

北京城区PM_{2.5}各组分污染特征及来源分析

安欣欣, 曹阳, 王琴, 富佳明, 王陈婧, 景宽, 刘保献



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年5月

第43卷 第5期
Vol.43 No.5

目次

北京城区 PM _{2.5} 各组分污染特征及来源分析	安欣欣, 曹阳, 王琴, 富佳明, 王陈婧, 景宽, 刘保献 (2251)
基于时空混合效应模型的京津冀 PM _{2.5} 浓度变化模拟	范丽行, 杨晓辉, 宋春杰, 李梦诗, 段继福, 王卫, 李夫星, 李伟妙 (2262)
2000~2018 年京津冀城市群 PM _{2.5} 时空演变及其与城市扩张的关联	赵安周, 相恺政, 刘宪锋, 张向蕊 (2274)
海-陆大气交汇作用下青岛冬季大气 PM _{2.5} 污染特征与来源解析	虞雄, 杨凌霄, 张婉, 齐安安, 王滢铭, 王鹏程, 黄琦, 赵彤, 张雄飞, 徐鹏, 张天琪, 王文兴 (2284)
硫酸盐非均相机制对颗粒物污染的影响: 上海典型污染事件的 WRF-Chem 模拟	张茹涵, 张皓然, 冯伟航, 汤克勤, 马亚平, 王红丽, 黄成, 胡建林, 张宏亮, 李楠 (2294)
省会城市不同功能区大气 PM _{2.5} 化学组分季节变化及来源分析	孙友敏, 范晶, 徐标, 李彦, 韩红, 张桂芹 (2304)
太原市冬季不同污染程度下 PM _{2.5} 的化学组成、消光特征及氧化潜势	任娇, 赵荣荣, 王铭, 张欢欢, 尹诗杰, 薛永刚 (2317)
郑州市冬季大气 PM _{2.5} 金属元素来源及健康风险评价	姚森, 王乾恒, 薛妍, 史来文, 张俊美, 杨书申 (2329)
淄博市冬季 PM _{2.5} 载带金属元素污染特征、生态风险评价及来源分析	白雯宇, 徐勃, 郭丽瑶, 殷宝辉, 马银红, 李丽明, 杨文, 赵雪艳 (2336)
承德市 PM _{2.5} 中多环芳烃的季节分布特征、来源解析及健康风险评价	贺博文, 聂赛赛, 李仪琳, 郭睿瑶, 姚波, 崔建升, 冯亚平, 王帅, 侯晓松 (2343)
珠三角大气中二噁英污染水平与区域迁移	付建平, 谢丹平, 黄锦琼, 杨艳艳, 冯桂贤, 周长风, 廖海婷, 青亮, 张漫雯, 吴明亮, 张素坤 (2355)
华北平原南部农村地区黑碳气溶胶浓度及来源	张玲, 孔少飞, 郑煌, 胡尧, 曾昕, 程溢, 祁士华 (2363)
基于模式过程分析技术天津地区 PM _{2.5} 污染气象成因分析	郝团, 蔡子颖, 韩素芹, 杨旭, 樊文雁, 姚青, 邱晓滨 (2373)
基于排放量和大气反应活性的 VOCs 污染源分级控制	陈鹏, 张月, 邢敏, 李珊珊 (2383)
基于复杂网络的中国臭氧拓扑特征	菅娜, 陈建华, 李冬, 王迪, 薛志钢 (2395)
基于前体物多情景排放的兰州市 2030 年夏季臭氧预测	陈天雷, 吴敏, 潘成珂, 常莉敏, 李洪, 刘鹏, 高宏, 黄韬, 马建民 (2403)
基于源反演和气溶胶同化方法天津空气质量模式预报能力改进	蔡子颖, 唐邈, 肖致美, 杨旭, 朱玉强, 韩素芹, 徐虹, 邱晓滨 (2415)
基于空气质量监测数据的钢铁行业污染源识别方法	石耀耀, 胡京南, 褚咏昕, 段青春, 胡丙鑫, 殷丽娜, 吕玲玲 (2427)
重污染天气应对“绩效分级、差异化管控”措施首次实践效果后评估	曾景海, 王灿 (2436)
黄河流域水污染风险分区	周夏飞, 曹国志, 於方, 杨威杉, 徐泽升 (2448)
黄河流域甘肃段工业行业水污染物空间排放特征	李雪迎, 杨曦, 乔琦, 刘丹丹, 张玥, 赵若楠, 白璐 (2459)
黄河沉积物重金属时空分布与污染评价	王韬轶, 潘保柱, 韩语, 王雨竹, 李晨辉, 杜蕾 (2467)
APCS-MLR 结合 PMF 模型解析厦门杏林湾近郊流域沉积物金属来源	沈宸宇, 闫钰, 于瑞莲, 胡恭任, 崔建勇, 颜妍, 黄华斌 (2476)
河流底泥 DOM、营养盐与重金属空间分异特征及响应关系	肖艳春, 于会彬, 宋永会 (2489)
太原市汾河河岸带土壤重金属分布特征、评价与来源解析	胡杰, 赵心语, 王婷婷, 苟奎贤, 王春玲 (2500)
洪泽湖溶解态有机质与重金属汞的结合特性	胡斌, 王沛芳, 张楠楠, 包天力, 金秋彤 (2510)
富营养化驱动下西凉湖百年生态演化轨迹	郑佳楠, 徐敏, 郑文秀, 朱可欣, 王荣, 张恩楼 (2518)
基于 DGT 技术的黄河上游典型水库沉积物氮磷释放与污染源解析	马玉坤, 朱翔, 庞晴晴, 孔明, 韩天伦, 彭福全, 谢磊, 汪龙眠, 徐斌, 何斐 (2527)
暴雨前后河南北部河流水质分异特征及其污染源解析	张彦, 邹磊, 梁志杰, 姜明, 李平, 黄仲冬, 齐学斌 (2537)
鄱阳湖流域水葫芦 (<i>Eichhornia crassipes</i>) 对水体微塑料的吸附截留效应	李文刚, 吴希恩, 简敏菲, 刘淑丽, 刘海球, 丁惠君 (2548)
太湖塑料添加剂时空分布和生态风险评价	刘舒娇, 丁剑楠, 石波哲, 张军毅, 庄严, 邹华 (2557)
骆马湖表层沉积物微塑料的分布、来源及储量	姚明轩, 白雪, 徐振佳, 李凤杰, 陆滢, 李畅, 华祖林 (2566)
太湖不同介质中磷的污染特征及其治理启示	蔡梅, 陆志华, 王元元, 钱旭 (2575)
辽河四平段流域河流沉积物微生物群落多样性和结构分析	李鹏洋, 安启睿, 王新皓, 孙思宇, 李青乾, 郑娜 (2586)
面源污染诱导嘉陵江沉积物中细菌群落结构与功能异变	薛玉琴, 徐飞, 刘坤和, 王佳颖, 竹兰萍, 朱志豪, 张拓 (2595)
微塑料对沉积物细菌群落组成和多样性的影响	李汶璐, 王志超, 杨文煊, 张博文, 李卫平 (2606)
白洋淀冬季沉积物好氧反硝化菌垂直分布特征及群落构建	张甜娜, 陈召莹, 张紫薇, 周石磊, 孟佳靖, 陈哲, 张一凡, 董宛佳, 崔建升 (2614)
人工诱导水库分层水体提前混合对细菌群落结构和代谢活性的影响	高悦, 黄廷林, 李楠, 齐允之, 司凡, 杨斌 (2624)
鄱阳湖典型区铜锈环螺体内微塑料分布特征	江为群, 胡启武, 简敏菲, 邹龙, 刘淑丽 (2633)
负载多壁碳纳米管的多孔 Ti/SnO ₂ -Sb-Ni 电极电催化氧化双酚 A	符远航, 刘安迪, 黄伟斌, 唐彬彬, 张进忠 (2640)
磁性 Mn _{0.6} Zn _{0.4} Fe ₂ O ₄ 催化 H ₂ O ₂ 降解亚甲基蓝效能及机制	徐冬莹, 余静, 郝旗, 杨迎春, 方淑红 (2650)
两种纳米颗粒对沸石吸附环丙沙星的影响	蒋兰翠, 孟昭福, 刘贤, 刘欣, 王新欣, 曹雪雯 (2662)
AMD 污泥复合材料吸附 As(V) 的机制及其影响因素	张亚辉, 张瑞雪, 吴攀, 陈世万, 杨艳, 安丽, 傅渝然, 张子豪 (2673)
三氯生及其降解中间产物对活性污泥中微生物群落变化和硝化反硝化功能基因的影响	卢英源, 董小琦, 彭星星, 贾晓珊 (2685)
污染场地风险管控可持续评价指标体系构建及关键影响因素分析	李笑诺, 易诗懿, 陈卫平 (2699)
基于生态功能的滨海湿地土壤质量综合评价方法构建及实证分析	张雪, 孔范龙, 姜志翔 (2709)
铜山矿区周边农田土壤重金属来源解析及污染评价	陈航, 王颖, 王澍 (2719)
典型铁、锰矿物对稻田土壤砷形态与酶活性的影响	周一敏, 黄雅媛, 刘凯, 赵儒乐, 李冰玉, 雷鸣 (2732)
两种油菜施肥水溶性壳聚糖修复典型铅污染农田土壤	孟晓飞, 郑国砥, 陈同斌, 杨俊兴, 郭俊梅, 刘杰 (2741)
基于贝叶斯理论的小麦籽粒镉铅超标风险预测	王天齐, 李艳玲, 杨阳, 牛硕, 王美娥, 陈卫平 (2751)
紫色土旱坡地油菜/玉米轮作下氮流失的年度变化特征	徐曼, 高明, 余添, 朱浩宇, 邓华, 王子芳 (2758)
不同原料生物炭的理化特性及其作炭基肥缓释载体的潜力评价	邢莉彬, 成洁, 耿增超, 张宏伟, 梁宏旭, 王强, 孙倩倩, 李艳 (2770)
木醋液酸化生物炭与氮素配施对盐渍土壤活性氮及氨挥发的影响	申书伟, 张丹丹, 王敏鸽, 王旭东 (2779)
生物可降解地膜覆盖对关中地区小麦-玉米农田温室气体排放的影响	郭怡婷, 罗晓琦, 王锐, 陈海心, 冯浩 (2788)
戴云山南坡不同海拔森林土壤微生物群落结构特征和影响因素	何中声, 王紫薇, 朱静, 陈佳嘉, 谷新光, 江蓝, 陈博, 吴则焰, 刘金福, 陈文伟 (2802)
模拟增温和降雨增加对撂荒草地土壤胞外酶活性及计量特征的影响	王兴, 钟泽坤, 简俊楠, 张硕宏, 杨改河, 任成杰, 冯永忠, 任广鑫, 王晓娇, 韩新辉 (2812)
中国主要城市的城市化对局地增温的贡献	李宇, 周德成, 闫章美, 张良侠 (2822)
《环境科学》征订启事 (2293)	
《环境科学》征稿简则 (2426)	
信息 (2585, 2672, 2708)	

基于排放量和大气反应活性的 VOCs 污染源分级控制

陈鹏, 张月, 邢敏, 李珊珊*

(北京市生态环境保护科学研究院, 北京 100037)

摘要: 挥发性有机物(VOCs)作为 $PM_{2.5}$ 和 O_3 共同的关键前体物, 是大气污染防治的重要方向. 目前我国 VOCs 的控制政策主要基于 VOCs 排放量, 而没有考虑到 VOCs 组分其化学反应活性, 这将影响 VOCs 减排对改善空气质量的效果. 因此, 尝试建立基于 VOCs 排放量和大气反应活性的 VOCs 污染源分级控制方法, 以北京市为例进行研究. 首先, 通过采样监测获得了北京市餐饮业、汽修业和加油站这 3 个典型 VOCs 污染源的成分谱, 并通过文献调研获得了炼油石化、包装印刷、汽车制造、建筑涂装和机动车这 5 类 VOCs 污染源的成分谱. 然后, 分别采用最大增量反应活性(MIR)和气溶胶生成系数(FAC)计算污染源排放单位质量 VOCs 的臭氧生成潜势(OFP)和二次有机气溶胶生成潜势(SOAFP), 来表征 VOCs 污染源对臭氧和二次有机气溶胶的反应活性. 在获得北京市各 VOCs 污染源的排放量(EA)、OFP 和 SOAFP 值后, 采用极差法对其进行归一化处理, 分别获得归一化指数 NEA、NOFP 和 NSOAFP. 最后, 计算得到 VOCs 污染源分级指数(PCI), 并根据归一化后的 NPCI 将 VOCs 污染源划分为 4 个等级. 结果表明, 北京市机动车的 NPCI 最高(1.00). I 级 VOCs 污染源包括机动车(1.00)、汽车制造(0.93)和建筑涂装(0.75). 除加油站(0.32)和汽修业(0.30)为 III 级 VOCs 污染源外, 餐饮业(0.19)、炼油石化(0.15)和包装印刷(0)均为 IV 级 VOCs 污染源. 北京市应优先管控机动车、汽车制造和建筑涂装, 以降低北京市环境空气中臭氧和二次有机气溶胶的生成.

关键词: 挥发性有机物(VOCs); 排放特征; 臭氧生成潜势(OFP); 二次有机气溶胶(SOA); 污染源分级

中图分类号: X511 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2022)05-2383-12 **DOI:** 10.13227/j.hjxx.202108204

Classification Control of Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission Pollution Sources Based on Emission Amounts and Atmospheric Reactivity

CHEN Peng, ZHANG Yue, XING Min, LI Shan-shan*

(Beijing Municipal Research Institute of Eco-Environmental Protection, Beijing 100037, China)

Abstract: Volatile organic compounds (VOCs), as the common key precursors of $PM_{2.5}$ and O_3 , are an important direction of air pollution prevention and control. The primary VOCs control policy is based on VOCs emissions, without considering the chemical reactivity of VOCs components, which would influence the effects of VOCs emissions to improve air quality. Therefore, this study sought to establish a VOCs pollution source classification control method based on VOCs emissions and atmospheric reactivity, taking Beijing as an example. First, we obtained the composition spectrum of three typical VOCs pollution sources in the catering and automobile repair industries and gas stations in Beijing through detection and obtained the composition spectrum of five types of VOCs pollution sources in the petroleum chemical industry, printing factory, automobile manufacturing, architectural paints, and motor vehicles through literature research. Then, the maximum incremental reactivity (MIR) and fractional aerosol coefficient (FAC) were used to calculate the ozone formation potential (OFP) and secondary organic aerosol formation potential (SOAFP) of VOCs, to characterize the reactivity of VOCs pollution sources to O_3 and SOA, respectively. After obtaining the emission amount (EA), OFP, and SOAFP of VOCs pollution sources in Beijing, the range method was used to normalize them, and the normalized indexes NEA, NOFP, and NSOAFP were obtained, respectively. Finally, the pollution source classification index (PCI) was calculated and VOCs pollution sources were divided into four grades according to the normalized NPCI. The results showed that the NPCI of motor vehicles in Beijing was the highest (1.00). Level I VOCs pollution sources also included automotive manufacturing (0.93) and architectural paints (0.75). In addition to the gas station (0.32) and automobile repair industry (0.30) as the level III VOCs pollution sources, catering (0.19), the petroleum chemical industry (0.15), and printing factories (0) were all level IV VOCs pollution sources. Beijing should give priority to the control of motor vehicles, automobile manufacturing, and architectural paints to reduce the generation of O_3 and SOA.

Key words: volatile organic compounds(VOCs); emission characteristics; ozone formation potential(OFP); secondary organic aerosol(SOA); pollution source classification

近年来,随着我国大气污染治理的逐步推进,我国环境空气质量获得持续改善,但在逐步治理了以粗颗粒物污染为特征的煤烟型污染的同时,以细颗粒物($PM_{2.5}$)和臭氧(O_3)为特征的复合污染成为大气污染的主要类型,需要积极推进 O_3 和 $PM_{2.5}$ 的协同控制^[1,2]. 挥发性有机物(volatile organic compounds, VOCs)作为 $PM_{2.5}$ 和 O_3 共同的关键前体物,是大气污染防治的重要方向^[3~5]. VOCs 含有多种组分且化学性质活跃,这些组分排入大气中以不同的方式参与大气化学反应,其活性反应主要表现

在两个方面:一方面 VOCs 和氮氧化物(NO_x)经一系列光化学反应后形成对流层 O_3 ; 另一方面 VOCs 与 O_3 、 $\cdot OH$ 和 NO_3 等大气中具氧化性的物质经过一系列复杂的光化学反应形成二次有机气溶胶(secondary organic aerosol, SOA). 有研究表明, SOA

收稿日期: 2021-08-19; 修订日期: 2021-10-18

基金项目: 北京市自然科学基金项目(8202024); 国家重点研发计划项目(2016YFC0207903, 2016YFC0207904)

作者简介: 陈鹏(1988~), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为大气污染与防治, E-mail: chenp_emma@163.com

* 通信作者, E-mail: liss0502@163.com

可占气溶胶颗粒物中有机成分的 20%~80%^[6,7]. 因此,VOCs 排放对局地大气 O₃、光化学烟雾和灰霾等大气复合污染的形成有重大的影响.

不同污染源排放的 VOCs 具有不同的化学组分,从而以不同的方式参与大气化学反应. 有研究显示,不同 VOCs 组分之间的反应活性相差较大,甚至相差 1 个数量级^[8]. 因此,科学地了解不同污染源的 VOCs 成分谱至关重要,不仅能进一步了解 VOCs 排放特征,而且对制定 VOCs 控制政策也至关重要. 目前我国的 VOCs 减排政策主要基于 VOCs 的排放量,而没有考虑其化学反应活性,这将影响 VOCs 减排对改善空气质量的效果. 综合考虑 VOCs 排放量及其大气反应活性的 VOCs 控制政策比基于单一排放量的控制政策能更有效地改善空气质量^[9].

当前,我国对不同污染源的 VOCs 成分谱及其大气反应活性进行了一定的探索,如石油化工源^[10~12]、化石燃料燃烧源^[2]、机动车排放源^[13~15]、溶剂使用源^[16~18]和涂料制造行业^[19,20]等. 但是上述研究重点大多集中于单一源 VOCs 成分谱及其对 O₃ 和 SOA 影响的研究,而对一个地区内典型 VOCs 污染源对空气质量的综合影响研究相对较少. 因此,本文的目的是建立基于排放量和大气反应活性的 VOCs 污染源分级控制方法,以北京市为例进行研究. 北京市 VOCs 污染主要表现为移动源和生活服务源^[21],为了提高对北京市不同污染源 VOCs 组分的认识,开展了对餐饮业、汽修业和加油站这 3 个典型污染源 VOCs 组分的监测. 通过估算单个 VOCs 污染源的排放量、臭氧生成潜势(ozone formation potential, OFP)和二次气溶胶生成潜势(secondary organic aerosol formation potential, SOAFP)等综合控制指标,明确 VOCs 污染源的控制等级,以期为我国 VOCs 污染控制提供借鉴.

1 材料与方法

1.1 VOCs 污染源基本情况

选取了北京市 VOCs 污染源为研究对象. 根据 2017 年北京市大气污染源排放清单^[21],典型的 VOCs 污染源主要有工业源(炼油石化、包装印刷、汽车制造)、生活服务源(餐饮、汽修、建筑涂装)和移动源(机动车、加油站),这 8 类 VOCs 污染源的排放量占北京市 VOCs 总排放量的 52.54%. 大部分污染源的 VOCs 成分谱在其他前期研究中已经获得,如炼油石化、包装印刷、汽车制造、建筑涂装和机动车的 VOCs 成分谱由文献调研获得,具体内容见表 1.

表 1 VOCs 污染源成分谱来源

Table 1 Summary of VOCs source profiles

类别	污染源	VOCs 物种数 /个	成分谱来源
工业源	炼油石化	46	[22]
	包装印刷	71	[23]
	汽车制造	52	[24]
生活服务源	餐饮业	45	本研究
	汽修业	49	本研究
	建筑涂装	45	[24]
移动源	机动车	57	[25]
	加油站	27	本研究

重点对北京市餐饮业、汽修业和加油站这 3 个典型污染源 VOCs 的组分进行了监测. 餐饮业选取北京市 3 家不同菜系的餐饮店进行 VOCs 采样,采样位置为油烟净化装置的排气筒,VOCs 样品均采集于烹饪进行时段. 汽修业选取北京市 3 家典型 4S 店进行 VOCs 采样,采样位置为喷烤漆房排气筒,VOCs 样品均采集于喷烤漆工序时段,喷涂设备正常运行状态. 加油站选取北京市 3 家不同规模的加油站进行采样,采样位置为地下储罐排气管,VOCs 样品均采集于加油站油气回收系统正常运行状态.

1.2 VOCs 组分监测

所有采样点的 VOCs 样品采集均使用 3L 聚四氟乙烯采样袋避光采集,以 500 mL·min⁻¹ 的流量采集 5 min,等时间间隔采集 3 个样品计平均值. 采样方法按照文献[26]的规定执行.

VOCs 样品分析方法参考了文献[27]及美国 EPA 的 TO-15 的方法,采用三级冷阱预浓缩系统进样后,用气相色谱-质谱联用系统进行定性定量分析. 首先通过自动进样器(ENTECH 7016D)自动进样 400 mL,然后样品进入气体冷阱浓缩仪(ENTECH 7200)进行前处理,三级冷冻温度分别为 -40、-50 和 -190℃. 聚焦冷冻完毕后快速升温使冷冻在毛细柱头的 VOCs 迅速汽化,在氮载气的推动下解吸进入 GC-MS 系统(Agilent 7890A/5975C)进行分离和定量.

GC-MS 系统升温程序如下:GC 柱箱初始温度为 35℃,保持 5 min;然后以 5℃·min⁻¹ 升温至 150℃,保持 7 min;再以 10℃·min⁻¹ 升温至 220℃并保持 5 min,载气为高纯氮气(纯度>99.999%),传输线温度为 250℃. 质谱条件:质谱检测器的离子源类型为电子轰击离子源(EI),电离电压为 70 eV,离子源温度 230℃,采用全扫描方式,扫描范围(*m/z*)为 20~300. 定量分析使用的外标气体组分为 65 种的 TO-15 标气(Linde Gas North America LLC),摩尔分数为 1 μmol·mol⁻¹. 内标气体组分为一溴一氯甲烷、1,2-二氟苯和氯苯-d5(Linde Gas North

America LLC), 摩尔分数为 $1 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$.

为保证监测数据的有效性和可靠性, 所有样品在运输过程中均用黑色袋子封装避光保存, 且在 48 h 内分析完成. 在正式建立工作曲线和每批样品分析前进行 GC-MS 系统运行检查. VOCs 定量工作的标准曲线包含 7 个浓度梯度, 各化合物标准曲线的相关因子均大于 0.99, 可保证数据的有效性和准确性.

1.3 臭氧生成潜势计算

VOCs 在参与大气反应过程中, 不同活性的 VOCs 物种对 O_3 生成的贡献不同, 具有不同的臭氧生成潜势 (OFP), 因此通常用 OFP 表征 VOCs 物种的化学反应活性^[28]. 通过对各种 VOCs 物种的 OFP 分析能筛选出 VOCs 中形成臭氧的优势成分. 采用 VOCs 最大增量反应活性 (maximum increment reactivity, MIR) 来计算 VOCs 物种的 OFP. MIR 是指增加一定量的 VOCs 所导致的臭氧浓度变化与 VOCs 增加量的比值.

通过计算污染源排放单位质量 VOCs 的 OFP 来表征 VOCs 污染源对臭氧的反应活性, 更能反映某污染源在不考虑 VOCs 排放强度的情况下生成臭氧的能力, 计算公式如下^[29]:

$$\text{OFP}_j = \sum_{i=1}^n f_{ij} \cdot \text{MIR}_i \quad (1)$$

式中, OFP_j 为 VOCs 污染源 j 的臭氧生成系数, $\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$; f_{ij} 为 j 源中第 i 种 VOC 组分的质量分数; MIR_i 为第 i 种 VOC 组分在臭氧最大增量反应中的臭氧生成系数, $\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$, 使用文献 [30, 31] 的 MIR 系数.

1.4 二次有机气溶胶生成潜势计算

排入大气中的 VOCs 经过大气氧化及气/粒分配等过程形成 SOA, VOCs 的二次有机气溶胶生成贡献常用二次有机气溶胶生成潜势 (SOAFP) 来描述^[32]. 目前, SOAFP 估算方法主要包括气溶胶生成系数 (fractional aerosol coefficient, FAC) 法、OC/EC 比值法、水溶性有机物法等, 其中 FAC 法被广泛应用^[33]. 基于 Grosjean 等^[34, 35] 的烟雾箱实验, 采用气溶胶生成系数估算大气中的 VOCs 的 SOA 生成潜势.

通过计算污染源排放单位质量 VOCs 的气溶胶生成潜势来表征 VOCs 污染源对 SOA 的反应活性, 更能反映某排放源在不考虑 VOCs 排放强度的情况下生成 SOA 的能力, 具体计算公式如下^[36]:

$$\text{SOAFP}_j = \sum_{i=1}^n f_{ij} \cdot \text{FAC}_i \quad (2)$$

式中, SOAFP_j 为 VOCs 污染源 j 的 SOA 生成系数,

$\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$; f_{ij} 为 j 源中第 i 种 VOC 组分的质量分数; FAC_i 为第 i 种 VOC 组分的气溶胶生成系数, %, 使用文献 [34, 35] 的 FAC 值.

1.5 VOCs 污染源分级方法

VOCs 污染源分级主要基于 VOCs 排放量 (emission amount, EA) 及其大气反应活性. 其中 VOCs 排放量 (EA) 来自于 2017 年北京市大气污染物排放清单^[21]. VOCs 大气反应活性分别选取臭氧生成潜势 (OFP) 和二次气溶胶生成潜势 (SOAFP) 两个指标来表征. 在获得各个 VOCs 污染源的 EA、OFP 和 SOAFP 值后, 为了便于污染源分级, 采用极差法对其进行归一化处理, 分别获得归一化指数 NEA、NOFP 和 NSOAFP. 计算公式如下^[37]:

$$\text{NEA}_j = \frac{\text{EA}_j - \text{EA}_{\min}}{\text{EA}_{\max} - \text{EA}_{\min}} \quad (3)$$

$$\text{NOFP}_j = \frac{\text{OFP}_j - \text{OFP}_{\min}}{\text{OFP}_{\max} - \text{OFP}_{\min}} \quad (4)$$

$$\text{NSOAFP}_j = \frac{\text{SOAFP}_j - \text{SOAFP}_{\min}}{\text{SOAFP}_{\max} - \text{SOAFP}_{\min}} \quad (5)$$

式中, EA_j 为 VOCs 污染源 j 的 VOCs 排放量, $\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$, $\text{EA}_{\min}$ 、 $\text{OFP}_{\min}$ 和 $\text{SOAFP}_{\min}$ 分别为 VOCs 污染源中最小的 EA_j 、 OFP_j 和 SOAFP_j , $\text{EA}_{\max}$ 、 $\text{OFP}_{\max}$ 和 $\text{SOAFP}_{\max}$ 分别为 VOCs 污染源中最大的 EA_j 、 OFP_j 和 SOAFP_j .

根据环境管理侧重, 分别对 NEA、NOFP 和 NSOAFP 赋予权重, 使用公式 (6) 进行加权加和, 得到污染源分级指数 (pollution source classification index, PCI), 计算公式如下^[37]:

$$\text{PCI}_j = k_1 \times \text{NEA}_j + k_2 \times \text{NOFP}_j + k_3 \times \text{NSOAFP}_j \quad (6)$$

式中, PCI_j 为 VOCs 污染源 j 的分级指数; k 为不同因子权重, $k_1 + k_2 + k_3 = 1$; 本文根据现阶段环境管理水平与减排重点^[37], k_1 取值 0.4, k_2 和 k_3 均取值 0.3.

计算得出 PCI 后, 对 PCI 值再次利用极差法进行归一化处理, 归一化后的 NPCI 即为分级指数, 用于 VOCs 污染源的分类, 计算公式如下:

$$\text{NPCI}_j = \frac{\text{PCI}_j - \text{PCI}_{\min}}{\text{PCI}_{\max} - \text{PCI}_{\min}} \quad (7)$$

式中, NPCI_j 为 VOCs 污染源 j 归一化后的分级指数; $\text{PCI}_{\min}$ 为 VOCs 污染源中最小的 PCI_j ; $\text{PCI}_{\max}$ 为 VOCs 污染源中最大的 PCI_j .

本文根据分级指数大小, 将 VOCs 污染源划分成 4 个等级. I、II、III 和 IV 级 VOCs 污染源的 NPCI 分别为 0.75 ~ 1.00、0.50 ~ 0.75、0.25 ~ 0.50 和 0 ~ 0.25. 分级指数数值越高, 越需要优先控制. I

级代表对环境空气质量影响最严重的 VOCs 污染源,需要优先控制。

2 结果与讨论

2.1 VOCs 污染源排放特征分析

通过对 9 家典型企业排气筒 VOCs 样品的监测,共获得 67 种 VOCs 物种。其中,卤代烃种类最多达 31 种,其次为含氧 VOC(OVOC)19 种,此外还检出芳香烃 11 种、烷烃 3 种和烯烃 3 种。

2.1.1 餐饮业

餐饮企业的总 VOCs 排放浓度为 228.85 ~ 665.23 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。这 3 家餐饮企业共检出 45 种 VOCs,虽然种类较多,但是主要 VOCs 种类比较集中,这 3 家企业 VOCs 排放量前 10 的物种质量分数分别为 93.25%、84.85% 和 94.03% (表 2)。由表 2 可知,丙酮为餐饮企业排放量最大的物质,质量分数为 34.70%~38.13%。正己烷(1.97%~31.92%)和

苯(2.37%~15.20%)的质量分数也较高,但是不同企业的监测结果差异较大。此外,苯甲醛(3.80%~9.59%)、乙酸乙酯(3.38%~6.94%)和甲苯(1.61%~7.98%)的质量分数也较高。由于烹饪方式和处理技术的不同,餐饮业 VOCs 的组分会有差异^[38],但是从类别上看主要有以酮类和酯类为主的 OVOC(50.19%~55.89%)、以苯系物为主的芳香烃(8.18%~33.20%),以及烷烃(3.51%~32.79%)。VOCs 组分的差异受烹饪方式的影响较大,如餐饮 2 为烧烤餐厅,主要燃料为木炭,相比使用天然气的餐饮 1 和餐饮 3,其苯系物的质量分数明显较高^[39]。这 3 家餐厅均采用静电式油烟处理技术,该技术对颗粒物和油烟有较好的处理效果,但是对 VOCs 的处理效果并不显著,可能是由于在静电处理过程中产生的臭氧导致部分大分子化合物氧化断链成了新增的 VOCs 组分^[40],这也进一步扩大了不同餐饮企业 VOCs 组分的差异性。

表 2 餐饮业排放的 VOCs 前 10 组分

Table 2 Ten most abundant species and their percentages in VOCs from catering emissions

序号	餐饮 1		餐饮 2		餐饮 3	
	VOCs 物种	质量分数/%	VOCs 物种	质量分数/%	VOCs 物种	质量分数/%
1	丙酮	34.70	丙酮	38.07	丙酮	38.13
2	正己烷	31.76	苯	15.20	正己烷	31.92
3	苯甲醛	8.28	苯甲醛	9.59	乙酸乙酯	4.58
4	乙酸乙酯	6.94	甲苯	7.98	苯甲醛	3.80
5	乙酸丁酯	2.60	乙酸乙酯	3.38	苯	3.61
6	苯	2.37	间/对-二甲苯	2.91	间/对-二甲苯	3.12
7	间/对-二甲苯	1.92	苯乙烯	2.05	甲苯	2.61
8	丙二醇单甲醚乙酸酯	1.91	正己烷	1.97	环戊酮	2.32
9	甲苯	1.61	乙苯	1.94	三氯甲烷	2.29
10	1-十二烯	1.17	邻-二甲苯	1.75	1,2-二氯乙烷	1.66
总计		93.25		84.85		94.03

2.1.2 汽修业

汽修业的总 VOCs 排放浓度为 1 632.28 ~ 2 630.61 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。这 3 家汽修企业共检出 49 种 VOCs,种类最多的为卤代烃达 26 种。汽修业的 VOCs 种类也比较集中,这 3 家企业 VOCs 排放量前 10 的物种质量分数分别为 94.56%、87.77% 和 90.63% (表 3)。质量分数较高的 VOCs 组分主要是芳香烃(36.97%)和卤代烃(48.72%),但是每个类别的优势 VOCs 组分在不同的汽修企业中并不完全相同,如汽修 1 中乙苯(31.47%)为排放量最多的物种,而在汽修 2 和汽修 3 中乙苯的质量分数分别仅为 3.26% 和 5.65%。此外,汽修 1 中 1,1,2-三氯乙烷(22.81%)、1,1,2,2-四氯乙烷(17.94%)和氯苯(10.20%)的质量分数均较高,而在汽修 2 中质量分数较高的组分依次为 1,2-二氯丙烷(24.62%)、甲苯(16.34%)、间/对-二甲苯

(13.70%)和二氯甲烷(12.28%)。VOCs 组分的差异主要因为不同汽修企业使用的油漆品种不同,汽修 1 原料漆为水性漆,而汽修 2 和汽修 3 则为油性漆,二甲苯是油性漆中重要的有机溶剂,因此汽修 2 和汽修 3 的废气中监测出较高质量分数的二甲苯^[41]。末端处理技术不同也会对 VOCs 组分产生较大影响,如汽修 1 和汽修 3 采用活性炭吸附工艺处理废气,而汽修 2 则采用活性炭+光氧催化技术,光氧催化技术会使部分 VOCs 分解成小分子物质^[42],从而造成 VOCs 组分增多,因此汽修 2 的 VOCs 组分较多且相对分散。

2.1.3 加油站

加油站的总 VOCs 排放浓度为 0.24 ~ 966.78 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。这 3 家加油站共检出 27 种 VOCs,OVOC(12 种)和芳香烃(7 种)种类较多,还监测到卤代烃(5 种)、烷烃(2 种)和烯烃(1 种)。加油站排放的

表 3 汽修业排放的 VOCs 前 10 组分

Table 3 Ten most abundant species and their percentages in VOCs from the automobile repair industry

序号	汽修 1		汽修 2		汽修 3	
	VOCs 物种	质量分数/%	VOCs 物种	质量分数/%	VOCs 物种	质量分数/%
1	乙苯	31.47	1,2-二氯丙烷	24.62	1,2-二氯丙烷	27.29
2	1,1,2-三氯乙烷	22.81	甲苯	16.34	间/对-二甲苯	20.52
3	1,1,2,2-四氯乙烷	17.94	间/对-二甲苯	13.70	甲苯	14.71
4	氯苯	10.20	二氯甲烷	12.28	邻二甲苯	8.09
5	四氢呋喃	4.58	邻-二甲苯	5.09	二氯甲烷	5.94
6	丙酮	2.46	正庚烷	4.80	乙苯	5.65
7	三溴甲烷	1.69	乙苯	3.26	1,2-二氯乙烷	2.55
8	1,1-二氯乙烷	1.55	环己烷	2.80	正庚烷	2.17
9	顺式-1,2-二氯乙烯	1.09	正己烷	2.55	四氯乙烯	1.91
10	乙酸乙酯	0.78	丙烯	2.32	正己烷	1.80
总计		94.56		87.77		90.63

VOCs 种类比餐饮业和汽修业种类要少,而且非常集中,排放量前 10 的 VOCs 物种质量分数分别为 99.39%、99.96% 和 88.67% (表 4)。排放量最多的物种为正己烷(10.42%~83.78%),其次为甲苯(9.09%~33.55%),这两类物质的质量分数可达 41.67%~92.87%。此外,乙酸乙酯(2.79%~8.20%)、正庚烷(2.18%~8.14%)和苯(1.67%~8.60%)的质量分数也相对较高。从 VOCs 类别上看,加油站的烷烃和芳

香烃质量分数较高,分别为 11.75%~86.00% 和 11.08%~53.66%,其他类别的质量分数均较低。加油站 VOCs 种类和浓度的差异主要受温度的影响^[43,44],其中加油站 1 和加油站 2 在温度较高的夏季(6 月)采样,VOCs 排放浓度分别为 175.78 和 966.78 mg·m⁻³。加油站 3 在温度较低的冬季(12 月)采样,其 VOCs 排放浓度仅为 0.24 mg·m⁻³,且监测出了汽油防冻剂的主要成分甲基叔丁基醚。

表 4 加油站排放的 VOCs 前 10 组分

Table 4 Ten most abundant species and their percentages in VOCs from gas stations

序号	加油站 1		加油站 2		加油站 3	
	VOCs 物种	质量分数/%	VOCs 物种	质量分数/%	VOCs 物种	质量分数/%
1	甲苯	33.55	正己烷	83.78	甲苯	31.25
2	正己烷	33.32	甲苯	9.09	间/对-二甲苯	13.69
3	苯	8.60	乙酸乙酯	2.79	正己烷	10.42
4	乙酸乙酯	8.20	正庚烷	2.18	丙烯醛	8.56
5	正庚烷	8.14	苯	1.67	甲基叔丁基醚	6.88
6	间/对-二甲苯	3.33	间/对-二甲苯	0.18	丙酮	4.98
7	乙苯	1.94	乙苯	0.08	邻-二甲苯	3.69
8	邻-二甲苯	1.64	3-戊酮	0.08	六氯丁二烯	3.51
9	3-戊酮	0.40	邻-二甲苯	0.06	二氯甲烷	3.04
10	环戊酮	0.26	丙酮	0.04	三氯甲烷	2.63
总计		99.39		99.96		88.67

2.1.4 VOCs 源成分谱

同一类型的污染源中不同企业测得的 VOCs 组成分布并不完全相同,为了消除某一样品对 VOCs 源成分谱的影响,将同一类型不同企业样品中的 VOCs 物种质量分数取平均值,获得该类污染源的 VOCs 源成分谱。根据上述监测的 9 家企业 VOCs 质量分数,分别获得餐饮业、汽修业和加油站的 VOCs 源成分谱,结果见表 5。

由餐饮业 VOCs 成分谱可知(表 5),丙酮是 VOCs 排放量最大的物种,占总 VOCs 排放量的 36.97%。此外质量分数较高的物质还有正己烷(21.88%)、苯甲醛(7.22%)、苯(7.06%)、乙酸乙酯(4.96%)以及

甲苯(4.07%)等。从 VOCs 类别来看,餐饮业 VOCs 排放的主要组分是 OVOC、烷烃和芳香烃,质量分数分别为 53.73%、22.81% 和 17.73%。

由汽修业 VOCs 成分谱可知(表 5),1,2-二氯丙烷是 VOCs 排放量最大的物种,占总 VOCs 排放量的 17.30%。从 VOCs 类别来看,卤代烃(45.48%)和芳香烃(41.43%)的 VOCs 排放量最大,如乙苯(13.46%)、间/对-二甲苯(11.41%)和甲苯(10.40%)等芳香烃类物质,以及 1,1,2-三氯乙烷(7.60%)、二氯甲烷(6.07%)和 1,1,2,2-四氯乙烷(5.98%)等卤代烃。

由加油站 VOCs 成分谱可知(表 5),正己烷和

表 5 不同污染源的 VOCs 成分谱¹⁾
Table 5 VOCs composition spectrum of different pollution sources

组分	VOCs 物种	MIR/g·g ⁻¹	FAC/%	质量分数/%		
				餐饮	汽修	加油站
烷烃	正己烷	1.24	—	21.88 ± 14.08	1.47 ± 1.04	42.51 ± 30.65
	环己烷	1.28	0.17	0.00	1.38 ± 1.08	0.00
	正庚烷	1.07	0.06	0.80 ± 0.63	2.32 ± 1.96	3.89 ± 3.03
烯烃	丙烯	11.66	—	0.00	1.03 ± 0.96	0.00
	1-癸烯	—	—	0.59 ± 0.62	0.00	0.01 ± 0.01
	1-十二烯	—	—	0.63 ± 0.48	0.00	0.00
芳香烃	苯	0.72	2	7.06 ± 5.78	0.57 ± 0.42	3.89 ± 3.33
	甲苯	4	5.4	4.07 ± 2.80	10.40 ± 7.29	24.63 ± 11.03
	乙苯	3.04	5.4	1.13 ± 0.58	13.46 ± 12.77	1.44 ± 0.97
	间对-二甲苯	8.2	4.7	2.65 ± 0.52	11.41 ± 8.53	5.74 ± 5.77
	邻-二甲苯	7.64	5	1.06 ± 0.50	4.51 ± 3.19	1.80 ± 1.49
	1,2,4-三甲苯	8.87	2	0.00	0.46 ± 0.42	0.44 ± 0.63
	1,3,5-三甲苯	11.76	2.9	0.20 ± 0.19	0.37 ± 0.23	0.00
	1,2,4-三已基苯	—	—	0.32 ± 0.19	0.00	0.00
	4-乙基甲苯	4.44	2.5	0.18 ± 0.11	0.23 ± 0.07	0.00
	苯乙烯	1.73	—	1.07 ± 0.72	0.00	0.02 ± 0.02
	萘	1.17	4	0.00	0.03 ± 0.05	0.00
卤代烃	二氯甲烷	0.041	—	0.33 ± 0.43	6.07 ± 5.02	1.01 ± 1.43
	三氯甲烷	0.022	—	1.27 ± 0.72	0.21 ± 0.16	0.88 ± 1.24
	四氯化碳	—	—	0.10 ± 0.07	0.13 ± 0.18	0.00
	三溴甲烷	—	—	0.00	0.56 ± 0.79	0.00
	一氟三氯甲烷	—	—	0.00	0.10 ± 0.08	0.27 ± 0.39
	二氟二氯甲烷	—	—	0.00	0.13 ± 0.10	0.47 ± 0.67
	一溴二氯甲烷	—	—	0.00	0.21 ± 0.21	0.00
	1,1,2-三氯-1,2,2-三氟乙烷	—	—	0.37 ± 0.12	0.00	0.00
	氯乙烷	0.29	—	0.00	0.19 ± 0.27	0.00
	1,1-二氯乙烷	0.069	—	0.00	0.52 ± 0.73	0.00
	1,2-二氯乙烷	0.21	—	0.73 ± 0.67	1.04 ± 1.09	0.00
	1,1,1-三氯乙烷	0.0049	—	0.04 ± 0.03	0.07 ± 0.09	0.00
	1,1,2-三氯乙烷	0.086	—	0.13 ± 0.10	7.60 ± 10.75	0.00
	1,1,2,2-四氯乙烷	—	—	0.11 ± 0.14	5.98 ± 8.46	0.00
	1,2-二溴乙烷	0.1	—	0.07 ± 0.10	0.02 ± 0.03	0.00
	1,2-二氯丙烷	0.29	—	0.04 ± 0.03	17.30 ± 12.28	0.00
	1,1-二氯乙烷	1.79	—	0.04 ± 0.05	0.05 ± 0.07	0.00
	顺式-1,2-二氯乙烯	1.70	—	0.01 ± 0.01	0.36 ± 0.51	0.00
	顺式-1,3-二氯丙烯	5.03	—	0.08 ± 0.10	0.00	0.00
	反式-1,3-二氯丙烯	3.7	—	0.01 ± 0.01	0.17 ± 0.24	0.00
	三氯乙烯	0.64	—	0.00	0.12 ± 0.17	0.00
	四氯乙烯	0.031	—	0.00	0.91 ± 0.77	0.00
	六氯丁二烯	—	—	0.10 ± 0.13	0.21 ± 0.15	1.17 ± 1.65
	六甲基二硅氧烷	—	—	0.23 ± 0.15	0.00	0.00
	氯苯	0.32	—	0.13 ± 0.14	3.40 ± 4.81	0.00
	氯甲苯	—	—	0.00	0.03 ± 0.04	0.00
	1,2-二氯苯	0.178	—	0.18 ± 0.18	0.00	0.00
	1,3-二氯苯	—	—	0.19 ± 0.13	0.05 ± 0.07	0.00
	1,4-二氯苯	0.178	—	0.28 ± 0.12	0.01 ± 0.01	0.00
	1,2,4-三氯苯	—	—	0.06 ± 0.08	0.04 ± 0.05	0.00
	苯基氯	—	—	0.15 ± 0.13	0.00	0.00
OVOC	丙酮	0.36	—	36.97 ± 1.60	1.56 ± 0.67	1.75 ± 2.29
	2-丁酮	—	—	0.00	0.14 ± 0.10	0.19 ± 0.27
	3-戊酮	1.24	—	0.00	0.00	0.16 ± 0.17
	环戊酮	—	—	1.38 ± 0.82	0.00	0.09 ± 0.12
	2-己酮	—	—	0.00	0.85 ± 0.76	0.00
	2-庚酮	—	0.12	0.35 ± 0.11	0.00	0.00
	2-壬酮	—	—	0.10 ± 0.08	0.00	0.00
	乙酸乙酯	0.63	—	4.96 ± 1.48	0.85 ± 0.26	3.66 ± 3.40
	乙酸丁酯	0.83	—	1.24 ± 1.07	0.00	0.09 ± 0.12
	乙酸乙烯酯	3.2	—	0.00	0.08 ± 0.08	0.71 ± 1.01
	乳酸乙酯	—	—	0.35 ± 0.43	0.00	0.00
	甲基丙烯酸甲酯	—	—	0.00	0.66 ± 0.42	0.00
	丙二醇单甲醚乙酸酯	—	—	1.04 ± 0.79	0.00	0.01 ± 0.01
	异丙醇	0.54	—	0.00	0.00	0.00
	四氢呋喃	4.32	0.65	0.00	1.63 ± 2.09	0.00
	丙烯醛	7.45	—	0.00	0.75 ± 0.05	2.85 ± 4.04
	甲基叔丁基醚	0.62	—	0.00	0.36 ± 0.24	2.29 ± 3.25
	苯甲醛	—	—	0.12 ± 0.16	0.00	0.00
	苯甲醛	0.67	—	7.22 ± 2.48	0.00	0.00

1) “—”表示该项无数据

甲苯是 VOCs 排放量最大两个物种, 占总 VOCs 排放量分别为 42.51% 和 24.63%, 其他 VOCs 物种质量分数均低于 10%。从 VOCs 类别来看, 加油站 VOCs 排放的主要组分是烷烃和芳香烃, 质量分数分别为 46.39% 和 37.95%。加油站排放的 VOCs 组分分布相对集中。

将表 5 中测得 VOCs 源成分谱和表 1 中的 VOCs 源成分谱按照 VOCs 类别划分, 结果如图 1 所示。芳香烃是汽车制造、建筑涂装和机动车中最大的 VOCs 类别, 分别占总 VOCs 的 96.95%、67.25% 和

39.32%。此外, 芳香烃在汽修业中质量分数也高达 41.43%。烷烃在各污染源中也有较大比例分布, 是包装印刷、加油站和炼油石化的主要 VOCs 类别, 分别占总 VOCs 的 47.28%、46.39% 和 42.11%。烷烃在机动车 (29.72%) 和建筑涂装 (27.84%) 的 VOCs 排放中也有较大比例分布。OVOC 则是餐饮业和包装印刷排放 VOCs 的主要类别, 质量分数分别为 53.73% 和 47.28%。此外, 卤代烃在汽修业 (45.48%) 和炼油石化 (23.93%) VOCs 排放中也有较大比例分布。烯烃和炔烃的质量分数整体较低。

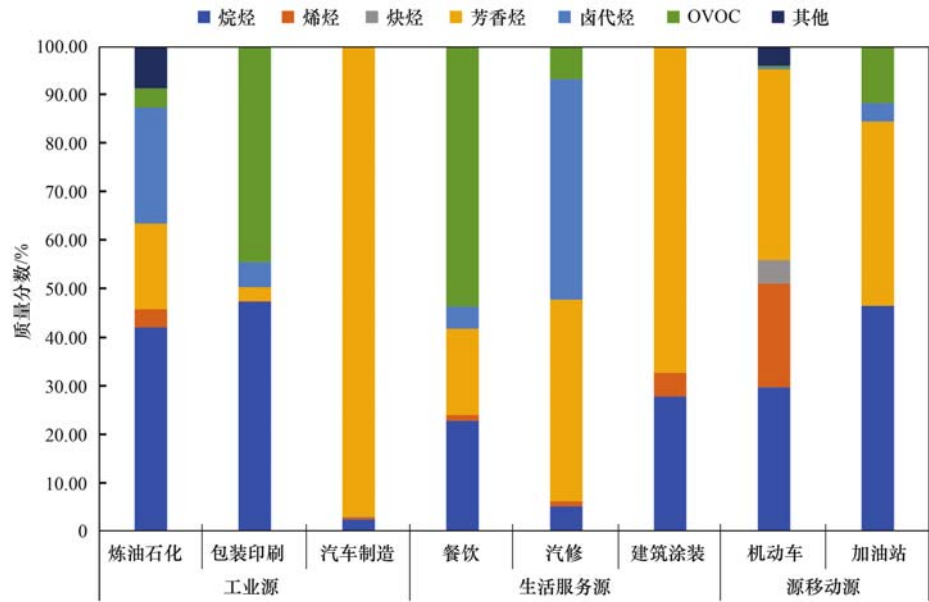


图 1 不同污染源 VOCs 组分分布
Fig. 1 VOCs component distribution in different pollution sources

2.2 VOCs 源反应活性分析

2.2.1 臭氧生成潜势分析

使用表 5 中测得 VOCs 源成分谱和表 1 中的 VOCs 源成分谱来计算北京市不同 VOCs 污染源臭氧生成潜势 (OFP), 结果如图 2 所示。可以看出汽车制造源排放的 VOCs 臭氧生成潜势最高, 高达 $6.50 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ 。此外, 机动车源和建筑涂装源的 OFP 也较高, 分别为 $4.47 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $4.46 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ 。这 3 类源 OFP 较高的原因主要是反应活性较高的芳香烃占总 VOCs 的质量分数较高, 尤其是汽车制造源芳香烃质量分数高达 96.95%。芳香烃对汽车制造源、机动车源和建筑涂装源 OFP 的贡献率分别高达 98.91%、42.98% 和 81.05%。此外, 烯烃的化学反应活性也较高, 如机动车源中质量分数 21.25% 的烯烃对 OFP 的贡献率高达 47.77%。因此, 芳香烃和烯烃质量分数较高的 VOCs 污染源 OFP 较高。包装印刷源的 OFP 最低, 仅有 $1.00 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$, 主要是因为反应活性较低的烷烃 (47.28%) 和 OVOC (44.56%) 质量分数较高。同样, 餐饮源的 OVOC 的

质量分数高达 53.73%, 但对 OFP 贡献率下降为 20.14%, 则其 OFP 也仅有 $1.11 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ 。因此, 减少同样的 VOCs 排放量, 减排汽车制造源、机动车源和建筑涂装源比减排包装印刷源和餐饮源更能减少臭氧的生成。

2.2.2 二次有机气溶胶生成潜势分析

使用表 5 中测得 VOCs 源成分谱和表 1 中的 VOCs 源成分谱来计算北京市不同 VOCs 污染源二次有机气溶胶生成潜势 (SOAFP), 结果如图 3 所示。可以看出汽车制造源排放的 VOCs 二次有机气溶胶生成潜势同样是最高的, 高达 $4.59 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ 。此外, 建筑涂装源、汽修源和加油站的 SOAFP 也较高, 分别为 3.26、2.10 和 $1.86 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ 。这同样是因为反应活性较高的芳香烃质量分数较高造成的, 尤其是汽车制造源芳香烃质量分数高达 96.95%。但是由于烯烃的二次气溶胶生成潜势很低, 因此机动车源中质量分数 21.25% 的烯烃对 SOAFP 的贡献率仅有 0.36%, 导致机动车的 SOAFP 相对较低, 为 $1.57 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ 。包装印刷源的 SOAFP 同样是最底的, 仅有

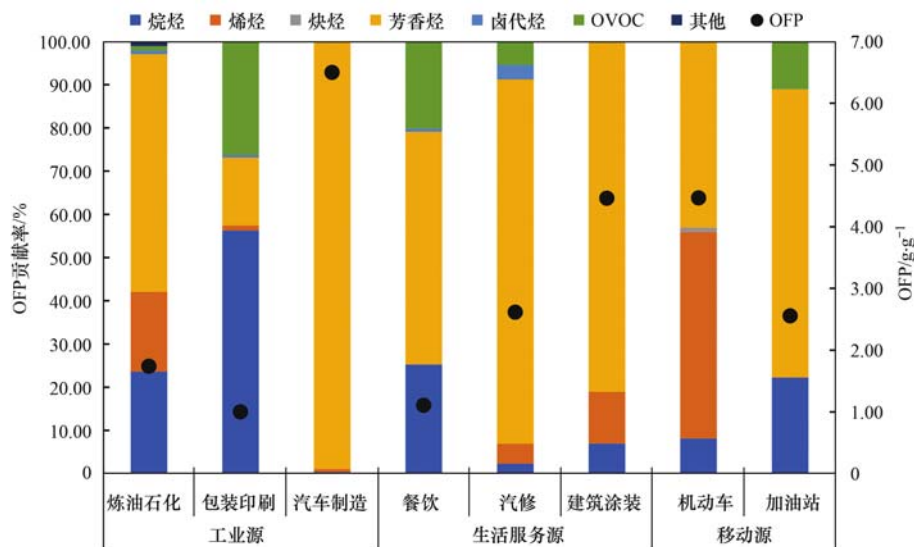


图2 北京市不同 VOCs 污染源的臭氧生成潜势比较

Fig. 2 Comparison of ozone generation potential of different VOCs pollution sources in Beijing

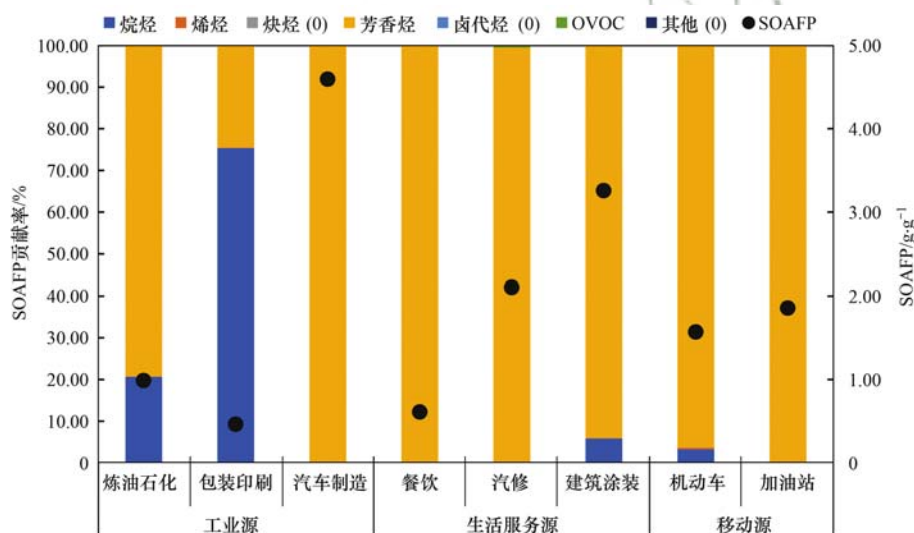


图3 北京市不同 VOCs 污染源的二次有机气溶胶生成潜势比较

Fig. 3 Comparison of secondary organic aerosol formation potential of different VOCs pollution sources in Beijing

$0.46 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$. 此外,餐饮源和炼油石化的 SOAFP 也较低,分别为 $0.61 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $0.99 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$. 主要是因为这 3 类源中含有较多的不产生二次有机气溶胶的小分子烷烃、卤代烃和 OVOC. 由此可以看出,芳香烃质量分数较高的 VOCs 污染源 SOAFP 较高,芳香烃在各类源中对 SOAFP 贡献率除包装印刷 (24.56%) 之外高达 79.32%~99.87%. 因此,减少芳香烃质量分数较高的汽车制造源、建筑涂装源、加油站和汽修源的 VOCs 排放量更能减少二次有机气溶胶的生成.

2.3 VOCs 污染源分级

2.3.1 北京市 VOCs 污染源排放量

根据北京市编制的 2017 年大气污染源排放清单^[21],北京市主要 VOCs 污染源的排放量如图 4 所示. 该清单将 VOCs 污染源划分为工业源 (18 371

$\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$)、生活服务源 ($81\,255 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$)、扬尘源 ($0 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$)、农业源 ($259 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$)、移动源 ($44\,792 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$) 和天然源 ($97\,729 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$) 这 6 大类,每个大类下又分为 26 个小类. 本研究的目标为人为源 VOCs 排放,而扬尘源和农业源的 VOCs 排放量整体较小,故重点选取了工业源 (炼油石化、包装印刷、汽车制造)、生活服务源 (餐饮、汽修、建筑涂装) 和移动源 (机动车、加油站),这 8 小类 VOCs 污染源的排放量占北京市 VOCs 人为源排放量的 52.54%.

根据 2017 年北京市 VOCs 污染源排放清单可知,生活服务源和移动源是北京市 VOCs 的主要来源. 从图 4 可知,北京市机动车的 VOCs 排放量最大 ($37\,800 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$),远高于其他污染源. 餐饮业和建筑涂装的 VOCs 排放量也较高,分别为 $11\,851 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $11\,618 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$. 其他污染源 VOCs 排放量相对较少,均

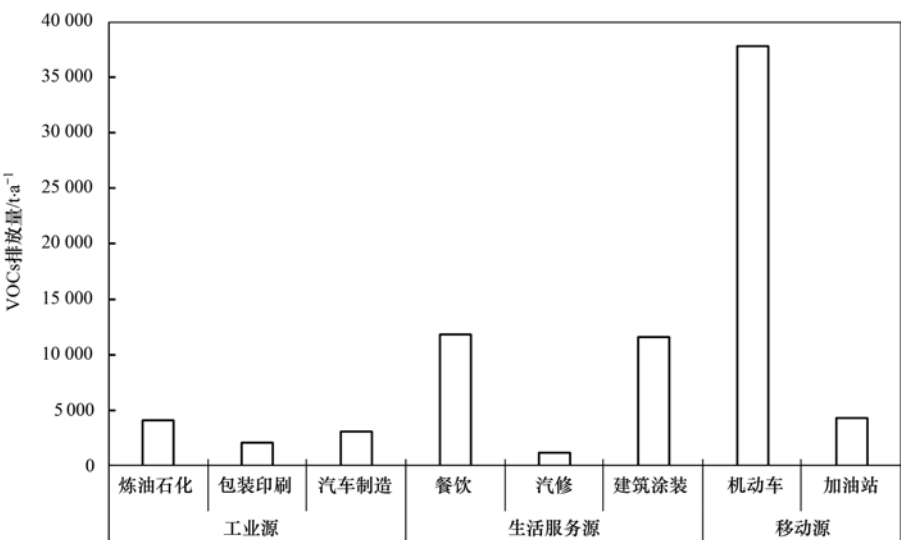


图4 北京市不同 VOCs 污染源的 VOCs 排放量

Fig. 4 VOCs emissions from different VOCs pollution sources in Beijing

小于 $5\,000\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$.

2.3.2 VOCs 污染源分级结果

图5是北京市各VOCs污染源分级结果.结果表明,北京市机动车的NPCI最高(1.00).I级VOCs污染源包括机动车(1.00)、汽车制造(0.93)和建筑涂装(0.75).除了加油站(0.32)和汽修业(0.30)为Ⅲ级VOCs污染源外,餐饮业(0.19)、炼油石化(0.15)和包装印刷(0)均为Ⅳ级VOCs污染源.可见,北京市应优先管控机动车、汽车制造和建筑涂装,以降低北京市环境空气中的臭氧和二次气溶胶浓度.该结果与Li^[9]的研究结果基本一致,其研究结果显示北京市应优先控制机动车和汽车制造,但是其建筑涂装为Ⅲ级VOCs污染源,主要因为其分级方法中未考虑VOCs对二次气溶胶的影响.

图5中还给出了NEA、NOFP和NSOAFP.可以

看出造成机动车NPCI最高的因素主要是其VOCs排放量最高(NEA为1.00)且其臭氧生成潜势也较大(NOFP为0.63).而汽车制造的NPCI主要贡献因素为VOCs的反应活性,其臭氧生成潜势(NOFP为1.00)和二次气溶胶生成潜势(NSOAFP为1.00)均是最高,而NEA仅为0.05.由此可见,综合考虑排放量及反应活性的VOCs控制政策比基于单一排放量的控制政策能更有效地削减臭氧和二次气溶胶的生成.

2.3.3 不确定性分析

本研究采用的VOCs污染源分级方法不确定性主要来自于VOCs排放清单和各VOCs源成分谱.VOCs排放清单越详细,VOCs源成分谱越精确,则VOCs污染源分级越准确.本文使用的2017年北京市VOCs排放清单中居民生活溶剂源VOCs排放量

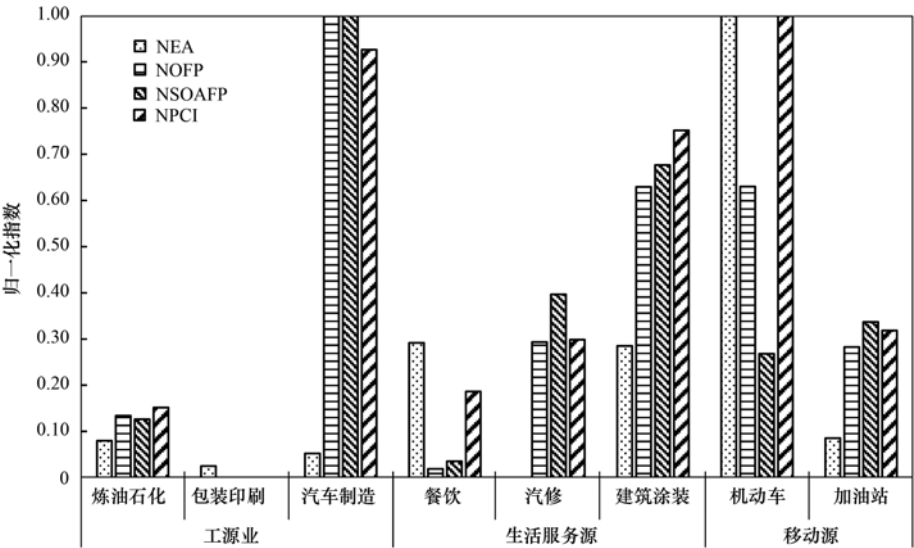


图5 北京市不同 VOCs 污染源的分级结果

Fig. 5 Classification results of different VOCs pollution sources in Beijing

占总 VOCs 排放量的 23.93%,但由于其没有给出具体使用溶剂的清单,因此无法确定其对应的 VOCs 源成分谱而暂未纳入本次分级.本文使用的 VOCs 源成分谱主要来自于已有研究和本研究的实地监测,但是同一类污染源的 VOCs 源成分谱往往有一定差异.例如本研究餐饮源中 OVOC 的质量分数最大(53.73%),而崔彤等^[39]的研究中烯烃的质量分数最大,约 8.75%~37.87%.本研究汽修源中卤代烃的质量分数最大(45.48%),OFP 为 $2.61 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$,而唐山市的研究中苯系物为质量分数最大的组分(94.8%)^[45],OFP 高达 $5.505 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$.由此可见,VOCs 源成分谱的差异会对 VOCs 污染源分级结果造成一定影响,但是 VOCs 源分类结果对区域 VOCs 优先减排控制仍具有指导意义.

3 结论

(1)对 3 类 VOCs 污染源的监测共获得 67 种 VOCs 物种,卤代烃种类最多达 31 种.获得了餐饮业、汽修业和加油站的 VOCs 源成分谱.餐饮业共检出 45 种 VOCs 组分,主要 VOCs 组分为丙酮(36.97%)和正己烷(21.88%),VOCs 主要类别为 OVOC(53.73%)、烷烃(22.81%)和芳香烃(17.73%).汽修业共检出 49 种 VOCs,主要 VOCs 组分为 1,2-二氯丙烷(17.30%)和乙苯(13.46%),VOCs 主要类别是卤代烃(45.48%)和芳香烃(41.43%).加油站共检出 27 种 VOCs 组分,主要 VOCs 组分为正己烷(42.51%)和甲苯(24.63%),VOCs 排放的主要类别是烷烃(46.39%)和芳香烃(37.95%).

(2)北京市各 VOCs 污染源的 OFP 为 $1.00 \sim 6.50 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$.汽车制造源 VOCs 的 OFP 最高,高达 $6.50 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$,其次为机动车源($4.47 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$)和建筑涂装源($4.46 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$).这 3 类源 OFP 较高的原因主要是反应活性较高的芳香烃和烯烃占总 VOCs 的质量分数较高,芳香烃对汽车制造源、机动车源和建筑涂装源 OFP 的贡献率分别高达 98.91%、42.98% 和 81.05%,机动车源中质量分数 21.25% 的烯烃对 OFP 的贡献率高达 47.77%.包装印刷源($1.00 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$)和餐饮源($1.11 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$)的 OFP 较低,主要是因为反应活性较低的烷烃和 OVOC 质量分数较高.

(3)北京市各 VOCs 污染源的 SOAFP 为 $0.46 \sim 4.59 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$.汽车制造源 VOCs 的 SOAFP 最高,高达 $4.59 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$,其次为建筑涂装源($3.26 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$)和加油站($1.86 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$).主要因为反应活性较高的芳香烃在上述 3 类源中占总 VOCs 的质量分数较高,芳香烃在各类源中对 SOAFP 贡献率除包装印刷

(24.56%)之外高达 79.32%~99.87%.由于烯烃的 SOAFP 很低,机动车源中质量分数 21.25% 的烯烃对 SOAFP 的贡献率仅 0.36%,导致机动车的 SOAFP ($1.57 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$)相对较低.包装印刷源、餐饮源和炼油石化的 SOAFP 较低,分别为 0.46、0.61 和 $0.99 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$.主要因为这 3 类源中含有较多的不产生二次有机气溶胶的小分子烷烃、卤代烃和 OVOC.

(4)北京市机动车的 NPCI 最高(1.00).I 级 VOCs 污染源包括机动车(1.00)、汽车制造(0.93)和建筑涂装(0.75).除了加油站(0.32)和汽修业(0.30)为 III 级 VOCs 污染源外,餐饮业(0.19)、炼油石化(0.15)和包装印刷(0)均为 IV 级 VOCs 污染源.北京市应优先管控机动车、汽车制造和建筑涂装,以降低北京市环境空气中的臭氧和二次气溶胶生成.

参考文献:

- [1] 张新民,赵文娟,孟凡.基于 OFP 的大气挥发性有机物污染源分级控制解析[J].环境保护,2017,45(13):22-25.
Zhang X M, Zhao W J, Meng F. Study on classification control of atmospheric volatile organic compounds emission pollution sources based on OFP[J]. Environmental Protection, 2017, 45(13): 22-25.
- [2] 刘镇,朱玉凡,郭文凯,等.兰州市化石燃料燃烧源排放 VOCs 的臭氧及二次有机气溶胶生成潜势[J].环境科学,2019,40(5):2069-2077.
Liu Z, Zhu Y F, Guo W K, et al. Formation potential of ozone and secondary organic aerosol of VOCs from fossil fuel combustion in Lanzhou City[J]. Environmental Science, 2019, 40(5): 2069-2077.
- [3] Thompson A M, Balashov N V, Witte J C, et al. Tropospheric ozone increases over the southern Africa region: bellwether for rapid growth in Southern Hemisphere pollution[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2014, 14(18): 9855-9869.
- [4] Shao M, Lu S H, Liu Y, et al. Volatile organic compounds measured in summer in Beijing and their role in ground-level ozone formation[J]. Journal of Geophysical, 2009, 114(D2), doi: 10.1029/2008jd010863.
- [5] Zhang Q, Yuan B, Shao M, et al. Variations of ground-level O_3 and its precursors in Beijing in summertime between 2005 and 2011[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2014, 14(12): 6089-6101.
- [6] Zheng J, Hu M, Peng J F, et al. Spatial distributions and chemical properties of $\text{PM}_{2.5}$ based on 21 field campaigns at 17 sites in China[J]. Chemosphere, 2016, 159: 480-487.
- [7] 韩丽,王幸锐,何敏,等.四川省典型人为污染源 VOCs 排放清单及其对大气环境的影响[J].环境科学,2013,34(12): 4535-4542.
Han L, Wang X R, He M, et al. Inventory and environmental impact of VOCs emission from the typical anthropogenic sources in Sichuan Province[J]. Environmental Science, 2013, 34(12): 4535-4542.
- [8] Derwent R G, Jenkin M E, Passant N R, et al. Reactivity-based strategies for photochemical ozone control in Europe[J]. Environmental Science & Policy, 2007, 10(5): 445-453.
- [9] Li G H, Wei W, Shao X, et al. A comprehensive classification method for VOC emission sources to tackle air pollution based on

- VOC species reactivity and emission amounts [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2018, **67**: 78-88.
- [10] Zhang Z J, Yan X Y, Gao F L, *et al.* Emission and health risk assessment of volatile organic compounds in various processes of a petroleum refinery in the Pearl River Delta, China [J]. *Environmental Pollution*, 2018, **238**: 452-461.
- [11] Zhang Y C, Li R, Fu H B, *et al.* Observation and analysis of atmospheric volatile organic compounds in a typical petrochemical area in Yangtze River Delta, China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2018, **71**: 233-248.
- [12] Wei W, Cheng S Y, Li G H, *et al.* Characteristics of volatile organic compounds (VOCs) emitted from a petroleum refinery in Beijing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **89**: 358-366.
- [13] Wang M L, Li S Y, Zhu R C, *et al.* On-road tailpipe emission characteristics and ozone formation potentials of VOCs from gasoline, diesel and liquefied petroleum gas fueled vehicles [J]. *Atmospheric Environment*, 2020, **223**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.117294.
- [14] 张瑞旭. 关中地区机动车排放臭氧前体物特征及其臭氧和二次有机气溶胶生成潜势[D]. 西安: 长安大学, 2020.
- [15] Dai P P, Ge Y S, Lin Y M, *et al.* Investigation on characteristics of exhaust and evaporative emissions from passenger cars fueled with gasoline/methanol blends [J]. *Fuel*, 2013, **113**: 10-16.
- [16] 王银海, 董莉, 刘景洋, 等. 典型溶剂使用行业 O_3 和 SOA 生成潜势分析 [J]. *现代化工*, 2020, **40**(11): 14-19.
- Wang Y H, Dong L, Liu J Y, *et al.* Analysis and research on generation potential of ozone and SOA in typical solvent use industries [J]. *Modern Chemical Industry*, 2020, **40**(11): 14-19.
- [17] 赵吉睿, 姚馨蕾, 孙猛, 等. 天津市典型溶剂使用行业挥发性有机物排放特征 [J]. *环境污染与防治*, 2021, **43**(5): 539-545.
- Zhao J R, Yao X L, Sun M, *et al.* Emission characteristics of volatile organic compounds from typical solvent use industries in Tianjin [J]. *Environmental Pollution and Control*, 2021, **43**(5): 539-545.
- [18] 莫梓伟, 陆思华, 李悦, 等. 北京市典型溶剂使用企业 VOCs 排放成分特征 [J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(2): 374-380.
- Mo Z W, Lu S H, Li Y, *et al.* Emission characteristics of volatile organic compounds (VOCs) from typical solvent use factories in Beijing [J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(2): 374-380.
- [19] 吴健, 高松, 陈曦, 等. 涂料制造行业挥发性有机物排放成分谱及影响 [J]. *环境科学*, 2020, **41**(4): 1582-1588.
- Wu J, Gao S, Chen X, *et al.* Source profiles and impact of volatile organic compounds in the coating manufacturing industry [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(4): 1582-1588.
- [20] 顾鑫生, 刘杰, 修光利. 涂料行业重点挥发性有机物的筛选与建议 [J]. *涂料工业*, 2019, **49**(1): 40-47.
- Gu X S, Liu J, Xiu G L. Identification and suggestion of priority volatile organic compounds in coatings industry [J]. *Paint & Coatings Industry*, 2019, **49**(1): 40-47.
- [21] 周扬胜, 肖灵, 闫静, 等. 基于大气污染源排放清单的北京市污染物减排分析 [J]. *环境与可持续发展*, 2019, **44**(2): 70-78.
- [22] 张欣. 天津石化行业挥发性有机物源排放成分谱研究 [D]. 天津: 天津工业大学, 2016.
- [23] 方莉, 刘文艺, 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.
- [24] 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.
- [25] Wang J, Jin L M, Gao J H, *et al.* Investigation of speciated VOC in gasoline vehicular exhaust under ECE and EUDC test cycles [J]. *Science of the Total Environment*, 2013, **445-446**: 110-116.
- [26] HJ 732-2014, 固定污染源废气 挥发性有机物的采样 气袋法 [S].
- [27] HJ 759-2015, 环境空气 挥发性有机物的测定 罐采样/气相色谱-质谱法 [S].
- [28] 张铁舜, 王佳, 韩士杰, 等. 郑州市碳素行业无组织 VOCs 排放特征分析及健康风险评估 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(11): 4847-4855.
- Zhang Y S, Wang J, Han S J, *et al.* Emission characteristics analysis and health risk assessment of unorganized VOCs in the carbon industry, Zhengzhou [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(11): 4847-4855.
- [29] 齐一谨, 倪经纬, 赵东旭, 等. 郑州市典型工业企业 VOCs 排放特征及风险评估 [J]. *环境科学*, 2020, **41**(7): 3056-3065.
- Qi Y J, Ni J W, Zhao D X, *et al.* Emission characteristics and risk assessment of volatile organic compounds from typical factories in Zhengzhou [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(7): 3056-3065.
- [30] Carter W P L. Development of the SAPRC-07 chemical mechanism [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, **44**(40): 5324-5335.
- [31] Carter W P L. Updated maximum incremental reactivity scale and hydrocarbon bin reactivities for regulatory applications [EB/OL]. <http://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/barcu/regact/2009/mir2009/mir10.pdf>, 2010-01-28.
- [32] 刘子楠, 郭斌, 任爱玲. 不同源挥发性有机物生成二次有机气溶胶的研究进展 [J]. *现代化工*, 2019, **39**(8): 54-58.
- Liu Z N, Guo B, Ren A L. Progress in formation of secondary organic aerosol by VOCs from different sources [J]. *Modern Chemical Industry*, 2019, **39**(8): 54-58.
- [33] 陈小方, 张嘉妮, 张伟霞, 等. 化工园区挥发性有机物排放清单及其环境影响 [J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(11): 4062-4071.
- Chen X F, Zhang J N, Zhang W X, *et al.* VOCs emission inventory of a chemical industry park and its influence on atmospheric environment [J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(11): 4062-4071.
- [34] Grosjean D, Seinfeld J H. Parameterization of the formation potential of secondary organic aerosols [J]. *Atmospheric Environment* (1967), 1989, **23**(8): 1733-1747.
- [35] Grosjean D. *In situ* organic aerosol formation during a smog episode: estimated production and chemical functionality [J]. *Atmospheric Environment. Part A. General Topics*, 1992, **26**(6): 953-963.
- [36] 张嘉妮, 曾春玲, 刘锐源, 等. 家具企业挥发性有机物排放特征及其环境影响 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(12): 5240-5249.
- Zhang J N, Zeng C L, Liu R Y, *et al.* Volatile organic compound emission characteristics of furniture manufacturing enterprises and the influence on the atmospheric environment [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(12): 5240-5249.

- [37] 大气污染源优先控制分级技术指南(试行)[EB/OL]. <http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201408/W020140828351293834462.pdf>, 2021-08-19.
- [38] Klein F, Platt S M, Farren N J, *et al.* Characterization of gas-phase organics using proton transfer reaction time-of-flight mass spectrometry: cooking emissions[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **50**(3): 1243-1250.
- [39] 崔彤, 程婧晨, 何万清, 等. 北京市典型餐饮企业 VOCs 排放特征研究[J]. *环境科学*, 2015, **36**(5): 1523-1529.
Cui T, Cheng J C, He W Q, *et al.* Emission characteristics of VOCs from typical restaurants in Beijing[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(5): 1523-1529.
- [40] 蒋宝, 孙成一, 白画画, 等. 油烟净化器对餐饮 VOCs 排放和光化学特征的影响[J]. *中国环境科学*, 2021, **41**(5): 2040-2047.
Jiang B, Sun C Y, Bai H H, *et al.* Influence of fume purifier on VOCs emission characteristics and photochemical reaction of catering[J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(5): 2040-2047.
- [41] 陈鹏, 张月, 张梁, 等. 汽车维修行业挥发性有机物排放特征及大气化学反应活性[J]. *环境科学*, 2021, **42**(8): 3604-3614.
Chen P, Zhang Y, Zhang L, *et al.* Emission characteristics and atmospheric chemical reactivity of volatile organic compounds (VOCs) in automobile repair industry[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(8): 3604-3614.
- [42] 方莉, 刘继业, 聂磊, 等. 北京市典型汽修企业 VOCs 排放特征与臭氧影响分析[J]. *环境工程*, 2020, **38**(10): 146-150, 155.
Fang L, Liu J Y, Nie L, *et al.* VOCs emission characteristics and ozone impact analysis of typical automobile repair enterprises in Beijing[J]. *Environmental Engineering*, 2020, **38**(10): 146-150, 155.
- [43] 王继钦, 陈军辉, 韩丽, 等. 四川省加油站挥发性有机物排放及控制现状[J]. *环境污染与防治*, 2020, **42**(6): 672-677.
Wang J Q, Chen J H, Han L, *et al.* Emission and control of volatile organic compounds in service stations in Sichuan[J]. *Environmental Pollution and Control*, 2020, **42**(6): 672-677.
- [44] 王思宇, 黄玉虎, 胡玮, 等. 加油站油气处理装置作用及 VOCs 排放现状[J]. *环境科学研究*, 2021, **34**(2): 279-285.
Wang S Y, Huang Y H, Hu W, *et al.* Functions and emission status of VOCs from vapor processing devices in gasoline filling stations[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021, **34**(2): 279-285.
- [45] 田亮, 魏巍, 程水源, 等. 典型有机溶剂使用行业 VOCs 成分谱及臭氧生成潜势[J]. *安全与环境学报*, 2017, **17**(1): 314-320.
Tian L, Wei W, Cheng S Y, *et al.* Source profiles and ozone formation potential of volatile organic compounds from the use of solvents in typical industry[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2017, **17**(1): 314-320.

CONTENTS

Chemical Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} in Urban Area of Beijing	AN Xin-xin, CAO Yang, WANG Qin, <i>et al.</i> (2251)
Modeling of PM _{2.5} Concentrations in the Beijing-Tianjin-Hebei Region Using a Space-time Linear Mixed Effects Model	FAN Li-hang, YANG Xiao-hui, SONG Chun-jie, <i>et al.</i> (2262)
Spatio-temporal Evolution Patterns of PM _{2.5} and Relationship with Urban Expansion in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration from 2000 to 2018	ZHAO An-zhou, XIANG Kai-zheng, LIU Xian-feng, <i>et al.</i> (2274)
Characteristics and Source Analysis of PM _{2.5} in Qingdao in Winter Under the Action of Sea-Land-Atmosphere Convergence	TUO Xiong, YANG Ling-xiao, ZHANG Wan, <i>et al.</i> (2284)
Impacts of Heterogeneous Uptake Pathway on Sulfate Formation: A Case Study in Shanghai Based on WRF-Chem	ZHANG Ru-han, ZHANG Hao-ran, FENG Wei-hang, <i>et al.</i> (2294)
Source Apportionment and Seasonal Changes in PM _{2.5} Chemical Components from Different Functional Areas of a Provincial Capital City	SUN You-min, FAN Jing, XU Biao, <i>et al.</i> (2304)
Chemical Compositions, Light Extinction Effect, and Oxidative Potential of PM _{2.5} Under Different Pollution Levels During Winter in Taiyuan	REN Jiao, ZHAO Rong-rong, WANG Ming, <i>et al.</i> (2317)
Source Apportionment and Health Risk Assessment of Metal Elements in Ambient PM _{2.5} in the Winter of Zhengzhou	YAO Sen, WANG Qian-heng, XUE Yan, <i>et al.</i> (2329)
Characteristics, Ecological Risk Assessment, and Sources of the Polluted Metallic Elements in PM _{2.5} During Winter in Zibo City	BAI Wen-yu, XU Bo, GUO Li-yao, <i>et al.</i> (2336)
Seasonal Distribution Characteristics, Source Analysis, and Health Risk Evaluation of PAHs in PM _{2.5} in Chengde	HE Bo-wen, NIE Sai-sai, LI Yi-lin, <i>et al.</i> (2343)
Pollution Level and Regional Migration of PCDD/Fs in Ambient Air from Pearl River Delta, China	FU Jian-ping, XIE Dan-ping, HUANG Jin-qiong, <i>et al.</i> (2355)
Concentrations and Sources of Black Carbon Aerosols in Rural Areas of Southern North China Plain	ZHANG Ling, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i> (2363)
Research on Causes of Severely Polluted Weather in Tianjin Based on Process Analytical Technology	HAO Jian, CAI Zi-ying, HAN Su-qin, <i>et al.</i> (2373)
Classification Control of Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission Pollution Sources Based on Emission Amounts and Atmospheric Reactivity	CHEN Peng, ZHANG Yue, XING Min, <i>et al.</i> (2383)
Complex Networks Reveal the Characteristics of Ozone in China	YING Na, CHEN Jian-hua, LI Dong, <i>et al.</i> (2395)
Ozone Simulation of Lanzhou City Based on Multi-scenario Emission Forecast of Ozone Precursors in the Summer of 2030	CHEN Tian-lei, WU Min, PAN Cheng-ke, <i>et al.</i> (2403)
Improvement of Environmental Model Prediction Based on Inversion and Aerosol Assimilation	CAI Zi-ying, TANG Miao, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i> (2415)
Method of Identifying Air Pollution from Iron and Steel Industry Based on Ambient Air Quality Monitoring Data Analysis	SHI Yao-peng, HU Jing-nan, CHU Yang-xi, <i>et al.</i> (2427)
Assessment of "Differentiated Response Requirement Based on Performance Grading" Policy During Heavy Air Pollution Alert	ZENG Jing-hai, WANG Can (2436)
Risk Zoning of Water Pollution in the Yellow River Basin	ZHOU Xia-fei, CAO Guo-zhi, YU Fang, <i>et al.</i> (2448)
Emission Characteristics of Industrial Water Pollutants in Gansu Section of the Yellow River Basin	LI Xue-ying, YANG Xi, QIAO Qi, <i>et al.</i> (2459)
Spatial-temporal Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in Sediments of the Yellow River	WANG Tao-yi, PAN Bao-zhu, HAN Xu, <i>et al.</i> (2467)
APCS-MLR Combined with PMF Model to Analyze the Source of Metals in Sediment of Xinglin Bay Suburban Watershed, Xiamen	SHEN Chen-yu, YAN Yu, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (2476)
Spatial Differentiation Characteristics and Response Relationship of DOM, Nutrients, and Heavy Metals in River Sediments	XIAO Yan-chun, YU Hui-bin, SONG Yong-hui (2489)
Distribution Characteristics, Evaluation, and Source Analysis of Heavy Metals in Soils of Fenhe Riparian Zone in Taiyuan City	HU Jie, ZHAO Xin-yu, WANG Ting-ting, <i>et al.</i> (2500)
Binding Affinity Between Heavy Metal Hg and Dissolved Organic Matter in Hongze Lake	HU Bin, WANG Pei-fang, ZHANG Nan-nan, <i>et al.</i> (2510)
Ecosystem Evolutionary Trajectory of Lake Xiliang over the Past Century Driven by Eutrophication	ZHENG Jia-nan, XU Min, ZHENG Wen-xiu, <i>et al.</i> (2518)
Sediment Release and Pollution Source Analysis of Typical Reservoirs in the Upper Reaches of the Yellow River Based on DGT Technology	MA Yu-shen, ZHU Xiang, PANG Qing-qing, <i>et al.</i> (2527)
Differential Characteristics and Source Identification of Water Quality of the Rivers in Northern Henan Before and After Rainstorm	ZHANG Yan, ZOU Lei, LIANG Zhi-jie, <i>et al.</i> (2537)
Adsorption and Interception Effects of <i>Eichhornia crassipes</i> on Microplastics in Water of the Poyang Lake Basin	LI Wen-gang, WU Xi-en, JIAN Min-fei, <i>et al.</i> (2548)
Spatiotemporal Distribution and Ecological Risk Assessment of Plastic Additives in Taihu Lake	LIU Shu-jiao, DING Jian-nan, SHI Jun-zhe, <i>et al.</i> (2557)
Distribution Characteristics, Sources, and Storage of Microplastics in Surface Sediments of Luoma Lake	YAO Ming-xuan, BAI Xue, XU Zhen-jia, <i>et al.</i> (2566)
Pollution Characteristics of Phosphorus in Different Media in Taihu Lake and Its Treatment Enlightenment	CAI Mei, LU Zhi-hua, WANG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (2575)
Analysis on Diversity and Structure of Microbial Community in River Sediment of Siping Section of Liaohe River	LI Peng-yang, AN Qi-rui, WANG Xin-hao, <i>et al.</i> (2586)
Non-point Source Pollution (NPSP) Induces Structural and Functional Variation in Bacterial Communities in Sediments of Jialing River	XUE Yu-qin, XU Fei, LIU Kun-he, <i>et al.</i> (2595)
Effects of Microplastics on Bacterial Community Composition and Diversity in Sediments	LI Wen-lu, WANG Zhi-chao, YANG Wen-huan, <i>et al.</i> (2606)
Vertical Distribution Characteristics and Community Construction of Aerobic Denitrification Bacteria from the Sediments of Baiyangdian Lake During the Winter Freezing Period	ZHANG Tian-na, CHEN Zhao-ying, ZHANG Zi-wei, <i>et al.</i> (2614)
Effect of Induced Mixing on Bacterial Community Structure and Metabolic Activity in Reservoir	GAO Yue, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2624)
Distribution Characteristics of Microplastics in <i>Bellamyia aeruginosa</i> in Typical Area of Poyang Lake	JIANG Wei-qun, HU Qi-wu, JIAN Min-fei, <i>et al.</i> (2633)
Electrocatalytic Oxidation of Bisphenol A by Porous Ti/SnO ₂ -Sb-Ni Electrode Loaded with Multi-wall Carbon Nanotubes	FU Yuan-hang, LIU An-di, HUANG Wei-bin, <i>et al.</i> (2640)
Efficiency and Mechanism of Degradation of Methylene Blue with H ₂ O ₂ Catalyzed by Magnetic Mn _{0.4} Zn _{0.4} Fe ₂ O ₄ @SiO ₂	XU Dong-ying, YU Jing, HAO Qi, <i>et al.</i> (2650)
Effect of Two Types of Nanoparticles on the Adsorption of Ciprofloxacin on Zeolite	JIANG Lan-cui, MENG Zhao-fu, LIU Xian, <i>et al.</i> (2662)
Adsorption Mechanisms and Effect Factors of As(V) by AMD Sludge Composite Material	ZHANG Ya-hui, ZHANG Rui-xue, WU Pan, <i>et al.</i> (2673)
Shifts in Microbial Community and Variation in Functional Genes for Nitrification and Denitrification in Activated Sludge Affected by Triclosan and Its Transformed Intermediates	LU Ying-yuan, DONG Xiao-qi, PENG Xing-xing, <i>et al.</i> (2685)
Construction of Sustainability Evaluation Index System for Contaminated Site Risk Management and Analysis on Key Influential Factors	LI Xiao-nuo, YI Shi-yi, CHEN Wei-ping (2699)
Construction and Empirical Analysis of a Comprehensive Evaluation Method of Coastal Wetland Soil Quality Based on Ecological Functions	ZHANG Xue, KONG Fan-long, JIANG Zhi-xiang (2709)
Source Analysis and Pollution Assessment of Heavy Metals in Farmland Soil Around Tongshan Mining Area	CHEN Hang, WANG Ying, WANG Shu (2719)
Effects of Typical Iron and Manganese Minerals on Arsenic Speciation and Enzyme Activities in Paddy Soil	ZHOU Yi-min, HUANG Ya-yuan, LIU Kai, <i>et al.</i> (2732)
Phytoremediation Efficiency of Two Cultivars of <i>Brassica napus</i> L. Under Water-soluble Chitosan Treatment in Typical Pb-contaminated Farmland Soils	MENG Xiao-fei, ZHENG Guo-di, CHEN Tong-bin, <i>et al.</i> (2741)
Risk Prediction of Cadmium and Lead in Wheat Grains Based on Bayes Theorem	WANG Tian-qi, LI Yan-ling, YANG Yang, <i>et al.</i> (2751)
Interannual Variation Characteristics of Nitrogen Loss Under Rapeseed/Maize Rotation in Purple Soil Sloping Field	XU Man, GAO Ming, YU Luo, <i>et al.</i> (2758)
Physicochemical Properties of Biochars Prepared from Different Feedstocks and Evaluation of Its Potential as A Slow-release Carriers for Biochar-based Fertilizers	XING Li-bin, CHENG Jie, GENG Zeng-chao, <i>et al.</i> (2770)
Effects of Combined Application of Wood Vinegar-Acidified Biochar and Nitrogen on Active Nitrogen and Ammonia Volatilization in Saline Soil	SHEN Shu-wei, ZHANG Dan-dan, WANG Min-ge, <i>et al.</i> (2779)
Effects of Biodegradable Plastic Film Mulching on Greenhouse Gas Emissions Under Wheat-Maize Rotation System in the Guanzhong Plain	GUO Yi-ting, LUO Xiao-qi, WANG Rui, <i>et al.</i> (2788)
Forest Soil Microbial Community Structure Characteristics and Its Influencing Factors at Different Elevations on the Southern Slope of Daiyun Mountain	HE Zhong-sheng, WANG Zi-wei, ZHU Jing, <i>et al.</i> (2802)
Effects of Simulated Warming and Increased Precipitation on Soil Extracellular Enzyme Activity and Enzymatic Stoichiometry of Abandoned Grassland	WANG Xing, ZHONG Ze-kun, JIAN Jun-nan, <i>et al.</i> (2812)
Contribution of Urbanization to Local Warming in Major Cities of China	LI Yu, ZHOU De-cheng, YAN Zhang-mei, <i>et al.</i> (2822)