

南京北郊大气降水中水溶性无机氮和有机氮沉降特征

张佳颖, 于兴娜, 张毓秀, 丁铎, 侯思宇



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年7月

第43卷 第7期
Vol.43 No.7

目次

两种模式下中国未来发电行业发展情景及其环境效益分析	刘春景, 吕建毅, 赵汶畅, 徐卿, 金玉佳 (3375)
基于 LEAP 模型的兰州市道路交通温室气体与污染物协同减排情景模拟	庞可, 张芊, 马彩云, 祝禄祺, 陈恒葵, 孔祥如, 潘峰, 杨宏 (3386)
基于半级别的城市空气质量预报评估方法探讨	王晓彦, 朱莉莉, 许荣, 高愈霄, 朱媛媛, 汪巍, 刘冰 (3396)
厦门港大气 PM _{2.5} 中重金属污染特征及健康风险评价	肖思晗, 蔡美君, 李香, 黄屋, 王坚, 朱清墩, 吴水平 (3404)
南京北郊大气降水中水溶性无机氮和有机氮沉降特征	张佳颖, 于兴娜, 张毓秀, 丁铖, 侯思宇 (3416)
晋中盆地主要城市冬季 PM _{2.5} 传输特征分析	王小兰, 王雁, 闫世明, 岳江, 郭伟, 郝振荣 (3423)
鄂尔多斯市夏秋季黑碳气溶胶时间演变特征及其来源解析	孔祥晨, 张连霞, 张彩云, 王红磊, 许晶, 郑佳峰 (3439)
济源冬季 VOCs 污染特征、来源和 SOAP	王芳, 李利霞, 王红果, 赵宗生, 张建平, 张栋 (3451)
长株潭城区 8 月 VOCs 污染特征及来源分析	罗达通, 张青梅, 刘湛, 尤翔宇, 黄杰, 宋云飞, 张敬巧 (3463)
2019 年 7 月石家庄市 O ₃ 生成敏感性控制策略解析	朱家贤, 王晓琦, 欧盛菊, 张新宇 (3473)
华北平原 AOD 时空演化与影响因素	郭霖, 孟飞, 马明亮 (3483)
基于地基太阳光度计观测的长安区气溶胶光学特性变化及其与颗粒物浓度的关系	郑玉蓉, 王旭红, 崔思颖, 冯子豪, 张秀, 刘康 (3494)
基于长时序“地-星”数据的京津冀大气污染时空分布及演变特征	王耀庭, 殷振平, 郑祚芳, 李炬, 李青春, 孟春雷, 李威 (3508)
近十年洪泽湖富营养化状态变化趋势及原因分析	陈天宇, 刘常清, 史小丽, 李云, 范子武, 贾本有, 廖轶鹏 (3523)
高原湖泊周边浅层地下水: 磷素时空分布及驱动因素	杨恒, 李桂芳, 叶远行, 陈清飞, 崔荣阳, 张丹, 陈安强 (3532)
三峡水库不同支流库湾蓄水期溶解氧分层特性及差异性	纪道斌, 方娇, 龙良红, 杨正健, 赵星星, 杨霞, 郭亚丽 (3543)
典型喀斯特城市湖泊溶解性有机质成分特征及来源解析	倪茂飞, 周慧, 马永梅, 苏印, 王晓丹, 王志康 (3552)
骆马湖表层水和沉积物中全氟化合物赋存特征、来源及健康风险评估	黄家浩, 吴玮, 黄天寅, 陈书琴, 项颂, 庞燕 (3562)
千岛湖浮游植物群落结构的垂向分布特征及其影响因素	王吉毅, 霍翟, 国超旋, 朱广伟, 龚志军, 范亚文, 王建军 (3575)
泗河水系沉积物磷的存在形态及其空间分布特征	张子涵, 张鑫茹, 贾传兴, 甘延东, 王世亮 (3587)
降雨径流过程中土地利用优化配置对磷流失的影响	周豪, 陈方鑫, 罗义峰, 龙翼, 周继, 王小燕, 李丹丹, 陈晓燕 (3597)
典型生物滞留设施重金属累积分布特征与风险评价	储杨阳, 杨龙, 周媛, 王喜龙, 王嗣禹, 张敏 (3608)
筑坝蓄水对不同水深浮游微生物群落结构和种间互作模式的影响	王洵, 张佳佳, 袁秋生, 胡斌, 刘胜 (3623)
天津独流减河流域不同等级河流沉积物细菌区系及功能辨识	刘嘉元, 丰玥, 杨雪纯, 张彦, 李德生, 刘福德 (3635)
地表水悬浮态多环芳烃时空变化特征及主要输入源响应机制	彭珂醒, 李瑞飞, 周亦辰, 卓泽铭, 张晋, 李梅, 李雪 (3645)
北京市通州区河流中微塑料组成的空间分布及潜在来源解析	门聪, 李頔, 左剑恶, 邢薇, 刘梦瑶, 魏凡钦, 胡嘉敏, 谢珍雯, 邢鑫, 沈杨贵 (3656)
微塑料对鲫鱼生长、肝脏损伤和肠道微生物组成的影响	胡嘉敏, 左剑恶, 李金波, 张艳艳, 艾翔, 龚大惠, 张继文, 孙丁明 (3664)
不同类型脱水药剂对底泥固化效果和理化性质的影响	任俊, 殷鹏, 王威振, 唐婉莹, 尹洪斌, 朱丽娟 (3672)
微纳米粒径生物炭的结构特征及其对 Cd ²⁺ 吸附机制	马文艳, 裴鹏刚, 高歌, 孙约兵 (3682)
不同生物炭对磷的吸附特征及其影响因素	连宁海, 张树楠, 刘锋, 邢宏霖, 吴金水 (3692)
Mg-La-Fe/沸石复合材料的制备及其处理低浓度含磷废水的性能	印学杰, 宋小宝, 丁陈蔓, 冯彦房, 杨根, 何世颖, 薛利红 (3699)
一体式部分亚硝化-厌氧氨氧化工艺污泥膨胀发生和恢复过程中微生物群落演替及 PICRUS2 功能预测分析	李亚男, 闫冰, 郑蕊, 姚丽, 隋倩雯, 魏源送 (3708)
丝状菌膨胀污泥好氧颗粒化稳定性及微生物多样性	高春娣, 杨箫阳, 欧家丽, 韩颖璐, 程阳阳, 彭永臻 (3718)
2000~2020 年长江流域植被 NDVI 动态变化及影响因素探测	徐勇, 郑志威, 郭振东, 宴世卿, 黄雯婷 (3730)
近 40 年来福建省水稻土有效磷富集效应及潜在生态风险评估	陈中星, 邱龙霞, 陈瀚闾, 范协裕, 毋亭, 沈金泉, 邢世和, 张黎明 (3741)
土地利用变化对西南喀斯特土壤团聚体组成、稳定性以及 C、N、P 化学计量特征的影响	何宇, 盛茂根, 王轲, 王霖娇 (3752)
长江经济带矿山土壤重金属污染及健康风险评价	张浙, 卢然, 伍思扬, 贾智彬, 王宁 (3763)
煤矸石堆积区周边土壤重金属污染特征与植物毒性	尚誉, 桑楠 (3773)
燃煤工业区不同土地利用类型土壤汞含量污染评价	李强, 姚万程, 赵龙, 张朝, 张恩月, 苏迎庆, 刘庚 (3781)
广州市南沙区第四剖面镉富集特征及生物有效性	王芳婷, 包科, 黄长生, 赵信文, 顾涛, 曾敏 (3789)
黔西北山区耕地重金属健康风险评价及环境基准	徐梦琪, 杨文毅, 杨利玉, 陈勇林, 景灏楠, 吴攀 (3799)
土壤重金属生物可利用性影响因素及模型预测	张加文, 田彪, 罗晶晶, 吴凡, 张聪, 刘征涛, 王晓南 (3811)
添加有机物料对豫中烟田土壤呼吸的影响	鲁琪飞, 叶协锋, 韩金, 潘昊东, 张明杰, 王晶, 杨佳豪, 姚鹏伟, 李雪利 (3825)
不同稻作系统土壤的 CH ₄ 产生潜力与产生途径	沈皖豫, 黄琼, 马静, 张广斌, 徐华 (3835)
东部平原矿区复垦土壤微生物群落特征及其组装过程	马静, 董文雪, 朱燕峰, 肖栋, 陈浮 (3844)
同质环境下不同锦鸡儿属植物根际土壤细菌群落结构差异及其影响因素	李媛媛, 徐婷婷, 艾喆, 魏庐潞, 马飞 (3854)
岩溶与非岩溶区水稻土团聚体细菌群落结构和功能类群比较	肖筱怡, 靳振江, 冷蒙, 李雪松, 熊丽媛 (3865)
紫色土中微生物群落结构及功能特征对土壤 pH 的差异响应	王智慧, 蒋先军 (3876)
有机物料还田对稻田土壤 DOM 碳源代谢能力的影响	肖怡, 李峥, 黄容, 汤奥涵, 李冰, 王昌全 (3884)
《环境科学》征订启事 (3403) 《环境科学》征稿简则 (3462) 信息 (3493, 3655, 3834)	

济源冬季 VOCs 污染特征、来源和 SOAP

王芳¹, 李利霞¹, 王红果¹, 赵宗生¹, 张建平¹, 张栋^{2,3*}

(1. 河南省济源生态环境监测中心, 济源 459000; 2. 郑州大学化学学院, 郑州 450001; 3. 郑州大学环境科学研究院, 郑州 450001)

摘要: 重工业城市济源经常发生雾-霾污染事件. 挥发性有机化合物(VOCs)是二次有机气溶胶(SOA)生成的前体物, SOA 对细颗粒物(PM_{2.5})贡献约 15%~20%. 于 2019 年 12 月 1 日至 12 月 31 日在济源进行 PM_{2.5}、O₃、VOCs 和其他微量气体在线监测,并分析 VOCs 污染特征、来源和 SOA 生成潜势(SOAP). 济源观测到 φ (TVOC)平均值为 $(54.3 \pm 27.5) \times 10^{-9}$. 烷烃、卤代烃和炔烃是主要组分. 运用正交矩阵因子分解模型(PMF)识别并分配 VOCs 来源. 确定 8 个主要 VOCs 来源:液化石油气/天然气(LPG/NG)、聚氯乙烯(PVC)工业、机动车、焦化工业、溶剂使用、工业、工艺过程和油气挥发. 二次有机气溶胶生成潜势分析发现芳香烃对 SOAP 的贡献最大,其中苯系物(BTEX)对 SOAP 贡献最大.

关键词: 雾-霾; 济源; 正交矩阵模型(PMF); 二次有机气溶胶生成潜势(SOAP); 臭氧生成潜势(OFP)

中图分类号: X511 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2022)07-3451-12 **DOI:** 10.13227/j.hjxx.202109153

Characteristics, Sources, and SOAP of VOCs During Winter in Jiyuan

WANG Fang¹, LI Li-xia¹, WANG Hong-guo¹, ZHAO Zong-sheng¹, ZHANG Jian-ping¹, ZHANG Dong^{2,3*}

(1. Henan Jiyuan Ecological Environment Testing Center, Jiyuan 459000, China; 2. College of Chemistry, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 3. Institute of Environmental Sciences, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Haze pollution events often occur in the heavy industry city of Jiyuan. Volatile organic compounds (VOCs) are the precursors of secondary organic aerosol (SOA), which accounts for 15%-20% of particulate matter (PM_{2.5}). Here, PM_{2.5}, O₃, VOCs, and trace gases were monitored by using online instruments in Jiyuan from December 1st to 31st. The characteristics, sources, and secondary organic aerosol potential (SOAP) of VOCs were analyzed. The mean concentrations of TVOC were $(54.3 \pm 27.5) \times 10^{-9}$. Alkanes, halocarbons, and alkynes were the predominant VOCs. The positive matrix factorization model was used to identify and apportion VOCs sources. Eight major sources of VOCs were identified, which included liquefied petroleum gas (LPG) or natural gas (NG), the polyvinyl chloride (PVC) industry, vehicular exhaust, the coking industry, solvent usage, industry, technological process, and fuel evaporation. The SOAP of aromatics was the largest. Among them, BTEXs were the dominant contributors to SOAP.

Key words: haze; Jiyuan; positive matrix factorization (PMF); secondary organic aerosol formation potential (SOAP); ozone formation potential (OFP)

随着城市化、工业化和区域经济一体化进程不断加快,大量的氮氧化物和挥发性有机化合物(volatile organic compounds, VOCs)被释放到空气中,许多城市暴露于空气污染中^[1,2]. VOCs 是形成臭氧(O₃)和二次有机气溶胶(secondary organic aerosol, SOA)的关键前体物^[3]. SOA 是细颗粒的重要组成部分,是雾-霾污染的主要贡献者^[4]. 雾-霾污染严重影响许多城市^[5,6],对健康造成不利影响^[7].

不同地区 VOCs 的污染特征不同,为了提高不同地区的空气质量,了解 VOCs 污染状况和来源非常关键^[8]. 有研究表明,武汉地区 VOCs 的浓度具有明显的季节性和昼夜变化特征^[9],例如鹤山、北京和重庆人为源 VOCs 浓度通常在早晨和夜晚较高,自然源排放的 VOCs 通常在中午或下午在高温高辐射下达到最大浓度^[10~13]. 通过研究 VOCs 污染特性,发现 VOCs 的排在污染过程中起着关键作用. 雾-霾污染期间 VOCs 浓度急剧上升并维持在较高水平^[10,14]. VOCs 的排放源很多,有人为源和自然源^[15,16]. 人为排放源在城市大气中的贡献远大于自然排放源^[17],其中汽车尾气、燃料燃烧和蒸发、交

通排放、石化行业和溶剂使用等是典型的人为源^[18]. Zheng 等^[11]的研究表明,上海的 VOCs 有 5 个来源,石化行业是 VOCs 的最大来源,其次是汽车尾气和溶剂使用. 有研究对珠江三角洲 VOCs 的来源进行了详细分析^[19~21],发现溶剂使用、车辆排放和生物质燃烧是最主要的 3 个来源.

SOA 在冬季浓度较高^[22~25],对雾-霾产生有一定的贡献^[26]. 芳烃对二次有机气溶胶生成潜势(secondary organic aerosol potential, SOAP)的贡献占主要地位. Liu 等^[18]和 Hui 等^[27]对北京城区和武汉的 SOAP 研究表明,芳香烃对 SOAP 的贡献占比超过 97%. 徐虹等^[28]通过研究天津市 VOCs 对 SOA 的影响发现芳香烃类是对 SOA 形成影响最大的物种.

济源是一个重工业城市,主要产业有冶金、电力、建材、煤炭和化工等. 以上产业基本上是能源

收稿日期: 2021-09-16; 修订日期: 2021-12-01

作者简介: 王芳(1978~),女,工程师,主要研究方向为大气污染研究与治理, E-mail: 425948688@qq.com

* 通信作者, E-mail: sqzhangdong@126.com

消耗大和染物排放强度大的产业,这种以高耗能、高污染和资源消耗型为主的粗放经济增长方式带来的结构性污染问题难以在短时期内得到根本解决. 由于对重工业城市 VOCs 的研究还很有限,因此有必要对济源进行 VOCs 监测分析. 本研究结果有助于了解重工业城市 VOCs 的浓度特征、来源和对 SOA 的贡献,进一步为控制雾-霾污染提供理论依据,对指导其减排政策的制定具有重要意义.

1 材料与方法

1.1 采样点位和时间

采样点位于济源市人民政府第一行政区建筑物顶部(39.07°N, 112.60°E, 图1),距离地面高度约20 m. 采样站点位于济源市的中心,距离沁园路约250 m,距离黄河公路280 m,距离玉川街220 m. 周边有居民区、商业和交通混合区,场地周边没有大型固定污染源,符合“环境空气质量监测点位布设技术规范(试行)(HJ 664-2013)”要求,具有一定的代表性. 本研究观测时间为2019年12月1日至2019年12月31日,12月15日有短暂降雨,其余天气均为晴朗或阴天,风向、风速和气温均接近济源冬季均值.

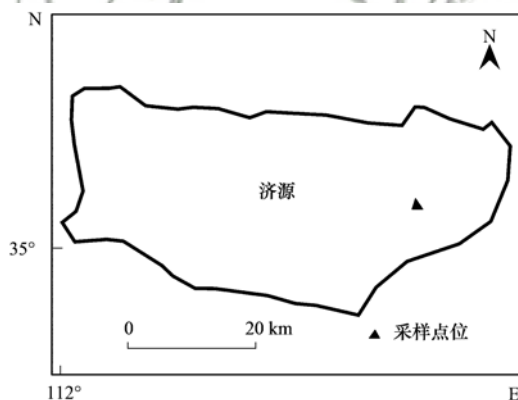


图1 采样点位示意
Fig. 1 Sampling site

1.2 采样及分析方法

使用 EXPEC 2000GC-MS/FID 在线 VOCs 监测系统连续监测济源市 106 种 VOCs 种类,时间分辨率为 1 h. 包括 29 种烷烃、11 种烯烃、17 种芳烃、38 种卤代烃、12 种 OVOCs、1 种炔烃(乙炔)和 1 种硫化物(二硫化碳). EXPEC 2000GC-MS/FID 系统包括超低温预浓缩,气相色谱和质谱分析(GC/MS). 在样品收集过程中,将样品在带有三级冷阱浓缩器的预浓缩器中进行浓缩,该浓缩器用于去除空气样品中的 H_2O 、 N_2 、 CO_2 、 CO 和 O_2 ,并通过加热使样品热脱附. 之后,将样品注入 GC-MS/FID 系统. 通过火焰离子化检测器(FID)分析低碳($C_2 \sim C_5$)碳氢化

合物,同时通过质谱分析高碳($C_5 \sim C_{12}$)碳氢化合物,卤代烃和 OVOCs. φ (VOCs)种类的方法检测限(MDL)为 $(0.03 \sim 0.21) \times 10^{-9}$. 质量保证和质量控制措施包括每周对仪器进行例行维护,每两周进行五点校准和验证,每日单点校正以及每周更换过滤器. 使用标准气体对分析仪进行校准,以确定保留时间和控制峰面积. 相关系数通常在 0.900 和 1.000 之间变化. 该系统对于 $C_2 \sim C_5$ 的低碳烷烃方法检出限为 $(0.02 \sim 0.09) \times 10^{-9}$,丙烷 $\leq 0.01 \times 10^{-9}$,丁烯 $\leq 0.05 \times 10^{-9}$,其他 $\leq 0.1 \times 10^{-9}$; $C_6 \sim C_{12}$ 挥发性有机物的方法检出限为 $0.003 \sim 0.019 \times 10^{-9}$. 监测期间超过 2/3 的物质线性达到了 0.999,其余物质线性相关性范围区间为 0.995 ~ 0.998,其中仅有 9 种物质的响应偏差超过了 10%,但对研究分析不产生影响.

颗粒物($PM_{2.5}$ 、 PM_{10})、其他微量气体[一氧化碳(CO),臭氧(O_3)、一氧化氮(NO)、二氧化氮(NO_2)、二氧化硫(SO_2)]和气象数据,包括温度(T)、相对湿度(RH)、风速(WS)和风向(WD)小时浓度同步在该点位在线监测.

为保证观测过程中数据的准确性和有效性,质量保证和质量控制严格遵循“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)”的规定. 具体内容可以参考文献[29].

1.3 数据分析方法

1.3.1 PMF 受体模型

本研究采用正交矩阵因子分解法分析 VOCs 的来源及占比. PMF 模型表示为:

$$X_{ij} = \sum_{k=1}^p g_{ik} f_{kj} + e_{ij} \quad (1)$$

式中, X_{ij} 为第 i 个样品中测得的第 j 种物质浓度; g_{ik} 为第 k 个因子对第 i 个样本的物种贡献; f_{kj} 为来自第 k 个源的第 j 个物种的含量, e_{ij} 为第 i 个样本中第 j 个物种的残差. PMF 通过最小化函数 Q 得到因子贡献和轮廓,如下所示:

$$Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left[\frac{X_{ij} - \sum_{k=1}^p g_{ik} f_{kj}}{u_{ij}} \right]^2 \quad (2)$$

式中, Q 为 PMF 输出与原始数据集的差的平方和的加权,而 u_{ij} 为第 i 个样本中第 j 个物种的不确定性.

根据式(3)和式(4)算样本数据的不确定性 u_{ij} ,如果数据浓度小于 MDL,则采用式(3). 否则,采用式(4).

$$Unc = (5/6) \times MDL \quad (3)$$

$$Unc = [(\text{error fraction} \times \text{concentration})^2 + (0.5 \times MDL)^2]^{1/2} \quad (4)$$

式中, error fraction 为每个物种的精度(%), 可根据浓度的不同设置为 5%~20%^[30,31]. 本研究中的 error fraction 为 10%. MDL 为检出限, concentration 为物种浓度.

并非全部 VOCs 都输入到 PMF 模型中. 3 种选择原则如下: ①排除样本缺失比例相对较高或浓度值低于 MDL 超过 25% 的物种^[32]; ②选择排放源典型的 VOCs 示踪剂^[33]; ③排除了大气寿命短的 VOCs^[32]. 此外应根据信噪比(S/N)对保留的物种进行分类. 如果 S/N > 2, 物种归类为 strong; 如果 0.2 < S/N < 2, 将其归类为 weak; 如果 S/N < 0.2, 物种归类为 bad^[33].

1.3.2 轨迹聚类方法

聚类分析是研究多变量分类的多元分析工具, 通过寻找能够客观反映样本之间相似程度的统计量, 然后根据这些统计量对样本进行分类. 本文重点关注两城市主城区 VOCs 输送路径, 利用 Meteoinfo 软件中的 Trajstat 插件对采样期间后向轨迹进行聚类, 气象数据来自全球数据同化系统(<http://www.arl.noaa.gov/>). 计算监测高度 500 m 内每天当地时间 00:00~23:00 的 36 h 气团后向轨迹.

1.3.3 潜在源分析

潜在源贡献因子分析法(potential source contribution function, PSCF)是一种利用气流轨迹出现概率表征每个网格对受点区域污染贡献的方法, 借此可识别污染区域^[34]. PSCF 分析通常由 TrajStat 软件在空间上识别和定位潜在来源^[35], PSCF 值就是研究区域内经过网格(i, j)的污染轨迹数量(m_{ij})与经过该网格所有轨迹点数量(n_{ij})的比值, 即:

$$\text{PSCF} = m_{ij}/n_{ij} \quad (5)$$

式中, i 和 j 分别代表纬度和经度, n_{ij} 是落入第 ij 个单元格中总轨迹数, m_{ij} 是同一单元格中对应于高于标准值的样本的端点号. PSCF 值越大, 代表该网格区域对目标定位污染物浓度影响越大. 本研究中 TVOC 和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度阈值采用平均浓度值.

由于 PSCF 是一种条件概率, 当 n_{ij} 较少时, PSCF 值不确定性较大, 因此, 为了降低不确定性, 引入 W_{ij} (权重函数), 即 $\text{WPSCF} = W_{ij} \times \text{PSCF}$, 来降低由 n_{ij} 偏小引起的不确定性. W_{ij} 定义如下:

$$W_{ij} = \begin{cases} 1.00, & n_{ij} > 60, \\ 0.70, & 20 < n_{ij} \leq 60, \\ 0.42, & 10 < n_{ij} \leq 20, \\ 0.05, & n_{ij} \leq 10. \end{cases} \quad (6)$$

1.3.4 SOA 生成潜势

基于 VOCs 的二次有机气溶胶生成潜势参数计

算了 VOC 种类对 SOA 生成的贡献. 甲苯加权质量贡献(toluene weighted mass contributions)法已用于估算不同前体物对 SOA 的贡献^[36]. SOAP 反映了每个有机化合物在相对于甲苯的同等质量排放基础上形成 SOA 的倾向, 它通常表示为甲苯指数为 100^[36]. 因为甲苯排放特征良好, 是 SOA 形成的重要人为排放前体物, 被选为计算 SOAP 的基础化合物. 计算 SOAP 的方法如下:

$$\text{SOAP}_i = \frac{\text{VOCs 组分 } i \text{ 对 SOA 质量浓度增量}}{\text{甲苯对 SOA 质量浓度增量}} \times 100\% \quad (7)$$

每种 VOCs 的 SOAP_i 值均来自文献[36]. 通过将 SOAP_i 值乘以单个 VOC 物种的浓度估算 SOA 生成潜势. 各 VOCs 的 SOAP 计算如下:

$$\text{SOAP} = \sum E_i \times \text{SOAP}_i \quad (8)$$

式中, E_i 为第 i 个 VOC 的浓度.

2 结果与讨论

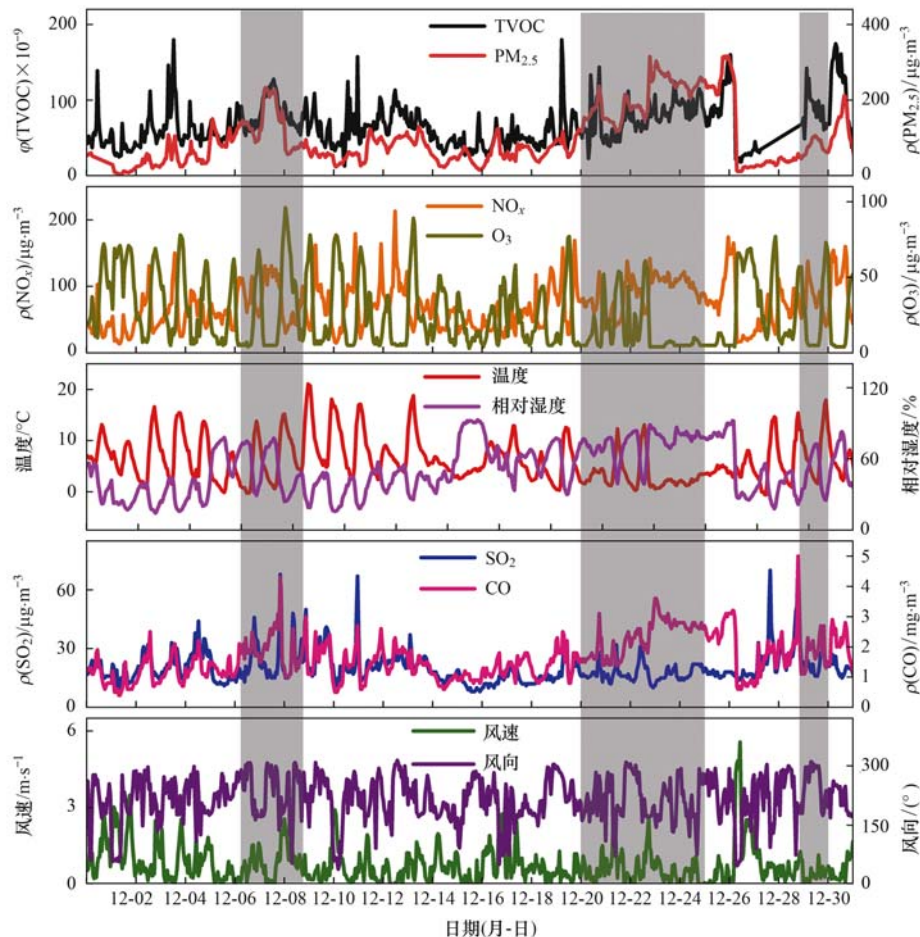
2.1 VOCs 浓度特征

图 2 为监测期间 VOCs、 $\text{PM}_{2.5}$ 、微量气体(NO_x 、CO、 O_3 、 SO_2)和气象参数(T 、RH、WS、WD)的时间序列. 采样期间共发生 3 次雾-霾事件(灰色区域), 分别为: 12 月 6 日~8 日(雾-霾-1)、12 月 20 日~25 日(雾-霾-2)和 12 月 29 日(雾-霾-3). 其余时间为非雾-霾污染过程.

在整个监测期间, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 的范围为 4~316 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 平均值为 $(96.0 \pm 73.6) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 高于空气质量二级标准规定的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 的 24 h 平均值 $(75.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$, 温度变化范围为 $-4.5 \sim 20.4^\circ\text{C}$, 平均值为 $(6.3 \pm 4.17)^\circ\text{C}$, RH 变化范围为 15.6%~100%. 济源市盛行东南风, 风速平均值为 $(1.04 \pm 0.8) \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 风速较低. 有研究表明, 静稳气象条件是导致冬季雾-霾事件的最重要因素之一^[37,38]. 雾-霾污染伴随着 VOCs 浓度的增加, 除了 O_3 , 其他微量气体浓度也明显增加. 雾-霾-1 中, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 日平均值达到 129.3 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 最大值约为 232.0 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 风速平均值为 $(1.0 \pm 0.7) \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, RH 平均值为 62%. 在雾-霾-2 中(12 月 20~26 日)空气污染物浓度显著升高, 持续 6 d 污染, 且污染较为严重(4 d 重度污染, 2 d 严重污染). $\rho(\text{PM}_{2.5})$ ($211.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 较高, RH 为 79%. 风速平均值为 $(0.8 \pm 0.0) \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. $\varphi(\text{TVOC})$ 、 $\rho(\text{NO}_x)$ 和 $\rho(\text{CO})$ 平均值分别为 $(73.5 \pm 23) \times 10^{-9}$ 、 $(90.6 \pm 20.70) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $(2.4 \pm 0.6) \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$. 雾-霾-3 (12 月 30 日)过程持续时间较短, 该过程风速平

均值较低 $[(0.7 \pm 0.2) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}]$, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 相对较低 $[(114.6 \pm 60.5) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$, $\varphi(\text{TVOC})$ 为 $(79.0 \pm 26.3) \times 10^{-9}$, 高于雾-霾-1 和雾-霾-2 过程. 非雾-霾污染过程, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ $[(87.0 \pm 15.6)$

$\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$ 和 $\varphi(\text{TVOC})$ $[(41.8 \pm 22.4) \times 10^{-9}]$ 远低于污染过程. 此外, 非污染过程风速平均值为 $(1.2 \pm 0.9) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 高于雾-霾污染期间的风速. 可见风速对雾霾的形成有一定的影响.



灰色区域表示雾-霾污染日

图2 采样期间 TVOC、 $\text{PM}_{2.5}$ 、CO、 SO_2 、 NO_x 、 O_3 和气象参数 (T 、 RH 、 WS 、 WD) 时间序列

Fig. 2 Hourly concentrations of TVOC, $\text{PM}_{2.5}$, CO, SO_2 , NO_x , and O_3 and meteorological parameters (T , RH , WS , and WD) during the sampling period

3 次雾-霾污染过程、非污染过程和全过程中 VOCs 的平均值和标准差见表 1. 在不同情况下, VOCs 平均值明显不同. 不同过程下烷烃是最丰富的组分, 分别占总 VOCs 的 28%、24% 和 30%. 其次, 卤代烃、OVOCs、炔烃、烯烃和芳香烃相对较高, 硫化物最低. 整个监测过程中 $\varphi(\text{TVOC})$ 为 $(54.3 \pm 27.5) \times 10^{-9}$, 非污染过程 $\varphi(\text{TVOC})$ 为 $(41.8 \pm 22.40) \times 10^{-9}$. 雾-霾-3 过程中 $\varphi(\text{TVOC})$ 最高, 平均值为 $(79 \pm 26.3) \times 10^{-9}$, 主要是由于卤代烃和 OVOCs 的体积分数升高造成的, 卤代烃和 OVOCs 的体积分数平均值明显高于雾-霾-1 和雾-霾-2、以及非污染过程; 卤代烃最高值为 65.8×10^{-9} , 平均值为 $(18.8 \pm 11.5) \times 10^{-9}$, $\varphi(\text{OVOCs})$ 平均值为 $(11.2 \pm 2.1) \times 10^{-9}$; 烷烃平均值相对雾-霾-1 和雾-霾-2 过程较低, 烯烃、芳香烃和硫化物平

均值变化不大; 炔烃的平均值相对于雾-霾-2 过程变化不大, 但明显高于雾-霾-1 过程. 卤代烃和 OVOCs 主要来自于工业过程和老化气团, 因此, 雾-霾-3 过程受到工业源排放和老化气团的影响. 雾-霾-2 过程的 $\varphi(\text{TVOC})$ 为 $(73.5 \pm 23) \times 10^{-9}$, 仅次于雾-霾-3 过程, 雾-霾-1 过程 $\varphi(\text{TVOC})$ 较低 $[(61 \pm 18.7) \times 10^{-9}]$. 3 次污染过程的 TVOC 以及各组分平均浓度值均高于非污染过程.

表 2 为 3 次污染过程中排名前 15 挥发性有机化合物. 3 次雾-霾污染过程中排名前 15 的 VOCs 相似. 雾-霾-1 过程中平均 $\varphi(\text{乙炔})$ 仅低于乙烷, 雾-霾-2 和雾-霾-3 过程乙炔平均值明显高于其他物种. 3 次雾-霾污染过程占总前 15 名 VOCs 的比例分别为 24%、24% 和 17%. 乙炔主要来自不完全燃烧和 PVC 工业. 氯乙烯也是主要的物种, 有研

究表明聚氯乙烯工艺过程可以排放乙炔和氯乙烯^[39,40]. 因此 PVC 工业和燃烧对污染的形成有一定的影响. 二氯甲烷、苯、甲苯和乙酸乙酯的 φ 均比较高, 它们主要来源于油漆溶剂的使用或工业排放^[41]. 此外, 有研究发现高 φ 的烷烃(乙烷、丙烷、正丁烷和异丁烷)和烯烃(乙烯、1-丁烯). 乙

烷、丙烷、正丁烷和异丁烷是天然气和液化石油气以及机动车尾气的主要组成部分^[42], 这表明 NG/LPG 和机动车尾气可能是造成高 φ (VOCs) 形成的原因. 丙酮和 2-丁酮是 OVOCs 中占比最多的, OVOCs 来源比较复杂, 来源于车辆排放、工业过程和二次形成^[43,44].

表 1 不同污染过程 VOCs 组分体积分数 $\times 10^{-9}$

Table 1 Concentrations of VOC species during different haze processes $\times 10^{-9}$										
组分	雾-霾-1		雾-霾-2		雾-霾-3		非污染		全过程	
	范围	平均值 $\pm$ 标准差	范围	平均值 $\pm$ 标准差	范围	平均值 $\pm$ 标准差	范围	平均值 $\pm$ 标准差	范围	平均值 $\pm$ 标准差
烷烃	12.3~48.7	24.7 $\pm$ 8.6	12.0~43.4	23.0 $\pm$ 5.4	10.6~34.2	20.8 $\pm$ 7.1	2.4~44.4	14.6 $\pm$ 7.8	2.4~48.7	17.9 $\pm$ 8.3
烯烃	2.6~13.7	6.4 $\pm$ 3.1	2.3~41.0	8.1 $\pm$ 3.9	1.8~25.7	7.0 $\pm$ 4.8	0.3~26.2	4.2 $\pm$ 3.3	0.3~41.0	5.6 $\pm$ 3.9
芳香烃	2.0~7.4	4.3 $\pm$ 1.7	2.0~8.5	5.6 $\pm$ 1.5	2.4~8.7	5.8 $\pm$ 2.0	0.5~10	3.2 $\pm$ 1.7	0.5~10.0	4.1 $\pm$ 2.0
卤代烃	5.6~18.8	10.5 $\pm$ 3.6	2.9~55.6	12.9 $\pm$ 6.0	9.8~65.8	18.8 $\pm$ 11.5	0.9~56.8	9.8 $\pm$ 6.4	0.5~65.8	11.4 $\pm$ 7.1
OVOCs	3.4~14.5	7.6 $\pm$ 2.4	3.2~15.7	7.3 $\pm$ 2.0	7.2~14.8	11.2 $\pm$ 2.1	0.6~12.7	5.1 $\pm$ 1.9	0.6~15.7	6.4 $\pm$ 2.7
硫化物	0.0~0.1	0.0 $\pm$ 0.0	0.0~0.1	0.0 $\pm$ 0.0	0.0~0.1	0.0 $\pm$ 0.0	0.0~0.1	0.0 $\pm$ 0.0	0.0~0.1	0.0 $\pm$ 0.0
炔烃	1.7~25.7	7.4 $\pm$ 5.1	0.0~59.6	16.5 $\pm$ 13	0.0~42	15.3 $\pm$ 8.7	0.0~68.9	5.0 $\pm$ 7.6	0.0~73.6	8.8 $\pm$ 10.7
TVOC	33.7~110.4	61.0 $\pm$ 18.7	31.2~138.8	73.5 $\pm$ 23	41.2~144.7	79.0 $\pm$ 26.3	11.0~162.4	41.8 $\pm$ 22.4	10.5~168.1	54.3 $\pm$ 27.5

表 2 济源各污染过程排名前 15 的物种 $\times 10^{-9}$

Table 2 Comparisons of the top 15 VOC species during different haze events $\times 10^{-9}$					
雾-霾-1		雾-霾-2		雾-霾-3	
物种	平均值 $\pm$ 标准差	物种	平均值 $\pm$ 标准差	物种	平均值 $\pm$ 标准差
乙烷	9.2 $\pm$ 3.1	乙炔	16.7 $\pm$ 13	乙炔	16 $\pm$ 8.3
乙炔	7.4 $\pm$ 5.1	乙烷	9.2 $\pm$ 1.7	乙烷	8.4 $\pm$ 2.4
丙烷	5.9 $\pm$ 2.9	丙烷	5.4 $\pm$ 1.8	氯乙烷	6.3 $\pm$ 3.7
丙酮	4.6 $\pm$ 1.3	乙烯	5.3 $\pm$ 2.0	丙酮	6.1 $\pm$ 0.6
乙烯	4.4 $\pm$ 2.3	丙酮	3.7 $\pm$ 1.3	丙烷	4.2 $\pm$ 1.5
萘	2.9 $\pm$ 2.7	二氯甲烷	3.5 $\pm$ 2.1	乙烯	4.1 $\pm$ 2.1
正丁烷	2.5 $\pm$ 1.1	正丁烷	2.1 $\pm$ 0.7	氯乙烯	3.7 $\pm$ 6.6
氯乙烷	2.5 $\pm$ 1.3	氯乙烯	2.1 $\pm$ 4.1	萘	3.1 $\pm$ 3.0
甲苯	1.5 $\pm$ 0.7	苯	2.0 $\pm$ 0.7	苯	2.2 $\pm$ 1.0
二氯甲烷	1.5 $\pm$ 1.4	甲苯	1.9 $\pm$ 0.6	正丁烷	2.1 $\pm$ 1.1
苯	1.5 $\pm$ 0.8	氯乙烷	1.8 $\pm$ 0.9	甲苯	1.9 $\pm$ 0.8
异戊烷	1.4 $\pm$ 0.9	1,1,2-三氟三氯乙烷	1.4 $\pm$ 1.1	二氯甲烷	1.8 $\pm$ 1.8
异丁烷	1.3 $\pm$ 0.5	异戊烷	1.2 $\pm$ 0.6	2-丁酮	1.6 $\pm$ 0.6
戊烷	1.0 $\pm$ 0.4	乙酸乙酯	1.2 $\pm$ 0.5	1-丁烯	1.4 $\pm$ 2.9
乙酸乙酯	0.8 $\pm$ 0.5	1-丁烯	1.2 $\pm$ 3.0	1,2-二氯乙烷	1.4 $\pm$ 1.0

2.2 潜在源分析

济源周边地形独特, 位于河南省西北部, 三面环山. 大气中的污染物极易积聚, 从而使大气污染物的浓度迅速增加. 为确定 12 月济源市的气团来源, 绘制了 36 h 后向轨迹(图 3). 轨迹分为 4 类. 轨迹 1 (红色) 和轨迹 4 (黑色) 源自内蒙古, 途经陕西中部和山西南部移动至济源市, 共占比 38%, 对应 φ (TVOC) 分别为 46.4×10^{-9} 和 43.0×10^{-9} . 轨迹 2 (蓝色) 占比较大(28%), 起源于甘肃西部, 经过陕西西部和山西南部传输到济源市西部, 对应 φ (TVOC) 为 62.6×10^{-9} . 轨迹 3 (粉色) 起源于河北南, 途经山东地区, 迁移至济源市, 占主导地位(34%), 对应 φ (TVOC) 为 42.0×10^{-9} . 结果表明, 大气传输对济源的 VOCs 污染有一定的影响, 来自

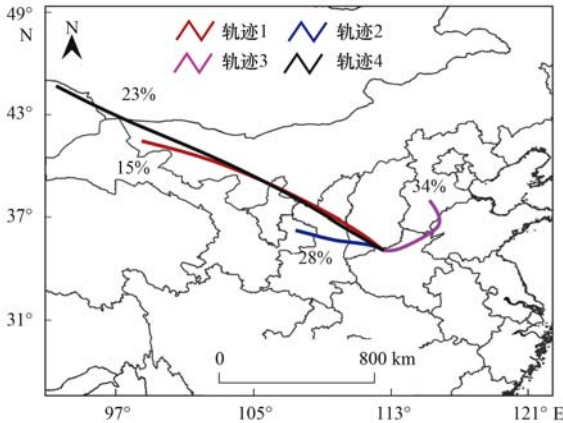


图 3 500 m 高度 36 h 后向轨迹
Fig. 3 The 36 h air mass back trajectories at 500 m during the monitoring period

甘肃西部,途经陕西西部和山西南部的气团对济源 VOCs 的影响最大。

图 4 为 12 月济源市的 TVOC 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的 PSCF 分析结果. 高 PSCF 值网格的区域是 TVOC 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的潜在来源区域. TVOC 的 PSCF 值较高的区域(0.8 ~ 0.9, 橙色网格)位于济源市的西侧和北侧密集工业区 50 ~ 300 km (包括西安、三门峡、洛阳、临汾、

晋城和运城), 并且是对济源影响最大的区域. 其次影响较大的是东南部郑州、开封、漯河、许昌和驻马店等地. 此外, 安徽、江苏和山东交界处发现较高值(橙色和黄色网格). $\text{PM}_{2.5}$ 的 PSCF 值较高的区域(0.8 ~ 0.9, 橙色网格)主要位于济源市西部南部(临汾南部和西安)和南部(十堰和襄阳)和东部(周口、驻马店和平顶山)地区.

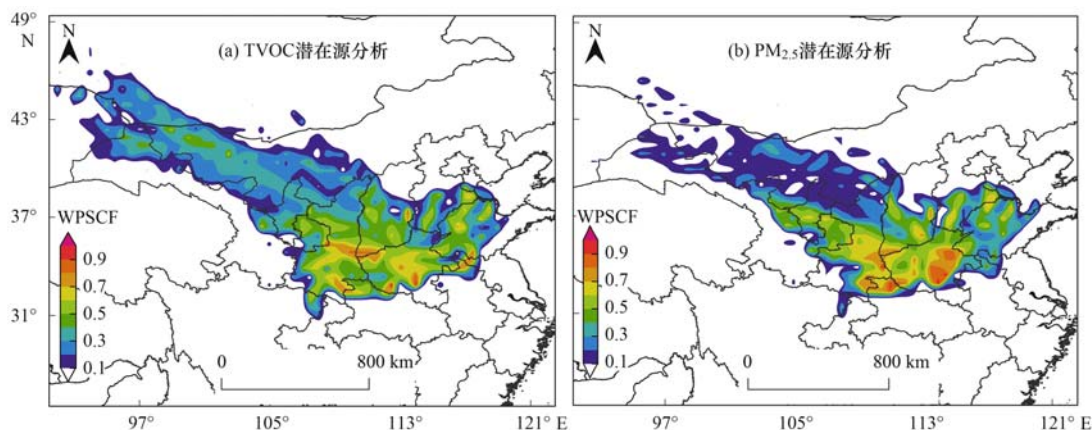


图 4 济源 $\text{PM}_{2.5}$ 和 VOCs 的潜在源

Fig. 4 Potential source contribution function (PSCF) of $\text{PM}_{2.5}$ and TVOC in Jiyuan

2.3 VOCs 源识别及源贡献

利用特殊 VOCs 的比率初步确定 VOCs 的来源^[45]. 以下讨论甲苯/苯(T/B)和乙苯/间/对-二甲苯(E/X), 异戊烷/正戊烷和异丁烷/正丁烷的比率.

异戊烷和正戊烷之间的相关性很强[图 5(a)], 表明这两种化合物的污染源相似. 有研究表明, 异戊烷/正戊烷之比在 0.8 ~ 0.9、2.2 ~ 3.8、1.5 ~ 3.0 和 1.8 ~ 4.6 范围内分别代表 NG 排放, 车辆排放, 液体汽油和燃料蒸发^[46]. 本研究中, 比率为 1.9, 表明戊烷更可能来自液体汽油和燃料蒸发的混合来源.

异丁烷/正丁烷的不同比例表明 VOCs 来自不同的源, 如 NG(0.6 ~ 1.0)、LPG(0.46)和车辆排放(0.2 ~ 0.3)^[46,47]. 本研究中, 异丁烷/正丁烷之比为 0.4[图 5(b)], 表明这两个物种主要来自 LPG.

Hong 等^[48]的研究指出, T/B 的变化可以区分不同燃烧源, 认为 $T/B < 2$ 表明污染物主要来自车辆排放和生物质燃烧, $T/B > 2$ 则表明来自非交通源. 本研究中 T/B 比为 0.6[图 5(c)]. 因此, 车辆排放和生物质燃烧是主要来源.

E/X 比是光化学反应的指标^[48], 因为它们具有共同的来源并且与 OH 自由基的反应速率不同. 这两种 VOCs 的光化学性质可以参见文献^[49]. 如图 5(d)所示, 乙苯与间/对-二甲苯之间存在显著的相关性($r = 0.8$), 高相关性表明该物种起源于共同的来源. 比率为 0.7, 表明监测点位的气团比较新

鲜^[50].

因此, 异戊烷/正戊烷, 异丁烷/正丁烷和 B/T 的诊断率表明, 汽车尾气, LPG/NG、工业、溶剂使用和燃烧对济源的挥发性有机化合物的贡献较大.

利用 PMF 模型分析全过程中 VOCs, 进一步确认当地 VOCs 主要来源. 确定 8 个主要源, 分别是 LPG/NG、PVC 工业、机动车尾气、焦化工业、溶剂使用、工业、工艺过程和油气挥发. 各因子如图 6 所示.

因子 1 中含有丰富的 $\text{C}_3 \sim \text{C}_5$ 烷烃, 如乙烷(33%)、丙烷(48%)、正丁烷(40%)、异丁烷(40%)、异戊烷和正戊烷等, 都是液化石油气(LPG)或天然气(NG)燃烧中的代表性物种^[51]. LPG/NG 可为家庭和机动车提供燃料^[52]. 因此, 因子 1 为 LPG/NG 源.

因子 2 主要含有乙炔和氯乙烯, 占比分别为 55% 和 90%, 乙炔和氯乙烯常作为氯乙烯工艺的原料^[53]. 因此, 因子 2 是 PVC 工业.

第 3 个因子的主要种类是 $\text{C}_2 \sim \text{C}_6$ 烷烃和烯烃(乙烷、乙烯、丙烷、丙烯、正戊烷、*i*-戊烷、*i*-丁烷、正丁烷、2,3-二甲基丁烷和 2,2-二甲基丁烷), 它们通常来自汽车尾气. 同时, 还有一些苯和甲苯, 它们也是车辆的示踪剂^[54]. 同时, 因子 4 中, 乙烯和 $\text{C}_3 \sim \text{C}_6$ 的烯烃、烷烃(丙烯, 1,3-丁二烯、甲基环戊烷、3-甲基戊烷和环己烷)和甲苯含量较高, 是典型的机动车示踪物质^[54]. 因此, 因子 3 和因子 4 为机

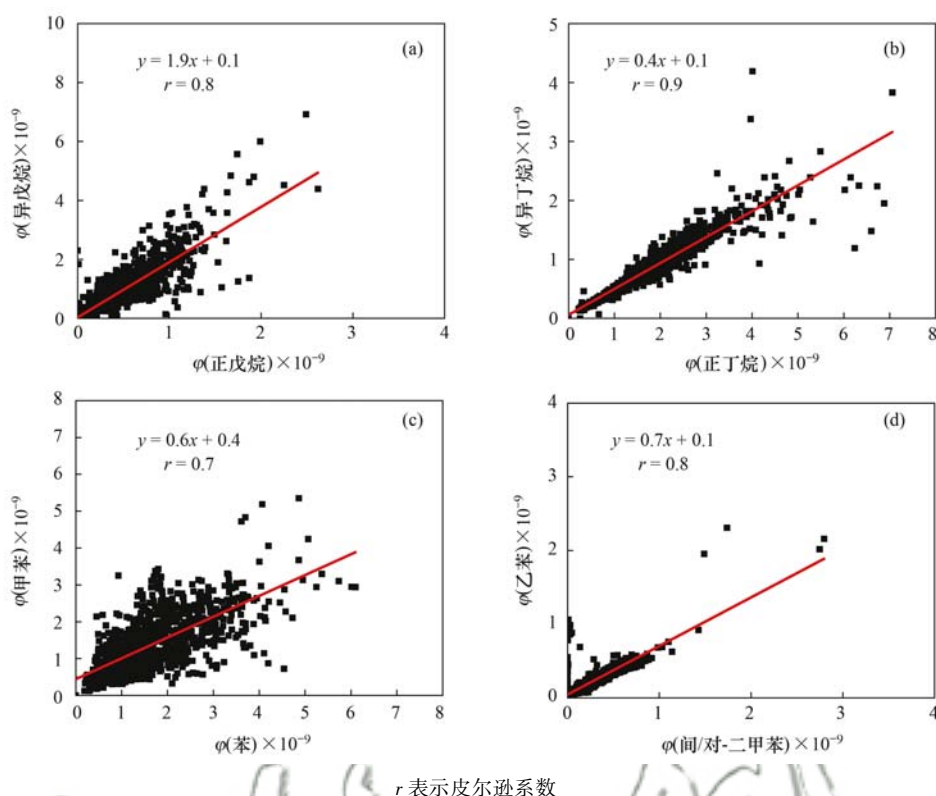


图5 物种之间的相关性分析

Fig. 5 Correlations between compounds

动车排放源。

因子5 中含量最丰富的物质是萘,占比达到72%。焦化行业会排放大量的萘。此外顺-2-丁烯、乙酸乙酯、丙酮和戊烷等含量也相对较高,这些物种是焦化工业源排放的特征组分^[55]。济源市内距离监测点位约4 公里处有大型焦化厂和钢铁厂。因此,因子5 定义为焦化工业。

因子6 中 BTEX(甲苯、乙苯和邻二甲苯)、1,2-二氯乙烷、1,2-二氯丙烷、二氯甲烷、三氯甲烷和乙酸乙酯比例较高。研究表明,BTEX 是溶剂使用过程中常用组分^[41]。高比例的二氯甲烷和三氯甲烷是重要的化学溶剂。酯类被用作工业溶剂或粘合剂^[41]。因此,因子6 为溶剂使用。

因子7 中 TEX(甲苯、乙苯和间/对-二甲苯)、1,2-二甲苯、环己烷、正辛烷、正壬烷、乙酸乙烯酯和四氯化碳,它们是典型的工业示踪物质。先前的研究提出 TEX 化合物是工业的主导成分^[56]。因此,因子7 为工业源。

因子8 中的主要贡献物质为苯乙烯、苯、甲苯、1,2-二甲苯、三氯甲烷和乙基苯等物质,他们主要来自于工艺过程^[57,58],因此,因子8 为工艺过程。

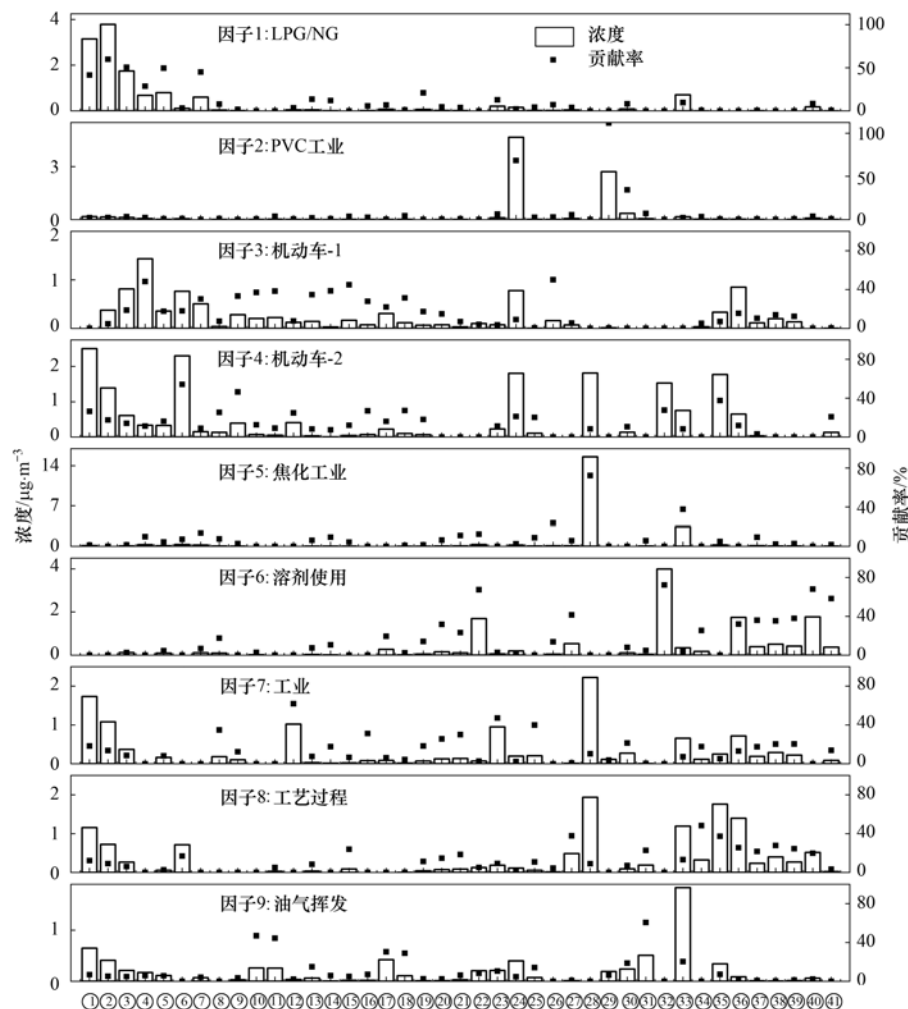
因子9 的特征物质是正己烷、甲基叔丁基醚(MTBE)、2-甲基戊烷、3-甲基戊烷和2,3-二甲基丁烷等,它们是汽油排放中具有代表性的挥发性有机

化合物^[59]。其中 MTBE 含量最高,可作为汽车汽油的添加剂^[41]。因此,因子9 为油气挥发。

图7 是8 类源所占比例。全过程中:机动车(25%)>焦化工业(17%)>油气挥发(16%)>LPG/NG(10%)>工业(10%)>工艺过程(9%)>溶剂使用(8%)>PVC 工业(5%);非污染过程:机动车(28%)>油气挥发(17%)>焦化工业(14%)>溶剂使用(11%)>LPG/NG(10%)>工艺过程(8%)>PVC 工业(7%)>工业(6%);污染过程:机动车(22%)>焦化工业(22%)>工业(14%)>油气挥发(13%)>LPG/NG(10%)>工艺过程(10%)>溶剂使用(5%)和 PVC 工业(3%)。3 个过程中,来自机动车排放的 VOCs 占比始终最高,尤其在非污染过程中,表明挥发性有机化合物的主要来源与车辆的使用有关。污染过程相较于非污染过程,工业、工艺过程和焦化工业占比明显增加,其中焦化工业增加最明显,占比达到22%,与机动车占比相同。油气挥发、PVC 工业和溶剂使用占比明显下降,溶剂使用占比下降最为明显,LPG/NG 占比相对稳定。因此,机动车排放、焦化行业和工业过程对济源市冬季空气污染起着重要的作用。

2.4 SOA 生成潜势

二次气溶胶在雾-霾污染中起着重要作用。本研



①乙烷, ②丙烷, ③正丁烷, ④异戊烷, ⑤异丁烷, ⑥乙烯, ⑦戊烷, ⑧环己烷, ⑨丙烯, ⑩3-甲基戊烷, ⑪2-甲基戊烷, ⑫2,3-二甲基戊烷, ⑬2,3-二甲基丁烷, ⑭2,2-二甲基丁烷, ⑮2,2,4-三甲基戊烷, ⑯1,3-丁二烯, ⑰正己烷, ⑱甲基环戊烷, ⑲甲基环己烷, ⑳正辛烷, ㉑正壬烷, ㉒乙酸乙酯, ㉓乙酸乙烯酯, ㉔乙炔, ㉕四氯化碳, ㉖顺-2-丁烯, ㉗三氯甲烷, ㉘萘, ㉙氯乙烯, ㉚氯甲烷, ㉛甲基叔丁基醚, ㉜二氯甲烷, ㉝丙酮, ㉞苯乙烯, ㉟苯, ㊱甲苯, ㊲乙基苯, ㊳间/对-二甲苯, ㊴1,2-二甲苯, ㊵1,2-二氯乙烷, ㊶1,2-二氯丙烷

图6 各因子中 VOCs 物种浓度及对每个来源的贡献

Fig. 6 Source profiles and contribution percentages of VOCs from each source

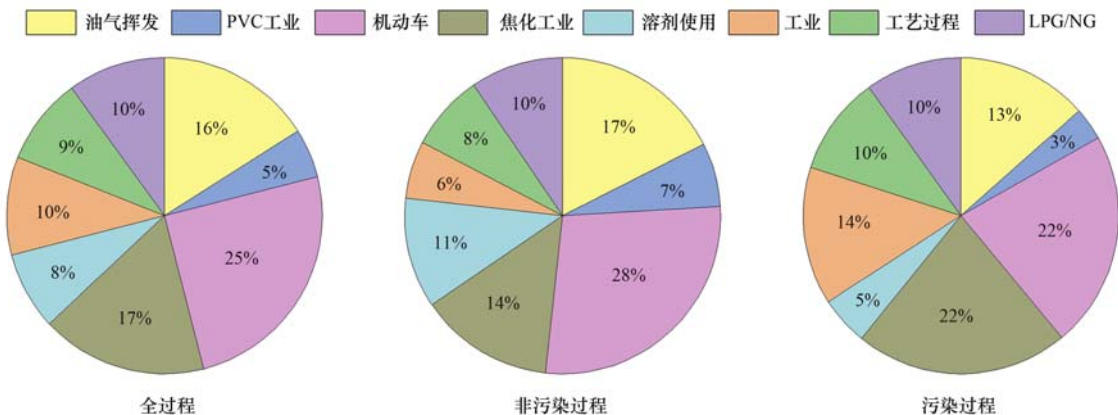


图7 不同过程每个源对 VOCs 的贡献

Fig. 7 Source contributions to VOCs concentrations at different periods

究计算了 41 种 VOCs 的 SOAP. 表 3 为不同污染过程和非污染过程中不同组分 SOAP. 雾-霾-1、雾-霾-2、雾-霾-3 和非污染日的 VOCs 总 SOAP 分别为

1 735.3、2 258.9、997.8 和 1 298.8 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 雾-霾-1 过程, 烷烃和 OVOCs 对 SOA 的贡献高于雾-霾-2、雾-霾-3, 而烯烃和炔烃在雾-霾-3 过程的 SOAP 高于

雾-霾-1 过程. 雾-霾-1 和雾-霾-2 中各组分 SOAP 显著高于非污染过程. 雾-霾-3 过程总 SOAP 低于非污染过程, 可能是因为雾-霾-3 过程持续时间短, 挥发性有机物浓度较低. 不同污染过程, 芳香烃是 SOAP 的主要贡献物质, 在雾-霾-1、雾-霾-2、雾-霾-3 和非污染过程, 芳香烃的 SOAP 分别为 1 678. 4、2 214. 0、954. 9 和 1 258. 5 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 其次, 烷烃烯烃是形成 SOA 的另一个比较重要的组分. OVOCs 和炔烃形成 SOA 的能力较弱.

表 4 为在 3 个雾-霾过程和非污染过程对 SOAP 贡献最大的 15 种 VOCs. 4 个不同过程中对 SOAP 贡献最大的 15 个物种是相似的. 排名前 15 的 VOCs 对 SOAP 的贡献超过 97%, 每个过程 SOAP 排名前 15 的物质几乎都是芳香族化合物, 其中 BTEX 始终是

表 3 不同过程 VOCs 的 SOAP/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

Table 3 SOAP of VOC species at different periods/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$				
物质	雾-霾-1	雾-霾-2	雾-霾-3	非污染日
烷烃	16. 7	12. 0	14. 3	15. 3
烯烃	14. 3	17. 2	14. 8	9. 1
芳香烃	1 678. 4	2 214. 0	954. 9	1 258. 5
OVOCs	4. 3	3. 8	1. 0	2. 9
炔烃	0. 9	1. 9	1. 0	0. 6

排名前 5 的物质. 在雾-霾过程和非污染过程, 甲苯始终是贡献最大的物种, SOAP 分别为 623. 6、788. 8、330. 4 和 421. 3 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 分别占总 SOAP 的 36%、34%、33% 和 32%. 苯是不同过程第二丰富的物质. 芳香族化合物主要是由于溶剂的使用和工业过程而产生的. 有研究表明, 溶剂的使用和工业流程在 SOAP 中起着重要的作用^[60].

表 4 SOAP 排名前 15 的 VOCs
Table 4 SOAP of top 15 VOC species at different periods

雾-霾-1			雾-霾-2		
物质	SOAP/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	占比/%	物质	SOAP/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	占比/%
甲苯	623. 6	36	甲苯	788. 8	35
苯	468. 8	27	苯	632. 5	28
乙基苯	137. 5	8	乙基苯	190. 4	8
苯乙烯	137. 3	8	苯乙烯	186. 4	8
间/对-二甲苯	115. 6	7	间/对-二甲苯	164. 1	7
1,2-二甲基苯	108. 6	6	1,2-二甲基苯	158. 4	7
1-乙基-3-甲基苯	32. 4	2	1-乙基-3-甲基苯	37. 8	2
丙基苯	11. 8	1	丙基苯	17. 7	1
4-乙基甲苯	11. 2	1	1-乙基-2-甲基苯	15. 3	1
1-乙基-2-甲基苯	10. 2	1	4-乙基甲苯	11. 2	1
1,2,4-三甲基苯	10	1	乙烯	8. 5	0
乙烯	7. 2	0	异丙基苯	5. 1	0
异丙基苯	5. 1	0	1,2,3-三甲苯	4. 7	0
1,2,3-三甲苯	4. 7	0	1-丁烯	3. 5	0
丙酮	3. 6	0	丙酮	2. 9	0
总和	1 687. 6	97	总和	2 227. 3	99
雾-霾-3			非污染日		
物质	SOAP/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	占比/%	物质	SOAP/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	占比/%
甲苯	631. 9	33	甲苯	421. 3	32
苯	488	31	苯	378. 9	29
乙基苯	142. 8	11	苯乙烯	127. 5	10
1,2-二甲基苯	131. 3	8	乙基苯	95. 2	7
间/对-二甲苯	130. 6	5	间/对-二甲苯	82. 1	6
苯乙烯	127. 5	4	1,2-二甲基苯	77	6
1-乙基-3-甲基苯	32. 4	2	1-乙基-3-甲基苯	27	2
丙基苯	11. 8	1	丙基苯	11. 8	1
4-乙基甲苯	11. 2	1	1-乙基-2-甲基苯	10. 2	1
1-乙基-2-甲基苯	10. 2	1	1,2,4-三甲基苯	8. 8	1
1,2,4-三甲基苯	10	1	4-乙基甲苯	7. 5	1
1-丁烯	6. 3	1	十二烷	5. 2	0
乙烯	5. 3	0	异丙基苯	5. 1	0
1,2,3-三甲苯	4. 7	0	1,2,3-三甲苯	4. 7	0
十一烷	2. 3	0	乙烯	4. 2	0
总和	1 746. 3	98	总和	1 266. 5	98

3 结论

- (1) 烷烃是主要组分, 其次是卤代烃、OVOCs、
- (2) VOCs 污染主要受到来自甘肃西部气团影

炔烃、烯烃、芳香烃和硫化物. 乙炔浓度平均值明显高于其他物质.

响,三门峡、洛阳、临汾、晋城和运城是重要潜在源. 源解析确定了8个污染源,其中机动车排放是最主要来源,其次是焦化行业和油气挥发,PVC工业和溶剂使用源占比贡献最少.

(3) 芳香烃是 SOAP 的主要贡献物质,其中 BTEX 是主要贡献物质. 其次是烯烃. 烷烃、OVOCs 和炔烃的 SOAP 较低.

参考文献:

- [1] Zheng S S, Xu X F, Zhang Y J, *et al.* Characteristics and sources of VOCs in urban and suburban environments in Shanghai, China, during the 2016 G20 summit[J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2019, **10**(6): 1766-1779.
- [2] 刘齐, 卢星林, 曾鹏, 等. 柳州市春季大气挥发性有机物污染特征及源解析[J]. *环境科学*, 2021, **42**(1): 65-74.
Liu Q, Lu X L, Zeng P, *et al.* Characteristics and source apportionment of ambient VOCs in spring in Liuzhou [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(1): 65-74.
- [3] Wang P, Wang T, Ying Q. Regional source apportionment of summertime ozone and its precursors in the megacities of Beijing and Shanghai using a source-oriented chemical transport model [J]. *Atmospheric Environment*, 2020, **224**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.117337.
- [4] Liu Y S, Li X R, Tang G Q, *et al.* Secondary organic aerosols in Jinan, an urban site in North China: Significant anthropogenic contributions to heavy pollution [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2019, **80**: 107-115.
- [5] Tao M H, Chen L F, Li R, *et al.* Spatial oscillation of the particle pollution in eastern China during winter: Implications for regional air quality and climate [J]. *Atmospheric Environment*, 2016, **144**: 100-110.
- [6] 刘威杰, 胡天鹏, 毛瑶, 等. 汾渭平原临汾市2019年春节期间大气污染特征与来源解析[J]. *环境科学*, 2021, **42**(11): 5122-5130.
Liu W J, Hu T P, Mao Y, *et al.* Characteristics and origin analysis of air pollution during the spring festival in Linfen, Fenwei Plain [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(11): 5122-5130.
- [7] Li Y J, Sun Y L, Zhang Q, *et al.* Real-time chemical characterization of atmospheric particulate matter in China: a review [J]. *Atmospheric Environment*, 2017, **158**: 270-304.
- [8] Mozaffar A, Zhang Y L, Fan M Y, *et al.* Characteristics of summertime ambient VOCs and their contributions to O₃ and SOA formation in a suburban area of Nanjing, China [J]. *Atmospheric Research*, 2020, **240**, doi: 10.1016/j.atmosres.2020.104923.
- [9] Yang Y C, Liu X G, Zheng J, *et al.* Characteristics of one-year observation of VOCs, NO_x, and O₃ at an urban site in Wuhan, China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2019, **79**: 297-310.
- [10] Song M D, Liu X G, Zhang Y H, *et al.* Sources and abatement mechanisms of VOCs in southern China [J]. *Atmospheric Environment*, 2019, **201**: 28-40.
- [11] Li K, Li J L, Tong S R, *et al.* Characteristics of wintertime VOCs in suburban and urban Beijing: concentrations, emission ratios, and festival effects [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, **19**(12): 8021-8036.
- [12] De Blas M, Ibáñez P, García J A, *et al.* Summertime high resolution variability of atmospheric formaldehyde and non-methane volatile organic compounds in a rural background area [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **647**: 862-877.
- [13] Li J, Zhai C Z, Yu J Y, *et al.* Spatiotemporal variations of ambient volatile organic compounds and their sources in Chongqing, a mountainous megacity in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **627**: 1442-1452.
- [14] Wu R R, Li J, Hao Y F, *et al.* Evolution process and sources of ambient volatile organic compounds during a severe haze event in Beijing, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **560-561**: 62-72.
- [15] 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.
- [16] Kansal A. Sources and reactivity of NMHCs and VOCs in the atmosphere: a review [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **166**(1): 17-26.
- [17] Zhang L H, Li H, Wu Z H, *et al.* Characteristics of atmospheric volatile organic compounds in urban area of Beijing: variations, photochemical reactivity and source apportionment [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2020, **95**: 190-200.
- [18] Liu Y F, Kong L W, Liu X G, *et al.* Characteristics, secondary transformation, and health risk assessment of ambient volatile organic compounds (VOCs) in urban Beijing, China [J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2021, **12**(3): 33-46.
- [19] Guo H, Cheng H R, Ling Z H, *et al.* Which emission sources are responsible for the volatile organic compounds in the atmosphere of Pearl River Delta? [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, **188**(1-3): 116-124.
- [20] 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.
- [21] Ling Z H, Guo H, Cheng H R, *et al.* Sources of ambient volatile organic compounds and their contributions to photochemical ozone formation at a site in the Pearl River Delta, southern China [J]. *Environmental Pollution*, 2011, **159**(10): 2310-2319.
- [22] Li C Q, Li Q Q, Tong D G, *et al.* Environmental impact and health risk assessment of volatile organic compound emissions during different seasons in Beijing [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2020, **93**: 1-12.
- [23] Yang W Q, Zhang Y L, Wang X M, *et al.* Volatile organic compounds at a rural site in Beijing: influence of temporary emission control and wintertime heating [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, **18**(17): 12663-12682.
- [24] Zhang J W, Chen J M, Xue C Y, *et al.* Impacts of six potential HONO sources on HO_x budgets and SOA formation during a wintertime heavy haze period in the North China Plain [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **681**: 110-123.
- [25] Strader R, Lurmann F, Pandis S N. Evaluation of secondary organic aerosol formation in winter [J]. *Atmospheric Environment*, 1999, **33**(29): 4849-4863.
- [26] Huang R J, Zhang Y L, Bozzetti C, *et al.* High secondary aerosol contribution to particulate pollution during haze events in China [J]. *Nature*, 2014, **514**(7521): 218-222.
- [27] Hui L R, Liu X G, Tan Q W, *et al.* VOC characteristics, sources and contributions to SOA formation during haze events in Wuhan, Central China [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **650**: 2624-2639.
- [28] 徐虹, 唐邈, 肖致美, 等. 天津市冬季重污染二次有机化学污染特征及 VOCs 对 SOA 生成潜势 [J]. *环境科学*, 2020, **41**(8): 3492-3499.

- Xu H, Tang M, Xiao Z M, *et al.* Characteristics of secondary organic particles and the potential formation of SOA from VOCs during wintertime heavy pollution episodes in Tianjin [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(8): 3492-3499.
- [29] 王红果, 孙永旺, 王芳, 等. 济源市疫情防控期间 VOCs 的变化特征、臭氧生成潜势及来源解析[J]. *环境科学学报*, 2021, **41**(3): 761-769.
- Wang H G, Sun Y W, Wang F, *et al.* Characteristics, ozone formation potential and source apportionment of VOCs during epidemic prevention in Jiyuan [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, **41**(3): 761-769.
- [30] Buzcu B, Fraser M P. Source identification and apportionment of volatile organic compounds in Houston, TX [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(13): 2385-2400.
- [31] 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.
- [32] Zhu Y H, Yang L X, Kawamura K, *et al.* Contributions and source identification of biogenic and anthropogenic hydrocarbons to secondary organic aerosols at Mt. Tai in 2014 [J]. *Environmental Pollution*, 2017, **220**: 863-872.
- [33] Shao P, An J L, Xin J Y, *et al.* Source apportionment of VOCs and the contribution to photochemical ozone formation during summer in the typical industrial area in the Yangtze River Delta, China [J]. *Atmospheric Research*, 2016, **176-177**: 64-74.
- [34] Hui L R, Liu X G, Tan Q W, *et al.* Characteristics, source apportionment and contribution of VOCs to ozone formation in Wuhan, Central China [J]. *Atmospheric Environment*, 2018, **192**: 55-71.
- [35] Hui L R, Liu X G, Tan Q W, *et al.* VOC characteristics, chemical reactivity and sources in urban Wuhan, central China [J]. *Atmospheric Environment*, 2020, **224**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.117340.
- [36] 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.
- [37] Song M D, Liu X G, Tan Q W, *et al.* Characteristics and formation mechanism of persistent extreme haze pollution events in Chengdu, southwestern China [J]. *Environmental Pollution*, 2019, **251**: 1-12.
- [38] 党莹, 张小玲, 饶晓琴, 等. 北京与成都大气污染特征及空气质量改善效果评估 [J]. *环境科学*, 2021, **42**(8): 3622-3632.
- Dang Y, Zhang X L, Rao X Q, *et al.* Evaluation of air pollution characteristics and air quality improvement effect in Beijing and Chengdu [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(8): 3622-3632.
- [39] Cai M, Zhang H Y, Man B C, *et al.* Synthesis of a vinyl chloride monomer *via* acetylene hydrochlorination with a ruthenium-based N-heterocyclic carbene complex catalyst [J]. *Catalysis Science & Technology*, 2020, **10**(11): 3552-3560.
- [40] 乔玉元. 乙烯和氯化氢生产氯乙烯的工艺研究 [J]. *化工管理*, 2020, (16): 200-201.
- [41] Li J, Xie S D, Zeng L M, *et al.* Characterization of ambient volatile organic compounds and their sources in Beijing, before, during, and after Asia-Pacific Economic Cooperation China 2014 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, **15**(14): 7945-7959.
- [42] Wu F K, Yu Y, Sun J, *et al.* Characteristics, source apportionment and reactivity of ambient volatile organic compounds at Dinghu Mountain in Guangdong Province, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **548-549**: 347-359.
- [43] Guo H, Ling Z H, Cheung K, *et al.* Acetone in the atmosphere of Hong Kong: abundance, sources and photochemical precursors [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **65**: 80-88.
- [44] Huang X F, Zhang B, Xia S Y, *et al.* Sources of oxygenated volatile organic compounds (OVOCs) in urban atmospheres in North and South China [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **261**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114152.
- [45] 库盈盈, 任万辉, 苏枫枫, 等. 沈阳市不同功能区挥发性有机物分布特征及臭氧生成潜势 [J]. *环境科学*, 2021, **42**(11): 5201-5209.
- Ku Y Y, Ren W H, Su C C, *et al.* Pollution characteristics and ozone formation potential of ambient VOCs in different functional zones of Shenyang, China [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(11): 5201-5209.
- [46] Zheng H, Kong S F, Xing X L, *et al.* Monitoring of volatile organic compounds (VOCs) from an oil and gas station in northwest China for 1 year [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, **18**(7): 4567-4595.
- [47] Bari A, Kindzierski W B. Ambient volatile organic compounds (VOCs) in Calgary, Alberta: sources and screening health risk assessment [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **631-632**: 627-640.
- [48] Hong Z Y, Li M Z, Wang H, *et al.* Characteristics of atmospheric volatile organic compounds (VOCs) at a mountainous forest site and two urban sites in the southeast of China [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **657**: 1491-1500.
- [49] Atkinson R, Arey J. Atmospheric degradation of volatile organic compounds [J]. *Chemical Reviews*, 2003, **103**(12): 4605-4638.
- [50] Sarkar C, Chatterjee A, Majumdar D, *et al.* Volatile organic compounds over Eastern Himalaya, India: temporal variation and source characterization using Positive Matrix Factorization [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, **14**(23): 32133-32175.
- [51] Guan Y A, Wang L, Wang S J, *et al.* Temporal variations and source apportionment of volatile organic compounds at an urban site in Shijiazhuang, China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2020, **97**: 25-34.
- [52] Zhang Y C, Li R, Fu H B, *et al.* Observation and analysis of atmospheric volatile organic compounds in a typical petrochemical area in Yangtze River Delta, China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2018, **71**: 233-248.
- [53] Di X X, Zhao J, Yu Y, *et al.* One-pot synthesis of nitrogen and sulfur co-doped activated carbon supported AuCl₃ as efficient catalysts for acetylene hydrochlorination [J]. *Chinese Chemical Letters*, 2016, **27**(9): 1567-1571.
- [54] 叶露, 邵菁菁, 俞华明. 汽车工业区大气挥发性有机物 (VOCs) 变化特征及来源解析 [J]. *环境科学*, 2021, **42**(2): 624-633.
- Ye L, Tai Q Q, Yu H M. Characteristics and source apportionment of volatile organic compounds (VOCs) in the automobile industrial park of Shanghai [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(2): 624-633.
- [55] 郭鹏, 全纪龙, 刘永乐, 等. 机械化炼焦 VOCs 排放源成分谱分析 [J]. *环境科学与技术*, 2020, **43**(5): 103-114.
- Guo P, Tong J L, Liu Y L, *et al.* VOCs Emission source composition spectrum of mechanized coking [J]. *Environmental*

- Science & Technology, 2020, **43**(5): 103-114.
- [56] Hsu C Y, Chiang H C, Shie R H, *et al.* Ambient VOCs in residential areas near a large-scale petrochemical complex: spatiotemporal variation, source apportionment and health risk [J]. *Environmental Pollution*, 2018, **240**: 95-104.
- [57] Gao J, Zhang J, Li H, *et al.* Comparative study of volatile organic compounds in ambient air using observed mixing ratios and initial mixing ratios taking chemical loss into account-A case study in a typical urban area in Beijing [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **628-629**: 791-804.
- [58] Kumar A, Singh D, Kumar K, *et al.* Distribution of VOCs in urban and rural atmospheres of subtropical India: temporal variation, source attribution, ratios, OFP and risk assessment [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **613-614**: 492-501.
- [59] 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.
- [60] Wu W J, Zhao B, Wang S X, *et al.* Ozone and secondary organic aerosol formation potential from anthropogenic volatile organic compounds emissions in China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2017, **53**: 224-237.

《环境科学》征稿简则

1. 来稿报道成果要有创新性,论点明确,文字精炼,数据可靠.全文不超过8 000字(含图、表、中英文摘要及参考文献).国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、国际合作项目或其它项目请在来稿中注明(在首页以脚注表示).作者投稿时请先登陆我刊网站(www.hjkx.ac.cn)进行注册,注册完毕后以作者身份登录,按照页面给出的提示信息投稿即可.

2. 稿件请按GB 7713-87《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》中学术论文的规范撰写.论文各部分的排列顺序为:题目;作者姓名;作者工作单位、地址、邮政编码;中文摘要;关键词;中图分类号;英文题目;作者姓名及单位的英译名;英文摘要;关键词;正文;致谢;参考文献.

3. 论文题目应简练并准确反映论文内容,一般不超过20字,少用副标题.

4. 中文摘要不少于300字,以第三人称写.摘要内容包括研究工作的目的、方法、结果(包括主要数据)和结论,重点是结果和结论.英文摘要与中文对应,注意人称、时态和语言习惯,以便准确表达内容.

5. 前言包括国内外前人相关工作(引文即可)和本工作的目的、特点和意义等.科普知识不必赘述.

6. 文中图表应力求精简,同一内容不得用图表重复表达,要有中英文对照题目.图应大小一致,曲线粗于图框,图中所有字母、文字字号大小要统一.表用三线表.图表中术语、符号、单位等应与正文一致.

7. 计量单位使用《中华人民共和国法定计量单位》(SI).论文中物理计量单位用字母符号表示,如mg(毫克),m(米),h(小时)等.科技名词术语用国内通用写法,作者译的新名词术语,文中第一次出现时需注明原文.

8. 文中各级标题采用1, 1.1, 1.1.1的形式,左起顶格书写,3级以下标题可用(1), (2)……表示,后缩2格书写.

9. 文中外文字母、符号应标明其大小写,正斜体.生物的拉丁学名为斜体.缩略语首次出现时应给出中文全称,括号内给出英文全称和缩略语.

10. 未公开发表资料不列入参考文献,可在出现页以脚注表示.文献按文中出现的先后次序编排.常见文献书写格式为:

期刊:作者(外文也要姓列名前).论文名[J].期刊名,年,卷(期):起页-止页.

图书:作者.书名[M].出版地:出版社,年.起页-止页.

会议文集:作者.论文名[A].见(In):编者.文集名[C].出版地:出版社(单位),年.起页-止页.

学位论文:作者.论文名[D].保存地:保存单位,年份.

报告:作者.论文名[R].出版地:出版单位,出版年.

专利:专利所有者.专利题名[P].专利国别:专利号,出版日期.

11. 来稿文责自负,切勿一稿多投.编辑对来稿可作文字上和编辑技术上的修改和删节.在3个月内未收到本刊选用通知,可来电询问.

12. 投稿请附作者单位详细地址,邮编,电话号码,电子邮箱等.编辑部邮政地址:北京市2871信箱;邮编:100085;电话:010-62941102;E-mail:hjkx@rcees.ac.cn;网址:www.hjkx.ac.cn

CONTENTS

Development Scenarios and Environmental Benefits Analysis of Future Power Generation Industry Under Two Modes in China	LIU Chun-jing, LÜ Jian-yi, ZHAO Wen-chang, <i>et al.</i>	(3375)
Forecasting of Emission Co-reduction of Greenhouse Gases and Pollutants for the Road Transport Sector in Lanzhou Based on the LEAP Model	PANG Ke, ZHANG Qian, MA Cai-yun, <i>et al.</i>	(3386)
Discussion of Air Quality Forecasting Evaluation for Cities Based on Half-level Method	WANG Xiao-yan, ZHU Li-li, XU Rong, <i>et al.</i>	(3396)
Characterization and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} in Xiamen Port	XIAO Si-han, CAI Mei-jun, LI Xiang, <i>et al.</i>	(3404)
Deposition Characteristics of Water-soluble Inorganic Nitrogen and Organic Nitrogen in Atmospheric Precipitation in the Northern Suburbs of Nanjing	ZHANG Jia-ying, YU Xing-na, ZHANG Yu-xiu, <i>et al.</i>	(3416)
Analysis of PM _{2.5} Transmission Characteristics in Main Cities of Jinzhong Basin in Winter	WANG Xiao-lan, WANG Yan, YAN Shi-ming, <i>et al.</i>	(3423)
Temporal Evolution and Source Apportionment of Black Carbon Aerosol in Ordos During Summer and Autumn 2019	KONG Xiang-chen, ZHANG Lian-xia, ZHANG Cai-yun, <i>et al.</i>	(3439)
Characteristics, Sources, and SOAP of VOCs During Winter in Jiyuan	WANG Fang, LI Li-xia, WANG Hong-guo, <i>et al.</i>	(3451)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in August in the Chang-Zhu-Tan Urban Area	LUO Da-tong, ZHANG Qing-mei, LIU Zhan, <i>et al.</i>	(3463)
Ozone Sensitivity Analysis and Control Strategy in Shijiazhuang City in July 2019	ZHU Jia-xian, WANG Xiao-qi, OU Sheng-ju, <i>et al.</i>	(3473)
Spatiotemporal Variation and Influencing Factors of AOD in the North China Plain	GUO Lin, MENG Fei, MA Ming-liang	(3483)
Aerosol Optical Characteristics with Ground-based Measurements via Sun Photometer and Its Relationship with PM Particle Concentration in Chang'an	ZHENG Yu-rong, WANG Xu-hong, CUI Si-ying, <i>et al.</i>	(3494)
Spatial-temporal Distribution and Evolution Characteristics of Air Pollution in Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on Long-term "Ground-Satellite" Data	WANG Yao-ting, YIN Zhen-ping, ZHENG Zuo-fang, <i>et al.</i>	(3508)
Ten-year Trend Analysis of Eutrophication Status and the Related Causes in Lake Hongze	CHEN Tian-yu, LIU Chang-qing, SHI Xiao-li, <i>et al.</i>	(3523)
Shallow Groundwater Around Plateau Lakes: Spatiotemporal Distribution of Phosphorus and Its Driving Factors	YANG Heng, LI Gui-fang, YE Yuan-hang, <i>et al.</i>	(3532)
Characteristics and Differences of Dissolved Oxygen Stratification in Different Tributaries of Three Gorges Reservoir During Impoundment Period	Ji Dao-bin, FANG Jiao, LONG Liang-hong, <i>et al.</i>	(3543)
Dissolved Organic Matter Component and Source Characteristics of the Metropolitan Lakes and Reservoirs in a Typical Karst Region	NI Mao-fei, ZHOU Hui, MA Yong-mei, <i>et al.</i>	(3552)
Characteristics, Sources, and Risk Assessment of Perfluoroalkyl Substances in Surface Water and Sediment of Luoma Lake	HUANG Jia-hao, WU Wei, HUANG Tian-yin, <i>et al.</i>	(3562)
Vertical Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phytoplankton Community Structure in Qiandao Lake	WANG Ji-yi, HUO Di, GUO Chao-xuan, <i>et al.</i>	(3575)
Chemical Forms and Spatial Distribution of Phosphorus in the Sediment of Sihe River	ZHANG Zi-han, ZHANG Xin-ru, JIA Chuan-xing, <i>et al.</i>	(3587)
Influence of Optimal Land Use Allocation on Phosphorus Loss in the Process of Rainfall and Runoff	ZHOU Hao, CHEN Fang-xin, LUO Yi-feng, <i>et al.</i>	(3597)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Accumulated Heavy Metals in Bioretention Systems	CHU Yang-yang, YANG Long, ZHOU Yuan, <i>et al.</i>	(3608)
Effects of Damming and Impoundment on Planktonic Microbial Community Structure and Interspecific Interaction Patterns in Different Water Depths	WANG Xun, ZHANG Jia-jia, YUAN Qiu-sheng, <i>et al.</i>	(3623)
Identification of Bacterial Flora and Metabolic Function of Sediments in Different Channels of Duliujian River Basin, Tianjin	LIU Jia-yuan, FENG Yue, YANG Xue-chun, <i>et al.</i>	(3635)
Spatiotemporal Distribution and Source Apportionment of Suspended Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Water	PENG Ke-xing, LI Rui-fei, ZHOU Yi-chen, <i>et al.</i>	(3645)
Spatial Variation and Potential Sources of Microplastics in Rivers in Tongzhou District, Beijing	MEN Cong, LI Di, ZUO Jian-e, <i>et al.</i>	(3656)
Effects of Microplastic Exposure on Crucian Growth, Liver Damage, and Gut Microbiome Composition	HU Jia-min, ZUO Jian-e, LI Jin-bo, <i>et al.</i>	(3664)
Influence of Different Types of Dewatering Agents on the Solidification Effect and Physical and Chemical Properties of Sediment	REN Jun, YIN Peng, WANG Wei-zhen, <i>et al.</i>	(3672)
Structural Characteristics of Micro-nano Particle Size Biochar and Its Adsorption Mechanism for Cd ²⁺	MA Wen-yan, PEI Peng-gang, GAO Ge, <i>et al.</i>	(3682)
Phosphorus Adsorption Characteristics of Different Biochar Types and Its Influencing Factors	LIAN Shen-hai, ZHANG Shu-nan, LIU Feng, <i>et al.</i>	(3692)
Development of Zeolite Loaded Mg-La-Fe Ternary (hydr)oxides for Treatment of Low Concentration Phosphate Wastewater	YIN Xue-jie, SONG Xiao-bao, DING Chen-man, <i>et al.</i>	(3699)
Succession and PICRUSt2-based Predicted Functional Analysis of Microbial Communities During the Sludge Bulking Occurrence and Restoration in One-stage Combined Partial Nitrification and ANAMMOX Process	LI Ya-nan, YAN Bing, ZHENG Rui, <i>et al.</i>	(3708)
Aerobic Granulation Stability and Microbial Diversity of Filamentous Bulking Sludge	GAO Chun-di, YANG Xiao-yang, OU Jia-li, <i>et al.</i>	(3718)
Dynamic Variation in Vegetation Cover and Its Influencing Factor Detection in the Yangtze River Basin from 2000 to 2020	XU Yong, ZHENG Zhi-wei, GUO Zhen-dong, <i>et al.</i>	(3730)
Enrichment and Ecological Risk Assessment of Available Phosphorus in Paddy Soil of Fujian Province Over Past 40 years	CHEN Zhong-xing, QIU Long-xia, CHEN Han-yue, <i>et al.</i>	(3741)
Effects of Land Use Change on Constitution, Stability, and C, N, P Stoichiometric Characteristics of Soil Aggregates in Southwest China Karst	HE Yu, SHENG Mao-yin, WANG Ke, <i>et al.</i>	(3752)
Heavy Metal Pollution and Health Risk Assessment of Mine Soil in Yangtze River Economic Belt	ZHANG Zhe, LU Ran, WU Si-yang, <i>et al.</i>	(3763)
Pollution Characteristics and Phytotoxicity of Heavy Metals in the Soil Around Coal Gangue Accumulation Area	SHANG Yu, SANG Nan	(3773)
Evaluation of Mercury Pollution in Soil of Different Land Use Types in Coal-fired Industrial Area	LI Qiang, YAO Wan-cheng, ZHAO Long, <i>et al.</i>	(3781)
Cadmium Enrichment and Bioavailability of Quaternary Profiles in Nansha District, Guangzhou, China	WANG Fang-ting, BAO Ke, HUANG Chang-sheng, <i>et al.</i>	(3789)
Health Risk Assessment and Environmental Benchmark of Heavy Metals in Cultivated Land in Mountainous Area of Northwest Guizhou Province	XU Meng-qi, YANG Wen-tao, YANG Li-yu, <i>et al.</i>	(3799)
Effect Factors and Model Prediction of Soil Heavy Metal Bioaccessibility	ZHANG Jia-wen, TIAN Biao, LUO Jing-jing, <i>et al.</i>	(3811)
Effect of Organic Material Amendments on Soil Respiration in Tobacco Fields of Central Henan	LU Qi-fei, YE Xie-feng, HAN Jin, <i>et al.</i>	(3825)
Methane Production Potential and Methanogenic Pathways in Paddy Soils Under Different Rice-based Cropping Systems	SHEN Wan-yu, HUANG Qiong, MA Jing, <i>et al.</i>	(3835)
Characteristics and Assembly Process of Reclaimed Soil Microbial Communities in Eastern Plain Mining Areas	MA Jing, DONG Wen-xue, ZHU Yan-feng, <i>et al.</i>	(3844)
Differences in Bacterial Community Structure in Rhizosphere Soil of Three <i>Caragana</i> Species and Its Driving Factors in a Common Garden Experiment	LI Yuan-yuan, XU Ting-ting, AI Zhe, <i>et al.</i>	(3854)
Comparison of Bacterial Community Structure and Functional Groups of Paddy Soil Aggregates Between Karst and Non-karst Areas	XIAO Xiao-yi, JIN Zhen-jiang, LENG Meng, <i>et al.</i>	(3865)
Contrasting Responses of the Microbial Community Structure and Functional Traits to Soil pH in Purple Soils	WANG Zhi-hui, JIANG Xian-jun	(3876)
Effects of Agricultural Organic Waste Incorporation on the Metabolic Capacity of Microbial Carbon Sources of Dissolved Organic Matter in Paddy Soil	XIAO Yi, LI Zheng, HUANG Rong, <i>et al.</i>	(3884)