

目次

|                                                                |                                                            |
|----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| 气候变化对中国夏季臭氧影响                                                  | 胡安琪, 谢晓栋, 龚康佳, 侯宇晖, 胡建林 (1801)                             |
| 基于 EOF 分解和 KZ 滤波的 2019~2021 年中国臭氧时空变化及驱动因素分析                   | 王浩琪, 张裕芬, 罗忠伟, 王艳阳, 戴启立, 毕晓辉, 吴建会, 冯银厂 (1811)              |
| 华北工业城市夏季大气臭氧生成机制及减排策略                                          | 郑镇森, 姜建平, 张国涛, 李丽明, 徐勃, 杨文, 白志鹏 (1821)                     |
| 2015~2020 年中国城市 PM <sub>2.5</sub> -O <sub>3</sub> 复合污染时空演变特征   | 牛笑笑, 钟艳梅, 杨璐, 易嘉慧, 慕航, 吴倩, 洪松, 何超 (1830)                   |
| 2015~2021 年京津冀及周边地区 PM <sub>2.5</sub> 和臭氧复合污染时空特征分析            | 宋小涵, 燕丽, 刘伟, 贺晋瑜, 王亚晨, 黄同林, 李园园, 陈敏, 孟静静, 侯战方 (1841)       |
| 2000~2020 年中国典型经济区 PM <sub>2.5</sub> 时空变化及其与植被景观格局的关系          | 徐勇, 李欣怡, 黄雯婷, 郭振东, 盘钰春, 郑志威, 戴强玉 (1852)                    |
| 北京市核心区冬春季大气离子沉降量特征及来源解析                                        | 赵宇, 李贝贝, 黄玉虎, 梁静, 杨洪玲, 秦建平, 朱玲 (1865)                      |
| 南京近郊农田大气颗粒物及金属干沉降输入特征                                          | 刘翠英, 靳浩, 樊建凌 (1873)                                        |
| 西安冬季 PM <sub>2.5</sub> 中不同极性水溶性有机物的污染特征及氧化潜势                   | 罗玉, 黄沙沙, 张甜, 孙健, 沈振兴 (1882)                                |
| 机动车源和民用燃料源颗粒物中有机碳和元素碳的排放特征                                     | 王红磊, 刘思略, 孙杰娟, 刘煥武, 赵天良, 裴宇僊, 可玥, 武自豪, 刘诗云 (1890)          |
| 伊犁河谷核心区春季 PM <sub>2.5</sub> 组分特征及来源解析                          | 谷超, 徐涛, 马超, 伊布提哈尔·加帕尔, 郭丽瑶, 李新琪, 杨文 (1899)                 |
| 基于高分辨率网格的郑州市城镇居民 PM <sub>2.5</sub> 暴露浓度与健康风险变化评估               | 李媛, 徐艺斐, 袁明浩, 苏方成, 王申博, 王克, 张瑞芹 (1911)                     |
| 基于多源数据融合的河南省建材行业排放清单                                           | 刘晓, 胡京南, 王红梅, 杨丽, 张皓 (1924)                                |
| 开封市城区冬季大气挥发性有机物污染特征及来源解析                                       | 施雨其, 郑凯允, 丁玮婷, 刘金平, 陈洪光, 高光, 王玲玲, 王楠, 马双良, 郑瑶, 谢绍东 (1933)  |
| 2020 年和 2021 年南京城区臭氧生成敏感性和 VOCs 来源变化分析                         | 陆晓波, 王鸣, 丁峰, 喻义勇, 张哲海, 胡崑 (1943)                           |
| 北京市城区夏季大气 VOCs 变化特征及臭氧生成潜势                                     | 张蕊, 孙雪松, 王裕, 王飞, 罗志云 (1954)                                |
| 青岛市臭氧污染与非污染期间 VOCs 化学特征及来源解析                                   | 贾智海, 顾瑶, 孔翠丽, 宋江邦, 孟赫, 石来元, 吴建会, 刘保双 (1962)                |
| 基于总过氧自由基观测研究合肥市西郊夏季 O <sub>3</sub> 生成特征                        | 俞辉, 韦娜娜, 徐学哲, 刘芊芊, 姚易辰, 赵卫雄, 张为俊 (1974)                    |
| “大气十条”政策的节能降碳效果评估与创新中介效应                                       | 李少林, 王齐齐 (1985)                                            |
| 北京市减污降碳协同控制情景模拟和效应评估                                           | 俞珊, 张双, 张增杰, 翟艳芝, 刘桐坤 (1998)                               |
| 基于不同排放清单的长三角人为 CO <sub>2</sub> 排放模拟                            | 马心怡, 黄文晶, 胡凝, 肖薇, 胡诚, 张弥, 曹畅, 赵佳玉 (2009)                   |
| 武汉汉江水源水质变化趋势及风险分析                                              | 卓海华, 姜保峰, 徐杰, 陈洁, 陈杰, 兰秀薇, 范文重, 欧阳雪姣, 兰静 (2022)            |
| 长江武汉段水源地典型抗生素及抗性基因污染特征与生态风险评价                                  | 李柏林, 张贺, 王俊, 沙雪妮, 陈晓飞, 卓海华 (2032)                          |
| 陕北矿区典型河流多环芳烃的赋存特征、来源及毒性风险分析                                    | 吴喜军, 董颖, 赵健, 刘静, 张亚宁 (2040)                                |
| 典型湖泊有机聚集体时空特征及驱动因子                                             | 谢贵娟, 龚伊, 朱富成, 刘昌利, 卢宝伟, 邓辉, 汤祥明 (2052)                     |
| 桂林市不同功能型公园水体微塑料的分布特征及风险评估                                      | 李沛钊, 吴莉, 黄菲菲, 林才霞, 舒小华, 张倩 (2062)                          |
| 长江流域浮游植物群落的环境驱动及生态评价                                           | 张静, 胡愈圻, 胡圣, 黄杰 (2072)                                     |
| 环境异质性对三峡库区支流香溪河附石硅藻群落的影响及驱动作用                                  | 纪璐璐, 赵璐, 欧阳添, 杨宋琪, 郑保海, 杜雨欣, 李玉鑫, 李佳欣, 施军琼, 吴忠兴 (2083)     |
| 武汉市 3 种类型湖泊浮游植物群落特点及关键影响因素                                     | 张浩坤, 闵奋力, 崔慧荣, 彭雪, 张心怡, 张淑烟, 李竹栖, 葛芳杰, 张璐, 吴振斌, 刘碧云 (2093) |
| 重金属污染对不同生境中微生物群落结构的影响                                          | 何一凡, 肖新宗, 王佳文 (2103)                                       |
| 毫清河水体细菌群落的结构和分布特征                                              | 王森, 陈建文, 张红, 李君剑 (2113)                                    |
| 微塑料暴露对小棒短指软珊瑚 ( <i>Sinularia microclavata</i> ) 共生细菌群落结构和功能的影响 | 刘敏, 车文学, 曾映旭, 边伟杰, 吕淑果, 穆军 (2122)                          |
| 上海市从源头到龙头的饮用水新型污染物分布特征及健康风险评价                                  | 严棋 (2136)                                                  |
| 铝改性生物炭对水体低浓度氟的吸附特性                                             | 刘艳芳, 高玮, 刘蕊, 尹思婕, 张妙雨, 刘晓帅, 李再兴 (2147)                     |
| 典型雌激素在微塑料上的吸附特征及位点能量分布                                         | 刘姜艳, 郑密密, 胡嘉梧, 柳玉荣, 贺德春, 潘杰 (2158)                         |
| 面向工业园区废水臭氧氧化深度处理性能评价的模型污染物选择与评估                                | 辛勃, 单超, 吕路 (2168)                                          |
| 基于地理探测器和多源数据的耕地土壤重金属来源驱动因子及其交互作用识别                             | 张宏泽, 崔文刚, 刘绥华, 崔瀚文, 黄月美 (2177)                             |
| 基于 APCS-MLR 和 PMF 模型的煤矸山周边耕地土壤重金属污染特征及源解析                      | 马杰, 沈智杰, 张萍萍, 刘萍, 刘今朝, 孙静, 王玲灵 (2192)                      |
| 基于蒙特卡罗模拟的铅锌冶炼厂周边农田土壤重金属健康风险评估                                  | 黄剑波, 姜登登, 温冰, 王磊, 石佳奇, 周艳 (2204)                           |
| 基于 BP 神经网络预测北京市加油站周边土壤多环芳烃含量                                   | 马赛炎, 魏海英, 马瑾, 刘奇缘, 吴颐杭, 屈雅静, 田雨欣, 赵文浩 (2215)               |
| 石家庄市土壤中喹诺酮类抗生素时空分布及其风险评估                                       | 赵鑫宇, 陈慧, 赵波, 宋圆梦, 卢梦淇, 崔建升, 张璐璐, 李双江 (2223)                |
| 典型黑色岩系地质高背景区土壤和农产品重金属富集特征与污染风险                                 | 邓帅, 段佳辉, 宁墨兔, 谭林, 蒲刚, 陈际行, 齐小兵, 蒋尚智, 谢桃园, 刘意章 (2234)       |
| 岩溶区不同母质土壤 Cd 地球化学特征及玉米籽实 Cd 含量预测                               | 戴亮亮, 徐宏根, 巩浩, 彭志刚, 肖凯琦, 吴欢欢, 许青阳, 郭军, 汤媛媛, 张俊 (2243)       |
| 龙岩市不同利用类型土壤及农作物 Pb、Cd 和 As 污染风险与贡献分析                           | 王蕊, 陈楠, 张二喜 (2252)                                         |
| 小麦籽粒镉含量影响因素 Meta 分析和决策树分析                                      | 刘娜, 张少斌, 郭欣宇, 宁瑞艳 (2265)                                   |
| 黄土高原次生林演替过程土壤有机碳库及其化学组成响应特征                                    | 刘涵宇, 刘颖异, 张琦, 封伦, 高起乾, 任成杰, 韩新辉 (2275)                     |
| 短期氮磷添加对祁连山亚高山草地土壤呼吸组分的影响                                       | 江原, 甘小玲, 曹丰丰, 赵传燕, 李伟斌 (2283)                              |
| 黄河源区斑块退化高寒草甸土壤微生物多样性对长期封育的响应                                   | 杨鹏年, 李希来, 李成一, 段成伟 (2293)                                  |
| 不同海拔箭筈锦鸡儿根际和非根际土壤细菌群落多样性及 PICRUSt 功能预测                         | 李媛媛, 徐婷婷, 艾喆, 魏庐璐, 马飞 (2304)                               |
| 模拟酸雨及氮沉降对马尾松林土壤细菌群落结构及其多样性的影响                                  | 王楠, 钱少郁, 潘小承, 陈一磊, 白尚斌, 徐飞 (2315)                          |
| 磷石膏和碱渣对盐渍化土壤水盐及细菌群落结构的影响                                       | 刘月, 杨树青, 张万峰, 姜帅 (2325)                                    |
| 菌渣与化肥配施对稻田土壤微生物群落组成及多样性的影响                                     | 耿和田, 王旭东, 石思博, 叶正钱, 周文晶 (2338)                             |
| 增氧对不同秸秆还田稻田田面水养分动态及温室气体排放的影响                                   | 胡锦涛, 薛利红, 钱聪, 魏利祥, 曹帅 (2348)                               |
| 外源褪黑素对胁迫下水稻幼苗生长和抗氧化系统的影响                                       | 储玉檀, 李颜, 黄益宗, 保琼莉, 孙红羽, 黄永春 (2356)                         |
| 面向 2035 的节能与新能源汽车全生命周期碳排放预测评价                                  | 付佩, 兰利波, 陈颖, 郝卓, 邢云翔, 蔡旭, 张春梅, 陈轶嵩 (2365)                  |
| 农田土壤微塑料分布、来源和行为特征                                              | 薄录吉, 李冰, 张凯, 马荣辉, 李彦, 王艳芹, 孙斌, 刘月岩 (2375)                  |
| 农田土壤除草剂污染的修复技术研究进展                                             | 胡芳雨, 安婧, 王宝玉, 徐明恺, 张惠文, 魏树和 (2384)                         |
| 我国黑土地农田土壤除草剂残留特征研究及展望                                          | 李睿, 吴秋梅, 赵归梅, 胡文友, 田康, 黄标, 吴祥为, 刘峰, 赵玉国, 赵永存 (2395)        |
| 《环境科学》征订启事(1910)                                               | 《环境科学》征稿简则(1984)                                           |
| 信息                                                             | (2167, 2191, 2324)                                         |

# 开封市城区冬季大气挥发性有机物污染特征及来源解析

施雨其<sup>1</sup>, 郑凯允<sup>2</sup>, 丁玮婷<sup>2</sup>, 刘金平<sup>3</sup>, 陈洪光<sup>4</sup>, 高光<sup>4</sup>, 王玲玲<sup>5</sup>, 王楠<sup>5</sup>, 马双良<sup>5</sup>, 郑瑶<sup>5</sup>, 谢绍东<sup>1\*</sup>

(1. 北京大学环境科学与工程学院, 北京 100871; 2. 中科三清科技有限公司, 北京 100029; 3. 开封市生态环境监控指挥调度中心, 开封 475000; 4. 开封市生态环境局, 开封 475000; 5. 河南省生态环境监测中心, 郑州 450000)

**摘要:** 为探究开封市冬季大气挥发性有机物(VOCs)的污染特征及来源, 基于2021年12月至2022年1月开封市生态环境局(城区)在线监测站获取的大气VOCs组分数据, 阐述其VOCs污染特征和二次有机气溶胶生成潜势(SOAP), 利用PMF模型解析出VOCs的来源。结果表明, 冬季开封市 $\rho(\text{VOCs})$ 平均值为 $(104.71 \pm 48.56) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ , 其质量分数最高为烷烃(37.7%), 其次为卤代烃(23.5%)、芳香烃(16.8%)、OVOCs(12.6%)、烯烃(6.9%)和炔烃(2.6%)。VOCs对SOA的贡献平均值为 $3.18 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ , 其中芳香烃贡献率高达83.8%, 其次为烷烃(11.5%); 开封市冬季VOCs的最大人为排放来源为溶剂使用(17.9%), 其次为燃料燃烧(15.9%)、工业卤代烃排放(15.8%)、机动车排放(14.7%)、有机化学工业(14.5%)和LPG排放(13.3%); 溶剂使用源对SOAP的贡献率达到32.2%, 其次是机动车排放(22.8%)和工业卤代烃排放(18.9%)。可见, 降低溶剂使用、机动车排放和工业卤代烃排放的VOCs排放量是控制开封市冬季二次有机气溶胶生成的重要途径。

**关键词:** 挥发性有机化合物(VOCs); 二次有机气溶胶生成潜势(SOAP); 来源解析; 冬季; 开封市

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)04-1933-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202204083

## Pollution Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Winter in Kaifeng City

SHI Yu-qi<sup>1</sup>, ZHENG Kai-yun<sup>2</sup>, DING Wei-ting<sup>2</sup>, LIU Jin-ping<sup>3</sup>, CHEN Hong-guang<sup>4</sup>, GAO Guang<sup>4</sup>, WANG Ling-ling<sup>5</sup>, WANG Nan<sup>5</sup>, MA Shuang-liang<sup>5</sup>, ZHENG Yao<sup>5</sup>, XIE Shao-dong<sup>1\*</sup>

(1. College of Environmental Sciences and Engineering, Peking University, Beijing 100871, China; 2. 3Clear Technology Co., Ltd., Beijing 100029, China; 3. Kaifeng Ecological Environment Monitoring Command and Dispatch Center, Kaifeng 475000, China; 4. Kaifeng Municipal Bureau of Ecology and Environment, Kaifeng 475000, China; 5. Henan Province Ecology Environment Monitoring Center, Zhengzhou 450000, China)

**Abstract:** In order to explore the pollution characteristics and sources of atmospheric volatile organic compounds (VOCs) in winter in Kaifeng City, based on the atmospheric VOCs component data obtained from the online monitoring station of the Kaifeng Ecological and Environmental Bureau (Urban Area) from December 2021 to January 2022, the pollution characteristics of VOCs and secondary organic aerosol formation potential (SOAP) were discussed, and the sources of VOCs were analyzed by using the PMF model. The results showed that the average mass concentration of VOCs in winter in Kaifeng City was  $(104.71 \pm 48.56) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ , and alkanes (37.7%) had the highest proportion of mass concentrations, followed by that of halohydrocarbons (23.5%), aromatics (16.8%), OVOCs (12.6%), alkenes (6.9%), and alkynes (2.6%). The averaged total SOAP contributed by VOCs was  $3.18 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ , of which aromatics contributed as much as 83.8%, followed by alkanes (11.5%). The largest anthropogenic source of VOCs in winter in Kaifeng City was solvent utilization (17.9%), followed by fuel combustion (15.9%), industrial halohydrocarbon emission (15.8%), motor vehicle emission (14.7%), organic chemical industry (14.5%), and LPG emission (13.3%); solvent utilization contributed 32.2% of the total SOAP, followed by motor vehicle emission (22.8%) and industrial halohydrocarbon emission (18.9%). It was found that reducing VOCs emissions from solvent utilization, motor vehicle emission, and industrial halohydrocarbon emission was important to control the formation of secondary organic aerosols in winter in Kaifeng City.

**Key words:** volatile organic compounds (VOCs); secondary organic aerosol formation potential (SOAP); source apportionment; winter; Kaifeng City

我国大气污染联防联控和区域大气污染防治工作的相关研究结果已经表明, 挥发性有机物(volatile organic compounds, VOCs)是PM<sub>2.5</sub>和O<sub>3</sub>协同防控的关键污染物<sup>[1,2]</sup>。二次有机气溶胶(secondary organic aerosol, SOA)是PM<sub>2.5</sub>的重要组成部分, VOCs是生成SOA的关键前体物, 研究VOCs的组成和来源特征对控制PM<sub>2.5</sub>中的有机组分和揭示复合型大气污染的形成具有重要意义<sup>[3~6]</sup>。

城市大气VOCs的人为排放源通常包括生物质燃烧、化石燃料燃烧、工艺过程排放、溶剂使用、移动源、油品的储存和运输等<sup>[7,8]</sup>。城市之间由于工

业和能源结构不同, 来自人为活动的VOCs有显著差异<sup>[9]</sup>。为探究不同地区大气VOCs污染特征及来源, 已有许多研究在各地开展在线或离线VOCs观测实验, 探讨物种组成、浓度水平、时空分布及化学反应活性, 并运用正定矩阵因子分解(positive matrix factorization, PMF)模型解析其来源<sup>[10~13]</sup>。

目前国内关于VOCs的监测和研究主要集中在

收稿日期: 2022-04-07; 修订日期: 2022-07-16

基金项目: 大气重污染成因与治理攻关项目(DQGG202129)

作者简介: 施雨其(1994~), 女, 博士, 主要研究方向为大气污染与防治, E-mail: shiyuqi@pku.edu.cn

\* 通信作者, E-mail: sdxie@pku.edu.cn

长三角、珠三角和京津冀等地区<sup>[14~17]</sup>,华北平原的大部分研究集中在北京市,组分上看北京市浓度最高的 VOCs 物种为烷烃和芳香烃,夏季最主要的 VOCs 排放源为与机动车相关的源(汽车尾气和油气挥发),冬季燃料燃烧 VOCs 排放凸显,其次是工业生产(石化化工和工业涂装),而京郊和乡村地区机动车则相关占比较少,液化石油气(LPG)贡献有所升高;燃料燃烧和机动车相关源的 VOCs 排放是冬季 SOA 生成潜势的主要来源<sup>[18~22]</sup>. 刘新军等<sup>[23]</sup>研究发现未受疫情影响时的雄安地区冬季大气 VOCs 受溶剂使用(24%)和机动车尾气(21%)影响最大. 王蕾<sup>[24]</sup>研究发现石家庄市石油化工源对大气 VOCs 贡献率最高;VOCs 组分中 OVOCs (30.5%)和烷烃(27.3%)对浓度贡献率最高,芳香烃(99%)对 SOA 生成潜势贡献率最高. 李一丹等<sup>[25]</sup>对郑州市冬季大气 VOCs 观测后得出,OVOCs 和烷烃为主要组分,来源解析表明机动车排放、工业排放、燃烧源、溶剂使用和 LPG 使用,重污染期间工业排放和溶剂使用贡献率显著增高;芳香烃中的甲苯和间/对-二甲苯为 SOA 生成潜势最大的物种,溶剂使用为其最主要来源. Qin 等<sup>[26]</sup>对许昌市大气 VOCs 离线样品分析后发现,燃烧源(33.1%)贡献率最高,其次是 LPG 使用(19.3%);芳香烃对 SOA 生成的贡献率超过 95%. 位于华北平原腹地的大多数城市,例如开封市,对其冬季大气 VOCs 的污染特征研究甚少.

开封市地处中原城市群东部,黄河下游南岸,地势十分平坦,冬季不利的气象条件下  $PM_{2.5}$  污染突

出<sup>[27,28]</sup>. 2019~2020、2020~2021 和 2021~2022 年秋冬季,开封市  $\rho(PM_{2.5})$  平均值分别为 76、76 和  $74 \mu g \cdot m^{-3}$ ,浓度值在河南全省 18 地市中分别排名第 5 位、第 4 位和第 4 位. 因此,了解开封市冬季 VOCs 的污染现状和来源,并分析其对二次有机组分的贡献,对提出有针对性的控制措施具有重要意义.

本研究选取位于开封市城区生态环境局楼顶的 VOCs 组分在线监测站的实测数据,分析 2021 年 12 月至 2022 年 1 月大气 VOCs 浓度特征,利用源解析模型研究其来源,评估其 SOA 生成潜势,旨在为开封市冬季大气环境 VOCs 和  $PM_{2.5}$  污染管控提供科学支撑.

## 1 材料与方法

### 1.1 监测点位

监测点位于开封市鼓楼区万善街 2 号开封市生态环境局老局楼顶( $34.80^{\circ}N, 114.35^{\circ}E$ ),该点紧邻小吃街西司夜市、旅游景点包公祠和河南大学淮河医院,且距离鼓楼大型商圈仅有 1 500 m,人流量和车流量较大,是典型城市中心站点,如图 1 所示. 为针对性地分析开封市具有代表性的冬季大气 VOCs 污染特征及来源,剔除 2022 年 2 月冬奥会实行严格管控措施对人为活动的影响,选取 2021 年 12 月至 2022 年 1 月两个冬季月份的连续在线 VOCs 观测数据,其来自河南省区域大气综合观测分析及管理平台(<http://1.192.88.18:51234/henan/login.jsp>).

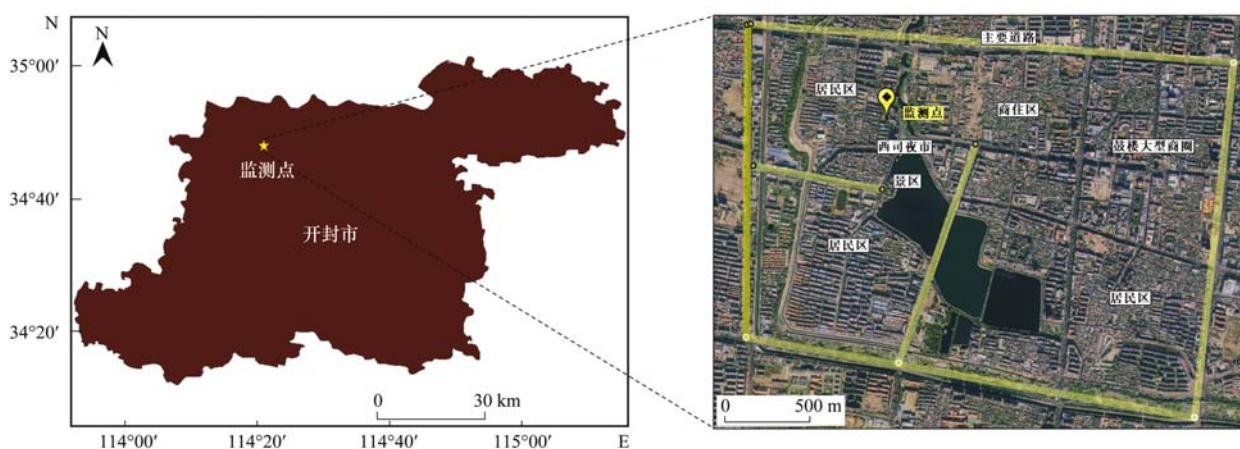


图 1 监测点位示意

Fig. 1 Location of sampling site

### 1.2 监测仪器设备及质控措施

开封市 VOCs 在线监测设备采用河北先河 XHVOC6000(前处理)以及岛津 GC/MS 气相色谱-质谱联用仪(后处理),开展采样频率为 1 h 的实时

连续监测. 检测仪器和质控体系均符合《环境空气挥发性有机物气相色谱连续监测系统技术要求及检测方法》(HJ 1010-2018)中样品采集、分析前处理和标样配制等相关的质量保证的有关要求. 前处理

过程为气样经过捕集管富集后,热脱附进入冷阱聚焦,再次热脱附进入气相色谱-质谱仪进行分析.后处理过程的气相色谱(GC)是一种分离技术,随着载气的流动,样品组分在运动中进行反复多次的分配或吸附/解附,利用物质的沸点、极性及吸附性质的差异来实现混合物的分离;质谱(MS)则利用离子源将样品分子电离,形成离子和碎片离子,再通过质量分析器按照质荷比的不同进行分离,最后在检测器部分产生信号,并放大、记录得到质谱图.标定时,系统采样设置应与环境空气采样一致,由低到高依次通入各个浓度点,记录各点响应,绘制强制过零点的标准曲线,要求所有组分相关系数  $R \geq 0.99$  (决定系数  $R^2 \geq 0.98$ ). 审核数据时,有效数据直接保留;存疑数据需对设备状态、运维和校准记录、谱图进行确认,若由于保留时间造成的数据异常,重积分后再次进行数据上传;若由于仪器性能等不满足要求造成的,直接做无效删除处理;若无法确认原因的其他存疑数据进行标记并注明理由,以备数据分析人员参考;无效数据直接进行删除处理,并标明无效数据判断原因;异常数据筛选及剔除后的有效数据上传入库.监测数据包含 113 种 VOCs,其中烷烃 29 种、烯烃 10 种、炔烃 1 种、芳香烃 16 种、卤代烃 35 种、OVOCs 21 种和有机硫 1 种,90% 以上的组分方法检出限在  $0.15 \times 10^{-9}$  以下,所有物种检出限均在  $0.33 \times 10^{-9}$  以下.最终在观测时间内,有效环境空气 VOCs 数据获取率为 88%,选取 92 种数据完整度高于 90% (烷烃 29 种、烯烃 10 种、炔烃 1 种、芳香烃 15 种、卤代烃 29 种、OVOCs 8 种) 的 VOCs 物种用于后续分析.

此外,开封市  $\text{PM}_{2.5}$  浓度数据来自中国空气质量在线监测分析平台 (<http://www.aqistudy.cn/#>);  $\text{PM}_{2.5}$  中有机碳和元素碳 (OC/EC) 浓度同样获取自河南省区域大气综合观测分析及管理平台,  $\text{PM}_{2.5}$  组分站采样点位于开封市世纪星幼儿园 ( $34.80^\circ\text{N}$ ,  $114.30^\circ\text{E}$ ).

### 1.3 VOCs 的 SOA 生成潜势

采用不同 VOCs 物种的产率计算 SOA 生成潜势 (secondary organic aerosols formation potential, SOAP):

$$\text{SOAP}_{i,j} = [\text{VOC}_i]_j \times Y_{\text{SOA},j} \quad (1)$$

式中,  $\text{SOAP}_{i,j}$  表示排放源  $i$  中物种  $j$  的 SOA 生成潜势;  $[\text{VOC}_i]_j$  表示排放源  $i$  中物种  $j$  的浓度或排放量,  $Y_{\text{SOA},j}$  表示物种  $j$  对应的 SOA 产率,其取值见文献[29].此外,  $\text{PM}_{2.5}$  中二次有机碳 (SOC) 浓度采用 EC 示踪法评估<sup>[30]</sup>,并用于后续与 SOAP 的对比讨论.

### 1.4 正交矩阵因子分解模型 (PMF)

选取 PMF 开展来源解析,其基本原理为:

$$\mathbf{x}_{ij} = \sum_{k=1}^p \mathbf{g}_{ik} \mathbf{f}_{kj} + \mathbf{e}_{ij} \quad (2)$$

式中,  $\mathbf{x}_{ij}$  表示  $i$  样品中  $j$  组分的浓度;  $\mathbf{g}_{ik}$  表示第  $k$  个源对第  $i$  个样品的相对贡献;  $\mathbf{f}_{kj}$  表示第  $k$  个排放源中  $j$  组分的含量;  $\mathbf{e}_{ij}$  表示残差.  $p$  表示源的个数,对于给定的  $p$  值求解以下目标函数的最小值,就可以得到  $\mathbf{g}_{ik}$  和  $\mathbf{f}_{kj}$  的结果.

$$Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left[ \frac{\mathbf{x}_{ij} - \sum_{k=1}^p \mathbf{g}_{ik} \mathbf{f}_{kj}}{\mathbf{u}_{ij}} \right]^2 \quad (3)$$

式中,  $n$  表示样品数量,  $m$  表示物种数量,  $p$  表示因子数,  $\mathbf{u}_{ij}$  表示每个原始数据中物种  $j$  在样品  $i$  中的不确定度.物种样品被当作一个  $n \times m$  的矩阵  $\mathbf{X}$ , 矩阵  $\mathbf{X}$  被分解为  $m \times p$  的源贡献矩阵  $\mathbf{G}$  和  $p \times n$  的污染源谱矩阵  $\mathbf{F}$ , 其中  $p$  表示因子个数. PMF 模型利用输入的 VOCs 数据矩阵  $\mathbf{X}$ , 通过寻找目标函数  $Q$  的最小值,找到符合  $\mathbf{X}$  的源贡献和污染源谱矩阵.

PMF 通常需要两个输入文件,分别为多组分的样品浓度文件和每种组分不确定性文件.不确定性文件根据 Polissar 等<sup>[31]</sup>的方法建立,该方法需要已知每种物种的方法检出限 (method detection limit, MDL) 和分析误差.当物种的浓度等于或小于 MDL 时,使用下式计算不确定度 (Uncertainty):

$$\text{Uncertainty} = (5/6) \times \text{MDL} \quad (4)$$

当物种的浓度大于 MDL 时,使用下式计算不确定性:

$$\text{Unvertainty} = [ (0.5 \times \text{MDL})^2 + (\text{Error fraction} \times \text{concentration})^2 ]^{1/2} \quad (5)$$

式中, concentration 为样品浓度, Error fraction 为样品误差,取经验值 20%.

本研究定义 VOC 物种为“Strong”、“Weak”和“Bad”,所有物种的默认值为“Strong”,“Weak”的不确定性将增加 3 倍,“Bad”在分析中被删除.根据输入文件,计算出每种物种的信噪比 (S/N),如果物种 50% 的样品无法检测到 ( $< \text{MDL}$ ) 或者其浓度始终低于不确定性 ( $S=0$ ),则不适用于 PMF 定义为“Bad”;也可依据其是否为特征物种和分析误差等信息来分类<sup>[32]</sup>;解析结果的稳定性和不确定性可以通过模型提供的位移方法和自举方法来估算和评价.

## 2 结果与讨论

### 2.1 大气 VOCs 的浓度水平及组成特征与 SOA 生成潜势

观测期间  $\rho$  (VOCs) 平均值为  $(104.71 \pm 48.56)$

$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,其 SOAP 估算值为  $(3.18 \pm 3.04) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . 图 2 给出了开封市观测期间逐日日均  $\text{PM}_{2.5}$  浓度,并对比了 SOAP 和  $\text{PM}_{2.5}$  中 SOC 浓度的日均值. SOA 是  $\text{PM}_{2.5}$  中的重要组分,许多 VOCs 物种可以经过大气光氧化和气/粒转化过程形成 SOA. SOC 为 SOA 中的碳质组分,SOAP 则为不同 VOCs 物种生成 SOA 能力的估算值. 总体上看,SOAP 高值的出现与  $\text{PM}_{2.5}$  和 SOC 有较高的一致性,表明本研究采用的 SOA 生成潜势评估方法能较好地反映出大气 VOCs 对  $\text{PM}_{2.5}$  中二次有机组分贡献的变化趋势. 图 3 进一步评估了 SOC 日均浓度和 SOAP 的线性关系,二者呈现明显的正相关,且浓度处于同一量级,但 SOAP 显著偏低 ( $k = 0.467$ ),再结合  $\text{PM}_{2.5}$  中二次

有机组分 (SOA) 浓度实际还要高于 SOC,表明本研究实测到的 VOCs 物种仅是  $\text{PM}_{2.5}$  中 SOA 的部分来源,未实测的半挥发性有机物、非本地生成的区域输送等因素对其也有十分显著的贡献<sup>[33~35]</sup>;此外,SOAP 和 SOC 相关系数偏低 ( $R^2 = 0.471$ ),主要由于 SOAP 只是评估 VOCs 各组分生成 SOA 能力强弱的指标,但不能用作在大气条件下评估实际 VOCs 的 SOA 生成量<sup>[9]</sup>. 总之,尽管真实大气中对  $\text{PM}_{2.5}$  中二次有机组分生成的影响因素众多,使用 SOAP 来量化开封市不同 VOCs 物种和来源对 SOA 形成的贡献率仍有较高的可信度,本研究使用该方法为开封市颗粒物污染控制提供有用的见解.

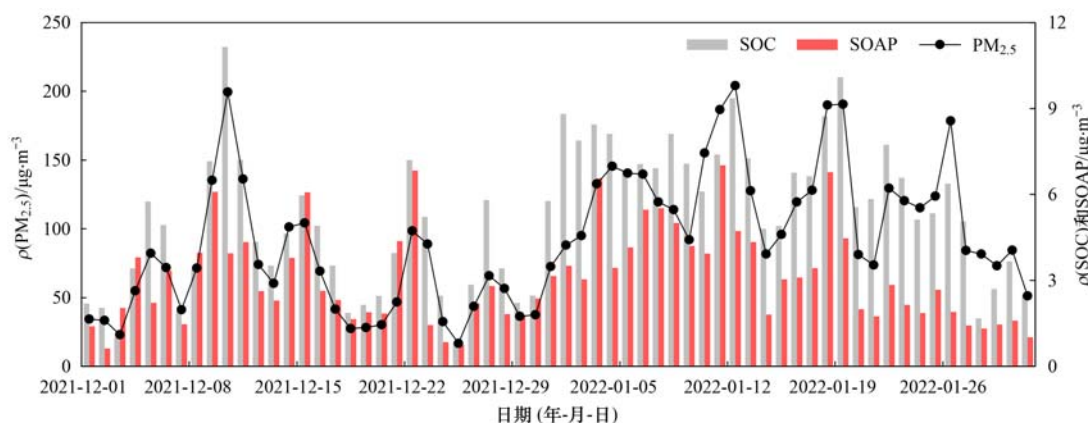


图 2 观测期间日均  $\text{PM}_{2.5}$  浓度和 SOAP 逐日对比

Fig. 2 Day-by-day comparison between daily average concentrations of  $\text{PM}_{2.5}$  and daily average SOAP during the observation period

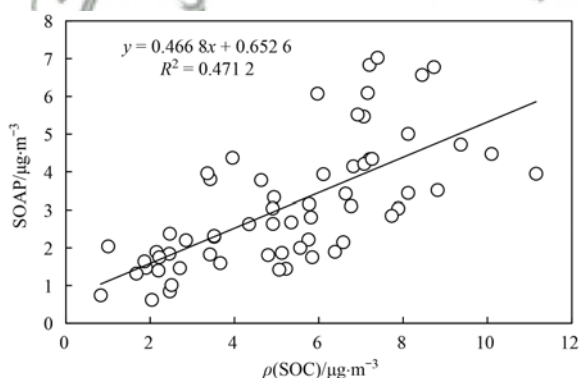


图 3 观测期间 SOC 日均浓度和 SOAP 的线性关系

Fig. 3 Linear relationship between daily average concentrations of SOC and daily average SOAP during the observation period

表 1 列出了浓度平均值前 10 的 VOCs 物种以及贡献 SOAP 前 10 的 VOCs 物种. 从中可知,观测期间 VOCs 浓度最高的物种是丙烷  $[(8.71 \pm 4.16) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}]$  和乙烷  $[(8.40 \pm 3.74) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}]$ , 其次为二氯甲烷  $[(6.59 \pm 6.68) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}]$ 、甲苯  $[(6.08 \pm 7.31) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}]$  和正丁烷  $[(5.94 \pm 3.24) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}]$ ; 对 SOAP 贡献最大的物种是甲苯  $[(2.19 \pm 2.63) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}]$ , 贡献率为 68.9%, 其次是间/对-

二甲苯  $[(0.20 \pm 0.15) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}]$ 、邻-二甲苯  $[(0.12 \pm 0.08) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}]$ 、1,3-丁二烯  $[(0.09 \pm 0.07) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}]$  和甲基环己烷  $[(0.08 \pm 0.06) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}]$ , 这 5 种 VOCs 物种占总 SOAP 的贡献率达到 83.8%. 大气中短链烷烃,如乙烷、丙烷和正丁烷的浓度水平较高,但对 SOAP 贡献很低,而长链烷烃和环烷烃在烷烃中浓度低但对 SOAP 有一定贡献,如甲基环己烷、正十二烷、正癸烷和十一烷;芳香烃中的甲苯虽然不是浓度最高的 VOCs 物种,但贡献了最多的 SOAP,间/对-二甲苯、邻-二甲苯、乙苯、苯也对 SOAP 有一定贡献;烯烃中的 1,3-丁二烯对 SOAP 也有所贡献. 因此控制芳香烃、环烷烃和长链烷烃等 VOCs 物种的排放是减少空气二次有机气溶胶生成的关键.

图 4 给出了观测期间 VOCs 组分的占比,其占比由大到小的顺序依次为:烷烃 (37.7%) > 卤代烃 (23.5%) > 芳香烃 (16.8%) > OVOCs (12.6%) > 烯烃 (6.9%) > 炔烃 (2.6%). 图 5 给出了观测站点大气中烷烃、烯烃、炔烃、芳香烃、卤代烃和 OVOCs 的日变化趋势,并绘制日变化误差带呈现其

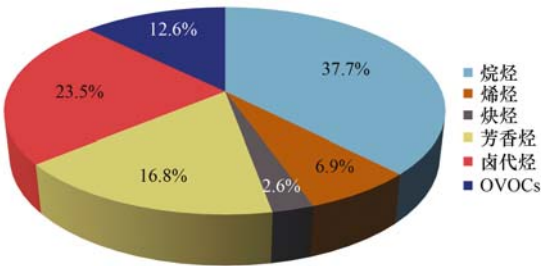


图4 观测期间不同 VOCs 组分占比  
Fig. 4 Proportion of different VOCs components during the observation period

相对误差. 其中,烷烃、烯烃和芳香烃日变化趋势与城市的生活和生产活动规律及日气象变化规律较为一致:清晨和傍晚出现两个峰值的日变化特征,主要由于这两时段人类活动的增强,如城市机动车和居民燃烧等,同时早晚大气较稳定,不利于 VOCs 的扩散;且中午和下午浓度低于夜间,主要由于中午及下午边界层抬升且对流增强,有利于污染物的扩散,同时紫外辐射变强也会对大气中烷烃、烯烃和芳香烃造成一定的消耗,因而浓度有所下降<sup>[36~38]</sup>. 炔烃也呈现中午和下午浓度略低的特征,但整体日变化不显著,可能其日变化主要受气象影响,而排放源强

变化不大. 卤代烃呈现出日间偏低和夜间偏高的特征,但清晨和傍晚没有出现峰值,表明其排放受城市居民每日生活规律影响偏小;结合开封市有较多原辅料含卤代烃的工业企业(如农药制造),卤代烃排放可能受工业生产影响较大<sup>[39]</sup>. 从烷烃、炔烃、卤代烃在中午和下午的浓度下降幅度较小看,冬季由扩散条件和辐射所引起的日变化不显著,因此在大

表1 观测期间主要 VOCs 物种的浓度平均值和贡献 SOA 生成主要 VOCs 物种的 SOAP/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

| Table 1 Average concentrations of major VOCs species and SOAP values of major VOCs species contributing to SOA formation during the observation period/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ |      |                 |         |                 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|-----------------|---------|-----------------|
| 序号                                                                                                                                                                                      | 组分   | 浓度平均值           | 组分      | SOAP            |
|                                                                                                                                                                                         |      | 数值              |         | 数值              |
| 1                                                                                                                                                                                       | 丙烷   | $8.71 \pm 4.16$ | 甲苯      | $2.19 \pm 2.63$ |
| 2                                                                                                                                                                                       | 乙烷   | $8.40 \pm 3.74$ | 间/对-二甲苯 | $0.20 \pm 0.15$ |
| 3                                                                                                                                                                                       | 二氯甲烷 | $6.59 \pm 6.68$ | 邻-二甲苯   | $0.12 \pm 0.08$ |
| 4                                                                                                                                                                                       | 甲苯   | $6.08 \pm 7.31$ | 1,3-丁二烯 | $0.09 \pm 0.07$ |
| 5                                                                                                                                                                                       | 正丁烷  | $5.94 \pm 3.24$ | 甲基环己烷   | $0.08 \pm 0.06$ |
| 6                                                                                                                                                                                       | 丙酮   | $5.21 \pm 2.92$ | 乙苯      | $0.06 \pm 0.04$ |
| 7                                                                                                                                                                                       | 苯    | $4.62 \pm 2.28$ | 正十二烷    | $0.06 \pm 0.03$ |
| 8                                                                                                                                                                                       | 乙醛   | $4.22 \pm 1.37$ | 正癸烷     | $0.06 \pm 0.04$ |
| 9                                                                                                                                                                                       | 氯甲烷  | $3.76 \pm 3.26$ | 正十一烷    | $0.06 \pm 0.04$ |
| 10                                                                                                                                                                                      | 乙烯   | $3.68 \pm 1.75$ | 苯       | $0.04 \pm 0.02$ |

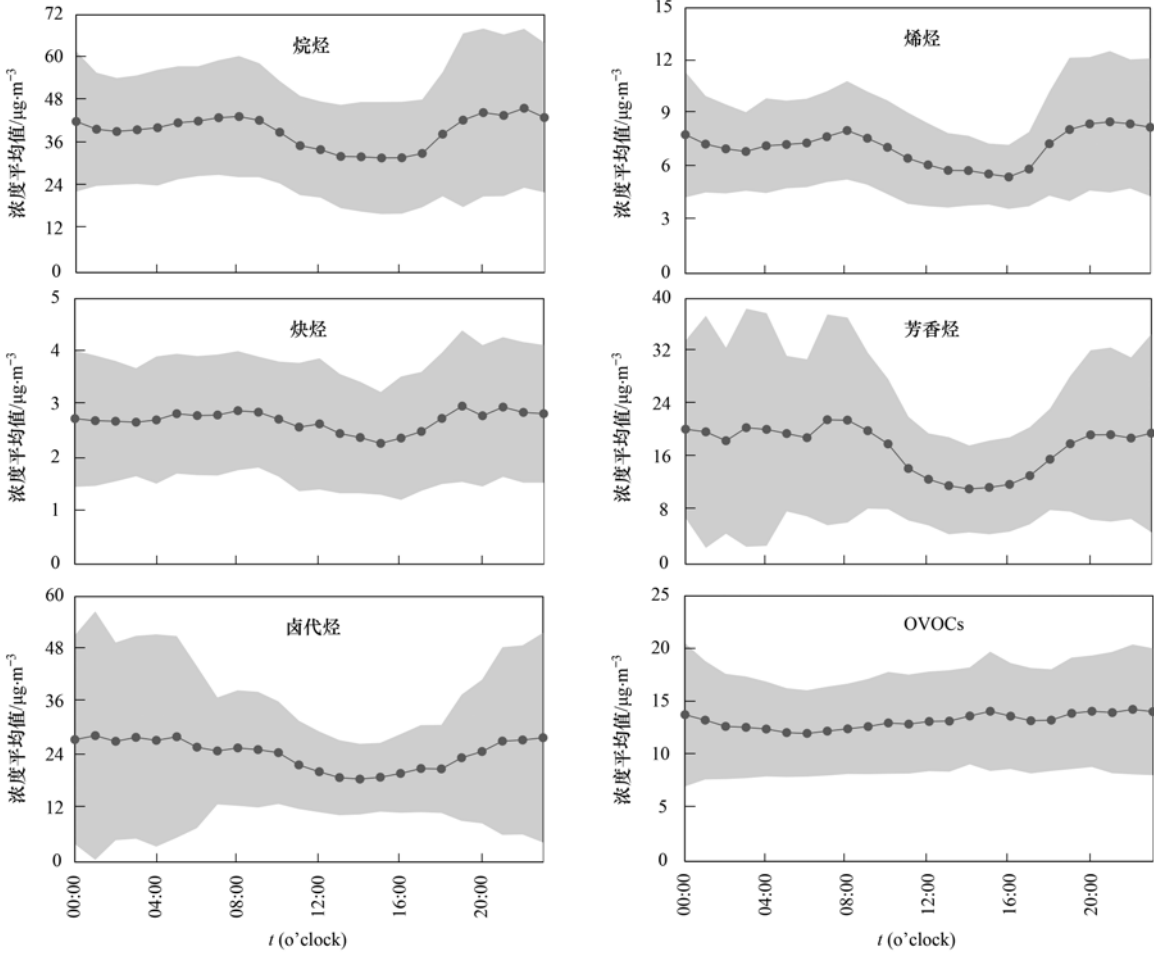


图5 观测期间 VOCs 各组分日变化特征及其相对误差  
Fig. 5 Diurnal variation characteristics and their relative errors of VOCs components during the observation period

气光化学反应相对较弱的冬季,OVOCs 也可能受中午和下午的二次生成贡献导致其没有明显的日变化特征<sup>[40]</sup>.

## 2.2 大气 VOCs 来源解析

对观测获得的 VOCs 数据,本研究选取观测期间逐时数据缺失比例小于 15%、低于检测限 (<MDL) 比例小于 50% 和来源指示性强的 VOCs

物种输入到 PMF 模型中进行源解析,选择 57 个物种,包括 25 种烷烃、6 种烯烃、1 种炔烃、6 种芳香烃、13 种卤代烃、6 种 OVOCs,最终识别出 7 类来源因子,各类因子的化学组成特征如图 6 所示,据此判别每个因子所代表的污染源,如下所述.

因子 1 主要为苯系物,包括甲苯、乙苯、间/对-二甲苯、邻-二甲苯和苯乙烯贡献率较高,这几类苯

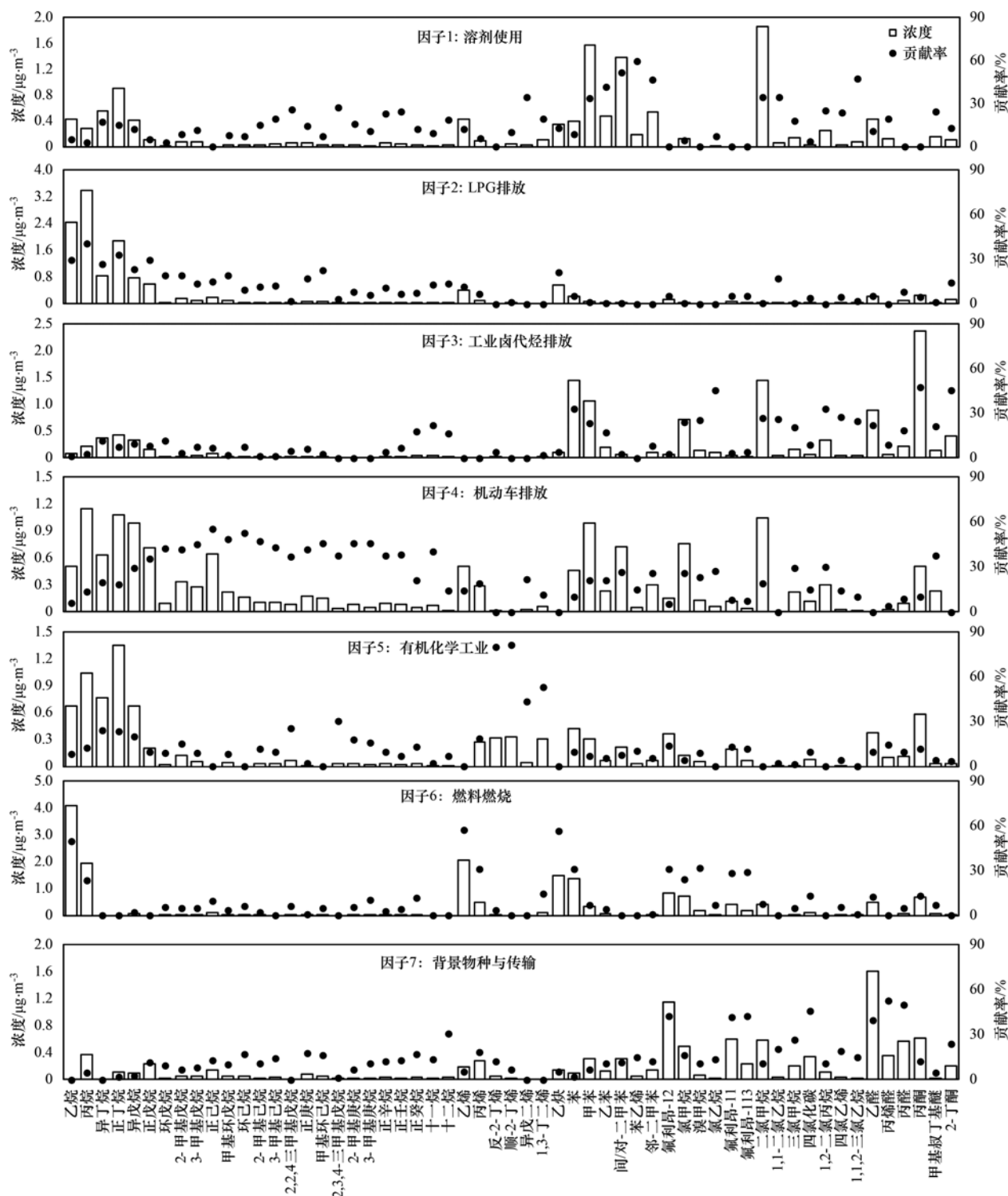


图 6 各因子中 VOCs 物种浓度及对各因子的贡献率

Fig. 6 Concentrations and contribution rates of VOC species for each factor

系物是沥青、家具喷涂和汽车喷涂行业常见的排放物种,且该源的 B/T 值仅为 0.26,因此将该因子归为溶剂使用源<sup>[41~44]</sup>。

因子 2 的 C2~C5 烷烃为优势组分,是 LPG 排放的主要物种,考虑到采样点周边环境,这些短链烷烃不仅来自 LPG 机动车,还可能来自附近夜市的居民 LPG 使用<sup>[45]</sup>。

因子 3 的卤代烃物种贡献最大,特别是氯甲烷、氯乙烷、二氯甲烷、三氯甲烷、二氯丙烷等,贡献率超过 40%,这几类物种除直接作为化工产品生产外,还常见于农药制造、医药制造等化工合成过程的副产物;该因子对苯、甲苯、丙酮、乙醛等常见于工业生产的物种也有较高的贡献率,因此将其识别为工业卤代烃排放<sup>[39]</sup>。

因子 4 贡献较大的物种是乙烷、丙烷、正/异丁烷、正/异戊烷、乙烯、丙烯、苯和甲苯,贡献率较高的是 C6 以上的长链烷烃;其中,几类短链烷烃是汽油内燃机燃烧产物,长链烷烃主要来自柴油车排放,而烯烃来自发动机不完全燃烧的产物;苯与甲苯的比值约为 0.47,符合典型的机动车排放比值;另外,甲基特丁基醚(MTBE)作为一种提高汽油辛烷值的汽油添加剂,其贡献率为 35% 以上,因此将此因子确定为机动车排放<sup>[46~49]</sup>。

因子 5 中,反-2-丁烯、顺-2-丁烯、1,3-丁二烯和苯乙烯等短链烯烃作为有机化工生产过程中的特征物种,在该因子中有极高的贡献率和浓度,该因子对主要来自工业生产的丙酮贡献也较高,因此该因子识别为有机化学工业<sup>[50~52]</sup>。

因子 6 中,乙烷、乙烯、乙炔、丙烷、丙烯和苯等不完全燃烧产物浓度和贡献率偏高,识别为燃料燃烧<sup>[53]</sup>。

因子 7 中,氟利昂-11、氟利昂-113、氟利昂-12、四氯化碳和三氯甲烷等区域背景的主要物质贡献率很高,同时该源对醛酮类、长链烷烃和苯系物也有一定贡献,可能受一定传输的影响,识别为背景物种与传输。

针对解析出的上述七类 VOCs 排放源,统计出了观测期间环境空气 VOCs 的源贡献,如图 7 所示。从中可以看出,观测期间 VOCs 源贡献最大的源为溶剂使用(17.9%),其次分别为燃料燃烧(15.9%)、工业卤代烃排放(15.8%)、机动车排放(14.7%)、有机化学工业(14.5%)、LPG 排放(13.3%)和背景物种和传输(7.8%)。

除背景物种和传输外,不同人为源的浓度贡献差异不大,但 VOCs 对 SOAP 的贡献存在显著差异,如图 8 所示。其中,溶剂使用排放的 VOCs 包含大量

甲苯在内的芳香烃,对 SOAP 的贡献率达到了 32.2%;机动车排放的 VOCs 以烷烃和芳香烃为主,对 SOAP 的贡献率仅次于溶剂使用,达到 22.8%;工业卤代烃排放的 VOCs 不仅包含大量的卤代烃,还伴随着较多的苯和甲苯,导致相关工业生产对 SOAP 的贡献率也十分突出,达到 18.9%。以上三类源 VOCs 总贡献率超过 48%,SOAP 总贡献率约为 74%,因此控制这三类源的 VOCs 排放既可以实现 VOCs 减排,又可以有效遏制 PM<sub>2.5</sub> 中二次有机组分的生成,是开封市冬季控制 SOA 生成潜势的重要途径。

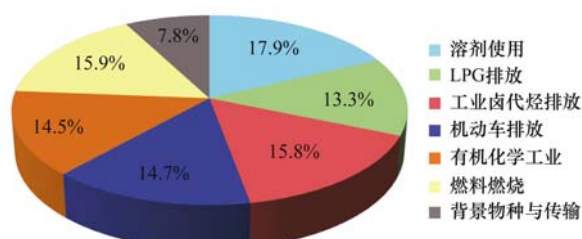


图 7 观测期间环境空气 VOCs 的源贡献率  
Fig. 7 Source contribution rate of ambient VOCs during observation period

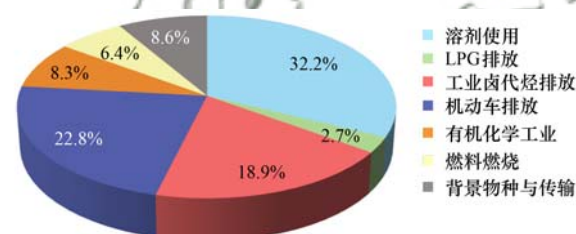


图 8 观测期间不同 VOCs 排放源对 SOAP 的贡献率  
Fig. 8 Contribution rate of different VOCs emission sources to SOAP during the observation period

此外,统计出了六类人为 VOCs 排放源在观测期间的日变化特征,如图 9 所示。其中,溶剂使用和机动车排放的日变化最为显著,日变化特征与人类活动密切相关,其中机动车排放 07:00~11:00 的早高峰更加显著,而下午浓度的降低可能是由于光化学反应消耗和边界层升高共同导致;有机化学工业也呈现出较为显著的日变化特征,下午同样出现浓度低值而傍晚至夜间浓度较高,可能与工业生产强度变化相关;LPG 排放整体日变化不明显,与机动车排放日变化有所不同,可能更大程度受居民 LPG 使用的影响,夜间浓度有所累积,而日间浓度略低于夜间;工业卤代烃排放没有显著的日变化特征,推测相关工业生产过程没有显著的日变化规律;燃料燃烧在下午时段略低于其它时间,整体变化不显著,该源主要来自于工业和居民的供热供暖。

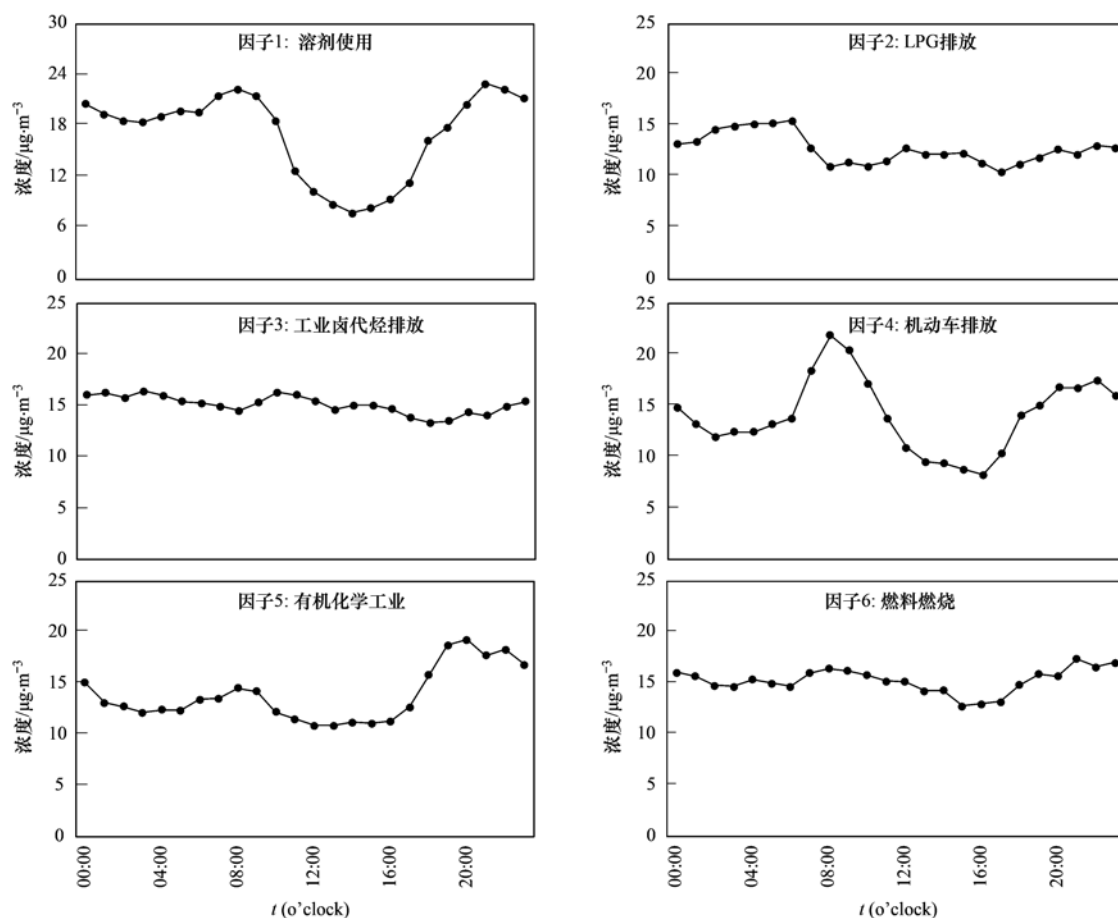


图9 观测期间不同人为 VOCs 排放源的日变化特征

Fig. 9 Diurnal variation characteristics of different anthropogenic VOCs emission sources during the observation period

### 3 结论

(1) 观测期间开封市  $\rho$  (VOCs) 平均值为  $(104.71 \pm 48.56) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ , 其中烷烃质量分数最高, 为 37.7%, 卤代烃质量分数为 23.5%, 芳香烃质量分数为 16.8%, OVOCs 质量分数为 12.6%. 烷烃、烯烃和芳香烃日变化趋势较为一致, 整体呈现早晚双峰的日变化规律, 受早晚较强人类活动的影响较大; 卤代烃和 OVOCs 日变化特征不明显, 可能主要与较为稳定的工业生产有较显著的相关关系. VOCs 物种中平均浓度水平最高的前 5 种是丙烷、乙烷、二氯甲烷、甲苯和正丁烷.

(2) 观测期间开封市大气 VOCs 对 SOAP 贡献最大的为芳香烃, 贡献率超过 80%, 其次是烷烃贡献率约为 11.5%. 分 VOCs 物种来看, 甲苯对 SOAP 的贡献最大, 贡献率达到总 SOAP 的 68.9%; 其次是间/对-二甲苯、邻-二甲苯、1,3-丁二烯和甲基环己烷.

(3) 开封市城区 VOCs 人为源贡献最大的为溶剂使用, 其次为燃料燃烧、工业卤代烃排放、机动车排放、有机化学工业和 LPG 排放, 且不同人为源贡献率差异不大, 均在 13%~18%. 从 SOAP 源贡献

看, 溶剂使用贡献率达到 32.2%, 其次是机动车排放 (22.8%) 和工业卤代烃排放 (18.9%). 因此, 控制开封市冬季二次气溶胶生成的重要途径, 是削减溶剂使用源、机动车排放源和工业卤代烃排放的 VOCs 排放量.

### 参考文献:

- [1] Peng J F, Hu M, Shang D J, *et al.* Explosive secondary aerosol formation during severe haze in the North China Plain [J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, **55** (4): 2189-2207.
- [2] 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.
- [3] Derwent R G, Jenkin M E, Utembe S R, *et al.* Secondary organic aerosol formation from a large number of reactive man-made organic compounds [J]. *Science of the Total Environment*, 2010, **408** (16): 3374-3381.
- [4] Yuan B, Hu W W, Shao M, *et al.* VOC emissions, evolutions and contributions to SOA formation at a receptor site in eastern China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13** (17): 8815-8832.
- [5] Hong Z Y, Hong Y W, Han Z, *et al.* Pollution characteristics and source apportionment of PM<sub>2.5</sub>-bound n-alkanes in the Yangtze River Delta, China [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2017, **17** (8): 1985-1998.
- [6] Atkinson R, Baulch D L, Cox R A, *et al.* Evaluated kinetic and

- photochemical data for atmospheric chemistry: Volume II - reactions of organic species [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2006, **6**(11): 3625-4055.
- [7] Wei W, Wang S X, Hao J M, *et al.* Projection of anthropogenic volatile organic compounds (VOCs) emissions in China for the period 2010-2020 [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(38): 6863-6871.
- [8] Wu R R, Bo Y, Li J, *et al.* Method to establish the emission inventory of anthropogenic volatile organic compounds in China and its application in the period 2008-2012 [J]. *Atmospheric Environment*, 2016, **127**: 244-254.
- [9] Wu R R, Xie S D. Spatial distribution of secondary organic aerosol formation potential in China derived from speciated anthropogenic volatile organic compound emissions [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, **52**(15): 8146-8156.
- [10] Gu Y, Liu B S, Dai Q L, *et al.* Multiply improved positive matrix factorization for source apportionment of volatile organic compounds during the COVID-19 shutdown in Tianjin, China [J]. *Environment International*, 2022, **158**, doi: 10.1016/j.envint.2021.106979.
- [11] He Z R, Wang X M, Ling Z H, *et al.* Contributions of different anthropogenic volatile organic compound sources to ozone formation at a receptor site in the Pearl River Delta region and its policy implications [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, **19**(13): 8801-8816.
- [12] Song Y, Shao M, Liu Y, *et al.* Source apportionment of ambient volatile organic compounds in Beijing [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, **41**(12): 4348-4353.
- [13] Zhang Z N, Man H Y, Qi L J, *et al.* Measurement and minutely-resolved source apportionment of ambient VOCs in a corridor city during 2019 China International Import Expo episode [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **798**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.149375.
- [14] Chen H M, Zhuang B L, Liu J, *et al.* Characteristics of ozone and particles in the near-surface atmosphere in the urban area of the Yangtze River Delta, China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, **19**(7): 4153-4175.
- [15] Li L, Hu J L, Li J Y, *et al.* Modelling air quality during the EXPLORE-YRD campaign-Part II. Regional source apportionment of ozone and PM<sub>2.5</sub> [J]. *Atmospheric Environment*, 2021, **247**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.118063.
- [16] Gao J J, Wang K, Wang Y, *et al.* Temporal-spatial characteristics and source apportionment of PM<sub>2.5</sub> as well as its associated chemical species in the Beijing-Tianjin-Hebei region of China [J]. *Environmental Pollution*, 2018, **233**: 714-724.
- [17] Yang S D, Li X, Song M D, *et al.* Characteristics and sources of volatile organic compounds during pollution episodes and clean periods in the Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **799**, doi:10.1016/j.scitotenv.2021.149491.
- [18] Li J, Hao Y F, Simayi M, *et al.* Verification of anthropogenic VOC emission inventory through ambient measurements and satellite retrievals [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, **19**(9): 5905-5921.
- [19] Shi Y Q, Xi Z Y, Simayi M, *et al.* Scattered coal is the largest source of ambient volatile organic compounds during the heating season in Beijing [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2020, **20**(15): 9351-9369.
- [20] Song Y, Dai W, Shao M, *et al.* Comparison of receptor models for source apportionment of volatile organic compounds in Beijing, China [J]. *Environmental Pollution*, 2008, **156**(1): 174-183.
- [21] Wang M, Shao M, Chen W, *et al.* Trends of non-methane hydrocarbons (NMHC) emissions in Beijing during 2002-2013 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, **15**(3): 1489-1502.
- [22] Yuan Z B, Lau A K H, Shao M, *et al.* Source analysis of volatile organic compounds by positive matrix factorization in urban and rural environments in Beijing [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2009, **114**(D2), doi: 10.1029/2008JD011190.
- [23] 刘新军, 王淑娟, 刘程, 等. COVID-19 疫情期间雄安新区 VOCs 的变化特征、臭氧生成潜势及来源解析 [J]. *环境科学*, 2022, **43**(3): 1268-1276.
- Liu X J, Wang S J, Liu C, *et al.* Characteristics, ozone formation potential, and source apportionment of VOCs during the COVID-19 epidemic in Xiong'an [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(3): 1268-1276.
- [24] 王蕾. 石家庄市 VOCs 污染特征及来源解析研究 [D]. 石家庄: 河北科技大学, 2019.
- [25] 李一丹, 尹沙沙, 张瑞芹, 等. 郑州市某城区冬季不同污染水平大气 VOCs 特征及源解析 [J]. *环境科学*, 2020, **41**(8): 3500-3510.
- Li Y D, Yin S S, Zhang R Q, *et al.* Characteristics and Source apportionment of VOCs at different pollution levels during the winter in an urban area in Zhengzhou [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(8): 3500-3510.
- [26] Qin J J, Wang X B, Yang Y R, *et al.* Source apportionment of VOCs in a typical medium-sized city in North China Plain and implications on control policy [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2021, **107**: 26-37.
- [27] 王洁, 王继志, 王宏, 等. 我国中原至华北平原冬季季雾-霾与北半球大气环流异常 [J]. *气象与环境科学*, 2017, **40**(4): 1-8.
- Wang J, Wang J Z, Wang H, *et al.* Winter fog-haze over the central plains and northern China plain associated with atmospheric circulation anomaly in Northern Hemisphere [J]. *Meteorological and Environmental Sciences*, 2017, **40**(4): 1-8.
- [28] 张唯, 熊险平, 刘炳杰, 等. 气象条件对华北平原持续性雾霾污染程度的影响研究 [J]. *环境科学与管理*, 2020, **45**(8): 34-38.
- Zhang W, Xiong X P, Liu B J, *et al.* Study on influence of meteorological conditions on persistent haze pollution in North China Plain [J]. *Environmental Science and Management*, 2020, **45**(8): 34-38.
- [29] Wu R R, Xie S D. Spatial distribution of Ozone formation in China derived from emissions of speciated volatile organic compounds [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **51**(5): 2574-2583.
- [30] Pio C, Cerqueira M, Harrison R M, *et al.* OC/EC ratio observations in Europe: Re-thinking the approach for apportionment between primary and secondary organic carbon [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(34): 6121-6132.
- [31] Polissar A V, Hopke P K, Paatero P, *et al.* Atmospheric aerosol over Alaska: 2. Elemental composition and sources [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1998, **103**(D15): 19045-19057.
- [32] Reff A, Eberly S I, Bhavsar P V. Receptor modeling of ambient particulate matter data using positive matrix factorization: review of existing methods [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*

- Association, 2007, **57**(2): 146-154.
- [33] Xing L, Fu T M, Cao J J, *et al.* Seasonal and spatial variability of the OM/OC mass ratios and high regional correlation between oxalic acid and zinc in Chinese urban organic aerosols [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13** (8): 4307-4318.
- [34] 谢绍东, 田晓雪. 挥发性和半挥发性有机物向二次有机气溶胶转化的机制[J]. *化学进展*, 2010, **22**(4): 727-733.  
Xie S D, Tian X X. Formation mechanism of secondary organic aerosols from the reaction of volatile and semi-volatile compounds [J]. *Progress in Chemistry*, 2010, **22**(4): 727-733.
- [35] 薛凡利. 2016-2018 年邯郸市 PM<sub>2.5</sub> 及其二次组分的污染特征研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2020.
- [36] 李凯, 潘宁, 梅如波, 等. 泰安市大气挥发性有机物污染特征及来源解析[J]. *环境化学*, 2022, **41**(2): 482-490.  
Li K, Pan N, Mei R B, *et al.* Characteristics and source apportionment of ambient volatile organic compounds in Taian [J]. *Environmental Chemistry*, 2022, **41**(2): 482-490.
- [37] 盛久江, 王飞, 李霞, 等. 北京城区夏冬两季 VOCs 时间变化和光化学特征的质子转移反应飞行时间质谱 (PTR-TOF-MS) 观测[J]. *环境化学*, 2019, **38**(7): 1590-1599.  
Sheng J J, Wang F, Li X, *et al.* The temporal variation and photochemical characters of VOCs in summer and winter of Beijing based on PTR-TOF-MS [J]. *Environmental Chemistry*, 2019, **38**(7): 1590-1599.
- [38] 金丹. 上海城郊夏季大气 VOCs 在臭氧生成中的作用[J]. *环境科学*, 2022, **43**(1): 132-139.  
Jin D. Role of atmospheric VOCs in ozone formation in summer in Shanghai suburb [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(1): 132-139.
- [39] 梁悦, 施雨其, 麦麦提·斯马义, 等. 农药制造企业的挥发性有机物排放特征及控制研究[J]. *环境污染与防治*, 2021, **43**(10): 1238-1243, 1248.  
Liang Y, Shi Y Q, Simayi M, *et al.* Study on emission characteristics and control of volatile organic compounds in a pesticide manufacturing enterprise [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2021, **43**(10): 1238-1243, 1248.
- [40] 李世杰. 淄博市大气挥发性有机化合物的污染特征、来源及臭氧生成敏感性分析[D]. 北京: 中国环境科学研究院, 2021.
- [41] Yang H H, Gupta S K, Dhital N B. Emission factor, relative ozone formation potential and relative carcinogenic risk assessment of VOCs emitted from manufacturing industries [J]. *Sustainable Environment Research*, 2020, **30** (1), doi: 10.1186/s42834-020-00068-2.
- [42] 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.
- [43] Cheng K, Hao W W, Yi P, *et al.* Volatile organic compounds emission from Chinese wood furniture coating industry: activity-based emission factor, speciation profiles, and provincial emission inventory [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2018, **18**(11): 2813-2825.
- [44] 赵锐, 黄络萍, 张建强, 等. 成都市典型溶剂源使用行业 VOCs 排放成分特征 [J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(3): 1147-1154.  
Zhao R, Huang L P, Zhang J Q, *et al.* Emissions characteristics of volatile organic compounds (VOCs) from typical industries of solvent use in Chengdu City [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(3): 1147-1154.
- [45] Yao D W, Lyu X P, Murray F, *et al.* Continuous effectiveness of replacing catalytic converters on liquified petroleum gas-fueled vehicles in Hong Kong [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **648**: 830-838.
- [46] Liu H, Man H Y, Cui H Y, *et al.* An updated emission inventory of vehicular VOCs and IVOCs in China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, **17**(20): 12709-12724.
- [47] Mo Z W, Shao M, Lu S H. Compilation of a source profile database for hydrocarbon and OVOC emissions in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2016, **143**: 209-217.
- [48] Zhang Y L, Wang X M, Zhang Z, *et al.* Species profiles and normalized reactivity of volatile organic compounds from gasoline evaporation in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **79**: 110-118.
- [49] Ou J M, Zheng J Y, Li R R, *et al.* Speciated OVOC and VOC emission inventories and their implications for reactivity-based ozone control strategy in the Pearl River Delta region, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **530-531**: 393-402.
- [50] Mo Z W, Shao M, Lu S H, *et al.* Process-specific emission characteristics of volatile organic compounds (VOCs) from petrochemical facilities in the Yangtze River Delta, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **533**: 422-431.
- [51] Zheng J Y, Yu Y F, Mo Z W, *et al.* Industrial sector-based volatile organic compound (VOC) source profiles measured in manufacturing facilities in the Pearl River Delta, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2013, **456-457**: 127-136.
- [52] Hsu Y C, Chen S K, Tsai J H, *et al.* Determination of volatile organic profiles and photochemical potentials from chemical manufacture process vents [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2007, **57**(6): 698-704.
- [53] 孙树睿. 典型燃烧源 VOCs 排放特征及污控设施影响研究 [D]. 西安: 长安大学, 2021.

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                           |                                                             |        |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|--------|
| Impact of Climate Change on Summer Ozone in China                                                                                                                         | HU An-qi, XIE Xiao-dong, GONG Kang-jia, <i>et al.</i>       | (1801) |
| Spatial-temporal Variation and Driving Factors of Ozone in China from 2019 to 2021 Based on EOF Technique and KZ Filter                                                   | WANG Hao-qí, ZHANG Yu-fen, LUO Zhong-wei, <i>et al.</i>     | (1811) |
| Photochemical Mechanism and Control Strategy Optimization for Summertime Ozone Pollution in an Industrial City in the North China Plain                                   | ZHENG Zhen-sen, DOU Jian-píng, ZHANG Guo-tao, <i>et al.</i> | (1821) |
| Spatiotemporal Evolution Characteristics of PM <sub>2.5</sub> -O <sub>3</sub> Compound Pollution in Chinese Cities from 2015 to 2020                                      | NIU Xiao-xiao, ZHONG Yan-mei, YANG Lu, <i>et al.</i>        | (1830) |
| Spatiotemporal Distribution Characteristics of Co-pollution of PM <sub>2.5</sub> and Ozone over BTH with Surrounding Area from 2015 to 2021                               | SONG Xiao-han, YAN Li, LIU Wei, <i>et al.</i>               | (1841) |
| Spatio-temporal Variation in PM <sub>2.5</sub> Concentration and Its Relationship with Vegetation Landscape Patterns in Typical Economic Zones in China from 2000 to 2020 | XU Yong, LI Xin-yi, HUANG Wen-ting, <i>et al.</i>           | (1852) |
| Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Ion Deposition During Winter and Spring in the Core Area of Beijing                                               | ZHAO Yu, LI Bei-bei, HUANG Yu-hu, <i>et al.</i>             | (1865) |
| Input Characteristics of Dry Deposition of Atmospheric Particulates and Metals in Farmland in the Suburb of Nanjing                                                       | LIU Cui-ying, JIN Hao, FAN Jian-ling                        | (1873) |
| Pollution Characterizations and Oxidative Potentials of Water-Soluble Organic Matters at Different Polarity Levels in Winter PM <sub>2.5</sub> Over Xi'an                 | LUO Yu, HUANG Sha-sha, ZHANG Tian, <i>et al.</i>            | (1882) |
| Emission Characteristics of Organic Carbon and Elemental Carbon in PM <sub>10</sub> and PM <sub>2.5</sub> from Vehicle Exhaust and Civil Combustion Fuels                 | WANG Hong-lei, LIU Si-han, SUN Jie-juan, <i>et al.</i>      | (1890) |
| Characteristics and Source Apportionment of PM <sub>2.5</sub> in the Core Area of Ili River Valley in Spring                                                              | GU Chao, XU Tao, MA Chao, <i>et al.</i>                     | (1899) |
| Evaluation of Changes in PM <sub>2.5</sub> Exposure Concentration and Health Risk for Urban Resident in Zhengzhou Based on High Spatial Resolution Grids                  | LI Yuan, XU Yi-fei, YUAN Ming-hao, <i>et al.</i>            | (1911) |
| Emission Inventory of Building Material Industry in Henan Province Based on Multi-source Data Integration                                                                 | LIU Xiao, HU Jing-nan, WANG Hong-mei, <i>et al.</i>         | (1924) |
| Pollution Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Winter in Kaifeng City                                                    | SHI Yu-qi, ZHENG Kai-yun, DING Wei-ting, <i>et al.</i>      | (1933) |
| Changes in O <sub>3</sub> -VOCs-NO <sub>x</sub> Sensitivity and VOCs Sources at an Urban Site of Nanjing Between 2020 and 2021                                            | LU Xiao-bo, WANG Ming, DING Feng, <i>et al.</i>             | (1943) |
| Variation Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient VOCs in Urban Beijing in Summer                                                                        | ZHANG Rui, SUN Xue-song, WANG Yu, <i>et al.</i>             | (1954) |
| Chemical Characteristics and Source Apportionment for VOCs During the Ozone Pollution Episodes and Non-ozone Pollution Periods in Qingdao                                 | JIA Zhi-hai, GU Yao, KONG Cui-li, <i>et al.</i>             | (1962) |
| Characteristics of O <sub>3</sub> Production in the Western Suburb of Hefei in Summer Based on the Observation of Total Peroxy Radical                                    | YU Hui, WEI Na-na, XU Xue-zhe, <i>et al.</i>                | (1974) |
| Evaluation of Energy Saving and Carbon Reduction Effect of Air Pollution Prevention and Control Action Plan and Innovation Intermediary Effect                            | LI Shao-lin, WANG Qi-qi                                     | (1985) |
| Scenario Simulation and Effects Assessment of Co-control on Pollution and Carbon Emission Reduction in Beijing                                                            | YU Shan, ZHANG Shuang, ZHANG Zeng-jie, <i>et al.</i>        | (1998) |
| Simulation of Anthropogenic CO <sub>2</sub> Emissions in the Yangtze River Delta Based on Different Emission Inventories                                                  | MA Xin-yi, HUANG Wen-jing, HU Ning, <i>et al.</i>           | (2009) |
| Water Quality Change Trend and Risk Analysis of Wuhan Hanjiang River Water Source                                                                                         | ZHUO Hai-hua, LOU Bao-feng, XU Jie, <i>et al.</i>           | (2022) |
| Pollution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics and Resistance Genes in Different Water Sources in the Wuhan Section of the Yangtze River                    | LI Bo-lin, ZHANG He, WANG Jun, <i>et al.</i>                | (2032) |
| Occurrence Characteristics, Sources, and Toxicity Risk Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Typical Rivers of Northern Shaanxi Mining Area, China              | WU Xi-jun, DONG Ying, ZHAO Jian, <i>et al.</i>              | (2040) |
| Spatio-temporal Characteristics of Organic Aggregates and the Driving Factors in Typical Lakes                                                                            | XIE Gui-juan, GONG Yi, ZHU Fu-cheng, <i>et al.</i>          | (2052) |
| Distribution Characteristics and Risk Assessment of Microplastics in Water of Different Functional Parks in Guilin                                                        | LI Pei-zhao, WU Li, HUANG Fei-fei, <i>et al.</i>            | (2062) |
| Environmental Driving Factors and Assessment on the Aquatic Ecosystem of Periphytic Algae of Six Inflow Rivers in Yangtze River Basin                                     | ZHANG Jing, HU Yu-xin, HU Sheng, <i>et al.</i>              | (2072) |
| Influence and Driving of Environmental Heterogeneity on the Epilithic Diatom Community in Xiangxi River, a Tributary of the Three Gorges Reservoir Area                   | JI Lu-lu, ZHAO Lu, OUYANG Tian, <i>et al.</i>               | (2083) |
| Characteristics of Phytoplankton Communities and Key Impact Factors in Three Types of Lakes in Wuhan                                                                      | ZHANG Hao-kun, MIN Fen-li, CUI Hui-rong, <i>et al.</i>      | (2093) |
| Effects of Heavy Metal Pollution on the Structure of Microbial Communities in Different Habitats                                                                          | HE Yi-fan, XIAO Xin-zong, WANG Jia-wen                      | (2103) |
| Structure and Distribution Characteristics of Bacterial Community in Boqing River Water                                                                                   | WANG Sen, CHEN Jian-wen, ZHANG Hong, <i>et al.</i>          | (2113) |
| Effects of Microplastic Exposure on the Community Structure and Function of Symbiotic Bacteria in <i>Sinularia microclavata</i>                                           | LIU Min, CHE Wen-xue, ZENG Ying-xu, <i>et al.</i>           | (2122) |
| Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Emerging Contaminants from Raw Water to Drinking Water in Shanghai                                             | YAN Qi                                                      | (2136) |
| Adsorption Characteristics of Fluoride in Low-Concentration Water by Aluminum and Zirconium-Modified Biochar                                                              | LIU Yan-fang, GAO Wei, LIU Rui, <i>et al.</i>               | (2147) |
| Sorption Characteristics and Site Energy Distribution Theory of Typical Estrogens on Microplastics                                                                        | LIU Jiang-yan, ZHENG Mi-mi, HU Jia-wu, <i>et al.</i>        | (2158) |
| Selection and Evaluation of Model Pollutants for Performance Assessment of Advanced Treatment of Industrial Park Wastewater by Ozonation                                  | XIN Bo, SHAN Chao, LÜ Lu                                    | (2168) |
| Identifying Driving Factors and Their Interacting Effects on Sources of Heavy Metal in Farmland Soils with Geodetector and Multi-source Data                              | ZHANG Hong-ze, CUI Wen-gang, LIU Sui-hua, <i>et al.</i>     | (2177) |
| Pollution Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in Farmland Soils Around the Gangue Heap of Coal Mine Based on APCS-MLR and PMF Receptor Model         | MA Jie, SHEN Zhi-jie, ZHANG Ping-ping, <i>et al.</i>        | (2192) |
| Contamination and Probabilistic Health Risk Assessment of Heavy Metals in Agricultural Soils Around a Lead-Zinc Smelter                                                   | HUANG Jian-bo, JIANG Deng-deng, WEN Bing, <i>et al.</i>     | (2204) |
| Prediction of PAHs Content in Soil Around Gas Stations in Beijing Based on BP Neural Network                                                                              | MA Sai-yan, WEI Hai-ying, MA Jin, <i>et al.</i>             | (2215) |
| Spatial-temporal Distribution and Risk Assessment of Quinolones Antibiotics in Soil of Shijiazhuang City                                                                  | ZHAO Xin-yu, CHEN Hui, ZHAO Bo, <i>et al.</i>               | (2223) |
| Accumulation and Pollution Risks of Heavy Metals in Soils and Agricultural Products from a Typical Black Shale Region with High Geological Background                     | DENG Shuai, DUAN Jia-hui, NING Mo-huan, <i>et al.</i>       | (2234) |
| Geochemical Characteristics of Cd in Different Parent Soils in Karst Area and Prediction of Cd Content in Maize                                                           | DAI Liang-liang, XU Hong-gen, GONG Hao, <i>et al.</i>       | (2243) |
| Pollution Risk and Contribution Analysis of Pb, Cd, and As in Soils and Crops Under Different Land Use Types in Longyan City                                              | WANG Rui, CHEN Nan, ZHANG Er-xi                             | (2252) |
| Influencing Factors of Cadmium Content in Wheat Grain: A Meta-analysis and Decision Tree Analysis                                                                         | LIU Na, ZHANG Shao-bin, GUO Xin-yu, <i>et al.</i>           | (2265) |
| Response Characteristics of Soil Organic Carbon Pool and Its Chemical Composition During Secondary Forest Succession in the Loess Plateau                                 | LIU Han-yu, LIU Ying-yi, ZHANG Qi, <i>et al.</i>            | (2275) |
| Effects of Short-Term Nitrogen and Phosphorus Addition on Soil Respiration Components in a Subalpine Grassland of Qilian Mountains                                        | JIANG Yuan, GAN Xiao-ling, CAO Feng-feng, <i>et al.</i>     | (2283) |
| Response of Soil Microbial Diversity to Long-term Enclosure in Degraded Patches of Alpine Meadow in the Source Zone of the Yellow River                                   | YANG Peng-nian, LI Xi-lai, LI Cheng-yi, <i>et al.</i>       | (2293) |
| Diversity and Predictive Functional of <i>Caragana jubata</i> Bacterial Community in Rhizosphere and Non-rhizosphere Soil at Different Altitudes                          | LI Yuan-yuan, XU Ting-ting, AI Zhe, <i>et al.</i>           | (2304) |
| Effects of Simulated Acid Rain and Nitrogen Deposition on Soil Bacterial Community Structure and Diversity in the Masson Pine Forest                                      | WANG Nan, QIAN Shao-yu, PAN Xiao-cheng, <i>et al.</i>       | (2315) |
| Effects of Phosphogypsum and <i>Suaeda salsa</i> on the Soil Moisture, Salt, and Bacterial Community Structure of Salinized Soil                                          | LIU Yue, YANG Shu-qing, ZHANG Wan-feng, <i>et al.</i>       | (2325) |
| Effects of Combined Application of Fungal Residue and Chemical Fertilizer on Soil Microbial Community Composition and Diversity in Paddy Soil                             | GENG He-tian, WANG Xu-dong, SHI Si-bo, <i>et al.</i>        | (2338) |
| Effects of Aeration on Surface Water Nutrient Dynamics and Greenhouse Gas Emission in Different Straw Returning Paddy Fields                                              | HU Jin-hui, XUE Li-hong, QIAN Cong, <i>et al.</i>           | (2348) |
| Effects of Exogenous Melatonin Treatment on the Growth and Antioxidant System of Rice Seedlings Under Antimony Stress                                                     | CHU Yu-tan, LI Yan, HUANG Yi-zong, <i>et al.</i>            | (2356) |
| Life Cycle Prediction Assessment of Energy Saving and New Energy Vehicles for 2035                                                                                        | FU Pei, LAN Li-bo, CHEN Ying, <i>et al.</i>                 | (2365) |
| Distribution, Sources, and Behavioral Characteristics of Microplastics in Farmland Soil                                                                                   | BO Lu-ji, LI Bing, ZHANG Kai, <i>et al.</i>                 | (2375) |
| Research Progress on the Remediation Technology of Herbicide Contamination in Agricultural Soils                                                                          | HU Fang-yu, AN Jing, WANG Bao-yu, <i>et al.</i>             | (2384) |
| Research Progress and Prospect of Herbicide Residue Characteristics in Black Soil Region of China                                                                         | LI Rui, WU Qiu-mei, ZHAO Gui-mei, <i>et al.</i>             | (2395) |