

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.1
第41卷 第1期

目次

近20年来中国PM_{2.5}污染演变的时空过程 时燕, 刘瑞梅, 罗毅, 杨昆 (1)

2007~2016年上海颗粒物浓度特征与气候背景异同分析 郑庆锋, 史军, 谈建国, 段玉森, 林燕芬, 徐卫忠 (14)

夏季大气PM_{2.5}中元素特征及源解析:以华中地区平顶山-随州-武汉为例 刘威杰, 石明明, 程敏, 黎荧, 朱戈昊, 邢新丽, 孔少飞, 张家泉, 祁士华 (23)

呼包鄂地区冬季、夏季PM_{2.5}污染特征 李伊明, 刘佳媛, 史国良, 皇甫延琦, 张昕, 杨奕, 冯银厂 (31)

2019年元旦前后石家庄市重污染过程PM_{2.5}污染特征及来源解析 周静博, 段菁春, 王建国, 杨鹏, 刘煥武, 李梅, 靳伟 (39)

基于模型模拟的成都市PM_{2.5}污染来源解析 许艳玲, 易爱华, 薛文博 (50)

北京市PM_{2.5}中砷污染特征 石绍萱, 杨艳蓉, 秦娟娟, 周雪明, 段菁春, 谭吉华, 陈荣志 (57)

夏秋季宁波市气态元素汞(GEM)污染特征及潜在源区贡献分析 易辉, 林佳梅, 蔡秋亮, 王克强, 陈进生, 佟磊, 李建荣, 肖航 (65)

安阳市大气PM_{2.5}中水溶性离子季节特征及来源解析 孙有昌, 姜楠, 王申博, 段时光, 张瑞芹 (75)

新乡市夏冬季节PM_{2.5}稳定碳同位素特征分析 闫广轩, 宋鑫, 张靖雯, 张朴真, 王力鹏, 张佳羽, 杨争, 曹治国, 樊静, 王跃思, 刘子锐 (82)

基于颗粒物化学组分粒径分布特征的源解析方法构建与评估 梁永莉, 田瑛泽, 刘童, 冯银厂 (90)

超低排放改造后燃煤电厂细颗粒物排放特征 王润芳, 马大卫, 姜少毅, 朱仁斌, 何军, 张本耀 (98)

京津冀地区城市臭氧污染趋势及原因探讨 余益军, 孟晓艳, 王振, 周崑, 于红霞 (106)

安阳市近地面臭氧污染特征及气象影响因素分析 杨健, 尹沙沙, 于世杰, 王丽娟, 张瑞芹, 郝建尤, 苏方成, 齐艳杰 (115)

长江三角洲2017年机动车IVOCs排放清单构建及其对SOA的生成影响 王倩, 黄凌, 王杨君, 殷司佳, 张琪, 易鑫, 李莉 (125)

华东典型城市非道路移动机械排气烟度 鲁君, 胡馨遥, 杨强, 唐伟, 夏阳, 井宝莉, 陈昫, 黄成 (133)

国内外储油库VOCs排放现状与标准分析 胡玮, 任碧琪, 黄玉虎, 秦建平, 卞吉玮, 吴清柱 (139)

四乙基愈创木酚液相·OH氧化SOA产率及特征分析:初始浓度的影响 庄雨, 陈彦彤, 李旭东, 马帅帅, 赵竹子, 叶招莲, 盖鑫磊 (146)

乌鞘岭南、北坡降水稳定同位素特征及水汽来源对比 徐秀婷, 贾文雄, 朱国锋, 马兴刚, 张昱, 袁瑞丰, 张志远, 石阳 (155)

长江源多年冻土区地下水氢氧稳定同位素特征及其影响因素 汪少勇, 何晓波, 丁永建, 常福宣, 吴锦奎, 胡召富, 王利辉, 杨贵森, 邓明珊 (166)

巴尔喀什湖流域水化学和同位素空间分布及环境特征 沈贝贝, 吴敬禄, 吉力力·阿不都外力, A. S. Saparov, Gulnura Isanova (173)

城市湖泊水环境整治对改善水质的影响:以蠡湖近30年水质变化为例 田伟, 杨周生, 邵克强, 潘辉, 胡洋, 白承荣, 姜星宇, 高光, 汤祥明 (183)

典型药物及个人护理品在黄东海海域水体中的检测、分布规律及其风险评估 陈贤, 张彩杰, 杨桂朋, 张婧, 刘梦 (194)

长江南京段水源水中有机磷酸酯的污染特征与风险评估 李栋, 张圣虎, 张芹, 王博, 卜元卿, 赵欣, 李辉, 宋宁慧, 郭瑞昕 (205)

雄安新区-白洋淀冬季冰封期水体溶解性有机物的空间分布、光谱特征及来源解析 周石磊, 孙悦, 张艺冉, 蒋永丰, 尹璐, 黄廷林, 李再兴, 罗晓, 战江, 王函 (213)

白洋淀表层沉积物元素的空间特征、风险评价及来源分析 汪敬忠, 刘卓, 魏浩, 吴玉会, 占水娥, 朱迟, 张益森 (224)

松花江表层沉积物PAEs分布特征及生态风险评估 王欢, 杨永哲, 王海燕, 董伟羊, 闫国凯, 常洋, 李泽文, 赵远哲, 凌宇 (232)

鄱阳湖湖口-长江段沉积物中微塑料与重金属污染物的赋存关系 李文华, 简敏菲, 刘淑丽, 江玉梅, 邓艳彬, 朱琳 (242)

臭氧对生物活性炭中微生物及出水消毒副产物的影响 刘宝明, 王夕希, 张晓夏, 顾艳芳, 李雨平, 阮文权, 缪恒锋, 潘杨 (253)

兰州市西固区儿童饮用水重金属暴露及健康风险精细化评估 陈月芳, 孙善伟, 段小丽, 许锦荣, 王娟, 康艺瑾, 梁为纲, 曹素珍 (262)

镁铁层状双金属氢氧化物对磷酸盐的吸附作用及对内源磷释放的控制效果及机制 吴俊麟, 林建伟, 詹艳慧, 程永前, 柏晓云, 辛慧敏, 常明玥 (273)

一硫代磷酸盐在介质上的吸附特征及机制 廖丹雪, 单慧媚, 彭三曦, 潘敖然, 黄健, 陈辉, 赵超然 (284)

酸碱复合改性海泡石亚结构特征及其对Cd(II)吸附性能 谢厦, 徐应明, 闫翠侠, 罗文文, 孙约兵 (293)

脱氮菌剂在低溶解氧黑臭水体中氮代谢特征 赵志瑞, 刘硕, 李铎, 李海萍, 李方红, 张佳瑶, 白志辉 (304)

宏基因组方法分析医药化工废水厂中抗生素耐药菌及抗性基因 陈红玲, 张兴桃, 王晴, 姚沛琳 (313)

淀粉废水处理系统中活性污泥的微生物群落结构及多样性分析 赵婷婷, 乔凯, 王蕾, 张伟, 竺建荣, 唐一, 胡滨, 王香莲, 杨静, 景在涛 (321)

基于SBR-ABR实现PN-SAD耦合工艺的运行与优化调控 陈重军, 张敏, 姜滢, 郭萌蕾, 谢嘉玮, 谢军祥, 沈耀良 (330)

基于间歇饥饿的SNAD工艺运行 李冬, 刘志诚, 徐贵达, 王玉颖, 张杰 (337)

反硝化-高效部分亚硝化-厌氧氨氧化工艺处理老龄垃圾渗滤液 陈小珍, 汪晓军, Karasuta Chayangkun, 周松伟, 钟中, 陈振国, 陈晓坤 (345)

硝化微颗粒污泥快速培养及其亚硝化功能快速实现 刘文如, 宋家俊, 王建芳, 沈耀良 (353)

高频曝停下曝时间对亚硝化颗粒污泥性能的影响 张杰, 劳会妹, 李冬, 魏子清 (360)

中国东北沈抚地区土壤中PBDEs的残留、来源及风险评估 向鑫鑫, 鲁垠涛, 阮起扬, 赖德, 孙绍斌, 姚宏, 张战胜 (368)

某焦化场地非均质包气带中多环芳烃(PAHs)来源及垂向分布特征 孟祥帅, 吴萌萌, 陈鸿汉, 岳希, 陶抒远 (377)

北京蔬菜地土壤中抗生素抗性基因与可移动元件的分布特征 张汝凤, 宋渊, 高浩泽, 程首涛, 孙艳梅, 王旭明 (385)

长期施肥和耕作下紫色土坡耕地土壤C、N、P和K化学计量特征 杜映妮, 李天阳, 何丙辉, 贺小容, 付适 (394)

亚热带稻田土壤碳氮磷生态化学计量学特征 宋佳龄, 盛浩, 周萍, 段良霞, 周清, 张杨珠 (403)

宛山荡农田土壤氮迁移过程反硝化与厌氧氨氧化 陈志浩, 覃云斌, 丁帮璟, 胡伏优, 陈伟, 李正魁 (412)

秸秆炭化还田对滴灌棉田土壤微生物代谢功能及细菌群落组成的影响 王晶, 马丽娟, 刘泽华, 闵伟, 侯振安 (420)

基于PMF模型的九龙江流域农田土壤重金属来源解析 黄华斌, 林承奇, 胡恭任, 于瑞莲, 郝春莉, 陈枫桦 (430)

塔里木盆地东南缘绿洲区土壤砷空间分布及农作物砷富集特征 陈云飞, 周金龙, 曾妍妍, 王松涛, 杜江岩, 孙英, 顾思博 (438)

广西典型碳酸盐岩区农田土壤-作物系统重金属生物有效性及迁移富集特征 马宏宏, 彭敏, 刘飞, 郭飞, 唐世琪, 刘秀金, 周亚龙, 杨柯, 李括, 杨峥, 成杭新 (449)

不同钝化剂对微碱性土壤镉、镍形态及小麦吸收的影响 张静静, 朱爽阁, 朱利楠, 柳海涛, 杨金康, 化党领 (460)

不同钝化剂对鸡粪堆肥重金属钝化效果及其腐熟度指标的影响 栾润宇, 高珊, 徐应明, 纪文凝, 闫翠侠, 孙约兵 (469)

黄土丘陵区退耕草地土壤呼吸及其组分对氮磷添加的响应 周俊杰, 陈志飞, 杨全, 赖帅彬, 王智, 徐炳成 (479)

炉渣与生物炭施加对福州平原水稻田温室气体排放的后续影响 蓝兴福, 王晓彤, 周雅心, 金强, 许旭萍, 王维奇 (489)

《环境科学》征订启事(89) 《环境科学》征稿简则(97) 信息(303, 329, 344)

长江三角洲 2017 年机动车 IVOCs 排放清单构建及其对 SOA 的生成影响

王倩¹, 黄凌^{1*}, 王杨君^{1*}, 殷司佳¹, 张琪², 易鑫², 李莉¹

(1. 上海大学环境与化学工程学院, 环境污染与健康研究所, 上海 200444; 2. 东华大学环境科学与工程学院, 上海 201620)

摘要: 中等挥发性有机物(IVOCs)对大气中二次有机气溶胶(SOA)的生成有重要贡献,但尚未包括在目前的排放清单中. 本研究以长三角地区为研究对象,分别基于排放因子法和 IVOCs/POA 比例系数法对长三角地区 2017 年机动车 IVOCs 的排放量进行估算,构建长三角地区 2017 年机动车 IVOC 排放清单,分析其不确定性并估算其对 SOA 生成潜势的影响. 基于排放因子法的结果表明,2017 年长三角地区机动车 IVOCs 排放总量为 3.58 万 t,SOA 的生成潜势为 695 t,其中载货汽车的 IVOCs 排放量在长三角大部分城市的占比均超过 70%;从燃料类型来看,柴油车的 IVOCs 排放量远高于汽油车. 基于 IVOCs/POA 比例系数法的结果表明,由不同的 IVOCs/POA 比例以及不同的 POA/PM_{2.5} 占比得到的排放清单结果差别巨大,最大值可达 64.2 万 t,最小仅为 5.2 万 t,造成的 SOA 生成潜势分别为 1.55 万 t 和 1032 t. 本研究表明基于不同的估算方法构建的 IVOCs 排放清单结果差别巨大,具有很大的不确定性,将直接影响后续空气质量模型对 SOA 的模拟结果. 因此,需进一步将不同清单结果用于空气质量模型中对 SOA 进行模拟,通过与观测值的比较,从而获得较为准确的长三角地区机动车 IVOCs 排放清单.

关键词: 中等挥发性有机物(IVOCs); 机动车; 排放清单; 长江三角洲; 二次有机气溶胶(SOA)

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)01-0125-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201907178

Emission Inventory of Intermediate Volatility Organic Compounds from Vehicles in the Yangtze River Delta in 2017 and the Impact on the Formation Potential of Secondary Organic Aerosols

WANG Qian¹, HUANG Ling^{1*}, WANG Yang-jun^{1*}, YIN Si-jia¹, ZHANG Qi², YI Xin², LI Li¹

(1. Institute of Environmental Pollution and Health, School of Environmental and Chemical Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 2. College of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract: Intermediate volatility organic compounds (IVOCs) have a significant contribution to the formation of secondary organic aerosols (SOA) in the atmosphere, but are not included in the current emission inventory. In this study, IVOC emissions from vehicles are estimated for the Yangtze River Delta region (YRD) for 2017 based on two methods: the emission factor method and the IVOCs/POA scaling factor method. Uncertainties in the estimated IVOCs emissions and the impact on their potential formation are discussed. The results based on the emission factor method showed that the total vehicular IVOCs emission in the YRD in 2017 was 35800 tons, and that the formation potential of SOA was an estimated 695 tons. IVOCs emissions from trucks accounted for >70% of total IVOCs emissions in most cities in the YRD region. In terms of fuel type, IVOCs emissions from diesel vehicles were much higher than of those from gasoline vehicles. Results based on the IVOCs/POA scaling factor method showed that the emissions calculated by different combinations of IVOCs/POA ratios and POA/PM_{2.5} ratios that could vary significantly, with a maximum of 64.2×10^4 tons and a minimum of just 5.2×10^4 tons. The resultant SOA formation potential was 1.55×10^4 tons and 1032 tons for the maximum and minimum, respectively. This study shows that the results of IVOCs emissions based on different estimation methods are associated with large uncertainties, which could directly affect the simulation results of SOA in subsequent air quality models. Therefore, it is necessary to use different inventory results in air quality models and perform model evaluation of SOA in order to obtain more accurate IVOCs emission inventories of vehicles in the YRD region.

Key words: intermediate volatility organic compounds (IVOCs); vehicles; emission inventory; Yangtze River Delta; secondary organic aerosols (SOA)

大气细颗粒物(PM_{2.5},即空气动力学直径小于2.5 μm的颗粒物)对大气能见度、人体健康及气候变化都有着重要影响^[1-4]. 有机气溶胶(organic aerosol, OA)是PM_{2.5}的重要组成部分,其质量占PM_{2.5}的20%~60%^[5]. 其中,二次有机气溶胶(secondary organic aerosol, SOA)是OA的重要组成部分,占OA质量的一半以上^[6]. 与二次无机气溶胶(如硫酸盐的生成)相比,SOA的前体物及其形成机

理更为复杂^[7],由于含氧、含氮等极性官能团的引入,SOA具有更强的溶解度和吸湿性,对气溶胶的

收稿日期: 2019-07-21; 修订日期: 2019-08-11

基金项目: 上海市青年科技英才扬帆计划项目(19YF1415600); 国家自然科学基金青年基金项目(41105102); 国家重点研发计划项目(2018YFC0213600)

作者简介: 王倩(1996~),女,硕士研究生,主要研究方向为大气污染成因分析, E-mail: 1651119057@qq.com

* 通信作者, E-mail: linghuang@shu.edu.cn; yjwang326@shu.edu.cn

光学特性及健康效应等有很大的影响^[8,9].

中等挥发性有机化合物(intermediate volatility organic compounds, IVOCs)是一种有效饱和浓度在 $10^3 \sim 10^6 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 之间的有机物,挥发性介于挥发性有机物(VOCs)和半挥发性有机物(SVOCs)之间,大致相当于 $\text{C}_{12} \sim \text{C}_{22}$ 的烷烃^[10].有研究表明,IVOCs是SOA的重要前体物^[11],对SOA的生成有显著的影响^[12,13].许多研究中都发现将IVOCs加入模型之后,对SOA的产量及日变化的模拟都更接近测量值^[14~16].但目前的排放清单仅包括了VOCs^[17~20],尚未包括IVOCs. IVOCs的主要来源包括机动车尾气排放^[21]、生物质燃烧^[22,23]、烹饪^[24]和船舶^[25]等.近年来,国内外学者对IVOCs排放开展了许多研究.例如,Zhao等^[26,27]研究了美国加利福尼亚州汽油车及柴油车的IVOCs排放量及化学成分;Cross等^[28,29]研究了加利福尼亚州爱德华兹机场的飞机及柴油发动机的IVOCs总排放量.在国内,Huang等^[25]对长江大型货船的IVOCs排放进行了表征,确定了不同燃料类型的IVOCs排放因子;Liu等^[30]采用排放因子法建立了基于省份的中国机动车IVOCs排放清单;Wu等^[31]建立了珠江三角洲IVOCs源排放清单并研究了IVOCs对SOA的生成影响.

长三角地区是我国最发达的三大重点城市群之一,经济发达,人口密集,机动车保有量大,同时也长期面临着灰霾的困扰.有研究表明 $\text{PM}_{2.5}$ 中的SOA占比高达75%^[32],是造成霾的主要物质之一^[33,34].长三角地区 $\text{PM}_{2.5}$ 中有机组分的贡献超过40%^[35],其中SOA对有机组分的贡献高达69%.因此,为进一步改善长三角地区 $\text{PM}_{2.5}$ 污染状况,需要针对长三角地区SOA的化学组成、时空分布和形成机制等开展一系列相关研究.但目前缺乏针对长三角地区IVOCs的研究,尚未建立完整的IVOCs源排放清单.

本文以长三角地区为研究对象,采用两种方法对长三角地区机动车的IVOCs排放量进行估算,构建长三角地区IVOCs排放清单,分析其不确定性,并估算IVOCs的SOA生成潜势,以期为更精准地揭示长三角地区SOA的生成、来源及污染规律以及制定科学的大气污染防控计划提供重要基础数据.

1 材料与方法

1.1 研究范围

本研究以2017年为基准年,研究区域为长三角三省一市(江苏省、浙江省、安徽省及上海市)共41个城市(图1).长三角地区是我国经济活动、能源消费最为密集的区域之一,2017年汽车保有量达到

3745万辆(数据来源:各市2018年统计年鉴),其中柴油车占9.2%,汽油车占比90.7%;载客和载货汽车分别占比91.3%和8.7%.车辆行驶过程中会产生大量的一次污染物(如 CO 、 NO_x 及一次颗粒物)及二次污染物的前体物(如VOCs和IVOCs),对大气污染物的排放贡献不可小觑^[36].

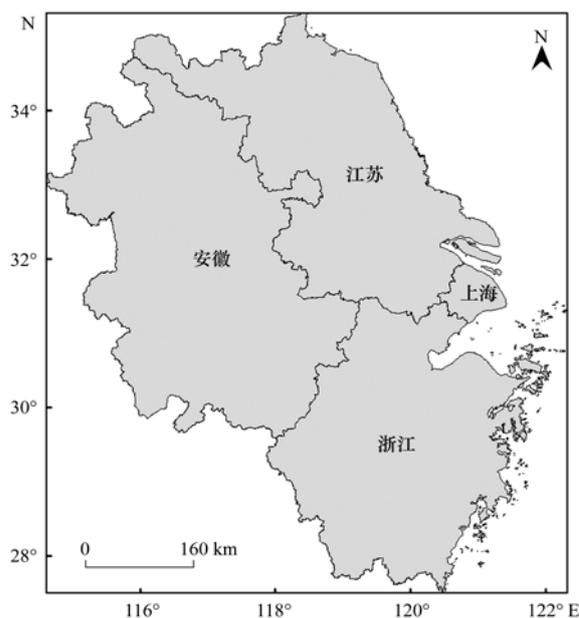


图1 研究区域示意

Fig. 1 Map of the study area

1.2 机动车IVOCs排放清单估算方法

1.2.1 排放因子法

本研究中基于排放因子法的机动车IVOCs排放量估算如公式(1)所示:

$$E_i = \sum_j \sum_k (EF_{j,k} \times VP_{i,j,k} \times \text{VKT}_j) \times 10^{-6} \quad (1)$$

式中, E_i 表示*i*市汽车的IVOCs排放量(t), $EF_{j,k}$ 表示车型为*j*型,排放控制标准为*k*的机动车IVOCs排放因子($\text{g} \cdot \text{km}^{-1}$), $VP_{i,j,k}$ 表示*i*市中车型为*j*型、排放控制标准为*k*的数量, VKT_j 表示车型为*j*型的年均行驶里程(km).VP数据来自长三角各市2018年统计年鉴^[37~40],VKT数据参考Liu等^[30]的研究.

1.2.2 机动车排放因子的确定

本研究将机动车分为载客汽车和载货汽车,并进一步根据燃料类型(汽油、柴油)和车型进行了细分.其中载客汽车分为5类,分别是微型客车、中型客车、大型客车、出租车和公交车;载货汽车分为微型货车、中型货车及重型货车这3类.不同车型的IVOCs排放因子参考Zhao等^[26,27]的研究,如表1所示.本研究假设出租车的排放因子与微型载客汽车一致,公交车的排放因子与中型载客汽车一致.按车型分,载货汽车的排放因子略大于载客汽

表 1 本研究使用的 IVOCs 排放因子

Table 1 IVOCs emission factors used in this study

机动车分类	排放因子/ $g \cdot km^{-1}$						
	国 1 前	国 1	国 2	国 3	国 4	国 5	
载客客车	小微型载客汽车	0.092 87	0.092 87	0.009 77	0.008 09	0.00413	0.001 51
	中型载客汽车	0.018 37	0.018 37	0.004 24	0.005 32	0.005 32	0.002 21
	大型载客汽车	0.016 71	0.016 71	0.004 47	0.004 47	0.025 53	0.002 31
	公交车	0.018 37	0.018 37	0.004 24	0.005 32	0.005 32	0.002 21
	出租车	0.092 87	0.092 87	0.009 77	0.008 09	0.004 13	0.001 51
载货汽车	轻微型货车-汽油	0.072	0.072	0.002 66	0.002 66	0.003 33	0.002 72
	轻微型货车-柴油	0.060 72	0.060 72	0.060 72	0.060 72	0.085 74	0.085 74
	中型货车-汽油	0.108	0.108	0.003 99	0.003 99	0.005	0.004 09
	中型货车-柴油	0.091 08	0.091 08	0.091 08	0.091 08	0.128 61	0.011 22
	重型货车-汽油	0.108	0.108	0.003 99	0.003 99	0.005	0.004 09
	重型货车-柴油	0.344 78	0.344 78	0.344 78	0.344 78	0.344 78	0.011 22

车;按燃料类型分,汽油车的排放因子远大于柴油车。

1.2.3 基于 IVOCs/POA 比例的方法

1.2.3.1 POA 的确定

本研究中机动车 $PM_{2.5}$ 的排放因子主要来源于本地实测校正以及参考国家清单指南再结合 IVE 模型计算。2017 年长三角 $PM_{2.5}$ 排放量为 10.4 万 t, 柴油车和汽油车分别为 7.2 万 t 和 3.0 万 t。机动车

POA 的排放量基于 $OC \times 1.2$ 计算得到。不同研究报道的 OC 在 $PM_{2.5}$ 中的占比有较大不同,表 2 为不同研究中 OC 在 $PM_{2.5}$ 中的占比。对柴油车来说, $OC/PM_{2.5}$ 在 16% ~ 94.9% 之间,相差 5 倍。汽油车的 $OC/PM_{2.5}$ 数据相对较少,分别为 27% 和 64.6%,相差 1.4 倍。表 3 为柴油车 $POA/PM_{2.5}$ 比值的均值、最大/小值以及 95% 置信区间。

表 2 不同研究中 $OC/PM_{2.5}$ 占比/%Table 2 $OC/PM_{2.5}$ ratio in different studies/%

燃料类型	车型	文献						
		[41]	[42]	[43]	[44]	[45]	[46]	[47]
柴油	轻型	23.2	66.5	16.5	—	—	—	51.0
	中型	23.6	—	—	64.4	—	—	51.0
	重型	24.5	94.9	16.9	—	51.8	51.8	51.0
汽油	轻型	—	—	—	64.6	—	—	27.0
	中型	—	—	—	—	—	—	27.0
	重型	—	—	—	—	—	—	27.0

表 3 不同车型的 $POA/PM_{2.5}$ 占比/%Table 3 $POA/PM_{2.5}$ ratio of different vehicle types/%

燃料类型	车型	$POA/PM_{2.5}$			
		均值	最大值	最小值	95% 置信区间
柴油	轻型	40	80	15	27 ~ 54
	中型	40	77	22	28 ~ 52
	重型	39	62	22	30 ~ 47
汽油	—	—	78	32	—

1.2.3.2 IVOCs/POA 比例法情景设置

不同的研究在使用 POA 估算 IVOCs 排放量时选取的 IVOCs/POA 比值不同(如表 4),且变化幅度在 1.5 ~ 30 之间。譬如,Robison 等^[12]使用 1.5 倍 POA 排放量作为移动源的 IVOCs 排放总量;Hodzic 等^[48]则使用 1.5 ~ 3.0 倍 POA 的值作为柴油车的 IVOCs 排放总量;Zhao 等^[49]使用 4.5 倍 POA 作为柴油车 IVOCs 的排放量。由于 IVOCs/POA 比值选取的不同,导致最终估算的 IVOCs 排放量差别非常大。因此,本研究选取 $POA/PM_{2.5}$ 的均值和置信区间

的上、下限(汽油车由于数据有限,直接采用已有报道数据)与不同 IVOCs/POA 比值进行组合,共设置 6 种柴油车 IVOCs 估算情景(S1D ~ S6D)以及 4 种汽油车 IVOCs 估算情景(S1G ~ S4G,如表 4)。

1.3 SOA 生成潜势估算

本研究基于 IVOCs 排放量初步估算 SOA 的生成潜势,计算方法如公式(2)所示:

$$M_{SOA} = E_{IVOC} \times \sum_i (\omega_i \times Y_i) \times 10^{-3} \quad (2)$$

式中, M_{SOA} 为 SOA 的生成量(t), E_{IVOC} 为 IVOCs 排放

表 4 情景设置
Table 4 Scenario settings

情景设置	燃料类型	轻型/%	中型/%	重型/%	POA 系数	文献
S1D	柴油车	27	28	30	2	[48]
S2D		40	40	39		
S3D		54	52	47		
S4D		27	28	30		
S5D		40	40	39		
S6D		54	52	47		
S1G	汽油车(不分车型)		32		1.5	[12]
S2G			78		30	[49]
S3G			32			
S4G			78			

量(t), ω_i 为物种 i 占总 IVOCs 的质量分数 ($\mu\text{g}\cdot\text{mg}^{-1}$), Y_i 为物种 i 的 SOA 产率. 本研究考虑了 15 种 IVOCs 物种的 SOA 生成潜势, 相关参数参考 Zhao 等^[26,27] 的研究, 各物种的质量分数以及 SOA 产率(OA 浓度为 $9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 如表 5 所示.

2 结果与讨论

2.1 基于排放因子法的 IVOCs 排放清单

本研究利用排放因子法得到 2017 年长三角机动车 IVOCs 排放总量为 3.58 万 t, 各车型 IVOCs 排放量及其本省占比详见表 6. 其中, 由于重型柴油货车的 IVOCs 排放因子较大, 重型货车的 IVOCs 排放量为 2.22 万 t, 占长三角机动车 IVOCs 排放总量的 62%. 另外, 2017 年长三角地区小微型客车保有量为 3355 万辆, 超过长三角机动车总保有量的 90%, 其 IVOCs 排放量仅次于重型货车, 为 8347 t, 占长三角机动车 IVOCs 总排放量的 23%. 从各省份的排放量来看, 江苏省 IVOCs 排放量最多(为 1.37 万 t),

占比 38%; 安徽省次之(为 1.04 万 t), 为 29%.

表 5 各 IVOCs 物种占总 IVOCs 的质量分数(ω) 及其 SOA 产率(Y)

Table 5 Mass fraction of each IVOCs in total IVOCs ω and SOA yield

组分	柴油车 $/\mu\text{g}\cdot\text{mg}^{-1}$	汽油车(cold start) $/\mu\text{g}\cdot\text{mg}^{-1}$	SOA 产率 (Y)
十二烷	13.42	7.07	0.08
十三烷	12.58	4.27	0.21
十四烷	8.4	2.56	0.28
十五烷	7.05	1.39	0.34
十六烷	5.25	1.46	0.38
十七烷	3.81	1.35	0.42
十八烷	3.41	1.29	0.42
十九烷	1.67	0.64	0.42
二十烷	0.84	1.31	0.42
二十一烷	0.51	2.11	0.42
二十二烷	0.33	4.54	0.42
姥鲨烷	3.3	1.8	0.34
植烷	71.84	1.59	0.38
萘	2.39	77.2	0.21
菲	0.27	2.72	0.31

表 6 长三角各车型 IVOCs 排放量及其占各省总排放量比例¹⁾

Table 6 IVOCs emissions from vehicles in the Yangtze River Delta and their proportion of total emissions in each province

省份	小微型客车	中型客车	大型客车	轻微型货车	中型货车	重型货车	总计
上海市	360(13.7)	10(0.4)	14(0.5)	138(5.2)	177(6.7)	1933(73.4)	2632
江苏省	3624(26.5)	37(0.3)	36(0.3)	868(6.4)	603(4.4)	8499(62.2)	13667
浙江省	2814(31.0)	32(0.4)	31(0.3)	1707(18.8)	288(3.2)	4213(46.4)	9085
安徽省	1549(14.9)	13(0.1)	26(0.3)	1059(10.2)	179(1.7)	7567(72.8)	10393
长三角总计	8347(23.3)	92(0.3)	107(0.3)	3772(10.5)	1247(3.5)	22212(62.1)	35777

1) 括号外数值表示排放量, 单位为 t, 括号内数值表示比例, 单位为 %

图 2 为长三角地区 2017 年各市 IVOCs 排放量. 在 41 个城市中, 由于上海市和苏州市 2017 年机动车保有量显著高于其他各市(上海市约为 365.4 万辆, 苏州市约为 357.5 万辆, 分别为平均值的 24 倍和 23 倍), 因此两市的 IVOCs 排放量明显高于其他城市. 上海市 IVOCs 排放量为 2632 t, 约为平均值的 3 倍; 苏州市次之, 排放量为 2390 t; 黄山市最低, 仅为

147 t. 从车型来看, 长三角地区载客汽车 IVOCs 排放量为 8546 t (占 24%), 载货汽车排放量为 27232 t (76%), 载货汽车 IVOCs 排放量远高于载客汽车. 长三角有 29 个城市载货汽车 IVOCs 排放量均占该城市机动车 IVOCs 排放总量的 70% 以上. 其中, 安徽省蚌埠市、亳州市、阜阳市、宿州市及浙江省台州市的载货汽车 IVOCs 排放量占比均超过 90%.

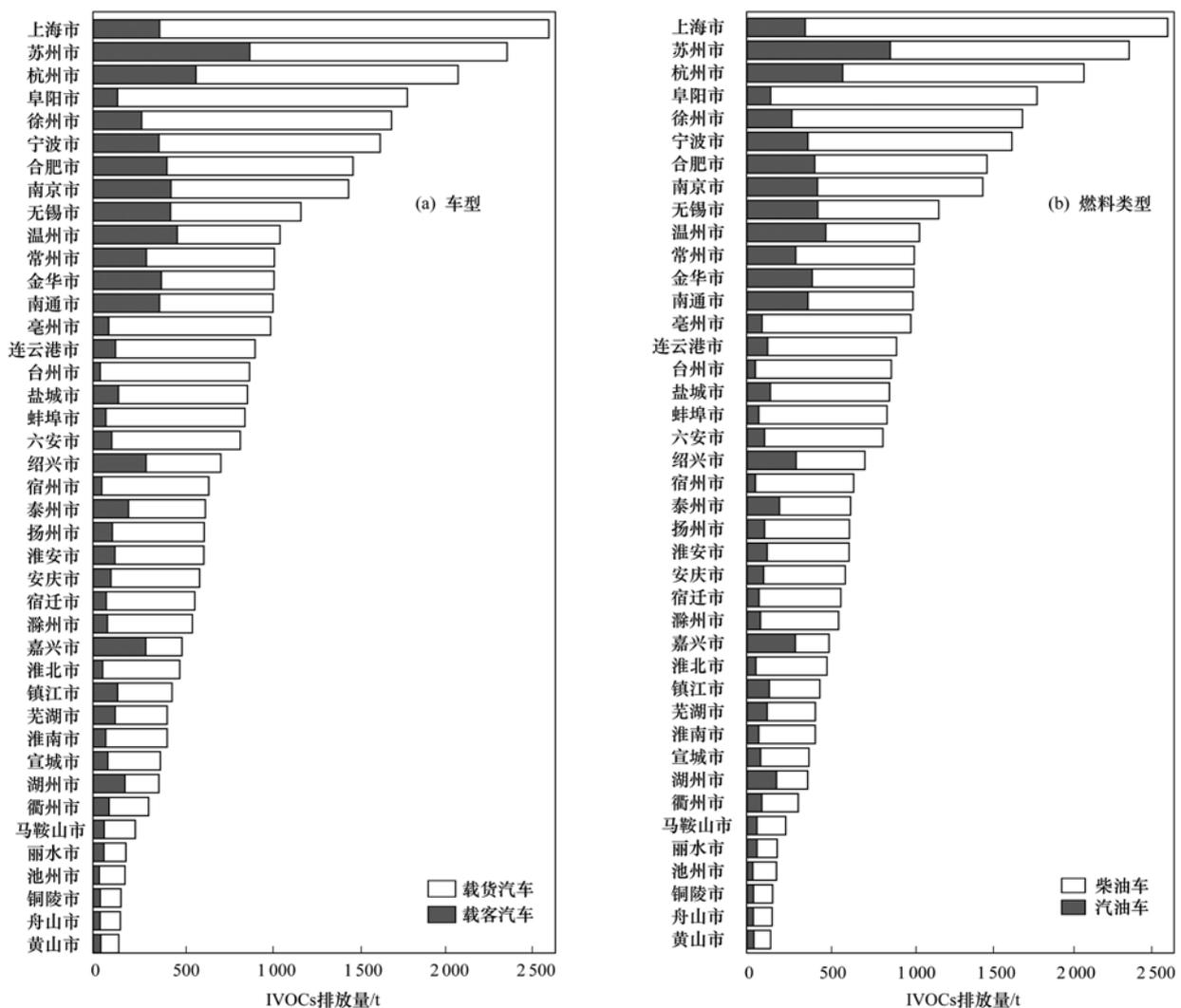


图2 长三角各市机动车 IVOCs 排放量

Fig. 2 IVOCs emissions from vehicles in the Yangtze River Delta

从燃料类型来看,汽油车排放总量为8 562 t (占24%),柴油车排放总量为2.72万t(占76%)。由于柴油车的排放因子高于汽油车,因此柴油车的IVOCs排放量显著高于汽油车。长三角各市的柴油车IVOCs排放量约占该市机动车IVOCs排放总量41%~94%。其中,上海市柴油车IVOCs排放量最大,为2 268 t,黄山市柴油车排放量最小,仅为104 t。苏州市汽油车IVOCs排放量最大,池州市最小,分别为896 t和36 t。

2.2 基于IVOCs/POA比例法的IVOCs排放清单

表7为不同IVOCs/POA情景设置下长三角2017年机动车IVOCs的排放总量。其中,汽油车IVOCs排放量在1.0~50.6万t之间,柴油车IVOCs排放量在3.9~15.0万t之间。由于POA/PM_{2.5}以及IVOCs/POA比值选取的不同,各情景设置下的排放清单差异巨大。例如,24个情景中(6个柴油车情景×4个汽油车情景)IVOCs排放总量最低为4.9万t(S1G+S1D),最高为65.5万t(S4G+S6D),相差

12倍。取其中6种情景的计算结果与排放因子法计算结果进行对比(图3),IVOCs排放总量分别为4.9、7.7、27.4、59.2、32.5、65.5和3.6万t。在S1G+S1D和S2G+S2D两种情景中,柴油车与汽油车的IVOCs/POA的比例系数分别为2和1.5,这两种情景中柴油车和汽油车的IVOCs排放量占比为79%和21%、67%和33%。而S3G+S3D、S4G+S4D、S3G+S5D和S4G+S6D这种情景中柴油车与汽油车的IVOCs/POA的比例系数分别为4.5和30,造成汽油车的IVOCs排放量远高于柴油车,具体表现为这3种情景中柴油车的IVOCs排放量占15%~36%,汽油车占64%~85%。由此可见,系数选取的不同会对清单结果造成巨大差异。

两种计算方法相比,基于排放因子法计算的IVOCs排放总量远低于基于IVOCs/POA比例法,前者排放量与S1G+S1D的结果最接近(相差1.3万t);与S4G+S6D相比,排放因子法的计算结果仅为后者结果的5.5%。基于排放因子法的结果中柴油

车的 IVOCs 排放量占 76%, 汽油车占 24%, 与 S1G + S1D 和 S2G + S2D 这 2 种情景类似. 但 S3G + S3D、S4G + S4D、S3G + S5D 和 S4G + S6D 这 4 种情景中柴油车与汽油车的排放量占比与前 4 种有显著的差别(柴油车占 15%~36%, 汽油车占 64%~85%). 由此可见, 不同 IVOCs 的计算方法对 IVOCs 排放量的结果有巨大影响. 因此, 以往的研究中用基于 IVOCs/POA 比例法计算的 IVOCs 排放量有相当大的不确定性.

表 7 不同情景下长三角机动车 IVOCs 排放量/ 10^4 t

Table 7 IVOCs emissions from vehicles in the Yangtze River Delta under different scenarios/ 10^4 t

项目	柴油						
	S1D	S2D	S3D	S4D	S5D	S6D	
汽油	S1G	4.9	6.3	7.7	9.7	12.8	16.0
	S2G	6.4	7.8	9.2	11.2	14.3	17.5
	S3G	24.6	26.0	27.4	29.4	32.5	35.7
	S4G	54.4	55.8	57.2	59.2	62.3	65.5

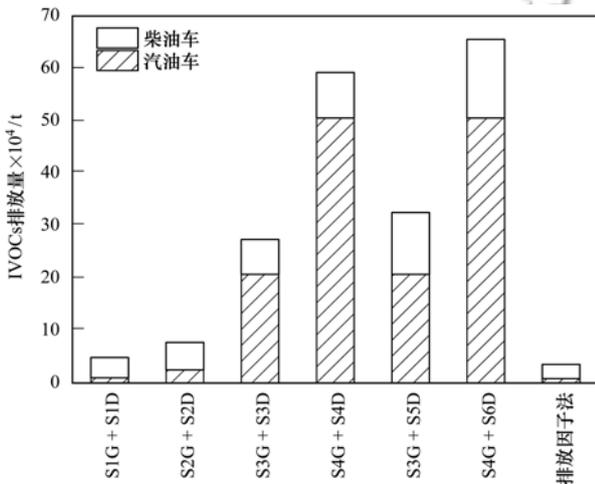


图 3 不同情景下 IVOCs 排放总量

Fig. 3 Total IVOCs emissions under different scenarios

2.3 SOA 生成潜势

本研究考虑了 15 种 IVOCs 物种在不同情景下的 SOA 生成潜势, 如图 4 所示. 由于 SOA 生成潜势与 IVOCs 排放量为简单的线性关系, 在 IVOCs/POA 比例法的 6 种情景中, S4G + S6D 的 SOA 生成潜势最大, 为 1.58 万 t, 其中柴油车和汽油车的 SOA 生成潜势分别为 2 591 t (占 16.4%) 和 1.32 万 t (占 83.6%); S1G + S1D 的 SOA 生成潜势最小, 为 938 t. 而基于排放因子法算出的 SOA 生成潜势显著低于 IVOCs/POA 比例法的结果, 其 SOA 生成潜势仅为 695 t. 由此可见, 基于不同方法算出的 SOA 生成潜势差别很大, IVOCs 排放清单的不确定性势必影响后续空气质量模式对 SOA 的模拟准确性.

2.4 不确定性分析

已有的研究对 IVOCs 的估算方法有所不同, 主

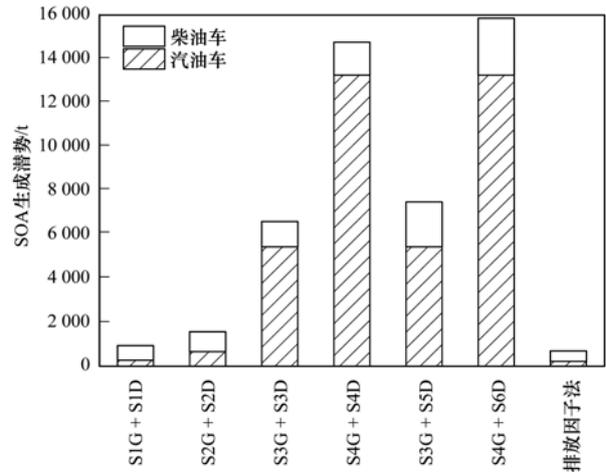


图 4 不同情景下 SOA 的生成潜势

Fig. 4 SOA generation potential in different scenarios

要采用两类方法对 IVOCs 排放量进行估算: ①排放因子法^[30,31], 即基于实测的源排放因子及相应地活动水平数据计算 IVOCs 排放量. 这种方法相对可靠, 但数据来源有限, 且排放因子具有较强的本地特征; ②基于 IVOCs/POA 比例法^[27,48], 即基于一次有机气溶胶(primary organic aerosol, POA)的排放量及固定的 IVOCs/POA 比例计算得出. 这种方法相对简单、直接, 但存在较大不确定性. 结果表明, 基于这两种方法获得的长三角地区 2017 年机动车 IVOCs 排放量在 3.6~65.5 万 t 之间, 估算结果存在较大的不确定性. 基于排放因子法构建 IVOCs 清单的不确定性主要来自活动水平数据的获取以及排放因子的确定. 活动水平主要来源于各市的统计年鉴以及相关文献资料通过间接计算得到. 2018 年各市统计年鉴中车辆数据分类(如车型)不一致, 且分类有详有简, 因此, 在计算过程中采取了一些简单假设. 除此之外, 本研究使用的排放因子为已有报道数据, 与本地机动车的排放因子可能存在一定差异.

基于 IVOCs/POA 比例法构建的 IVOCs 排放清单的不确定性相对更大. 首先, OC/PM_{2.5} 取值具有一定的不确定性, 造成计算出的 POA 排放量差别较大. 其次, IVOCs/POA 的比值也存在较大不确定性. 已有研究中 IVOCs/POA 比值的取值范围在 1.5~30 之间不等. 上述两种原因都会造成排放清单的不确定性. 因此, 需进一步结合空气质量模式对 SOA 进行模拟, 通过与观测值的对比验证以评估 IVOCs 排放清单的准确性.

3 结论

(1) 基于两种不同估算方法首次对长三角地区机动车 IVOC 排放总量进行了估算.

(2) 基于排放因子法的结果表明, IVOCs 排放

量以微型客车和中型货车为主,上海和苏州的 IVOCs 排放量显著高于长三角其他城市。

(3) 两种 IVOCs 排放清单计算方法结果相差甚远,表明 IVOCs 排放清单具有很大的不确定性,由此计算的 SOA 生成潜势相差巨大。IVOCs 清单的不确定性可进一步造成后续空气质量模式 SOA 模拟的不确定性。

参考文献:

- [1] Kampa M, Castanas E. Human health effects of air pollution [J]. *Environmental Pollution*, 2008, **151**(2): 362-367.
- [2] Liu Y Z, Jia R, Dai T, *et al.* A review of aerosol optical properties and radiative effects [J]. *Journal of Meteorological Research*, 2014, **28**(6): 1003-1028.
- [3] Pui D Y H, Chen S C, Zuo Z L. PM_{2.5} in China: Measurements, sources, visibility and health effects, and mitigation [J]. *Particology*, 2014, **13**: 1-26.
- [4] 谢元博, 陈娟, 李巍. 雾霾重污染期间北京居民对高浓度 PM_{2.5} 持续暴露的健康风险及其损害价值评估 [J]. *环境科学*, 2014, **35**(1): 1-8.
- Xie Y B, Chen J, Li W. An assessment of PM_{2.5} related health risks and impaired values of Beijing residents in a consecutive high-level exposure during heavy haze days [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(1): 1-8.
- [5] 郝吉明. 大气二次有机气溶胶污染特征及模拟研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [6] Ayres B R, Allen H M, Draper D C, *et al.* Organic nitrate aerosol formation via NO₃⁺ biogenic volatile organic compounds in the southeastern United States [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, **15**(23): 13377-13392.
- [7] 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.
- [8] 高杰, 乔利平, 楼晟荣, 等. 上海城区二次气溶胶的形成: 光化学氧化与液相反应对二次气溶胶形成的影响 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(6): 2510-2518.
- Gao J, Qiao L P, Lou S R, *et al.* Secondary aerosol formation in urban Shanghai: insights into the roles of photochemical oxidation and aqueous-phase reaction [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(6): 2510-2518.
- [9] 郑玫, 闫才青, 李小滢, 等. 二次有机气溶胶估算方法研究进展 [J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(3): 555-564.
- Zheng M, Yan C Q, Li X Y, *et al.* A review of methods for quantifying secondary organic aerosol [J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(3): 555-564.
- [10] Zhao Y L, Hennigan C J, May A A, *et al.* Intermediate-volatility organic compounds: a large source of secondary organic aerosol [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48**(23): 13743-13750.
- [11] Tkacik D S, Presto A A, Donahue N M, *et al.* Secondary organic aerosol formation from intermediate-volatility organic compounds: cyclic, linear, and branched alkanes [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46**(16): 8773-8781.
- [12] Robinson A L, Donahue N M, Shrivastava M K, *et al.* Rethinking organic aerosols: Semivolatile emissions and photochemical aging [J]. *Science*, 2007, **315**(5816): 1259-1262.
- [13] Jathar S H, Woody M, Pye H O T, *et al.* Chemical transport model simulations of organic aerosol in southern California: model evaluation and gasoline and diesel source contributions [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, **17**(6): 4305-4318.
- [14] Couvidat F, Kim Y, Sartelet K, *et al.* Modeling secondary organic aerosol in an urban area: application to Paris, France [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13**(2): 983-996.
- [15] Hayes P L, Carlton A G, Baker K R, *et al.* Modeling the formation and aging of secondary organic aerosols in Los Angeles during CalNex 2010 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, **15**(10): 5773-5801.
- [16] Woody M C, Baker K R, Hayes P L, *et al.* Understanding sources of organic aerosol during CalNex-2010 using the CMAQ-VBS [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, **16**(6): 4081-4100.
- [17] 夏思佳, 刘倩, 赵秋月. 江苏省人为源 VOCs 排放清单及其对臭氧生成贡献 [J]. *环境科学*, 2018, **39**(2): 592-599.
- Xia S J, Liu Q, Zhao Q Y. Emission inventory of anthropogenically sourced VOCs and its contribution to ozone formation in Jiangsu province [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(2): 592-599.
- [18] 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.
- [19] 项成龙, 王杨君, 周怀中, 等. 金华市人为源大气污染物排放清单 [J]. *环境科学与技术*, 2017, **40**(S2): 229-237.
- Xiang C L, Wang Y J, Zhou H Z, *et al.* Development of the anthropogenic air pollutants emission inventory in Jinhua [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **40**(S2): 229-237.
- [20] 孙西勃, 廖程浩, 曾武涛, 等. 广东省秸秆燃烧大气污染物及 VOCs 物种排放清单 [J]. *环境科学*, 2018, **39**(9): 3995-4001.
- Sun X B, Liao C H, Zeng W T, *et al.* Emission inventory of atmospheric pollutants and VOC species from crop residue burning in Guangdong province [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(9): 3995-4001.
- [21] Pye H O T, Seinfeld J H. A global perspective on aerosol from low-volatility organic compounds [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, **10**(9): 4377-4401.
- [22] Posner L N, Theodoritis G, Robinson A, *et al.* Simulation of fresh and chemically-aged biomass burning organic aerosol [J]. *Atmospheric Environment*, 2019, **196**: 27-37.
- [23] 卢雅静, 冯艳丽, 钱哲, 等. 民用固体燃料源的 IVOCs 排放特征及燃烧温度的影响 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(10): 4404-4411.
- Lu Y J, Feng Y L, Qian Z, *et al.* Emission characteristics of IVOCs for combustion source of residential solid fuels and the impact of burning Temperature [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(10): 4404-4411.
- [24] Liu T Y, Wang Z Y, Huang D D, *et al.* Significant production of secondary organic aerosol from emissions of heated cooking oils [J]. *Environmental Science & Technology Letters*, 2018, **5**(1): 32-37.
- [25] Huang C, Hu Q Y, Li Y J, *et al.* Intermediate volatility organic compound emissions from a large cargo vessel operated under real-world conditions [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, **52**(21): 12934-12942.
- [26] Zhao Y L, Nguyen N T, Presto A A, *et al.* Intermediate

- volatility organic compound emissions from on-road diesel vehicles; chemical composition, emission factors, and estimated secondary organic aerosol production[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**(19): 11516-11526.
- [27] Zhao Y L, Nguyen N T, Presto A A, *et al.* Intermediate volatility organic compound emissions from on-road gasoline vehicles and small off-road gasoline engines[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **50**(8): 4554-4563.
- [28] Cross E S, Hunter J F, Carrasquillo A J, *et al.* Online measurements of the emissions of intermediate-volatility and semi-volatile organic compounds from aircraft [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13**(15): 7845-7858.
- [29] Cross E S, Sappok A G, Wong V W, *et al.* Load-dependent emission factors and chemical characteristics of IVOCs from a medium-duty diesel engine [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**(22): 13483-13491.
- [30] Liu H, Man H Y, Cui H Y, *et al.* An updated emission inventory of vehicular VOCs and IVOCs in China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, **17**(20): 12709-12724.
- [31] Wu L Q, Wang X M, Lu S H, *et al.* Emission inventory of semi-volatile and intermediate-volatility organic compounds and their effects on secondary organic aerosol over the Pearl River Delta region[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, **19**(12): 8141-8161.
- [32] Wang G H, Zhou B H, Cheng C L, *et al.* Impact of Gobi desert dust on aerosol chemistry of Xi'an, inland China during spring 2009: differences in composition and size distribution between the urban ground surface and the mountain atmosphere [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13**(2): 819-835.
- [33] 李璇, 聂滕, 齐璐, 等. 2013年1月北京市PM_{2.5}区域来源解析[J]. *环境科学*, 2015, **36**(4): 1148-1153.
- Li X, Nie T, Qi J, *et al.* Regional source apportionment of PM_{2.5} in Beijing in January 2013 [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(4): 1148-1153.
- [34] 陈卓, 刘峻峰, 陶玮, 等. 中国地区二次有机气溶胶的时空分布特征和来源分析[J]. *环境科学*, 2016, **37**(8): 2815-2822.
- Chen Z, Liu J F, Tao W, *et al.* Spatiotemporal distribution and source attribution of SOA in China[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(8): 2815-2822.
- [35] Cheng Z, Wang S, Fu X, *et al.* Impact of biomass burning on haze pollution in the Yangtze River delta, China; a case study in summer 2011 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, **14**(9): 4573-4585.
- [36] Huang C, Chen C H, Li L, *et al.* Emission inventory of anthropogenic air pollutants and VOC species in the Yangtze River Delta region, China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, **11**(9): 4105-4120.
- [37] 安徽省统计局. 安徽省环境统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018.
- [38] 江苏省统计局. 江苏省环境统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018.
- [39] 浙江省统计局. 浙江省环境统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018.
- [40] 上海市统计局. 上海市环境统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018.
- [41] 张英志. 柴油车细颗粒物理化性质及其排放特征研究[D]. 北京: 清华大学, 2016.
- [42] 孙蜀. 成都市柴油车颗粒物排放特征分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
- [43] 刘亚勇, 张文杰, 白志鹏. 机动车排放PM_{2.5}源成分谱特征初步研究[A]. 见: 第八届全国大气细及超细粒子技术研讨会暨PM_{2.5}源谱交流会论文集[C]. 黄石: 中国颗粒学会气溶胶专业委员会, 2015.
- [44] 张鹏飞. 天津市柴油公交车尾气颗粒物成分谱建立及特征研究[D]. 天津: 南开大学, 2007.
- [45] 黄成, 楼晟荣, 乔利平, 等. 重型柴油公交车实际道路颗粒物排放的理化特征[J]. *环境科学研究*, 2016, **29**(9): 1352-1361.
- Huang C, Lou S R, Qiao L P, *et al.* Physicochemical characteristics of real-world PM emissions from heavy-duty diesel buses[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, **29**(9): 1352-1361.
- [46] 冯小琼. 珠江三角洲机动车VOCs和PM_{2.5}排放特征谱研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
- [47] 李楠, 卞雅慧, 钟庄敏, 等. 广东省人为源BC、OC排放清单建立与校验[J]. *环境科学学报*, 2017, **37**(2): 419-428.
- Li N, Bian Y H, Zhong Z M, *et al.* Development and verification of black carbon and organic carbon anthropogenic emission inventory in Guangdong Province [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, **37**(2): 419-428.
- [48] Hodzic A, Jimenez J L, Madronich S, *et al.* Modeling organic aerosols in a megacity: potential contribution of semi-volatile and intermediate volatility primary organic compounds to secondary organic aerosol formation [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, **10**(12): 5491-5514.
- [49] Zhao B, Wang S X, Donahue N M, *et al.* Quantifying the effect of organic aerosol aging and intermediate-volatility emissions on regional-scale aerosol pollution in China[J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**: 28815.

CONTENTS

Spatiotemporal Variations of PM _{2.5} Pollution Evolution in China in Recent 20 Years	SHI Yan, LIU Rui-mei, LUO Yi, <i>et al.</i>	(1)
Characteristics of Aerosol Particulate Concentrations and Their Climate Background in Shanghai During 2007-2016	ZHENG Qing-feng, SHI Jun, TAN Jian-guo, <i>et al.</i>	(14)
Characteristics and Sources of Elements in PM _{2.5} During Summer for Three Typical Cities in Pingdingshan-Suizhou-Wuhan, Central China	LIU Wei-jie, SHI Ming-ming, CHENG Cheng, <i>et al.</i>	(23)
PM _{2.5} Pollution Characteristics During Winter and Summer in the Hohhot-Baotou-Ordos Region, China	LI Yi-ming, LIU Jia-yuan, SHI Guo-liang, <i>et al.</i>	(31)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of PM _{2.5} During Heavy Pollution in Shijiazhuang City Around New Year's Day 2019	ZHOU Jing-bo, DUAN Jing-chun, WANG Jian-guo, <i>et al.</i>	(39)
Modeling Studies of Source Contributions to PM _{2.5} in Chengdu, China	XU Yan-ling, YI Ai-hua, XUE Wen-bo	(50)
Chemical Characteristics of Arsenic in PM _{2.5} in Beijing	SHI Shao-xuan, YANG Yan-rong, QIN Juan-juan, <i>et al.</i>	(57)
Pollution Characteristics and Potential Source Contributions of Gaseous Elemental Mercury (GEM) During Summer and Autumn in Ningbo City	YI Hui, LIN Jia-mei, CAI Qiu-liang, <i>et al.</i>	(65)
Seasonal Characteristics and Source Analysis of Water-Soluble Ions in PM _{2.5} of Anyang City	SUN You-chang, JIANG Nan, WANG Shen-bo, <i>et al.</i>	(75)
Analysis of Stable Carbon Isotope Characteristics of PM _{2.5} in Summer and Winter Season in Xixiang City	YAN Guang-xuan, SONG Xin, ZHANG Jing-wen, <i>et al.</i>	(82)
Construction and Evaluation on Size Resolved Source Apportionment Methods Based on Particle Size Distribution of Chemical Species	LIANG Yong-li, TIAN Ying-ze, LIU Tong, <i>et al.</i>	(90)
Fine Particulate Emission Characteristics of an Ultra-Low Emission Coal-Fired Power Plant	WANG Run-fang, MA Da-wei, JIANG Shao-yi, <i>et al.</i>	(98)
Driving Factors of the Significant Increase in Surface Ozone in the Beijing-Tianjin-Hebei Region, China, During 2013-2018	YU Yi-jun, MENG Xiao-yan, WANG Zhen, <i>et al.</i>	(106)
Characteristic of Surface Ozone and Meteorological Parameters Analysis in Anyang City	YANG Jian, YIN Sha-sha, YU Shi-jie, <i>et al.</i>	(115)
Emission Inventory of Intermediate Volatility Organic Compounds from Vehicles in the Yangtze River Delta in 2017 and the Impact on the Formation Potential of Secondary Organic Aerosols	WANG Qian, HUANG Ling, WANG Yang-jun, <i>et al.</i>	(125)
Exhaust Smoke of Non-Road Vehicles in Typical Cities of Eastern China	LU Jun, HU Qing-yao, YANG Qiang, <i>et al.</i>	(133)
Emission Status and Standards of Volatile Organic Compounds from Chinese and Foreign Bulk Petroleum Terminals	HU Wei, REN Bi-qi, HUANG Yu-hu, <i>et al.</i>	(139)
Secondary Organic Aerosol Mass Yield and Characteristics from 4-ethylguaiaicol Aqueous ·OH Oxidation: Effects of Initial Concentration	ZHUANG Yu, CHEN Yan-tong, LI Xu-dong, <i>et al.</i>	(146)
Stable Isotope Characteristics and Vapor Source of Precipitation in the South and North Slopes of Wushaoling Mountain	XU Xiu-ting, JIA Wen-xiong, ZHU Guo-feng, <i>et al.</i>	(155)
Characteristics and Influencing Factors of Stable Hydrogen and Oxygen Isotopes in Groundwater in the Permafrost Region of the Source Region of the Yangtze River	WANG Shao-yong, HE Xiao-bo, DING Yong-jian, <i>et al.</i>	(166)
Hydrochemical and Isotopic Characteristics of the Lake Balkhash Catchment, Kazakhstan	SHEN Bei-bei, WU Jing-lu, JILILI Abuduwalli, <i>et al.</i>	(173)
Effect of a Comprehensive Improvement Project on Water Quality in Urban Lakes: A Case Study of Water Quality Variation in Lihu Lake Over the Past 30 Years	TIAN Wei, YANG Zhou-sheng, SHAO Ke-qiang, <i>et al.</i>	(183)
Detection Method, Distribution, and Risk Assessment of Pharmaceuticals and Personal Care Products in the Yellow Sea and the East China Sea	CHEN Xian, ZHANG Cai-jie, YANG Gui-peng, <i>et al.</i>	(194)
Occurrence and Risk Assessment of Organophosphate Esters in Source Water of the Nanjing Section of the Yangtze River	LI Dong, ZHANG Sheng-hu, ZHANG Qin, <i>et al.</i>	(205)
Spatial Distribution, Spectral Characteristics, and Sources Analysis of Dissolved Organic Matter from Baiyangdian Lake in Xiong'an New District During the Winter Freezing Period	ZHOU Shi-lei, SUN Yue, ZHANG Yi-ran, <i>et al.</i>	(213)
Spatial Characteristics, Risk Assessment, and Source Analysis of Elements in Surface Sediments from the Baiyangdian Lake	WANG Jing-zhong, LIU Zhou, WEI Hao, <i>et al.</i>	(224)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Phthalate Esters in Surface Sediments of the Songhua River	WANG Huan, YANG Yong-zhe, WANG Hai-yan, <i>et al.</i>	(232)
Occurrence Relationship Between Microplastics and Heavy Metals Pollutants in the Estuarine Sediments of Poyang Lake and the Yangtze River	LI Wen-hua, JIAN Min-fei, LIU Shu-li, <i>et al.</i>	(242)
Effect of Ozonation on Microorganism in the Biological Activated Carbon and Disinfection By-Products in the Effluent	LIU Bao-ming, WANG Xi-xi, ZHANG Xiao-xia, <i>et al.</i>	(253)
Refined Assessment of Exposure and Health Risks of Heavy Metals in Water for the Children in Xigu District, Lanzhou	CHEN Yue-fang, SUN Shan-wei, DUAN Xiao-li, <i>et al.</i>	(262)
Adsorption of Phosphate on Mg/Fe Layered Double Hydroxides (Mg/Fe-LDH) and Use of Mg/Fe-LDH as an Amendment for Controlling Phosphorus Release from Sediments	WU Jun-lin, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i>	(273)
Characteristics and Mechanism of Monothioarsenate Adsorption on Sand, Sediment, and Goethite	LIAO Dan-xue, SHAN Hui-mei, PENG San-xi, <i>et al.</i>	(284)
Substructure Characteristics of Combined Acid-Base Modified Sepiolite and Its Adsorption for Cd(II)	XIE Sha, XU Ying-ming, YAN Cui-xia, <i>et al.</i>	(293)
Characteristics of Nitrogen Metabolism by Denitrifying Bacterial Agents in Low Dissolved Oxygen Black Odor Water	ZHAO Zhi-rui, LIU Shuo, LI Duo, <i>et al.</i>	(304)
Metagenomic Analysis of Antibiotic Resistant Bacteria and Resistance Genes in a Pharmaceutical and Chemical Wastewater Treatment Plant	CHEN Hong-ling, ZHANG Xing-tao, WANG Qing, <i>et al.</i>	(313)
Measurements of Bacterial Community and Biodiversity from Activated Sludge for a Wastewater Treatment Containing Starch	ZHAO Ting-ting, QIAO Kai, WANG Lei, <i>et al.</i>	(321)
Process Control and Operation Optimization of PN-SAD Coupling Process Based on SBR-ABR	CHEN Chong-jun, ZHANG Min, JIANG Ying, <i>et al.</i>	(330)
Effects of Intermittent Starvation on the Operation of the SNAD Process	LI Dong, LIU Zhi-cheng, XU Gui-da, <i>et al.</i>	(337)
Nitrogen Removal from Mature Landfill Leachate via Denitrification-Partial Nitrification-ANAMMOX Based on a Zeolite Biological Aerated Filter	CHEN Xiao-zhen, WANG Xiao-jun, Karasuta Chayangkun, <i>et al.</i>	(345)
Rapid Achievement of Nitrifying Micro-granular Sludge and Its Nitrification Function	LIU Wen-ru, SONG Jia-jun, WANG Jian-fang, <i>et al.</i>	(353)
Effect of On/Off Aeration Time Ratio Under High Frequency On/Off Aeration on Performance of Nitrosated Granular Sludge	ZHANG Jie, LAO Hui-mei, LI Dong, <i>et al.</i>	(360)
Occurrence, Distribution, Source, and Health Risk Assessment of Polybrominated Diphenyl Ethers in Surface Soil from the Shen-Fu Region, Northeast China	XIANG Xin-xin, LU Yin-tao, RUAN Qi-yang, <i>et al.</i>	(368)
Vertical Pollution Characteristics and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Heterogeneous Unsaturated Zone Under a Coking Plant	MENG Xiang-shuai, WU Meng-meng, CHEN Hong-han, <i>et al.</i>	(377)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes and Mobile Genetic Elements in Beijing Vegetable Base Soils	ZHANG Ru-feng, SONG Yuan, GAO Hao-ze, <i>et al.</i>	(385)
Stoichiometric Characteristics of Purple Sloping Cropland Under Long-term Fertilization and Cultivation	DU Ying-ni, LI Tian-yang, HE Bing-hui, <i>et al.</i>	(394)
Ecological Stoichiometry of Carbon, Nitrogen, and Phosphorus in Subtropical Paddy Soils	SONG Jia-ling, SHENG Hao, ZHOU Ping, <i>et al.</i>	(403)
Denitrification and Anaerobic Ammonium Oxidation in Soil Nitrogen Migration Process in a Farmland of Wanshandang Lake	CHEN Zhi-hao, QIN Yun-bin, DING Bang-jing, <i>et al.</i>	(412)
Effects of Straw Biochar on Soil Microbial Metabolism and Bacterial Community Composition in Drip-irrigated Cotton Field	WANG Jing, MA Li-juan, LONG Ze-hua, <i>et al.</i>	(420)
Source Appointment of Heavy Metals in Agricultural Soils of the Julong River Basin Based on Positive Matrix Factorization	HUANG Hua-bin, LIN Cheng-ni, HU Gong-qi, <i>et al.</i>	(430)
Spatial Distribution of Soil Arsenic and Arsenic Enrichment in Crops in the Oasis Region of the Southeastern Tarim Basin	CHEN Yun-fei, ZHOU Jin-long, ZENG Yan-yan, <i>et al.</i>	(438)
Bioavailability, Translocation, and Accumulation Characteristic of Heavy Metals in a Soil-Crop System from a Typical Carbonate Rock Area in Guangxi, China	MA Hong-hong, PENG Min, LIU Fei, <i>et al.</i>	(449)
Effects of Different Amendments on Fractions and Uptake by Winter Wheat in Slightly Alkaline Soil Contaminated by Cadmium and Nickel	ZHANG Jing-jing, ZHU Shuang-ge, ZHU Li-nan, <i>et al.</i>	(460)
Effect of Different Passivating Agents on the Stabilization of Heavy Metals in Chicken Manure Compost and Its Maturity Evaluating Indexes	LUAN Run-yu, GAO Shan, XU Ying-ming, <i>et al.</i>	(469)
Response of Soil Respiration and Its Components to Nitrogen and Phosphorus Addition in Farming-Withdrawn Grassland in the Semiarid Loess Hilly-Gully Region	ZHOU Jun-jie, CHEN Zhi-fei, YANG Quan, <i>et al.</i>	(479)
Subsequent Effects of Slag and Biochar Application on Greenhouse Gas Emissions from Paddy Fields in the Fuzhou Plain	LAN Xing-fu, WANG Xiao-tong, ZHOU Ya-xin, <i>et al.</i>	(489)