常数 β 值为 0.09K^{-1} 。

2 园林绿化基础数据

2.1 绿化植被普查数据

北京市政府于 2000 年曾对全市园林绿化现状进行全面普查,涵盖全市绿地系统,包括城八区、远郊区县及风景名胜区。北京城市各类绿地均为人造林,绿地可分为公共绿地、城市防护区绿地、单位附属绿地、居住区绿地、道路绿地、生产绿地、风景名胜区。绿地植物种类包括树木、草坪、宿根花卉。基本分类为常乔、落乔、常灌、落灌、竹子、草坪等。该普查资料中包括北京市园林绿地的植物种类、数量和地区分布状况等数据^[11]。

2.2 VOCs 的标准排放因子

如果在植物种属水平上分别计算排放量,则需要知道区域内各种植物的排放因子。如果国内有可靠的观测研究结果,则按种确定排放因子,否则参照国外研究结果,按种或属确定排放因子。对于其他 VOCs 的排放因子,目前国内外尚无相对可靠的观测结果,本研究采用文献推荐值 $1.5\mu\text{gC}/(\text{g}\cdot\text{h})$ ^[3]。本研究共确定了 200 余种植物的标准排放因子,其中 23 种为北京地区植物 VOC 排放速率实测值^[12],其余来源于国外文献数据^[2,7-8,13]。文献中的排放因子已经标准化为标准状态下的基本排放速率,作为年平均值不再考虑其季节变化。

在北京市园林绿地植物中,异戊二烯排放速率较高的植物主要是落乔类,如杨树、柳树、栎树、槐树等。而单萜烯排放速率较高的植物主要是草地、常乔类的松树、落乔类的苹果等种类。灌木类植物和草地主要排放的是单萜烯。竹子类主要排放异戊二烯。

2.3 叶生物量

单株植物的平均叶生物量由 3 种方式获得:文献中已有的北京地区或相近地区植物的单株叶生物量实测值^[14];叶生物量密度和植物叶面积

的乘积;草地、竹子类植被占地面积、叶面积指数和生物量密度三者的乘积。

其中叶生物量密度由文献[8]可得,叶面积可由文献[12]或陈自新等^[15]归纳的北京市园林主要植物叶面积回归方程计算得到。缺乏相关数据的采用陈自新等^[14]统计总结的北京市园林植物单株叶面积数据近似代替,落叶乔木 $16.57\text{m}^2/\text{株}$,常绿乔木 $12.6\text{m}^2/\text{株}$,灌木 $8.8\text{m}^2/\text{株}$ 。

需要指出的是,文献中查得的叶生物量密度通常是一年中叶密度的峰值 D_p ^[10],模型中的平均叶密度是 D_p 与 D_f (特定时间的叶数量比例)的乘积,本研究采取以下假定近似计算:常绿植物叶数量各月不变, $D_f=1$;而落叶植物 6、7、9 月夏季叶数量达到最大值, $D_f=1$;12、1、2 月冬季为 0,而 3、4、5 月春季和 9、10、11 月秋季叶数量为 7 月的一半, $D_f=1/2$ 。而文献中查得的叶面积数据可认为是全年的平均值。

2000 年月平均气温和太阳辐射数据来源于国家气象信息中心。

3 结果与讨论

3.1 排放总量

3.1.1 不同植物种类总排放量 经计算可得,2000 年北京市园林绿地 VOCs 的年总排放量(以 C 计)约为 3.85 万 t,其中异戊二烯为 3.09 万 t,单萜烯为 0.59 万 t,其他 VOCs(OVOC)为 0.16 万 t。异戊二烯排放量比例最高,达 80.3%;单萜烯其次,占 15.4%,其他 VOCs 占 4.3%。

将植物分成常绿乔木、落叶乔木、常绿灌木、落叶灌木、竹子、草地 6 种,比较其排放量可知,落叶乔木是异戊二烯的主要排放者;草地是单萜烯的主要排放者;常绿乔木排放的主要是单萜烯,仅排放少量异戊二烯;灌木和竹子排放的 VOCs 很少。

3.1.2 单种植物排放量(以 C 计)比较 从单种植物的排放量来看,排放异戊二烯量最高的植物是杨树、柳树和槐树,分别为 2.06,0.54,0.46 万 t。其他种类 VOCs 排放量最高的植物依然是杨树和柳树,分别为 0.030,0.012 万 t。而草地是单萜烯的主要排放者,全年共排放 0.37 万 t,占有植物

排放单萜烯的 62.7%。排放总量较高的植物主要为杨树 2.10 万 t,柳树 0.58 万 t,槐树 0.50 万 t,草地 0.39 万 t。

可见,乔木类植物是主要的排放者,灌木排放较低。杨树、柳树、槐树等树种排放量较大。草地是萜烯的主要排放者。

3.1.3 与文献研究的对比 表 1 给出了国内外其他研究者对北京市天然源 VOCs 年排放量的研究结果。其他不同研究者所得的估算值也存在差异。本研究计算的园林绿地植被排放量高于 Wang 等^[8]的估算值,而低于其他研究值。差异主要是由于重点估算的区域、植被类型不同造成的。除本研究之外,其余文献值计算的主要为北京市森林植被的排放量,包括山区森林、灌丛、丘陵及平原地区的果园、农田等。植被数据来源于早年的植被图集,主要植被类型为松林、柏林、栎林、果园等。而本研究主要针对的是园林植被的排放,植物种类涵盖了草地、竹、松柏、杨柳槐、菊丁香、月季等在内的城八区及远郊区县各类绿地的植物类型,数据来源于园林局 2000 年的统计数据,较为精确。另外,其余文献中报道的 OVOC 量均高于单萜烯的量,而本研究则低于单萜烯,可能是因为园林绿地植物组成并不同于森林植被,而包括了部分单萜烯排放因子较高的植物。不同研究中选用的标准排放因子也不完全相同,如在本研究中草地、苹果、海棠等单萜烯排放速率较高的植物所采用的标准排放因子均来自于北京市实测值,其具体值远高于其他文献所采用的值。本研究结果也表明园林绿地植物排放的 VOCs 量应引起关注。

3.1.4 与北京市 VOCs 人为源排放量对比 据北京市大气污染的成因和来源分析(2002)^{*}估算,1999 年 VOCs 人为源总排放量为 24.23 万 t 左右,其中流动源为 11.64 万 t、固定源 7.45 万 t、溶剂使用 4.59 万 t、油品储运 0.6 万 t。与人为源总排放相比,园林植物排放的 3.85 万 t VOCs 与之相差并不大,甚至远超过油品储运源排放,应该引起足够的重视。

* 北京市大气污染控制对策研究课题组。北京大气污染的成因和来源分析。2002。(内部资料)

表 1 北京市天然源 VOCs 排放量(以 C 计)的比较(万 t)
Table 1 Comparison of the biogenic VOCs emissions of Beijing in different studies ($\times 10^4$ t)

文献	异戊二烯	萜烯	OVOC	VOC
[8]	0.79	0.35	0.48	1.6
[7]	1.39	0.78	2.63	4.8
[1]	2.78	0.8	1.69	5.27
*	1.88	0.43	3.56	5.87
本研究	3.09	0.59	0.16	3.85

注:*来源于北京市大气污染的成因和来源分析(2002),北京市大气污染控制对策研究课题组(内部资料)

3.2 地区分布

表 2 给出北京市园林绿地植物年排放量地区分布.城八区排放量比远郊区县高,而城八区当中,朝阳、海淀、丰台、石景山是主要排放地区.这与当地的植物数量和种类分布有关.如在朝阳区杨树、柳树等排放速率较高的树木数量高于其他地区.

表 2 北京市各行政区的 VOCs 排放量(以 C 计)分布(万 t)
Table 2 District distribution of the biogenic VOCs emissions of Beijing($\times 10^4$ t)

行政区	异戊二烯	萜烯	OVOC	VOC
东城区	0.020	0.012	0.0028	0.034
西城区	0.025	0.019	0.0035	0.047
崇文区	0.019	0.0095	0.0018	0.030
宣武区	0.013	0.0082	0.0017	0.023
朝阳区	1.18	0.15	0.043	1.37
海淀区	0.44	0.15	0.033	0.62
丰台区	0.42	0.082	0.025	0.52
石景山区	0.11	0.057	0.013	0.18
城八区	2.22	0.48	0.12	2.83
远郊区县	0.87	0.11	0.037	1.02

3.3 季节排放特征

表 3 为各类 VOCs 及总 VOCs 一年中各个季节的排放量.夏季最高,冬季最低.这主要是因为植物 VOCs 排放与植物的生长周期相关,受环境如温度、太阳辐射的影响.植物的生物量和环境条件均随季节变化.如表 3 所示,3 类 VOCs 的不同季节排放量相差最大的是异戊二烯,表明异戊二烯受季节的影响要高于其他 2 类 VOCs.异戊二烯属于叶绿体排放类型,排放量受光照和温度

影响非常大;而萜烯和 OVOC 则属防御专属组织类型,主要受温度影响,其季节波动幅度要比异戊二烯小.

表 3 四季的排放量(以 C 计)比较(万 t)
Table 3 Comparison of the biogenic VOCs emissions of Beijing by season ($\times 10^4$ t)

季节	异戊二烯	萜烯	OVOC	VOCs
春	0.63	0.13	0.036	0.80
夏	2.07	0.33	0.092	2.49
秋	0.39	0.12	0.034	0.55
冬	0.00011	0.0056	0.0029	0.0086
全年	3.09	0.59	0.16	3.85

4 不确定因素

在本研究 VOCs 排放量的估算过程中,其估算误差主要来自于以下 3 个方面.

4.1 植物标准排放速率

实测的北京市植物 VOC 排放因子仅为 23 种,其余大部分排放因子是使用中国其他地区或是国外的文献值.

4.2 叶生物量的计算

部分叶密度、叶面积数值来自于其他地区 and 国家的文献值,未查到的按科属类别赋值;而不同地区的同种植物其叶生物量密度及叶面积可能存在差异.

4.3 环境校正因子

因缺乏相关数据,未考虑叶龄校正,而处于不同生长期的叶子其排放能力是有差异的.本研究中令 $\gamma_a = 1$,忽略了处于新生期或衰老期的叶子排放能力与成熟期叶子排放能力的差距,使最后的估算结果偏大.

5 结论

5.1 北京市园林绿地植物 VOCs 年总排放量(以 C 计)约为 3.85 万 t,其中异戊二烯为 3.09 万 t,单萜烯为 0.59 万 t,其他 VOCs(OVOC)为 0.16 万 t.乔木类植物是主要的排放者,灌木排放较低.杨树、柳树、槐树等树种排放量较大.另外草地排放的萜烯和其他种类的 VOCs 也较高.

5.2 排放量高的地区主要集中在城八区,其中

近郊区的朝阳、海淀、丰台、石景山排放较多,3类 VOCs 的排放情况具有明显的季节依赖性,夏季最高,冬季最低。

5.3 经计算与比较,本研究所得的北京市园林绿地植物排放量与其他学者对北京森林植被 VOCs 排放量结果相比相当,而与北京市人为源 VOCs 排放量相比亦相差不大,甚至超过油品储运源排放量,故应引起有关部门重视,在推进北京市的园林绿化时考虑采取一定措施控制 VOCs 的排放。

参考文献:

- [1] Guenther A, Hewitt C N. A global-model of natural volatile organic-compound emission [J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 1995,100(5):8873-8892.
- [2] Geron C, Guenther A, Pierce T, *et al.* An improved model for estimating emissions of volatile compounds from forests in the eastern united states [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99(6):12773-12791.
- [3] Guenther A, Zimmerman P, Wildermuth M. Natural volatile organic compound emission rate estimates for U.S. woodland and landscapes [J]. *Atmospheric Environment*, 1994,28(6):1197-1210.
- [4] Guenther A, Zimmerman P. Estimates of regional natural volatile organic compound fluxes from enclosure and ambient measurements [J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 1996,101(1):1345-1359.
- [5] Simpson D, Winiwarter W. Inventorying emissions from nature in Europe [J]. *Journal of Geophysical Research- Atmospheres*, 1999,104(7):8113-8152.
- [6] Benjamin M T, Winer A M. Estimating the ozone-forming potential of urban trees and shrubs [J]. *Atmospheric Environment*, 1998,32:53-68.
- [7] Klinger L F, Li Q J, Guenther A, *et al.* Assessment of volatile organic compound emissions from ecosystems of China [J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2002,107(21):4603-4624.
- [8] Wang Z H, Bai Y H. A biogenic volatile organic compounds emission inventory for Beijing [J]. *Atmospheric Environment*, 2003,37:3771-3782.
- [9] Guenther A, Baugh B, Brasseur G, *et al.* Isoprene emission estimates and uncertainties for the Central African EXPRESSO study domain [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104(23):30625-30639.
- [10] Guenther A, Geron C, Pierce T, *et al.* Natural emissions of non-methane volatile organic compounds, carbon monoxide, and oxides of nitrogen from North America [J]. *Atmospheric Environment*, 2000,34(12-14):2205-2230.
- [11] 北京市园林局.北京市城市园林绿化普查资料汇编(2000) [M]. 北京:北京出版社, 2001.
- [12] 王志辉,张树宇,白郁华,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.
- [13] Benjamin M T, Mark Sudol. Low-emitting urban forests: A taxonomic methodology for assigning isoprene and monoterpene emission rates [J]. *Atmospheric Environment*, 1996,30(9):1437-1452.
- [14] 陈传国.东北主要林木生物量手册 [M]. 北京:中国林业出版, 1987.
- [15] 陈自新.北京城市园林绿化生态效益的研究 [J]. *中国园林* 1998,14(1):54-59.

作者简介: 谢扬飏(1983-),女,江西吉安人,北京大学硕士研究生,主要从事大气化学方面的研究。

致谢: 研究所用的气象资料(中国辐射资料国际交换站北京台站月值数据集)由国家气象信息中心提供,在此表示感谢。

告 读 者

为了适应我国环境保护科学事业的发展,缩短环境保护科研人员科技成果发表的周期,《中国环境科学》编辑委员会决定 2008 年《中国环境科学》由双月刊改为月刊,页码由双月刊的 144 页改为 96 页,定价由双月刊的 23.80 元/本改为 19.80 元/本。

《中国环境科学》编辑部

2007 年 8 月 3 日