

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第11期

Vol.37 No.11

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

承德市大气污染源排放清单及典型行业对 PM _{2.5} 的影响	陈国磊, 周颖, 程水源, 杨孝文, 王晓琦 (4069)
浙江省木制品行业挥发性有机物排放特征及排放系数	姚轶, 王浙明, 何志桥, 徐志荣, 顾震宇 (4080)
山西省人为源 VOCs 排放清单及其对臭氧生成贡献	闫雨龙, 彭林 (4086)
某化工区典型高污染过程 VOCs 污染特征及来源解析	高松, 崔虎雄, 伏晴艳, 高爽, 田新愿, 方方, 衣学文 (4094)
加油 VOCs 排放因子测试方法研究与应用	黄玉虎, 常耀卿, 任碧琪, 秦建平, 胡玮, 刘明宇 (4103)
北京市生活垃圾填埋场氨排放特征研究	崔彤, 李金香, 杨妍研, 程刚 (4110)
西安市人为源大气氨排放清单及特征	苏航, 闫东杰, 黄学敏, 宋文斌, 王惠琴, 宋雪娟 (4117)
佛山市冬夏季非甲烷烃污染特征研究	周雪明, 项萍, 段菁春, 贺克斌, 马永亮, 邓思欣, 司徒淑婷, 谭吉华 (4124)
天津市道路环境大气颗粒物水溶性无机离子分析	赵梦雪, 吴琳, 方小珍, 杨志文, 李凤华, 毛洪钧 (4133)
戴云山国家级自然保护区大气氮沉降特点	袁磊, 李文周, 陈文伟, 张金波, 蔡祖聪 (4142)
青岛近海冬季大气生物气溶胶中微生物活性研究	孟祥斌, 李孟哲, 李鸿涛, 高冬梅, 祁建华 (4147)
玉米秸秆烟尘中正构脂肪酸的分子与碳同位素组成	刘刚, 孙丽娜, 徐慧, 李久海, 李中平, 李立武 (4156)
极低风速条件下水-气界面甲烷气体传输速率分析	张成, 吕新彪, 龙丽, 张军伟, 穆晓辉, 李迎晨, 王圣瑞, 张文丽, 肖尚斌 (4162)
典型水库型湖泊中 CDOM 吸收及荧光光谱变化特征: 基于沿岸生态系统分析	陈雪霜, 江韬, 卢松, 白薇扬, 张成, 王定勇, 魏世强 (4168)
西苕溪支流河口水体营养盐的特征及源贡献分析	陈诗文, 袁旭音, 金晶, 李正阳, 许海燕 (4179)
周村水库主库区热分层初期氮素降低的驱动因子分析	张春华, 黄廷林, 方开凯, 周石磊, 夏超 (4187)
太湖湖泛易发区沉积物中有机磷形态分布特征	董丹萍, 章婷曦, 张丁予, 王巧云, 李德芳, 王国祥 (4194)
多重扰动对湖泊内源磷迁移转化的影响	蔡顺智, 李大鹏, 王忍, 刘焱见, 徐垚, 于胜楠, 黄勇 (4203)
丹江口库区覆膜耕作土壤氮素淋失随夏玉米生长期的变化	王伟, 于兴修, 汉强, 刘航, 徐苗苗, 任瑞, 张家鹏 (4212)
营养盐恢复对氮磷饥饿铜绿微囊藻生长的影响	岳冬梅, 李洁, 肖琳 (4220)
氯灭活地下水源中 3 种优势真菌的效能与机制	文刚, 朱红, 黄廷林, 赵建超, 任巍, 徐向前 (4228)
净水工艺对饮用水中微生物多重耐药性的影响与分析	马晓琳, 陆洋, 王钰, 侯誉, 白晓慧 (4235)
单过硫酸氢钾复合粉在饮用水消毒过程中的副产物生成特性及遗传毒性变化	敖秀玮, 李豪杰, 刘文君, 余京儒 (4241)
三维有序介孔 Co ₃ O ₄ 非均相活化单过硫酸氢钾降解罗丹明 B	冯善方, 邓思萍, 杜嘉雯, 马晓雁, 卢遇安, 高乃云, 邓靖 (4247)
调控絮体形态强化电絮凝减缓膜污染	赵凯, 杨春风, 孙境求, 李静, 胡承志 (4255)
初始 pH 值对序批式 CANON 工艺脱氮效果和 N ₂ O 释放的影响	付昆明, 王会芳, 苏雪莹, 周厚田 (4261)
3DBER-S-Fe 同步脱氮除磷及去除邻苯二甲酸酯的工艺特性	张娅, 郝瑞霞, 徐鹏程, 徐忠强 (4268)
基于反硝化脱氮的硫铁复合填料除磷机制	范军辉, 郝瑞霞, 李萌, 朱晚霞, 万京京 (4275)
基于 ABR-MBR 组合工艺优化反硝化除磷性能的研究	程朝阳, 赵诗惠, 吕亮, 吴鹏, 沈耀良 (4282)
中常温变化对 PN-ANAMMOX 联合工艺脱氮效果的影响	袁砚, 朱亮 (4289)
生物活性炭对不同 C/N 比废水同步硝化反硝化脱氮效果的影响	崔延瑞, 邱鑫, 张庆荣, 王琦, 吴青, 孙剑辉 (4296)
ANAMMOX 菌利用零价铁还原硝酸盐脱氮研究	周健, 完颜德卿, 黄勇, 刘忻, 袁怡, 李祥, 姚鹏程, 杨朋兵, 薛鹏程 (4302)
间歇曝气 SBR 与传统 SBR 处理养猪沼液的比较研究	董宝刚, 宋小燕, 刘锐, 川岸朋树, 张永明, 陈吕军 (4309)
应用解蛋白菌生物预水解剩余污泥	何晶晶, 王颖, 胡洁, 吕凡, 邵立明 (4317)
应用环境多介质逸度模型研究废旧电器拆解区多溴联苯醚的迁移及归趋	薛南冬, 陈宣宇, 杨兵, 秦普丰, 龙雨 (4326)
南宁市多环境介质中多环芳烃分布特征	苗迎, 孔祥胜 (4333)
杭州城区室内灰尘中多溴联苯醚的含量及人体暴露水平	金漫彤, 滕丹丹, 郑艳霞, 胡张璇, 沈学优, 金赞芳 (4341)
应用线性自由能关系估算药用活性化合物的生物碳质-水吸附系数	王佳怡, 毕二平 (4349)
表流湿地细菌群落结构特征	魏佳明, 崔丽娟, 李伟, 雷茵茹, 于菁菁, 秦鹏, 穆泳林, 梁钊瑞 (4357)
城市污水中硝化菌群落结构与性能分析	于莉芳, 杜倩倩, 傅学焘, 张茹, 李文江, 彭党聪 (4366)
DNA 和 cDNA 水平对比研究施肥对稻田土壤细菌多样性的影响	王聪, 吴讷, 侯海军, 汤亚芳, 沈健林, 秦红灵 (4372)
培养条件下双酚 A 对稻田土壤微生物群落特征的影响	刘畅, 黄雅丹, 张莹, 靳振江, 梁月明, 宋昂, 王腾, 郭佳怡, 李强 (4380)
1 株兼具好、厌氧汞甲基化能力细菌的分离鉴定	陶兰兰, 向玉萍, 王定勇, 黄曼琳, 申鸿 (4389)
北京地区菜田土壤抗生素抗性基因的分布特征	张兰河, 王佳佳, 哈雪姣, 邱孟超, 高敏, 仇天雷, 王旭明 (4395)
梅花鹿养殖场抗生素抗性基因分布特征	黄福义, 安新丽, 陈青林, 任红云, 苏建强 (4402)
几种高硅质矿物细颗粒的 A549 细胞毒性对比	霍婷婷, 董发勤, 邓建军, 张青碧, 贺小春, 孙东平 (4410)
添加复合吸附剂对土壤吸附菲和 Cr(VI) 的影响	李文斌, 孟昭福, 吴琼, 许绍娥, 刘泽 (4419)
生物炭对西北黄土吸附壬基酚的影响	张振国, 蒋煜峰, 慕仲锋, 孙航, 周琦, 展惠英 (4428)
集雨种植下不同沟垄比对土壤呼吸的影响及其对水热因子的响应	王昌江, 施成晓, 冯帆, 陈婷, 张磊, 吕晓康, 王伟, 廖允成 (4437)
秸秆还田与化肥减量配施对稻-菜轮作下土壤养分及酶活性的影响	黄容, 高明, 万毅林, 田冬, 陶睿, 王芳丽 (4446)
《环境科学》征稿简则 (4161) 《环境科学》征订启事 (4365) 信息 (4123, 4132, 4409)	

山西省人为源 VOCs 排放清单及其对臭氧生成贡献

闫雨龙¹, 彭林^{1,2*}

(1. 太原理工大学环境科学与工程学院, 太原 030024; 2. 华北电力大学环境与化学工程系, 北京 102206)

摘要: 根据统计年鉴中主要的人为挥发性有机物 (VOCs) 排放源的行业活动水平和文献中查阅到的 VOCs 排放因子和组分特征, 计算了山西省 2013 年的人为源 VOCs 的排放量, 计算了臭氧生成潜势。计算结果显示山西省 2013 年人为源 VOCs 排放量为 72.37 万 t, 最主要的排放行业是工业排放源和移动源, 分别占总排放量的 36.47% 和 24.28%; 在工业源中, 焦炭生产和化学品生产的 VOCs 排放量分别为 19.06 万 t 和 3.88 万 t, 分别占工业排放行业总排放量的 72.22% 和 14.72%, 是工业排放行业中最大的排放源; 2013 年山西省各个排放源排放的臭氧前驱 VOCs 共 43.59 万 t, 所产生的臭氧生成潜势总量为 176.99 万 t, 对总臭氧生成潜势贡献最大的是移动源、燃烧源和工业排放, 分别占总臭氧生成潜势总量的 40.35%、26.43% 和 24.95%。结果表明: 煤化工行业 VOCs 排放量显示了山西省独特的以煤为主的单一化、重型化的产业结构; 机动车保有量快速增长导致了机动车的 VOCs 排放量巨大; 移动源和工业排放源排放的 VOCs 所产生的臭氧生成潜势巨大。总之控制山西省的 VOCs 排放及其带来的臭氧污染应主要关注于控制工业排放和机动车排放。

关键词: 挥发性有机物; 山西省; 排放清单; 煤化工行业; 臭氧生成潜势

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)11-4086-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201606055

Emission Inventory of Anthropogenic VOCs and Its Contribution to Ozone Formation in Shanxi Province

YAN Yu-long¹, PENG Lin^{1,2*}

(1. College of Environmental Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. School of Environment and Chemical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Based on the activity levels, emission factors and composition characteristics of VOCs, which was obtained in statistic data and references, the emission amount of anthropogenic VOCs in Shanxi province in 2013 was calculated, and the ozone formation potential of VOCs was studied in this study. The results showed that the emission amount of anthropogenic VOCs in Shanxi province in 2013 was 723 700 t, with the major sector of the industrial emission and vehicle emission, accounting for 36.47% and 24.28% of total emission amount, respectively. Coke and chemicals production, the major emission source of VOCs in industrial emission, emitting 190 600 t and 38 800 t VOCs in 2013, accounting for 72.22% and 14.72% of industrial emission, respectively. The emission amount of ozone precursor VOCs was 435 900 t, and the total amount of ozone formation potential in Shanxi province in 2013 was 1 769 900 t. The sources of the greatest contribution to total ozone were vehicle emission, combustion sources and industrial emission. The results indicated that industrial emission was the major source of VOCs emission, which showed the simplification and heavy industrial structure. The increasing numbers of vehicles led to the huge emission of VOCs in recent years. In conclusion, the main measure of controlling the ozone pollution caused by VOCs emissions was controlling the VOCs emission from industrial emission and vehicle emission.

Key words: VOCs; Shanxi Province; emission inventories; coal chemical industry; ozone formation potential

挥发性有机物 (VOCs) 是对流层臭氧光化学反应重要的前体物, 能与空气中的其他化合物、自由基进行反应, 能导致空气中的臭氧和其他二次污染物的产生^[1,2]。而一些 VOCs 化合物, 如 1,3-丁二烯和苯等化合物都已经被证明是空气中的毒害污染物, 会对人体产生危害^[3]。制定人为源 VOCs 的排放清单是研究空气中的 VOCs 浓度分布、排放治理和总量控制的前提。目前, 我国的 VOCs 清单编制工作主要采用“自上而下”方法, 研究对象集中于国家层面、经济发达地区或某个特定污染源, 对 VOCs 的防控和区域污染模拟等研究开展极具有意义^[4~10]。对 VOCs 中

的关键组分的排放研究, 有利于了解 VOCs 的环境效应, 对了解区域环境的臭氧污染来源和有目的性的管控 VOCs 排放有重要意义^[2,11]。

山西省是我国的煤炭资源储存和利用大省, 以能源、冶金为代表的重工业发达。省内的太原市等地的环境空气中 VOCs 研究表明, 机动车排放、溶剂挥发、燃料挥发和工业排放等排放源对城市环境

收稿日期: 2016-06-10; 修订日期: 2016-06-28

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41173002, 41373008)

作者简介: 闫雨龙 (1986~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为大气污染及控制, E-mail: yanyulong@yeah.net

* 通讯联系人, E-mail: penglin6611@163.com

空气质量产生影响^[12]。目前对山西省人为源 VOCs 的详细清单编制已有部分研究,但普遍存在分类不完善、分辨率低的问题^[4~7],且研究中对生成臭氧的 VOCs 组份的排放量及环境影响尚未明确,这不利于有针对性地控制 VOCs 排放和研究臭氧污染。本文将以 2013 年为基准年,以统计年鉴和文献中的数据为行业活动数据为基础,结合国内外排放因子和组分特征等研究成果,建立山西省的人为源 VOCs 排放清单和主要组分排放量,并研究不同排放源对臭氧生成的贡献,以期对山西省的 VOCs 控制提供科学依据,对管控臭氧污染有指导意义。

1 材料与方法

1.1 排放清单的估算方法

按污染源性质的不同,本研究根据 VOCs 的排放过程和国内其他文献上的分类方法^[4~10],结合山西省的产业特点,将山西省的 VOCs 人为源划分为燃烧源、溶剂使用源、工业排放源、移动源、油气储运源和居民生活源六大类,并在每一小类内对 VOCs 的排放进行了细化小类的研究,具体各行业内的排放源列于表 1。

对 VOCs 排放量估算采用排放因子法,估算公式为:

$$E_i = A_i \times EF_i \quad (1)$$

式中, E_i 代表 i 类的 VOCs 排放量; A_i 代表污染源 i 的活动水平; EF_i 代表排放源 i 的排放因子。

1.1.1 各行业的活动水平统计

(1) 燃烧源 本研究中燃烧源主要分为生物质燃烧和化石燃料两类。生物质燃烧的活动水平是根据农作物产量^[13]或森林生物量^[8]和谷草比^[14]或燃烧比例^[9]计算得出。化石燃料燃烧的活动水平为各类燃料的消费量,具体数据来源于文献^[15]。

(2) 溶剂使用源 溶剂使用过程中的活动水平是指溶剂使用量,计算方法是基于涂料、印刷用溶剂、胶粘剂等溶剂在各主要应用行业的全国消费水平和不同情境下的使用量增长^[16],再利用分省分配指标得到山西省各行业的涂料消费量^[4,6,17],使用的统计数据来源于文献^[13,18,19]中获取。

(3) 工业排放源 工业排放源的活动水平是指生产工业产品的产量或废物处理量,数据主要来源于文献^[18~23]。

(4) 移动源 本研究将移动源分为道路移动源和非道路移动源。道路移动源包括摩托车、轻型客车、重型客车、轻型货车、重型货车等,活动水平是

指该类机动车的行驶公里数,由机动车的保有量^[18]和机动车单车年均行驶里程^[10,24]进行计算。非道路移动源主要是指农用机械和工程机械。该类源的 VOCs 排放量估计主要通过消耗的油品量^[14]进行估算。

(5) 油气储运源 本研究中油气储运源是指石油类产品在生产、运输和销售过程中的 VOCs 排放源,活动水平是指山西省的该类型油类的消费量,数据来自文献^[15]。

(6) 居民生活源 居民生活源是指居民在生活过程中的 VOCs 排放,本研究中对其统计的活动水平主要包括谷物产量、农药年消耗量和人口数量^[18]。

1.1.2 排放因子的确定

在使用“自上而下”方法计算 VOCs 排放清单的研究中,采用的排放因子主要使用的是欧美等发达国家的排放因子数据。为进一步切合我国的排放实际情况,本研究尽量收集符合我国实际情况的排放因子,我国未进行研究或研究成果未得到广泛使用的排放因子数据将参考国外的排放因子数据和相关研究来选取(表 1)。

1.2 臭氧前驱 VOCs 各组分排放量及其臭氧生成潜势

本研究中按照美国环保署建议,将参与光化学反应并生成臭氧的化合物视为臭氧前驱 VOCs,含有 29 种烷烃化合物、10 种烯烃(含乙炔)、16 种芳香烃化合物、3 种羰基化合物^[42]。本研究中对参与臭氧生成的 58 种化合物定义为臭氧前驱 VOCs,排放量的计算方法如下:

$$E_{ij} = E_i \times P_{ij} \quad (2)$$

式中, E_{ij} 为第 i 种源中第 j 种化合物的排放量,万 t; E_i 为第 i 种源中 VOCs 的排放总量,万 t; P_{ij} 为第 i 种源中第 j 种化合物在 VOCs 中比例,%。VOCs 的组成比例(源谱)是研究 VOCs 各组分排放量的重要参数。但在目前的各种研究中该参数不易获取,尤其是在我国污染源排放实测基础上的数据更难查询。基于此,本研究尽量选取收集符合我国实际情况的组成特征,并参考了国外的污染源排放 VOCs 的组成比^[6,11,33,43,44]。

由于不同臭氧前驱 VOCs 化合物之间的光化学反应活性差异较大,导致其对臭氧的生成贡献也有较大差异。为研究排放的不同臭氧前驱 VOCs 化合物对臭氧生成的贡献,本研究使用臭氧生成潜势(ozone production potential, OFP)的方法来计算。

表 1 各排放源的 VOCs 排放因子/kg·t⁻¹
Table 1 VOCs emissions factors of various emission sources/kg·t⁻¹

行业	排放源	燃料或产品类型	排放因子	行业	排放源	燃料或产品类型	排放因子	
燃烧源	生物质燃烧	露天燃烧 ^[25]	9.74	工业排放		泡沫塑料 ^[6]	770	
		薪柴燃烧 ^[26]	10.56			农药 ^[35]	20	
		森林火灾 ^[25]	10.30			纺织业	合成纤维 ^[26]	73.4
	电力燃烧	煤 ^[27]	0.15			合成橡胶 ^[31]	7.17	
		工业燃烧	煤 ^[27]		0.18	食品生产	植物油 ^[31]	2.45
	燃料油 ^[27]		0.19		酒精 ^[34]		20 ^e	
		液化石油气 ^[28]	6.51			烈酒 ^[2]	25.35 ^e	
		天然气 ^[27]	0.18 ^a			葡萄酒 ^[31]	0.38 ^e	
		煤气 ^[27]	0.000 44 ^a			啤酒 ^[2]	0.44 ^e	
		柴油 ^[27]	0.15		废物处理	填埋 ^[34]	0.23	
	供热燃烧	煤 ^[27]	0.18				焚烧 ^[34]	0.74
		生活燃烧	煤 ^[27]		0.6	水泥生产	水泥 ^[31]	0.1
	燃料油 ^[27]		0.15		钢铁生产		粗钢 ^[31]	0.15
		液化石油气 ^[28]	6.51				生铁 ^[36]	0.2
		天然气 ^[27]	0.18 ^a		焦炭生产			
		煤气 ^[27]	0.000 44 ^a			焦炭 ^[31]	2.1	
		柴油 ^[27]	0.15					
溶剂使用	建筑涂料	内墙涂料 ^[29]	180	移动源	重型货车 ^[37]		0.8 ^d	
		外墙涂料 ^[29]	580		轻型货车 ^[37]		1.2 ^d	
	汽车涂料	制造涂料 ^[29]	479		重型客车 ^[37]		6.5 ^d	
		修补涂料 ^[29]	720		轻型客车 ^[37]		1.5 ^d	
	印刷排放	溶剂使用 ^[30]	800		摩托车 ^[37]		0.8 ^d	
		合成革制造	溶剂使用 ^[29]		196	农用汽油 ^[6]		91.5
	木器涂料	装修木器涂料 ^[29]	640	农用柴油 ^[6]		18.3		
		木器家具涂料 ^[29]	640	工程机械 ^[6]		18.3		
	其他工业涂料使用	涂料使用 ^[29]	235	油气储运源	卸油过程损失	汽油 ^[38]	1.16	
		胶粘剂	制鞋与皮革胶粘剂 ^[6]		670		柴油 ^[27]	0.1
		建筑建材胶粘剂 ^[6]	62		储罐呼吸损失	汽油 ^[39]	0.16	
		其他胶粘剂 ^[6]	90			柴油 ^[40]	0.034	
	造纸业生产	纸制品 ^[31]	2		加注过程	汽油 ^[40]	1.74	
化学品生产		合成氨 ^[31]	4.72				柴油 ^[40]	0.1
工业排放	工业过程	甲醇 ^[32]	5.95	加注过程溢出损失	汽油 ^[40]	0.11		
		化学药品原料 ^[33]	114.14		油库储存	汽油 ^[40]	0.16	
			轮胎制造 ^[34]	0.285 ^b	生活源	烹饪 ^[6]		3.5 ^e
			油墨生产 ^[34]	30		干洗 ^[31]		120 ^e
			医药制造 ^[6]	430		谷物干燥 ^[41]		1.3
			合成洗涤剂 ^[31]	0.025		农药使用 ^[41]		0.95
			塑料 ^[26]	2.2		家庭溶剂(城市) ^[30]		500 ^e
			家庭溶剂(农村) ^[30]		100 ^e			

1) 上标 a 表示单位为 mg·m⁻³; b 表示单位为 kg·条⁻¹; c 表示单位为 g·L⁻¹; d 表示单位为 g·km⁻¹; e 表示单位为 g·(人·a)⁻¹

计算公式如下:

$$OFP_{ij} = MIR_i \times E_{ij} \tag{3}$$

式中,OFP_{ij}为第*i*种源中第*j*种化合物的臭氧生成潜势(以O₃计),万t; MIR_{*i*}为第*i*种化合物的最大臭氧生成潜势^[45],以O₃/VOCs计,g·g⁻¹.

2 结果与讨论

2.1 山西省 2013 年 VOCs 的排放清单

山西省 2013 年人为源 VOCs 排放量为 72.37

万 t,各类排放源的排放量所占比例如图 1 所示. 工业排放源和移动源是山西省 VOCs 排放的最主要的两个来源,分别占总 VOCs 排放量的 36.47% 和 24.28%; 其次是燃烧源和溶剂使用源,贡献最低的是居民生活源和油气储运源. 与其他省份相比,山西省 2013 年人为源 VOCs 排放量(72.37 万 t)高于 2010 年北京市人为污染源 VOCs 排放量(39.8 万 t)^[4]、2011 年四川省典型人为污染源 VOCs 排放量(48.2 万 t)^[17],低于 2010 年江苏省人为源 VOCs 排

放量(179.20 万 t)^[35]、2010 年江苏省人为污染源 VOCs 排放量(250.4 万 t)^[4],与 2010 年黑龙江人为污染源 VOCs 排放量(74.5 万 t)^[4]相当。

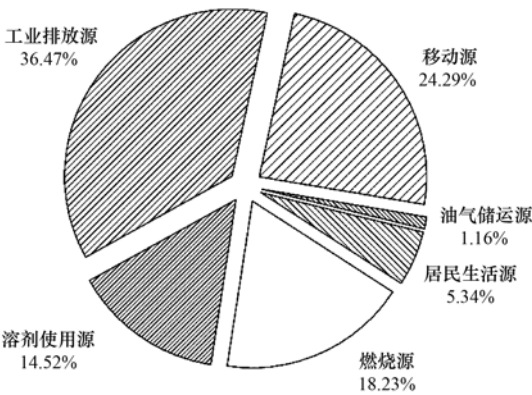


图 1 山西省各行业 VOCs 排放所占比例
Fig. 1 Contribution of VOCs emission sources by sectors in Shanxi Province

焦炭生产和化学品生产(含合成氨、甲醇生产和化学药品生产等排放源)是 VOCs 排放量最高的工业行业,2013 年排放量分别为19.06 万 t 和3.88

万 t,分别占工业排放行业排放总量的72.22%和14.72%(表 2),其中焦炭生产是最大的 VOCs 单一排放源,占 VOCs 排放总量的 22.15%。医药制造、烈酒制造、水泥生产和钢铁生产过程中均也排放了大量的 VOCs,年排放量均在 1 万 t 以上。山西省作为我国的焦炭生产量最大的省份,2013 年焦炭年产量为 9 076.82 万 t,占当年全国总产量的 18.94%^[13]。山西省煤化工行业发达,合成氨和甲醇生产都是煤化工过程中的产物,2013 年以合成氨的产量为 519.80 万 t,约占全国 9.05%;煤制甲醇和焦炉煤气制精甲醇的年产量为 216 万 t,约占全国 7.52%^[21]。山西省每年因合成氨和甲醇的 VOCs 排放量为 2.46 万 t 和 1.29 万 t,占排放总量的 3.40%和 1.78%。以焦炭生产、化学品生产为代表的工业排放成为山西省主要的 VOCs 排放源显示了山西省以重工业为主的产业特征。煤化工行业的高 VOCs 排放量在之前其他省份的研究中均未发现,这显示了山西省独特的产业特点。

表 2 工业行业的 VOCs 排放清单 ×10⁴/t
Table 2 VOCs emissions inventory of different sections of industry ×10⁴/t

行业	排放源	排放量	行业	排放源	排放量
造纸业	造纸	0.07	食品	植物油生产	0.07
化学品生产	合成氨	2.46		酒精制造	0.01
	甲醇生产	1.29		烈酒制造	0.28
	化学药品生产	0.14		葡萄酒制造	9.19E-05
				啤酒制造	0.02
工艺加工	轮胎制造	0.05	废物处理	废物填埋	0.05
	油墨生产	0.09		废物焚烧	0.10
	医药制造	0.63	水泥	水泥生产	0.53
	合成洗涤剂	2.71E-04	钢铁	粗钢生产	0.65
	塑料生产	0.06		生铁生产	0.81
	农药生产	1.00E-03	焦炭	焦炭生产	19.06
纺织业	合成纤维	0.02			
	合成橡胶	0.01			

作为移动源中最主要排放源的道路移动源,轻型客车和重型客车是最重要的 VOCs 排放源,排放量分别占移动源的 50.74%和 18.38%。非道路移动源中最主要的排放源是农用汽油机械的排放(年排放量 1.58 万 t)。山西省近些年来的机动车数量迅速增加,从 2000 年的 55.01 万辆增长到 2013 年的 317.56 万辆,年均增长率为 14.44%^[18]。快速增长导致了机动车排放到空气中的污染物量大,对空气质量(尤其是城市环境空气质量)造成了极大影响,是造成城市环境污染的主要问题。燃烧源排放 VOCs 最多的源是生物质燃烧排放,占燃烧源排

放总量的 76.98%,与魏巍^[6]在全国的研究比例相一致。生物质燃烧排放中最主要是薪柴燃烧和野外燃烧,2013 年排放 VOCs 的量分别达到 7.73 万 t 和 2.38 万 t。生物质燃的 VOCs 烧排放量大的主要原因是广大农村地区的能源结构和生活方式影响。山西省的主要粮食作物为玉米,大量的秸秆在广大农村地区被焚烧或者作为薪柴在家中用来做饭、取暖。电力生产排放的 VOCs 占燃烧源排放总量的 13.14%,是 VOCs 的重要煤炭燃烧排放来源。丰富的煤炭资源使山西省的发电量一直位居全国前列,2013 年全省火力发电共耗煤11 554.8

万 t,发电量达2 641 亿 kW·h^[15]. 虽然耗煤量巨大,但由于发电过程中煤炭燃烧充分,VOCs 排放量只占 VOCs 排放总量的 2.39%. 溶剂使用源中主要的排放源是木器涂料、建筑涂料和和其他工业涂料的使用,每个排放源的 2013 年排放量均超过 1 万 t. 生活排放源中 VOCs 排放量最大的是谷物干燥过程和家庭溶剂使用,年排放量为 1.62 万 t 和 1.13 万 t.

为反映该研究排放清单结果与相关研究之间的差异,选取之前的 2000 年、2007 年和 2010 年针对

山西省 VOCs 排放清单的研究与本研究进行对比 (表 3 所示). 本研究与之前研究最主要的差别体现在燃烧源、溶剂使用和工业排放的 VOCs 量明显高于之前研究. 造成本研究排放量较大的原因一方面是因为从 2000 年至 2013 年之间各行业的活动水平有逐步的提升;另一方面是本研究中在对行业分类时更加全面、分类更细,如考虑了燃烧源中的生活用燃料油、柴油等污染源的排放,也考虑了生活源中的烹饪、城乡分开的家用溶剂使用等过程的 VOCs 排放.

表 3 本研究 VOCs 排放清单与其他研究的对比 ×10⁴/t

Table 3 Comparison of VOCs emission inventory in this study and other studies ×10⁴/t

年份	排放行业及排放量						总排放量
2000 年 ^[5]	固定燃烧源	溶剂使用	工艺过程	流动源	石油精炼及运储	混杂源	总排放量
	4.2	2.4	8.7	6.7	0.6	0.6	23.2
2007 年 ^[7]	固定源燃烧	溶剂应用	化工产储源	交通源	石油储运和精炼	混杂源	总排放量
	19.79	5.95	2.8	8.3	1.72	5.84	44.39
2010 年 ^[4]	固定燃烧	溶剂使用	工艺过程	移动源	储存和运输	—	总排放量
	14	4.5	18.7	13.5	0.4	—	51.1
2013 年(本研究)	燃烧源	溶剂使用源	工业排放源	移动源	油气储运源	居民生活源	总排放量
	13.19	10.51	26.39	17.58	0.84	3.86	72.37

2.2 臭氧前驱 VOCs 的排放及其臭氧生成

2013 年山西省人为源排放的 VOCs 中含有 58 种臭氧前驱 VOCs 化合物共 37.99 万 t, 占总 VOCs 排放量的 52.49%. 其中,燃烧源、溶剂使用源、工业排放源、移动源、油气储运源和居民生活源排放的臭氧前驱 VOCs 化合物分别为 8.16、3.24、12.25、13.70、0.48 和 0.16 万 t, 分别占各行业 VOCs 排放量的 61.85%、30.84%、46.41%、77.94%、57.31% 和 4.14%. 烷烃、芳香烃和烯烃是最重要的化合物类别,分别占总臭氧前驱 VOCs 的 44.49%、29.98% 和 20.58% (图 2). 苯、正丁烷、甲苯和乙烯等化合物是排放量最大的化合物.

其中排放量最大的苯全年排放量达到 3.45 万 t, 主要来源是焦炭生产、生物质燃烧和机动车排放.

2013 年山西排放的臭氧前驱 VOCs 所产生的 OFP 总量为 143.46 万 t, 单位质量的臭氧前驱 VOCs 生成的 OFP 为 3.78. 在臭氧前驱 VOCs 中所产生的 OFP 中,烯烃、芳香烃、烷烃和羰基化合物所产生的 OFP 分别占 OFP 总量的 42.97%、35.35%、13.43% 和 8.25% (图 3). 其中,烯烃由于其具有较大的 MIR 值,单位质量的烯烃生成的 OFP 达到 7.88,高于羰基化合物(6.30)、芳香烃(4.45)和烷烃(1.14). 对总 OFP 贡献最大的是乙烯,其 OFP 为 26.53 万 t, 占总量的 18.50%, 其次是丙烯(16.27

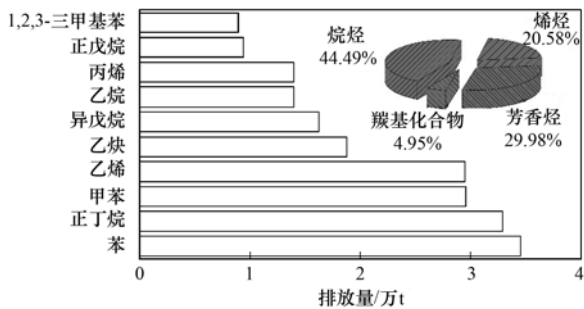


图 2 排放量前十的臭氧前驱 VOCs 化合物及各种类化合物的比例

Fig. 2 Top 10 abundant ozone precursors VOCs species and percentages of individual groups species

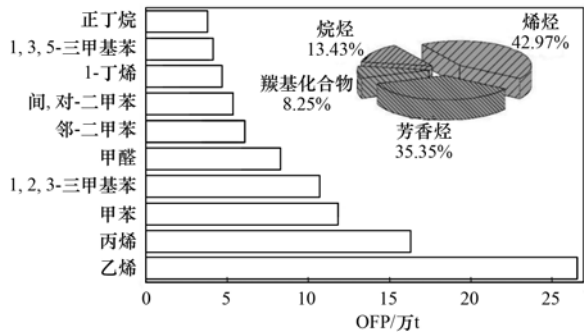


图 3 OFP 生成量前十的臭氧前驱 VOCs 化合物及各种类化合物的生成比例

Fig. 3 Top 10 OFP producing ozone precursors VOCs species and percentages of individual groups species

万 t, 11.35%), 其他如甲苯、1,2,3-三甲基苯和甲醛等化合物对总 OFP 的贡献亦均大于 5% (图 3)。

表 4 为各行业的排放源的 OFP 生成情况。对总 OFP 贡献最大的是移动源, 生成的 OFP 达到 57.89 万 t, 对总 OFP 的贡献达到 40.35%。由于机动车大量集中在城市地区, 其对人口密集的城市地区造成的臭氧污染等环境影响应该引起重视。燃烧排放的臭氧前驱 VOCs 生成的 OFP 占总 OFP 的 26.43%, 仅次于移动源。其中, 最主要的两个 OFP 来源是生物质燃烧和电力燃煤排放的臭氧前驱 VOCs 生成的, OFP 分别为 31.24 万 t 和 2.93 万 t。虽然生物质燃烧排放

的臭氧前驱 VOCs 生成的 OFP 较大, 但其主要发生在偏远农村或者荒山地区, 对人口密集的城市地区的环境影响有限。工业排放的臭氧前驱 VOCs 生成的 OFP 达到 24.95 万 t, 其中最主要的排放源是焦炭生产 (OFP 达到 23.56 万 t, 占工业排放生成 OFP 的 65.81%)。一般来讲, 为方便焦炉煤气的使用多将焦化厂建在城市周边, 其对城市环境造成的影响较大。电力生产排放、工业燃烧排放、建筑涂料、合成革制造、木器涂料、化学品生产、钢铁业生产、油品挥发等源排放的臭氧前驱 VOCs 生成的 OFP 也均超过 1 万 t, 对环境产生的影响应引起重视。

表 4 各排放源排放的臭氧前驱 VOCs 的 OFP 生成量 $\times 10^4/t$

Table 4 OFP production of ozone precursors VOCs from individual emission source ×10 ⁴ /t							
行业	排放源	OFP	OFP 合计	行业	排放源	OFP	OFP 合计
燃烧	生物质燃烧	31.24	37.93	工业排放	造纸业	0.03	35.80
	电力生产	2.93			化学产品生产	5.47	
	工业排放	2.42			工艺加工	0.53	
	供热排放	0.52			纺织业	0.00	
	生活排放	0.82			橡胶业	0.11	
溶剂使用	建筑涂料	1.09	9.72		食品业	0.19	
	汽车涂料	0.1			废物处理	0.26	
	印刷排放	0.84			水泥生产	0.03	
	合成革制造	1.15			钢铁生产	5.63	
	木器涂料	2.92			焦炭生产	23.56	
	其他工业涂料	2.80		移动源	机动车排放	57.89	57.89
	胶粘剂	0.84		油品挥发	油品挥发	1.47	1.47
				生活排放	生活排放	0.64	0.64
			合计		143.46		

2.3 不确定性研究

在对山西省的 VOCs 排放清单和臭氧前驱 VOCs 组分排放量估算过程中, 可能会出现不确定性的因素主要有: ①活动水平数据选取: 本研究选取的活动水平数据均来自于相关的统计年鉴, 但部分数据只能找到国家水平, 需要通过“分省分配指标”进行处理, 有少数行业数据来源于相关研究的预测, 从而使活动水平的不确定性大大增强^[4,6]; ②排放因子选择的不确定性: 本研究中所用的排放因子数据大多来自于国外的相关研究, 但国内外的生产工艺与污控技术差异大, 排放实际情况有较大差别, 这就造成了使用对 VOCs 的排放清单估计过程中的不确定性较大^[2,4,6]; ③臭氧前驱 VOCs 源谱的不确定性: 本研究使用的 VOCs 源谱来源于国内、国外的多项研究, 污染源排放臭氧前驱 VOCs 的实际情况可能由于活动水平、生产技术、污控技术等原因导致排放的 VOCs 组分特征差异较大^[11,46]。解决上述不确定性的主要方法除了要不断细化分行业统计数据外, 还需要建立适合我国国情

的排放因子数据库和源谱数据库。

3 结论

(1) 山西省 2013 年人为源 VOCs 排放量约为 72.37 万 t, 工业排放源和移动源是最主要的两个来源, 分别占总 VOCs 排放量的 36.47% 和 24.28%。工业源中焦炭生产和化学产品生产是 VOCs 排放量最高的行业, 排放量分别为 19.06 万 t 和 3.88 万 t。移动源中最主要排放源是轻型客车和重型客车, 分别占移动源的 50.74% 和 18.38%。

(2) 58 种臭氧前驱 VOCs 化合物人为源排放共 37.99 万 t, 占总 VOCs 排放量的 52.49%。其中苯、正丁烷、甲苯和乙烯等化合物是排放量最大的化合物。排放量最大的苯全年排放量达到 3.45 万 t, 占臭氧前驱 VOCs 排放量的 9.08%。

(3) 人为排放的臭氧前驱 VOCs 所产生的 OFP 总量为 143.46 万 t, 对总 OFP 贡献最大的化合物是乙烯和丙烯等, 分别占 18.50% 和 11.35%; 移动源和工业排放源排放的 VOCs 所产生的臭氧生成潜势

巨大,分别占总 OFP 的 40.35% 和 24.95%。

(4) 丰富的煤炭资源和行业特点导致煤化工行业的 VOCs 排放量很高,机动车保有量快速增长导致了机动车的 VOCs 排放量巨大;工业排放源和移动源 VOCs 排放量巨大导致了其产生巨量的臭氧生成潜势,从而会对环境造成影响;控制环境大气中的臭氧污染应加强工业排放源和移动源的 VOCs 排放控制。

参考文献:

- [1] Prinn R G, Weiss R F, Fraser P J, *et al.* A history of chemically and radiatively important gases in air deduced from ALE/GAGE/AGAGE[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984-2012), 2000, **105**(D14): 17751-17792.
- [2] 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.
- [3] USEPA. Integrated risk information system [EB/OL]. Washington, DC: USEPA, 2014. <http://www.epa.gov/iris/>, 2016-04-15.
- [4] 龚芳. 我国人为源 VOCs 排放清单及行业排放特征分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2013.
Gong F. Anthropogenic volatile organic compounds emission inventory and characteristics [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2013.
- [5] 刘金凤, 赵静, 李涵涵, 等. 我国人为源挥发性有机物排放清单的建立[J]. *中国环境科学*, 2008, **28**(6): 496-500.
Liu J F, Zhao J, Li T T, *et al.* Establishment of Chinese anthropogenic source volatile organic compounds emission inventory[J]. *China Environmental Science*, 2008, **28**(6): 496-500.
- [6] 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.
Wei W. Study on current and future anthropogenic emissions of volatile organic compounds in China [D]. Beijing: Tsinghua University, 2009.
- [7] 范辞冬, 王幸锐, 王玉瑶, 等. 中国人类活动源非甲烷挥发性有机物 (NMVOC) 排放总量及分布[J]. *四川环境*, 2012, **31**(1): 82-87.
Fan C D, Wang X R, Wang Y Y, *et al.* Anthropogenic total emissions and distribution of non-methane volatile organic compounds in China[J]. *Sichuan Environment*, 2012, **31**(1): 82-87.
- [8] 陆炳, 孔少飞, 韩斌, 等. 2007 年中国大陆地区生物质燃烧排放污染物清单[J]. *中国环境科学*, 2011, **31**(2): 186-194.
Lu B, Kong S F, Han B, *et al.* Inventory of atmospheric pollutants discharged from biomass burning in China continent in 2007[J]. *China Environmental Science*, 2011, **31**(2): 186-194.
- [9] 田贺忠, 赵丹, 王艳. 中国生物质燃烧大气污染物排放清单[J]. *环境科学学报*, 2011, **31**(2): 349-357.
Tian H Z, Zhao D, Wang Y. Emission inventories of atmospheric pollutants discharged from biomass burning in China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, **31**(2): 349-357.
- [10] 宋翔宇, 谢绍东. 中国机动车排放清单的建立[J]. *环境科学*, 2006, **27**(6): 1041-1045.
Song X Y, Xie S D. Development of vehicular emission inventory in China[J]. *Environmental Sciences*, 2006, **27**(6): 1041-1045.
- [11] 李锦菊, 伏晴艳, 吴冠名, 等. 上海大气面源 VOCs 排放特征及其对 O₃ 的影响[J]. *环境监测管理与技术*, 2009, **21**(5): 54-57.
Li J J, Fu Q Y, Wu Y M, *et al.* Characteristic of VOCs emission from atmospheric area sources in Shanghai and its contribution to O₃ [J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2009, **21**(5): 54-57.
- [12] 温彦平, 闫雨龙, 李丽娟, 等. 太原市夏季挥发性有机物污染特征及来源分析[J]. *太原理工大学学报*, 2016, **47**(3): 331-336.
Wen Y P, Yan Y L, Li L J, *et al.* Pollution characteristic and source analysis of volatile organic compounds in summer in Taiyuan[J]. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 2016, **47**(3): 331-336.
- [13] 国家统计局. 中国统计年鉴 2014[M]. 北京: 中国统计出版社, 2014.
National Statistics Bureau. China statistical yearbook: 2014 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2014.
- [14] 曹国良, 张小曳, 王亚强, 等. 中国区域农田秸秆露天焚烧排放量的估算[J]. *科学通报*, 2007, **52**(15): 1826-1831.
Cao G L, Zhang X Y, Wang Y Q, *et al.* Estimation of emissions from field burning of crop straw in China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, **53**(5): 784-790.
- [15] 国家统计局. 中国能源统计年鉴: 2014[M]. 北京: 中国统计出版社, 2015.
National Statistics Bureau. China energy statistical yearbook: 2014[M]. Beijing: China Statistics Press, 2015.
- [16] 龚翠凡. 我国大陆胶粘剂市场现状及发展预测[J]. *粘接*, 2008, **29**(1): 1-5.
Gong B F. Current situation and development forecast of adhesive market in China mainland[J]. *Adhesion in China*, 2008, **29**(1): 1-5.
- [17] 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.
- [18] 山西省统计局. 山西省统计年鉴: 2014[M]. 北京: 中国统计出版社, 2014.
Statistics Bureau of Shanxi Province. Shanxi statistical yearbook: 2014[M]. Beijing: China Statistics Press, 2014.
- [19] 中国轻工业联合会. 中国轻工业年鉴: 2014[M]. 北京: 中国轻工业年鉴社, 2014.
China Light Industry Association. China light industry yearbook: 2014[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2014.
- [20] 国家统计局. 中国工业统计年鉴: 2014[M]. 北京: 中国统计出版社, 2015.
National Statistics Bureau. China industry statistical yearbook: 2014[M]. Beijing: China Statistics Press, 2015.

- [21] 中国石油和化学工业联合会. 中国化学工业年鉴: 2014 [M]. 北京: 中国化工信息中心, 2015.
China Petroleum and Chemical Industry Association. China chemical industry yearbook: 2014 [M]. Beijing: China National Chemical Information Center, 2015.
- [22] 中国涂料工业协会. 中国涂料工业年鉴: 2014 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2015.
China Coating Industrial Association. China paint and coatings industry annual: 2014 [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2015.
- [23] 中国酒业协会. 中国酒业年鉴: 2012-2013 [M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2015.
China Alcoholic Drinks Association. Yearbook of China alcoholic drinks industry: 2012-2013 [M]. Beijing: China Light Industry Press, 2015.
- [24] 姚志良, 张明辉, 王新彤, 等. 中国典型城市机动车排放演变趋势[J]. 中国环境科学, 2012, **32**(9): 1565-1573.
Yao Z L, Zhang M H, Wang X T, *et al.* Trends in vehicular emissions in typical cities in China [J]. China Environmental Science, 2012, **32**(9): 1565-1573.
- [25] Wei W, Wang S X, Chatani S, *et al.* Emission and speciation of non-methane volatile organic compounds from anthropogenic sources in China [J]. Atmospheric Environment, 2008, **42**(20): 4976-4988.
- [26] Wang S X, Wei W, Du L, *et al.* Characteristics of gaseous pollutants from biofuel-stoves in rural China [J]. Atmospheric Environment, 2009, **43**(27): 4148-4154.
- [27] 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.
- [28] Zhang Y S, Shao M, Lin Y, *et al.* Emission inventory of carbonaceous pollutants from biomass burning in the Pearl River Delta Region, China [J]. Atmospheric Environment, 2013, **76**: 189-199.
- [29] 魏巍, 王书肖, 郝吉明. 中国涂料应用过程挥发性有机物的排放计算及未来发展趋势预测 [J]. 环境科学, 2009, **30**(10): 2809-2815.
Wei W, Wang S X, Hao J M. Estimation and forecast of volatile organic compounds emitted from paint uses in China [J]. Environmental Science, 2009, **30**(10): 2809-2815.
- [30] 余宇帆, 卢清, 郑君瑜, 等. 珠江三角洲地区重点 VOC 排放行业的排放清单 [J]. 中国环境科学, 2011, **31**(2): 195-201.
Yu Y F, Lu Q, Zheng J Y, *et al.* VOC emission inventory and its uncertainty from the key VOC-related industries in the Pearl River Delta Region [J]. China Environmental Science, 2011, **31**(2): 195-201.
- [31] USEPA. Emissions factors & AP 42. Compilation of air pollutant emission factors [EB/OL]. Washington, DC: USEPA, 2010.
<http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42/>.
- [32] 曹国良, 张小曳, 龚山陵, 等. 中国区域主要颗粒物及污染气体的排放源清单 [J]. 科学通报, 2011, **56**(3): 261-268.
Cao G L, Zhang X Y, Gong S L, *et al.* Emission inventories of primary particles and pollutant gases for China [J]. Chinese Science Bulletin, 2011, **56**(8): 781-788.
- [33] 陈颖, 叶代启, 刘秀珍, 等. 我国工业源 VOCs 排放的源头追踪和行业特征研究 [J]. 中国环境科学, 2012, **32**(1): 48-55.
Chen Y, Ye D Q, Liu X, *et al.* Source tracing and characteristics of industrial VOCs emissions in China [J]. China Environmental Science, 2012, **32**(1): 48-55.
- [34] Klimont Z, Streets D G, Gupta S, *et al.* Anthropogenic emissions of non-methane volatile organic compounds in China [J]. Atmospheric Environment, 2002, **36**(8): 1309-1322.
- [35] 夏思佳, 赵秋月, 李冰, 等. 江苏省人为源挥发性有机物排放清单 [J]. 环境科学研究, 2014, **27**(2): 120-126.
Xia S J, Zhao Q Y, Li B, *et al.* Anthropogenic Source VOCs Emission Inventory of Jiangsu Province [J]. Research of Environmental Sciences, 2014, **27**(2): 120-126.
- [36] 王玉珏, 黄天佑, 金亮君. 铸造业挥发性有机物与危险性空气污染物控制技术研究 [J]. 铸造, 2010, **59**(2): 128-133.
Wang Y J, Huang T Y, Jin L J. Control of volatile organic compound and hazardous air pollutant emission of foundry industry [J]. Foundry, 2010, **59**(2): 128-133.
- [37] 蔡皓, 谢绍东. 中国不同排放标准机动车排放因子的确定 [J]. 北京大学学报(自然科学版), 2010, **46**(3): 319-326.
Cai H, Xie S D. Determination of emission factors from motor vehicles under different emission standards in china [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2010, **46**(3): 319-326.
- [38] 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 (1984-2012), 2003, **108**(D21): 8809.
- [39] 羌宁. 全国石化行业 VOCs 排放特征研究报告 [R]. 上海: 同济大学, 2010.
- [40] 沈旻嘉, 郝吉明, 王丽涛. 中国加油站 VOC 排放污染现状及控制 [J]. 环境科学, 2006, **27**(8): 1473-1478.
Shen M J, Hao J M, Wang L T. VOC emission situation and control measures of gas station in China [J]. Environmental Science, 2006, **27**(8): 1473-1478.
- [41] EEA. EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook [EB/OL]. <http://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-emission-inventory-guidebook-2009/>.
- [42] USEPA. PAMS: enhanced ozone & precursor monitoring: chapter 4, PAMS: enhanced ozone & precursor monitoring [R]. Washington, DC: USEPA, 1996.
- [43] Hsu Y K, Divita F, Dorn J. SPECIATE 4. 4: speciation database development documentation [M]. Washington, DC: Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency, 2014.
- [44] He Q S, Yan Y L, Li H Y, *et al.* Characteristics and reactivity of volatile organic compounds from non-coal emission sources in China [J]. Atmospheric Environment, 2015, **115**: 153-162.
- [45] Carter W P L. SAPRC atmospheric chemical mechanisms and VOC reactivity scales [OB/EL]. 2010. www.cert.ucr.edu/~carter/SAPRC.
- [46] 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): 2179-2187.
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): 2179-2187.

CONTENTS

Air Pollutant Emission Inventory and Impact of Typical Industries on PM _{2.5} in Chengde	CHEN Guo-lei, ZHOU Ying, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (4069)
Pollution Characteristics and Emission Coefficient of Volatile Organic Compounds from Woodwork-making Industry in Zhejiang Province	YAO Yi, WANG Zhe-ming, HE Zhi-qiao, <i>et al.</i> (4080)
Emission Inventory of Anthropogenic VOCs and Its Contribution to Ozone Formation in Shanxi Province	YAN Yu-long, PENG Lin (4086)
Characteristics and Source Apportionment of VOCs of High Pollution Process at Chemical Industrial Area in Winter of China	GAO Song, CUI Hu-xiong, FU Qing-yan, <i>et al.</i> (4094)
Study and Application of Test Method for VOCs Emission Factor of Refueling in Service Station	HUANG Yu-hu, CHANG Yao-qing, REN Bi-qi, <i>et al.</i> (4103)
NH ₃ Emission Characteristics in Landfill Sites in Beijing	CUI Tong, LI Jin-xiang, YANG Yan-yan, <i>et al.</i> (4110)
Inventory and Characteristics of Anthropogenic Ammonia Emission in Xi'an	SU Hang, YAN Dong-jie, HUANG Xue-min, <i>et al.</i> (4117)
Pollution Characteristics of Non-methane Hydrocarbons During Winter and Summer in Foshan City	ZHOU Xue-ming, XIANG Ping, DUAN Jing-chun, <i>et al.</i> (4124)
Water-soluble Inorganic Ions in the Road Ambient Atmospheric Particles of Tianjin	ZHAO Meng-xue, WU Lin, FANG Xiao-zhen, <i>et al.</i> (4133)
Characteristics of Nitrogen Deposition in Daiyun Mountain National Nature Reserve	YUAN Lei, LI Wen-zhou, CHEN Wen-wei, <i>et al.</i> (4142)
Microbial Activity in Bioaerosols in Winter at the Coastal Region of Qingdao	MENG Xiang-bin, LI Meng-zhe, LI Hong-tao, <i>et al.</i> (4147)
Molecular and Carbon Isotopic Compositions of <i>n</i> -Alkanoic Acids in Smoke from Maize Straw Combustion	LIU Gang, SUN Li-na, XU Hui, <i>et al.</i> (4156)
Gas Transfer Velocity of CH ₄ at Extremely Low Wind Speeds	ZHANG Cheng, LÜ Xin-biao, LONG Li, <i>et al.</i> (4162)
Spectral Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter (DOM) from a Typical Reservoir Lake from Inland of Three Gorges Reservoir Areas: In the View of Riparian Ecosystem Analysis	CHEN Xue-shuang, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (4168)
Characteristics and Pollution Source Analysis of Nutrients in Tributary Outlets of Xitaoxi Watershed	CHEN Shi-wen, YUAN Xu-yin, JIN Jing, <i>et al.</i> (4179)
Analysis of Driving Factors on the Nitrogen Decrease in the Early Stage of the Thermal Stratification in Main Area of Zhoucun Reservoir	ZHANG Chun-hua, HUANG Ting-lin, FANG Kai-kai, <i>et al.</i> (4187)
Characteristics of Organic Phosphorus Fractions in the Sediments of the Black Water Aggregation in Lake Taihu	DONG Dan-ping, ZHANG Ting-xi, ZHANG Ding-yu, <i>et al.</i> (4194)
Impacts of Multiple Disturbance on Migration and Transformation of Endogenous Phosphorus in Lake	CAI Shun-zhi, LI Da-peng, WANG Ren, <i>et al.</i> (4203)
Change of Soil Nitrogen Leaching with Summer Maize Growing Periods Under Plastic Film Mulched Cultivation in Danjiangkou Reservoir Area, China	WANG Wei, YU Xing-xiu, HAN Qiang, <i>et al.</i> (4212)
Nutrients Recovery on the Growth of Nitrogen and Phosphorus Starved <i>Microcystis aeruginosa</i>	YUE Dong-mei, LI Jie, XIAO Lin (4220)
Inactivation Efficiency and Mechanism of Three Dominant Fungal Spores in Drinking Groundwater by Chlorine	WEN Gang, ZHU Hong, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (4228)
Effect of Water Treatment Process on the Bacterial Multidrug Resistance in Drinking Water	MA Xiao-lin, LU Yang, WANG Yu, <i>et al.</i> (4235)
Characteristics of Disinfection By-products and Genotoxicity During Drinking Water Disinfection with Potassium Monopersulfate Compound Powder	AO Xiu-wei, LI Hao-jie, LIU Wen-jun, <i>et al.</i> (4241)
Heterogeneous Activation of Peroxymonosulfate with Three-dimensional Ordered Mesoporous Co ₃ O ₄ for the Degradation of Rhodamine B	FENG Shan-fang, DENG Si-ping, DU Jia-wen, <i>et al.</i> (4247)
Enhanced Mitigation of Membrane Fouling by Regulations on Floc Morphology in Electrocoagulation	ZHAO Kai, YANG Chun-feng, SUN Jing-qiu, <i>et al.</i> (4255)
Effect of Initial pH on Nitrogen Removal Performance and N ₂ O Emission of a Sequencing Batch CANON Reactor	FU Kun-ming, WANG Hui-fang, SU Xue-ying, <i>et al.</i> (4261)
Operational Characteristics of the Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal and Removal of Phthalate Esters by Three-dimensional Biofilm-electrode Coupled with Iron/Sulfur Reactor	ZHANG Ya, HAO Rui-xia, XU Peng-cheng, <i>et al.</i> (4268)
Phosphorus Removal Mechanism of Sulfur/Sponge Iron Composite Fillers Based on Denitrification	FAN Jun-hui, HAO Rui-xia, LI Meng, <i>et al.</i> (4275)
Optimization of Denitrifying Phosphorus Removal Performance Based on ABR-MBR Combined Process	CHENG Chao-yang, ZHAO Shi-hui, LÜ Liang, <i>et al.</i> (4282)
Effect of Moderate and Room Temperature on Nitrogen Removal in PN-ANAMMOX Process	YUAN Yan, ZHU Liang (4289)
Influence of Biological Activated Carbon on Simultaneous Nitrification and Denitrification in Inflow with Different C/N Ratios	CUI Yan-ni, QIU Xin, ZHANG Qing-rong, <i>et al.</i> (4296)
Biotransformation of Nitrate to Nitrogen Gas Driven by ANAMMOX Microbes via Zero-valent Iron Under Anaerobic Conditions	ZHOU Jian, WANYAN De-qing, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4302)
A Comparative Study on Performance of an Intermittent Aeration SBR and a Traditional SBR for Treatment of Digested Piggery Wastewater	DONG Bao-gang, SONG Xiao-yan, LIU Rui, <i>et al.</i> (4309)
Biological Pre-treatment of Surplus Sludge Using the Protease-secreting Bacteria	HE Pin-jing, WANG Ying, HU Jie, <i>et al.</i> (4317)
Transfer and Fate of Polybrominated Diphenyl Ethers in an Electrical Equipment Dismantling Area Using a Multimedia Fugacity Model	XUE Nan-dong, CHEN Xuan-yu, YANG Bing, <i>et al.</i> (4326)
Distribution Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Environmental Media in Nanning City	MIAO Ying, KONG Xiang-sheng (4333)
PBDEs Levels in House Dust and Human Exposure to PBDEs via Dust Ingestion in Hangzhou	JIN Man-tong, TENG Dan-dan, ZHENG Yan-xia, <i>et al.</i> (4341)
Evaluating Biochar-Water Sorption Coefficients of Pharmaceutically Active Compounds by Using a Linear Free Energy Relationship	WANG Jia-yi, BI Er-ping (4349)
Characteristics of Bacterial Communities in Surface-flow Constructed Wetlands	WEI Jia-ming, CUI Li-juan, LI Wei, <i>et al.</i> (4357)
Community Structure and Activity Analysis of the Nitrifiers in Raw Sewage of Wastewater Treatment Plants	YU Li-fang, DU Qian-qian, FU Xue-tao, <i>et al.</i> (4366)
Effects of Fertilization on Soil Microbial Abundance and Community Structure at DNA and cDNA Levels in Paddy Soils	WANG Cong, WU Ne, HOU Hai-jun, <i>et al.</i> (4372)
Effects of Bisphenol A on Characteristics of Paddy Soil Microbial Community Under Different Cultural Conditions	LIU Chang, HUANG Ya-dan, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (4380)
Identification of a Facultative Bacterium Strain with the Ability to Methylate Mercury Under Both Aerobic and Anaerobic Conditions	TAO Lan-lan, XIANG Yu-ping, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4389)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Vegetable Soils in Beijing	ZHANG Lan-he, WANG Jia-jia, HA Xue-jiao, <i>et al.</i> (4395)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Sika Deer Farm	HUANG Fu-yi, AN Xin-li, CHEN Qing-lin, <i>et al.</i> (4402)
Comparison of Toxic Effect of Siliceous Mineral Dusts on Lung Epithelial A549 Cells	HUO Ting-ting, DONG Fa-qin, DENG Jian-jun, <i>et al.</i> (4410)
Effect of Adding Compound Adsorbent on Phenanthrene and Cr(VI) Absorption by Lou Soil	LI Wen-bin, MENG Zhao-fu, WU Qiong, <i>et al.</i> (4419)
Effect of Biochar on Adsorption Behavior of Nonylphenol onto Loess Soil in Northwest China	ZHANG Zhen-guo, JIANG Yu-feng, MU Zhong-feng, <i>et al.</i> (4428)
Soil Respiration in Response to Different Ridge/Furrow Ratios and Its Relationship with Soil Moisture and Temperature Under Ridge-Furrow Planting Patterns	WANG Chang-jiang, SHI Cheng-xiao, FENG Fan, <i>et al.</i> (4437)
Effects of Straw in Combination with Reducing Fertilization Rate on Soil Nutrients and Enzyme Activity in the Paddy-Vegetable Rotation Soils	HUANG Rong, GAO Ming, WAN Yi-lin, <i>et al.</i> (4446)

《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)

2016年11月15日 第37卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 11 Nov. 15, 2016

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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行