

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第2期

Vol.38 No.2

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

北京大气颗粒物和重金属铅干沉降通量及季节变化	姚利, 刘进, 潘月鹏, 田世丽, 王振波, 韦霞, 张国忠, 周保华, 王跃思 (423)
海西城市群 PM _{2.5} 中重金属元素的污染特征及健康风险评价	陈衍婷, 杜文娇, 陈进生, 徐玲玲 (429)
峨边地区大气 PM _{2.5} 中汞形态污染及其与碳组分的关系	程娜, 钱冠磊, 段炼, 赵梦飞, 修光利 (438)
泰山夏季 PM _{2.5} 中二元羧酸类 SOA 的分子组成及来源	孟静静, 侯战方, 刘晓迪, 邢继钊 (445)
南京北郊大气 BTEX 变化特征和健康风险评估	张玉欣, 安俊琳, 王健宇, 王俊秀, 师远哲, 刘静达, 梁静舒 (453)
长株潭城市群人为源 VOCs 排放清单及其对环境的影响	尤翔宇, 罗达通, 刘湛, 苏艳蓉 (461)
南京城市交通甲烷排放特征	张雪, 胡凝, 刘寿东, 王淑敏, 高韵秋, 赵佳玉, 张圳, 胡勇博, 李旭辉, 张国君 (469)
2003~2014 年东北三省气溶胶光学厚度变化分析	张宸赫, 赵天良, 王富, 徐祥德, 苏航, 程兴宏, 谭成好 (476)
基于增强回归树的城市 PM _{2.5} 日均值变化分析: 以常州为例	葛跃, 王明新, 孙向武, 齐今笛 (485)
重庆市燃煤电厂汞排放特征及排放量	张成, 张雅惠, 王永敏, 王定勇, 徐凤, 杨熹, 何秀清 (495)
几种可能来源对广东某地空气中二噁英的影响	付建平, 韩静磊, 于晓巍, 杨艳艳, 尹文华, 冯桂贤, 张素坤, 黄锦琼, 任明忠 (502)
养鸡场空气中抗性基因和条件致病菌污染特征	高敏, 仇天雷, 秦玉成, 王旭明 (510)
百年来滇池沉积物中不同形态氮分布及埋藏特征	吴亚林, 李帅东, 江俊武, 沈胤胤, 黄昌春, 黄涛, 杨浩, 余艳红, 罗玉 (517)
岩溶地下河补给的地表溪流溶解无机碳及其稳定同位素组成的时空变化	李丽, 蒲俊兵, 李建鸿, 张陶 (527)
三峡水库大宁河支流浮游植物演变过程及其驱动因素	张佳磊, 郑丙辉, 刘德富, 王丽婧, 谭纤茹 (535)
分层型水库夏季水质对极端厄尔尼诺事件的响应	邱晓鹏, 黄廷林, 曾明正, 史建超, 曹占辉 (547)
淹水-落干与季节性温度升高耦合过程对消落带沉积物氮矿化影响	林俊杰, 刘丹, 张帅, 于志国, 何立平, 余顺慧 (555)
湖泊水体中铁(III)-草酸络合物驱动有机磷光解释放磷酸根	蒋永参, 彭云霄, 刘广龙, 周易勇, 朱端卫 (563)
高效磷吸附剂 Mg/Al-LDO 的制备及除磷机制	王卫东, 郝瑞霞, 张晓娴, 万京京, 钟丽燕 (572)
改性沸石湿地脱氮除磷效能及机制	吴鹏, 陆爽君, 徐乐中, 梁奇奇, 沈耀良 (580)
几种水陆交错带植物对底质氮磷释放的抑制作用	姚程, 胡小贞, 卢少勇, 耿荣妹 (589)
模拟三峡库区消落带优势植物根系低分子量有机酸对土壤中铅的解吸动力学	何沅洁, 刘江, 江韬, 黄京晶, 成晴, 陈宏 (600)
TiO ₂ /膨润土复合材料对 Hg ²⁺ 的吸附性能研究	唐兴萍, 周雄, 张金洋, 张成, 王定勇 (608)
氨氮及 H ₂ O ₂ 对溴酸盐和消毒副产物控制的影响	王永京, 杜旭, 金萌, 冯思捷, 杨凯, 张明露, 于建伟 (616)
配水管网细菌活性影响因素	王晓丹, 赵新华 (622)
施氏矿物的化学合成及其对含 Cr(VI) 地下水吸附修复	朱立超, 刘元元, 李伟民, 牟海燕, 王婉玉, 石德智, 王涛 (629)
臭氧-混凝耦合工艺污水深度处理特性及其机制	侯瑞, 金鑫, 金鹏康, 王晓昌 (640)
单级和多级 A/O 工艺中氮的去除效果及 N ₂ O 的产生特性	郭昌梓, 张凤燕, 刘富宇, 朱超, 裴立影 (647)
有机碳源作用下厌氧氨氧化系统的脱氮效能	管勇杰, 于德爽, 李津, 齐泮晴, 魏思佳 (654)
完全混合式曝气系统运行特性及微生物群落结构解析	王硕, 徐巧, 张光生, 李激 (665)
颗粒+絮体污泥 CANON 工艺的启动与 SRT 影响研究	孙延芳, 韩晓宇, 张树军, 李星, 曹相生 (672)
游离氨调控对污泥高含固厌氧消化反应器性能的影响	戴晓虎, 何进, 严寒, 李宇, 丁月玲, 董滨, 戴翎翎 (679)
利用卷枝毛霉成球特性高效收获微藻	顾琼, 金文标, 陈远清, 郭仕达, 万超凡 (688)
零价铁对污泥高温厌氧消化过程中四环素抗性基因及第一类整合子的消减影响	魏欣, 薛顺利, 杨帆, 李响, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (697)
沈抚新城不同土地利用类型多环芳烃含量、来源及人体健康风险评价	王静, 刘明丽, 张士超, 鲁垠涛, 姚宏 (703)
河南某市驾校地表灰尘多环芳烃组成、来源与健康风险	陈轶楠, 马建华, 段海静, 魏林恒 (711)
外源微生物对植物根系修复十溴联苯醚污染底泥的强化作用	杨雷峰, 尹华, 彭辉, 李跃鹏 (721)
微生物修复油污土壤过程中氮素的变化及菌群生态效应	叶茜琼, 吴蔓莉, 陈凯丽, 李炜, 袁婧 (728)
沼泽红假单胞菌 PSB06 对辣椒根际微生物群落结构的影响	罗路云, 金德才, 左晖, 张卓, 谭新球, 张德咏, 卢向阳, 刘勇 (735)
再生水补水对河道底泥细菌群落组成与功能的影响	邱琰茗, 王广煊, 黄兴如, 郭逍宇 (743)
矿区不同植被复垦模式对土壤细菌群落结构的影响	贺龙, 李艳琴, 李彬春, 李君剑 (752)
稻田土壤固碳功能微生物群落结构和数量特征	刘琼, 魏晓梦, 吴小红, 袁红朝, 王久荣, 李裕元, 葛体达, 吴金水 (760)
不同温度制备的生物炭对土壤有机碳及其组分的影响: 对土壤腐殖物质组成及性质的影响	赵世翔, 于小玲, 李忠徽, 杨艳, 张霞, 王旭东, 张阿凤 (769)
复合菌剂秸秆堆肥对土壤碳氮含量和酶活性的影响	聂文翰, 戚志萍, 冯海玮, 孙玉静, 支月娥, 张进忠, 张丹 (783)
秸秆/生物炭施用对关中地区小麦-玉米轮作系统净增温潜势影响的对比分析	成功, 陈静, 刘晶晶, 张阿凤, 王旭东, 冯浩, 赵英 (792)
1 株氨基高效降解菌的分离鉴定及降解特性	叶杰旭, 林彤晖, 骆煜昊, 陈东之, 陈建孟 (802)
1 株异养反硝化硫细菌的分离鉴定及代谢特性	谭文勃, 马晓丹, 黄聪, 陈川, 王爱杰 (809)
连续施用污泥堆肥土壤剖面中重金属积累迁移特征及对小麦吸收重金属的影响	孙娜, 商和平, 茹淑华, 苏德纯 (815)
施氮对小麦(Ⅵ)吸收、转运和分配的影响	陈玉鹏, 彭琴, 梁东丽, 宋卫卫, 雷凌明, 喻大松 (825)
长期暴露下纳米二氧化钛对典型淡水藻体砷累积与生物转化的影响	李金丽, 王振红, 严雅萌, 黄兵, 罗专溪 (832)
不同热解温度制备的玉米芯生物炭对对硝基苯酚的吸附作用	马锋锋, 赵保卫 (837)
《环境科学》征稿简则(526) 《环境科学》征订启事(720) 信息(678, 696, 844)	

长株潭城市群人为源 VOCs 排放清单及其对环境的影响

尤翔宇, 罗达通, 刘湛, 苏艳蓉*

(湖南省环境保护科学研究院, 长沙 410004)

摘要: 基于长株潭城市群环境统计数据 and 排放系数, 建立了 2014 年长株潭城市群人为源 VOCs 排放清单, 并根据空间特征数据进行了 3 km × 3 km 的空间网格分配, 同时还估算了各类人为源排放 VOCs 的臭氧生成潜势与二次有机气溶胶生成潜势。结果表明, 长株潭地区人为源 VOCs 排放总量为 113.49 kt, 其中工艺过程源、溶剂使用源和移动源为最主要的排放源, 排放量分别为 35.88、28.72、22.13 kt, 工艺过程源中 75.34% 的 VOCs 排放量来自建材生产, 溶剂使用源中建筑涂料和汽车喷涂为主要排放源; 各区县中醴陵市的 VOCs 排放量最高为 16.58 kt; 长株潭地区总臭氧生成潜势为 375.33 kt, 溶剂使用源贡献最大为 27.28%, 生物质燃烧源的臭氧生成能力最强; 二次有机气溶胶生成潜势中, 溶剂使用源贡献比例最大为 35.35%, 其二次有机气溶胶生成能力也强于其它源类; 空间分布特征显示城区的网格排放量较大。

关键词: 长株潭; 挥发性有机物; 排放清单; 臭氧生成潜势; 二次有机气溶胶生成潜势

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)02-0461-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201607185

Inventory and Environmental Impact of VOCs Emission from Anthropogenic Source in Chang-Zhu-Tan Region

YOU Xiang-yu, LUO Da-tong, LIU Zhan, SU Yan-rong*

(Hunan Research Academy of Environmental Protection, Changsha 410004, China)

Abstract: Based on environmental statistical data and emission factor, an anthropogenic volatile organic compounds (VOCs) emission inventory was established for the Chang-Zhu-Tan region, and a grid with spatial resolution of 3 km × 3 km was built according to the spatial feature data. Ozone formation potential (OFP) and secondary organic aerosol (SOA) formation potential of anthropogenic sources were also estimated. The results showed that the total anthropogenic VOCs emission was about 113.49 kt in Chang-Zhu-Tan region and the main sources were industrial processes, solvent utilization and vehicles with the VOCs emission of 35.88 kt, 28.72 kt and 22.13 kt, respectively. Paving pitch and architecture wall painting accounted for the majority of the solvent utilization and the building materials industry accounted for 75.34% of VOCs emission from the industrial processes. Liling was the largest contributor compared to the other cities in Chang-Zhu-Tan region, where the VOCs emission from these anthropogenic sources in 2014 was 16.58 kt. The total OFP of these sources was 375.33 kt, in which solvent utilization contributed 27.28% and the O₃ generative capacity of biomass burning was the largest. Solvent utilization contributed 35.35% to the total SOA formation potentials and its SOA generative capacity was also the largest. The spatial distribution characteristics revealed that the VOCs emission mostly originated from urban area.

Key words: Chang-Zhu-Tan region; volatile organic compounds (VOCs); emission inventory; ozone formation potential (OFP); secondary organic aerosol (SOA) formation potential

随着我国工业化和城市化的快速推进,加之大气活性物质的大量排放,使得我国主要城市群^[1~3]在夏秋季节都面临严峻的臭氧(O₃)污染^[4,5],2015年5~9月全国重点城市 and 城市群以O₃为首要污染物的天数远超过细颗粒物(PM_{2.5})^[6]。有研究表明,VOCs主导了城市区域O₃污染的主要化学反应过程^[7],是对流层O₃生成的重要前体物;也是二次有机气溶胶(SOA)的重要前体物之一^[8];同时,一些大气VOCs组分还会对人体健康造成危害,我国部分城市的毒性VOCs物种浓度已远超出美国环保署健康环境浓度标准^[9]。城市区域各类人为活动如机动车尾气、燃料燃烧、有机化学品的生产使用等过程造成的排放使得城市大气中的VOCs来源极为复杂,且多为有毒有害物质。建立VOCs排放清单,掌

握区域大气VOCs排放特征,对开展区域大气复合污染形成过程及污染控制对策研究具有重要意义^[10]。

国内外学者针对VOCs排放特征开展了一系列研究,在VOCs来源识别、估算方法、排放系数、源特征等方面开展了大量的研究。目前国内VOCs排放清单的编制通常采用“自上而下”的方法,依据宏观统计数据估算一定区域范围内不同部门VOCs排放总量^[11,12],建立的清单不能准确反映区域VOCs的排放特征,难以有效支撑污染防治策略制订。长

收稿日期: 2016-07-26; 修订日期: 2016-09-07

基金项目: 环境保护公益性行业科研专项(201509019)

作者简介: 尤翔宇(1984~),男,博士,工程师,主要研究方向为大气污染物排放清单, E-mail: hkyxy@qq.com

* 通信作者, E-mail: 89426781@qq.com

株潭城市群包括长沙、株洲、湘潭三市,是长江中游城市群的重要组成部分,近年来,长株潭地区 O_3 污染日益严重,是全国大气复合污染最严重的区域之一。本研究基于长株潭城市群各类统计数据和其他相关调查资料,利用排放系数法,采用“自下而上”与“自上而下”相结合的方法,详细估算了 2014 年长株潭城市群人为源 VOCs 排放清单,并对 VOCs 排放清单进行空间分配,在此基础上根据最大增量反应活性(MIR)和气溶胶生成系数法(FAC)得到各类污染源的 O_3 和 SOA 的生成潜势,旨在为长株潭城市群的大气污染防治提供可靠依据。

1 材料与方法

1.1 研究范围与估算方法

根据长株潭地区的产业特点,参考国内外相关研究成果,将 VOCs 的人为来源分为生物质燃烧源、化石燃料燃烧源、工艺过程源、溶剂使用源、移动源和存储运输源。研究区域为长沙、株洲、湘潭三市所辖 23 个区县。以 2014 年为研究年份,采用排放系数法进行估算,计算过程用公式概括为:

$$E_{i,j} = \sum_{j,k} EF_{i,j,k} \times A_{i,j,k} \quad (1)$$

式中, i 为区县, j 为排放源, k 为技术类型, E 为排放量,EF 为排放系数, A 为活动水平。

1.2 活动水平

1.2.1 生物质燃烧源

生物质燃烧源包括作为燃料使用的秸秆、薪柴等生物质燃料燃烧和作为废弃物处置的生物质露天焚烧。生物质燃烧源的活动水平包括生物质燃料使用量和生物质露天焚烧量,生物质燃料的使用量采用区县环保局调研得到的生物质锅炉燃料年使用量,秸秆露天焚烧量根据各类农作物产量^[13]及谷草比^[14]测算各类农作物秸秆产生量,再根据燃烧比例、燃烧效率等得到秸秆露天焚烧量。

1.2.2 化石燃料燃烧源

化石燃料是由碳氢化合物及其衍生物组成的燃料资源,包括煤、石油、天然气、液化石油气等。化石燃料燃烧源活动水平为工业、商业、居民生活等部门的燃料消费量,工商业燃料消费量来自《2015 湖南统计年鉴》,主要工业企业燃料消费量来自环境统计数据,居民生活燃料消费量根据《湖南能源统计年鉴 2005-2010》中数据外推获得。

1.2.3 工艺过程源

工艺过程源是有机化学、无机化学、食品和农业、木材加工等排放 VOCs 的工业生产过程。具体

集中在机械设备及电子制造业、包装印刷业、木材加工及家具制造业、石油炼制和石油化工业、非金属矿物制品业、食品制造业、化学原料及化学制品制造业、涂料制造业、金属冶炼业、炼焦业、造纸和纸制品业等制造业分类中。各行业排放量计算所需要的产品产量数据主要来自于环境统计数据。

1.2.4 溶剂使用源

溶剂使用源包括有机溶剂使用过程中排放 VOCs 的污染源,主要的排放过程包括农药使用、表面涂层、染色过程等。其中,建筑涂料根据文献[12]建立了内墙涂料、外墙水性涂料与外墙溶剂型涂料使用量与建筑竣工面积的关系,染色过程中油墨消费、干洗剂消费活动水平数据来自《2015 湖南统计年鉴》,农药使用量的数据来自《2015 湖南农村统计年鉴》,汽车喷涂与其他涂层以及染料消费量活动水平均来自环境统计数据。

1.2.5 移动源

移动源主要包括机动车等道路移动源和飞机、内河船舶、工程机械、农业机械等非道路移动源。道路移动源活动水平信息包括不同车龄和不同排放标准的分车型的机动车保有量,不同车型的年平均行驶里程,非道路移动源的活动水平包括飞机起飞着陆循环次数和其它非道路移动源的汽油和柴油消费量。机动车保有量信息来自环境统计数据,机动车年均行驶里程数据引用文献[15]的成果,非道路移动源活动水平数据主要来自《2015 湖南统计年鉴》和《2015 湖南农村统计年鉴》。

1.2.6 储存运输源

储存运输源主要指油品的储存和运输过程中的排放,活动水平是油库或加油站油品的年销售量,该数据由各区县环境保护局调研提供。由于数据获取有限,本研究没有涉及各区县城区范围以外的民营加油站。

1.3 排放系数

本研究中各类污染源的排放系数主要引用《大气挥发性有机物排放清单编制技术指南(试行)》,部分行业排放系数来自文献调研。

1.4 物种排放量计算

总结选取国内外已有的各种污染源成分谱测试分析结果,对长株潭地区的 VOCs 进行物种分配,从而实现对 O_3 和 SOA 生成潜势的估算,VOCs 源成分谱如表 1 所示。溶剂使用源中除涉及到涂料使用的行业外,其余的行业均认为与印刷行业排放成分谱相同,工艺过程的各行业均采用了相同的源成分谱。

表 1 VOCs 源成分谱来源

Table 1 Summary of VOCs source profiles		
污染源	源成分谱分类	文献
生物质燃烧源	水稻秸秆燃烧	[16]
	玉米秸秆燃烧	[16]
	小麦秸秆燃烧	[16]
	薪柴燃烧	[16]
	水稻秸秆露天燃烧	[16]
	玉米秸秆露天燃烧	[16]
化石燃料固定燃烧源	火力发电	[17]
	工业燃煤	[17]
	民用燃煤	[18]
工艺过程源	化工制造	[19]
	汽车喷涂	[20]
溶剂使用源	建筑涂料	[21]
	工业涂层	[18]
	包装印刷	[22]
移动源	汽油车尾气	[23]
	柴油车尾气	[23]
存储运输源	油品挥发	[23]

1.5 臭氧生成潜势估算方法

臭氧生成潜势 (ozone formation potentials, OFP) 代表 VOCs 物种在最佳反应条件下对 O₃ 生成的最大贡献, OFP 是综合衡量 VOCs 物种的反应活性对 O₃ 生成潜势的指标参数, 该指标被广泛地用于评估 VOCs 在某一地区 O₃ 生成中的作用^[24,25], 其计算公式表示为:

$$OFP_i = E_i \times MIR_i \tag{2}$$

式中, OFP_{*i*} 为 VOCs 物种 *i* 的 OFP 值; *E_i* 为该 VOCs 物种的排放量或浓度; MIR_{*i*} 为该 VOCs 物种在 O₃ 最大增量反映中的 O₃ 生成系数, 本研究采用 Carter 最新更新的 MIR 数据^[26]. 将不同污染源中的各 VOC 物种的 OFP 值加和, 即获得该污染源总臭氧生成潜势.

1.6 二次有机气溶胶生成潜势估算方法

二次有机气溶胶 (SOA) 是由人类活动或者天然源直接排放的有机前体物在大气中经过一系列的氧化、吸附、凝结等过程后的产物, 采用气溶胶生成系数法来估算 SOA 的生成潜势, 计算公式如下:

$$SOA_p = VOC_0 \times F_{VOCr} \times FAC \tag{3}$$

式中, VOC₀ 为某种 VOCs 的排放量或排放浓度; FAC 和 *F_{VOCr}* 分别是该 VOC 物种的气溶胶生成系数和参与反应的系数. 将不同污染源中的各 VOC 物种的 SOA_{*p*} 值加和, 即得到总 SOA 生成潜势. 本研究的 FAC 和 *F_{VOCr}* 数值主要来源于 Grosjean 的研究结果^[27].

2 结果与讨论

2.1 长株潭城市群人为源 VOCs 排放清单

长株潭城市群人为源 VOCs 排放清单如表 2 所示, 从中可以看出, 长株潭地区工艺过程源排放的 VOCs 最大, 为 35.88 kt, 占 VOCs 排放总量的 31.62%, 其次为溶剂使用源、移动源和生物质燃烧源, 分别为 28.72、22.13 和 12.38 kt, 各占排放总量的 25.31%、19.50% 和 10.91%. 而化石燃料燃烧源、存储运输源和废弃物处理源排放量较小, 分别为 8.01、5.60 和 0.76 kt, 共占总排放量的 9.74%.

表 2 长株潭地区人为源 VOCs 排放量

Table 2 Anthropogenic VOCs emissions of different sectors in Chang-Zhu-Tan area			
排放源		排放量/kt	比例/%
工艺过程源		35.88	31.62
	陶瓷	15.60	13.75
	水泥	7.11	6.27
	钢铁	6.05	5.33
	玻璃	3.03	2.67
	化工	2.74	2.41
	砖瓦及其它建材	1.29	1.14
	其它工艺过程	0.05	0.04
溶剂使用源		28.72	25.31
	建筑涂料	17.18	15.14
	工业涂层	8.06	7.10
	生活溶剂	3.02	2.66
	农药使用	0.28	0.25
	印刷印染	0.18	0.16
移动源		22.13	19.50
	道路机动车	20.52	18.08
	非道路移动源	1.61	1.42
生物质燃烧源		12.38	10.91
	生物质露天焚烧	11.26	9.92
	生物质燃料燃烧	1.12	0.99
化石燃料燃烧源		8.01	7.06
	火力发电	1.05	0.93
	工业燃煤	5.66	4.99
	民用燃煤	1.30	1.15
存储运输源	加油站	5.60	4.94
废弃物处理源	固废填埋	0.76	0.67

工艺过程源涉及的行业较多, 建材生产排放量比重较大, 陶瓷、水泥、玻璃、砖瓦等建材行业的排放总量占总排放量的 23.83%, 占工艺过程源排放量的 75.34%, 此外, 钢铁和化工的排放量也占有很大比例. 溶剂使用源中, 建筑涂料和工业涂层是主要排放源, 排放量分别为 17.18 kt 和 8.06 kt. 移动源中道路机动车的排放量远大于非道路移动源. 生

物质燃烧源中,生物质露天焚烧的排放量为 11.26 kt,远大于生物质燃料.化石燃料燃烧源中工业燃煤的排放量最大,为 5.66 kt,存储运输源 VOCs 排放量为 5.60 kt,也都占有较大的比例.

2.2 长株潭地区人为源 VOCs 排放的地域分布
长株潭地区 VOCs 各污染源的排放量地域分布

情况见表 3,其中醴陵市各污染源 VOCs 排放总量为 16.58 kt,显著高于长株潭地区的其他区县,占长株潭地区排放总量的 14.61%,另外长沙县、岳塘区的排放量也较高,在 9 kt 以上,宁乡县、浏阳市、望城区、天元区、石峰区的排放量在 5 kt 以上,其余区县均在 5 kt 以下.

表 3 长株潭地区各区县人为源 VOCs 排放量统计/kt
Table 3 VOCs emissions of different cities in Chang-Zhu-Tan region/kt

地市	区县	溶剂使用	工艺过程	移动源	生物质燃烧	化石燃料燃烧	存储运输	废弃物处理	总量
长沙	芙蓉区	0.86	0.04	1.14	0.00	0.27	0.68	0.00	2.99
	天心区	0.49	0.00	1.03	0.00	0.23	0.42	0.00	2.17
	岳麓区	1.69	0.49	1.51	0.17	0.21	0.36	0.00	4.44
	开福区	0.92	0.41	1.23	0.04	0.15	0.36	0.00	3.10
	雨花区	2.39	0.01	1.65	0.00	0.16	0.37	0.00	4.57
	望城区	0.20	2.55	0.69	0.70	0.90	0.28	0.47	5.78
	长沙县	7.27	1.55	1.42	1.12	0.40	0.58	0.00	12.35
	浏阳市	0.82	3.10	1.58	1.08	0.62	0.52	0.03	7.75
	宁乡县	1.54	1.90	1.42	1.76	0.70	0.60	0.03	7.95
	合计	16.18	10.04	11.68	4.88	3.62	4.16	0.53	51.11
株洲	荷塘区	0.60	0.67	0.86	0.07	0.22	0.15	0.05	2.63
	芦淞区	0.99	0.00	0.74	0.10	0.09	0.12	0.00	2.04
	石峰区	0.29	2.77	0.91	0.06	1.15	0.06	0.01	5.25
	天元区	4.19	0.22	0.66	0.20	0.11	0.12	0.00	5.50
	株洲县	0.55	0.59	0.29	0.50	0.15	0.03	0.00	2.11
	攸县	0.37	0.66	1.14	0.98	0.52	0.08	0.04	3.78
	茶陵县	0.25	0.43	0.84	0.69	0.20	0.08	0.01	2.50
	炎陵县	0.58	0.60	0.27	0.20	0.06	0.01	0.00	1.73
	醴陵市	0.90	12.33	1.56	1.16	0.56	0.04	0.02	16.58
	合计	8.72	18.27	7.29	3.96	3.07	0.68	0.13	42.12
湘潭	雨湖区	1.58	0.60	1.00	0.31	0.20	0.30	0.00	3.99
	岳塘区	0.67	6.82	0.88	0.06	0.61	0.18	0.07	9.89
	湘潭县	0.98	0.11	0.63	1.70	0.22	0.02	0.00	3.66
	湘乡市	0.57	0.04	0.58	1.30	0.22	0.24	0.03	2.97
	韶山市	0.03	0.00	0.08	0.16	0.07	0.01	0.00	0.36
	合计	3.82	7.57	3.16	3.53	1.33	0.75	0.10	20.27

图 1 列出了长株潭各区县污染源的 VOCs 排放分担率.溶剂使用源排放量靠前的区县依次为长沙县、天元区、雨花区、岳麓区、雨湖区和宁乡县,均超过 1.5 kt,除宁乡县,溶剂使用源均为以上县区最主要的人为 VOCs 排放源.醴陵市、岳塘区、浏阳市、石峰区和望城区的工艺过程源 VOCs 排放量较大,均占当地 VOCs 排放总量的 40% 以上,其主要排放行业分别为陶瓷生产、钢铁冶炼、陶瓷生产、玻璃制造和水泥生产.移动源排放的 VOCs 差别不大,雨花区排放量最大,为 1.65 kt.相对于郊区,移动源排放的 VOCs 对中心城区的贡献更大,特别是长沙市,移动源排放量约占中心城区排放总量的 37.98%.宁乡县生物质燃烧源排放的 VOCs 最多,为 1.76 kt,生物质燃烧源排放 VOCs 贡献率较大的

区县主要是湘潭县、韶山市和湘乡市.化石燃料燃烧源排放的 VOCs 较少,仅有石峰区的排放量达到了 1.15 kt,占其排放总量的 21.90%,其他区县排放量均不到 1 kt.存储运输源和废弃物处理源的排放量都很小,排放量最高的分别为芙蓉区和望城区,其排放量分别仅为 0.68 kt 和 0.47 kt.

2.3 人为源 VOCs 排放清单的空间分布
本研究基于长株潭地区污染源空间分布表征数据,建立了 3 km×3 km 的长株潭地区网格化人为源 VOCs 排放清单.工业点源根据排放源的经纬度直接分配到网格中,农业源按照农田分布、移动源按照道路分布、生活源按照城镇人口分布、其它的溶剂使用源按照 GDP 分布数据进行空间分配.基于上述方法得到长株潭地区 2014 年人为源 VOCs 排

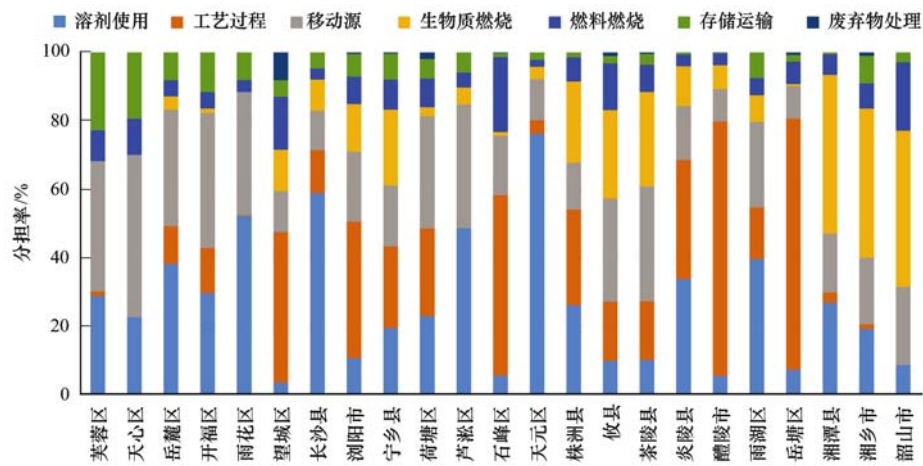


图1 长株潭城市群各区县人为源 VOCs 排放分担率

Fig. 1 Source contributions of anthropogenic VOCs in Chang-Zhu-Tan region

放的空间分布,如图2所示。从中可以看出,长株潭地区的人为源 VOCs 排放主要分布在中心城区,城区外主要沿交通干线分布,部分大型点源所在网格排放量也相对较大。

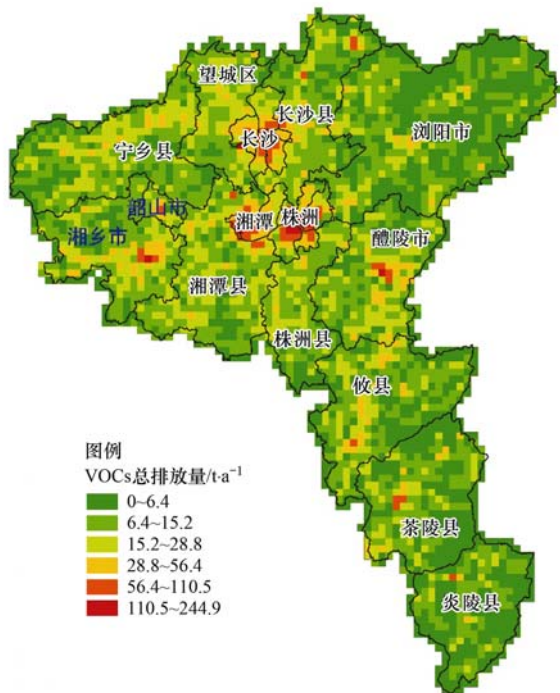


图2 长株潭地区人为源 VOCs 排放空间分布特征

Fig. 2 Spatial distribution of anthropogenic VOCs in Chang-Zhu-Tan region

2.4 不确定性分析

排放清单估算分析过程中不确定性主要包括活动水平数据的缺失和排放系数的本地化程度不足等。本研究中,除工业涂层外其他溶剂使用源活动水平数据根据宏观统计数据推算,不确定性较大;工业涂层和工艺过程源的活动水平数据来自环境统

计数据,不确定性较小;移动源中道路机动车的活动水平来自环境统计数据,但无法获取分车型和分排放标准数据,不确定性相对较大,非道路移动源的活动水平根据宏观统计数据推算,也存在较大的不确定性;生物质燃烧源的活动水平数据来自统计年鉴,但秸秆焚烧、利用比例等难以获取,不确定性较大;化石燃料燃烧源中工业燃煤活动水平来自环境统计数据,不确定性较小,民用燃煤根据历年能源年鉴推算,存在较大的不确定性;存储运输源的活动水平数据来自基层调研,不确定性较小。排放系数主要来自《大气挥发性有机物排放清单编制技术指南(试行)》,除工业源由于原料和产品差异导致不确定性偏大外,其它源类排放系数的不确定性较小。

本研究采用 Monte Carlo 方法对主要人为排放源及总的排放清单不确定性的进一步分析,如表4所示。

表4 长株潭地区人为源 VOCs 排放清单不确定性

Table 4 Uncertainties of anthropogenic VOCs emission

inventory in Chang-Zhu-Tan region		
排放源	类型	不确定性范围/%
溶剂使用源	建筑涂料	-11.75 ~ 11.56
	工业涂层	-8.42 ~ 8.96
	生活溶剂	-11.40 ~ 12.67
工艺过程源		-29.30 ~ 28.38
移动源	道路机动车	-14.08 ~ 14.34
	非道路移动源	-10.70 ~ 10.40
生物质燃烧源		-20.90 ~ 20.41
化石燃料燃烧源	工业燃煤	-9.25 ~ 10.72
	民用燃煤	-13.32 ~ 12.47
存储运输源	加油站	-9.72 ~ 8.84
长株潭地区总排放		-16.13 ~ 17.04

总体而言,估算过程中不确定性的主要来源为

活动水平数据的选取和排放系数的选取. 从 Monte Carlo 模拟结果来看, 工艺过程源、生物质燃烧源的不确定度较高, 溶剂使用源和存储运输源的不确定度较低. 工艺过程源是由于行业类别过多, 不同行业原料和产品差别较大, 生物质燃烧源是由于秸秆焚烧、利用比例差异较大造成的.

2.5 长株潭地区人为源挥发性有机物的环境影响

2.5.1 臭氧生成潜势

通过 MIR 计算, 长株潭地区人为源排放的挥发性有机物的 OFP 总量为 375.33 kt. 其中, 溶剂使用源的 OFP 占总量的 27.28%, 其次是移动源和工艺过程源, 分别占 OFP 总量的 24.53% 和 21.04%. 与各类排放源的 VOCs 排放贡献相比, 溶剂使用源和移动源的 OFP 超过了工艺过程源, 成为前两大源类, 各类污染源的 OFP 情况如图 3 所示.

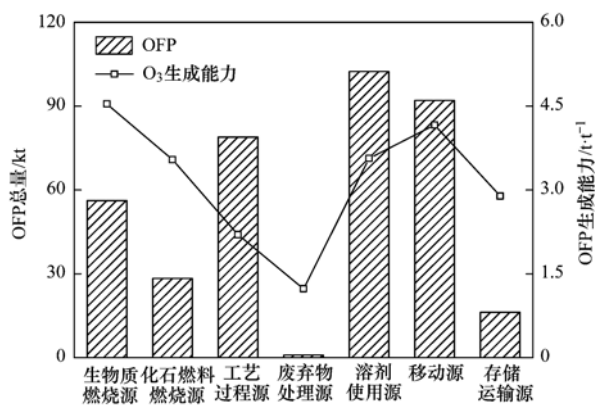


图 3 各类人为源生成的 OFP 总量与 O₃ 生成能力

Fig. 3 Total OFP and O₃ generative capacity of anthropogenic VOCs

各人为源排放单位质量 VOCs 造成的 OFP 可以用来判断该污染源的臭氧生成能力的大小^[25], 其中生物质燃烧源的臭氧生成能力最高, 为 4.54 t·t⁻¹, 其次是移动源和溶剂使用源, 分别为 4.16 t·t⁻¹ 和 3.57 t·t⁻¹, 其他四类排放源的臭氧生成能力相对较弱, 均低于 3.5 t·t⁻¹. 对比各类排放源的 OFP 与 O₃ 生成能力比较可以发现, 溶剂使用源、移动源和工艺过程源对长株潭地区 O₃ 的生成贡献较大, 生物质燃烧源的 O₃ 生成能力最高, 这四类排放源对于 O₃ 生成具有重要的作用.

2.5.2 SOA 生成潜势

采用气溶胶生成系数法估算 SOA 生成潜势往往会导致其计算结果偏低^[28,29], 因此, 本研究主要利用 SOA 生成潜势的相对高低来评价各类人为源对 SOA 的影响^[30]. 长株潭地区人为源排放的 VOCs 对 SOA 生成潜势贡献总量为 335.76 t. 各污染源对

应的 SOA 生成潜势排序不同于 OFP 的排序, 其中溶剂使用排放源贡献的 SOA 生成潜势比例最大, 为 35.35%, 其次是移动源和工艺过程源, 分别为 28.40% 和 17.06%, 其它源类由于 VOCs 的排放量低, 其 SOA 生成潜势贡献量均低于 9%, 各类人为源 SOA 的生成潜势情况如图 4 所示.

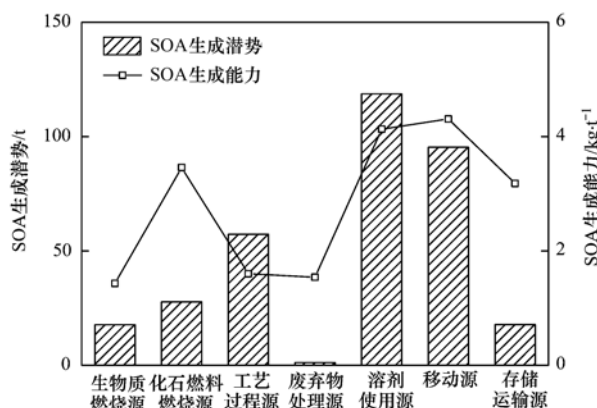


图 4 各类人为源的 SOA 生成潜势总量与生成能力

Fig. 4 Total SOA formation potentials and generative capacity of anthropogenic VOCs

与 OFP 类似, 各类人为源排放单位质量 VOCs 造成的 SOA 生成潜势大小可以用来判断该污染源的 SOA 生成能力, 其中移动源的 SOA 生成能力最强, 其次为溶剂使用源、化石燃料燃烧源和存储运输源. 通过以上分析可以得出长株潭地区溶剂使用源和移动源对 SOA 的生成影响最大, 贡献率和生成能力均是各类污染源中最强的. 此外化石燃料固定燃烧源和存储运输源的 SOA 生成能力较强也应受到足够的重视.

3 结论

(1) 2014 年长株潭地区典型人为源 VOCs 的总排放量为 113.49 kt, 其中工艺过程源、溶剂使用源、移动源、生物质燃烧源、化石燃料燃烧源、存储运输源和废弃物处理源排放量分别为 35.88、28.72、22.13、12.37、8.01、5.60 和 0.76 kt.

(2) 陶瓷、水泥和钢铁为最主要的工艺过程源排放行业, 其 VOCs 排放量分别为 15.60、7.11、6.05 kt; 建筑涂料和工业涂层是长株潭地区最主要的溶剂使用源排放行业, 其 VOCs 排放量分别为 17.18 kt 和 8.06 kt.

(3) 醴陵市各人为源 VOCs 排放总量为 16.58 kt, 长沙县和岳塘区的 VOCs 排放量在 9 kt 以上, 宁乡县、浏阳市、望城区、天元区、石峰区的排放量在 5 kt 以上, 其余区县均在 5 kt 以下.

(4)长株潭地区各人为源 VOCs 的 OFP 总量为 375.33 kt. 溶剂使用源、移动源和工艺过程源的 OFP 分别占总量的 27.28%、24.53% 和 21.04%, 生物质燃烧源的 O₃ 生成能力最强. 长株潭地区人为源排放的 VOCs 对 SOA 生产潜势中,溶剂使用源贡献比例最大为 35.35%,其次为移动源和工艺过程源,贡献率分别为 28.40% 和 17.06%,SOA 生成能力方面,移动源最强.

参考文献:

- [1] Xu W Y, Zhao C S, Ran L, *et al.* Characteristics of pollutants and their correlation to meteorological conditions at a suburban site in the North China Plain [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, **11**(9): 4353-4369.
- [2] Dong X Y, Li J, Fu J S, *et al.* Inorganic aerosols responses to emission changes in Yangtze River Delta, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **481**: 522-532.
- [3] Ou J M, Zheng J Y, Li R R, *et al.* Speciated OVOC and VOC emission inventories and their implications for reactivity-based ozone control strategy in the Pearl River Delta region, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **530-531**: 393-402.
- [4] Shao M, Tang X Y, Zhang Y H, *et al.* City clusters in China: air and surface water pollution [J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2006, **4**(7): 353-361.
- [5] Chan C K, Yao X H. Air pollution in mega cities in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(1): 1-42.
- [6] 环境保护部. 环境保护部发布 2015 年第三季度重点区域和 74 个城市空气质量状况 [EB/OL]. http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/qt/201510/t20151021_315285.htm, 2015-10-21.
- [7] 唐孝炎, 张远航, 邵敏. 大气环境化学 [M]. (第二版). 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [8] Hallquist M, Wenger J C, Baltensperger U, *et al.* The formation, properties and impact of secondary organic aerosol: current and emerging issues [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, **9**(14): 5155-5236.
- [9] Carlton A G, Wiedinmyer C, Kroll J H. A review of Secondary Organic Aerosol (SOA) formation from isoprene [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, **9**(14): 4987-5005.
- [10] 魏巍, 王书肖, 郝吉明. 中国人为源 VOC 排放清单不确定性研究 [J]. *环境科学*, 2011, **32**(2): 305-312.
- Wei W, Wang S X, Hao J M. Uncertainty analysis of emission inventory for volatile organic compounds from anthropogenic sources in China [J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(2): 305-312.
- [11] Bo Y, Cai H, Xie S D. Spatial and temporal variation of historical anthropogenic NMVOCs emission inventories in China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2008, **8**(23): 7297-7316.
- [12] 魏巍. 中国人为源挥发性有机化合物的排放现状及未来趋势 [D]. 北京: 清华大学, 2009.
- [13] 湖南省统计局. 2015 湖南统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2015.
- [14] 环境保护部科技标准司. 生物质燃烧源大气污染物排放清单编制技术指南 (试行) [EB/OL]. <http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201501/W020150107594588071383.pdf>, 2014-12-31.
- [15] 环境保护部科技标准司. 道路机动车大气污染物排放清单编制技术指南 (试行) [EB/OL]. <http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201501/W020150107594587831090.pdf>, 2014-12-31.
- [16] 李兴华, 王书肖, 郝吉明. 民用生物质燃烧挥发性有机化合物排放特征 [J]. *环境科学*, 2011, **32**(12): 3515-3521.
- Li X H, Wang S X, Hao J M. Characteristics of volatile organic compounds (VOCs) emitted from biofuel combustion in China [J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(12): 3515-3521.
- [17] Passant N R. Speciation of UK emissions of non-methane volatile organic compounds [R]. Report No. AEAT/ENV/R/0545. Oxford, UK: AEA Technology, 2002.
- [18] Yuan B, Shao M, Lu S H, *et al.* Source profiles of volatile organic compounds associated with solvent use in Beijing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, **44**(15): 1919-1926.
- [19] 韩丽, 王幸锐, 何敏, 等. 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 [J]. *环境科学*, 2013, **34**(12): 4535-4542.
- Han L, Wang X R, He M, *et al.* Inventory and Environmental Impact of VOCs emission from the typical anthropogenic sources in Sichuan province [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(12): 4535-4542.
- [20] 莫梓伟, 邵敏, 陆思华. 中国挥发性有机物 (VOCs) 排放源成分谱研究进展 [J]. *环境科学学报*, 2014, **34**(9): 2179-2189.
- Mo Z W, Shao M, Lu S H. Review on volatile organic compounds (VOCs) source profiles measured in China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, **34**(9): 2179-2189.
- [21] 陆思华, 白郁华, 张广山, 等. 大气中挥发性有机化合物 (VOCs) 的人为来源研究 [J]. *环境科学学报*, 2006, **26**(5): 757-763.
- Lu S H, Bai Y H, Zhang G S, *et al.* Source apportionment of anthropogenic emissions of volatile organic compounds [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, **26**(5): 757-763.
- [22] 王伯光, 张远航, 邵敏, 等. 广州地区大气中 C₂~C₉ 非甲烷碳氢化合物的人为来源 [J]. *环境科学学报*, 2008, **28**(7): 1430-1440.
- Wang B G, Zhang Y H, Shao M, *et al.* Sources apportionment of anthropogenic C₂~C₉ non-methane hydrocarbons in the atmosphere of Guangzhou, China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, **28**(7): 1430-1440.
- [23] 王伯光, 邵敏, 张远航, 等. 机动车排放中挥发性有机污染物的组成及其特征研究 [J]. *环境科学研究*, 2006, **19**(6): 75-80.
- Wang B G, Shao M, Zhang Y H, *et al.* A study of volatile organic compounds and its emission factors from city vehicles [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2006, **19**(6): 75-80.
- [24] Zheng J Y, Shao M, Che W W, *et al.* Speciated VOC emission inventory and spatial patterns of ozone formation potential in the Pearl River Delta, China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, **43**(22): 8580-8586.
- [25] 徐敬, 马建中. 北京地区有机物种人为源排放量及 O₃ 生成潜势估算 [J]. *中国科学: 化学*, 2013, **43**(1): 104-115.
- Xu J, Ma J Z. Estimation of anthropogenic emissions and ozone formation potential of speciated VOCs in Beijing area [J].

- Scientia Sinica Chimica, 2013, **43**(1): 104-115.
- [26] Carter W P L. Updated maximum incremental reactivity scale and hydrocarbon bin reactivities for regulatory applications[EB/OL]. <http://www.arb.ca.gov/research/reactivity/mir09.pdf>, 2009-06-22.
- [27] Grosjean D. *In situ* organic aerosol formation during a smog episode: Estimated production and chemical functionality[J]. Atmospheric Environment. Part A. General Topics, 1992, **26**(6): 953-963.
- [28] 王倩, 陈长虹, 王红丽, 等. 上海市秋季大气 VOCs 对二次有机气溶胶的生成贡献及来源研究[J]. 环境科学, 2013, **34**(2): 424-433.
- Wang Q, Chen C H, Wang H L, *et al.* Forming potential of secondary organic aerosols and sources apportionment of VOCs in autumn of Shanghai, China[J]. Environmental Science, 2013, **34**(2): 424-433.
- [29] 陈文泰, 邵敏, 袁斌, 等. 大气中挥发性有机物(VOCs)对二次有机气溶胶(SOA)生成贡献的参数化估算[J]. 环境科学学报, 2013, **33**(1): 163-172.
- Chen W T, Shao M, Yuan B, *et al.* Parameterization of contribution to secondary organic aerosol (SOA) formation from ambient volatile organic compounds (VOCs)[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, **33**(1): 163-172.
- [30] Dechapanya W, Russell M, Allen D T. Estimates of anthropogenic secondary organic aerosol formation in Houston, Texas special issue of *aerosol science and technology* on findings from the fine particulate matter supersites program[J]. Aerosol Science and Technology, 2004, **38**(S1): 156-166.

CONTENTS

Atmospheric Dry Deposition Fluxes and Seasonal Variations of Particulate Matter and Lead in Urban Beijing	YAO Li, LIU Jin, PAN Yue-peng, <i>et al.</i> (423)
Pollution Characteristics of Heavy Metals in PM _{2.5} and Their Human Health Risks Among the Coastal City Group Along Western Taiwan Straits Region, China	CHEN Yan-ting, DU Wen-jiao, CHEN Jin-sheng, <i>et al.</i> (429)
Correlation of Speciated Mercury with Carbonaceous Components in Atmospheric PM _{2.5} in Shengsi Region	CHENG Na, QIAN Guan-lei, DUAN Lian, <i>et al.</i> (438)
Compositions and Sources of Summertime Dicarboxylic Acids and Related SOA in PM _{2.5} from Mt. Taishan	MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, LIU Xiao-di, <i>et al.</i> (445)
Variation Characteristics and Health Risk Assessment of BTEX in the Atmosphere of Northern Suburb of Nanjing	ZHANG Yu-xin, AN Jun-lin, WANG Jian-yu, <i>et al.</i> (453)
Inventory and Environmental Impact of VOCs Emission from Anthropogenic Source in Chang-Zhu-Tan Region	YOU Xiang-yu, LUO Da-tong, LIU Zhan, <i>et al.</i> (461)
Characteristics of Methane Emission from Urban Traffic in Nanjing	ZHANG Xue, HU Ning, LIU Shou-dong, <i>et al.</i> (469)
Variations in Aerosol Optical Depth over Three Northeastern Provinces of China, in 2003-2014	ZHANG Chen-he, ZHAO Tian-liang, WANG Fu, <i>et al.</i> (476)
Variation Analysis of Daily PM _{2.5} Concentrations Based on Boosted Regression Tree: A Case Study in Changzhou	GE Yue, WANG Ming-xin, SUN Xiang-wu, <i>et al.</i> (485)
Characteristics of Mercury Emissions from Coal-fired Power Plants in Chongqing	ZHANG Cheng, ZHANG Ya-hui, WANG Yong-min, <i>et al.</i> (495)
Possible Sources of PCDD/Fs in Atmosphere of a Certain District in Guangdong	FU Jian-ping, HAN Jing-lei, YU Xiao-wei, <i>et al.</i> (502)
Sources and Pollution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes and Conditional Pathogenic Bacteria in Concentrated Poultry Feeding Operations	GAO Min, QIU Tian-lei, QIN Yu-cheng, <i>et al.</i> (510)
Distribution and Burial Characteristics of Nitrogen Forms in Sediment of Dianchi Lake During Last Century	WU Ya-lin, LI Shuai-dong, JIANG Jun-wu, <i>et al.</i> (517)
Temporal and Spatial Variations of Dissolved Inorganic Carbon and Its Stable Isotopic Composition in the Surface Stream of Karst Groundwater Recharge	LI Li, PU Jun-bing, LI Jian-hong, <i>et al.</i> (527)
Succession Pattern of Phytoplankton of Daning River in the Three Gorges Reservoir and Its Driving Factors	ZHANG Jia-lei, ZHENG Bing-hui, LIU De-fu, <i>et al.</i> (535)
Response of the Water Quality of a Stratified Reservoir to an Extreme El Niño Event During Summer	QIU Xiao-peng, HUANG Ting-lin, ZENG Ming-zheng, <i>et al.</i> (547)
Effect of Coupling Process of Wetting-Drying Cycles and Seasonal Temperature Increasing on Sediment Nitrogen Minerization in the Water Level Fluctuating Zone	LIN Jun-jie, LIU Dan, ZHANG Shuai, <i>et al.</i> (555)
Photo-induced Phosphate Release from Organic Phosphorus Decomposition Driven by Fe(III)-oxalate Complex in Lake Water	JIANG Yong-can, PENG Yun-xiao, LIU Guang-long, <i>et al.</i> (563)
Preparation and Phosphorus Removal Mechanism of Highly Efficient Phosphorus Adsorbent Mg/Al-LDO	WANG Wei-dong, HAO Rui-xia, ZHANG Xiao-xian, <i>et al.</i> (572)
Efficiency and Mechanism of Nitrogen and Phosphorus Removal in Modified Zeolite Wetland	WU Peng, LU Shuang-jun, XU Le-zhong, <i>et al.</i> (580)
Repression of Nitrogen and Phosphorus Release from Lakeshore Sediment by Five Littoral-zone Plants	YAO Cheng, HU Xiao-zhen, LU Shao-yong, <i>et al.</i> (589)
Simulated Desorption Kinetics of Lead by the Dominant Plant Roots Released Low Molecular Weight Organic Acids from the Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir	HE Yuan-jie, LIU Jiang, JIANG Tao, <i>et al.</i> (600)
Experimental Research of Hg ²⁺ Removal by TiO ₂ /Bentonite Composite	TANG Xing-ping, ZHOU Xiong, ZHANG Jin-yang, <i>et al.</i> (608)
Impact of Ammonia and H ₂ O ₂ on Bromate and Disinfection By-products Control	WANG Yong-jing, DU Xu, JIN Meng, <i>et al.</i> (616)
Influencing Factors of Bacterial Activity in Water Distribution Networks	WANG Xiao-dan, ZHAO Xin-hua, <i>et al.</i> (622)
Adsorptive Remediation of Cr(VI) Contaminated Groundwater with Chemically Synthesized Schwertmannite	ZHU Li-chao, LIU Yuan-yuan, LI Wei-min, <i>et al.</i> (629)
Characteristics and Mechanism of Hybrid Ozonation-Coagulation Process in Wastewater Reclamation	HOU Rui, JIN Xin, JIN Peng-kang, <i>et al.</i> (640)
Nitrogen Removal Effect and Conversion Characteristics of Nitrous Oxide in Single-stage and Multi-stage A/O Processes	GUO Chang-zi, ZHANG Feng-yan, LIU Fu-yu, <i>et al.</i> (647)
Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX with Different Organic Carbon Sources	GUAN Yong-jie, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (654)
Operational Performance and Microbial Community Structure in a Completely Mixed Aeration System	WANG Shuo, XU Qiao, ZHANG Guang-sheng, <i>et al.</i> (665)
Start-up of Combined Floc-granule CANON Process and the Effects of SRT on Reactor Performance	SUN Yan-fang, HAN Xiao-yu, ZHANG Shun-jun, <i>et al.</i> (672)
Effects of Free Ammonia Regulation on the Performance of High Solid Anaerobic Digesters with Dewatered Sludge	DAI Xiao-hu, HE Jin, YAN Han, <i>et al.</i> (679)
Highly Efficient Bioflocculation of Microalgae Using <i>Mucor circinelloides</i>	GU Qiong, JIN Wen-biao, CHEN Yuan-qing, <i>et al.</i> (688)
Effect of Zero Valent Iron on the Decline of Tetracycline Resistance Genes and Class 1 Integrons During Thermophilic Anaerobic Digestion of Sludge	WEI Xin, XUE Shun-li, YANG Fan, <i>et al.</i> (697)
Concentration, Sources and Ecological Risks of PAHs of Different Land Use Types in Shenfu New City	WANG Jing, LIU Ming-li, ZHANG Shi-chao, <i>et al.</i> (703)
Compositions, Sources and Health Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Dusts from Driving-schools in a City of Henan Province, China	CHEN Yi-nan, MA Jian-hua, DUAN Hai-jing, <i>et al.</i> (711)
Remediation of Decabromodiphenyl Ether Contaminated Sediment Through Plant Roots Enhanced by Exogenous Microbes	YANG Lei-feng, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i> (721)
Impacts of Bioremediation on Microbial Communities and Different Forms of Nitrogen in Petroleum Contaminated Soil	YE Xi-qiong, WU Man-li, CHEN Kai-li, <i>et al.</i> (728)
Effects of <i>Rhodopseudomonas palustris</i> PSB06 on Pepper Rhizosphere Microbial Community Structure	LUO Lu-yun, JIN De-cai, ZUO Hui, <i>et al.</i> (735)
Effect of Reclaimed Water on Bacterial Community Composition and Function in Urban River Sediment	DI Yan-ming, WANG Guang-xuan, HUANG Xing-ru, <i>et al.</i> (743)
Effects of Different Vegetation Types and Reclamation Years on Soil Bacterial Community Structure in Reclaimed Mine Areas	HE Long, LI Yan-qin, LI Bin-chun, <i>et al.</i> (752)
Characteristic of Abundances and Diversity of Carbon Dioxide Fixation Microbes in Paddy Soils	LIU Qiong, WEI Xiao-meng, WU Xiao-hong, <i>et al.</i> (760)
Effects of Biochar Pyrolyzed at Varying Temperatures on Soil Organic Carbon and Its Components: Influence on the Composition and Properties of Humic Substances	ZHAO Shi-xiang, YU Xiao-ling, LI Zhong-hui, <i>et al.</i> (769)
Straw Composts with Composite Inoculants and Their Effects on Soil Carbon and Nitrogen Contents and Enzyme Activity	NIE Wen-han, QI Zhi-ping, FENG Hai-wei, <i>et al.</i> (783)
Comparative Analysis on Effect of Wheat Straw and Its Biochar Amendment on Net Global Warming Potential Under Wheat-Maize Rotation Ecosystem in the Guanzhong Plain	CHENG Gong, CHEN Jing, LIU Jing-jing, <i>et al.</i> (792)
Isolation and Identification of a Chlorobenzene-degrading Bacterium and Its Degradation Characteristics	YE Jie-xu, LIN Tong-hui, LUO Yu-hao, <i>et al.</i> (802)
Isolation, Identification and Metabolic Characteristics of a Heterotrophic Denitrifying Sulfur Bacterial Strain	TAN Wen-bo, MA Xiao-dan, HUANG Cong, <i>et al.</i> (809)
Effects of Continuous Application of Sewage Sludge Compost on Heavy Metals Accumulation and Mobility Characteristics in Soil Profile and on Heavy Metals Uptake of Wheat	SUN Na, SHANG He-ping, RU Shu-hua, <i>et al.</i> (815)
Effects of Nitrogen Application on Selenium Uptake, Translocation and Distribution in Winter Wheat	CHEN Yu-peng, PENG Qin, LIANG Dong-li, <i>et al.</i> (825)
Accumulation and Biotransformation in Typical Freshwater Algae Species Influenced by Titanium Dioxide Nanoparticles Under Long-term Exposure	LI Jin-li, WANG Zhen-hong, YAN Ya-meng, <i>et al.</i> (832)
Sorption of <i>p</i> -Nitrophenol by Biochars of Corn cob Prepared at Different Pyrolysis Temperatures	MA Feng-feng, ZHAO Bao-wei, <i>et al.</i> (837)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

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 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
赵进才 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)

2017年2月15日 第38卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 38 No. 2 Feb. 15, 2017

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	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
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	北京宝昌彩色印刷有限公司	Printed	by	Beijing Baochang Color Printing Co., Ltd.
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	中国国际图书贸易集团有限公司 (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: 140.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人

ISSN 0250-3301



9 770250 330172