

目次

基于机器学习方法研究气象及排放变化对长三角地区主要城市大气污染物的影响	付文星, 黄琳, 丁嘉豪, 秦墨梅, 于兴娜, 谢放尖, 胡建林 (5879)
不同行业减排对我国东部地区空气质量及大气温度的影响	龙籽谕, 朱佳, 李柯, 陈磊, 杜楠, 廖宏 (5889)
冬奥会期间京津冀及周边区域空气质量时空特征、气象影响和减排效果评估	侯露, 朱媛媛, 刘冰, 李健军 (5899)
中国印刷业 VOCs 排放趋势及未来减排潜力	梁小明, 吴彭珍, 陈来国, 刘明, 卢清, 朱李华, 孙西勃, 叶代启 (5915)
济南市典型行业 VOCs 排放特征及减排潜力分析	吴文璐, 单春艳, 赵菁林, 崔羽浓 (5924)
南京市溧水区大气挥发性有机物污染特征及来源解析	阮兆元, 燕鸥, 王体健, 王勤耕, 罗干, 文金科 (5933)
我国近 10 年城市生活垃圾处置单元温室气体排放时空变化及减排潜能分析	张昕雪, 高淑丹, 滕晓, 蒋旭彤, 陈纪宏, 高晨琦, 卞荣星, 孙英杰, 李卫华, 王亚楠, 王华伟 (5946)
中国重点城市大气污染与健康风险的时空分布特征	涂佩玥, 杨欢, 陈兰洲, 牛笑笑, 杨璐, 易嘉慧, 柯碧钦, 田雅, 叶志祥, 梅新, 洪松, 何超 (5954)
中国 PM ₁ 浓度时空特征及其与 AOD 的相关性分析(2014~2017 年)	袁丽梅, 马芳芳, 卞泽, 秦凯 (5964)
长株潭城市群 PM _{2.5} 中二次无机离子特征及生成机制	马杰利, 罗达通, 刘欣, 王蕾, 李幸, 刘湛, 沈健, 张俊丰, 李晟 (5975)
周口市 2022 年冬季重污染过程中细颗粒物污染特征及成因分析	马英歌, 杨露, 狄睿苗, 马南, 乔利平, 吴宇航, 周文鑫, 赵新华, 张越, 孙志华, 陈长虹, 陈学军, 楼晟荣, 黄成 (5986)
兰州市 PM _{2.5} 中多环芳烃的污染特征和来源解析	马可婧, 孙丽娟 (5997)
北京市门头沟区大气降尘污染特征及其化学组分特征与质量重构	王志焱, 姚琦, 吕富, 王雨薇, 王珊, 王铮, 胡月琪 (6007)
典型热带海滨城市臭氧污染特征与成因分析	韩淑艳, 张鑫, 谢荣富, 霍思思, 高利澳, 吴泓锦, 党娟, 徐文帅, 邢巧, 张庆竹, 王文兴 (6015)
珠江源块泽河流域地表水水化学特征及控制因素	陶兰初, 寸得欣, 涂春霖, 马一奇, 刘振南, 尹林虎, 和成忠, 庞龙, 张七道 (6025)
淮南煤矿区地表水和地下水水化学特征及控制因素	刘海, 康博, 管政亭, 宋阳, 柴义伦 (6038)
巴伊盆地平原区地下水水化学特征及污染源识别	姜凤, 周金龙, 周殷竹, 孙英, 韩双宝, 鲁涵 (6050)
滇池周边浅层地下水硝酸盐来源及转化过程识别	陈清飞, 陈安强, 崔荣阳, 叶远行, 闵金恒, 付斌, 闫辉, 张丹 (6062)
典型铅锌矿流域土壤重金属累积与分布的影响因素分析	潘泳兴, 陈盟, 王樯樯 (6071)
铅锌矿周边岩溶流域重金属污染及健康风险评价	廖红为, 蒋忠诚, 周宏, 覃小群, 黄奇波, 吴华英 (6085)
开封市主要河道沉积物重金属时空分布特征及生态风险评价	丁亚鹏, 卢希昊, 王晓婧, 武鲲鹏, 张浩杰, 李欢, 付贤志, 王洪涛 (6095)
霍邱县城湖泊沉积物重金属环境容量评价与预测	刘海, 魏伟, 宋阳, 潘杨 (6106)
基于宏条形码技术的白洋淀水华藻类识别及其驱动因子分析	陈婷, 杜珣, 陈义永, 郭道宇, 熊薇 (6116)
基于种群、功能群对比分析洞庭湖浮游植物群落驱动因素及水质评价	严广寒, 殷雪妍, 汪星, 黄民生, 黄代中, 王思瑞, 张韵宇 (6125)
南水北调东线山东境内调蓄湖库蓝藻种群分布特征及环境驱动因子	韦洁琳, 崔玉静, 李亦真, 张莎莎, 徐杭州, 庞一鸣, 裴海燕 (6137)
广东省药物活性化合物的污染特征及生态风险评价	罗嘉豪, 王煜凯, 原珂, 卢耀斌, 罗丽娟, 栾天罡 (6149)
紫外老化微塑料衍生 DOM 理化特性及其与磺胺嘧啶、铜的络合机制	王筱, 晏彩霞, 聂明华, 莫茜婷, 丁明军, 徐鳌雪, 邓思维 (6159)
共混塑料在海水中的光降解及海洋环境风险	张洪瑜, 高嘉蔚, 陈思宝, 林千惠, 葛安琪, 赵莎莎, 郑浩, 李锋民 (6172)
铁改型蓝藻生物炭的制备及对地表水中磷的协同吸附机制	韩杰, 黄鑫, 杨昆仑, 宋超凡, 缪恒锋 (6181)
基于改进输出系数模型的非点源污染评估及关键源区识别: 以北运河上游流域为例	李华林, 张守红, 于佩丹, 宋卓远, 谢晨新, 张建军 (6194)
农村黑臭水体沉积物细菌群落结构特征	任宏伟, 田彦芳, 路金霞, 石雅君, 王进, 岳正波, 刘晓玲 (6205)
气候变化背景下人类活动对承德坝区植被净初级生产力的影响	单振东, 刘顿, 骆汉, 刘建伟, 张丽梅, 魏宇航 (6215)
氮沉降对陆地生态系统土壤有机碳含量影响的 Meta 分析	杨灵芳, 孔东彦, 刁静文, 郭鹏 (6226)
生物炭施用 5 a 后对桂北桉树人工林土壤有机氮组分和活性氮的影响	曹杨, 沈育伊, 陈运霜, 王紫卉, 牟芝熠, 徐广平, 张德楠, 孙英杰, 毛馨月 (6235)
稻田微氧层和还原层土壤有机碳矿化对氮素添加的响应	毛婉琼, 夏银行, 马冲, 朱光旭, 王忠诚, 涂强, 陈香碧, 吴金水, 苏以荣 (6248)
保护性耕作对玉米田土壤中除草剂残留的影响	刘沅, 汪祖丞, 刘美华, 张天宇, 王健 (6257)
土壤中微塑料对陆生植物的毒性及其降解机制研究进展	刘微, 李宇欣, 荣飒爽, 汪晚晴, 王鑫鑫, 郭嘉朋, 韩冰, 王树涛 (6267)
南水北调丹江口库区土壤中微塑料分布特征及风险评估	王峰, 公玮, 刘哲, 朱重宁, 张润琴, 李志国, 刘毅 (6279)
北京市城市公园土壤铅累积特征、来源及健康风险	安江梅朵, 张瑞卿, 郭广慧, 王云涛 (6287)
锌冶炼废渣重金属在地块土壤中的垂向迁移特征及归趋	杨爱萍, 王小燕, 肖细元, 王倩如, 胡建华, 郭朝晖, 彭驰 (6297)
典型硫铁矿农区土壤-作物系统重金属生态风险及迁移富集特征	成晓梦, 赵辰, 吴超, 孙彬彬, 曾道明, 贺灵 (6309)
不同土壤-小麦体系中铅镉交互作用与转运特征	寇萌, 樊宇, 苏梦贤, 熊娟, 汪明霞, 谭文峰 (6319)
开花后小麦地上部镉、砷分布及其转运特征	王秋实, 华桂丽, 李翔宇, 冯柳旭, 唯康鑫, 耿丽平, 薛培英, 刘文菊 (6328)
黑河上游不同植被类型土壤细菌群落多样性、功能及季节动态	王竹, 刘扬, 王芳, 王义成 (6339)
典型煤炭产业园区土壤重金属污染对细菌群落结构的影响	郑丹凤, 刘娣, 苏超, 张红 (6354)
增氧模式对水稻根际微生物多样性和群落结构的影响	肖德顺, 徐春梅, 王丹英, 陈松, 褚光, 刘元辉 (6362)
紫色土硝化势和氨氧化微生物群落对化肥和有机肥配施生物炭的响应	李越, 王子芳, 贾丽娟, 谢军, 熊子怡, 高明 (6377)
连作对参根际土壤理化性质、微生物活性及群落特征的影响	杨阳, 李海亮, 马凯丽, 虞凡枫, 牛世全 (6387)
粪肥施用对抗生素在土壤上吸附的影响	罗珊, 胡锦昇, 唐翔宇, 耿春文, 程建华 (6399)
基于脱钩指数的工业园区碳排放与经济发展关系	陈四瑜, 刘晶茹, 孙光明 (6412)
近 5 年我国部分城市人群生活垃圾特性	王小波, 刘安琪, 钟慧琼, 赵增立 (6421)
《环境科学》征订启事(5963) 《环境科学》征稿简则(6193) 信息(5923, 6024, 6037)	

南京市溧水区大气挥发性有机物污染特征及来源解析

阮兆元¹, 燕鸥¹, 王体健^{2*}, 王勤耕¹, 罗干², 文金科²

(1. 南京大学环境学院, 南京 210023; 2. 南京大学大气科学学院, 南京 210023)

摘要: 为了解南京市溧水区大气挥发性有机物(VOCs)的组分、来源及其对臭氧的贡献,2021年对区域内VOCs开展了为期1 a的走航监测,进行数据分析。结果表明,溧水区 ρ (TVOC)年均值为 $223.45 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,其中 ρ (烷烃)为 $49.45 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (占比22.13%), ρ [含氧(氮)VOCs]为 $50.63 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (占比22.66%), ρ (卤代烃)为 $64.73 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (占比28.95%), ρ (芳香烃)为 $35.46 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (占比15.87%), ρ (烯烃)为 $18.26 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (占比8.19%),其他为 $4.9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (占比2.2%)。夏季的 ρ (TVOC)平均值较高,为 $263.75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,冬季较低,为 $187.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,春季为 $246.11 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,秋季为 $204.77 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。日均TVOC浓度,在09:00~10:00和14:00~15:00出现峰值。2021年溧水区的TVOC臭氧生成潜势(OFP)为 $278.92 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,其中烯烃 $114.47 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (41.1%),芳香烃 $113.39 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (40.8%),二者贡献率总和超过80%,是臭氧重要的前体物质。特征物甲苯/苯(T/B)为4.13,反映出其受溶剂使用的影响较大。基于正定矩阵因子分解(PMF)模型的源解析结果表明,溧水区的VOCs主要来源于溶剂使用、有机合成及道路移动源。溧水区大气挥发性有机物污染对臭氧的影响较大,应加大对工业排放源、溶剂使用源及道路移动源的治理。

关键词: 南京市溧水区; 挥发性有机物(VOCs); 臭氧生成潜势(OFP); 源解析; 走航监测

中图分类号: X511 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2023)11-5933-13 **DOI:** 10.13227/j.hjxx.202211036

Pollution Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in Lishui Area of Nanjing

RUAN Zhao-yuan¹, YAN Ou¹, WANG Ti-jian^{2*}, WANG Qin-geng¹, LUO Gan², WEN Jin-ke²

(1. School of Environment, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 2. School of Atmosphere Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

Abstract: To understand the changes in the components of volatile organic compounds (VOCs), the contribution proportion of each component to ozone, and the VOCs sources, we monitored the VOCs for a year in Lishui. The results showed that the ρ (TVOC) was $223.46 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, ρ (alkanes) was $49.45 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (22.3%), ρ (OVOCs) was $50.63 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (22.66%), ρ (halogenated hydrocarbons) was $64.73 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (28.95%), ρ (aromatic hydrocarbons) was $35.46 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (15.87%), ρ (alkenes) was $18.26 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (8.19%), and ρ (others) was $4.9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (2.2%). ρ (TVOC) was higher in summer ($263.75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) and lower in winter ($187.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), with $246.11 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ in spring and $204.77 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ in autumn. The daily concentration of VOCs showed two peaks, one from 9:00 to 10:00 and another from 14:00 to 15:00, and the high concentration was mainly found in the urban main road area with dense human activities. The ozone formation potential (OFP) was $278.92 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, and those of olefin and aromatic hydrocarbon were $114.47 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (41.1%) and $113.49 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (40.8%), respectively, contributing over 80%, which was an important precursor of ozone. On the other hand, the ratio of characteristic compounds to toluene/benzene (T/B) was 4.13, which indicated that it was greatly affected by the solvent usage. In the end, the results of positive matrix factorization (PMF) source apportionment showed that VOCs mainly came from solvent usage, industrial production, and traffic emissions. The VOCs pollution had a great influence on ozone, so it was necessary to strengthen the treatment of industrial production, solvent usages, and traffic emissions.

Key words: Lishui of Nanjing; volatile organic compounds (VOCs); ozone formation potential (OFP); source apportionment; mobile monitoring

挥发性有机物(volatile organic compounds, VOCs)是指熔点低于室温而沸点在 $50 \sim 260^\circ\text{C}$ 之间,常温下较易挥发的有机化合物^[1]。VOCs根据其化学组成结构,分为烷烃、烯烃、芳香烃、卤代烃和含氧(氮)VOCs等,其中含氧VOCs包括醇类、醛类、酮类、醚类、酯类和酸类等^[2]。部分VOCs参与大气光化学反应,是臭氧(O_3)及二次有机气溶胶的重要前体物,与大气中 $\cdot\text{OH}$ 等光化学氧化剂发生反应,这类VOCs在对流层中寿命较短,一般为几小时至一天,大多集中在污染源附近,不参与长距离区域传输;另一部分VOCs光化学反应活性较弱,其寿命较长且对温室效应影响较大,需考虑区域传输带来的影响^[3]。美国环保署(EPA)制定的大气有毒污染物名单中有50余种VOCs^[4],由于VOCs中的许多物质具有致癌性、致畸性和致突变性,对环境

安全及人类的生存发展造成危害^[5]。因此,研究VOCs的组成及其来源能更好地进行大气污染防治,对保护人体健康具有重大意义。

国内外针对VOCs的源解析方法主要包括以污染源为研究对象的大气扩散模型和以环境受体为研究对象的受体模型,相比于大气扩散模型,受体模型不需要源强、气象条件和地形等信息及数据^[6]。常见的受体模型有化学质量平衡(chemical mass balance, CMB)^[7]、正定矩阵因子分解(positive matrix factorization, PMF)^[8]和主成分分析(principal component analysis, PCA)^[9]等。相比于其他受体模

收稿日期: 2022-11-03; 修订日期: 2023-01-06

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFA0607802)

作者简介: 阮兆元(1998~),男,硕士研究生,主要研究方向为大气VOCs模拟和来源解析, E-mail: m21250083@smail.nju.edu.cn

* 通信作者, E-mail: tjwang@nju.edu.cn

型,PMF 可以无需获取相应地区的 VOCs 源谱,通过误差估计,能更合理地处理数据中的缺失值和异常值,从而获得解析结果。

目前我国对于 VOCs 的研究主要集中在长三角^[10,11]、珠三角^[12~14]、京津冀^[15~17]、成渝^[18~20]和华中^[21]等经济较为发达和人口较为密集的地区。王红丽^[10]对上海 3 个典型地区开展了 O₃ 及其前体物挥发性有机物(VOCs)的观测,VOCs 浓度徐汇 > 青浦 > 南汇;浓度贡献最主要的物种为甲苯、C2 和 C3 的烷烃和烯烃、丙酮以及辛烷;而 C7 ~ C10 芳香烃、C3 和 C4 的烯烃、异戊二烯以及乙醛是上海大气臭氧生成潜势贡献最大的 VOCs 类物质。邹宇等^[13]在 2012 年对广州番禺大气成分观测站进行了 1 a 的连续监测,广州 φ (VOCs)月均值为 48.10×10^{-9} ,冬季 VOCs 体积分数高于夏季,烷烃、烯烃和芳香烃全年平均值所占比例分别为 58%、16% 和 26%。刘芮伶等^[20]2015 年在重庆主城区开展了为期 1 个月的 VOCs 观测,重庆 φ (TVOC)为 41.35×10^{-9} ,烷烃占比最大,其次是烯炔烃、芳香烃和含氧性挥发性有机物(OVOCs),芳香烃(32.1%)和烯炔(30.6%)对臭氧生成的贡献率最为显著,源解析发现重庆城区交通源贡献率最大(50.4%),其次是工业源和溶剂源的贡献率(>30%)。翟增秀等^[17]研究了天津中心城区挥发性有机物的污染特征,发现 φ (TVOC)季节变化特征为:春季(110.43×10^{-9}) > 秋季(93.73×10^{-9}) > 冬季(73.37×10^{-9}) > 夏季(60.43×10^{-9}),含氧有机物和烷烃是 VOCs 主要组成物质,两者质量分数之和 4 个季节均在 50% 以上。

南京市地处中国东部、长江下游,作为江苏省的省会城市,是长三角辐射带动中西部地区发展的国家重要门户城市,溧水区位于南京市中南部,处苏(江苏)皖(安徽)两省、宁(南京)镇(镇江)马(马鞍山)三市交界处。近年来溧水区受 O₃ 污染较为严重,而 VOCs 作为重要的前体物,对 O₃ 的生成起着至关重要的作用。本研究利用南京市溧水区为期 1 a 的走航监测数据,对 VOCs 浓度及其组分进行分析,利用最大反应增量(MIR)评估臭氧生成潜势,使用 PMF 模型对 VOCs 的来源进行解析,以期为溧水区大气污染防治提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 数据收集

针对溧水区的走航监测覆盖 2021 年全年(极端天气除外),每天监测时间为 09:00 ~ 11:30 和 14:00 ~ 16:30。监测范围覆盖整个溧水区,对 56 种 VOCs

进行监测,包括 11 种烷烃、5 种烯烃、6 种芳香烃、20 种含氧(氮)VOCs,13 种卤代烃和 1 种含硫化合物(CS₂)。图 1 为走航总路线,遍及了整个溧水行政区。

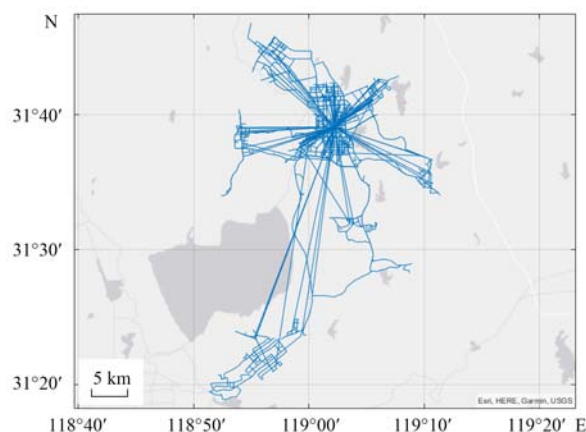


图 1 2021 年溧水区 VOCs 走航监测路线

Fig. 1 Route of VOCs monitoring in 2021 at Lishui

1.2 仪器与分析

采用搭载广州禾信在线挥发性有机物质谱仪(SPI-MS-2000)的走航车进行 VOCs 监测,通过质谱仪实时获取不同 VOCs 的浓度分布及变化规律。采样气体通过 PDMS 膜进样系统直接进入仪器反应室,进行杂质过滤及样品富集浓缩,利用真空紫外灯(10.6 eV)对 VOCs 进行软电离,产生各自特征的分子离子,各分子离子在相同路径的真空飞行时间质量分析器中飞行,质荷比小的先到达终点,质荷比大的后到达终点,根据到达终点飞行时间的先后,实现对不同物质的定性定量分析。具体指标参数见表 1^[22]。

表 1 车载 VOCs 监测质谱仪指标参数

Table 1 Vehicle-mounted VOCs monitoring mass spectrometer	
项目	指标参数
检测范围/u	1 ~ 650
检测限/ $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	≤ 3 (甲苯)
响应时间/s	< 2
质量精度/u	< 0.02
质量稳定性/u	< 0.05(甲苯)
相对标准偏差(RSD)	< 5%(甲苯)
最佳线性动态范围	4 个数量级

1.3 受体模型 PMF

PMF 即正定矩阵因子分解法,是由 Paatero 等^[23]提出的一种有效的数据分析方法。首先利用权重计算出污染物中各化学组分的误差,然后通过最小二乘法确定主要的污染源及其贡献率^[24]。PMF 是一种有效、新颖的污染物源解析方法,与其他相比,具有不需要测量源成分谱,分解矩阵中元素分担率为非负值,可以利用数据标准偏差来进行优化,并且

可处理遗漏数据和不精确数据等特点。

本研究使用由美国环境保护局开发的 PMF 5.0 版本进行 VOCs 的来源解析,其基本思路为:假设 X 为 $n \times m$ 矩阵, n 为样品数, m 为化学成分数目,将矩阵 X 分解为矩阵 G 和矩阵 F ; 其中 G 为 $n \times p$ 的污染物排放源贡献矩阵, F 为 $p \times m$ 的污染物源成分谱矩阵, p 为主要污染源的数目,其基本公式为:

$$X = G \times F + E \quad (1)$$

式中, E 为残差矩阵,表示 X 与 G 和 F 之间的差异, Q 为实际数据与解析结果之间的差值。为解析出 G 和 F , 正定矩阵因子分解模式解析过程即要求 Q 趋于最小^[25]:

$$5Q(E) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left(\frac{e_{ij}}{s_{ij}} \right) \quad (2)$$

式中, s_{ij} 为 X 的标准偏差; X_{ij} 、 G_{ij} 、 F_{ij} 和 E_{ij} 为 X 、 G 、 F 和 E 的矩阵元素,在 $G_{ij} \geq 0$, $F_{ij} \geq 0$ 的约束条件下,通过迭代最小化算法对 Q 求解。

PMF 需要输入物种浓度和物种浓度不确定度两个文件。在进行源解析前,需将原数据中低于检出限的物质浓度用 1/2 倍检出限替换,低于检出限浓度的物质不确定度(UNC)用 5/6 倍检出限替换,若浓度大于检出限,则不确定度的计算公式如下:

$$UNC = \sqrt{(c \times EF)^2 + (0.5 \times MDL_i)^2} \quad (3)$$

式中, c 为物种浓度; EF (error fraction) 为推估标准偏差的百分比; MDL_i 第 i 个组分的方法检出限^[26]。

将包含浓度与不确定度数据的文件输入 PMF 5.0 模型中,用信噪比(S/N)判断物种是否适合放入模型分析^[27]。若 S/N 小于 0.5, 设为“bad”, 代表该物种对解析结果有不良影响,应剔除;若 S/N 在 0.5 ~ 1.0 之间,将该物种设为“weak”, 此时模型预设将该物种的标准偏差(即不确定度)乘以 3;若 S/N 大于 1.0, 物种设为“strong”, 可直接放入模型进行分析。

PMF 运行后查看残差分析中的不确定性比例残差。需保证物种残差在 -3 ~ 3 之间,并呈正态分布,残差在 -3 ~ 3 之外的物种需对其 Obs/Pred 的散点图和时间序列图进行进一步的评估。通常而言较大的残差可能表明 PMF 不适合拟合该物种。

1.4 臭氧生成潜势 OFP

臭氧生成潜势(ozone formation potential, OFP)是评价 VOCs 对 O_3 生成影响的一个重要参数,本研究采用最大增量反应活性(MIR)因子来估算大气中 VOCs 的 OFP。将 VOCs 的浓度乘以相应的最大增量反应活性因子,计算公式如下:

$$OFP_i = MIR_i \times [VOCs]_i \quad (4)$$

式中, OFP_i 为第 i 种 VOCs 的臭氧生成潜势, $\mu g \cdot m^{-3}$; MIR_i 为第 i 种 VOCs 的最大增量反应活性,以 $O_3/VOCs$ 计, $g \cdot g^{-1}$, $VOCs_i$ 为大气中第 i 种 VOCs 的浓度, $\mu g \cdot m^{-3}$ 。为尽可能多地找到不同种类 VOCs 的 MIR 值,参见文献[28 ~ 31]确定 MIR 系数,当不同研究中同一物种的 MIR 系数出现不同,则采用最新研究中的 MIR 系数。

2 结果与讨论

2.1 VOCs 浓度及特征

本研究针对 56 种 VOCs 进行分析,其中包括 11 种烷烃、5 种烯烃、6 种芳香烃、20 种含氧(氮) VOCs、13 种卤代烃和一种含硫化合物(CS_2)。表 2 列出了走航期间 56 种挥发性有机物的浓度,检出 $\rho(TVOC)$ 的平均值为 $223.45 \mu g \cdot m^{-3}$, 其中 ρ (烷烃)为 $49.45 \mu g \cdot m^{-3}$, ρ (烯烃)为 $18.26 \mu g \cdot m^{-3}$, ρ (芳香烃)为 $35.46 \mu g \cdot m^{-3}$, ρ [含氧(氮) VOCs] 为 $50.63 \mu g \cdot m^{-3}$, ρ (卤代烃)为 $64.73 \mu g \cdot m^{-3}$, $\rho(CS_2)$ 为 $4.9 \mu g \cdot m^{-3}$ 。

VOCs 作为 O_3 重要的前体物质,很大程度上决定了 O_3 的生成,而夏季又是 O_3 浓度偏高的时段。根据 2021 年溧水区国控点永阳站的监测数据,2021 年出现多次 O_3 持续污染事件,其中溧水区 MDA8 O_3 超过国家二级标准 $160 \mu g \cdot m^{-3}$ 的时间达到 4 d, 出现在 6 月 21 ~ 24 日, $\rho(O_3)$ 分别为 211、175、218 和 $229 \mu g \cdot m^{-3}$ 。为了了解走航过程中的 VOCs 浓度变化特征,选取 6 月 21 ~ 24 日走航数据,选择其中臭氧生成潜势最大的 4 类有机物(戊烯、乙苯、丁烯和三甲苯)进行分析。图 2 为 4 种典型污染物连续 4 d 走航的浓度箱型图,通过对比发现,6 月 22 日,4 类有机物的浓度均值及中位数低于其它 3 d,走航途中可能存在重要的 VOCs 排放源,后文将对走航浓度分布及 TVOC 浓度日变化进一步分析,并通过 VOCs 来源解析结果辅以判断,量化不同源的贡献率。

表 3 为国内一些城市不同种类 VOCs 组分的对比。从表中可以看出,本研究中卤代烃占比最大,为 28.95%,其次是 OVOC 和烷烃,占比分别为 22.66% 和 22.13%,烯烃占比相对较低,与其它城市监测结果较为吻合。对比发现,卤代烃在不同城市中均占较大比例,由于不同城市工业结构不同,如南京北郊存在大量石油化工企业,烷烃占比达 45.1%;天津主要以工业为主导,其烷烃占比也达 62.04%;晋城冬季环境空气中烷烃(56.68%)和芳香烃(28.17%)的占比较高,我国北方地区冬季 VOCs 主要来源于生活燃煤源。本研究走航监测范围覆盖整个溧

表 2 溧水区 2021 年 VOCs 浓度及 OFP 统计结果¹⁾

Table 2 VOCs concentration and OFP in 2021 at Lishui

种类	名称	浓度平均值/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	MIR ^[29~31] / $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	OFP/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$
烷烃	正十三烷	2.65	0.76	2.01
	正辛烷	6.22	0.07	0.43
	正庚烷	1.08	0.28	0.30
	正己烷	1.43	0.62	0.88
	戊烷	5.81	1.04	6.04
	甲基环戊烷	3.67	2.80	10.28
	甲基环己烷	7.89	1.8	14.20
	壬烷	3.17	0.54	1.71
	正癸烷	3.43	0.46	1.57
	十一烷	8.22	0.42	3.45
	正十二烷	5.87	0.38	2.23
	合计	49.45		43.14
烯烃	异戊二烯	3.03	7.89	23.90
	1,3-丁二烯	3.278	4.73	15.50
	丁烯	3.17	10.00	31.71
	戊烯	6.50	6.20	40.33
	环己烯	2.27	1.28	2.91
	合计	18.26		114.37
芳香烃	对-二乙基苯	3.08	4.18	12.87
	苯	1.89	0.42	0.79
	甲苯	9.60	2.70	25.92
	乙苯	13.23	2.70	35.73
	三甲苯	3.18	8.90	28.31
	苯乙炔	4.47	2.20	9.85
	合计	35.46		113.49
含氧(氮)VOC	三乙胺	1.35	3.91	5.27
	甲基叔丁基醚(MTBE)	1.27	0.79	1.00
	正丙醇	0.83	2.89	2.39
	丙酮	4.01	0.58	2.32
	乙酸正丙酯	1.31	0.95	1.24
	乙酸正丁酯	4.62	0.50	2.31
	甲硫醇	2.18	—	—
	二甲基二硫醚	3.24	2.08	6.75
	二甲基甲酰胺	0.47	—	—
	甲酸乙酯	1.02	—	—
	二亚乙基三胺	0.98	—	—
	己硫醇	3.47	—	—
	甲硫醚	2.81	—	—
	乙硫醚	2.31	—	—
	苯胺	3.03	—	—
	二甲苯酚	5.06	—	—
	苯甲酸甲酯	4.19	—	—
	磷酸三甲酯	2.80	—	—
	二乙基苯胺	3.68	—	—
	正癸醇	1.96	—	—
	合计	50.63		6.75
卤代烃	氯乙烷	0.86	0.34	0.29
	四氯乙烯	2.69	0.04	0.10
	1,2-二溴乙烷	13.23	0.11	1.45
	三氯乙烯	11.5	0.75	8.62
	三氯乙烷	16.12	0.01	0.16
	1,3-二氯丙烯	3.64	3.66	13.32
	1,1-二氯乙烷	3.24	2.08	6.75
	六氯-1,3-丁二烯	1.56	—	—
	1,1,2,2,-四氯乙烷	3.26	—	—
	氯苯	2.31	0.28	0.64
	二氯苯	2.48	0.20	0.49
	1,2,4-三氯苯	1.55	—	—
	二溴甲烷	2.27	—	—
	合计	64.73		1.14
含硫化合物	二硫化碳	4.90	—	—
TVOC		223.45		278.92

1) “—”表示无数据

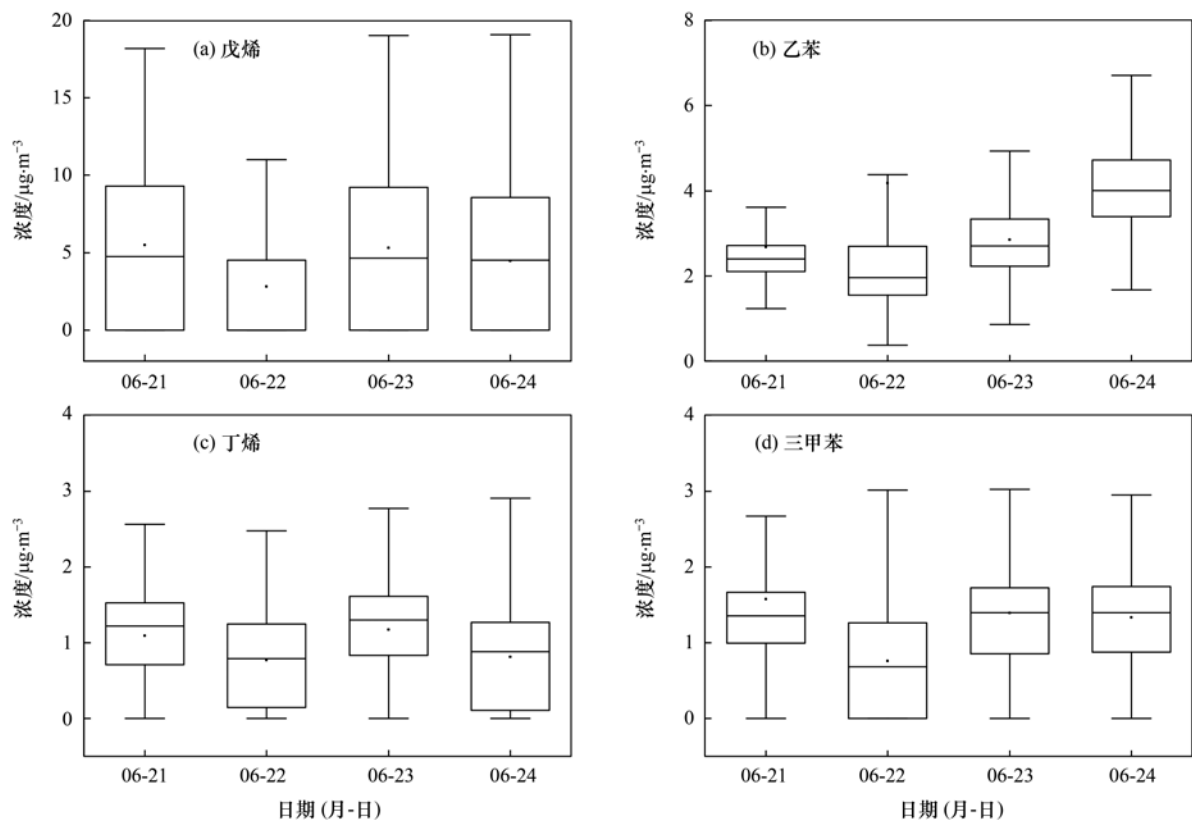


图2 连续4 d 走航过程中典型污染物的浓度
Fig. 2 Concentrations of typical pollutants for four days

表3 国内不同城市各 VOCs 组分占比
Table 3 Comparison of VOCs components in different cities in China

位置(年份)	占比/%						文献
	烷烃	烯烃	芳香烃	OVOC	卤代烃	其他	
南京市溧水区	22.13	8.18	15.87	22.66	28.95	2.19	本研究
成都(2019)	20.51	5.70	14.17	—	23.23	5.10	[32]
重庆(2020)	18.88	14.49	6.50	39.05	15.67	3.62	[33]
南京市区(2013)	36.21	13.29	20.10	30.41	—	—	[34]
南京北郊(2012)	45.10	25.30	22.30	—	—	—	[4]
天津(2019)	62.04	15.32	18.81	—	—	—	[35]
成都双流(2016)	29.00	9.00	22.00	15.00	17.00	8.00	[36]
北京东四环(2015)	20.33	6.71	4.11	9.33	3.37	5.02	[37]
厦门冬季(2014)	50.67	8.98	40.34	—	—	—	[38]
阳泉(2018)	51.80	8.00	17.80	—	—	3.80	[39]
佛山冬季(2014)	34.70	10.04	51.20	—	—	4.05	[40]
晋城冬季(2017)	56.68	9.95	28.17	—	—	5.21	[41]

1) “—”表示无相关监测数据

水区,VOCs 主要排放来源于城市移动源、溶剂使用和有机化工企业等。

图3为6月21~24日TVOC的走航浓度变化,每天TVOC出现浓度峰值的时间有所差异,但大都集中在09:00~10:00和14:00~15:00出现。由于夜晚大气光化学反应减弱使TVOC积累,早晨更易出现TVOC的峰值;日出后,随着温度逐渐升高及太阳辐射增强,大气光化学反应增强,大量TVOC转化生成O₃,TVOC浓度会有所降低。此外,各类企业

(如加油站和汽车修理厂等)排放的TVOC会逐渐积累,并持续到午后16:00之后,边界层高度逐渐降低,光化学反应减弱,TVOC消耗减慢,浓度上升。

此外TVOC的浓度变化与走航途经覆盖区域有较大的联系,其中6月22日TVOC浓度出现多个异常高值区,这里作进一步分析。图4为6月22日走航途经的3个高值区域段,分别为城市快速路[图4(a)]和郊区道路,附近存在工业园区[图4(b)]、城市主干道[图4(c)]。图4(a)中TVOC主要由三

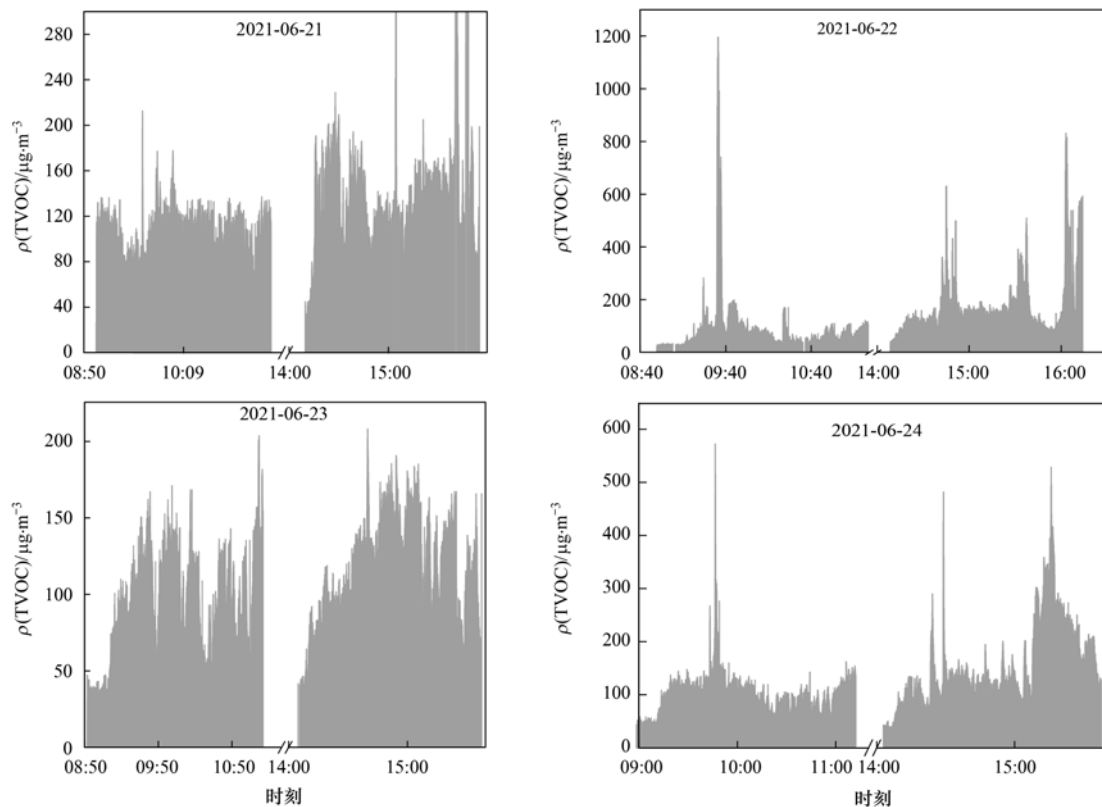


图3 2021年6月21~24日走航TVOC浓度日变化

Fig. 3 Diurnal variation in TVOC from June 21 to 24, 2021

氯乙烯和三氯乙烯贡献, $\rho(\text{TVOC})$ 为 $720 \sim 800 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $\rho(\text{三氯乙烯})$ 为 $350 \sim 450 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $\rho(\text{三氯乙烷})$ 为 $210 \sim 240 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 三氯乙烯主要用作溶剂, 三氯乙烷用作树脂和染料香料原料; 图4(b)中 $\rho(\text{TVOC})$ 为 $800 \sim 1200 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $\rho(\text{甲苯})$ 为 $700 \sim 800 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 甲苯主要由原油经石油化工过程制得, 用作溶剂和高辛烷值汽油添加剂, 是有机化工的重要原料; 图4(c)中 $\rho(\text{TVOC})$ 为 $700 \sim 820 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $\rho(\text{甲苯})$ 为 $400 \sim 600 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 考虑为道路移动源导致的浓度高值. 图4中 VOCs 的高值区均处在人为活动较为密集的场所, 后文将利用 PMF 模型进一步定性定量 VOCs 的来源.

图5为不同种类 VOCs 的季节平均值对比, 夏季的 $\rho(\text{TVOC})$ 较高, 为 $263.75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 冬季较低, 为 $187.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 春季为 $246.11 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 秋季为

$204.77 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 其中芳香烃和 OVOC 的季节差异性较小, 烷烃和卤代烃在夏季浓度较高, 冬季各类 VOCs 的浓度均低于平均值.

2.2 臭氧生成潜势

本次走航监测各类 VOCs 组分占比见图6, 其中 $\rho(\text{卤代烃})$ 平均值达 $64.73 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 占比为 28.95%, $\rho(\text{烷烃})$ 平均为 $49.46 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 占比 22.13%, $\rho[\text{含氧(氮)VOCs}]$ 平均为 $50.63 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 占比 22.66%, $\rho(\text{芳香烃})$ 平均为 $35.46 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 占比 15.87%. 在检出浓度上, 卤代烃和含氧(氮) VOCs 占有较大比例; 烯烃和芳香烃的最大反应增量(MIR)较大, 对 O_3 的贡献率分别达到了 41.1% 和 40.08%, 是 O_3 重要的前体物.

烷烃和卤代烃光化学反应活性较低, 与 $\cdot\text{OH}$ 的反应较为缓慢, 生成 O_3 的能力也相对较弱, 对 OFP

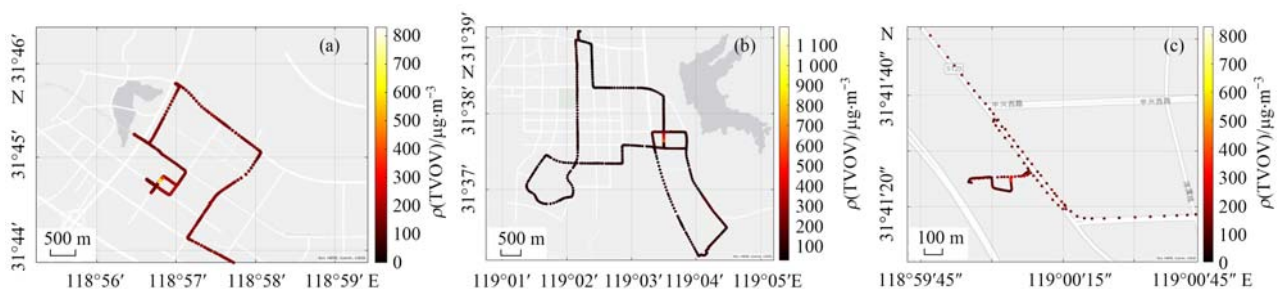


图4 2021年6月22日走航TVOC浓度分布

Fig. 4 TVOC concentration distribution on June 22, 2021

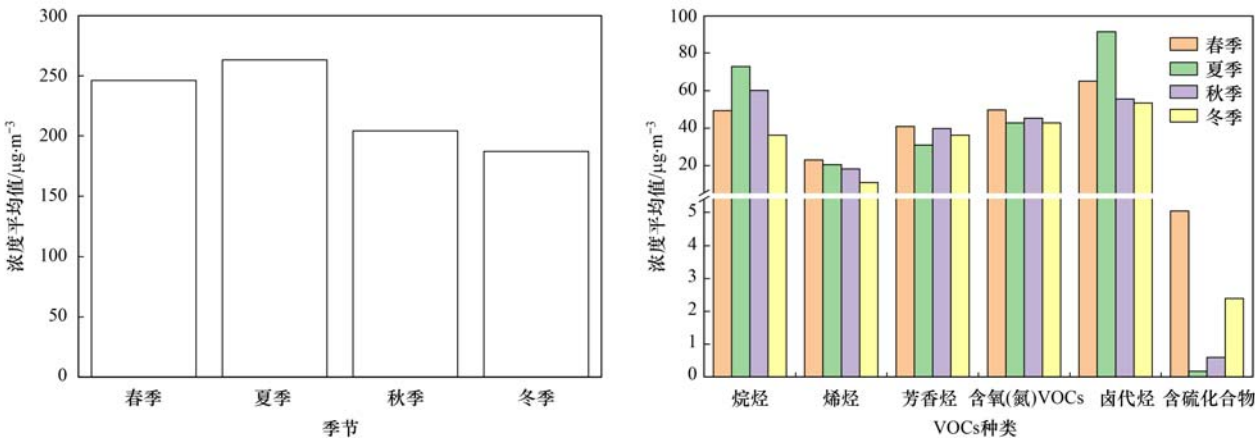


图5 不同季节的 VOCs 浓度平均值对比

Fig. 5 VOCs concentration in different seasons

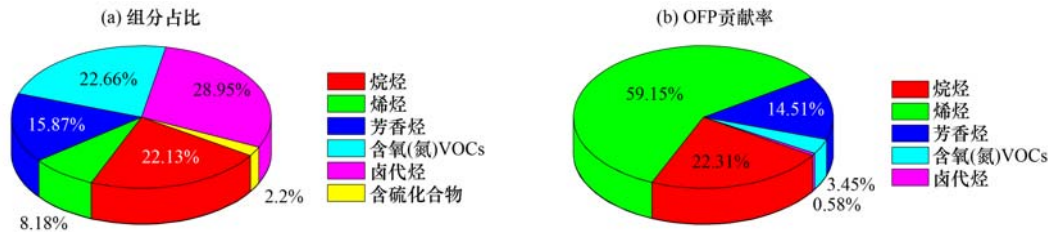


图6 各类 VOCs 组分占比及 O₃ 生成潜势贡献率

Fig. 6 VOCs concentration and ozone potential ratio

的贡献相对较小。反之芳香烃和烯烃的浓度远低于烷烃,烯烃仅占 TVOC 的 8.2%,芳香烃仅占 15.9%,但芳香烃和烯烃与·OH反应化学活性较高,更易参与光化学反应,生成更多的 O₃。

2021 年走航监测期间 OFP 大于 10 μg·m⁻³ 的 VOCs 物种见图 7,其中戊烯 OFP 贡献率为 14.5%,戊烯可作为高辛烷汽油的添加剂,是机动车排放和燃油挥发源的主要贡献物质;甲苯、乙苯和三甲苯 OFP 贡献率分别达 9.3%、12.8% 和 10.2%,苯系物多作为溶剂使用,是有机化工的重要原料,也是汽油中的重要组成物质;丁烯和 1,3-丁二烯 OFP 贡献率分别达 11.4% 和 5.6%,其多用于橡胶,树脂等的原料;异戊二烯 OFP 贡献率为 8.6%,是天然源植物排放的主要 VOCs;甲基环己烷和甲基环戊烷 OFP 贡献率分别为 5.1% 和 3.7%,多见于溶剂使用和有机合成原料。

综上,芳香烃和烯烃在 O₃ 形成中具有极大潜力,在本次监测中,烯烃和芳香烃浓度虽然较低,但贡献了超 80% 的 O₃ 生成潜势,相比之下烷烃,卤代烃和 OVOCs 浓度虽然较高,却未对 O₃ 的生成潜势有显著的影响,因此需要加大对一次排放的芳香烃和烯烃的控制以有效减小大气 O₃ 污染的生成。

2.3 VOCs 来源解析

本研究参考溧水区 VOCs 浓度水平及周边工业的调查情况,选取信噪比 S/N 大于 5 的 VOCs 物

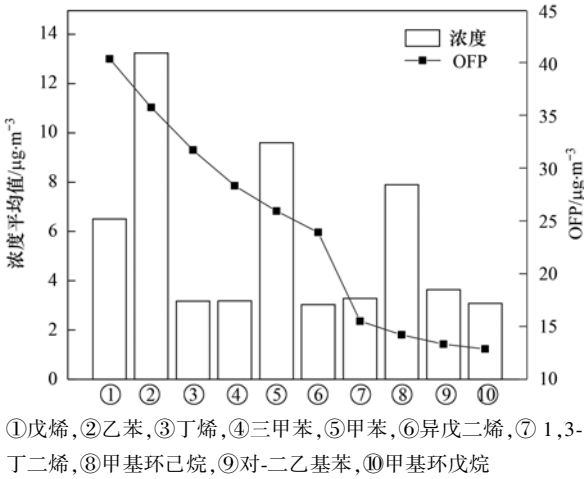


图7 OFP 大于 10 μg·m⁻³ 的物种及其浓度

Fig. 7 Species with OFP more than 10 μg·m⁻³ and its concentration

种,控制物种残差在 -3 ~ 3 之间,并呈正态分布. 最终得到 26 类 VOCs 物种,并放入 PMF 模型进行来源解析。

因子数通过 Q_{true} 和 $Q_{\text{theoretical}}$ 的比值来判断^[42], 本次研究对比了选取 4 ~ 7 个因子时解析的不同结果,在选取 6 个因子时 Q_{true} 为 50 680.5, $Q_{\text{theoretical}}$ 为 48 864.3, 选取 6 个因子时预测值与真实值的回归模型拟合度 (r^2) 达到 0.876 65,也是各个因子中最高的. 当选择更多的因子个数时,会出现因子被拆分成两个没有实际物理意义的因子的情况,选择更少

的因子时 r^2 会有很明显的降低,最终选择 6 个因子.

将 2021 年走航观测结果分为春夏秋冬 4 个季节进行 VOCs 来源解析,探讨不同组分、不同源对 VOCs 的贡献差别,以及不同季节的源变化和物种贡献,见图 8 ~ 11.

涂料溶剂在挥发排放过程中的甲苯/苯(T/B, 体积比,下同)值较高,往往大于2. 当T/B大于5 时,则表明 VOCs 中的苯和甲苯主要受工业溶剂使用排放的影响;当 T/B 在 2 左右时,表明受交通排放影响较大;当 T/B 小于 2 时,则表明工业生产和燃烧源排放对大气中苯和甲苯的影响较为显著;当

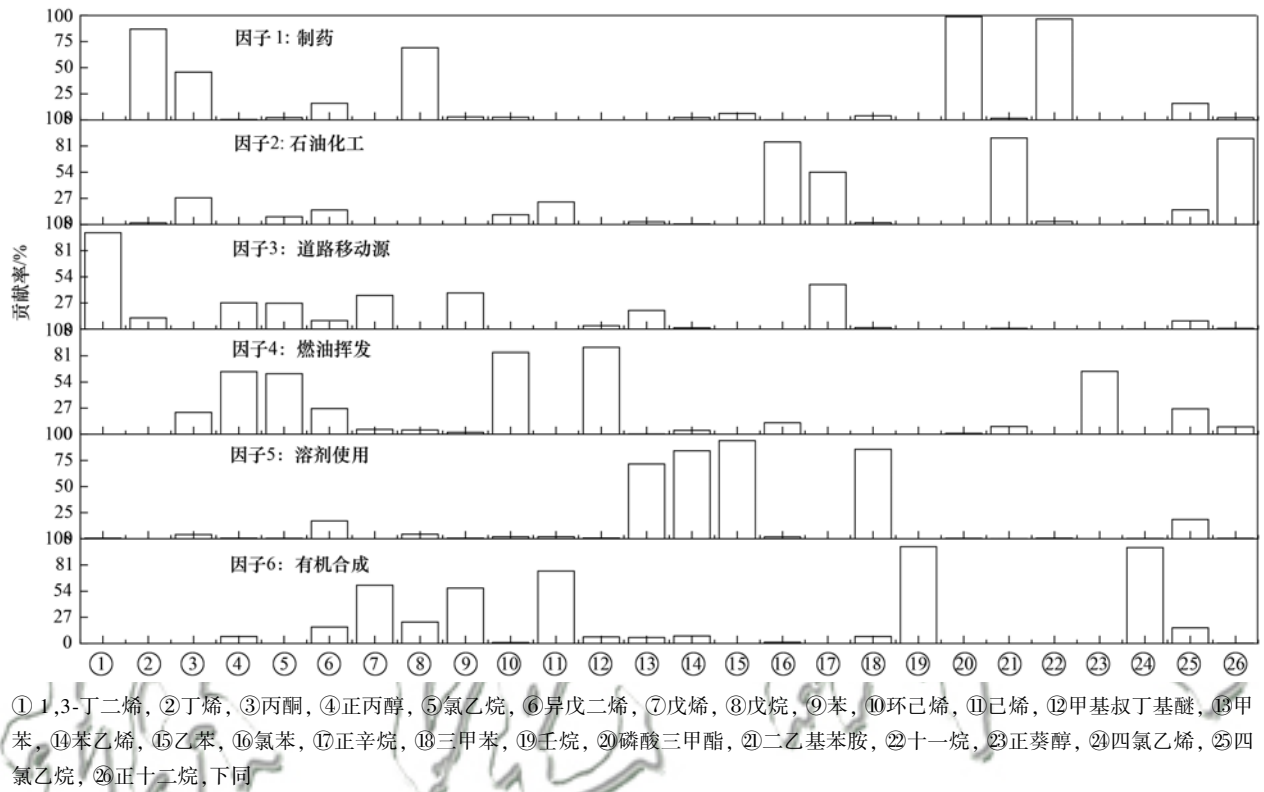


图 8 春季 VOCs 来源解析
Fig. 8 Source apportionment of VOCs in spring

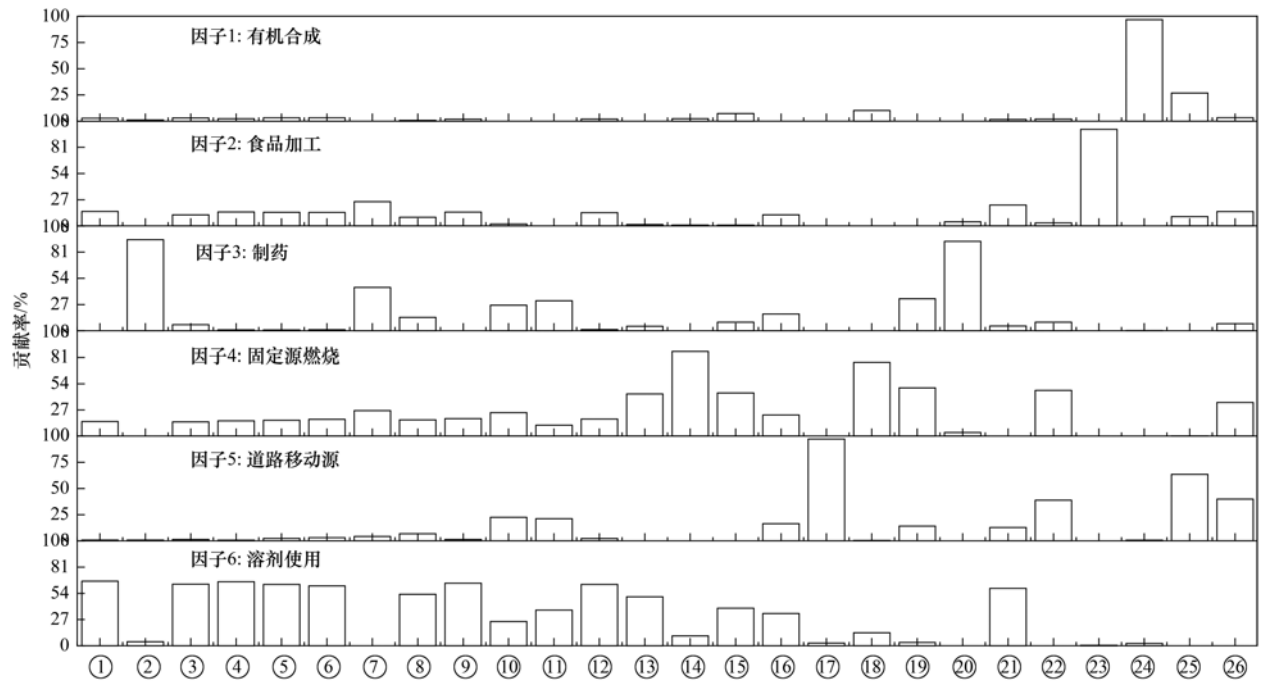


图 9 夏季 VOCs 来源解析
Fig. 9 Source apportionment of VOCs in summer

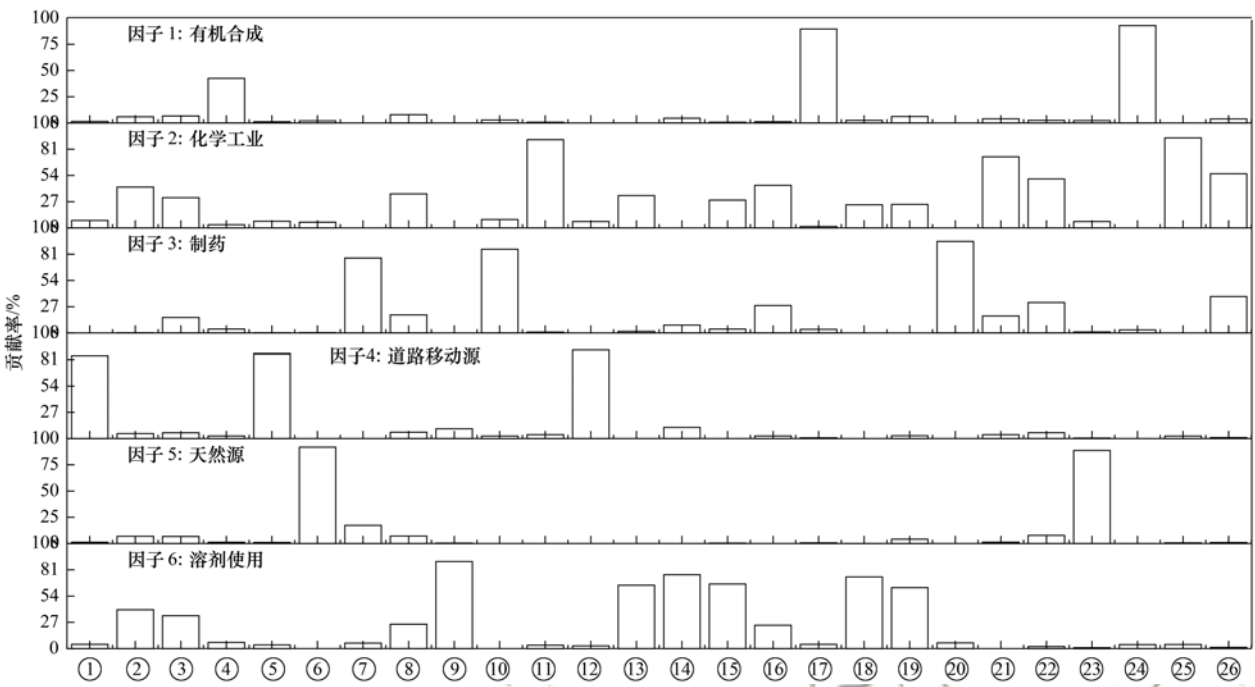


图10 秋季 VOCs 来源解析

Fig. 10 Source apportionment of VOCs in autumn

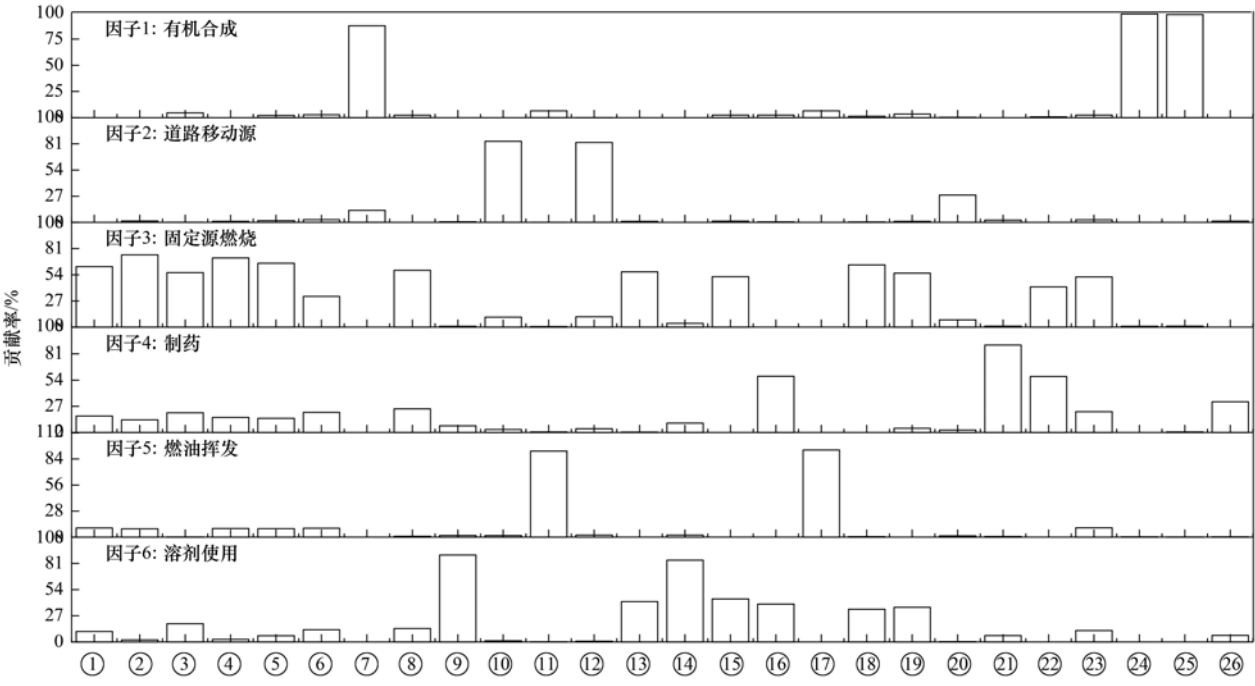


图11 冬季 VOCs 来源解析

Fig. 11 Source apportionment of VOCs in winter

T/B 小于 1 时,其贡献以燃煤排放为主;当 T/B 约为 0.4 时,表明生物质燃烧排放对气团中 VOCs 的影响较大^[43]. 本研究中 T/B 为 4.13,表明溧水区苯和甲苯主要受工业溶剂使用的影响.

春季 VOCs 各因子的确定,因子 1 贡献较高的磷酸三甲酯主要作为医药和农药的溶剂及萃取剂,丙酮常作为溶剂用于生产农药与医药,将因子 1 定为制药源. 因子 2:正辛烷是工业用汽油成分之一,

十二烷和氯苯常见于化工行业中,因此将因子 2 定性为石油化工源. 因子 3: 1,3-丁二烯是道路燃烧的主要物质,正辛烷为汽油的主要成分,且 1,3-丁二烯贡献较高,将其归类为道路移动源. 因子 4:甲基叔丁基醚是一种高辛烷值汽油添加剂且贡献率达 89%,环己烯也常用作油类萃取,因子 4 定为燃油挥发源. 因子 5:苯系物贡献较高,甲苯及乙苯主要与有机溶剂有关^[44],因此将其定性为溶剂使用源. 因

子6: 壬烷, 烯烃常见于有机合成, 四氯乙烯用于胶黏剂、干燥剂、脱漆剂、驱虫剂和脂肪类萃取剂等有机原料, 因此将因子6定性为有机合成源。

夏季 VOCs 各因子的确定, 因子1中四氯乙烯主要用作金属脱脂溶剂, 是重要的有机合成原料, 贡献率达80%, 因此将其定为有机合成源。因子2中正葵醇为无色或浅黄色黏稠液体, 是国标 GB 2760-96 规定允许使用的香料, 因此将因子2定性为食品加工。因子3中磷酸三甲酯主要用作医药和农药的溶剂及萃取剂, 贡献率达92%, 将其定性为制药源。因子4中苯乙烯多见于固定源燃烧, 三甲苯在城市中主要由燃烧产生, 将因子4定性为固定源燃烧。因子5中正辛烷是工业汽油的主要成分, 贡献率为97%, 因此将因子5定性为道路移动源。因子6中氯乙烷、戊烷、丙酮、二乙基苯胺、苯和甲苯多见于溶剂使用[45], 将因子6定性为溶剂使用源。

秋季 VOCs 各因子的确定, 因子1为有机合成, 正辛烷及四氯乙烯贡献率较高, 正辛烷除常见于汽油外也多用于有机合成原料, 四氯乙烯主要用作金属脱脂溶剂, 脂肪类萃取剂等, 是重要的有机合成原料。因子2中贡献较高的己烯用作制造染料、洗涤剂、药剂及杀虫剂等化工原料, 四氯乙烷常用于制造四氯乙烯的原料, 也可用作杀虫剂、除草剂等化学品的制作, 因子2定为化学工业。因子3中磷酸三甲酯、环己烯为重要的医药中间体, 将其定为制药源。因子4中1,3-丁二烯是道路燃烧的主要物质, 甲基叔丁基醚(MTBE)为汽油的主要添加剂, 将因子4定性为移动道路源。因子5以异戊二烯为主, 异戊二烯是重要的天然植物排放源。因子6以苯系物贡献为主, 将其定性为溶剂使用源[46,47]。

冬季 VOCs 各因子的确定, 因子1中四氯乙烯和四氯乙烷贡献较高, 卤代烃多用于合成纤维的干洗剂, 将其定性为有机合成源[48]。因子2中甲基叔丁基醚和戊烯贡献较大, 戊烯在高温时裂解为低级烃类可作高辛烷汽油的添加剂, 甲基叔丁基醚(MTBE)是重要的汽油添加剂, 将其定为道路移动源[49]。因子3中丁烯、丁二烯、丙酮常见于燃烧产物中, 将因子3定性为固定源燃烧[50]。因子4中二乙基苯胺主要用作农药医药的原料, 定性为制药源[51]。因子5中己烯可作为汽油类添加剂和高辛烷值燃料, 正辛烷是汽油的主要成分, 将因子5定性为燃油挥发源。因子6定性为溶剂使用, 其贡献主要以苯系物为主。

图12为PMF解析的各源因子对不同季节VOCs的贡献率。春季不同源贡献差别较小, 燃油挥发源贡献率稍高, 达24%; 夏、秋、冬这3个季节溶剂使用贡献率均较高, 其中夏季更为明显, 贡献率达38%; 秋季工业排放和溶剂使用贡献率均较大分别为32%和28%; 冬季由于气温下降, 采暖需求增大, 固定源燃烧贡献率最大达39%。从以上结果来看, 南京市溧水区的VOCs主要来源于溶剂使用、工业排放、道路移动源及由燃煤、天然气造成的固定源燃烧。结合走航VOCs浓度分布及源解析结果, 人为活动较为密集的城市主干道VOCs浓度较高。工业排放、溶剂使用、燃油挥发及道路移动源是区域内VOCs的主要排放源。因此, 控制溧水区大气VOCs污染应关注园区工业排放, 并加大对溶剂使用和油品挥发、道路机动车排放的监管力度。冬季燃烧源(煤、石油气、天然气、秸秆燃烧和工业燃烧等)对VOCs浓度的影响较大, 也不容忽视。

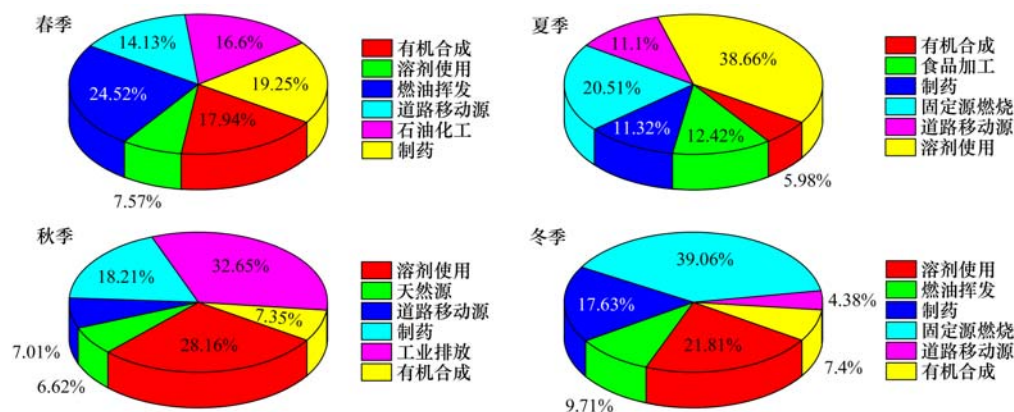


图12 不同季节大气VOCs各来源贡献率

Fig. 12 Source contribution ratios of atmospheric VOCs in different seasons

3 结论

(1) 基于走航监测, 2021年溧水区 ρ (TVOC)为

$223.46 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 其中 ρ (卤代烃)和 ρ (烷烃)较高, 分别为 $64.73 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $49.45 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. TVOC浓度在09:00~10:00和14:00~15:00出现高值, 且

TVOC 的高值多出现在人为活动较为密切的城市区域及化工园区附近。

(2) 溧水区大气 VOCs 的 O_3 生成潜势为 $278.92 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, 由于烯烃和芳香烃的最大反应增量活性(MIR)较大, 使其存在较大的 O_3 生成潜势, 其中烯烃为 $114.37 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ (41%), 芳香烃为 $113.49 \text{ g} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

(3) 基于 PMF 源解析, 2021 年不同季节 VOCs 的主要源贡献不同, 春季为燃油挥发 (24.52%), 夏季为溶剂使用 (38.66%), 秋季为工业排放 (32.65%), 冬季为固定源燃烧 (39.06%)。

(4) 溧水区 VOCs 的管控重点应放在工业排放、固定源燃烧(燃煤、石油气、天然气等)、道路移动源(汽油车、柴油车)、溶剂使用和燃油挥发上, 随季节变化应有所侧重。

参考文献:

- [1] 曹梦瑶. 南京工业区大气挥发性有机物污染特征、来源解析及环境效应[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2021.
- [2] 邵敏, 董东. 我国大气挥发性有机物污染与控制[J]. 环境保护, 2013, 41(5): 25-28.
- [3] 莫梓伟, 邵敏, 陆思华. 中国挥发性有机物(VOCs)排放源成分谱研究进展[J]. 环境科学学报, 2014, 34(9): 2179-2189.
- [4] Mo Z W, Shao M, Lu S H. Review on volatile organic compounds(VOCs) source profiles measured in China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, 34(9): 2179-2189.
- [5] 安俊琳, 朱彬, 王红磊, 等. 南京北郊大气 VOCs 变化特征及来源解析[J]. 环境科学, 2014, 35(12): 4454-4464.
- [6] An J L, Zhu B, Wang H L, et al. Characteristics and source apportionment of volatile organic compounds (VOCs) in the Northern Suburb of Nanjing[J]. Environmental Science, 2014, 35(12): 4454-4464.
- [7] Moschonas N, Glavas S. C_3 C_{10} hydrocarbons in the atmosphere of Athens, Greece[J]. Atmospheric Environment, 1996, 30(15): 2769-2772.
- [8] 王帅杰, 朱坦. 大气颗粒物源解析技术研究进展[J]. 环境污染治理技术与设备, 2002, 3(8): 8-12.
- [9] Wang S J, Zhu T. The research progress of source apportionment of airborne particulate matter[J]. Techniques and Equipment for Environment Pollution Control, 2002, 3(8): 8-12.
- [10] Cheng N N, Zhang C, Jing D J, et al. An integrated chemical mass balance and source emission inventory model for the source apportionment of $PM_{2.5}$ in typical coastal areas[J]. Journal of Environmental Sciences, 2020, 92: 118-128.
- [11] 胡崑, 王鸣, 王红丽, 等. 基于 PMF 和源比例法的大气羰基化合物来源解析: 以南京市观测为例[J]. 环境科学, 2021, 42(1): 45-54.
- [12] Hu K, Wang M, Wang H L, et al. Source apportionment of ambient carbonyl compounds based on a PMF and source tracer ratio method: a case based on observations in Nanjing[J]. Environmental Science, 2021, 42(1): 45-54.
- [13] 刘营营, 王丽涛, 齐孟姚, 等. 邯郸大气 VOCs 污染特征及其在 O_3 生成中的作用[J]. 环境化学, 2020, 39(11): 3101-3110.
- [14] Liu Y Y, Wang L T, Qi M Y, et al. Characteristics of atmospheric VOCs and their role in O_3 generation in Handan[J]. Environmental Chemistry, 2020, 39(11): 3101-3110.
- [15] 王红丽. 上海市光化学污染期间挥发性有机物的组成特征及其对臭氧生成的影响研究[J]. 环境科学学报, 2015, 35(6): 1603-1611.
- [16] Wang H L. Characterization of volatile organic compounds (VOCs) and the impact on ozone formation during the photochemical smog episode in Shanghai, China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(6): 1603-1611.
- [17] 张爱东, 王晓燕, 修光利. 上海市交通干道空气中挥发性有机物冬季污染特征研究[J]. 环境科学与管理, 2006, 31(1): 54-56.
- [18] Zhang A D, Wang X Y, Xiu G L. Characterization of atmospheric TVOCs near traffic road in winter in Shanghai[J]. Environmental Science and Management, 2006, 31(1): 54-56.
- [19] Zhang Y L, Wang X M, Zhang Z, et al. Sources of C_2 - C_4 alkenes, the most important ozone nonmethane hydrocarbon precursors in the Pearl River Delta region[J]. Science of the Total Environment, 2015, 502: 236-245.
- [20] 邹宇, 邓雪娇, 王伯光, 等. 广州番禺大气成分站挥发性有机物的污染特征[J]. 中国环境科学, 2013, 33(5): 808-813.
- [21] Zhou Y, Deng X J, Wang B G, et al. Pollution characteristics of volatile organic compounds in Panyu Composition Station[J]. China Environmental Science, 2013, 33(5): 808-813.
- [22] 马永亮, 谭吉华, 贺克斌, 等. 佛山灰霾期挥发性有机物的污染特征[J]. 环境科学, 2011, 32(12): 3549-3554.
- [23] Ma Y L, Tan J H, He K B, et al. Characteristics of volatile organic compounds during haze episode in Foshan City[J]. Environmental Science, 2011, 32(12): 3549-3554.
- [24] 范莉茹, 王淑娟, 高博, 等. 石家庄市采暖期间环境空气中挥发性有机物污染特征分析[J]. 绿色环保建材, 2018, (1): 14-15.
- [25] 刘奇琛, 黄婧, 郭新彪. 北京市大气挥发性有机物(VOCs)的污染特征及来源[J]. 生态毒理学报, 2017, 12(3): 49-61.
- [26] Liu Q C, Huang J, Guo X B. Pollution characteristics and sources of ambient volatile organic compounds(VOCs) in Beijing[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2017, 12(3): 49-61.
- [27] 翟增秀, 邹克华, 李伟芳, 等. 天津中心城区环境空气挥发性有机物污染特征分析[J]. 环境科学, 2013, 34(12): 4513-4518.
- [28] Zhai Z X, Zou K H, Li W F, et al. Pollution characterization of volatile organic compounds in ambient air of Tianjin Downtown[J]. Environmental Science, 2013, 34(12): 4513-4518.
- [29] Song M D, Tan Q W, Feng M, et al. Source apportionment and secondary transformation of atmospheric nonmethane hydrocarbons in Chengdu, Southwest China[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2018, 123(17): 9741-9763.
- [30] 余家燕, 刘建国, 秦皓, 等. 重庆江津城区夏季臭氧污染过程挥发性有机物特征与来源分析[J]. 地球化学, 2021, 50(5): 503-512.
- [31] Yu J Y, Liu J G, Qin H, et al. Analysis of volatile organic compound characteristics and sources during the typical ozone pollution process in Jiangjin District of Chongqing[J]. Geochimica, 2021, 50(5): 503-512.
- [32] 刘芮伶, 翟崇治, 李礼, 等. 重庆主城区夏秋季挥发性有机物(VOCs)浓度特征及来源研究[J]. 环境科学学报, 2017, 37(4): 1260-1267.
- [33] Liu R L, Zhai C Z, Li L, et al. Concentration characteristics and source analysis of ambient VOCs in summer and autumn in the urban area of Chongqing[J]. Acta Scientiae Circumstantiae,

- 2017, **37**(4): 1260-1267.
- [21] Shen L J, Xiang P, Liang S W, *et al.* Sources profiles of volatile organic compounds (VOCs) measured in a typical industrial process in Wuhan, Central China[J]. *Atmosphere*, 2018, **9**(8), doi: 10.3390/atmos9080297.
- [22] 刘剑, 赵绍伟, 王攀攀, 等. 在线质谱仪在车内 VOCs 现场快速监测中的应用[J]. *分析试验室*, 2020, **39**(4): 432-437.
Liu J, Zhao S W, Wang P P, *et al.* Application of on-line mass spectrometer in the rapid on-site monitoring of VOCs inside cabin of vehicles[J]. *Chinese Journal of Analysis Laboratory*, 2020, **39**(4): 432-437.
- [23] Paatero P, Tapper U. Analysis of different modes of factor analysis as least squares fit problems[J]. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 1993, **18**(2): 183-194.
- [24] 陈航, 王颖, 王澍. 铜山矿区周边农田土壤重金属来源解析及污染评价[J]. *环境科学*, 2022, **43**(5): 2719-2731.
Chen H, Wang Y, Wang S. Source analysis and pollution assessment of heavy metals in farmland soil around Tongshan mining area[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(5): 2719-2731.
- [25] 虞雄, 杨凌霄, 张婉, 等. 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[J]. *环境科学*, 2022, **43**(5): 2284-2293.
Tuo X, Yang L X, Zhang W, *et al.* Characteristics and source analysis of PM_{2.5} in Qingdao in winter under the action of sea-land-atmosphere convergence[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(5): 2284-2293.
- [26] 贺博文, 聂赛赛, 李仪琳, 等. 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[J]. *环境科学*, 2022, **43**(5): 2343-2354.
He B W, Nie S S, Li Y L, *et al.* Seasonal distribution characteristics, source analysis, and health risk evaluation of PAHs in PM_{2.5} in Chengde[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(5): 2343-2354.
- [27] Paatero P, Hopke P K. Discarding or downweighting high-noise variables in factor analytic models[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2003, **490**(1-2): 277-289.
- [28] Sha Q E, Zhu M N, Huang H W, *et al.* A newly integrated dataset of volatile organic compounds(VOCs) source profiles and implications for the future development of VOCs profiles in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **793**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.148348.
- [29] Zhang Y N, Xue L K, Carter W P L, *et al.* Development of ozone reactivity scales for volatile organic compounds in a Chinese megacity[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2021, **21**(14): 11053-11068.
- [30] Venecek M A, Carter W P L, Kleeman M J. Updating the SAPRC maximum incremental reactivity (MIR) scale for the United States from 1988 to 2010[J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2018, **68**(12): 1301-1316.
- [31] Carter W P L. Development of ozone reactivity scales for volatile organic compounds[J]. *Air & Waste*, 1994, **44**(7): 881-899.
- [32] 徐晨曦, 陈军辉, 姜涛, 等. 成都市区夏季大气挥发性有机物污染特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(12): 5316-5324.
Xu C X, Chen J H, Jiang T, *et al.* Characteristics and sources of atmospheric volatile organic compounds pollution in summer in Chengdu[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(12): 5316-5324.
- [33] 李陵, 李振亮, 张丹, 等. 重庆市主城区 O₃ 污染时期大气 VOCs 污染特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2021, **42**(8): 3595-3603.
Li L, Li Z L, Zhang D, *et al.* Pollution characteristics and source apportionment of atmospheric VOCs during ozone pollution period in the main urban area of Chongqing[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(8): 3595-3603.
- [34] 杨笑笑, 汤莉莉, 张运江, 等. 南京夏季市区 VOCs 特征及 O₃ 生成潜势的相关性分析[J]. *环境科学*, 2016, **37**(2): 443-451.
Yang X X, Tang L L, Zhang Y J, *et al.* Correlation analysis between characteristics of VOCs and ozone formation potential in summer in Nanjing Urban District[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(2): 443-451.
- [35] 王文美, 高璟赞, 肖致美, 等. 天津市夏季不同臭氧浓度级别 VOCs 特征及来源[J]. *环境科学*, 2021, **42**(8): 3585-3594.
Wang W M, Gao J Y, Xiao Z M, *et al.* Characteristics and sources of VOCs at different ozone concentration levels in Tianjin[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(8): 3585-3594.
- [36] 邓媛元, 李晶, 李亚琦, 等. 成都双流夏秋季环境空气中 VOCs 污染特征[J]. *环境科学*, 2018, **39**(12): 5323-5333.
Deng Y Y, Li J, Li Y Q, *et al.* Characteristics of ambient VOCs at the shuangliu site in Chengdu, China, during summer and autumn[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(12): 5323-5333.
- [37] 张博韬, 安欣欣, 王琴, 等. 2015 年北京大气 VOCs 时空分布及反应活性特征[J]. *环境科学*, 2018, **39**(10): 4400-4407.
Zhang B T, An X X, Wang Q, *et al.* Temporal variation, spatial distribution, and reactivity characteristics of air VOCs in Beijing 2015[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(10): 4400-4407.
- [38] 徐慧, 张晗, 邢振雨, 等. 厦门冬春季大气 VOCs 的污染特征及臭氧生成潜势[J]. *环境科学*, 2015, **36**(1): 11-17.
Xu H, Zhang H, Xing Z Y, *et al.* Pollution characteristics and ozone formation potential of ambient VOCs in winter and spring in Xiamen[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(1): 11-17.
- [39] 牛月圆, 刘倬诚, 李如梅, 等. 阳泉市区夏季挥发性有机物污染特征、来源解析及其环境影响[J]. *环境科学*, 2020, **41**(7): 3066-3075.
Niu Y Y, Liu Z C, Li R M, *et al.* Characteristics, source apportionment, and environmental impact of volatile organic compounds in summer in Yangquan[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(7): 3066-3075.
- [40] 周雪明, 项萍, 段菁春, 等. 佛山市冬夏季非甲烷烃污染特征研究[J]. *环境科学*, 2016, **37**(11): 4124-4132.
Zhou X M, Xiang P, Duan J C, *et al.* Pollution characteristics of non-methane hydrocarbons during winter and summer in Foshan city[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(11): 4124-4132.
- [41] 杨帆, 闫雨龙, 戈云飞, 等. 晋城市冬季环境空气中挥发性有机物的污染特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2018, **39**(9): 4042-4050.
Yang F, Yan Y L, Ge Y F, *et al.* Characteristics and source apportionment of ambient volatile organic compounds in winter in Jincheng[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(9): 4042-4050.
- [42] Chen W T, Shao M, Lu S H, *et al.* Understanding primary and secondary sources of ambient carbonyl compounds in Beijing using the PMF model[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, **14**(6): 3047-3062.
- [43] Liu Y F, Song M D, Liu X G, *et al.* Characterization and sources of volatile organic compounds(VOCs) and their related changes during ozone pollution days in 2016 in Beijing, China

- [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **257**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113599.
- [44] 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.
- [45] Wang G, Cheng S Y, Wei W, *et al.* Characteristics and source apportionment of VOCs in the suburban area of Beijing, China [J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2016, **7** (4): 711-724.
- [46] 王伯光, 邵敏, 张远航, 等. 珠江三角洲大气中甲基叔丁基醚的污染特征研究[J]. *环境科学*, 2007, **28** (7): 1614-1620.
Wang B G, Shao M, Zhang Y H, *et al.* Methyl tert-butyl ether (MTBE) in atmosphere of the Pearl River Delta, China [J]. *Environmental Science*, 2007, **28** (7): 1614-1620.
- [47] Karl T, Guenther A. Atmospheric variability of biogenic VOCs in the surface layer measured by proton-transfer-reaction mass spectrometry [J]. *International Journal of Mass Spectrometry*, 2004, **239** (2-3): 77-86.
- [48] 赵泉, 黄靖, 陈书忠, 等. 干洗店行业挥发性有机物(VOCs)排放调查及核算方法[J]. *广东化工*, 2019, **46** (19): 153-154.
- Zhao Q, Huang J, Chen S Z, *et al.* Investigation and accounting of volatile organic compounds from laundry [J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2019, **46** (19): 153-154.
- [49] 曹冬冬, 李兴春, 翁艺斌, 等. 某石化企业三类成品油装载环节的有机污染物排放特征、环境影响及控制措施[J]. *环境工程学报*, 2022, **16** (8): 2630-2639.
Cao D D, Li X C, Weng Y B, *et al.* Emission characteristics, environmental implications and its control measures of organic pollutants from three typical petrochemical oil product loading process [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2022, **16** (8): 2630-2639.
- [50] 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.
- [51] 贾劲松, 戴京, 熊晓妹. 气相色谱法测定农药废水中2,6-二乙基苯胺[J]. *精细化工中间体*, 2008, **38** (4): 68-70.
Jia J S, Dai J, Xiong X M. Determination of 2,6-diethylaniline in the pesticide wastewater by GC [J]. *Fine Chemical intermediates*, 2008, **38** (4): 68-70.



CONTENTS

Elucidating the Impacts of Meteorology and Emission Changes on Concentrations of Major Air Pollutants in Major Cities in the Yangtze River Delta Region Using a Machine Learning De-weather Method	FU Wen-xing, HUANG Lin, DING Jia-hao, <i>et al.</i> (5879)
Impact of Emission Reduction in Different Sectors on Air Quality and Atmospheric Temperature in Eastern China	LONG Zi-yu, ZHU Jia, LI Ke, <i>et al.</i> (5889)
Analysis of Spatio-temporal Characteristics of Air Quality, Meteorological Impact, and Emission Reduction Effect During the Winter Olympics in Beijing-Tianjin-Hebei and Its Surrounding Areas	HOU Lu, ZHU Yuan-yuan, LIU Bing, <i>et al.</i> (5899)
Emission Trends and Reduction Potential of VOCs from Printing Industry in China	LIANG Xiao-ming, WU Peng-zhen, CHEN Lai-guo, <i>et al.</i> (5915)
Analysis of VOCs Emission Characteristics and Emission Reduction Potential of Typical Industries in Jinan, China	WU Wen-lu, SHAN Chun-yan, ZHAO Jing-lin, <i>et al.</i> (5924)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in Lishui Area of Nanjing	RUAN Zhao-yuan, YAN Ou, WANG Ti-jian, <i>et al.</i> (5933)
Spatio-temporal Change in City-level Greenhouse Gas Emissions from Municipal Solid Waste Sector in China During the Last Decade and Its Potential Mitigation	ZHANG Ting-xue, GAO Shu-dan, TENG Xiao, <i>et al.</i> (5946)
Spatiotemporal Distribution Characteristics of Air Pollution and Health Risks in Key Cities of China	TU Pei-yue, YANG Huan, CHEN Lan-zhou, <i>et al.</i> (5954)
Spatial and Temporal Variations in PM ₁ Concentration and its Correlation with AOD in China from 2014 to 2017	YUAN Li-mei, MA Fang-fang, BIAN Ze, <i>et al.</i> (5964)
Characteristics and Generation Mechanism of Secondary Inorganic Ions in PM _{2.5} in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan City Group	MA Jie-li, LUO Da-tong, LIU Xin, <i>et al.</i> (5975)
Characteristics and Cause of PM _{2.5} During Haze Pollution in Winter 2022 in Zhoukou, China	MA Ying-ge, YANG Lu, DI Rui-miao, <i>et al.</i> (5986)
Characterization and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM _{2.5} in Lanzhou	MA Ke-jing, SUN Li-juan (5997)
Characteristics of Atmospheric Dust Fall Pollution and Its Chemical Composition and Mass Reconstruction in Mentougou District of Beijing	WANG Zhi-yao, YAO Qi, LÜ Fu, <i>et al.</i> (6007)
Ozone Pollution Characteristics and Formation Mechanism in a Typical Tropical Seaside City	HAN Shu-yan, ZHANG Xin, XIE Rong-fu, <i>et al.</i> (6015)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Surface Water in Kuaize River Basin at the Upper Pearl River	TAO Lan-chu, CUN De-xin, TU Chun-lin, <i>et al.</i> (6025)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Surface Water and Groundwater in Huainan Coal Mine Area	LIU Hai, KANG Bo, GUAN Zheng-ting, <i>et al.</i> (6038)
Hydrochemical Characteristics and Pollution Source Identification of Groundwater in Plain Area of Barkol-Yiwu Basin	JIANG Feng, ZHOU Jin-long, ZHOU Yin-zhu, <i>et al.</i> (6050)
Identification of Nitrate Source and Transformation Process in Shallow Groundwater Around Dianchi Lake	CHEN Qing-fei, CHEN An-qiang, CUI Rong-yang, <i>et al.</i> (6062)
Analysis of Influencing Factors on the Accumulation and Distribution of Heavy Metals in Soil of a Typical Lead-zinc Mine Watershed	PAN Yong-xing, CHEN Meng, WANG Xiao-tong (6071)
Heavy Metal Pollution and Health Risk Assessment in Karst Basin Around a Lead-Zinc Mine	LIAO Hong-wei, JIANG Zhong-cheng, ZHOU Hong, <i>et al.</i> (6085)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Heavy Metals in Main Rivers Sediments and Ecological Risk Assessment in Kaifeng City	DING Ya-peng, LU Xi-hao, WANG Xiao-jing, <i>et al.</i> (6095)
Evaluation and Prediction of Environmental Capacities of Heavy Metals in the Surface Sediments of Lakes in Huoqiu County	LIU Hai, WEI Wei, SONG Yang, <i>et al.</i> (6106)
Metabarcoding Profiling of Phytoplankton Communities Associated with Algal Blooms and Determining Related Drivers in Baiyangdian Lake ...	CHEN Ting, DU Xun, CHEN Yi-yong, <i>et al.</i> (6116)
Driving Factors Analyze of Phytoplankton Community by Comparison of Population and Functional Groups and Water Quality Evaluation in Dongting Lake	YAN Guang-han, YIN Xue-yan, WANG Xing, <i>et al.</i> (6125)
Distribution Characteristics and Environmental Driving Factors of Cyanobacteria Community in Impounded Lakes and Reservoirs in Shandong on the East Route of South-to-North Water Diversion Project	WEI Jie-lin, CUI Yu-jing, LI Yi-zhen, <i>et al.</i> (6137)
Characteristics and Ecological Risk Assessment of Pharmaceutical Active Compounds in Guangdong Province	LUO Jia-hao, WANG Yu-kai, YUAN Ke, <i>et al.</i> (6149)
Characteristics of Microplastic-derived Dissolved Organic Matter(MPDOM) and the Complexation Between MPDOM and Sulfadiazine/Cu ²⁺	WANG Xiao, YAN Cai-xia, NIE Ming-hua, <i>et al.</i> (6159)
Photodegradation of Plastic Blends in Seawater and Its Risk to the Marine Environment	ZHANG Hong-yu, GAO Jia-wei, CHEN Si-bao, <i>et al.</i> (6172)
Preparation of Iron-improved Blue Algae Biochar and Its Co-adsorption Mechanism for Phosphorus in Surface Water	HAN Jie, HUANG Xin, YANG Kun-lun, <i>et al.</i> (6181)
Estimation and Critical Source Area Identification of Non-point Source Pollution Based on Improved Export Coefficient Models; A Case Study of the Upper Beiyun River Basin	LI Hua-lin, ZHANG Shou-hong, YU Pei-dan, <i>et al.</i> (6194)
Characteristics of Bacterial Community Structure in the Sediment of Rural Black and Odorous Water Bodies	REN Hong-wei, TIAN Yan-fang, LU Jin-xia, <i>et al.</i> (6205)
Impacts of Human Activities on the Net Primary Productivity of Vegetation in Chengde's Transitional Region from Plateau to Plain in the Context of Climate Change	SHAN Zhen-dong, LIU Dun, LUO Han, <i>et al.</i> (6215)
Meta-analysis on the Effects of Nitrogen Addition on Soil Organic Carbon Content in Terrestrial Ecosystems	YANG Ling-fang, KONG Dong-yan, DIAO Jing-wen, <i>et al.</i> (6226)
Effects of Biochar Application on Soil Organic Nitrogen Component and Active Nitrogen in <i>Eucalyptus</i> Plantations After Five Years in Northern Guangxi	CAO Yang, SHEN Yu-yi, CHEN Yun-shuang, <i>et al.</i> (6235)
Response of Organic Carbon Mineralization to Nitrogen Addition in Micro-aerobic and Anaerobic Layers of Paddy Soil	MAO Wan-qiong, XIA Yin-hang, MA Chong, <i>et al.</i> (6248)
Effects of Conservation Tillage on Herbicide Residues in Maize Field Soil	LIU Yuan, WANG Zu-cheng, LIU Mei-hua, <i>et al.</i> (6257)
Research Progress on Toxicity of Microplastics in Soil to Terrestrial Plants and Their Degradation Mechanism	LIU Wei, LI Yu-xin, RONG Sa-shuang, <i>et al.</i> (6267)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Microplastics in Soil in Danjiangkou Reservoir Area of South-to-North Water Diversion Project	WANG Feng, GONG Wei, LIU Zhe, <i>et al.</i> (6279)
Accumulation Characteristics, Sources, and Health Risks of Soil Lead of Urban Parks in Beijing	AN Jiang-mei-duo, ZHANG Rui-qing, GUO Guang-hui, <i>et al.</i> (6287)
Vertical Migration Characteristics and Fate of Heavy Metals from Zinc Smelting Slag in Soil Profile	YANG Ai-ping, WANG Xiao-yan, XIAO Xi-yuan, <i>et al.</i> (6297)
Ecological Risk Assessment and Migration and Accumulation Characteristics of Heavy Metals in Farmland Soil-crop System from Typical Pyrite Mining Area	CHENG Xiao-meng, ZHAO Chen, WU Chao, <i>et al.</i> (6309)
Interaction and Transport Characteristics of Lead and Cadmium in Different Soil-wheat Systems	KOU Meng, FAN Yu, SU Meng-xian, <i>et al.</i> (6319)
Distribution and Transport of Cadmium and Arsenic in Different Aboveground Parts of Wheat After Flowering	WANG Qiu-shi, HUA Gui-li, LI Xiang-yu, <i>et al.</i> (6328)
Effects of Vegetation Types and Seasonal Dynamics on the Diversity and Function of Soil Bacterial Communities in the Upper Reaches of the Heihe River	WANG Zhu, LIU Yang, WANG Fang, <i>et al.</i> (6339)
Ecological Responses of Soil Bacterial Communities to Heavy Metal Contamination Surrounding a Typical Coal-based Industrial Region	ZHENG Dan-feng, LIU Di, SU Chao, <i>et al.</i> (6354)
Effects of Aeration Methods on Microbial Diversity and Community Structure in Rice Rhizosphere	XIAO De-shun, XU Chun-mei, WANG Dan-ying, <i>et al.</i> (6362)
Response of Nitrification Potential and Ammonia Oxidation Microbial Community in Purple Soils to the Application of Biochar Combined with Chemical Fertilizer and Manure	LI Yue, WANG Zi-fang, JIA Li-juan, <i>et al.</i> (6377)
Effect of Continuous Cropping on the Physicochemical Properties, Microbial Activity, and Community Characteristics of the Rhizosphere Soil of <i>Codonopsis pilosula</i>	YANG Yang, LI Hai-liang, MA Kai-li, <i>et al.</i> (6387)
Effect of Manure Application on the Adsorption of Antibiotics to Soil	LUO Shan, HU Jin-sheng, TANG Xiang-yu, <i>et al.</i> (6399)
Relationship Between Carbon Emissions and Economic Development of Industrial Parks Based on Decoupling Index	CHEN Si-yu, LIU Jing-ru, SUN Guang-ming (6412)
Characteristics of Municipal Solid Waste in Some Urban Agglomeration in the Past Five Years	WANG Xiao-bo, LIU An-qi, ZHONG Hui-qiong, <i>et al.</i> (6421)