

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第12期

Vol.34 No.12

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

序	郝郑平 (4503)
南京北郊大气 VOCs 体积分数变化特征	安俊琳, 朱彬, 李用宇 (4504)
天津中心城区环境空气挥发性有机物污染特征分析	翟增秀, 邹克华, 李伟芳, 王亘, 翟友存 (4513)
南京市北郊夏季挥发性有机物的源解析	杨辉, 朱彬, 高晋徽, 李用宇, 夏丽 (4519)
上海市春季臭氧和二次有机气溶胶生成潜势的估算	崔虎雄 (4529)
四川省典型人为污染源 VOCs 排放清单及其对大气环境的影响	韩丽, 王幸锐, 何敏, 郭卫广 (4535)
武汉市秸秆燃烧 VOCs 排放估算及管理对策	黄碧捷 (4543)
北京市冬季灰霾期 NMHCs 空间分布特征研究	段菁春, 彭艳春, 谭吉华, 郝吉明, 柴发合 (4552)
广州市中心城区环境空气中挥发性有机物的污染特征与健康风险评价	李雷, 李红, 王学中, 张新民, 温冲 (4558)
天津某家具城挥发性有机物健康风险评估	张银, 王秀艳, 高爽 (4565)
废旧有机玻璃再生利用行业挥发性有机物 (VOCs) 排放特征研究	王浙明, 徐志荣, 叶红玉, 许明珠, 王晓星 (4571)
农药企业场地空气中挥发性有机物污染特征及健康风险	谭冰, 王铁宇, 庞博, 朱朝云, 王道涵, 吕永龙 (4577)
电子产品加工制造企业挥发性有机物 (VOCs) 排放特征	崔如, 马永亮 (4585)
汽车涂料生产环节 VOCs 的排放特征及安全评价	曾培源, 李建军, 廖东奇, 涂翔, 许玫英, 孙国萍 (4592)
载人汽车室内空气 VOCs 污染的指标评价	陈小开, 程赫明, 罗会龙 (4599)
基于 GC-MS 的烹调油烟 VOCs 的组分研究	何万清, 聂磊, 田刚, 李靖, 邵霞, 王敏燕 (4605)
VOCs 污染场地挖掘过程的环境健康风险评价	房增强, 甘平, 杨乐, 戴子瑜, 祁世鸿, 贾建丽, 何绪文 (4612)
挥发性有机物污染场地挖掘过程中污染扩散特征	甘平, 杨乐巍, 房增强, 郭淑倩, 于妍, 贾建丽 (4619)
土壤中苯向大气挥发过程的影响因素和通量特征研究	杜平, 王世杰, 赵欢欢, 伍斌, 韩春媚, 房吉敦, 李慧颖, 细见正明, 李发生 (4627)
土壤组分对四氯乙烯吸附解吸行为的影响	胡林, 邱兆富, 何龙, 宴颖, 吕树光, 隋倩, 林匡飞 (4635)
自来水常规和深度处理工艺中挥发性有机物的变化规律	陈锡超, 罗茜, 陈虎, 魏孜, 王子健, 许科文 (4642)
杭州市典型企业废水中挥发性有机物排放特征及其评价	陈峰, 徐建芬, 唐访良, 张明, 阮东德 (4649)
维生素 C 工业废水处理系统 VOCs 污染特性	郭斌, 律国黎, 任爱玲, 杜昭, 邢志贤, 韩鹏, 高博, 刘淑娅 (4654)
新型生物滴滤填料性能评价	梅瑜, 成卓韦, 王家德, 活泼 (4661)
微量臭氧强化生物滴滤降解甲苯性能研究	张超, 赵梦升, 张丽丽, 陈建孟 (4669)
BF 和 BTf 工艺去除 DCM 性能比较	潘维龙, 於建明, 成卓韦, 蔡文吉 (4675)
改性 13X 沸石蜂窝转轮对甲苯的吸附性能研究	王家德, 郑亮巍, 朱润晔, 俞云锋 (4684)
转轮吸附法处理有机废气的研究	朱润晔, 郑亮巍, 毛玉波, 王家德 (4689)
活性炭吸附有机蒸气性能的研究	蔡道飞, 黄维秋, 王丹莉, 张琳, 杨光 (4694)
UV-生物过滤联合降解苯乙炔废气的研究	沙昊雷, 杨国靖, 夏静芬 (4701)
蜂窝状 ZSM-5 型分子筛对丙酮和丁酮吸附性能研究	杜娟, 栾志强, 解强, 叶平伟, 李凯, 王喜芹 (4706)
内浮顶油罐“小呼吸”对环境影响过程的分析	吴宏章, 黄维秋, 杨光, 赵晨露, 王英霞, 蔡道飞 (4712)
基于 Tanks 4.0.9d 模型的石化储罐 VOCs 排放定量方法研究	李靖, 王敏燕, 张健, 何万清, 聂磊, 邵霞 (4718)
铜铈复合氧化物上石化行业典型 VOCs 的氧化行为与动力学	陈长伟, 于艳科, 陈进生, 何焜 (4724)
KrBr ⁺ 准分子灯直接光解一甲胺气体	赵洁, 刘玉海, 韦连梅, 叶招莲, 张善端 (4734)
异味混合物中组分浓度与其强度贡献关系研究	颜鲁春, 刘杰民, 付慧婷, 孙媛, 林文辉 (4743)
挥发性有机污染物排放控制标准制订中的关键技术问题研究	江梅, 张国宁, 任春, 邹兰, 魏玉霞 (4747)
挥发性有机污染物排放控制标准体系的建立与完善	江梅, 张国宁, 邹兰, 魏玉霞, 张明慧 (4751)
我国 VOCs 的排放特征及控制对策研究	王铁宇, 李奇峰, 吕永龙 (4756)
固定源废气 VOCs 排放在线监测技术现状与需求研究	王强, 周刚, 钟琪, 赵金宝, 杨凯 (4764)
石化行业炼油恶臭污染源治理技术评估	牟桂芹, 隋立华, 郭亚逢, 马传军, 杨文玉, 高阳 (4771)
植物源挥发性有机化合物排放清单的研究进展	谢军飞, 李延明 (4779)
基于动态 CGE 的挥发性有机污染物 VOCs 排放预测和控制研究	刘昌新, 王宇飞, 郝郑平, 王铮 (4787)
《环境科学》第34卷(2013年)总目录	(4792)
《环境科学》征订启事 (4717) 《环境科学》征稿简则 (4742) 信息 (4528, 4626, 4693, 4700)	

植物源挥发性有机化合物排放清单的研究进展

谢军飞, 李延明

(北京市园林科学研究所, 北京 100102)

摘要: 根据近期国内外相关文献, 从植物 VOC 排放清单的角度, 对不同空间尺度下植物 VOC 排放模型的建立与排放清单量值的估算进行了归纳, 其中, 中国植被 VOC 年排放总量的估算值 (以 C 计) 在 $12.4 \sim 28.4 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$ 之间, 2000 年北京市园林绿地植物 VOC 年总排放量约为 3.85 万 t。另外, 以北京城市为例, 为确定城市大气污染物的总体减排对策, 还进一步对园林植物 VOC 排放清单量值对大气中 O_3 与 SOA 形成的贡献进行了介绍, 在同一时期内, 相比园林植物, 人为源排放的活性芳香烃类化合物和烯烃类对大气中 O_3 的产生贡献最大, 人为源排放的芳香烃还是北京 SOA 生成潜势的主要贡献源。最后建议重点控制城市人为源的 VOC 排放, 这将对降低北京城市臭氧与二次有机气溶胶污染起到关键作用。

关键词: 植物; 挥发性有机化合物; 排放清单; 臭氧; 二次有机气溶胶

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)12-4779-08

Research Advances on Volatile Organic Compounds Emission Inventory of Plants

XIE Jun-fei, LI Yan-ming

(Beijing Institute of Landscape Architecture, Beijing 100102, China)

Abstract: Reference to relative literatures in recent years, model building and calculation on volatile organic compound (VOC) emission inventory of plants were summarized in different spatial scales, the total annual VOC emission amounts from Vegetation in China are in the range from $12.4 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$ to $28.4 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$. For garden plants in Beijing, the annual VOC emissions are approximately 38 500 tons C in 2000. Furthermore, in order to determine reduction strategies for Beijing urban atmospheric major pollutants, the contribution of garden plant VOC emissions to the ozone and secondary organic aerosol (SOA) formation was presented, compared to garden plant in the same period, the largest contribution to ozone formation comes from aromatic hydrocarbons and olefin which are exhausted from anthropogenic activity, besides, the aromatic hydrocarbons exhausted from anthropogenic activity is also a main contribution source for the potential formation of SOA. In the meantime, it is suggested to focus on emission control of VOCs which are emitted from urban anthropogenic sources.

Key words: plants; volatile organic compound; emission inventory; ozone; secondary organic aerosol

1 研究意义

植物作为陆地生态系统中第一生产者,除了在光合作用过程中吸收 CO_2 并释放氧气,维持整个生态系统的平衡。另一方面,植物也会在生理过程中向大气释放出大量挥发性有机化合物 (volatile organic compound, VOC), 如异戊二烯。在生态系统中,植物释放的 VOC 作为重要的化学信息传递物质,具有很强的生态学功能,其在缓解人类疲劳和紧张情绪、调节植物的生长发育、以及预防病虫害等方面均具有重要影响。

另一方面,虽然相比大气中 CO_2 气体, VOC 在大气中的含量还较低,但 VOC 中的成分具有很强的反应活性,在一定的光照等气象条件下,可通过参与光化学反应,以前体物的形式,对大气中的臭氧 (O_3) 和二次有机气溶胶 (secondary organic aerosol, SOA) 的形成产生重要影响 (图 1)^[1], 这会直接或间

接地影响气候变化与大气质量,且影响大小通常与排放清单总量呈正相关关系^[2,3]。

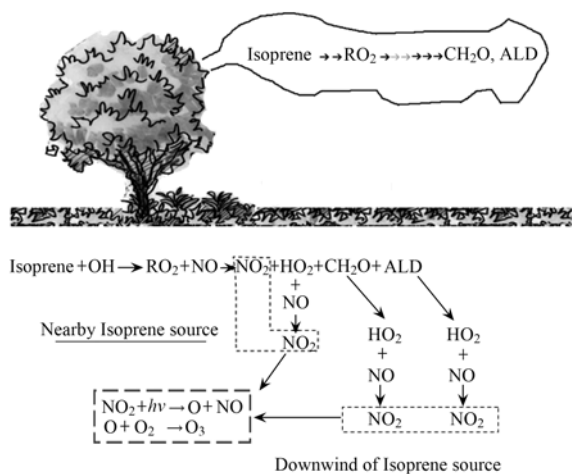
尤其随着我国经济的快速发展,多个大中型城市出现了严重的空气污染现象,其中的 O_3 与 SOA 日益成为大气污染控制的关键污染物。城市园林植物所释放的 VOC,作为重要的前体物,定量了解其排放总量对 O_3 与 SOA 形成的贡献,将有助于确定城市大气污染物 O_3 与 SOA 的总体减排对策及方向。

本文将根据近期国内外相关文献,从植物 VOC 排放清单的角度,对不同空间尺度下植物 VOC 排放模型的建立与排放清单量值的估算进行归纳,并以北京城市为例,重点对园林植物 VOC 排放清单量值对城市大气中 O_3 与 SOA 形成的贡献进行介绍。

收稿日期: 2012-12-01; 修订日期: 2013-04-27

基金项目: 北京市自然科学基金项目 (8102017)

作者简介: 谢军飞 (1976 ~), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为城市生态评价, E-mail: xiejunfei@126.com



ALD 为乙醛 (acetaldehyde)

图1 植物源 VOC 对下风向城市臭氧生成的影响

Fig. 1 Impact of biogenic emissions on the photochemical production of ozone in the downwind of urban region

2 不同空间尺度下植物 VOC 排放模型的建立

为了解植物 VOC 排放总量对于大气化学过程进而对区域乃至全球环境变化的影响,相关研究常应用相关植物 VOC 排放估算模型来获取一定时间内的清单值,植物 VOC 排放估算模型通常可以分为两类:一类估算模型从个体的角度,遵循从植物单位叶生物量的 VOC 排放,到单株,然后推导群体的基本思路,这种估算模型基本不考虑植被冠层的影响,适合应用于中小尺度范围的研究^[4]。

另一类估算模型则是从植被的角度,在遥感与地理信息系统的支持下,将一定区域按一定的分辨率划分为若干网格,然后基于单位网格内园林植被 VOC 排放通量,统计求和得到区域内植物 VOC 排放清单,计算过程中,通常会考虑植被冠层的影响,适合应用于中大尺度范围的研究^[5-7]。

在两类估算模型中,关于植物源 VOC 释放与影响因子之间的定量计算方法,主要与叶生物量密度、光照以及温度条件有关,具体关系式可参考文献[3, 8]。

关于中大尺度估算模型的建立,在 20 世纪 80 年代中期,Pierce 等^[9]在大量观测数据的基础上建立了一个生物排放清单系统 (biogenic emissions inventory system, BEIS),开始用于中尺度范围的植物 VOC 排放清单研究,到了 20 世纪 90 年代中期,Pierce 等^[10]继续发展了一个第二代版本 BEIS2,随着地理信息系统技术的发展,在 2002 年还发布了第三代版本 BEIS3^[11],该版本开始使用 1 km 分辨率

的土地利用数据库用于植物冠层 VOC 排放模拟。

Guenther 等^[3]在改进 G95 算法基础上,首次建立了 BVOCs 排放的全球模式,对全球异戊二烯、单萜烯以及其它 VOC 的排放量进行了估算。美国大气科学研究中心 (NCAR) 还于 1999 年推出了适用于全球范围内植被 VOC 排放清单计算的 GLOBEIS 模型。GLOBEIS 模型的基本算法参考了 Guenther 等提出的方法^[12,13],目前已发展到了 GLOBEIS 3.2 版本 (<http://www.globeis.com>)。

Potter 等^[14]建立了 NASA-CASA 模型 (Carnegie-Ames-Stanford Approach),该模型耦合了碳循环、水文循环与生物地理化学过程,并预测出全球陆地生态系统植物源异戊二烯年排放量 (以 C 计) 为 559 Tg。Scott 等^[15]在地理信息系统的支持下,建立了一个生物源排放清单模型 (biogenic emission inventory geographic information system, BEIGIS),模拟得到 1997 年南加利福尼亚州日排放可达 866 t。

Zimmer 等^[16]为了准确计算不同生态系统下树的异戊二烯排放,建立了一个能描述叶绿体中酶反应的异戊二烯排放模型 BIM,通过验证,BIM 模型能很好地模拟异戊二烯的日排放速率,该模型甚至能反映出中午净光合速率抑制对异戊二烯的影响。

2003 年,Zimmer 等^[17]又发展了过程机制模型 SIM-BIM,该模型由生理学模型 SIM 与生物化学排放模型 BIM 组合形成,通过与 Guenther 等^[18]的 ISO G97 算法比较,SIM-BIM 模型具备了模拟植物异戊二烯排放的能力。随后 Grote 等^[19]还基于 SIM-BIM 发展了一个改进版本 SIM-BIM2。

2006 年,Guenther 等^[20]通过进一步完善机理和地表资料数据库,建立了自然气体、气溶胶排放模型 (MEGAN)。该模型能够很好地替代之前建立的区域模型 BEIS 系列,以及 Guenther 于 1995 年建立的 BVOCs 全球排放模型。

至 2010 年,Poupkou 等^[21]发展了一个基于格网的高时空分辨率的 BEM 模型 (biogenic emission model),该模型模拟的欧洲植物 VOC 排放值与 MEGAN 模型的模拟结果有很好的 consistency。

另外,Levis 等^[22]还在一个公共气候系统模型 (community climate system model, CCSM) 中耦合植物源异戊二烯模式,模拟了全球陆地生态系统植物源异戊二烯年排放量,初步实现植物 VOC 排放模型与其它模型的耦合。

综合国内外研究进展可以了解到,针对植物 VOC 排放模型的建立已取得了很大成果,虽然研究

对象以森林植被为主,但在一定条件下也可供城市园林植物 VOC 排放清单估算借鉴;另外,随着模型的发展,实现植物 VOC 排放模型与各类陆地生态系统模型的耦合,尤其是与动态全球植被模型的双向耦合将是未来的研究趋势^[23]。

3 不同空间尺度下植物 VOC 排放清单量值的估算

3.1 大尺度的植物 VOC 排放清单量值的估算

随着排放估算模型的发展,不同空间尺度下植物 VOC 排放清单量值得到日益关注。在大尺度范围上,Andreani-Aksoyoglu 等^[24]根据主要树种,使用 Tingey 模型计算了瑞士森林 10 a 的年均 VOC 排放量值为 8.7 万 t。Lathièere 等^[25]将生物源 VOC 排放方法耦合到动态植被模型中,预测出 1983~1995 年全球年平均生物源排放量(以 C 计)值为 (752 ± 16) $\text{Tg} \cdot \text{a}^{-1}$ 。Smiatek 等^[26]通过半经验植被 VOC 排放估算模型(seBVOC)估算了德国 20 a(1994~2003 年)植被 VOC 排放量,并得出德国平均植被 VOC 年排放量约为 366 Gg,其敏感性分析表明,敏感度主要来自叶生物量、排放潜力以及温度参数 3 个方面。

Wang 等^[27]估算得出 1999 年 7 月中国植被 VOC 排放总量(以 C 计,下同)为 2.3 Tg。Rainer 等^[28]通过多种模型比较得出,欧洲 2003 年 7 月的异戊二烯排放量为 1 124 Gg(NATAIR)或 1 446 Gg(MEGAN 模型);而单萜烯类为 338 Gg(MEGAN 模型)或 1 112 Gg(OLDBIO 模型)。

张莉^[29]在系统总结国内外异戊二烯排放研究的基础上,采用封闭式采样方法和带有光离子化检测器(photo-ionization detector, PID)的气相色谱,得到了 40 种植物的异戊二烯排放潜力;并结合前人的观测结果和全国森林资源普查,利用 Guenther 方程估算得到全国主要森林优势树种的异戊二烯排放量为 $0.03 \sim 8.6 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$,上限值约占全球年排放总量的 1.5%~4.3%。

闫雁等^[30]应用 1:1 000 000 中国植被图集数据,按照 Guenther 等提出的 G95 改进算法,结合土地使用情况,对中国植被 VOC 的排放情况进行了比较全面和系统的研究。结果表明,2000 年全国植被 VOC 的年总排放量约为 17.08 Tg,其中异戊二烯为 4.85 Tg,单萜烯为 3.29 Tg,其它 VOC 为 8.94 Tg。

谢旻等^[31]利用 Guenther 模型估算得出 2000 年中国植被 VOC 排放总量为 13.23 Tg,略低于中国人为源 VOC 排放量 $15.1 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[32,33]。

张钢锋等^[34]以中国森林优势树种为对象,应用

森林资源统计资料和 Guenther 等^[3]所提出的光温模型,建立了中国森林生态系统的 VOC 排放清单,并得到了中国森林 VOC 年总排放量为 8.56 Tg,其中异戊二烯约占 66.42%,单萜烯约占 15.69%。

池彦琪等^[35]得出 2003 年中国植被 VOC 总排放量为 12.83 Tg,其中异戊二烯为 7.45 Tg(58%)、单萜烯为 2.23 Tg(17%)、其他为 VOC 3.14 Tg(25%);不同植物的 VOC 排放量差异较大,各类型植被排放贡献率为森林(61%)>灌丛(27%)>农作物(7%)>草地(5%);南部和东北地区为中国天然源 VOC 主要排放区域;不同龄级森林对 VOC 排放的贡献有所不同,中龄林贡献最多。

另外,从表 1 可以看出,对于中国地区植被 VOC 年排放总量的估算,不同研究者的估算值存在一定差异,这应该与植被分布资料、气象数据、标准排放因子选取的差异有关,但需要注意的是,相比闫雁等中国学者,Klinger 等^[38]国外研究者的估算值均偏高,具体原因还有待进一步分析。

表 1 以 C 计的中国地区植被 VOC 年排放总量/ $\text{Tg} \cdot \text{a}^{-1}$

Table 1 Estimated vegetation VOC emissions of China according to carbon/ $\text{Tg} \cdot \text{a}^{-1}$

异戊二烯	单萜烯类	其它 VOC	总 VOC	文献
15	4.3	9.1	28.4	[3]
6.7	1.8	3.9	12.4	[36]
12	6	17	35	[37]
4.1	3.5	13	20.6	[38]
4.85	3.29	8.94	17.08	[30]
7.77	1.86	3.60	13.23	[31]

3.2 区域尺度的植物 VOC 排放清单量值的估算

在区域尺度范围上,着重于经济较发达的城市与相邻区域,胡泳涛等^[39]将中尺度气象模式 MM5 应用于植被 VOC 排放清单的估算,结果表明,华南地区夏季典型日的植被源 VOC 排放总量约 1.12 万 t。

Steiner 等^[37]对东亚两种土地利用情景的植物 VOC 排放进行了计算,得出没有干扰情景下东亚异戊二烯的年排放量是 $12 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$,单萜烯类的 C 年排放量是 $6 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$ 。Parra 等^[40]还根据高分辨率 1 km 土地利用图与气象数据,计算得出 2000 年西班牙东北部地区卡塔卢尼亚的 NMVOCs(non-methane volatile organic compounds)排放量为 4.69 万 t。

王焕顺等^[41]利用各类植物的排放因子,估算出大连地区生态植被所排放的年 VOC 总量为 $2.56 \times 10^2 \text{ t}$ 。Tsui 等^[42]估算了香港的 BVOCs 排放,得出香港的 BVOCs 年排放量为 8.6 万 t。Chang 等^[43]在台

湾地区土地利用数据库的支持下,通过生物排放清单模型估算了台湾地区的 BVOCs 年排放量约为 21.4 万 t,其单位面积年排放量超过任意一个欧洲国家两倍。

司徒淑娉等^[7]利用自然排放气体和气溶胶模式 MEGAN(model of emissions of gases and aerosols from nature),基于珠江三角洲 4 种主要的植被类型(PFT),对典型夏季日珠江三角洲地区植被异戊二烯的排放进行了初步研究,估算出珠江三角洲植被异戊二烯日总排放量为 $1.73 \times 10^3 \text{ t} \cdot \text{d}^{-1}$;并通过进一步的敏感性分析表明,植物 VOC 排放清单的敏感性主要来自卫星影像的解译、气象场的模拟、模式参数的选择以及排放因子的确定,在模式参数一定的前提下,排放因子的改变对排放计算带来的敏感度最大,其次为气象场的模拟以及卫星影像对叶生物量的解译。Ferreira 等^[44]也对 MEGAN 模式中的 LAI、EF、温度与太阳辐射进行了敏感性分析。Ashworth 等^[45]进一步研究表明,如果使用日平均的气象数据代替小时值作为输入,其全球植物异戊二烯的排放会降低 3%。

Zheng 等^[46]利用实际观测的气象数据和基于遥感图像解译的土地利用现状和植被资料,运用 GloBEIS 模型,对珠江三角洲 2006 年度天然源 VOCs 排放总量进行了估算,结果表明,该区天然源 VOCs 的年度排放总量达 29.6 万 t,空间特征与土地利用和植被分布密切相关,天然源 VOCs 排放主要集中在城镇化程度较低和林区较密集的区域。

Wang 等^[47]利用 MM5 模型输出的气象数据,以及来源于 TM 影像与实地调查得到的植物功能类型分布,运用 MEGAN 模型,对珠江三角洲的植物源 VOCs 排放总量进行了估算,得出异戊二烯的年排放量为 $95.55 \times 10^6 \text{ kg}$,单萜烯类的年排放量为 $117.35 \times 10^6 \text{ kg}$,倍半萜的年排放量为 $9.77 \times 10^6 \text{ kg}$ 。

朱轶梅^[48]计算得到杭州地区的植物 VOC 年排放量为 $7.9 \times 10^{10} \text{ g}$,其中异戊二烯、单萜和其他 VOC 所占的比重分别为 85%、8%和 7%。

从城市园林的角度,谢扬颺等^[49]根据北京市 2000 年城市园林绿化普查结果以及相关学者的园林树种的测定,对北京市园林绿地植物挥发性有机物的排放情况进行研究,建立了北京市园林绿地源 VOC 排放清单。结果表明,北京市园林绿地植物 VOC 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 VOC 为

0.16 万 t,在排放量的估算过程中,与上述森林植被类似,误差主要来自于植物标准排放速率的获取、叶生物量的计算;气象参数的时空变异也会给排放清单带来很大的不确定性。

4 园林植物 VOC 排放清单量值对城市臭氧形成的贡献

目前,随着城市化进程的加剧,城市大气中 VOC 含量迅速增加,以北京城市为例,2003 年 4 月,北京总 VOC 平均质量浓度达到了 $(163.7 \pm 39.0) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,位于城区的东四采用点的 VOC 平均质量浓度达到了 $(244.5 \pm 7.1) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,远超过郊区的 VOC 平均质量浓度^[50]。在灰霾天气,2005 年北京冬季大气中 TVOCs 的体积分数可达 $(105.0 \pm 59.2) \times 10^{-9}$ ^[51]。

在紫外辐射强度、 NO_x 浓度适宜的条件下,通过相关光化学反应,城市大气中 VOC 就能促进对流层中 O_3 的生成^[7,52,53]。而对流层 O_3 浓度的增加会对人体健康、农业生产、以及生态系统造成诸多不利影响^[54]。

北京城市大气中 VOC 主要来源于天然源(园林植物)与人为源(交通、工业、居民生活等),但需要注意的是,天然源与人为源存在以下区别。

(1)园林植物的 VOCs 主要集中在异戊二烯和单萜烯上,但北京城市大气中挥发性有机物主要由饱和烷烃($\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$)、芳香烃($\text{C}_n\text{H}_{2n-6}$)、烯烃(C_nH_{2n})、卤代烷烃、卤代烯烃和卤代芳香烃组成,其中浓度较高的有毒物质苯系物和卤代烃主要来源于机动车尾气^[55~57],中国其它大城市大气中挥发性有机物成分组成也有相似特征^[58]。

(2)在排放清单总量上,谢扬颺等^[49]根据北京市 2000 年城市园林绿化普查结果以及相关学者的园林树种的测定,计算得到北京市园林绿地植物 VOC 年总排放量(以 C 计)约为 3.85 万 t,而 1999 年北京 VOCs 人为源总排放量为 24.23 万 t,通过计算可以得出,园林绿地植物 VOC 年排放量仅相当于北京人为源 VOCs 总排放量的 14%。

王雪松等^[59]也得出类似结论:在夏季,北京市城近郊区碳氢化合物的源排放绝大部分来自人为源,其中,流动源排放的碳氢化合物所占比例最大(占 42.0%),然后依次为油品储运与溶剂使用(占 37.7%),工业面源(占 13.7%),天然源排放的碳氢化合物所占的比例很小(1.5%)。

(3)关于臭氧生成潜力 OFP(ozone formation

potential, 代表 VOCs 物种在最佳反应条件下对 O_3 生成的最大贡献), 2006 年, 北京植物释放的 VOCs 中的异戊二烯其对应的臭氧生成潜力为 23%^[60]. 臭氧生成潜力可以反映各类 VOC 对臭氧生成的相对贡献.

Huang 等^[61]在 2004 年夏季, 通过分析北京大气中 73 种 VOC 成分的化学反应活性, 发现烯烃与芳香化合物超过 70% 的臭氧生成潜力. 徐敬^[62]也利用 2007 年观测获得的北京城区 VOCs 浓度数据, 通过计算推导出, 对 O_3 生成潜势贡献最高的 VOCs 组分是芳香烃类物质. 其中烯烃主要来源于机动车尾气的排放和汽油挥发^[63~64]; 而芳香烃类化合物则来源于建筑涂料与石油精炼.

总体而言, 关于 VOC 排放清单量值对城市 O_3 形成的贡献, 在同一时期内, 其中以人为源排放的活性芳香烃类化合物和烯烃类对城市大气中 O_3 的增加贡献最大^[65~66], 虽然目前还不能确定每种 VOC 成分对城市大气 O_3 的具体贡献量, 但有研究表明^[67], 在同一时期内, 北京机动车相关的流动源对城市大气中 O_3 的生成贡献达 50.2%, 固定源贡献 41.9%, 植物排放贡献 7.9%, 很显然, 园林植物 VOC 排放清单量值对城市 O_3 形成的贡献较少.

5 园林植物 VOC 排放清单量值对 SOA 形成的贡献

二次有机气溶胶 SOA 是天然源或人为源排放的挥发性有机物或半挥发性有机物经氧化和气粒分配等过程而生成的悬浮于大气中的固体或液体微粒, 是城市大气细粒子的重要组成部分^[68], 且 SOA 平均占 $PM_{2.5}$ 有机组分质量的 20%~50%^[69]; 而在偏远地区大约占 $PM_{2.5}$ 的 30%~50%. 无论在污染地区还是在偏远的背景地区, 二次有机气溶胶均含有致癌性, 如多环芳烃等有机化合物, 并会影响大气能见度, 是大气光化学烟雾、酸沉降的重要贡献者^[70].

通常情况, VOC 中含碳数大于 6 的烷烃、烯烃、芳香烃和羰基化合物等可以形成 SOA^[71], 吕子峰等^[72]基于北京市夏季高臭氧事件期间清华大学校园内 VOC 的监测数据, 利用气溶胶生成系数 (FAC, FAC 等于生成的 SOA 浓度与初始 VOC 浓度的比值, 也是 SOA 生成潜势的一种表达方式) 对北京市夏季 SOA 的生成潜势进行了估算, 检测到的 70 种 VOC 中有 31 种是 SOA 前体物, 其中由人为源排放的芳香烃占北京 SOA 生成潜势的 76%, 天然源排放的烯烃对 SOA 生成潜势的贡献仅占 16%.

综合上述研究, 可以了解到, 由于园林植物与北京城市人为源在成分组成, 排放总量以及化学反应活性存在较大差异, 在同一时期内, 相比城市人为源, 北京园林植物 VOC 排放量值对 O_3 与 SOA 形成的贡献较低, 因此在城市 VOC 控制政策的制定上应有所侧重, 相对而言, 重点控制人为源的 VOC 排放更为有效. 尤其对排放活性芳香烃类化合物和烯烃类化合物的人为源活动, 如建筑涂料、石油精炼、机动车尾气等控制改善, 将对降低北京城市大气污染程度起到关键作用.

此外, 考虑到园林植物所具有的多重生态功能, 在不减少绿化覆盖率的前提下, 通过城市园林植物种类的科学选择与合理配置, 对减缓城市大气污染也具有一定的作用.

6 结论与展望

(1) 为了解植物 VOC 排放总量对于区域乃至全球环境变化的影响, 相关研究常应用植物 VOC 排放估算模型来获取清单值, 尤其从植被的角度建立的中大尺度模型, 得到了迅速的发展与广泛的应用, 但模型的核心 G93 公式等考虑的影响因素还不是很全面, 影响因素与排放速率之间的定量关系还有待进一步完善. 另外, 虽然目前已初步实现植物 VOC 排放模型与其它生态模型的耦合, 但还缺乏动态全球植被模型的双向耦合.

(2) 目前关于中国植被 VOC 年排放总量的估算值在 $12.4 \sim 28.4 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$ 之间, 2000 年北京市园林绿地植物 VOC 年总排放量约为 3.85 万 t. 不同研究者的估算值存在一定差异, 这应该与植被分布资料、气象数据、标准排放因子选取的差异有关. 另外, 排放清单的计算本身也存在很大的不确定性, 计算植物源 VOC 排放清单的过程实质上是基本排放因子与影响因子的耦合过程, 其中, 影响因子主要是气象要素, 但在使用某一个气象站的气象要素值来代表整个研究区域的气象状况, 会产生气象要素时空变异所带来的不确定性.

(3) 总体而言, 关于 VOC 排放清单量值对城市 O_3 形成的贡献, 在同一时期内, 其中以人为源排放的活性芳香烃类化合物和烯烃类对城市大气中 O_3 的增加贡献最大. 虽然目前还不能确定每种 VOC 成分对大气 O_3 的具体贡献量, 但有研究表明, 北京机动车相关的流动源中的 VOC 对大气中 O_3 的生成贡献达 50.2%, 固定源贡献 41.9%, 植物排放贡献 7.9%, 园林植物 VOC 排放清单量值对城市 O_3 形成

的贡献较少。

(4)研究表明,北京城市人为源排放的芳香烃占北京 SOA 生成潜势的 76%,天然源排放的烯烃对 SOA 生成潜势的贡献仅 16%,需要补充的是,由于对 SOA 的形成机理还没有完全了解,在测量和模拟 VOC 形成有机颗粒物的动力学和热力学过程中,应用了大量的经验估计方法,导致源排放贡献比例存在一定误差。

(5)相比城市人为源 VOC,北京园林植物 VOC 排放量值对臭氧与二次有机气溶胶形成的贡献较低,因此在城市 VOC 控制政策的制定上应有所侧重,重点控制人为源如建筑涂料、石油精炼、机动车尾气等 VOC 排放,将对降低北京大气 O_3 与 SOA 污染起到关键作用。此外,科学选择与合理配置园林绿化植物也具有一定的减缓大气污染的作用。

参考文献:

- [1] Geng F, Tie X, Guenther A, *et al.* Effect of isoprene emissions from major forests on ozone formation in the city of Shanghai, China[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, **11**(20): 10449-10459.
- [2] Vance E. The man who smells forests[J]. *Nature*, 2009, **459**(7246): 498-499.
- [3] 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.
- [4] Wiedinmyer C, Strange W, Estes M, *et al.* Biogenic hydrocarbon emission estimates for North Central Texas[J]. *Atmospheric Environment*, 2000, **34**(20): 3419-3435.
- [5] Simpson D, Winiwarer W, Börjesson G, *et al.* Inventorying emissions from nature in Europe[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1999, **104**(D7): 8113-8152.
- [6] Smiatek G. Parallelization of a grid-oriented model on the example of a biogenic volatile organic compounds emission model[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2008, **23**(12): 1468-1473.
- [7] 司徒淑娉,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.
- [8] 石明洁,延晓冬,贾根锁. 生物挥发性有机物研究进展[J]. *地球科学进展*, 2008, **23**(8): 866-873.
- [9] Pierce T E, Waldru P S. PC-BEIS: a personal-computer version of the biogenic emissions inventory system[J]. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 1991, **41**(7): 937-941.
- [10] Pierce T, Geron C, Bender L, *et al.* Influence of increased isoprene emissions on regional ozone modeling[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, **103**(D19): 25611-25629.
- [11] Pierce T, Geron C, Pouliot G, *et al.* Integration of the Biogenic Emissions Inventory System (BEIS3) into the Community Multiscale Air Quality Modelling System[A]. In: *Proceedings of the 25th Agricultural and Forest Meteorology Conference* [C]. Norfolk: American Meteorological Society, 2002.
- [12] 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**(D23): 30625-30639.
- [13] 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.
- [14] Potter C S, Alexander S E, Coughlana J C, *et al.* Modeling biogenic emissions of isoprene: exploration of model drivers, climate control algorithms, and use of global satellite observations [J]. *Atmospheric Environment*, 2001, **35**(35): 6151-6165.
- [15] Scott K I, Benjamin M T. Development of a biogenic volatile organic compounds emission inventory for the SCOS97-NARSTO domain[J]. *Atmospheric Environment Supplement*, 2003, **37**(S2): 39-49.
- [16] Zimmer W, Brüggemann N, Emeis S, *et al.* Process-based modelling of isoprene emission by oak leaves[J]. *Plant, Cell and Environment*, 2000, **23**(6): 585-595.
- [17] Zimmer W, Steinbrecher R, Körner C, *et al.* The process-based SIM-BIM model: towards more realistic prediction of isoprene emissions from adult *Quercus petraea* forest trees [J]. *Atmospheric Environment*, 2003, **37**(12): 1665-1671.
- [18] Guenther A. Seasonal and spatial variations in natural volatile organic compound emissions[J]. *Ecological Applications*, 1997, **7**(1): 34-45.
- [19] Grote R, Mayrhofer S, Fischbach R J. Process-based modelling of isoprenoid emissions from evergreen leaves of *Quercus ilex* (L.) [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(S1): 152-165.
- [20] Guenther A, Karl T, Harley P, *et al.* Estimates of global terrestrial isoprene emissions using MEGAN (model of emissions of gases and aerosols from nature) [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2006, **6**(11): 3181-3210.
- [21] Poupkou A, Giannaros T, Markakis K, *et al.* A model for european biogenic volatile organic compound emissions: software development and first validation[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2010, **25**(12): 1845-1856.
- [22] Levis S, Wiedinmyer C, Bonan G B, *et al.* Simulating biogenic volatile organic compound emissions in the community climate system model[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2003, **108**(D21): 4659, doi:10.1029/2002JD003203.
- [23] Muller J F, Stavrakou T, Wallen S, *et al.* Global isoprene emissions estimated using MEGAN, ECMWF analyses and a detailed canopy environment model[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2008, **8**(5): 1329-1341.
- [24] Andreani-Aksoyoglu S, Keller J. Estimates of monoterpene and isoprene emissions from the forests in Switzerland[J]. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 1995, **20**(1): 71-87.

- [25] Lathière J, Hauglustaine D A, Friend A D, *et al.* Impact of climate variability and land use changes on global biogenic volatile organic compound emissions[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2006, **6**(8): 2129-2146.
- [26] Smiatek G, Steinbrecher R. Temporal and spatial variation of forest VOC emissions in Germany in the decade 1994-2003[J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(S1): 166-177.
- [27] Wang Q G, Han Z W, Wang T J, *et al.* An estimate of biogenic emissions of volatile organic compounds during summertime in China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2007, **14**(S1): 69-75.
- [28] Steinbrecher R, Smiatek G, Köble R, *et al.* Intra-and inter-annual variability of VOC emissions from natural and semi-natural vegetation in Europe and neighbouring countries [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(7): 1380-1391.
- [29] 张莉. 中国森林生态系统异戊二烯排放研究[D]. 南京: 南京气象学院, 2002.
- [30] 闫雁, 王志辉, 白郁华, 等. 中国植被 VOC 排放清单的建立[J]. *中国环境科学*, 2005, **25**(1): 110-114.
- [31] 谢旻, 王体健, 江飞, 等. NO_x 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.
- [32] Streets D G, Bond T C, Carmichael G R, *et al.* An inventory of gaseous and primary aerosol emissions in Asia in the year 2000 [J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2003, **108**(D21): 8809.
- [33] Tie X X, Li G H, 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**(1-3): 238-251.
- [34] 张钢锋, 谢绍东. 基于树种蓄积量的中国森林 VOC 排放估算[J]. *环境科学*, 2009, **30**(10): 2816-2822.
- [35] 池彦琪. 基于蓄积量和产量的中国天然源 VOC 排放清单及时空分布[D]. 北京: 北京大学, 2011.
- [36] 王勤耕. 中国 VOC 和 NO_x 陆地生态源及其对对流层臭氧影响的数值研究[D]. 北京: 中国科学院大气物理研究所, 2001.
- [37] Steiner A, Luo C, Huang Y, *et al.* Past and present-day biogenic volatile organic compound emissions in East Asia[J]. *Atmospheric Environment*, 2002, **36**(31): 4895-4905.
- [38] 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-Atmospheres*, 2002, **107**(D21): 1-21.
- [39] 胡泳涛, 张远航, 谢绍东, 等. 区域高时空分辨率 VOC 天然源排放清单的建立[J]. *环境科学*, 2001, **22**(6): 1-6.
- [40] Parra R, Gassó S, Baldasano J M. Estimating the biogenic emissions of non-methane volatile organic compounds from the North Western Mediterranean vegetation of Catalonia, Spain[J]. *Science of the Total Environment*, 2004, **329**(1-3): 241-259.
- [41] 王焕顺, 林长清, 万显烈. 大连地区生态植被所排放 VOC 的估算研究[J]. *环境保护科学*, 2008, **34**(3): 79-81.
- [42] Tsui J K Y, Guenther A, Yip W K, *et al.* A biogenic volatile organic compound emission inventory for Hong Kong [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(40): 6442-6448.
- [43] Chang K H, Chen T F, Huang H C. Estimation of biogenic volatile organic compounds emissions in subtropical island-Taiwan [J]. *Science of the Total Environment*, 2005, **346**(1-4): 184-199.
- [44] Ferreira J, Reeves C E, Murphy J G, *et al.* Isoprene emissions modelling for West Africa: MEGAN model evaluation and sensitivity analysis [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, **10**(17): 8453-8467.
- [45] Ashworth K, Wild O, Hewitt C N. Sensitivity of isoprene emissions estimated using MEGAN to the time resolution of input climate data[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, **10**(3): 1193-1201.
- [46] Zheng J Y, Zheng Z Y, Yua Y F, *et al.* Temporal, spatial characteristics and uncertainty of biogenic VOC emissions in the Pearl River Delta region, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2010, **44**(16): 1960-1969.
- [47] Wang X M, Situ S, Guenther A, *et al.* Spatiotemporal variability of biogenic terpenoid emissions in Pearl River Delta, China, with high-resolution land-cover and meteorological data[J]. *Tellus B*, 2011, **63**(2): 241-254.
- [48] 朱铁梅. 亚热带城乡区域植物源 VOC 排放的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- [49] 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.
- [50] 张靖, 邵敏, 苏芳. 北京市大气中挥发性有机物的组成特征[J]. *环境科学研究*, 2004, **17**(5): 1-5.
- [51] Mao T, Wang Y, Jiang J, *et al.* The vertical distributions of VOCs in the atmosphere of Beijing in autumn[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, **390**(1): 97-108.
- [52] 戴树桂. 环境化学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001. 19-50.
- [53] Calfapietra C, Fares S, Loreto F. Volatile organic compounds from Italian vegetation and their interaction with ozone [J]. *Environmental Pollution*, 2009, **157**(5): 1478-1486.
- [54] Lippmann M. Health effects of tropospheric ozone [J]. *Environmental Science and Technology*, 1991, **25**(12): 1954-1962.
- [55] 王思源, 邵敏, 王玮, 等. 北京市大气中 VOCs 垂直分布的航测研究[J]. *中国环境科学*, 2009, **29**(7): 679-684.
- [56] Wang Y, Ren X Y, Ji D S, *et al.* Characterization of volatile organic compounds in the urban area of Beijing from 2000 to 2007 [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2012, **24**(1): 95-101.
- [57] Okada Y, Nakagoshi A, Tsurukawa M, *et al.* Environmental risk assessment and concentration trend of atmospheric volatile organic compounds in Hyogo Prefecture, Japan [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2012, **19**(1): 201-213.

- [58] Liu Y, Shao M, Lu S H, *et al.* Volatile Organic Compound (VOC) measurements in the Pearl River Delta (PRD) region, China[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2008, **8**(6): 1531-1545.
- [59] 王雪松, 李金龙. 人为源排放 VOC 对北京地区臭氧生成的贡献[J]. *中国环境科学*, 2002, **22**(6): 501-505.
- [60] Xie X, Shao M, Liu Y, *et al.* Estimate of initial isoprene contribution to ozone formation potential in Beijing, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(24): 6000-6010.
- [61] Huang S, Shao M, Lu S H, *et al.* Reactivity of ambient volatile organic compounds (VOCs) in summer of 2004 in Beijing[J]. *Chinese Chemical Letters*, 2008, **19**(5): 573-576.
- [62] 徐敬. 北京地区大气有机物对臭氧生成的影响研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2012.
- [63] 邵敏, 付琳琳, 刘莹, 等. 北京市大气挥发性有机物的关键活性组分及其来源[J]. *中国科学(D 辑)*, 2005, **35**(增刊 I): 123-130.
- [64] Ortega J, Helmig D, Guenther A, *et al.* Flux estimates and OH reaction potential of reactive biogenic volatile organic compounds (BVOCs) from a mixed northern hardwood forest [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(26): 5479-5495.
- [65] 安俊琳. 北京大气臭氧浓度变化特征及其形成机制研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2007.
- [66] 罗玮, 王伯光, 刘舒乐, 等. 广州大气挥发性有机物的臭氧生成潜势及来源研究[J]. *环境科学与技术*, 2011, **34**(5): 80-86.
- [67] 张俊刚. 北京及其周边地区大气中非甲烷碳氢化合物(NMHC)的来源和反应活性研究[D]. 北京: 中国科学院大气物理研究所, 2009.
- [68] 谢绍东, 田晓雪. 挥发性和半挥发性有机物向二次有机气溶胶转化的机制[J]. *化学进展*, 2010, **22**(4): 727-732.
- [69] Turpin B J, Huntzicker J J. Identification of secondary organic aerosol episodes and quantitation of primary and secondary organic aerosol concentrations during SCAQS[J]. *Atmospheric Environment*, 1995, **29**(23): 3527-3544.
- [70] 谢绍东, 于淼, 姜明. 有机气溶胶的来源与形成研究现状[J]. *环境科学学报*, 2006, **26**(12): 1933-1939.
- [71] Jacobson M C, Hansson H C, Noone K J, *et al.* Organic atmospheric aerosols: review and state of the science [J]. *Reviews of Geophysics*, 2000, **38**(2): 267-294.
- [72] 吕子峰, 郝吉明, 段菁春, 等. 北京市夏季二次有机气溶胶生成潜势的估算[J]. *环境科学*, 2009, **30**(4): 969-975.

CONTENTS

Preface	HAO Zheng-ping (4503)
Variation Characteristics of Ambient Volatile Organic Compounds (VOCs) in Nanjing Northern Suburb, China	AN Jun-lin, ZHU Bin, LI Yong-yu (4504)
Pollution Characterization of Volatile Organic Compounds in Ambient Air of Tianjin Downtown	ZHAI Zeng-xiu, ZOU Ke-hua, LI Wei-fang, <i>et al.</i> (4513)
Source Apportionment of VOCs in the Northern Suburb of Nanjing in Summer	YANG Hui, ZHU Bin, GAO Jin-hui, <i>et al.</i> (4519)
Estimation of the Formation Potential of Ozone and Secondary Organic Aerosol in Shanghai in Spring	CUI Hu-xiong (4529)
Inventory and Environmental Impact of VOCs Emission from the Typical Anthropogenic Sources in Sichuan Province	HAN Li, WANG Xing-rui, HE Min, <i>et al.</i> (4535)
Study on Volatile Organic Compounds Emission of Straw Combustion and Management Countermeasure in Wuhan City	HUANG Bi-jie (4543)
Spatial Distribution Characteristics of NMHCs During Winter Haze in Beijing	DUAN Jing-chun, PENG Yan-chun, TAN Ji-hua, <i>et al.</i> (4552)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Atmospheric VOCs in the Downtown Area of Guangzhou, China	LI Lei, LI Hong, WANG Xue-zhong, <i>et al.</i> (4558)
Health Risk Assessment of VOCs from a Furniture Mall in Tianjin	ZHANG Yin, WANG Xiu-yan, GAO Shuang (4565)
Characterization of Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission from Recycled Waste Polymethyl Methacrylate (PMMA) Industry	WANG Zhe-ming, XU Zhi-rong, YE Hong-yu, <i>et al.</i> (4571)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Atmospheric Volatile Organic Compounds (VOCs) in Pesticide Factory	TAN Bing, WANG Tie-yu, PANG Bo, <i>et al.</i> (4577)
Characteristics of Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission from Electronic Products Processing and Manufacturing Factory	CUI Ru, MA Yong-liang (4585)
Emission Characteristics and Safety Evaluation of Volatile Organic Compounds in Manufacturing Processes of Automotive Coatings	ZENG Pei-yuan, LI Jian-jun, LIAO Dong-qi, <i>et al.</i> (4592)
Index Assessment of Airborne VOCs Pollution in Automobile for Transporting Passengers	CHEN Xiao-kai, CHENG He-ming, LUO Hui-long (4599)
Study on the Chemical Compositions of VOCs Emitted by Cooking Oils Based on GC-MS	HE Wan-qing, NIE Lei, TIAN Gang, <i>et al.</i> (4605)
Health-based Risk Assessment in the Excavating Process of VOCs Contaminated Site	FANG Zeng-qiang, GAN Ping, YANG Le, <i>et al.</i> (4612)
Characteristics of Gaseous Pollutants Distribution During Remedial Excavation at a Volatile Organic Compound Contaminated Site	GAN Ping, YANG Yue-wei, FANG Zheng-qiang, <i>et al.</i> (4619)
Factors Affecting Benzene Diffusion from Contaminated Soils to the Atmosphere and Flux Characteristics	DU Ping, WANG Shi-jie, ZHAO Huan-huan, <i>et al.</i> (4627)
Effects of Soil Compositions on Sorption and Desorption Behavior of Tetrachloroethylene in Soil	HU Lin, QIU Zhao-fu, HE Long, <i>et al.</i> (4635)
Occurrence and Distribution of Volatile Organic Compounds in Conventional and Advanced Drinking Water Treatment Processes	CHEN Xi-chao, LUO Qian, CHEN Hu, <i>et al.</i> (4642)
Characteristics and Evaluation of Volatile Organic Compounds Discharge in Typical Enterprise Wastewater in Hangzhou City	CHEN Feng, XU Jian-fen, TANG Fang-liang, <i>et al.</i> (4649)
Pollution Characteristics of Volatile Organic Compounds from Wastewater Treatment System of Vitamin C Production	GUO Bin, LÜ Guo-li, REN Ai-ling, <i>et al.</i> (4654)
Performance Evaluation of Three Novel Biotrickling Packings	MEI Yu, CHENG Zhuo-wei, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (4661)
Performance of Trace Ozone-augmented Biological Trickling Filter in Toluene Degradation	ZHANG Chao, ZHAO Meng-sheng, ZHANG Li-li, <i>et al.</i> (4669)
Removal Characteristics of DCM by Biotrickling Filter and Biofilter	PAN Wei-long, YU Jian-ming, CHENG Zhuo-wei, <i>et al.</i> (4675)
Removal of Toluene from Waste Gas by Honeycomb Adsorption Rotor with Modified 13X Molecular Sieves	WANG Jia-de, ZHENG Liang-wei, ZHU Run-ye, <i>et al.</i> (4684)
Treatment of Organic Waste Gas by Adsorption Rotor	ZHU Run-ye, ZHENG Liang-wei, MAO Yu-bo, <i>et al.</i> (4689)
Study on Adsorption Properties of Organic Vapor on Activated Carbons	CAI Dao-fei, HUANG Wei-qiu, WANG Dan-li, <i>et al.</i> (4694)
Degradation of Styrene by Coupling Ultraviolet and Biofiltration	SHA Hao-lei, YANG Guo-jing, XIA Jing-fen (4701)
Adsorption Characteristics of Acetone and Butanone onto Honeycomb ZSM-5 Molecular Sieve	DU Juan, LUAN Zhi-qiang, XIE Qiang, <i>et al.</i> (4706)
Analysis of the Distribution of VOCs Concentration Field with Oil Static Breathing Loss in Internal Floating Roof Tank	WU Hong-zhang, HUANG Wei-qiu, YANG Guang, <i>et al.</i> (4712)
Study on the Quantitative Estimation Method for VOCs Emission from Petrochemical Storage Tanks Based on Tanks 4.0.9d Model	LI Jing, WANG Min-yan, ZHANG Jian, <i>et al.</i> (4718)
Oxidation Behavior and Kinetics of Representative VOCs Emitted from Petrochemical Industry over CuCeO _x Composite Oxides	CHEN Chang-wei, YU Yan-ke, CHEN Jin-sheng, <i>et al.</i> (4724)
Direct Photolysis of Methylamine Gas by KrBr * Excilamp	ZHAO Jie, LIU Yu-hai, WEI Lian-mei, <i>et al.</i> (4734)
Study on the Relationship Between Odor Intensity and Components Concentrations of Odor Mixture	YAN Lu-chun, LIU Jie-min, FU Hui-ting, <i>et al.</i> (4743)
Study on Key Technical Problems in the Development of Volatile Organic Pollutants Emission Standards	JIANG Mei, ZHANG Guo-ning, REN Chun, <i>et al.</i> (4747)
Establishment and Improvement of Emission Control Standard System of Volatile Organic Compounds in Industry	JIANG Mei, ZHANG Guo-ning, ZOU Lan, <i>et al.</i> (4751)
Characteristics and Countermeasures of Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission in China	WANG Tie-yu, LI Qi-feng, LÜ Yong-long (4756)
Status and Needs Research for On-Line Monitoring of VOCs Emissions from Stationary Sources	WANG Qiang, ZHOU Gang, ZHONG Qi, <i>et al.</i> (4764)
Evaluation of Treatment Technology of Odor Pollution Source in Petrochemical Industry	MU Gui-qin, SUI Li-hua, GUO Ya-feng, <i>et al.</i> (4771)
Research Advances on Volatile Organic Compounds Emission Inventory of Plants	XIE Jun-fei, LI Yan-ming (4779)
Study of VOCs Emission Prediction and Control Based on Dynamic CGE	LIU Chang-xin, WANG Yu-fei, HAO Zheng-ping, <i>et al.</i> (4787)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2013年12月15日 34卷 第12期(卷终)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 12 Dec. 15, 2013

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行