

目次

复合污染条件下人为源 VOCs 的 SOA 生成研究进展	陈天增, 刘俊, 马庆鑫, 楚碧武, 张鹏, 刘永春, 刘昌庚, 贺泓 (1201)
全氟和多氟烷基化合物微生物降解与转化研究进展	孙红文, 方博, 陈浩, 赵茂森, 张耀之, 乔碧汀, 喻蒙 (1214)
湖泊水质参数遥感监测研究进展	王思梦, 秦伯强 (1228)
淡水环境中微塑料与重金属的“木马效应”研究进展	赵伟高, 田一梅, 赵鹏, 赵令铨, 金超 (1244)
长江经济带二氧化碳净排放时空演变特征及脱钩效应	吴一帆, 许杨, 唐洋博, 贾宁, 李玮, 李翀, 殷国栋 (1258)
中国土地利用碳排放变化及协调分区	李缘缘, 魏伟, 周俊菊, 郝瑞军, 陈帝伯 (1267)
基于 STIRPAT 模型天津减污降碳协同效应多维度分析	刘茂辉, 岳亚云, 刘胜楠, 李婧, 刘佳泓, 孙猛 (1277)
基于燃料生命周期的中国铁路排放趋势	佟惠, 范朝阳, 梁晓宇, 孙露娜, 门正宇, 赵肖阳, 毛洪钧 (1287)
浙江省大气颗粒物 PM _{2.5} 化学组分污染特征分析	周菁清, 余磊, 陈书鑫, 陆佳峰, 许亚璐, 季海冰, 张柳芳, 刘劲松, 王静 (1297)
南京亚微米级颗粒物化学组成的季节变化、粒径分布和来源	徐振麒, 尚玥, 丁峰, 谢鸣捷, 王勤耕 (1310)
洛阳地区碳质组分季节特征及来源解析: 棕碳的重要贡献	闫广轩, 侯明阳, 张朴真, 王洁琦, 王虎, 李崇浩, 王跃思 (1319)
江苏省 2019 年 S/IVOCs 排放清单及分布特征	宋童艾, 张佳颖, 关璐, 胡建林, 于兴娜 (1328)
珠三角典型工业区挥发性有机物 (VOCs) 组成特征: 含氧挥发性有机物的重要性	宋鑫, 袁斌, 王思行, 何贤俊, 李小兵, 彭钰雯, 陈钰彬, 齐吉朋, 蔡嘉骅, 黄山, 胡丹, 魏文, 刘可旋, 邵敏 (1336)
2000 ~ 2020 年天津市机动车全过程 VOCs 排放特征及演变	孙露娜, 仲崇智, 孙世达, 刘妍, 佟惠, 吴亚君, 宋鹏飞, 张丽娜, 黄旭, 吴琳, 毛洪钧 (1346)
港口自有移动源大气污染物排放清单	徐小凡, 王宝庆, 吴俊成, 李怡诺 (1357)
基于改进水资源生态足迹模型的中国水资源可持续利用仿真及调控	欧阳兴涛, 廖浩宇, 姜秋香, 王子龙 (1368)
黄河流域入海口典型区域有机磷酸酯分布特征和风险评估	曹渺, 郭昌胜, 张恒, 刘士清, 陈苗, 吕佳佩, 侯嵩, 尤新军, 徐建 (1378)
桂林会仙岩溶湿地水体与沉积物中有机氯农药污染特征	余悦, 邢新丽, 程铖, 刘威杰, 张标, 孔祥胜, 李森, 余海阔, 罗为群, 祁士华 (1387)
广东茂名主要水系表层沉积物重金属风险评估及源解析	陈小霞, 张敏, 李蓓, 温鹏翀, 丁平, 姚玲爱, 马千里, 李廷真, 蔡丹, 胡国成 (1397)
宁波市地表水重金属时空分布特性和健康风险评价	徐美娟, 杨佳, 任晓景, 赵红燕, 高夫燕, 蒋跃军 (1407)
典型西北山地-绿洲系统不同水体水化学特征及其水力关系分析	王诗语, 孙从建, 陈伟, 周思捷, 张鑫 (1416)
牟汶河中上游孔隙水化学特征及控制因素	刘元晴, 周乐, 吕琳, 李伟, 王新峰, 邓启军, 郑一迪, 李常锁 (1429)
石河子-昌吉地区地下水水质时空变化及污染源解析	丁启振, 周金龙, 季彦桢, 杨方源, 张淑霞 (1440)
北方富营养分层型水库藻类季节性暴发机制及其阈值分析	温成成, 黄廷林, 孔昌昊, 张志刚, 田鹏飞 (1452)
拉林河流域底栖硅藻群落结构特征及水生态健康评价	单涛, 袁安龙, 黄子芮, 周静怡, 陆欣鑫, 范亚文 (1465)
南昌市湖泊丰水期浮游细菌群落结构及影响因素	高鹏飞, 王鹏, 黄伟, 丁明军, 张华, 聂明华, 黄高翔 (1475)
调蓄水库细菌群落季节变化特征与影响因素	丁宁, 杨莹莹, 万年新, 徐爱玲, 葛建华, 宋志文 (1484)
典型城市内河细菌组成与氮循环功能垂直分布及溯源分析	谭秋阳, 吕金燕, 白献宇, 程莉蓉, 李晓艳, 郭蕾 (1497)
滇中高原水库外源污染负荷贡献解析与环境容量核算	郭玉静, 李红兵, 王树明, 白乙娟, 任良锁, 丁爱中 (1508)
窄孔径含磷棉秆生物质炭的制备及对四环素的吸附机制	曾少毅, 李坤权 (1519)
高比表面疏脲改性花生壳炭的制备及对四环素和铜的吸附	闵炳坤, 李坤权 (1528)
不同供水管材生物膜抗生素抗性基因分布特征	刘晨旭, 白晓慧 (1537)
水蚀环境植被恢复对土壤有机碳固存和团聚体稳定的影响: Meta 分析	杨睿哲, 杨世龙, 翁希哲, 徐灵颖, 刘雪健, 杜运田, 张雪辰, 郑伟, 翟丙年, 王朝辉, 李紫燕 (1542)
增温施肥对稻麦农田土壤有机碳及其活性组分的影响	邓旭哲, 韩晨, 薛利祥, 侯朋福, 薛利红, 杨林章 (1553)
三江源地区高寒草地土壤功能的水平分异特征及其沿发生层的垂直变化	李柏键, 申聪聪, 刘四义, 吴华勇, 王继琛, 赵冬辉, 葛源 (1562)
鄱阳湖平原直播稻 CH ₄ 通量及其与 CO ₂ 通量的综合温室效应	时元智, 崔远来, 时硕, 洪大林, 程婕 (1572)
不同土地利用类型土壤多环芳烃的纵向污染特征及来源解析	周芷嫣, 张秀秀, 王飞, 朱昌达, 潘剑君 (1583)
石家庄道路灰尘中全氟/多氟化合物及其新型替代品的污染特征及健康风险评估	李鹏飞, 王媛, 杨晨, 史亚利, 崔建升 (1593)
南方典型矿区农业小流域耕地土壤重金属空间分布特征及污染评价	杨宇, 郭婷婷, 刘孝利, 铁柏清 (1602)
三峡库区(重庆段)菜地土壤重金属污染特征、潜在生态风险评估及源解析	石雨佳, 方林发, 方标, 叶莘莘, 范晓霞, 高坤鹏, 陈征, 肖然 (1611)
兰州市耕地表层土壤重金属的积累特征及其影响因素分析	康乐, 彭鑫波, 马延龙, 张利瑞, 张妍娥, 王泉灵, 张松林 (1620)
粤北典型工矿区土壤重金属富集特征、来源解析及风险评价	王越, 莫莉, 余新晓, 师华定, 费杨 (1636)
三门峡某铝业厂遗留场地土壤重金属空间分布特征及来源解析	卢小慧, 余方中, 范一鸣, 杨阳 (1646)
某试验场土壤重金属分布特征及其污染评价	王诗雨, 李淳, 赵洪伟, 陈希, 张慧君, 朱勇兵, 赵三平, 计超, 刘晓东 (1657)
化学淋洗联合电动技术修复重金属污染土壤的效果及其机制	马强, 卫泽斌, 吴启堂 (1668)
再生铜冶炼过程中重金属排放特征和控制	林炳丞, 吴广龙, 郑明辉, 刘国瑞 (1678)
长江流域(安徽段)土壤-作物系统重金属污染特征及健康风险评价	刘海, 魏伟, 黄健敏, 赵国红 (1686)
稻-麦轮作模式下不同钝化材料对镉污染农田土壤的原位钝化效应	张路, 唐婵, 余海英, 李廷轩, 张锡洲, 黄化刚 (1698)
巯基化蒙脱石用于镉污染农田安全生产的效果及其持久性	冯先翠, 陈亚刚, 焦洪鹏, 曹鹏, 朱凤榕, 李媛媛, 江海燕 (1706)
蚯蚓、秸秆和柠檬酸对少花龙葵与韭菜修复铅镉污染土壤的影响	陈敏妮, 袁小奇, 张金峰, 何川黔, 高波 (1714)
地质高背景区富 Se 耕地可利用性研究及区划建议	王锐, 李瑜, 余京, 周蛟, 余飞, 张云逸, 蒋玉莲 (1727)
张家口市北新屯地区蔬菜种植区锆元素富集特征及成因分析	安永龙, 殷秀兰, 金爱芳, 李文娟, 鲁青原 (1735)
三峡库区消落带落羽杉人工林土壤细菌群落结构多样性及动态变化	谭雪, 董智, 张丽苗, 袁中勋, 李昌晓 (1748)
黄土丘陵区退耕还林对土壤真菌群落的影响	张蕾, 王强, 杨新月, 吕俊平 (1758)
化肥减量配施有机肥对土壤功能微生物和柠檬产量及品质的影响	王蕊燕, 熊子怡, 罗东海, 王子芳, 高明 (1768)
鸡粪和猪粪生物发酵过程中抗生素抗性基因的动态变化	张丹, 彭双, 王丹青, 王一鸣, 林先贵 (1780)
牛粪还田对土壤微生物群落特征的影响	张雅丽, 郭晓明, 胡慧, 郭暖, 徐小涛, 李建林 (1792)
《环境科学》征订启事(1406) 《环境科学》征稿简则(1592) 信息(1635, 1667, 1677)	

江苏省 2019 年 S/IVOCs 排放清单及分布特征

宋童艾¹, 张佳颖¹, 关璐¹, 胡建林², 于兴娜^{1*}

(1. 南京信息工程大学中国气象局气溶胶-云-降水重点开放实验室, 南京 210044; 2. 南京信息工程大学环境科学与工程学院, 江苏省大气环境监测与污染控制高技术研究重点实验室, 南京 210044)

摘要: 通过收集各类 S/IVOCs 排放源的活动水平数据, 选取合适的排放因子和估算方法, 建立了 2019 年江苏省半/中等挥发性有机物(S/IVOCs)排放清单, 分析了江苏省各地市以及各排放源的排放特征. 结果表明, 2019 年江苏省排放 S/IVOCs 约 637.31 Gg, 其中工业源排放最多, 占比达到 63.42%, 其次为道路移动源(22.23%), 非道路移动源占比最少(0.06%). 江苏省 13 地市中, 苏州市 S/IVOCs 排放量最高(161.86 Gg), 占江苏省 S/IVOCs 排放总量的 25.40%; 单位面积排放强度苏州市最高(18.70 t·km⁻²), 而单位 GDP 排放强度连云港市最高(22.45 t·亿元⁻¹). 江苏南部 S/IVOCs 的排放量较中部和北部地区高, 各地市 S/IVOCs 总排放量、单位面积排放强度和单位 GDP 排放强度相差均较大. 全省 S/IVOCs 排放量的不确定范围在 -88.46%~224.38%, 其中生物质燃烧源的不确定范围最大, 为 -96.40%~277.17%.

关键词: 半挥发性有机物(SVOCs); 中等挥发性有机物(IVOCs); 排放清单; 江苏省; 空间分布

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)03-1328-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.202203275

Establishment and Spatial Distribution of S/IVOCs Emission Inventory in Jiangsu Province in 2019

SONG Tong-ai¹, ZHANG Jia-ying¹, GUAN Lu¹, HU Jian-lin², YU Xing-na^{1*}

(1. Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of High Technology for Atmospheric Environment Monitoring and Pollution Control, School of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: The semi-/intermediate volatile organic compound (S/IVOCs) emissions inventory of Jiangsu province was established in 2019 using the activity data of various S/IVOCs emission sources, emission factors, and an estimation method. S/IVOCs emissions for each source and city in Jiangsu province were analyzed. The total amount of S/IVOCs emissions in Jiangsu province in 2019 was 637.31 Gg. Industrial sources were the major source of total S/IVOCs emissions accounting for 63.42% (404.20 Gg), followed by residential on-road mobile sources (22.23%), and off-road mobile sources accounted for the least (0.06%). Suzhou had the highest S/IVOCs emissions in 2019, accounting for 25.40% (161.86 Gg) of the total S/IVOCs emissions in Jiangsu province. The S/IVOCs emission intensity per unit area in Suzhou was the highest, reaching 18.70 t·km⁻², and the emission intensity per unit GDP was the highest in Lianyungang (22.45 t·100 million yuan⁻¹). The spatial distribution map revealed that S/IVOCs emissions in southern Jiangsu were relatively higher. The difference in the total emission of S/IVOCs, emission intensity per unit area, and emission intensity per unit of GDP were quite different among cities. The uncertainty range of S/IVOCs emissions was -88.46%-224.38% in Jiangsu province in 2019. The uncertainty range of biomass burning sources was the largest (-96.40%-277.17%).

Key words: semi-volatile organic compounds (SVOCs); intermediate volatile organic compounds (IVOCs); emissions inventory; Jiangsu province; spatial characteristics

大气细颗粒物(空气动力学直径小于 2.5 μm 的颗粒物, PM_{2.5})可长时间悬浮于空气中, 对于大气能见度、人体健康和生态环境等有重要的影响^[1,2]. 作为 PM_{2.5}的重要组成部分, 有机气溶胶(OA)近年来成为了大气污染治理的关键因素. 而二次有机气溶胶(SOA)则是 OA 的重要组成部分, 对于 PM_{2.5}的贡献也逐年上升^[3]. 因此, 对于 SOA 形成机制进行深入的研究, 对于控制 PM_{2.5}的污染至关重要. SOA 前体物众多, 形成机制非常复杂, 使得人们对其的认识严重不足. 而半挥发性有机化合物(semi-volatile organic compounds, SVOCs)和中等挥发性有机物(intermediate volatile organic compounds, IVOCs)对于 SOA 的生成有很大影响^[4]. SVOCs 是沸点在 170~350℃^[5]、蒸气压在 1.01 × 10⁻⁶~10.1 Pa 的有机物^[6], 挥发性区间大致相当于 C₂₃~C₃₄烷烃, 在大气

中主要以气态和气溶胶两种形式存在^[6]. IVOCs 是有效饱和浓度在 10³~10⁶ μg·m⁻³的有机物^[7], 挥发性介于挥发性有机物(VOCs)和 SVOCs 之间, 大致相当于 C₁₂~C₂₂烷烃^[8]. 以下将 SVOCs 和 IVOCs 称为 S/IVOCs. 有研究表明, 将 S/IVOCs 放入 SOA 估算模型中, 得到的 SOA 更接近测量值^[9~11]. 近年来有不少学者已经开始对 S/IVOCs 进行研究. 例如 Lu 等^[12]对于汽油、柴油和燃气涡轮发动机的 S/IVOCs 的排放情况进行了较为细致的研究. 卢雅静等^[13]利用成熟度不同的煤和不同的生物质, 来讨论

收稿日期: 2022-03-29; 修订日期: 2022-06-16

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFC0214604); 国家自然科学基金项目(41775154); 江苏省“六大人才高峰”项目(JNHB-057)

作者简介: 宋童艾(1999~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为污染物排放清单, E-mail: ai1999bi@163.com

* 通信作者, E-mail: xnyu@nuist.edu.cn

烟煤和生物质燃烧的排放因子、组成和燃烧温度的影响. Cross 等^[14]估算了美国加利福尼亚州爱德华机场的飞机和柴油发动机 IVOCs 的排放总量.

目前国内已有一些学者建立了 S/IVOCs 排放清单. 如 Liu 等^[15]建立中国内地机动车 IVOCs 的排放清单,发现江苏省 IVOCs 的排放量占到全国第 4 位. 朱永慧等^[16]基于卫星火点建立了长三角地区 2010 年~2018 年生物质燃烧 IVOCs 的排放清单,指出生物质燃烧 IVOCs 排放总量均值为 73.4 万 t,不确定性范围在 -99%~68%. 王倩等^[7]通过建立长三角地区 2017 年机动车 IVOCs 的排放清单,发现 IVOCs 排放量以微型客货车和中型货车为主,上海市和苏州市的 IVOCs 排放量更为突出. 但这些研究中建立的排放清单类别很少,研究结果缺少可比性. 因此,对于 S/IVOCs 进行细致的研究,建立一个较为全面的 S/IVOCs 排放清单是十分必要的. 江苏省位于长江三角洲,经济发达,人口众多. 随着工业化和城市化的快速发展,空气污染问题日益突出,呈现区域性、复合型^[17]. 但目前针对江苏省 S/IVOCs 的研究较少,尚未建立较为完整的 S/IVOCs 排放清单. 因此本文以江苏地区为研究对象,建立 S/IVOCs 排放清单,分析 S/IVOCs 的排放分布特征,以期为 PM_{2.5} 的治理提供新的思路.

1 材料与方法

计算污染物排放量时常会利用排放因子法. 计算如公式(1)所示:

$$E_i = \sum_{j=1}^j EF_{ij} \times A_{ij} \tag{1}$$

式中, E 为污染物排放量, i 为某特定区域, j 为某一污染物的源, EF 为排放因子, A 为活动水平. 但目前对于 S/IVOCs 排放清单的研究相对较少,可用的 S/IVOCs 排放因子是有限的. 为了清单构建方便, S/IVOCs 的排放因子通常使用 S/IVOCs 与一次有机气溶胶 (POA) 的比例等方法间接获得. 通常利用有机物与有机碳的质量比 (OM/OC) 可以得到一次有机碳 (POC) 的排放因子,从而获得 POA 的排放因子. 通过将有机碳 (OC) 的质量分数用于 PM_{2.5}, 则 POC 的排放因子可由 PM_{2.5} 的排放因子间接获得.

因此,本文采用 Wu 等^[18]所提出的计算方法,通过对于 PM_{2.5} 排放量的计算,利用式(2)给出的公式来间接估算江苏省 2019 年 S/IVOCs 的排放量. 计算中所涉及到的参数如表 1 所示.

$$E_{S/IVOCs,j} = E_{PM_{2.5},j} \times F_{CO,j} \times (OM/OC)_j \times \left(\frac{E_{SVOCs,j}}{E_{POA,j}} + \frac{E_{IVOCs,j}}{E_{POA,j}} \right) \tag{2}$$

式中, $E_{S/IVOCs,j}$ 为每一类源 S/IVOCs 的排放量, $E_{PM_{2.5},j}$ 为每一类源 PM_{2.5} 的排放量, OM/OC 为有机物与有机碳的质量比, F_{OC} 为有机碳在 PM_{2.5} 中的比例, POA 为一次有机气溶胶, E_{SVOCs}/E_{POA} 为 SVOCs 与 POA 排放量的比值, E_{IVOCs}/E_{POA} 为 IVOCs 与一次有机气溶胶排放量的比值.

本文所使用的活动水平数据来自江苏省各地市统计年鉴中的统计数据^[19~31],若无法在年鉴中直接查询到相关数据,则参考其他参数,例如人口、GDP 和工业产值等推算得到. 其中工业源包括固定燃烧源和工艺过程源,固定燃烧源中包括煤炭、柴油、燃料油、煤油、天然气和其他气体,工艺过程源包括生铁、钢、铸铁和化肥. 民用源中包括家庭使用的柴油、汽油、天然气和液化石油气. 道路移动源包括汽油车和柴油车. 汽油车分为重型载货汽车、中型载货汽车、轻型载货汽车、大型载客汽车、中型载客汽车、小型载客汽车和摩托车,柴油车包括重型载货汽车、中型载货汽车、轻型载货汽车、大型载客汽车、中型载客汽车和小型载客汽车. 汽车的种类和燃料类型的占比参考 Liu 等^[15]的研究. 汽车年均行驶里程以及部分国 5 排放标准的 PM_{2.5} 排放系数参考文献^[32]. 非道路移动源包括航运、农用机械和建筑机械. 由于我国生物质燃烧以秸秆燃烧为主^[33],生物质燃烧源考虑秸秆露天焚烧,包括玉米、小麦、水稻和其他农作物. 由于各地 PM_{2.5} 的排放量容易计算获得,因此通过 PM_{2.5} 间接估算 S/IVOCs 的排放量,具有很大的便捷性.

表 1 本研究中所使用的参数^[18]

Table 1 Datasets of all input parameters used in this study				
源	F_{OC}	OM/OC	E_{SVOCs}/E_{POA}	E_{IVOCs}/E_{POA}
工业	0.03 ^[34]	1.77 ^[35]	0.67 ^[36]	8 ^[37]
民用	0.1 ^[34]	1.39 ^[38]	0.67 ^[36]	8 ^[37]
道路移动	0.58 ^[34]	1.4 ^[39]	0.67 ^[36]	8 ^[37]
非道路移动	0.33 ^[34]	1.4 ^[39]	0.67 ^[36]	8 ^[37]
生物质燃烧	0.58 ^[40]	1.55 ^[35]	0.65 ^[41]	0.75 ^[42]

2 结果与讨论

2.1 2019 年江苏省 S/IVOCs 排放特征

2019 年江苏省 S/IVOCs 排放清单及各类源占比如表 2 和图 1 所示. 经计算,全省 2019 年共排放 S/IVOCs 达到 637.31 Gg,其中工业源排放量最多 (404.20 Gg),占到排放总量的 63.42%;其次为道路移动源 (22.23%) 和生物质燃烧源 (14.06%),其排放量分别达到 141.66 Gg 和 89.61 Gg. 排放量第 4 和第 5 的源分别为民用源和非道路移动源,其占比共仅占排放总量的 0.29%.

2019 年,江苏省钢材产量高达 14 211.41 万

t^[43],可排放约 353.40 Gg 的 S/IVOCs,占到工业源排放总量的 87.68%.在道路移动源中,重型柴油货车 S/IVOCs 排放量占比最高(62.02%),可排放约 87.87 Gg 的 S/IVOCs;柴油车 S/IVOCs 排放量(126.03 Gg)远高于汽油车(15.64 Gg).长三角地区作为中国最为发达的地区之一,重工业密集、汽车保有量多,使得工业源和道路移动源成为江苏省 S/IVOCs 的主要排放源.

表 2 2019 年江苏省五类排放源 S/IVOCs 排放清单
Table 2 Emission inventory of S/IVOCs from five sources in Jiangsu province in 2019

源	排放量/Gg	占比/%
工业	404.20	63.42
民用	1.46	0.23
道路移动	141.66	22.23
非道路移动	0.37	0.06
生物质燃烧	89.61	14.06
总计	637.31	100.00

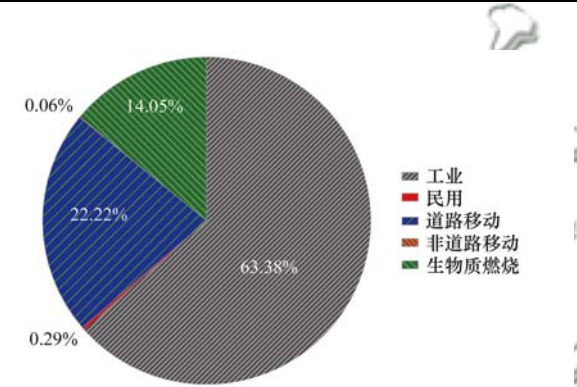


图 1 2019 年江苏省 5 类 S/IVOCs 排放源占比
Fig. 1 Proportion of five types of S/IVOCs emission sources in Jiangsu province in 2019

2.2 分地市 S/IVOCs 排放特征

江苏省 13 地市 S/IVOCs 排放量及其占比如图 2 所示.可以看出,由于各市经济发展水平、产业结构和人口数量不同,使得各市 S/IVOCs 的排放总量及其占比存在较明显的差异.例如,2019 年苏州市 S/IVOCs 的排放量为全省最高,超过 160 Gg,远高于全省平均值(49.02 Gg).其中,苏州市工业源 S/IVOCs 排放量高达 130.80 Gg,占到全市 S/IVOCs 排放量的 80.81%,也占到工业源的 32.36%,其次为无锡(74.58 Gg)和南京(70.14 Gg),分别占全省排放总量的 25.40%、11.70% 和 11.01%.较高的 S/IVOCs 排放量与这 3 个地市具有较大的人口密度、高城镇化率以及工厂数量和产业结构有紧密关系^[44~46]. S/IVOCs 排放量在后 3 位的城市依次为泰州(18.17 Gg)、镇江(20.63 Gg)和宿迁(24.37 Gg),其排放总量分别是苏州的 11.23%、12.75% 和 15.06%,这主要归因于较低的人口数量或较小的行政面积.除镇江市以

外,其他苏南城市(南京、无锡、常州和苏州)的 S/IVOCs 排放量均高于苏北(徐州、连云港、宿迁、淮安、盐城)和苏中(扬州、泰州、南通).总体上,苏南地区的 S/IVOCs 排放量较苏北和苏中地区高,苏中三市 S/IVOCs 的排放量较为接近.

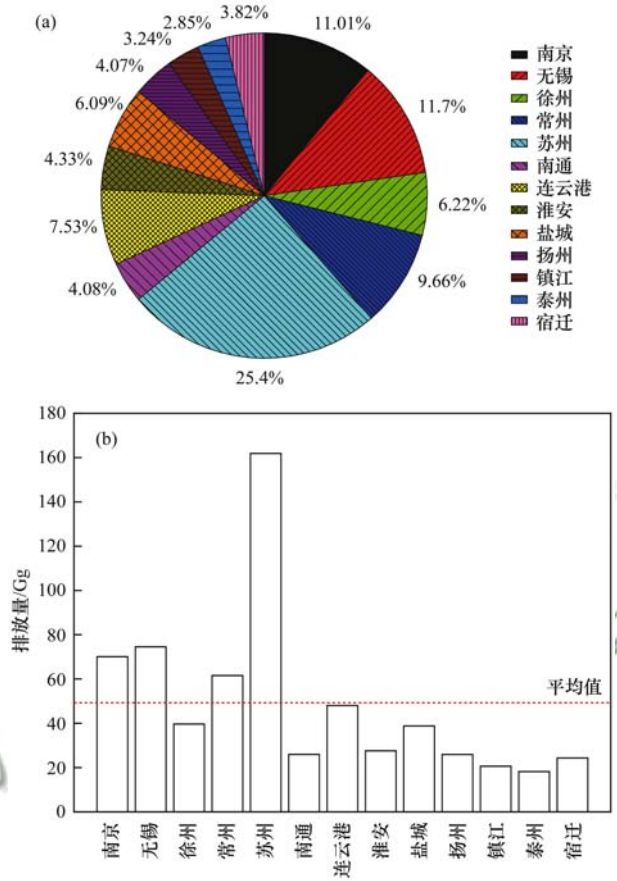


图 2 江苏 13 地市 S/IVOCs 的排放量占比和排放总量
Fig. 2 Proportion of S/IVOCs emissions and total emissions in 13 cities in Jiangsu

图 3 展示了江苏省各地市 S/IVOCs 各类排放源分布、单位面积排放强度和单位 GDP 排放强度.可以看出,除南通市外,总体上工业源的排放量最高,能占到所有源排放总量的 30%~82%.例如,常州地区工业源产生的 S/IVOCs 排放量可以达到 50.18 Gg,占到全市 S/IVOCs 排放量的 81.49%,为全省工业源占比最高的地市.镇江、盐城等地市虽然排放总量不高,但工业源却占到排放总量的 30% 以上,说明工业源是产生 S/IVOCs 的重要排放源之一. S/IVOCs 的第二和第三大类排放源分别为道路移动源和生物质燃烧源,其排放量范围分别在 4.0~30.0 Gg 和 1.0~17.0 Gg 之间.生物质燃烧源产生的 S/IVOCs 排放量在盐城达到最高(16.65 Gg),徐州(13.63 Gg)次之,主要是因为两地市农业发达^[47],农作物总播种面积均超过 10 000 km²,农作物产量位居全省前列^[43].值得注意的是,由于地理位置的原因,

南通市非道路移动源的 S/IVOCs 排放量占到全省非道路移动源的 22.83%; 苏州人口数量位居全省第一,其民用源占到全省民用源的 13.55%.

单位面积 S/IVOCs 排放强度定义为单位面积上 S/IVOCs 的排放量,能够反映该地区单位面积下 S/IVOCs 的污染情况. 由图 3(b) 可知,苏南地区除镇江市 S/IVOCs 的单位面积排放强度 ($2.71 \text{ t}\cdot\text{km}^{-2}$) 低于平均值 ($7.53 \text{ t}\cdot\text{km}^{-2}$) 外,其他地市均远高于平均值,变化范围在 $10.65 \sim 18.70 \text{ t}\cdot\text{km}^{-2}$ 之间. 而苏北地区除徐州市 ($10.33 \text{ t}\cdot\text{km}^{-2}$) 外,其余四市单位面积排放强度均远低于平均值. 值得注意的

是,虽然徐州市的排放总量 (39.65 Gg) 相对不高,但其单位面积排放强度却不低,这表明徐州市单位面积的 S/IVOCs 环境负荷较大.

单位 GDP 的 S/IVOCs 排放强度定义为单位 GDP 下 S/IVOCs 的排放量,能够反映单位 GDP 的 S/IVOCs 对于环境负荷的大小,各地市 GDP 信息来源于文献[48]. S/IVOCs 的单位 GDP 排放强度越大,则单位 GDP 的环境负荷越大,从而看出当地经济生产水平以及 S/IVOCs 治理能力^[49]. 如图 3(c) 所示,连云港市 S/IVOCs 的单位 GDP 排放强度最高 ($22.45 \text{ t}\cdot\text{亿元}^{-1}$), 约为全省平均值 ($7.20 \text{ t}\cdot\text{亿元}^{-1}$) 的 3.12 倍,更是南通市 ($2.77 \text{ t}\cdot\text{亿元}^{-1}$) 的 8.10 倍. 总体上,S/IVOCs 的单位 GDP 排放强度呈现南北高、中部低的趋势. 例如,苏北五市中,除徐州外,单位 GDP 排放强度明显高于或接近平均值. 这与经济发展水平、产业结构、资源利用效率、污染物治理水平和资金投入等多方面因素有关^[49].

2.3 S/IVOCs 排放清单对比分析

本文将研究结果与其他地区的 S/IVOCs 排放清单进行了对比,结果如表 3 所示. 不同的源清单差

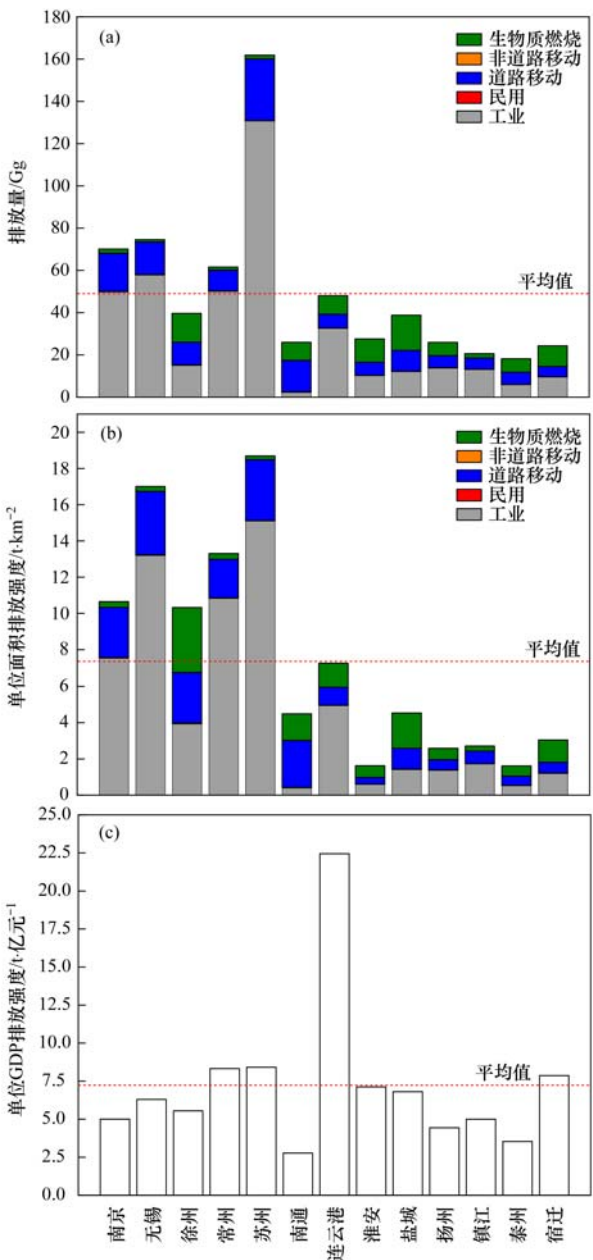


图3 各地市 5 类排放源 S/IVOCs 的排放总量、单位面积排放强度和单位 GDP 排放强度

Fig. 3 Five types of emission source S/IVOCs of total emission, emission intensity per unit area and emission intensity per unit of GDP in each city

表 3 与其他源清单的对比

Table 3 Comparison of S/IVOCs emissions between this study and those in other studies					
源	地区	年份	排放量/Gg	占比/%	文献
道路移动	江苏省	2019	141.66	22.23	本研究
	珠三角	2010	134.4	41.6	[18]
	长三角	2016	152.19	19.0	[50]
	珠三角	2016	54.91	25.9	[50]
	京津冀	2016	116.86	15.9	[50]
	川渝	2016	55.2	9.2	[50]
	京津冀	2014	36	6.38	[51]
	中国	2015	200.37		[15]
民用	江苏省	2019	1.46	0.23	本研究
	珠三角	2010	8.4	2.6	[18]
	长三角	2016	152.19	19.0	[50]
	珠三角	2016	11.87	5.6	[50]
	京津冀	2016	211.68	28.8	[50]
	川渝	2016	277.2	46.2	[50]
	京津冀	2014	387	68.62	[51]
工业	江苏省	2019	404.20	63.42	本研究
	珠三角	2010	114.6	35.4	[18]
	长三角	2016	480.6	60.0	[50]
	珠三角	2016	138.65	65.4	[50]
	京津冀	2016	396.17	53.9	[50]
	川渝	2016	247.2	41.2	[50]
	京津冀	2014	141	25	[51]
非道路移动	江苏省	2019	0.37	0.06	本研究
	珠三角	2010	4.8	1.5	[18]
生物质燃烧	江苏省	2019	89.61	14.06	本研究
	珠三角	2010	14.4	4.5	[18]
	长三角	2016	16.02	2.0	[50]
	珠三角	2016	6.36	3.0	[50]
	京津冀	2016	10.29	1.4	[51]
	川渝	2016	20.4	3.4	[50]

异较大,原因主要来自于不同的计算方法或参数,例如 OC 排放估算方法、S/IVOCs 与 POA 的比值、源的类别等^[50]. 本研究中工业源占到 63.42%,与 Wu 等^[50]的研究,2016 年长三角地区工业源占比最多(60.0%),是较为吻合的. 但本研究中民用源占比很小(0.23%),生物质燃烧源占到了不小的比重(14.06%),与 Wu 等^[50]的研究有差异. 因本研究利用江苏省各地市统计年鉴中的统计数据,根据污染物排放清单指南计算 PM_{2.5} 的排放量,从而间接估算 S/IVOCs 排放量. 而 Wu 等^[50]则基于 OC 排放量来估算,使用的数据来自 NCAR 的 FINN (fire inventory; <http://bai.acom.ucar.edu/Data/fire/>) 以及 MEIC 清单,使得所得到的结果差异较大.

2.4 不确定分析

在估算排放清单的过程中,由于所获取的活动水平和排放因子等数据,在一定程度上会出现统计误差、模型误差等带来的不确定性^[52,53]. 因此,进行

不确定性分析,对于排放清单的分析具有重要的意义. 清单所用到的数据基本来自文献调研和指南,仅存在一个有效数值. 因此本文所采用数据的不确定性参考文献^[54]. 其中来自统计年鉴的数据不确定性取 5%,部门调研的数据取 10%,专家估算的数据取 15%^[55]. 假定活动水平数据遵循正态分布,排放因子遵循对数正态分布^[56]. F_{OC} 、 OM/OC 、 E_{SVOCs}/E_{POA} 和 E_{SVOCs}/E_{POA} 的不确定性参数分布参考 Wu 等^[18]的研究. 清单不确定性范围的计算公式如下所示:

$$(a, b) = \left(\frac{D - E}{E}, \frac{T - E}{E} \right) \quad (3)$$

式中, (a, b) 为清单的不确定性范围, D 和 T 分别为 95% 置信区间的下限和上限, E 为概率分布的均值^[57].

本研究基于蒙特卡罗法对江苏省 2019 年各类源的排放量进行 10 万次抽样计算,如图 4 得到其

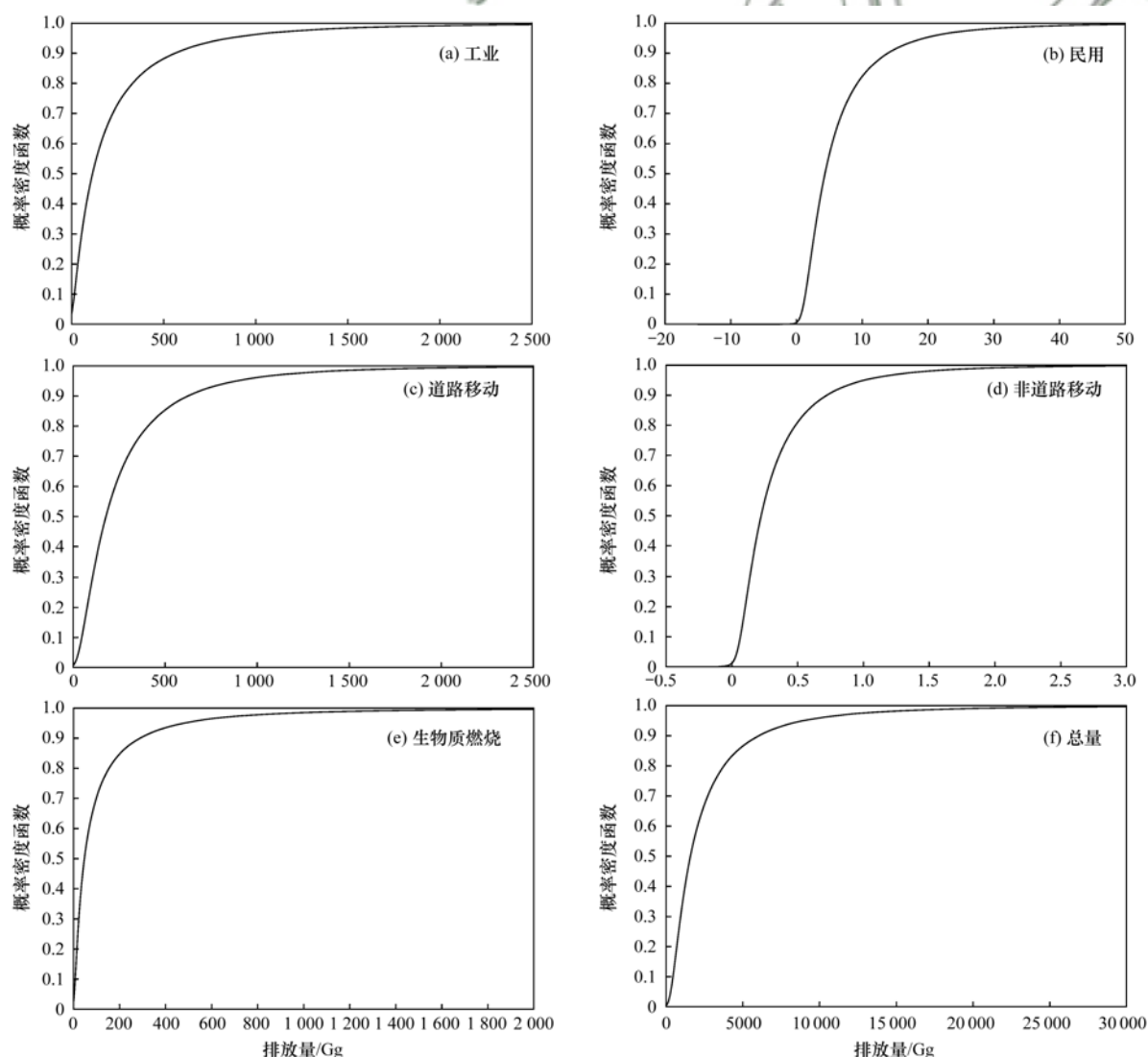


图 4 S/IVOCs 排放量排放 10 万次抽样结果概率分布

Fig. 4 Probability distribution of 100,000 sampling results of S/IVOCs emissions from various sources

95% 的置信区间范围, 利用公式 (3) 计算各类源排放量的不确定性范围. 各类源排放量样本的概率分布如图 4 所示, 各类源 10 万次抽样后算得的均值、95% 置信区间和不确定范围如表 4 所示. 从中可知, 2019 年江苏省 S/IVOCs 排放量经 10 万次模拟得到的平均值为 2 792. 86 Gg, 95% 概率范围在 322. 41 ~ 9 059. 46 Gg, 不确定性范围为 - 88. 46% ~ 224. 38%. 其中生物质燃烧源的不确定范围最大 (- 96. 40% ~ 277. 17%), 这是因为秸秆焚烧过程中排放的污染物成分繁多, 不同组分间的反应机制十分复杂, 不同地区的经济条件, 秸秆燃烧方式、燃烧习惯、作物种类等都会对 S/IVOCs 的排放量造成很大影响.

此外, 污染源的本地化排放因子的缺失、不同城市活动水平统计的口径的一致性和关键参数的假设都会对清单的不确定性造成影响^[58]. 本文在计算排放量时所用到的参数均选自参考文献, 比如 $E_{\text{SVOCs}}/E_{\text{POA}}$ 和 $E_{\text{IVOCs}}/E_{\text{POA}}$ 的值在不同的研究中差异非常大, 这是排放清单中不确定性一个非常大的来源. S/IVOCs 的源众多, 很难准确测量, 因此目前还无法将所有的排放源全部考虑进来. 经验基础和对于污染物认识的缺乏也会是清单不确定性的来源^[59].

表 4 江苏省各类源排放量的不确定性范围
Table 4 Uncertainty range of emissions from various sources in Jiangsu province

源	均值/Gg	95% 置信区间/Gg	不确定性范围/%
工业	2343. 46	(78. 42, 8 421. 02)	(- 96. 65, 258. 34)
民用	6. 57	(0. 99, 19. 45)	(- 85. 00, 195. 89)
道路移动	288. 07	(32. 59, 898. 39)	(- 88. 69, 211. 86)
非道路移动	0. 34	(0. 04, 1. 02)	(- 87. 35, 200. 68)
生物质燃烧	126. 77	(4. 57, 478. 12)	(- 96. 40, 277. 17)
总和	2 792. 86	(322. 41, 9 059. 46)	(- 88. 46, 224. 38)

3 结论

(1) 2019 年江苏省 S/IVOCs 排放量约为 637. 31 Gg, 其中工业源占比最多, 为 63. 42%; 非道路移动源占比最少 (0. 06%).

(2) 江苏省 13 地市中, 苏州市 S/IVOCs 占比最高, 为 25. 40%, 排放量约 161. 86 Gg; 泰州占比最少 (2. 85%), 排放量达 18. 17 Gg. 单位面积排放强度苏州最高 ($18. 70 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$), 泰州最小 ($1. 61 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$). 连云港市单位 GDP 排放强度最高 ($22. 45 \text{ t} \cdot \text{亿元}^{-1}$), 南通市最小 ($2. 77 \text{ t} \cdot \text{亿元}^{-1}$).

(3) 整体而言, 苏南地区 S/IVOCs 排放总量较苏北、苏中地区高, 排放总量、单位面积排放强度各地市之间差异较大, S/IVOCs 的单位 GDP 排放强度呈现南北高、中部低的趋势.

(4) 2019 年江苏省 S/IVOCs 排放量的不确定范围为 - 88. 46% ~ 224. 38%, 生物质燃烧源的不确定范围最大, 在 - 96. 40% ~ 277. 17%.

参考文献:

- [1] 刘晟东, 史君楠, 程勇, 等. 中国典型城市群 PM_{2.5} 污染特征研究进展[J]. 环境科学研究, 2020, **33**(2): 243-251.
Liu S D, Shi J N, Cheng Y, et al. Review of pollution characteristics of PM_{2.5} in Chinese representative megacities[J]. Research of Environmental Sciences, 2020, **33**(2): 243-251.
- [2] Zhang Y J, Cai J, Wang S X, et al. Review of receptor-based source apportionment research of fine particulate matter and its challenges in China[J]. Science of the Total Environment, 2017, **586**: 917-929.
- [3] 郑玫, 张延君, 闫才青, 等. 中国 PM_{2.5} 来源解析方法综述[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2014, **50**(6): 1141-1154.
Zheng M, Zhang Y J, Yan C Q, et al. Review of PM_{2.5} source apportionment methods in China[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2014, **50**(6): 1141-1154.
- [4] 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.
- [5] 葛祥, 吴健, 高松, 等. 典型化工集中区环境空气 SVOCs 污染特征及来源解析[J]. 环境科学, 2021, **42**(12): 5663-5672.
Ge X, Wu J, Gao S, et al. Characteristics and source apportionment of atmospheric SVOCs around typical chemical industry zones[J]. Environmental Science, 2021, **42**(12): 5663-5672.
- [6] 李登科. 机动车排气中 SVOCs 及颗粒物中 SOF 成分分析[D]. 天津: 天津大学, 2012.
Li D K. Research of composition of semi volatile organic compounds and SOF in particulate matter in vehicle exhaust[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
- [7] 王倩, 黄凌, 王杨君, 等. 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[J]. 环境科学, 2020, **41**(1): 125-132.
Wang Q, Huang L, Wang Y J, et al. 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[J]. Environmental Science, 2020, **41**(1): 125-132.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Ots R, Young D E, Vieno M, et al. Simulating secondary organic aerosol from missing diesel-related intermediate-volatility organic compound emissions during the Clean Air for London (ClearfLo) campaign[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2016, **16**(10): 6453-6473.
- [11] Lu Q Y, Murphy B N, Qin M M, et al. Simulation of organic aerosol formation during the CalNex study: updated mobile emissions and secondary organic aerosol parameterization for intermediate-volatility organic compounds[J]. Atmospheric

- Chemistry and Physics, 2020, **20**(7): 4313-4332.
- [12] Lu Q Y, Zhao Y L, Robinson A L. Comprehensive organic emission profiles for gasoline, diesel, and gas-turbine engines including intermediate and semi-volatile organic compound emissions[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, **18**(23): 17637-17654.
- [13] 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 from the combustion of residential solid fuels and the impact of burning temperature [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(10): 4404-4411.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 朱永慧, 王倩, 黄凌, 等. 长江三角洲 2010~2018 年生物质燃烧中等挥发性有机物 (IVOCs) 排放清单[J]. *环境科学*, 2020, **41**(8): 3511-3517.
Zhu Y H, Wang Q, Huang L, *et al.* Emission inventory of intermediate volatility organic compounds (IVOCs) from biomass burning in the Yangtze River Delta During 2010-2018 [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(8): 3511-3517.
- [17] 侯新红, 于兴娜, 沈丽, 等. 2013~2017 年江苏省人为源氨排放清单的建立及特征[J]. *环境科学*, 2019, **40**(11): 4862-4869.
Hou X H, Yu X N, Shen L, *et al.* Establishment and characteristics of an artificial ammonia emissions inventory in Jiangsu Province from 2013 to 2017 [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(11): 4862-4869.
- [18] 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.
- [19] 泰州市统计局, 国家统计局泰州调查队. 泰州统计年鉴-2019[M]. 北京: 中国统计出版社, 2019.
- [20] 南京市统计局, 国家统计局南京调查队. 南京统计年鉴-2020[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- [21] 无锡市统计局, 国家统计局无锡调查队. 无锡统计年鉴-2020[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- [22] 徐州市统计局, 国家统计局徐州调查队. 徐州统计年鉴-2020[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- [23] 苏州市统计局, 国家统计局苏州调查队. 苏州统计年鉴-2020[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- [24] 常州市统计局, 国家统计局常州调查队. 常州统计年鉴-2020[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- [25] 镇江市统计局, 国家统计局镇江调查队. 镇江统计年鉴-2020[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- [26] 连云港市统计局, 国家统计局连云港调查队. 连云港统计年鉴-2020[M]. 连云港: 连云港市统计局, 2020.
- [27] 盐城市统计局, 国家统计局盐城调查队. 盐城统计年鉴-2020[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- [28] 淮安市统计局, 国家统计局淮安调查队. 淮安统计年鉴-2020[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- [29] 宿迁市统计局, 国家统计局宿迁调查队. 宿迁统计年鉴-2020[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- [30] 扬州市统计局, 国家统计局扬州调查队. 扬州统计年鉴-2020[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- [31] 南通市统计局, 国家统计局南通调查队. 南通统计年鉴-2020[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- [32] 生态环境部. 道路机动车大气污染物排放清单编制技术指南(试行)[EB/OL]. http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201501/t20150107_293955.htm, 2022-05-30.
- [33] 王书肖, 张楚莹. 中国秸秆露天焚烧大气污染物排放时空分布[J]. *中国科技论文在线*, 2008, **3**(5): 329-333.
Wang S X, Zhang C Y. Spatial and temporal distribution of air pollutant emissions from open burning of crop residues in China [J]. *Sciencepaper Online*, 2008, **3**(5): 329-333.
- [34] 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.
- [35] Huang X F, He L Y, Hu M, *et al.* Characterization of submicron aerosols at a rural site in Pearl River Delta of China using an Aerodyne High-Resolution Aerosol Mass Spectrometer [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, **11**(5): 1865-1877.
- [36] May A A, Presto A A, Hennigan C J, *et al.* Gas-particle partitioning of primary organic aerosol emissions: (1) Gasoline vehicle exhaust[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **77**: 128-139.
- [37] 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.
- [38] Hu W W, Hu M, Hu W, *et al.* Chemical composition, sources, and aging process of submicron aerosols in Beijing: contrast between summer and winter [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2016, **121**(4): 1955-1977.
- [39] Xu W Q, Sun Y L, Chen C, *et al.* Aerosol composition, oxidation properties, and sources in Beijing: results from the 2014 Asia-Pacific Economic Cooperation summit study [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, **15**(23): 13681-13698.
- [40] He L Y, Huang X F, Xue L, *et al.* Submicron aerosol analysis and organic source apportionment in an urban atmosphere in Pearl River Delta of China using high-resolution aerosol mass spectrometry [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2011, **116**(D12), doi: 10.1029/2010JD014566.
- [41] Louvaris E E, Florou K, Karnezis E, *et al.* Volatility of source apportioned wintertime organic aerosol in the city of Athens[J]. *Atmospheric Environment*, 2017, **158**: 138-147.
- [42] Shrivastava M K, Lane T E, Donahue N M, *et al.* Effects of gas particle partitioning and aging of primary emissions on urban and regional organic aerosol concentrations [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2008, **113**(D18), doi: 10.1029/2007JD009735.
- [43] 江苏省统计局, 国家统计局江苏调查总队. 江苏统计年鉴-2020[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- [44] 刘松华, 周静, 谭译, 等. 苏州市大气细颗粒物 (PM_{2.5}) 工业源排放清单[J]. *环境科学学报*, 2017, **37**(2): 453-459.
Liu S H, Zhou J, Tan Y, *et al.* Emission inventory of

- atmospheric fine particles ($PM_{2.5}$) from industrial sources in Suzhou City[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, **37**(2): 453-459.
- [45] 沙丹丹. 长三角地区含碳气溶胶的时空分布特征及来源解析[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2018.
- Sha D D. Seasonal and spatial variations and potential sources of carbonaceous aerosols in the Yangtze River Delta[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2018.
- [46] 程昊, 康娜, 张佳欣, 等. 南京冬季典型霾天气过程多元对比分析[J]. *中国环境科学*, 2022, **42**(3): 993-1004.
- Cheng H, Kang N, Zhang J X, *et al.* Multivariate comparative analysis of typical haze weather episodes in Nanjing[J]. *China Environmental Science*, 2022, **42**(3): 993-1004.
- [47] 沈丽, 于兴娜, 项磊. 2006~2014 年江苏省氨排放清单[J]. *中国环境科学*, 2018, **38**(1): 26-34.
- Shen L, Yu X N, Xiang L. Estimation of ammonia emissions inventories in Jiangsu province from 2006 to 2014[J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(1): 26-34.
- [48] 国家统计局城市社会经济调查司. 中国城市统计年鉴-2020[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
- [49] 陈东景. 我国主要污染物排放强度的区域差异分析[J]. *生态环境*, 2008, **17**(1): 133-137.
- Chen D J. Analysis on the regional differences in main pollutants emission intensity in China[J]. *Ecology and Environment*, 2008, **17**(1): 133-137.
- [50] Wu L Q, Ling Z H, Liu H, *et al.* A gridded emission inventory of semi-volatile and intermediate volatility organic compounds in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **761**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.143295.
- [51] Li J, Han Z W, Li J W, *et al.* The formation and evolution of secondary organic aerosol during haze events in Beijing in wintertime[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **703**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134937.
- [52] 马品. 两种尺度下机动车排放清单及不确定性研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2015.
- Ma P. Analysis of vehicle emission inventory and its uncertain under two scales[D]. Jilin: Northeast Electric Power University, 2015.
- [53] 沈丽. 长江三角洲地区大气氨排放清单的建立及特征分析[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2019.
- Shen L. Establishment and characteristic analysis of atmospheric ammonia emission inventory in the Yangtze River Delta[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2019.
- [54] IPCC. Good practice guidance and uncertainty management in national greenhouse gas inventories[EB/OL]. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/english/>, 2022-03-15.
- [55] 张晓梅, 庄贵阳, 刘杰. 城市温室气体清单的不确定性分析[J]. *环境经济研究*, 2018, **3**(1): 8-18, 149.
- Zhang X M, Zhuang G Y, Liu J. Uncertainty analysis of urban greenhouse gas inventories[J]. *Journal of Environmental Economics*, 2018, **3**(1): 8-18, 149.
- [56] Frey H C, Zhao Y C. Quantification of variability and uncertainty for air toxic emission inventories with censored emission factor data[J]. *Environmental Science & Technology*, 2004, **38**(22): 6094-6100.
- [57] 云南省生态环境监测中心. 云南省大气污染物排放源清单编制探索与实践[M]. 北京: 中国环境出版集团, 2020.
- [58] 杨静. 珠江三角洲 2012 年大气排放源清单建立与时空分配改进研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
- Yang J. A study on refining temporal and spatial allocation for the 2012-based air pollutant emission inventory in the Pearl River Delta region[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015.
- [59] 赵睿东, 于兴娜, 侯新红, 等. 浙江省人为源氨排放清单建立及分布特征[J]. *环境科学*, 2020, **41**(9): 3976-3984.
- Zhao R D, Yu X N, Hou X H, *et al.* Establishment and spatial distribution of anthropogenic ammonia emission inventory in Zhejiang Province[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(9): 3976-3984.

CONTENTS

Research Progress of SOA Formation from Anthropogenic VOCs Under Complex Pollution Condition	CHEN Tian-zeng, LIU Jun, MA Qing-xin, <i>et al.</i>	(1201)
Advances in Microbial Degradation and Transformation of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFASs)	SUN Hong-wen, FANG Bo, CHEN Hao, <i>et al.</i>	(1214)
Research Progress on Remote Sensing Monitoring of Lake Water Quality Parameters	WANG Si-meng, QIN Bo-qiang	(1228)
Research Progress on Trojan-horse Effect of Microplastics and Heavy Metals in Freshwater Environment	ZHAO Wei-gao, TIAN Yi-mei, ZHAO Peng, <i>et al.</i>	(1244)
Temporal and Spatial Characteristics of Net CO ₂ Emissions and Decoupling Analysis in Yangtze River Economic Belt	WU Yi-fan, XU Yang, TANG Yang-bo, <i>et al.</i>	(1258)
Changes in Land Use Carbon Emissions and Coordinated Zoning in China	LI Yuan-yuan, WEI Wei, ZHOU Jun-ju, <i>et al.</i>	(1267)
Multi-dimensional Analysis of the Synergistic Effect of Pollution Reduction and Carbon Reduction in Tianjin Based on the STIRPAT Model	LIU Mao-hui, YUE Ya-yun, LIU Sheng-nan, <i>et al.</i>	(1277)
Railway Emission Trends in China Based on Fuel Life Cycle Analysis	TONG Hui, FAN Zhao-yang, LIANG Xiao-yu, <i>et al.</i>	(1287)
Pollution Characteristics of PM _{2.5} Chemical Composition in Zhejiang Province	ZHOU Jing-qing, YU Lei, CHEN Shu-xin, <i>et al.</i>	(1297)
Seasonal Variations, Size Distributions, and Sources of Chemical Components of Submicron Particulate Matter in Nanjing	XU Zhen-qi, SHANG Yue, DING Feng, <i>et al.</i>	(1310)
Seasonal Variations and Source Apportionment of Carbonaceous Components in Luoyang: Implication for Brown Carbon Contribution	YAN Guang-xuan, HOU Ming-yang, ZHANG Pu-zhen, <i>et al.</i>	(1319)
Establishment and Spatial Distribution of S/IVOCs Emission Inventory in Jiangsu Province in 2019	SONG Tong-ai, ZHANG Jia-ying, GUAN Lu, <i>et al.</i>	(1328)
Compositional Characteristics of Volatile Organic Compounds in Typical Industrial Areas of the Pearl River Delta: Importance of Oxygenated Volatile Organic Compounds	SONG Xin, YUAN Bin, WANG Si-hang, <i>et al.</i>	(1336)
Evolution and Characteristics of Full-process Vehicular VOCs Emissions in Tianjin from 2000 to 2020	SUN Lu-na, ZHONG Chong-zhi, SUN Shi-da, <i>et al.</i>	(1346)
Port-owned Mobile Source Air Pollutant Emission Inventory	XU Xiao-fan, WANG Bao-qing, WU Jun-cheng, <i>et al.</i>	(1357)
Simulation and Regulation of Sustainable Utilization of Water Resources in China Based on Improved Water Resources Ecological Footprint Model	OUYANG Xing-tao, LIAO Hao-yu, JIANG Qiu-xiang, <i>et al.</i>	(1368)
Occurrence Distribution and Risk Assessment of Organophosphate Esters in A Typical Area of the Estuary in the Yellow River Basin	CAO Miao, GUO Chang-sheng, ZHANG Heng, <i>et al.</i>	(1378)
Pollution Characteristics of Organochlorine Pesticides in Water and Sediments of Huixian Karst Wetland in Guilin	YU Yue, XING Xin-li, CHENG Cheng, <i>et al.</i>	(1387)
Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Surface Sediments from Major River Systems in Maoming City, Guangdong Province	CHEN Xiao-xia, ZHANG Min, LI Bei, <i>et al.</i>	(1397)
Temporal-spatial Distribution and Health Risk Assessment of Heavy Metals in the Surface Water of Ningbo	XU Mei-juan, YANG Jia, REN Xiao-jing, <i>et al.</i>	(1407)
Analysis of Water Chemistry Characteristics and Hydraulic Relationships of Different Water Bodies in Typical Mountain-oasis Systems in the Northwest Inland Area	WANG Shi-yu, SUN Cong-jian, CHEN Wei, <i>et al.</i>	(1416)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Pore-water in the Middle and Upper Reaches of Muwen River	LIU Yuan-qing, ZHOU Le, LÜ Lin, <i>et al.</i>	(1429)
Spatial-temporal Variation in Groundwater Quality and the Contamination Source Analysis in Shihezi-Changji Area	DING Qi-zhen, ZHOU Jin-long, JI Yan-zhen, <i>et al.</i>	(1440)
Analysis of Mechanism and Start-up Thresholds of Seasonal Algal Blooms in a Northern Eutrophic Stratified Reservoir	WEN Cheng-cheng, HUANG Ting-lin, KONG Chang-hao, <i>et al.</i>	(1452)
Characteristics of Benthic Diatom Community Structure and Water Ecological Health Evaluation in the Lalin River Basin	SHAN Tao, YUAN An-long, HUANG Zi-rui, <i>et al.</i>	(1465)
Bacterioplankton Communities and Assembly Mechanisms in Wet Season of Lakes, Nanchang	GAO Peng-fei, WANG Peng, HUANG Yi, <i>et al.</i>	(1475)
Seasonal Variation and Influencing Factors of Bacterial Communities in Storage Reservoirs	DING Ning, YANG Ying-ying, WAN Nian-xin, <i>et al.</i>	(1484)
Vertical Distribution and Source Tracking Analysis of Bacteria Composition and Nitrogen Metabolism Function of a Typical Urban Inland River	TAN Qiu-yang, LÜ Jin-yan, BAI Xian-yu, <i>et al.</i>	(1497)
Contribution Analysis of External Source Pollution Load and Environmental Capacity Estimation of Reservoirs in Central Yunnan Plateau	GUO Yu-jing, LI Hong-bing, WANG Shu-ming, <i>et al.</i>	(1508)
Preparation of Narrow Pore Diameter Phosphorus Containing Cotton Stalk Carbon and Its Adsorption Mechanism for Tetracycline	ZENG Shao-yi, LI Kun-quan	(1519)
Preparation of High Specific Surface Thiourea Modified Peanut Shell Carbon and Adsorption of Tetracycline and Copper	MIN Bing-kun, LI Kun-quan	(1528)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes on Different Water Supply Pipes	LIU Chen-xu, BAI Xiao-hui	(1537)
Effects of Vegetation Restoration on Soil Organic Carbon Sequestration and Aggregate Stability in Water-Eroded Environment: A Meta-analysis	YANG Rui-zhe, YANG Shi-long, WENG Xi-zhe, <i>et al.</i>	(1542)
Effects of Warming and Fertilization on Soil Organic Carbon and Its Labile Components in Rice-wheat Rotation	DENG Xu-zhe, HAN Chen, XUE Li-xiang, <i>et al.</i>	(1553)
Horizontal Variation Characteristics of Alpine Grassland Soil Function and Vertical Changes Along Soil Genetic Horizons in the Three-River Headwaters Region	LI Bo-jian, SHEN Cong-cong, LIU Si-yi, <i>et al.</i>	(1562)
CH ₄ Fluxes and Their Comprehensive Greenhouse Effects with CO ₂ Fluxes in Direct-seeded Rice in Poyang Lake Plain	SHI Yuan-zhi, CUI Yuan-lai, CAI Shuo, <i>et al.</i>	(1572)
Vertical Pollution Characteristics and Source Analysis of Soil PAHs in Different Land Use Types	ZHOU Zhi-yan, ZHANG Xiu-xiu, WANG Fei, <i>et al.</i>	(1583)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Per- and Polyfluoroalkyl Substances and Emerging Alternatives in Road Dust, Shijiazhuang	LI Peng-fei, WANG Yuan, YANG Chen, <i>et al.</i>	(1593)
Spatial Distribution Characteristics and Assessment of Heavy Metal Pollution in Cultivated Soil of Agricultural Small Watershed in Typical Mining Area in South China	YANG Yu, GUO Ting-ting, LIU Xiao-li, <i>et al.</i>	(1602)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in Vegetable Field in the Three Gorges Reservoir Area (Chongqing Section)	SHI Yu-jia, FANG Lin-fa, FANG Biao, <i>et al.</i>	(1611)
Accumulation Characteristics and Influencing Factors of Heavy Metals in Cultivated Land Surface Soil in Lanzhou	KANG Le, PENG Xin-bo, MA Yan-long, <i>et al.</i>	(1620)
Enrichment Characteristics, Source Apportionment, and Risk Assessment of Heavy Metals in the Industrial and Mining Area of Northern Guangdong Province	WANG Yue, MO Li, YU Xin-xiao, <i>et al.</i>	(1636)
Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Soil of a Lead Plant in Sanmenxia	LU Xiao-hui, YU Fang-zhong, FAN Yi-ming, <i>et al.</i>	(1646)
Distribution Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals in Soils of a Testing Range	WANG Shi-yu, LI Chun, ZHAO Hong-wei, <i>et al.</i>	(1657)
Effectiveness and Mechanisms of Chemical Leaching Combined with Electrokinetic Technology on the Remediation of Heavy Metal Contaminated Soil	MA Qiang, WEI Ze-bin, WU Qi-tang	(1668)
Emission Characteristics and Control of Heavy Metals in Secondary Copper Smelting Process	LIN Bing-cheng, WU Guang-long, ZHENG Ming-hui, <i>et al.</i>	(1678)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Soil-crops System in Anhui Section of the Yangtze River Basin	LIU Hai, WEI Wei, HUANG Jian-min, <i>et al.</i>	(1686)
In-situ Remediation Effect of Cadmium-polluted Agriculture Land Using Different Amendments Under Rice-wheat Rotation	ZHANG Lu, TANG Chan, YU Hai-ying, <i>et al.</i>	(1698)
Effect and Persistent Effect of Thiolated Montmorillonite on Safe Production in Cadmium-contaminated Cropland	FENG Xian-cui, CHEN Ya-gang, JIAO Hong-peng, <i>et al.</i>	(1706)
Effects of Earthworm, Straw, and Citric Acid on the Remediation of Zn, Pb, and Cd Contaminated Soil by <i>Solanum photeinocarpon</i> and <i>Pterocypselia indica</i>	CHEN Min-ni, NIE Xiao-qi, ZHANG Xing-feng, <i>et al.</i>	(1714)
Availability of Se-rich Arable Land in High Geological Background Area and Suggestions for Zoning	WANG Rui, LI Yu, YU Jing, <i>et al.</i>	(1727)
Characteristics and Causes of Ge Enrichment in Vegetable Growing Areas of Beixintun Town, Zhangjiakou City	AN Yong-long, YIN Xiu-lan, JIN Ai-fang, <i>et al.</i>	(1735)
Structural Diversity and Its Temporal Variation in the Soil Bacterial Community Under Plantations of <i>Taxodium distichum</i> in the Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir Area	TAN Xue, DONG Zhi, ZHANG Li-miao, <i>et al.</i>	(1748)
Effect of the Process of Returning Farmland to Forest in the Loess Hilly Area on Soil Fungal Communities	ZHANG Lei, WANG Qiang, YANG Xin-yue, <i>et al.</i>	(1758)
Effects of Chemical Fertilizer Reduction Substitute with Organic Fertilizer on Soil Functional Microbes and Lemon Yield and Quality	WANG Ying-yan, XIONG Zi-yi, LUO Dong-hai, <i>et al.</i>	(1768)
Dynamic Changes in Antibiotic Resistance Genes During Biological Fermentation of Chicken Manure and Pig Manure	ZHANG Dan, PENG Shuang, WANG Dan-qing, <i>et al.</i>	(1780)
Effects of Cow Manure Application on Soil Microbial Community in Farmland	ZHANG Ya-li, GUO Xiao-ming, HU Hui, <i>et al.</i>	(1792)