

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

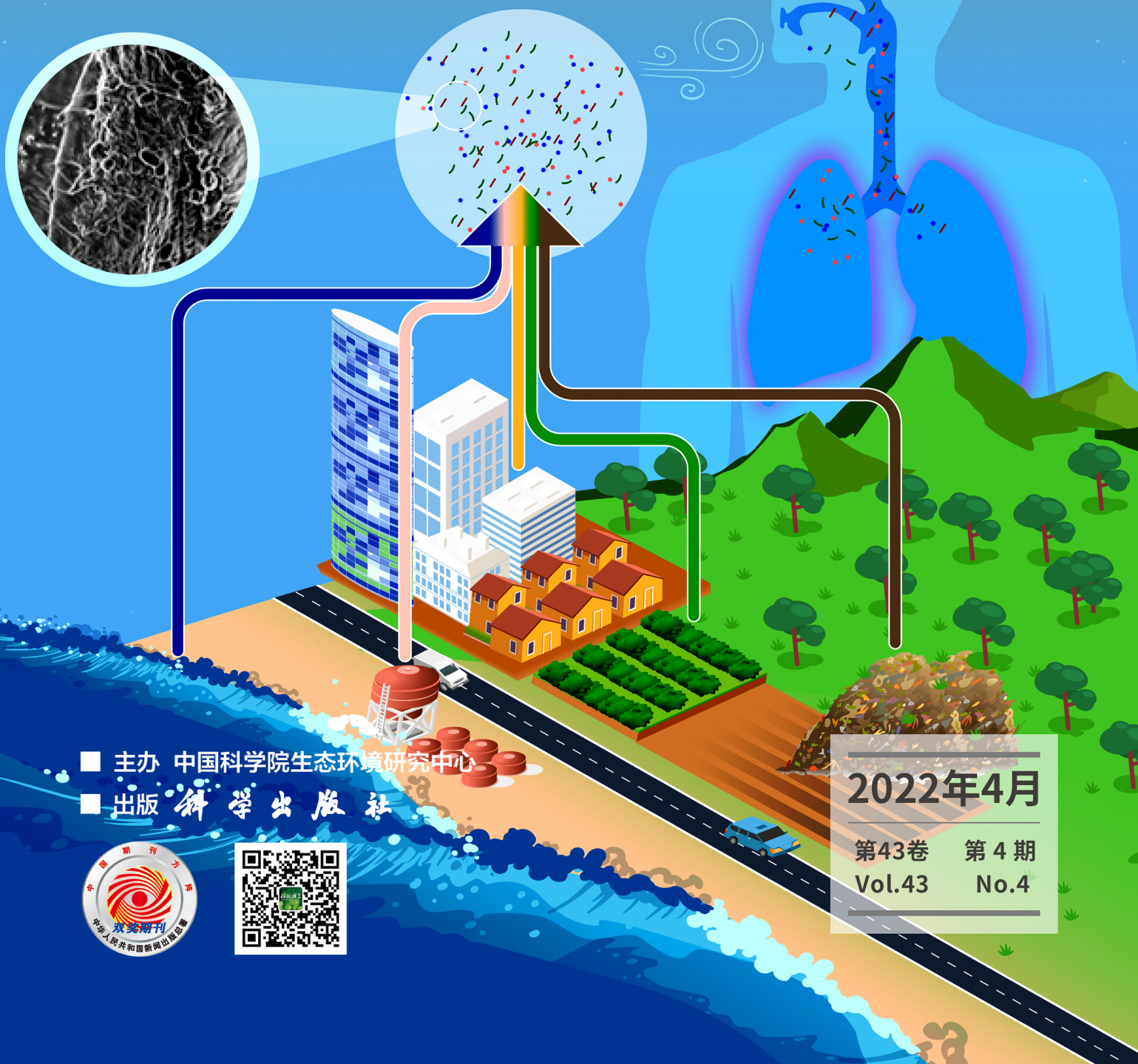
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

大连海岸带夏、秋季大气沉降(微)塑料的赋存特征及其表面生物膜特性

涂晨, 田媛, 刘颖, 张馨宁, 骆永明



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年4月

第43卷 第4期
Vol.43 No.4

目次

2015~2019年河南省PM _{2.5} 时空特征与驱动因素分析	葛昱序, 刘岩, 杨洪, 郭恒亮 (1697)
郑州市大气PM _{2.5} 中重金属的污染特征、来源及健康风险评估: 基于高分辨数据	曲光辉, 孙俊苹, 王申博, 姜楠, 李利萍, 刘洋, 陈红阳, 马双良 (1706)
宁波市春节期间水溶性离子污染来源和特征分析	杨梦蓉, 潘勇, 黄仲文, 张晶晶, 黄显军, 何萌萌, 肖航 (1716)
上海城区PM _{2.5} 中有机组分及硝基芳香化合物分布特征	庄旻, 马英歌, 程玉璜, 周敏, 戴海夏, 黄成, 郁建珍, 朱书慧, 乔利平, 童张法 (1725)
南京北郊大气细粒子硝基苯酚类化合物污染特征与来源	陈美娟, 钱姿合, 顾陈娟, 张书萌, 刘智艺, 王新峰, 盖鑫磊 (1738)
春节与疫情管控期间珠三角VOCs的组成和来源变化	江明, 袁鸾, 温丽容, 张莹, 方洪波, 杨满芽, 李成柳 (1747)
重庆市主要工业源VOCs组分排放清单及其臭氧生成潜势	李陵, 李振亮, 方维凯, 王晓宸, 蒲茜, 汪凌韬, 袁睿, 张卫东, 翟崇治 (1756)
珠三角石化园区VOCs排放特征及影响评价	张雪驰, 沙青娥, 陆梦华, 王毓铮, 饶思杰, 明桂英, 李勤勤, 吴淑珠, 郑君瑜 (1766)
基于隧道测试的机动车VOCs排放特征及源解析	刘鑫会, 朱仁成, 金博强, 梅慧, 祖雷, 尹沙沙, 张瑞芹, 胡京南 (1777)
基于多通道分布式VOCs在线监测质谱系统精准识别企业污染源	韦啸, 张永杰, 王沛涛, 洪燕, 夏瑞, 高伟 (1788)
基于SOA和O ₃ 生成潜势的杭州市PM _{2.5} 和O ₃ 协同控制	林旭, 严仁婧, 金嘉佳, 许凯儿 (1799)
超低排放燃煤电厂中湿式电除尘器对可凝结颗粒物排放特性的影响	王鹏程, 袁畅, 梁胜文, 蒋鹭翔, 成海容, 许睿光, 虞晓晗, 王祖武 (1808)
西安市住宅室内空气污染物实测分析与叠加效应	王秀茹, 樊灏, 范洁, 沈振兴 (1814)
大连海岸带夏、秋季大气沉降(微)塑料的赋存特征及其表面生物膜特性	涂晨, 田媛, 刘颖, 张馨宁, 骆永明 (1821)
基于在线观测本地因子的长三角家禽养殖氨排放时空分布特征	高宗源, 徐昶, 倪远之, 沈根祥, 苗文亮, 王振旗, 付侃, 钱晓雍, 曹国民 (1829)
西宁市农牧源氨排放清单及其分布特征	杨益, 姬亚芹, 高玉宗, 林孜, 林宇, 马妍 (1844)
“三水”统筹视角下京津冀地区城市水生态环境保护策略分析	廖雅, 侯晓妹, 任晓红 (1853)
中国居民饮用水镉暴露非致癌风险的年龄分层权重	秦宁, 阿依博塔·吐尔逊别克, 刘运炜, 侯荣, 徐翔宇, 官家丞, 段小丽 (1863)
新疆博尔塔拉河流域平原区地表水与地下水水化学特征及转化关系	雷米, 周金龙, 张杰, 陈亚鹏, 滕杰, 吴彤, 徐东升, 孙英, 纪媛媛 (1873)
珠江源区小黄泥河流域地表水水化学组成特征及控制因素	涂春霖, 尹林虎, 和成忠, 寸得欣, 马一奇, 令狐昌卫 (1885)
河套灌区浅层地下水NO ₃ ⁻ -N时空变化及驱动因素	袁宏颖, 杨树青, 张万峰, 王波, 韩天凯, 丁雪华 (1898)
盐城地区地下水溶质来源及其成因分析	王建, 张华兵, 许君利, 李永山 (1908)
白洋淀不同水体氢氧同位素特征及其指示意义	王雨山, 尹德超, 祁晓凡, 徐蓉桢 (1920)
东部地区大型湖库有色可溶性有机物来源组成及潜在驱动因素	陈丽丽, 肖启涛, 俞晓琴, 陈慧敏, 周蕾, 周永强, 韩龙飞 (1930)
松花湖沉积物溶解性有机质荧光光谱特性	程云轩, 赵可, 张越, 张渝婷, 焦立新 (1941)
区域土地利用类型对水源水中溶解性有机物丰度和荧光组分的影响	高静, 蒲晓, 张玉虎, 程红光, 张瑞宁, 刘训良, 董雪, 许新瑶 (1950)
南北水调东线枢纽湖泊表层水体甲烷释放特征及潜在影响因素	朱俊羽, 彭凯, 李宇阳, 俞晓琴, 陈慧敏, 周蕾, 周永强, 丁艳青 (1958)
千岛湖水体中邻苯二甲酸酯(PAEs)的分布特征及健康风险评价	弥启欣, 国晓春, 卢少勇, 邓义祥, 卢洪斌, 李响, 刘晓贺, 陈金明 (1966)
蓝藻越冬期湖湾沉积物磷吸附特征和释放风险	靳郑海, 涂成琪, 王书航, 陈俊伊, 卢昶雨, 黄威 (1976)
基于植物多样性的北京市湿地生态质量评价	李果, 孙光, 赵梓伊, 刘冬梅, 肖能文, 赵志平, 罗遵兰 (1988)
小清河专项治理对莱州湾环境和浮游植物的影响	张晶晶, 王玉珏, 李凡, 刘珂, 王英, 于洋, 高彦洁, 肖晓彤, 吕振波 (1997)
不同曝气方式对人工湿地细菌多样性、代谢活性及功能的影响	王飞鹏, 黄亚玲, 张瑞瑞, 岳琛, 李飞翔, 张超月, 穆景利 (2007)
南宁市老城区降雨径流溯源及污染特征分析	岳桢桢, 李一平, 周玉璇, 郑可, 于珊, 伍彬 (2018)
老化作用对微塑料吸附铅的影响及其机制	王俊杰, 陈晓晨, 李权达, 金成俊, 黄艺佳, 范露健, 张剑宇, 刘宪华, 徐开钦 (2030)
碳化泡沫负载Co ₃ O ₄ 活化过硫酸盐降解罗丹明B	王渊源, 阎鑫, 艾涛, 李卓, 牛艳辉 (2039)
低总氮浓度下Fe ²⁺ 促进ANAMMOX生物膜反应器脱氮	郑旭文, 秦嘉富, 汪晓军, 陈浩川, 朱梓静, 陈振国 (2047)
污水管道增强通风作用下臭气气液传质特性	杨洲, 张志强, 杨静, 卢金锁 (2055)
长江经济带工业区土壤重金属污染特征与评价	张义, 周心功, 曾晓敏, 冯娇, 刘玉荣 (2062)
中国北方典型设施菜地土壤稀土元素分布特征及环境意义	王祖伟, 刘雅明, 王子璐, 苗钰婷 (2071)
贵州省典型铅锌矿区潜在有毒元素(PTEs)物源甄别、生态风险评价及控制因素	张富贵, 彭敏, 贺灵, 马宏宏 (2081)
地质高背景与污染叠加区不同土地利用方式下土壤重金属分布特征	王雪雯, 刘鸿雁, 顾小凤, 涂宇, 于恩江, 吴攀 (2094)
矿区周边农田土壤重金属分布特征及污染评价	王海洋, 韩玲, 谢丹妮, 胡慧娟, 刘志恒, 王祯 (2104)
农田-泥炭藓系统重金属富集特征与生态风险评价	朱迪, 张朝晖, 王智慧 (2115)
安顺市土壤pH空间变异及影响因素分析	陈清霞, 陆晓辉, 涂成龙 (2124)
方解石基组配钝化剂与低积累玉米协同修复效果	任超, 任或仲, 李竞天, 王浩, 朱利文, 肖建辉, 赵瑞, 杜倩倩 (2133)
伯克氏菌Y4对水稻幼苗损伤和镉吸收的影响	张雅荟, 刘月敏, 王常荣, 刘雅萍, 庞杰, 黄永春, 刘仲齐, 张长波 (2142)
我国长江中下游平原典型稻田含碳温室气体通量变化特性	刘硕, 甄晓杰, 刘钢, 冯兆忠 (2151)
地膜覆盖和生物炭添加对菜地N ₂ O排放的影响	胡剑, 江长胜, 陈鑫童, 熊艳芳, 郝庆菊 (2163)
氮肥运筹对稻田CH ₄ 和N ₂ O排放的影响	郑梅群, 刘娟, 姜培坤, 吴家森, 李永夫, 李松果 (2171)
松花江下游滨岸带典型植被根际土壤细菌群落结构与功能多样性	王露莹, 孙慧珍, 杨雪 (2182)
棉秆还田对咸水滴灌棉田土壤酶活性和细菌群落结构多样性的影响	周永学, 陈静, 李远, 侯振安, 阎伟 (2192)
pH对水稻土全程氨氧化细菌丰度和群落结构组成影响	马瑞, 赵永鹏, 王智慧, 蒋先军 (2204)
生物炭对紫色土坡耕地侵蚀性耕层土壤有机碳的影响	张健乐, 曾小英, 史东梅, 倪书辉, 夏蕊, 王荣浩 (2209)
有机肥替代化肥对旱地黄壤有机碳矿化及活性有机碳的影响	林仕芳, 王小利, 段建军, 皮义均, 郭琴波, 龙大勇, 徐彬, 杨宏伟 (2219)
九龙江河口潮滩湿地土壤有机碳储量、活性组分及稳定性沿淹水梯度的分布特征	黄小清, 全川, 罗敏, 杨洋, 谭凤凤, 潘哲妍, 刘娜, 陈欣, 黄佳芳 (2226)
碳中和战略下煤矿区生态碳汇体系构建及功能提升展望	刘祥宏, 阎永军, 刘伟, 黄占斌 (2237)
《环境科学》征订启事(1929)	《环境科学》征稿简则(1975)
信息(1996, 2029, 2080)	

重庆市主要工业源 VOCs 组分排放清单及其臭氧生成潜势

李陵, 李振亮*, 方维凯, 王晓宸, 蒲茜, 汪凌韬, 袁睿, 张卫东, 翟崇治

(重庆市生态环境科学研究院, 城市大气环境综合观测与污染防治重庆市重点实验室, 重庆 401147)

摘要: 基于“第二次全国污染源普查”基础信息和工业行业 VOCs 源成分谱, 建立了重庆市 2017 年主要工业源 VOCs 组分清单, 并估算其臭氧生成潜势 (OFP), 识别工业源 VOCs 重点管控物种及其来源。结果表明, 重庆市 2017 年工业源 VOCs 排放总量及其 OFP 分别为 144.12 kt 和 477.34 kt, 汽车制造、装备制造、塑料制造和化学原料与化学制品行业的 VOCs 排放量及其 OFP 贡献较大, VOCs 排放量分别为 37.18、33.09、19.47 和 18.14 kt, OFP 分别为 191.43、153.69、27.21 和 57.51 kt。芳香烃是 VOCs 排放量和 OFP 贡献最大的组分, 分别占 VOCs 排放总量和总 OFP 的 62.55% 和 82.15%, 其主要来源于金属表面涂装和石油化工工业。工业源 VOCs 中主要的活性物种为间/对-二甲苯、甲苯、乙苯、邻-二甲苯和丙烯, OFP 分别为 130.47、103.37、46.37、42.83 和 28.26 kt, 累积占总 OFP 高达 71.11%。从空间分布来看, 全市各区县 VOCs 排放强度与 O_3 污染程度较为一致; VOCs 排放量和 OFP 高值点均主要分布在主城区和渝西片区, 主城区和渝西片区的 VOCs 排放来源分别以金属表面涂装和石油化工工业为主。

关键词: 工业源; 挥发性有机物 (VOCs); 组分排放清单; 臭氧生成潜势 (OFP); 重庆市

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)04-1756-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202108015

Speciated Emission Inventory of VOCs from Industrial Sources and Their Ozone Formation Potential in Chongqing

LI Ling, LI Zhen-liang*, FANG Wei-kai, WANG Xiao-chen, PU Xi, WANG Ling-tao, YUAN Rui, ZHANG Wei-dong, ZHAI Chong-zhi

(Key Laboratory for Urban Atmospheric Environment Integrated Observation & Pollution Prevention and Control of Chongqing, Chongqing Research Academy of Eco-Environmental Sciences, Chongqing 401147, China)

Abstract: Based on the basic information of the Second National Pollution Source Census and the VOCs source profiles of industrial industries, we established the speciated emission inventory of major industrial sources in Chongqing in 2017, estimated their ozone formation potential (OFP), and identified the key control species of industrial VOCs and their sources. The results showed that the total VOCs emission from industrial sources and their OFPs were 144.12 kt and 477.34 kt, respectively. Automobile manufacturing, equipment manufacturing, plastic manufacturing, and chemical raw materials and chemical products were all industries that contributed significantly to VOCs emissions and OFP, with VOCs emissions of 37.18, 33.09, 19.47, and 18.14 kt and OFP of 191.43, 153.69, 27.21, and 57.51 kt, respectively. Aromatics were the components with the largest contribution to VOCs emissions and OFP, accounting for 62.55% of the total VOCs emissions and 82.15% of the total OFP, mainly from metal surface coating and petrochemical industries. The major reactive species of industrial source VOCs were *m/p*-xylene, toluene, ethylbenzene, *o*-xylene, and propylene, with OFP of 130.47, 103.37, 46.37, 42.83, and 28.26 kt, respectively, cumulatively accounting for 71.11% of the total OFP. In terms of spatial distribution, the emission intensity of VOCs and O_3 pollution degree in all districts and counties of Chongqing were relatively consistent; the high value points of VOCs emissions and OFP were mainly distributed in the main urban area and the western area, and the sources of VOCs emission in the main urban area and western area were mainly in metal surface coating and the petrochemical industry, respectively.

Key words: industrial source; volatile organic compounds (VOCs); speciated emission inventory; ozone formation potential (OFP); Chongqing

近年来,近地面臭氧 (O_3) 和 $PM_{2.5}$ 污染对空气质量、生态系统和人类健康造成了严重的不利影响^[1~3]。当前,在我国 $PM_{2.5}$ 污染依旧严峻并且 O_3 污染日益凸显的形势下,推动 $PM_{2.5}$ 和 O_3 协同控制的问题得到了广泛关注^[4,5]。挥发性有机物 (volatile organic compounds, VOCs) 是大气环境中非常重要的痕量组分,对二次有机气溶胶 (secondary organic aerosol, SOA) 和 O_3 的二次生成具有重要的贡献^[6], VOCs 的有效治理和精准管控对于 O_3 和 $PM_{2.5}$ 污染的改善具有重要的作用。

VOCs 污染源排放清单在一定程度上提供了 VOCs 排放来源和特征等方面的信息,是 VOCs 污染

控制的重要基础工作之一^[7]。有研究表明,1990~2017 年我国人为源 VOCs 排放量持续增长,由 1990 年的 9 760 kt 增加到 2017 年的 28 500 kt,其中 2000 年之前的增长主要来自交通运输的推动,而 2000 年以后工业排放和溶剂使用主导了 VOCs 排放量的增长^[8]。随着我国经济的快速发展和城市工业化进程的加快,工业源 VOCs 已成为我国最显著的人为源,占人为源 VOCs 排放总量的 50% 以上^[9],是大气污

收稿日期: 2021-08-03; 修订日期: 2021-09-18

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFC0214005); 重庆市重点研发项目 (cstc2018jszx-zdyfmxX0003)

作者简介: 李陵 (1995~), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为大气 VOCs 污染防治, E-mail: lilingle@163.com

* 通信作者, E-mail: zhenliangli@163.com

染防控工作中 VOCs 减排的关键部分^[10~12]. 2011 ~ 2018 年中国工业 VOCs 的排放量呈现逐年增长的趋势,由 2011 年的 8 777 kt 增加到 2018 年的 12 446 kt, 年均增长率达到 5.2%^[13]. 工业 VOCs 的排放特征和来源十分复杂,在不同的行业企业中所使用的原辅料,涉及的 VOCs 排放环节、排放模式和末端处理设备均具有较大的差异. 此外,近年产业结构的升级和 VOCs 排放控制措施的深入实施,也导致 VOCs 的排放特性正在发生变化.

VOCs 物种种类数以千计,各个物种在大气中化学反应性显著不同,并且对 O₃ 的生成有不同的贡献^[14]. 臭氧生成潜势 (OFP) 是用于评估在最佳反应条件下 VOCs 物种对 O₃ 形成的最大贡献,已被广泛用于识别本地 VOCs 排放源生成 O₃ 的关键物种和来源^[15, 16]. 有研究表明,基于 VOCs 组分排放清单估算 OFP 的结果更有利于制定精准和科学的大气 O₃ 污染防控策略^[17, 18]. 随着 VOCs 排放总量的增加,相应的 OFP 同样从 1990 年的 38 200 kt 增加到 2017 年的 99 700 kt^[8]. 2018 年,我国工业源 OFP 总量为 38 775 kt,芳香烃和烯炔烃占总 OFP 的 64% 和 19%,其中间/对-二甲苯、甲苯、乙苯和丙烯等物种贡献了较高的 OFP^[13]. OFP 的增加在一定程度上也反映了我国城市大气 O₃ 污染的日益严重和 VOCs 活性组分排放的增强.

成渝城市群近年来大气污染形势依然严峻,虽然 PM_{2.5} 污染得到显著改善,但是 O₃ 却逐渐成为影响该地区环境空气质量改善的主要污染物^[19, 20]. 随着未来成渝地区双城经济圈建设的持续推动,大气污染防治的压力将进一步加强. 重庆市是成渝地区的特大城市,工业源排放是重庆地区首要的 VOCs 排放源,然而目前关于重庆市工业源 VOCs 组分清单的研究仍未有报道. 本研究基于“第二次全国污染源普查”基础信息,估算了重庆市 2017 年主要工业源 VOCs 排放量,并且结合工业行业 VOCs 源成分谱,建立了主要工业源 VOCs 组分清单;在此基础上估算 OFP,识别工业源 VOCs 重点管控物种及其来源,以期对重庆市工业源 VOCs 的精细化管控和 O₃ 污染防控提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域

重庆市位于我国西南地区,市域面积约为 82 402 km²,是长江上游地区的经济中心和国家重要的现代制造业基地. 本研究对象为重庆市域内所有涉 VOCs 排放的工业企业,研究区域为重庆市全域,包括主城区、渝西片区、渝东北片区和渝东南

片区,共涵盖了 38 个县级区划,区域划分示意如图 1 所示.

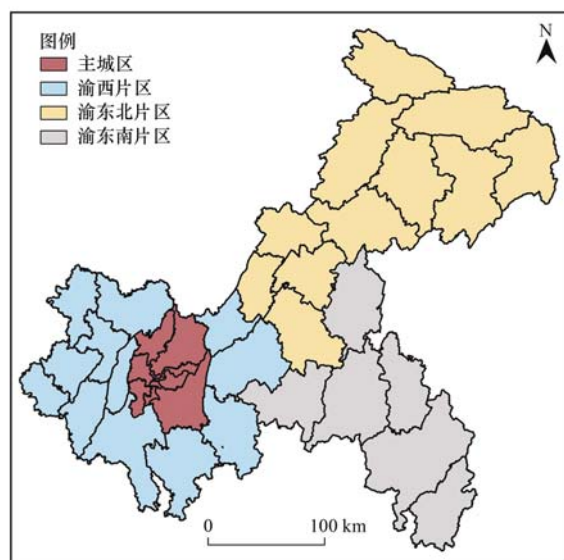


图1 重庆市区域划分示意

Fig. 1 Schematic diagram of regional division of Chongqing

1.2 VOCs 排放量核算

本研究采用排放因子法^[21]对重庆市主要工业源 VOCs 排放总量进行核算:

$$E_p = \sum_{c=1}^n \sum_k \left[\sum_m A_{i,k,m} \times EF_{i,k,m} \right] \quad (1)$$

式中, E_p 为 VOCs 排放总量, kt; i 为排放源; c 为行政区域; k 为分类系统中的来源类别; m 为产品/原辅料类型; A 为活动水平. EF 是 VOCs 经末端设备处理后的排放因子:

$$EF = EF_{\text{raw}} \sum_n C_n (1 - \eta_n) \quad (2)$$

式中, EF_{raw} 为初始排放因子; C_n 为末端设备 n 的使用比例, %; η_n 为末端设备 n 的去除效率, %.

活动水平及末端控制状况主要来源于“第二次全国污染源普查”基础信息及现场调研,基准排放因子主要来源于文献^[21, 22].

1.3 VOCs 源成分谱

以往研究中,大多数源谱资料主要参考了美国 EPA 的 SPECIATE 数据库,并不能准确反映我国各类源的 VOCs 真实排放情况^[13, 23]. 本研究中,通过文献调研汇编了一个工业源源谱数据库,涵盖了大多数 VOCs 物种,并且 90% 以上是中国本土测量数据,如表 1 所示. 二级和三级排放源的分类主要参照了文献^[21]中 VOCs 的排放源分类方法,同时结合重庆市涉 VOCs 排放的工业企业结构和规模,工业源 VOCs 排放实际情况和排放特征来进行分类. VOCs 组分排放清单估算时,优先选择监测 VOCs 物种数量全面和本土测量的源谱.

表 1 本研究涉及的主要工业源 VOCs 源成分谱来源

Table 1 Data sources of main industrial VOCs source profiles involved in this study

二级排放源	三级排放源	主要排放物种	成分谱数据来源
石油化工业	天然原油与天然气开采	苯、甲苯、乙烷、间/对-二甲苯、邻-二甲苯、乙烯和丙烷	[24,25]
	石油制品	丙烷、正丁烷、乙烷、正戊烷、丙烯和异戊烷	[26~28]
	化学原料与化学制品	丙烷、丙烯、乙烷、异丁烷、正丁烷、异戊烷和正戊烷	[26,29,30]
	合成纤维制造	丙酮、异丙醇、甲苯和二氯甲烷	[31,32]
金属表面涂装	汽车制造	间/对-二甲苯、甲苯、乙苯、邻-二甲苯、1,2,4-三甲基苯和间-乙基甲苯	[25,28,33,34]
	装备制造	甲苯、间/对-二甲苯、乙苯和邻-二甲苯	[30,35]
电子设备制造	/	丙酮、己醛、2-丁酮、环己烷和乙烷	[28,30,36,37]
染色过程	包装印刷	乙酸乙酯、异丙醇、二氯甲烷和甲苯	[25,30,34,38]
家具制造	/	苯乙烯、乙酸乙酯、乙苯、甲苯、间/对-二甲苯和邻-二甲苯	[28,34,38]
医药制造	/	乙酸乙酯、乙醇、2-丁酮、苯、丙酮和二氯甲烷	[25,29,30]
制鞋	/	2-丁酮、丙酮、乙酸乙酯、甲苯和环己烷	[38,39]
橡胶与塑料制品	橡胶制品	环己烷、苯乙烯、丙酮、间/对-二甲苯和2-丁酮	[30~32]
	塑料制品	乙酸乙酯、2-丁酮、甲苯、苯、苯乙烯和乙苯	[30,40]
有色金属	/	甲苯、1,2,4-三甲基苯、间/对-二甲苯、乙苯和苯	[41]
非金属矿物业	/	四氯化碳、甲苯、1,2,4-三甲基苯、间/对-二甲苯、乙苯和苯	[42,43]
其他行业	发电	丙酮、乙酸乙酯、异丙醇、甲苯、正己烷和2-丁酮	[44]
	纺织业	丙酮、丙烷和正丁烷	[30,45]
	人造板	甲醛、正癸烷和异丙醇	[29,46]
	造纸业	丙酮、2-甲基戊烷、乙烯、苯和2,2-二甲基丁烷	[43]
	酒类生产	甲苯、乙苯、间/对-二甲苯、苯乙烯和顺-2-丁烯	[47]
	食品生产	异丁烷、乙醇、丙烷和正丁烷	[30,43]

1.4 VOCs 组分排放清单

基于 VOCs 排放量和对应成分谱中各个物种相应的质量分数,计算出特定 VOCs 物种排放量:

$$E_{i,j} = E_i \times f_{i,j} \quad (3)$$

式中, i 为排放源; j 为 VOCs 物种; E_i 为污染源 i 中 VOCs 物种 j 的排放量,kt; $f_{i,j}$ 为污染源 i 中物种 j 占总 VOCs 的质量分数,%。

1.5 OFP 估算

不同的 VOCs 物种生成 O_3 的潜力各不相同,可以通过最大增量反应性(MIR)计算出不同 VOCs 物种的 OFP^[13]:

$$OFP_{i,j} = E_{i,j} \times MIR_j \quad (4)$$

式中, i 为排放源; j 为 VOCs 物种; $E_{i,j}$ 为污染源 i 中 VOCs 物种 j 的排放量,kt; $OFP_{i,j}$ 为污染源 i 中 VOCs 物种 j 的 OFP 值,kt; MIR_j 为物种 j 的最大增量反应活性。

1.6 不确定性分析

本研究在 Crystal Ball 软件中运用 Monte Carlo 模拟方法对 2017 年重庆市工业源 VOCs 排放清单不确定性进行了定量评估. 清单中每个来源的活动水平和排放因子数据彼此独立,并假设排放清单输入的活动水平和排放因子数据均呈对数正态分布,活动水平和排放因子不确定度参考魏巍^[48]等的研究成果. 然后,采用 Monte Carlo 模拟方法经 10 000 次重复计算,将输入基础数据的不确定性传递至清单,从而评估排放清单的不确定性。

2 结果与讨论

2.1 VOCs 排放量和 OFP

2.1.1 VOCs 排放量

重庆市 2017 年工业源 VOCs 排放量为 144.12 kt,其中化学原料与化学制品、合成纤维制造、汽车制造、装备制造和塑料制造是工业源 VOCs 排放的主要来源,占 VOCs 排放总量的 82.8% (表 2). 排名前 5 的行业中,汽车制造是 VOCs 排放贡献最大的行业,VOCs 排放量为 37.18 kt,占 VOCs 排放总量 25.8%,其次为装备制造、塑料制造、化学原料与化学制品和合成纤维制造,其 VOCs 排放量分别为 33.09、19.47、18.14 和 11.45 kt,占 VOCs 排放总量分别为 22.96%、13.51%、12.59% 和 7.94%. VOCs 排放量排名 6~10 的行业分别为包装印刷、家具制造、电子设备制造、天然原油与天然气开采和酒类生产,累积占 VOCs 排放总量为 12.91%. 除此之外,非金属矿物业、橡胶制品和制鞋等行业 VOCs 排放总量相对较少,排名 11~21 的行业累积占 VOCs 排放总量仅为 4.29%。

2.1.2 OFP

重庆市 2017 年工业源 OFP 为 477.34 kt. 各工业行业 OFP 与 VOCs 排放贡献略有区别,OFP 排名前 5 的工业行业依次为汽车制造、装备制造、化学原料与化学制品、塑料制品和家具制造,OFP 分别为 191.43、153.69、57.51、27.21 和 12.04 kt,分别

表 2 重庆市主要工业源 VOCs 排放量和 OFP
Table 2 VOCs emissions and OFP of major industrial sources in Chongqing

二级排放源	三级排放源	VOCs		OFP		VOCs 排名	OFP 排名
		排放量/kt	占比/%	数值/kt	贡献率/%		
石化工业	天然原油与天然气开采	1.86	1.29	3.89	0.82	9	10
	石油制品	0.40	0.28	1.22	0.26	16	14
	化学原料与化学制品	18.14	12.59	57.51	12.05	4	3
	合成纤维制造	11.45	7.94	5.12	1.07	5	8
金属表面涂装	汽车制造	37.18	25.80	191.43	40.10	1	1
	装备制造	33.09	22.96	153.69	32.20	2	2
电子设备制造	/	2.06	1.42	2.59	0.54	8	11
染色过程	包装印刷	8.61	5.97	6.21	1.30	6	7
家具制造	/	4.25	2.95	12.04	2.52	7	5
医药制造	/	0.87	0.60	0.32	0.07	14	16
制鞋	/	1.02	0.70	1.05	0.22	13	15
胶与塑料制品	橡胶制品	1.17	0.81	1.68	0.35	12	13
	塑料制品	19.47	13.51	27.21	5.70	3	4
有色金属	/	0.44	0.31	1.69	0.35	15	12
非金属矿物业	/	1.72	1.19	4.84	1.01	11	9
其他行业	发电	0.29	0.20	0.30	0.06	17	17
	纺织业	0.09	0.06	0.02	0.01	19	20
	人造板	0.01	0.01	0.05	0.01	20	19
	造纸业	0.01	0.01	0.01	0.01	21	21
	酒类生产	1.85	1.28	6.38	1.34	10	6
	食品生产	0.14	0.10	0.09	0.02	18	18
总计	/	144.12	/	477.34	/	/	/

占总 OFP 的 40.10%、32.2%、12.05%、5.7% 和 2.52% (表 2), 累积占比高达 92.48%。甲苯、二甲苯和丙烯等活性物种是这 5 个行业所排放的 VOCs 中含量较高的物种, 高浓度和高活性的排放特性导致其具有相对较高的 OFP。OFP 排名 6~10 的行业分别为酒类生产、包装印刷、合成纤维制造、非金属矿物质和天然原油与天然气开采, 累积占总 OFP 的 5.54%。除此之外, 电子设备制造、有色金属和橡胶制品等行业 OFP 相对较低, 累积占总 OFP 仅为 1.9%。

2.1.3 同类研究比较

表 3 显示了重庆市与国内部分地区的 VOCs 排放量、排放强度和主要来源对比。全国工业源 VOCs 排放清单的研究显示, 2018 年工业源 VOCs 排放量为 12 446 kt, 排放强度为 1.3 t·km⁻², 其主要的 VOCs 来源为工业涂装 (27.84%)、印刷 (11.02%)

和基础有机化工 (6.24%) 行业。由于不同地区产业结构和污染物排放特征的差异, 各城市之间 VOCs 排放量、排放强度和主要来源均表现出明显的不同。所调研的地区中, 重庆市工业源 VOCs 排放量在这些城市中处于较高水平, VOCs 排放量为 144.12 kt, 主要来源于金属表面涂装 (48.76%)、石化工业 (22.1%) 和橡胶与塑料制品 (14.32%)。与其他城市相比, 重庆市工业源 VOCs 排放量与成都市 (117.03 kt) 相对接近, 明显高于杭州 (36.84 kt)、郑州 (23.27 kt)、青岛 (75.6 kt)、厦门 (5.51 kt) 和苏州 (62.9 kt)。从排放强度的角度来看, 重庆市工业源 VOCs 排放强度却处于相对较低的水平, VOCs 排放强度为 1.75 t·km⁻², 与杭州 (2.18 t·km⁻²) 相接近, 远低于成都 (8.16 t·km⁻²)、郑州 (3.13 t·km⁻²)、青岛 (6.69 t·km⁻²)、厦门 (3.24 t·km⁻²)

表 3 重庆市与国内部分地区的 VOCs 排放量、排放强度和主要行业来源的对比

Table 3 Comparison of VOCs emissions, emission intensity, and major sources in Chongqing and selected regions in China

地区	年份	VOCs 排放量 /kt	排放强度 /t·km ⁻²	主要来源	文献
重庆	2017	144.12	1.75	金属表面涂装 (48.76%)、石化工业 (22.10%) 和橡胶与塑料制品 (14.32%)	本研究
成都	2016	117.03	8.16	合成产品制造 (58.00%) 和炼油与石化 (10.00%)	[49]
杭州	2015	36.84	2.18	印刷和记录媒介复制 (13.90%)、化学原料与化学制品 (13.78%) 和金属制品 (13.36%)	[50]
郑州	2016	23.27	3.13	非金属制品 (57.74%)、造纸 (23.78%) 和化学原料制造业 (11.63%)	[51]
青岛	2016	75.60	6.69	原油加工 (48.00%)、轮胎制造 (14.90%) 和船舶制造 (11.00%)	[52]
厦门	2019	5.51	3.24	涂装行业 (51.22%)、印刷 (20.17%) 和化工制造 (13.64%)	[53]
苏州	2016	62.90	7.27	有机化工 (61.20%) 和橡胶塑料制品生产 (25.10%)	[54]
全国	2018	12 446	1.30	工业涂装 (27.84%)、印刷 (11.02%) 和基础有机化工 (6.24%)	[13]

和苏州 ($7.72 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$). 总的来说, 各个地区 VOCs 排放的主要来源具有一个共同的特征, 涉溶剂使用的工业过程和石油化工类行业均是各个地区非常重要的两个 VOCs 来源.

2.2 VOCs 组分排放特征

2.2.1 VOCs 组分结构特征

重庆市主要工业源 VOCs 排放的组分中 (图 2), 芳香烃质量分数最大 (62.55%), 其次为 OVOCs (19.87%)、烷烃 (11.76%)、烯烃 (3.32%)、卤代烃 (1.86%) 和其他 VOCs (0.51%), 炔烃质量分数

最少 (0.13%). 芳香烃组分主要来源于金属表面涂装行业, 该行业排放的芳香烃质量分数高达 50.84%, 其次为石油化工业和橡胶与塑料制品行业, 芳香烃质量分数分别为 2.98% 和 4.53%. OVOCs 排放量仅次于芳香烃, 主要来源于橡胶与塑料制品、染色过程和石油化工业, 3 个行业排放的 OVOCs 质量分数分别为 9.61%、5.13% 和 2.86%. 烷烃、烯烃和卤代烃组分大部分来自于石油化工业排放, 该行业排放的烷烃、烯烃和卤代烃质量分数分别为 9.14%、2.87% 和 1.09%.

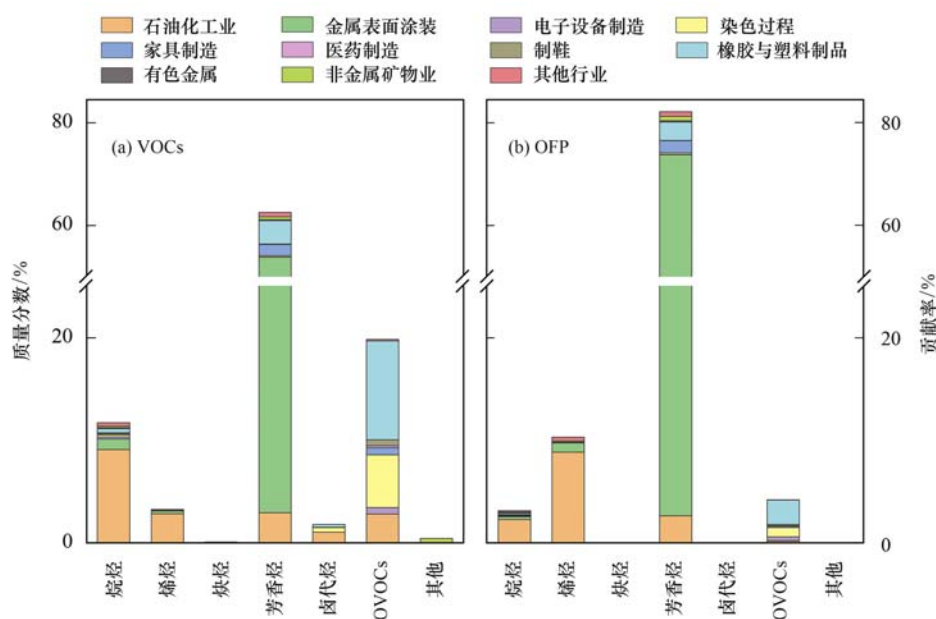


图 2 重庆市主要工业源对各 VOCs 组分质量分数和 OFP 贡献率

Fig. 2 Mass fraction and OFP contribution of major industrial sources to each VOCs component in Chongqing

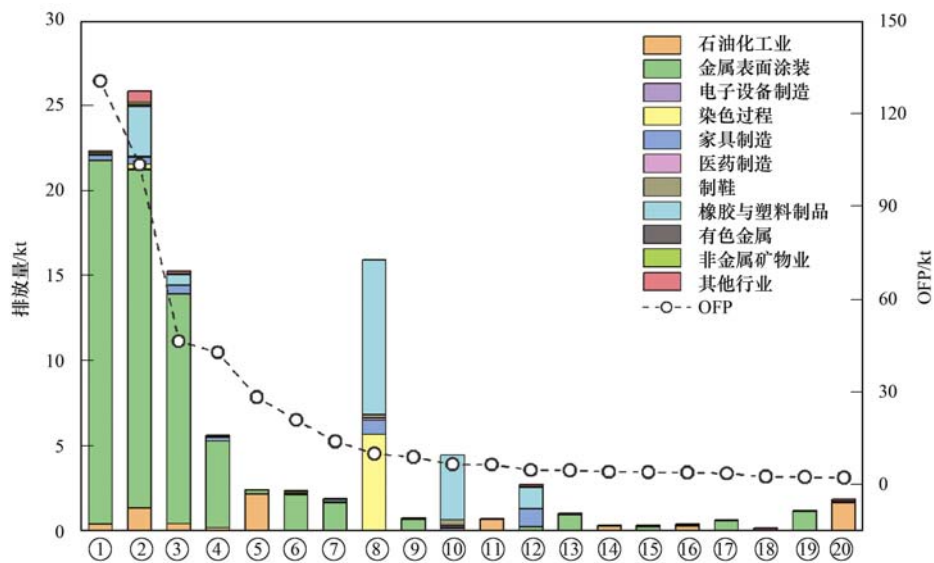
对 OFP 贡献最大的组分为芳香烃, 贡献率为 82.15%; 其次是烯烃、OVOCs 和烷烃, 对总 OFP 的贡献率分别为 10.33%、4.25% 和 3.17%; 炔烃、卤代烃和其他 OVOCs 对 OFP 的贡献极少, 贡献率均不超过 0.1%. 芳香烃组分中 OFP 的贡献主要来源于金属表面涂装, 其贡献率为 71.09%; 其次为橡胶与塑料制品、石油化工业和家具制造行业, 对总 OFP 的贡献率分别为 3.53%、2.7% 和 2.35%; 其余行业贡献相对较少, 累积对总 OFP 的贡献率为 2.48%. 烯烃组分中石油化工业 OFP 贡献远高于其他行业, 对总 OFP 的贡献率为 8.88%; OVOCs 组分中橡胶与塑料制品行业对 OFP 贡献最大, 贡献率为 2.38%; 烷烃组分中石油化工业 OFP 贡献最大, 贡献率为 2.33%.

总体而言, 芳香烃是 VOCs 排放量最大的组分, 同时也是对 OFP 贡献最大的组分, 占 VOCs 排放总量的质量分数和对 OFP 的贡献率分别高达 62.55% 和 82.15%. 从行业贡献的角度来看, 金属表面涂装

和石油化工业对 OFP 贡献最大, 对总 OFP 的贡献率分别为 72.3% 和 14.19%. 芳香烃组分中绝大部分来源于金属表面涂装行业, 而石油化工业对烷烃和烯烃的贡献更为显著. 另外, 值得注意的是烯烃组分排放量仅占总 OFP 的 3.32%, 但由于其较高的光化学反应活性导致其对 OFP 的贡献率却达到了 10.33%, 而石油化工业对于烯烃的排放量和 OFP 具有重要的贡献.

2.2.2 主要 VOCs 活性物种识别

重庆市主要工业源 OFP 排名前 20 的 VOCs 物种及其排放量见图 3. 间/对-二甲苯是对 OFP 贡献最大的物种, 对应的 OFP 和排放量分别为 130.47 kt 和 22.34 kt; 甲苯是 VOCs 排放量最大的物种, 其 OFP 和排放量分别为 103.37 kt 和 25.84 kt. OFP 贡献率排名前 1~5 的另外 3 种物种分别是乙苯、邻-二甲苯和丙烯, OFP 分别为 46.37、42.83 和 28.26 kt, 排放量分别为 15.25、5.61 和 2.42 kt. 排名前 5 的物种 OFP 之和占总 OFP 的比例高达 71.11%, 而



①间/对二甲苯, ②甲苯, ③乙苯, ④邻二甲苯, ⑤丙烯, ⑥1,2,4-三甲苯, ⑦间-乙基甲苯, ⑧乙酸乙酯, ⑨1,3,5-三甲苯, ⑩丁酮, ⑪乙烯, ⑫苯乙烯, ⑬对-乙基甲苯, ⑭1,3-丁二烯, ⑮1,2,3-三甲苯, ⑯1-丁烯, ⑰邻-乙基甲苯, ⑱顺-2-丁烯, ⑲正丙苯, ⑳异丁烷

图3 OFP 排名前20VOCs 物种的主要工业源排放量

Fig. 3 Emissions from major industrial sources for the top 20 VOCs species in terms of OFP

排放量之和仅占 VOCs 排放总量的 49.59%。排名前 4 的物种主要来源于金属表面涂装行业排放,对间/对二甲苯、甲苯、乙苯和邻二甲苯的贡献率分别为 95.52%、76.89%、88.36% 和 90.34% ; 排名第 5 的丙烯主要来源于石化工业,贡献率为 89.63%。

OFP 排名 6~10 的物种依次为 1,2,4-三甲苯、间-乙基甲苯、乙酸乙酯、1,3,5-三甲苯和丁酮,OFP 分别为 20.96、14.03、10.06、8.95 和 6.61 kt。乙酸乙酯是 OFP 排名 6~10 的物种中排放量最大的物种,排放量为 15.97 kt; 染色过程和橡胶与塑料制品行

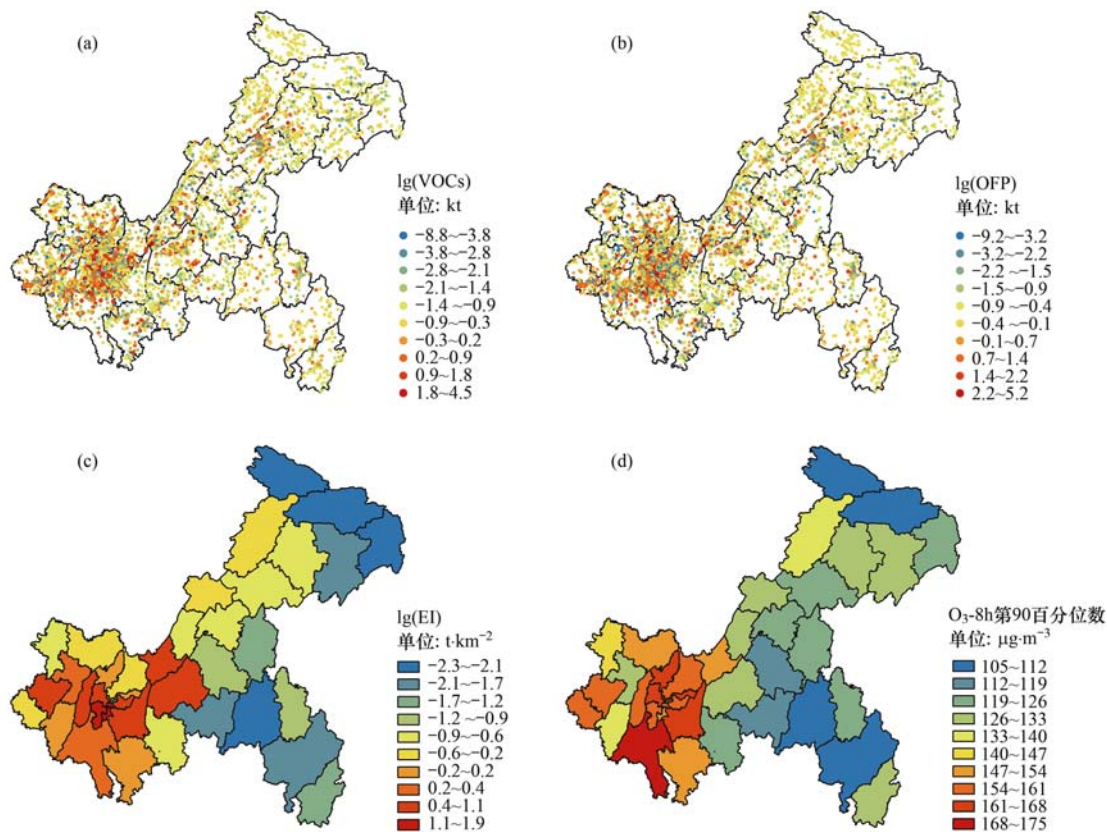


图4 重庆市2017年VOCs排放量、OFP、EI和O₃年评价价值空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of VOCs emissions, OFP, EI, and O₃ annual evaluation value in Chongqing in 2017

Fig. 5 Contribution of major industrial sources to VOCs emissions and OFP in each district of Chongqing

OFP 较高的区县为九龙坡区、巴南区、沙坪坝区、两江新区和大渡口区;渝西片区 VOCs 排放量和 OFP 较高的区县为涪陵区、长寿区、江津区、璧山区和大足区.整体上看,主城区 VOCs 排放来源以金属表面涂装为主,占 VOCs 排放总量的 79.19%;而渝西片区 VOCs 排放来源以石油化工业为主,占 VOCs 排放总量的 46.23%.渝西片区和主城区 OFP 的主要贡献来源与 VOCs 排放量略有差别,金属表面涂装行业同样是主城区 OFP 主要的贡献来源,贡献率高达 92.47%;石油化工业和金属表面涂装行业均是渝西片区 OFP 主要的贡献来源,贡献率分别为 40.23% 和 34.91%.渝西片区中金属表面涂装行业 VOCs 排放量相对较小,但由于其排放的 VOCs 物种具有较强的光化学反应活性,因此金属表面涂装行业对渝西片区 OFP 的贡献仍然具有较高的比重.渝东南和渝东北片区各区县 VOCs 排放量和 OFP 远远小于渝西片区和主城区,其中开州区、梁平区、云阳县和万州区 VOCs 排放量和 OFP 明显高于其他区县.

2.4 清单不确定性分析

VOCs 组分排放清单的不确定性是污染源排放因子、活动水平和源成分谱不确定性的综合表现.因此,VOCs 组分排放清单编制过程中,由于上述 3 种因素和估算方法的局限性,会导致清单结果存在一定的不确定性,主要体现在以下 4 个方面:①排放因子主要参考文献[21,22],可能并不完全符合重庆地区的情况;②本研究活动水平主要来源于“第二次全国污染源普查”基础信息和现场调研,同样不可避免地会造成一定的不确定性;③各个行业 VOCs 废气收集、无组织排放和末端治理设备运行情况良莠不齐,也属于不确定性的来源;④尽管本研究所使用的 VOCs 源成分谱多为国内本地化源谱,但不同地区和不同工艺的企业排放情况均有差异,因此也会存在一定的不确定性.针对活动水平和排放因子等因素造成的排放清单的不确定性,采用蒙特卡罗模拟对清单的不确定性进行了定量评估.结果显示,2017 年重庆市工业源 VOCs 排放量估算在 95% 置信区间不确定性范围为 $[-58.42\%, 129.61\%]$.

3 结论

(1)重庆市 2017 年工业源 VOCs 排放总量及其 OFP 分别为 144.12 kt 和 477.34 kt,汽车制造、装备制造、塑料制造和化学原料与化学制品行业的 VOCs 排放量及其 OFP 贡献较大,VOCs 排放量分别为 37.18、33.09、19.47 和 18.14 kt,累积占 VOCs

排放总量的 82.8%;OFP 分别为 191.43、153.69、27.21 和 57.51 kt,累积占总 OFP 的 92.48%.

(2)芳香烃是 VOCs 排放量和 OFP 贡献最大的组分,对两者的贡献率分别为 62.55% 和 82.15%.工业源 VOCs 中主要的活性物种为间/对-二甲苯、甲苯、乙苯、邻-二甲苯和丙烯,OFP 分别为 130.47、103.37、46.37、42.83 和 28.26 kt,累积占总 OFP 的 71.11%.从行业角度来看,金属表面涂装和石油化工业对 OFP 贡献最大,对总 OFP 的贡献率分别为 72.3% 和 14.19%.间/对-二甲苯、甲苯、乙苯和邻-二甲苯等芳香烃组分绝大部分来源于金属表面涂装行业,而丙烯、乙烯和 1,3-丁二烯等烯烃组分主要来源于石油化工业.

(3)从空间分布来看,VOCs 排放量和 OFP 高值点均主要分布在主城区和渝西片区;全市各区县 VOCs 排放强度与 O_3 污染程度非常一致,主城区和渝西片区的排放强度远高于渝东北和渝东南片区,主城区 VOCs 排放来源以金属表面涂装行业为主,渝西片区以石油化工业行业为主.

参考文献:

- [1] Monks P S, Archibald A T, Colette A, *et al.* Tropospheric ozone and its precursors from the urban to the global scale from air quality to short-lived climate forcer[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, **15**(15): 8889-8973.
- [2] Lu X, Hong J Y, Zhang L, *et al.* Severe surface ozone pollution in China: a global perspective[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, **5**(8): 487-494.
- [3] Zheng H, Kong S F, Chen N, *et al.* Source apportionment of volatile organic compounds: implications to reactivity, ozone formation, and secondary organic aerosol potential[J]. *Atmospheric Research*, 2021, **249**, doi: 10.1016/j.atmosres.2020.105344.
- [4] 李红,彭良,毕方,等.我国 $PM_{2.5}$ 与臭氧污染协同控制策略研究[J]. *环境科学研究*, 2019, **32**(10): 1763-1778.
Li H, Peng L, Bi F, *et al.* Strategy of coordinated control of $PM_{2.5}$ and ozone in China[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, **32**(10): 1763-1778.
- [5] Zhu J, Chen L, Liao H, *et al.* Correlations between $PM_{2.5}$ and ozone over China and associated underlying reasons[J]. *Atmosphere*, 2019, **10**(7), doi: 10.3390/atmos10070352.
- [6] Mozaffar A, Zhang Y L, Fan M Y, *et al.* Characteristics of summertime ambient VOCs and their contributions to O_3 and SOA formation in a suburban area of Nanjing, China[J]. *Atmospheric Research*, 2020, **240**, doi: 10.1016/j.atmosres.2020.104923.
- [7] 梁小明,孙西勃,徐建铁,等.中国工业源挥发性有机物排放清单[J]. *环境科学*, 2020, **41**(11): 4767-4775.
Liang X M, Sun X B, Xu J T, *et al.* Industrial volatile organic compounds (VOCs) emission inventory in China[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(11): 4767-4775.
- [8] Li M, Zhang Q, Zheng B, *et al.* Persistent growth of anthropogenic non-methane volatile organic compound (NMVOC) emissions in China during 1990-2017: drivers, speciation and ozone formation potential[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, **19**(13): 8897-8913.

- [9] Wu R R, Bo Y, Li J, *et al.* Method to establish the emission inventory of anthropogenic volatile organic compounds in China and its application in the period 2008-2012 [J]. *Atmospheric Environment*, 2016, **127**: 244-254.
- [10] Ou J M, Zheng J Y, Yuan Z B, *et al.* Reconciling discrepancies in the source characterization of VOCs between emission inventories and receptor modeling [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **628-629**: 697-706.
- [11] Sun W, Shao M, Granier C, *et al.* Long-term trends of anthropogenic SO₂, NO_x, CO, and NMVOCs emissions in China [J]. *Earth's Future*, 2018, **6**(8): 1112-1133.
- [12] Zheng B, Tong D, Li M, *et al.* Trends in China's anthropogenic emissions since 2010 as the consequence of clean air actions [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, **18**(19): 14095-14111.
- [13] Liang X M, Sun X B, Xu J T, *et al.* Improved emissions inventory and VOCs speciation for industrial OFP estimation in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **745**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140838.
- [14] 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.
- [15] Yang Y, Wang Y H, Yao D, *et al.* Significant decreases in the volatile organic compound concentration, atmospheric oxidation capacity and photochemical reactivity during the National Day holiday over a suburban site in the North China Plain [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **263**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114657.
- [16] Zhang X F, Yin Y Y, Wen J H, *et al.* Characteristics, reactivity and source apportionment of ambient volatile organic compounds (VOCs) in a typical tourist city [J]. *Atmospheric Environment*, 2019, **215**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2019.116898.
- [17] Liang X M, Chen X F, Zhang J N, *et al.* Reactivity-based industrial volatile organic compounds emission inventory and its implications for ozone control strategies in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2017, **162**: 115-126.
- [18] Wu R R, Xie S D. Spatial distribution of ozone formation in China derived from emissions of speciated volatile organic compounds [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **51**(5): 2574-2583.
- [19] Simayi M, Shi Y Q, Xi Z Y, *et al.* Understanding the sources and spatiotemporal characteristics of VOCs in the Chengdu Plain, China, through measurement and emission inventory [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **714**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.136692.
- [20] Li J, Zhai C Z, Yu J Y, *et al.* Spatiotemporal variations of ambient volatile organic compounds and their sources in Chongqing, a mountainous megacity in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **627**: 1442-1452.
- [21] 中华人民共和国生态环境部. 大气挥发性有机物源排放清单编制技术指南(试行) [EB/OL]. <https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201408/W020140828351293705457.pdf>, 2014-08-20.
- [22] 中华人民共和国生态环境部. 排放源统计调查产排污核算方法和系数手册 [EB/OL]. <https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk01/202106/W020210624327149500026.pdf>, 2021-08-03.
- [23] Sha Q E, Zhu M N, Huang H W, *et al.* A newly integrated dataset of volatile organic compounds (VOCs) source profiles and implications for the future development of VOCs profiles in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **793**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.148348.
- [24] Tsai S M, Zhang J F, Smith K R, *et al.* Characterization of non-methane hydrocarbons emitted from various cookstoves used in China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, **37**(13): 2869-2877.
- [25] 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.
- [26] Mo Z W, Shao M, Lu S H, *et al.* Process-specific emission characteristics of volatile organic compounds (VOCs) from petrochemical facilities in the Yangtze River Delta, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **533**: 422-431.
- [27] 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.
- [28] 周子航, 邓也, 周小玲, 等. 成都市工业挥发性有机物排放成分谱 [J]. *环境科学*, 2020, **41**(7): 3042-3055.
- Zhou Z H, Deng Y, Zhou X L, *et al.* Source profiles of industrial emission-based VOCs in Chengdu [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(7): 3042-3055.
- [29] 周子航, 邓也, 吴柯颖, 等. 成都市典型工艺过程挥发性有机物源成分谱 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(9): 3949-3961.
- Zhou Z H, Deng Y, Wu K Y, *et al.* Source profiles of VOCs associated with typical industrial processes in Chengdu [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(9): 3949-3961.
- [30] Zhang Y S, Li C, Yan Q S, *et al.* Typical industrial sector-based volatile organic compounds source profiles and ozone formation potentials in Zhengzhou, China [J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2020, **11**(5): 841-850.
- [31] Zhao Y, Mao P, Zhou Y D, *et al.* Improved provincial emission inventory and speciation profiles of anthropogenic non-methane volatile organic compounds: a case study for Jiangsu, China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, **17**(12): 7733-7756.
- [32] 毛攀. 江苏省人为源挥发性有机物排放清单及源谱研究 [D]. 南京: 南京大学, 2016.
- [33] 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.
- [34] 方莉, 刘文文, 陈丹妮, 等. 北京市典型溶剂使用行业 VOCs 成分谱 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(10): 4395-4403.
- Fang L, Liu W W, Chen D N, *et al.* Source profiles of volatile organic compounds (VOCs) from typical solvent-based industries in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(10): 4395-4403.
- [35] Zhong Z M, Sha Q E, Zheng J Y, *et al.* Sector-based VOCs emission factors and source profiles for the surface coating industry in the Pearl River Delta region of China [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **583**: 19-28.
- [36] 王瑞文, 张春林, 丁航, 等. 电子制造业塑料件生产过程的挥发性有机物排放特征分析 [J]. *环境科学学报*, 2019, **39**(1): 4-12.
- Wang R W, Zhang C L, Ding H, *et al.* Emission characteristics of volatile organic compounds (VOCs) from the production processes of plastic parts in electronic manufacturing industry [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, **39**(1): 4-12.

- [37] Shen L J, Xiang P, Liang S W, *et al.* Sources profiles of volatile organic compounds (VOCs) measured in a typical industrial process in Wuhan, central China [J]. *Atmosphere*, 2018, **9** (8), doi: 10.3390/atmos9080297.
- [38] Zheng J Y, Yu Y F, Mo Z W, *et al.* Industrial sector-based volatile organic compound (VOC) source profiles measured in manufacturing facilities in the Pearl River Delta, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2013, **456-457**: 127-136.
- [39] Li Q Q, Su G J, Li C Q, *et al.* Emission profiles, ozone formation potential and health-risk assessment of volatile organic compounds in rubber footwear industries in China [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, **375**: 52-60.
- [40] 王伯光, 冯志诚, 周炎, 等. 聚氨酯合成革厂空气中挥发性有机物的成分谱 [J]. *中国环境科学*, 2009, **29** (9): 914-918.
Wang B G, Feng Z C, Zhou Y, *et al.* VOC components in the air caused by the local polyurethane synthetic leather industries in the Pearl River Delta region [J]. *China Environmental Science*, 2009, **29** (9): 914-918.
- [41] 刘政, 徐晨曦, 陈军辉, 等. 典型钢铁企业挥发性有机物排放量测算及组分特征 [J]. *中国环境科学*, 2020, **40** (10): 4292-4303.
Liu Z, Xu C X, Chen J H, *et al.* Emission estimation and component characteristics of volatile organic compounds in typical iron and steel enterprise [J]. *China Environmental Science*, 2020, **40** (10): 4292-4303.
- [42] Tsai J H, Lin K H, Chen C Y, *et al.* Volatile organic compound constituents from an integrated iron and steel facility [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, **157** (2-3): 569-578.
- [43] USEPA (United States Environment Protection Agency). SPECIATE 5.1 [DB/OL]. <https://www.epa.gov/air-emissions-modeling/speciate>, 2021-05-05.
- [44] Shi J W, Deng H, Bai Z P, *et al.* Emission and profile characteristic of volatile organic compounds emitted from coke production, iron smelt, heating station and power plant in Liaoning Province, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **515-516**: 101-108.
- [45] 王瑞文. 工业源排放 VOCs 成分谱及其在 PMF 解析中的应用 [D]. 广州: 暨南大学, 2019.
- [46] 徐晨曦, 陈军辉, 韩丽, 等. 四川省典型行业挥发性有机物源成分谱 [J]. *环境科学*, 2020, **41** (7): 3031-3041.
Xu C X, Chen J H, Han L, *et al.* Source composition spectrum of volatile organic compounds in typical industries in Sichuan [J]. *Environmental Science*, 2020, **41** (7): 3031-3041.
- [47] 王刚, 魏巍, 米同清, 等. 典型工业无组织源 VOCs 排放特征 [J]. *中国环境科学*, 2015, **35** (7): 1957-1964.
Wang G, Wei W, Mi T Q, *et al.* Characteristics of VOCs emitted from typical industrial fugitive [J]. *China Environmental Science*, 2015, **35** (7): 1957-1964.
- [48] 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.
- [49] Simayi M, Shi Y Q, Xi Z Y, *et al.* Understanding the sources and spatiotemporal characteristics of VOCs in the Chengdu Plain, China, through measurement and emission inventory [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **714**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.136692.
- [50] 卢滨, 黄成, 卢清, 等. 杭州市工业源 VOCs 排放清单及排放特征 [J]. *环境科学*, 2018, **39** (2): 533-542.
Lu B, Huang C, Lu Q, *et al.* Emission inventory and pollution characteristics of industrial VOCs in Hangzhou, China [J]. *Environmental Science*, 2018, **39** (2): 533-542.
- [51] 卢轩, 张瑞芹, 韩跃钢. 郑州市 VOCs 组分排放清单及其臭氧生成潜势 [J]. *环境科学*, 2020, **41** (10): 4426-4435.
Lu X, Zhang R Q, Han L K. Emission inventory of VOCs components in Zhengzhou and their ozone formation potential [J]. *Environmental Science*, 2020, **41** (10): 4426-4435.
- [52] Zhou M M, Jiang W, Gao W D, *et al.* A high spatiotemporal resolution anthropogenic VOC emission inventory for Qingdao City in 2016 and its ozone formation potential analysis [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2020, **139**: 147-160.
- [53] 吴冬阳, 庄马展, 吴艳聪, 等. 厦门市工业源 VOCs 排放清单及控制对策分析 [J]. *环境科学*, 2020, **41** (12): 5336-5344.
Wu D Y, Zhuang M Z, Wu Y C, *et al.* Analysis of industrial VOCs emission inventory and countermeasures in Xiamen [J]. *Environmental Science*, 2020, **41** (12): 5336-5344.
- [54] 华倩雯, 冯菁, 杨珏, 等. 苏州市人为源挥发性有机物排放清单及特征 [J]. *环境科学学报*, 2019, **39** (8): 2690-2698.
Hua Q W, Feng J, Yang J, *et al.* Emission inventory and characteristics of volatile organic compounds from anthropogenic sources in Suzhou City [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, **39** (8): 2690-2698.

CONTENTS

Analysis on Spatial-temporal Characteristics and Driving Factors of PM _{2.5} in Henan Province from 2015 to 2019	GE Qi-xu, LIU Yan, YANG Hong, <i>et al.</i>	(1697)
Pollution Characterization, Source Identification, and Health Risks of Atmospheric Particle-Bound Heavy Metals in PM _{2.5} in Zhengzhou City: Based on High-resolution Data	QU Guang-hui, SUN Jun-ping, WANG Shen-bo, <i>et al.</i>	(1706)
Source Analysis and Composition Characteristics of Water-soluble Ions During Spring Festival in Ningbo	YANG Meng-rong, PAN Yong, HUANG Zhong-wen, <i>et al.</i>	(1716)
Characteristics of Nitroaromatic Compounds in PM _{2.5} in Urban Area of Shanghai	ZHUANG Min, MA Ying-ge, CHENG Yu-huang, <i>et al.</i>	(1725)
Characteristics and Sources of Nitrated Phenols in Atmospheric Fine Particles of Northern Suburban Nanjing	CHEN Mei-juan, QIAN Zi-he, GU Chen-juan, <i>et al.</i>	(1738)
Variety of the Composition and Sources of VOCs During the Spring Festival and Epidemic Prevention in the Pearl River Delta	JIANG Ming, YUAN Luan, WEN Li-rong, <i>et al.</i>	(1747)
Speciated Emission Inventory of VOCs from Industrial Sources and Their Ozone Formation Potential in Chongqing	LI Ling, LI Zhen-liang, FANG Wei-kai, <i>et al.</i>	(1756)
Volatile Organic Compound Emission Characteristics and Influences Assessment of a Petrochemical Industrial Park in the Pearl River Delta Region	ZHANG Xue-chi, SHA Qing-e, LU Meng-hua, <i>et al.</i>	(1766)
Characteristics and Source Apportionment of Vehicular VOCs Emissions in a Tunnel Study	LIU Xin-hui, ZHU Ren-cheng, JIN Bo-qiang, <i>et al.</i>	(1777)
Accurate Identification of Pollution Sources in a Chemical Enterprise Based on a Distributed Multi-channel VOCs Online Monitoring Mass Spectrometry System	WEI Xiao, ZHANG Yong-jie, WANG Pei-tao, <i>et al.</i>	(1788)
Coordinated Control of PM _{2.5} and O ₃ in Hangzhou Based on SOA and O ₃ Formation Potential	LIN Xu, YAN Ren-chang, JIN Jia-jia, <i>et al.</i>	(1799)
Effect of WESP on Emission Characteristics of Condensable Particulate Matter from Ultra-low Emission Coal-fired Power Plants	WANG Peng-cheng, YUAN Chang, LIANG Sheng-wen, <i>et al.</i>	(1808)
Measurement Analysis and Superposed Effect of Residential Indoor Air Pollutants in Xi'an	WANG Xiu-ru, FAN Hao, FAN Jie, <i>et al.</i>	(1814)
Occurrence of Atmospheric (Micro)plastics and the Characteristics of the Plastic Associated Biofilms in the Coastal Zone of Dalian in Summer and Autumn	TU Chen, TIAN Yuan, LIU Ying, <i>et al.</i>	(1821)
Spatiotemporal Distribution of Ammonia Emissions from Poultry Farming in the Yangtze River Delta Based on Online Monitoring Derived Local Emission Factors	GAO Zong-yuan, XU Chang, NI Yuan-zhi, <i>et al.</i>	(1829)
Agricultural Ammonia Emission Inventory and Its Distribution in Xining City	YANG Yi, JI Ya-qin, GAO Yu-zong, <i>et al.</i>	(1844)
Analysis of the Urban Water Eco-environment Protection Strategy in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from "Three Waters" Overall Planning	LIAO Ya, HOU Xiao-shu, REN Xiao-hong	(1853)
Non-carcinogenic Risk Assessment of Cadmium Exposure Through Drinking Water in Chinese Residents Based on Age-stratification Weight	QIN Ning, Ayibota Tuexunbieke, LIU Yun-wei, <i>et al.</i>	(1863)
Hydrochemical Characteristics and Transformation Relationship of Surface Water and Groundwater in the Plain Area of Bortala River Basin, Xinjiang	LEI Mi, ZHOU Jin-long, ZHANG Jie, <i>et al.</i>	(1873)
Hydrochemical Composition Characteristics and Control Factors of Xiaohuangni River Basin in the Upper Pearl River	TU Chun-lin, YIN Lin-hu, HE Cheng-zhong, <i>et al.</i>	(1885)
Temporal and Spatial Variation Characteristics and Driving Factors of Nitrogen of Shallow Groundwater in Hetao Irrigation District	YUAN Hong-ying, YANG Shu-qing, ZHANG Wan-feng, <i>et al.</i>	(1898)
Provenance of Groundwater Solute and Its Controlling Factors in Yancheng Area	WANG Jian, ZHANG Hua-bing, XU Jun-li, <i>et al.</i>	(1908)
Hydrogen and Oxygen Isotopic Characteristics of Different Water and Indicative Significance in Baiyangdian Lake	WANG Yu-shan, YIN De-chao, QI Xiao-fan, <i>et al.</i>	(1920)
Optical Composition and Potential Driving Factors of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Large Lakes and Reservoirs in the Eastern Region of China	CHEN Li-li, XIAO Qi-tao, YU Xiao-qin, <i>et al.</i>	(1930)
Fluorescence Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter in Songhua Lake Sediment	CHENG Yun-xuan, ZHAO Ke, ZHANG Yue, <i>et al.</i>	(1941)
Abundance and Fluorescent Components of Dissolved Organic Matter Affected by Land Use in a Drinking Water Source	GAO Jing, PU Xiao, ZHANG Yu-hu, <i>et al.</i>	(1950)
Emission of Methane from a Key Lake in the Eastern Route of the South-to-North Water Transfer Project and the Corresponding Driving Factors	ZHU Jun-yu, PENG Kai, LI Yu-yang, <i>et al.</i>	(1958)
Distribution Characteristics and Ecological and Health Risk Assessment of Phthalic Acid Esters in Surface Water of Qiandao Lake, China	MI Qi-xin, GUO Xiao-chun, LU Shao-yong, <i>et al.</i>	(1966)
Phosphorus Adsorption Characteristics and Loss Risk in Sediments of Lake Bay During the Overwinter Period of Cyanobacteria	JIN Zheng-hai, TU Cheng-qi, WANG Shu-hang, <i>et al.</i>	(1976)
Ecological Quality Assessment of the Wetlands in Beijing: Based on Plant Diversity	LI Guo, SUN Guang, ZHAO Zi-yi, <i>et al.</i>	(1988)
Effects of Pollution Control of Xiaoqing River on Environment Factors and Phytoplankton Community in the Laizhou Bay	ZHANG Jing-jing, WANG Yu-jue, LI Fan, <i>et al.</i>	(1997)
Effects of Different Aeration Treatments on Bacterial Diversity, Metabolic Activity, and Function in Constructed Wetlands	WANG Fei-peng, HUANG Ya-ling, ZHANG Rui-rui, <i>et al.</i>	(2007)
Analysis on the Source Tracing and Pollution Characteristics of Rainfall Runoff in the Old Urban Area of Nanning City	YUE Zhen-wu, LI Yi-ping, ZHOU Yu-xuan, <i>et al.</i>	(2018)
Effects of Aging on the Cd Adsorption by Microplastics and the Relevant Mechanisms	WANG Jun-jie, CHEN Xiao-chen, LI Qian-da, <i>et al.</i>	(2030)
Carbonized Foam Supported Co ₃ O ₄ Activated Peroxymonosulfate Towards Rhodamine B Degradation	WANG Yuan-yuan, YAN Xin, AI Tao, <i>et al.</i>	(2039)
Promoting Nitrogen Removal in ANAMMOX Biofilm Reactor by Fe ²⁺ Under Low Nitrogen Concentration	ZHENG Xu-wen, QIN Jia-fu, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i>	(2047)
Investigation on Oxygen Gas-liquid Mass Transfer in Sewage Pipelines Under Enhanced Ventilation	YANG Zhou, ZHANG Zhi-qiang, YANG Jing, <i>et al.</i>	(2055)
Characteristics and Assessment of Heavy Metal Contamination in Soils of Industrial Regions in the Yangtze River Economic Belt	ZHANG Yi, ZHOU Xin-quan, ZENG Xian-min, <i>et al.</i>	(2062)
Distribution and Environmental Significance of Rare Earth Elements in Typical Protected Vegetable Soil, Northern China	WANG Zu-wei, LIU Ya-ming, WANG Zi-lu, <i>et al.</i>	(2071)
Sources Identification, Ecological Risk Assessment, and Controlling Factors of Potentially Toxic Elements in Typical Lead-Zinc Mine Area, Guizhou Province, Southwest China	ZHANG Fu-gui, PENG Min, HE Ling, <i>et al.</i>	(2081)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in Soils Affected by Different Land Use Types in a Superimposed Pollution Area with High Geological Background	WANG Xue-wen, LIU Hong-yan, GU Xiao-feng, <i>et al.</i>	(2094)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in Farmland Soils Around Mining Areas and Pollution Assessment	WANG Hai-yang, HAN Ling, XIE Dan-ni, <i>et al.</i>	(2104)
Concentration Characteristics of Heavy Metals in Farmland-Sphagnum System and Ecological Risk Assessment	ZHU Di, ZHANG Zhao-hui, WANG Zhi-hui	(2115)
Spatial Variation and Influencing Factors of Soil pH in Anshun City	CHEN Qing-xia, LU Xiao-hui, TU Cheng-long	(2124)
Synergistic Repair Effect of Calcite-Based Passivator and Low-Accumulation Maize	REN Chao, REN Yu-zhong, LI Jing-tian, <i>et al.</i>	(2133)
Effects of <i>Burkholderia</i> sp. Y4 on Cadmium Damage and Uptake in Rice Seedlings	ZHANG Ya-hui, LIU Yue-min, WANG Chang-rong, <i>et al.</i>	(2142)
Changing Characteristics of Carbon-Based Greenhouse Gas Fluxes in Paddy Field in the Middle-Lower Yangtze Plain in China	LIU Shuo, ZHEN Xiao-jie, LIU Gang, <i>et al.</i>	(2151)
Effects of Plastic Film Mulching and Biochar Application on N ₂ O Emission from a Vegetable Field	HU Jian, JIANG Chang-sheng, CHEN Xin-tong, <i>et al.</i>	(2163)
Effects of Nitrogen Fertilizer Management on CH ₄ and N ₂ O Emissions in Paddy Field	ZHENG Mei-qun, LIU Juan, JIANG Pei-kun, <i>et al.</i>	(2171)
Structure and Functional Diversity of Bacterial Community in Rhizosphere Soil of Typical Vegetation in the Riparian Zone Along the Downstream of Songhua River	WANG Lu-ying, SUN Hui-zhen, YANG Xue	(2182)
Effects of Cotton Stalk Returning on Soil Enzyme Activity and Bacterial Community Structure Diversity in Cotton Field with Long-term Saline Water Irrigation	ZHOU Yong-xue, CHEN Jing, LI Yuan, <i>et al.</i>	(2192)
Effect of pH on the Abundance and Community Structure of Comammox <i>Nitrospira</i> in Paddy Soils	MA Rui, ZHAO Yong-peng, WANG Zhi-hui, <i>et al.</i>	(2204)
Effects of Biochar on Soil Organic Carbon of Eroded Cultivated Layer of Slope Farmland in Purple Hilly Area	ZHANG Jian-le, ZENG Xiao-ying, SHI Dong-mei, <i>et al.</i>	(2209)
Effects of Organic Fertilizer Replacing Chemical Fertilizer on Organic Carbon Mineralization and Active Organic Carbon in Dryland Yellow Soil	LIN Shi-fang, WANG Xiao-li, DUAN Jian-jun, <i>et al.</i>	(2219)
Soil Organic Carbon Storage, Active Component Contents, and Stability Along a Flooding Gradient in the Tidal Wetland of the Jiulong River Estuary	HUANG Xiao-qing, TONG Chuan, LUO Min, <i>et al.</i>	(2226)
System Construction and the Function Improvement of Ecological Carbon Sink in Coal Mining Areas Under the Carbon Neutral Strategy	LIU Xiang-hong, YAN Yong-jun, LIU Wei, <i>et al.</i>	(2237)