

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.7
第41卷 第7期

目次

中国钢铁行业大气环境影响	汤铃, 薛晓达, 伯鑫, 贾敏, 郭静, 田军, 黄满堂, 崔维庚, 王彤, 李时蓓, 敬红, 甄瑞卿, 孙露, 成国庆 (2981)
华北地区大气细颗粒物(PM _{2.5})年际变化及其对土地利用/覆被变化的响应	杨伟, 姜晓丽 (2995)
郑州市民运会期间大气PM _{2.5} 改善效果评估	王申博, 姜亚敏, 徐艺斐, 袁明浩, 苏方成, 张瑞芹 (3004)
成都夏冬季PM _{2.5} 中水溶性无机离子污染特征	冯炎鹏, 张军科, 黄小娟, 刘琴, 张巍, 张建强 (3012)
川南自贡市大气颗粒物污染特征及传输路径与潜在源分析	雷雨, 张小玲, 康平, 王浩霖, 青泉, 欧奕含, 卢宁生, 邓中慈 (3021)
四川省典型行业挥发性有机物源成分谱	徐晨曦, 陈军辉, 韩丽, 王继钦, 王波 (3031)
成都市工业挥发性有机物排源成分谱	周子航, 邓也, 周小玲, 吴柯颖, 谭钦文, 尹代娟, 宋丹林, 陈秋宇, 曾文斌 (3042)
郑州市典型工业企业VOCs排放特征及风险评估	齐一谨, 倪经纬, 赵东旭, 杨艺, 韩丽岩, 李博伟 (3056)
阳泉市区夏季挥发性有机物污染特征、来源解析及其环境影响	牛月圆, 刘倬诚, 李如梅, 高千卓, 邓萌杰, 闫雨龙, 胡冬梅, 吴婧, 彭林 (3066)
典型光化学污染期间杭州大气挥发性有机物污染特征及反应活性	景盛翱, 叶旭红, 高雅琴, 彭亚荣, 李英杰, 王倩, 沈建东, 王红丽 (3076)
华北地区典型重工业城市夏季近地面O ₃ 污染特征及敏感性	欧盛菊, 魏巍, 王晓琦, 姚森, 周志博, 关攀博, 段文娇, 姚诗音 (3085)
稳定同位素模型解析大气氨来源的参数敏感性	顾梦娜, 潘月鹏, 何月欣, 田世丽, 王彦君, 吕雪梅, 倪雪, 孙杰, 吴电明, 方运霞 (3095)
苏州市大气中汞的形态分布特征及来源分析	卢仁杰, 吴也正, 张晓婕, 沈莹, 吴福全, 薛媛媛, 邹强, 麻春艳 (3102)
轻型汽油车稳态工况下的尾气排放特征	谢岩, 廖松地, 朱曼妮, 王怡然, 王日超, 张立航, 余飞, 钟庄敏, 白莉, 黄江荣, 刘俊文, 郑君瑜 (3112)
非超低与超低排放煤电机组启动过程NO _x 排放特征对比分析	李辉, 朱法华, 孙雪丽, 王宗爽, 王圣, 裴杰, 谭玉菲, 薛峰, 郭敏, 郑桂博 (3121)
邢台市区道路可悬浮灰尘重金属污染特征及来源识别	宋怡, 卢新卫, 周潇, 葛子赫 (3130)
叶片微观结构变化对其颗粒物滞纳能力的影响	魏文俊, 王兵, 牛香 (3136)
关中平原降水氢氧稳定同位素特征及其水汽来源	赵明华, 陆彦玮, Rachana Heng, 司炳成 (3148)
岩溶流域不同水体硝酸盐的来源解析	田永著, 韩志伟, 赵然, 李耕, 曾祥颖, 黄家琰 (3157)
木沥河流域氮素污染及其污染源解析	齐冉, 徐菲菲, 杨帆, 颜昌宙 (3165)
辽河口沉积物环境要素时空动态及影响因素分析	齐玥, 孙永光, 马恭博, 吴楠, 付元宾 (3175)
鄱阳湖多尺度流域磷源输送特征及其生态效应	王朔月, 高扬, 陆瑶, 贾琰杰, 李兆喜, 马明真, 温学发 (3186)
象山港流域入湾河流水体中重金属风险评价及其来源解析	王磊, 汪文东, 刘懂, 李刚, 于红梅, 黄沙, 徐耀阳 (3194)
乐安河河流水体典型全氟化合物的浓度及其前体物的污染贡献	张慧, 王世亮, 余杨 (3204)
连云港海州湾海域表层水体和沉积物中微塑料的分布特征	李征, 高春梅, 杨金龙, 吴立珍, 张硕, 刘艳华, 靳迪迪 (3212)
茅洲河流域民用井中耐药基因的分布特征与健康风险	吴黛灵, 邹海燕, 何璐茜, 高方舟, 应光国, 何良英 (3222)
金盆水库沉积物铁锰释放规律	路林超, 黄廷林, 李楠, 齐允之, 张晗, 王晨旭, 司凡 (3231)
城市湖泊沉积物微塑料污染特征	王璇, 牛司平, 宋小龙, 饶竹, 战楠 (3240)
西藏尼洋河沉积物中微生物群落结构特征分析	刘晓丹, 黄毅, 王永花, 汪贝贝, 吴兵, 陆光华 (3249)
海水中的红毒素与营养盐对微藻的复合影响	王娜, 赵卫红, 苗辉 (3257)
梯级电站作用下牡丹江底栖动物沿程变化规律	温佳琦, 王皓冉, 陈永灿, 刘昭伟 (3266)
宁波市典型城市下垫面雨水径流污染特征解析	徐宇婕, 龚玥敏, 毕军鹏, 王洋, 程军蕊, 王侃 (3275)
分层型水库藻类垂直演替的水质与细菌种群调控	闫苗苗, 陈胜男, 黄廷林, 贾克宇, 刘凯文, 苗雨甜, 宗容容 (3285)
长距离供水系统中消毒副产物分布特征及二次加氯的影响	毕薇薇, 叶胜, 于建全, 杨玉龙, 陈晨, 李青松, 马晓雁 (3297)
供水管网终端消毒副产物分布特征及预测模型	刘俊萍, 陈镜吉, 宋亚丽, 杨玉龙, 李青松, 马晓雁 (3307)
碱和磁复合改性小麦秸秆生物炭对水体中镉的吸附特性及机制	崔志文, 任艳芳, 王伟, 张黎明, 张陆云, 王曦玥, 何俊瑜 (3315)
弱磁场强化氧化石墨烯负载纳米零价铁(GO-nFe ⁰ /WMF)对水中Cr(VI)的去除特性及机制	计盟, 鲍建国, 朱晓伟, 杜江坤, 郑汉 (3326)
一硫代肟在针铁矿上的吸附及影响因素	廖丹雪, 单慧娟, 张进贤, 彭三曦, 黄健, 陈辉, 赵超然, 曾春芽 (3337)
生物滤池快速启动ANAMMOX运行策略及菌群特征	王晓瞳, 杨宏, 苏杨, 刘旭妍 (3345)
低碳源条件下供氧模式对活性污泥系统脱氮性能的影响	张欣瑞, 池玉蕾, 王倩, 金鑫, 石炬, 金鹏康 (3356)
羟胺对厌氧氨氧化污泥群落的影响	邢崇阳, 范禹辰, 陈璇, 郭劲松, 申渝, 晏楠, 方芳, 陈猷鹏 (3365)
低温下丝状菌膨胀污泥的微生物多样性	高春娣, 张娜, 韩微, 任浩, 李悦, 侯春艳, 王传德, 彭永臻 (3373)
我国剩余污泥厌氧消化的主要影响因素及强化	董滨, 高君, 陈思思, 杨殿海, 戴晓虎 (3384)
城镇河流CO ₂ 及CH ₄ 排放与市政排水管网污水输入的关联影响	李磊, 陈浩, 朱奔, 王宇晖, 聂云汉, 赵昕, 贾其隆, 叶建峰 (3392)
控释尿素对黄河故道沙性潮土N ₂ O排放的影响	姜右锦, 袁俊吉, 丁维新, 刘阳, 张松林 (3402)
我国典型露地蔬菜生产中的温室气体排放	张芬, 程泰鸿, 陈新平, 王孝忠 (3410)
不同母质发育土壤Cd环境行为对水分管理模式的响应差异	黄敬, 李欣阳, 文沙, 蒋凯, 龙坚, 彭佩钦, 侯红波 (3418)
锰基改性生物炭对弱碱性Cd污染土壤团聚体结构以及Cd含量特征的影响	孙彤, 付宇童, 李可, 徐应明, 孙约兵 (3426)
钝化与叶面阻控对不同基因型红菜苔镉累积的影响	曹坤坤, 李成成, 胡学玉, 郭晓, 黄洋 (3434)
叶面喷施2,3-二巯基丁二酸对水稻幼苗镉吸收转运及抗氧化系统的影响	杨晓荣, 黄永春, 刘仲齐, 黄益宗, 程六龙, 张长波 (3441)
《环境科学》征订启事 (3011)	《环境科学》征稿简则 (3084)
信息 (3174, 3185, 3391)	

阳泉市区夏季挥发性有机物污染特征、来源解析及其环境影响

牛月圆¹, 刘倬诚¹, 李如梅^{1,2}, 高千卓¹, 邓萌杰¹, 闫雨龙¹, 胡冬梅¹, 吴婧^{1*}, 彭林¹

(1. 华北电力大学环境科学与工程学院, 资源环境系统优化教育部重点实验室, 北京 102206; 2. 华北电力大学能源动力与机械工程学院, 北京 102206)

摘要: 采集阳泉市区夏季3个监测点的环境空气样品, 利用气相色谱-质谱/氢火焰离子化检测器(GC-MSD/FID)测定了挥发性有机物(VOCs)的组成, 研究了其浓度特征, 运用特征比值法和正定矩阵因子分析模型(PMF)解析了VOCs来源, 评估了VOCs对O₃和二次有机气溶胶(SOA)生成的影响。结果表明, 阳泉市区VOCs平均总浓度为(82.1 ± 22.7) μg·m⁻³, 其中烷烃浓度占比最大(51.8%), 其次是芳香烃(17.8%)和烯烃(8.0%), 炔烃浓度占比最小(3.8%)。VOCs呈现双峰的变化特征, 分别于08:00~10:00和18:00~20:00出现峰值, 在12:00~14:00出现谷值。苯/甲苯和异戊烷/正戊烷的均值分别为2.1 ± 1.3和1.7 ± 0.6, 表明环境空气VOCs可能受燃煤排放和机动车排放的双重影响。PMF解析出VOCs来源分别为燃煤源(34.9%)、机动车排放源(18.2%)、汽油挥发源(15.2%)、工业排放源(13.6%)、植物排放源(9.2%)和溶剂使用源(9.0%)。VOCs臭氧生成潜势(OFP)均值为156.6 μg·m⁻³, 烯烃贡献最大, 二次有机气溶胶生成潜势(SOA_p)均值为68.7 μg·m⁻³, 芳香烃的贡献达到93.4%。总之, 燃煤排放对VOCs的贡献较高, 因此, 控制燃煤源排放是阳泉市区VOCs管控重点, 需加快矸石山治理和能源结构调整, 同时机动车排放源、汽油挥发源和工业排放源的管控也不容忽视。

关键词: 阳泉; 挥发性有机物(VOCs); 来源解析; 臭氧生成潜势(OFP); 二次有机气溶胶生成潜势(SOA_p)

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)07-3066-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.201912253

Characteristics, Source Apportionment, and Environmental Impact of Volatile Organic Compounds in Summer in Yangquan

NIU Yue-yuan¹, LIU Zhuo-cheng¹, LI Ru-mei^{1,2}, GAO Qian-zhuo¹, DENG Meng-jie¹, YAN Yu-long¹, HU Dong-mei¹, WU Jing^{1*}, PENG Lin¹

(1. Key Laboratory of Resources and Environmental System Optimization, Ministry of Education, College of Environmental Science and Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. School of Energy, Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Volatile organic compounds (VOCs) were collected at three environmental sampling sites in Yangquan and quantified by gas chromatography-mass selective detector/flame ionization detector (GC-MSD/FID). The VOC sources were identified by diagnostic ratios and positive matrix factorization (PMF), and environmental impact of VOCs on O₃ and secondary organic aerosol (SOA) were evaluated. The results showed that the average VOC concentration was (82.1 ± 22.7) μg·m⁻³, with alkanes being the most abundant group (51.8%), followed by aromatics (17.8%), alkenes (8.0%), and alkynes (3.8%). The diurnal variation of VOCs exhibited a bimodal trend, with twin peaks appearing at 08:00-10:00 and 18:00-20:00, falling to a valley at 12:00-14:00. The results for benzene/toluene (2.1 ± 1.3) and isopentane/*n*-pentane (1.7 ± 0.6) showed that the ambient VOCs may be influenced by coal combustion and vehicular emissions. Six sources were extracted by PMF: coal combustion (34.9%), vehicle emissions (18.2%), gasoline evaporation (15.2%), industrial emissions (13.6%), biogenic emissions (9.2%), and solvent usage (9.0%). The average concentration of ozone formation potential (OFP) was 156.6 μg·m⁻³, with the highest contribution from alkenes, while the average concentration of secondary organic aerosol formation potential (SOA_p) was 68.7 μg·m⁻³, mainly from aromatics (93.4%). In summary, coal combustion was the most abundant source of VOCs, and accelerating the management of coal gangue and energy structure readjustment are the key points to address. Meanwhile, restricting the VOCs from vehicle emissions, gasoline evaporation, and industrial emissions is also required.

Key words: Yangquan; volatile organic compounds (VOCs); source apportionment; ozone formation potential (OFP); secondary organic aerosol formation potential (SOA_p)

随着中国城市化进程的快速稳定发展, 大气污染物排放持续增加带来的环境问题引发了全社会的关注^[1,2]。近年来, 我国环境污染逐渐由传统单一的煤烟型污染转化为以臭氧(O₃)和霾污染并存的复合型污染^[3~6]。其中, 臭氧污染问

收稿日期: 2019-12-30; 修订日期: 2020-02-13

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFC0214200, 2019YFC0214500); 大气重污染成因与治理攻关项目(DQGG-05-12); 国家自然科学基金项目(41673004, 21976053); 中央高校基本科研业务费专项(2018ZD12)

作者简介: 牛月圆(1995~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气污染与控制, E-mail: yueyuan03070@163.com
* 通信作者, E-mail: wujing@ncepu.edu.cn

题日益突出,已经成为影响我国许多城市夏季环境空气质量的主要问题. 臭氧主要是由一次排放的挥发性有机物 (volatile organic compounds, VOCs) 和氮氧化物 (NO_x) 等在大气中发生一系列复杂化学反应而产生的^[7]. 已有研究表明,近地面 O_3 的形成与 VOCs 和 NO_x 浓度之间存在着复杂的非线性关系,多数城市城区范围内 VOCs 对 O_3 的形成起主控作用^[5]. 此外, VOCs 还是环境空气中二次有机气溶胶 (secondary organic aerosols, SOA) 形成的重要前体物^[8]. 环境空气中 VOCs 来源较多且成分复杂多变,研究 VOCs 在大气中的浓度特征、来源和环境影响对制定合理的减排对策具有重要意义.

国内大多数研究集中于长三角、珠三角以及京津冀等地区,而针对典型煤炭资源城市的研究较少. 本研究选择典型煤炭资源城市阳泉市作为研究对象,用以探讨环境空气中 VOCs 的污染特征、来源与环境影响. 阳泉市位于山西省中东部,是山西煤炭能源重化工基地的重要组成部分,同时是京津冀大气污染传输通道城市 (“2+26”城市) 之一. 2018 年 5~8 月,阳泉市以臭氧为首要污染物的天数有 97 d, 占总天数的 78.9%,臭氧污染已成为影响阳泉市环境空气质量的重要原因之一. 本研究在阳泉市区选取 3 个监测点位,于 2018 年夏季对环境空气中的 VOCs 进行采样,分析其污染特征,利用正定矩阵因子分析模型 (positive matrix factorization, PMF) 对 VOCs 进行来源解析,同时计算了其臭氧生成潜势

(ozone formation potential, OFP) 和二次气溶胶生成潜势 (secondary organic aerosol formation potential, SOA_p), 以期对阳泉市大气环境 VOCs 管控以及改善环境空气质量提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 样品采集与分析方法

1.1.1 样品采集

本研究于 2018 年 7 月 27 日~8 月 2 日 (7 月的 28 日和 30 日由于降水原因暂停采样) 在阳泉市区 3 个监测点位进行了采样,采样点位均为国控站点,采样口距地面约 15 m, 采样点位分别为: 南庄 (37.85°N, 113.58°E)、白羊墅 (37.85°N, 113.62°E) 和大阳泉 (37.84°N, 113.51°E), 如图 1 所示. 南庄点位位于市中心,是居民、商业和办公的混合区; 白羊墅点位位于工业区,工业较多,往来货车频繁,且临近 207 国道; 大阳泉点位设于狮脑山上,周围无明显污染源,但可能受附近大面积煤矸石山的影响. 采样采取 1 h 连续积分采样,在南庄点位开展加强观测,采样时间为 06:00~20:00, 每 2 h 采集 1 次样品,用于分析日变化特征; 在白羊墅和大阳泉点位开展常规观测,每日 06:00 和 14:00 各采集 1 次样品,用于反映每日的 VOCs 整体水平. 采用阻尼采样器将空气样品采集到体积为 3.2 L 的苏玛罐 (SUMMA canister, Entech, USA) 中. 采样后的苏玛罐室温下保存,且确保采样后 1 周之内进行分析.

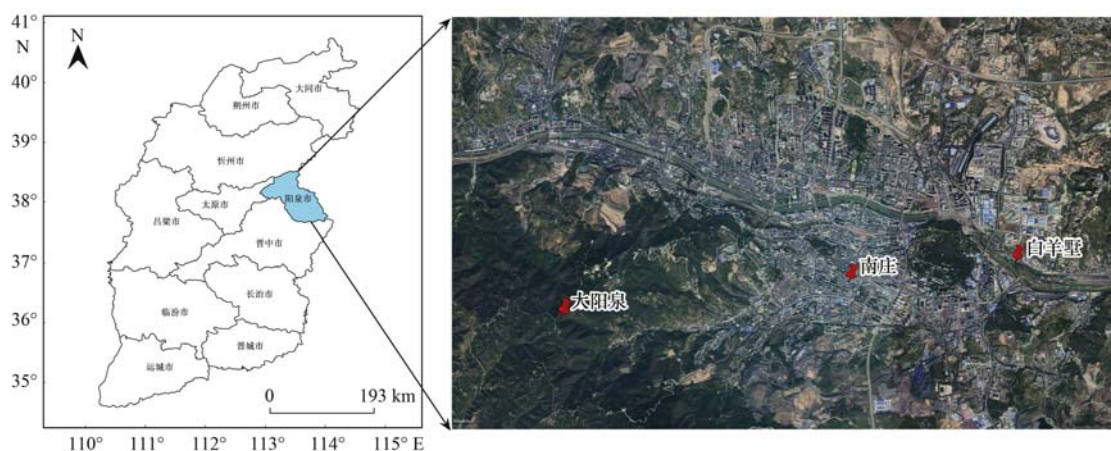


图 1 采样点位分布示意

Fig. 1 Locations of sampling sites

1.1.2 样品分析

本研究使用 VOCs 预浓缩仪 (Entech 7200A, USA) 对气体样品进行预处理,并通过气相色谱-质谱/氢火焰离子化检测器 (Agilent 7890GC-5975MSD/FID, USA) 进行分析. 首先,将气体样品

(300 mL) 吸入一级冷阱中,样品在 -150°C 冷却并在 10°C 下解吸,同时将 N_2 、 O_2 和 Ar 分离出去. 然后,将来自一级冷阱的样品在 -40°C 的二级冷阱中浓缩两次并在 180°C 下解吸,同时将剩余的 CH_4 、 CO_2 、 H_2O 和 Ar 分离出去. 之后通过空毛细管柱在

-160℃下的聚焦冷阱中冷冻样品. 冷冻后,将来自空毛细管柱的样品加热使其迅速升温并通过高纯度(99.9%)氦气(He)将所有目标物质通过 DB-1 (60 m×0.25 mm×1.0 μm)进行分离. 随后,C2~C3 化合物经 Deans Switch 中心切割技术,送入 PLOT-Q (30 m×0.32 mm×2.0 μm,USA) 色谱柱继续分离

后由 FID 检测,其它化合物经切割后送入空柱由 MSD 检测. 化合物的定性依据色谱保留时间和质谱图,通过建立工作曲线对目标化合物进行定量分析. 目标 VOCs 种类如表 1 所示. 本研究的 O₃ 和 NO_x 等气态污染物数据来源于市监测站,风速和风向等气象数据来源于市气象站.

表 1 目标 VOCs 物种
Table 1 Target VOCs species

检测 ¹⁾	VOCs 化合物
FID	乙烷、乙烯、乙炔、丙烯、丙烷
MSD	异丁烷、正丁烷、1-丁烯、反式-2-丁烯、顺式-2-丁烯、异戊烷、正戊烷、环戊烷、1-戊烯、异戊二烯、反式-2-戊烯、顺式-2-戊烯、2,2-二甲基丁烷、2,3-二甲基丁烷、2-甲基戊烷、3-甲基戊烷、1-己烯、正己烷、甲基环戊烷、2,4-二甲基戊烷、苯、环己烷、2-甲基己烷、2,3-二甲基戊烷、3-甲基己烷、2,2,4-三甲基戊烷、正庚烷、甲基环己烷、2,3,4-三甲基戊烷、甲苯、2-甲基庚烷、3-甲基庚烷、正辛烷、乙苯、间/对-二甲苯、邻-二甲苯、苯乙烯、正壬烷、异丙苯、正丙苯、间-乙基甲苯、对-乙基甲苯、1,3,5-三甲基苯、邻-二乙基苯、1,2,4-三甲基苯、正癸烷、1,2,3-三甲基苯、间-二乙基苯、对-二乙基苯、正十一烷、正十二烷、氯甲烷、氯乙烯、1,3-丁二烯、氯乙烷、二氯甲烷、三氯甲烷、1,2-二氯丙烷、1,1,2-三氯乙烷、四氯乙烯、异丙醇、甲基叔丁醚

1) FID: 氢火焰离子化检测器(flame ionization detector); MSD: 质谱检测器(mass spectrum detector)

1.2 质量控制和保证

苏玛罐配有真空阀门,密闭性好,内壁无吸附,在使用前均用高纯度氮气清洗 3~5 次. 监测过程严格执行质量控制和保证措施,使用具有标准证书的 VOCs 标准样品稀释后绘制标准曲线. 每次进行样品分析前,先以高纯氮气进样,进行空白实验,以确保仪器系统不会带来污染;每日需随机选取 1 个样品进行重复实验,要求 2 次检测目标化合物浓度的相对标准偏差(RSD)≤15%,目标化合物检测限范围为 0.010~0.330 μg·m⁻³;绘制标准曲线时必须保证每 1 个响应因子的 RSD 均小于 30%.

1.3 研究方法

1.3.1 PMF 模型

本研究采用 PMF 模型对阳泉市区夏季 VOCs 进行定量的源解析^[9]. 其基本原理是将受体矩阵分解为源成分谱矩阵、源贡献矩阵和残差矩阵. PMF 计算过程中的基本公式为:

$$E_{ik} = \sum_{j=1}^p A_{ik} B_{jk} + \varepsilon_{ik} \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

式中, E_{ik} 为 k 次观测的污染物 i 的浓度; j 为因子, A_{ik} 和 B_{jk} 分别为源成分谱和源贡献; ε_{ik} 为残差. PMF 主要是计算目标函数 Q 的最小值,目标函数为:

$$Q = \sum_i^m \sum_k^n \left(\frac{\varepsilon_{ik}}{\sigma_{ik}} \right)^2$$

式中, σ_{ik} 为样品的不确定性偏差. 样品的不确定度 U 计算公式为:

$$U = \begin{cases} \sqrt{(E \cdot c)^2 + M^2}, & (c > M) \\ \frac{5}{6}M, & (c \leq M) \end{cases}$$

式中, E 为误差比例; M 为检测限; c 为污染物的

浓度.

1.3.2 臭氧生成潜势

环境空气中 VOCs 生成臭氧的能力受 VOCs 浓度、反应活性和气象条件等因素的影响. Carter^[10] 提出了最大增量反应活性(MIR)概念,用来评估理想条件下 VOCs 物种通过化学反应产生 O₃ 的能力,计算公式为:

$$\text{OFP}_i = [\text{VOCs}_i] \times \text{MIR}_i$$

式中, OFP_i 指第 i 个 VOCs 物种的臭氧生成潜势(μg·m⁻³); MIR_i 指第 i 个 VOCs 物种的最大增量反应系数,以 O₃/VOCs 计(g·g⁻¹),相关数值见文献[10].

1.3.3 二次有机气溶胶生成潜势

为了解环境空气中 VOCs 对 SOA 生成的影响,本研究采用气溶胶生成系数法(FAC 法)评估阳泉市区 SOA 生成潜势^[11,12]. 计算公式如下:

$$\text{SOA}_p = \text{VOCs}_i / (1 - F_{\text{VOCr}}) \times \text{FAC}$$

式中, SOA_p 指 SOA 的生成潜势(μg·m⁻³); VOCs_i 指环境空气中 VOCs 的浓度(μg·m⁻³); F_{VOCr} 指 SOA 的生成系数(%),其中 F_{VOCr} 与 FAC 由烟雾箱实验获得^[11,12].

2 结果与讨论

2.1 VOCs 污染特征

2.1.1 浓度水平及组成特征

本研究共讨论了 68 种 VOCs 组分,包括 29 种烷烃、10 种烯烃、17 种芳香烃、1 种炔烃(乙炔)和 11 种其他 VOCs (氯甲烷、氯乙烯、1,3-丁二烯、氯乙烷、二氯甲烷、三氯甲烷、1,2-二氯丙烷、1,1,2-三氯乙

烷、四氯乙烯、异丙醇和甲基叔丁醚). 阳泉市区 VOCs 平均总浓度为(82.1 ± 22.7) $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 其中,南庄点位平均浓度最高(86.2 ± 24.9) $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 白羊墅点位次之(80.9 ± 16.3) $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 大阳泉点位最低(69.0 ± 14.3) $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 采样期间南庄点位最高浓度为 $134.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 出现在 7 月 29 日 16:00 ~ 17:00; 最低浓度为 $36.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 出现在 8 月 2 日 12:00 ~ 13:00. 阳泉市区环境空气中 VOCs 烷烃占比最大(51.8%), 其次为芳香烃(17.8%)和烯烃(8.0%), 炔烃占比较小(3.8%). 3 个点位组分占比存在空间差异(表 2), 南庄和白羊墅点位烷烃的占比略高于大

阳泉点位, 大阳泉点位烯烃的占比相对较高. 本研究测得的 VOCs 浓度与国内同类研究(研究时段均处于夏季)对比如表 3 所示. 阳泉市区烷烃($42.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)和烯烃($6.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)浓度接近朔州的浓度水平, 略低于太原、南京和成都地区等内陆经济发达城市; 芳香烃浓度($14.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)显著低于所有同类研究; 炔烃浓度($3.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)高于朔州、太原、佛山、成都和台中大多数城市, 阳泉是典型的煤炭资源城市, 而煤燃烧过程会排放乙炔^[13,14], 因而阳泉较高的乙炔浓度可能与其显著的燃煤排放有关.

表 2 不同点位 VOCs 浓度水平
Table 2 Concentrations of VOCs at different sampling sites

采样点位	VOCs			烷烃			烯烃		
	最大值	最小值	均值	最大值	最小值	均值	最大值	最小值	均值
南庄	134.4	36.6	86.2	77.6	18.1	45.0	12.8	3.2	6.8
白羊墅	107.3	57.7	80.9	56.4	30.0	43.0	11.3	2.5	5.1
大阳泉	91.3	45.0	69.0	46.0	21.0	33.1	10.7	3.8	6.7

采样点位	芳香烃			炔烃			其他 VOCs		
	最大值	最小值	均值	最大值	最小值	均值	最大值	最小值	均值
南庄	29.0	4.0	15.8	8.8	1.1	3.6	26.1	4.5	15.8
白羊墅	21.5	8.4	15.7	4.3	0.2	2.2	29.6	10.6	15.7
大阳泉	18.7	7.0	14.3	4.7	0.9	2.1	20.9	9.6	14.3

表 3 阳泉与国内其他城市夏季 VOCs 组分浓度对比¹⁾/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$
Table 3 Comparison of VOCs between Yangquan and similar studies/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

项目	烷烃	烯烃	芳香烃	炔烃	其他 VOCs	VOCs	文献
朔州(2015 年)	41.7(29)	6.5(10)	25.2(17)	1.1(1)	—	74.6(57)	[15]
太原(2014 年)	47.2(28)	10.0(10)	37.8(17)	2.8(1)	—	97.8(56)	[16]
南京(2013 年)	51.5(29)	7.5(10)	38.6(17)	4.7(1)	—	102.3(57)	[17]
佛山(2015 年)	19.1(24)	10.8(14)	24.7(17)	1.6(1)	—	56.2(56)	[18]
成都(2014 年)	50.8(29)	8.2(11)	75.5(17)	2.7(1)	—	137.2(58)	[19]
台中(2016 年)	33.8(28)	5.4(9)	34.8(17)	2.2(1)	—	76.2(55)	[20]
厦门(2014 年)	39.9(29)	6.3(10)	27.6(17)	—	—	73.8(56)	[21]
阳泉市区(2018 年)	42.5(29)	6.2(10)	14.6(17)	3.1(1)	15.5(11)	82.1(68)	本研究

1) 括号中为 VOCs 物种数

3 个点位 VOCs 浓度排名前 10 的物种占比为 62.1% ~ 68.5%, 可视为优势物种. 异丁烷、乙烷、丙烷、苯、氯甲烷和二氯甲烷在 3 个点位的 VOCs 中均为优势物种(图 2), 应作为阳泉市区 VOCs 关注重点. 异戊烷是汽油挥发的典型示踪物^[22], 白羊墅点位较高的异戊烷浓度可能受其周边加油站油气泄漏以及工业区来往车辆油气挥发影响.

2.1.2 日变化特征

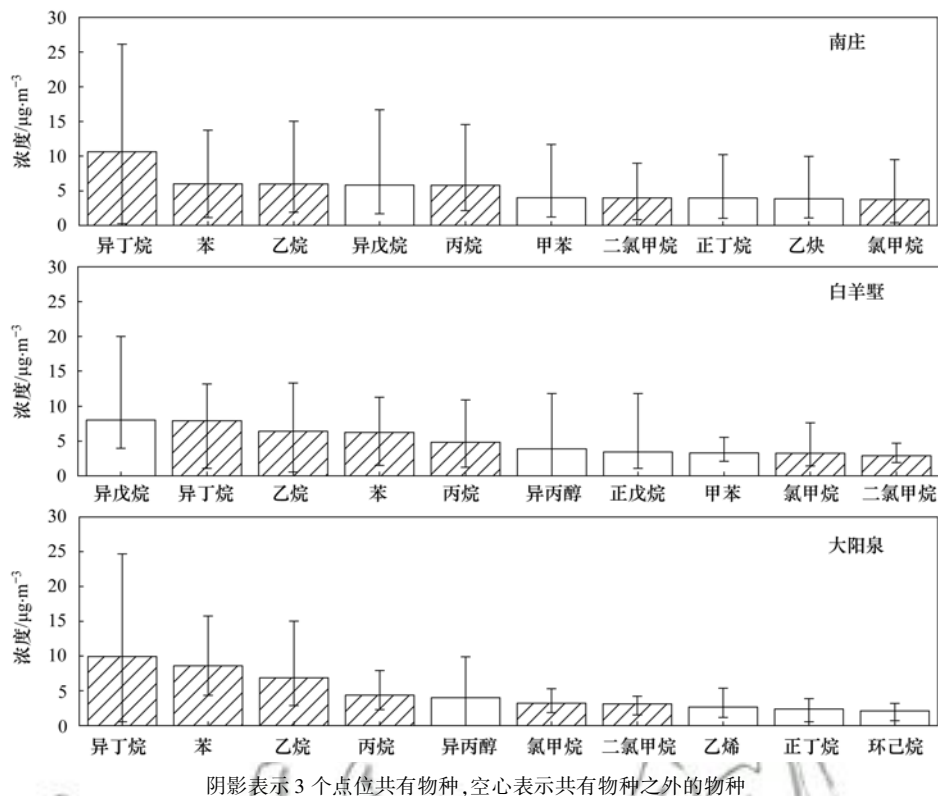
采样时段南庄点位 VOCs 均大致呈现双峰的变化特征(图 3): ①上午时段(06:00 ~ 09:00), VOCs 与氮氧化物(NO 、 NO_2 和 NO_x)易出现峰值, 此时 O_3 维持低值. 其中, 8 月 1 日和 8 月 2 日上午时段, 氮氧化物浓度较其他采样日期同时段浓度显著提升, 此时烷烃浓度也占比较高, 推测早高峰

机动车排放可能对 VOCs 浓度的抬升有重要影响, 同时夜晚污染物累积对上午时段浓度的升高也有一定作用. ②随后光化学反应对臭氧前体物质的消耗使得 VOCs 与氮氧化物浓度下降并在中午时段(12:00 ~ 15:00)达到谷值, 此时 O_3 浓度较高. 其中, 8 月 1 日和 8 月 2 日午后(14:00 ~ 17:00)风速瞬间增大使得 VOCs 得到快速清除, 其浓度相比其他采样日期同时段的浓度更低. ③傍晚时段(16:00 ~ 19:00), VOCs 浓度上升明显, NO_2 和 NO_x 也有小幅度上升, 可能受本地排放与区域传输的综合影响.

2.2 VOCs 来源解析

2.2.1 特征比值分析

苯与甲苯的比值(B/T)通常用来简单地判断环



阴影表示 3 个点位共有物种,空心表示共有物种之外的物种

图 2 不同采样点位 VOCs 优势物种

Fig. 2 Concentrations of major VOCs species at various sampling sites

境空气中 VOCs 的来源^[8]. B/T 值接近 0.5 时,可判断 VOCs 主要受机动车排放影响^[8,23],比值大于 1 时 VOCs 主要来自燃烧源,尤其比值介于 1.5 ~ 2.2 时被认为受燃煤源排放影响较大^[24]. 阳泉市区 B/T 的变化范围是 0.2 ~ 4.6,平均比值为 2.1 ± 1.3 (图 4),表明阳泉市 VOCs 排放受燃煤源影响显著,此外还受机动车排放影响. 异戊烷与正戊烷具有相似的大气寿命,通过异戊烷与正戊烷的比值(i/n)可初步判断 VOCs 的来源^[25]. 相关研究表明,我国隧道实验和汽油挥发 i/n 值分别约为 2.9 和 3.8,燃煤源 i/n 值变化范围约为 0.56 ~ 0.8^[24,26]. 本研究异戊烷/正戊烷变化范围为 0.4 ~ 2.5,平均比值为 1.7 ± 0.6 ,表明阳泉市区 VOCs 排放受燃煤源和机动车源共同影响. 综上,阳泉市区 VOCs 排放主要受燃煤排放影响,机动车影响也不容忽视.

苯、乙苯和间/对-二甲苯具有同源性但大气寿命有显著差异,常用乙苯与间/对-二甲苯(E/X)和苯与间/对-二甲苯(B/X)的比值来评估气团的老化程度^[27,28]. 当 E/X 大于 0.33 或 B/X 大于 1.7 时,认为该区域受老化气团控制可能性较大^[29,30]. 本研究 E/X 均值为 0.5 ± 0.1 ,B/X 均值为 3.5 ± 1.9 (图 4),采样期位于夏季且晴天居多,VOCs 反应较快,加之区域传输的影响,因而阳泉市环境空气中 VOCs 可能受老化气团控制.

2.2.2 PMF 来源解析

本研究采用 PMF 5.0 模型对阳泉市区环境空气 VOCs 进行来源解析. 最终选取源指示性较强和较稳定的 35 种 VOCs 参与模型运算. 多次运行分析发现选取 6 个因子时计算结果较为稳定,此时 Q (Ture) 值收敛于 875.809, Q (Robust) 值收敛于 875.811.

PMF 解析出阳泉市区 6 类 VOCs 排放源,各因子的 VOCs 化合物源谱如图 5 所示. 本研究主要参考 Mo 等^[14] 给出的源谱的特征物种判断源. 因子 1 中贡献较大的物种有苯乙烯、甲苯、乙苯和间/对-二甲苯等,由于苯乙烯是焦化排放的特征物种,甲苯、乙苯和间/对-二甲苯等在全类工业中排放较大,因子 1 可认为是工业排放源^[14,31]. 因子 2 中贡献最大的物种是异戊二烯,可认为是植物排放源^[1]. 因子 3 中,间-乙基甲苯、1,3,5-三甲基苯、邻-乙基甲苯、1,2,4-三甲基苯和 1,2,3-三甲基苯等物种载荷贡献较高,由于芳香烃在溶剂使用过程中排放比例较大,因子 3 可作为溶剂使用源^[14,32]. 因子 4 中贡献较大的物种有正丁烷、异戊烷和正戊烷,其中正戊烷和异戊烷是汽油挥发的特征物种,因子 4 可认为是汽油挥发源^[22]. 因子 5 中载荷较大的物种有异戊烷、正戊烷、2,3-二甲基丁烷、2-甲基戊烷、2-甲基己烷、2,3-二甲基戊烷、甲基叔丁醚以及部分芳香烃化合

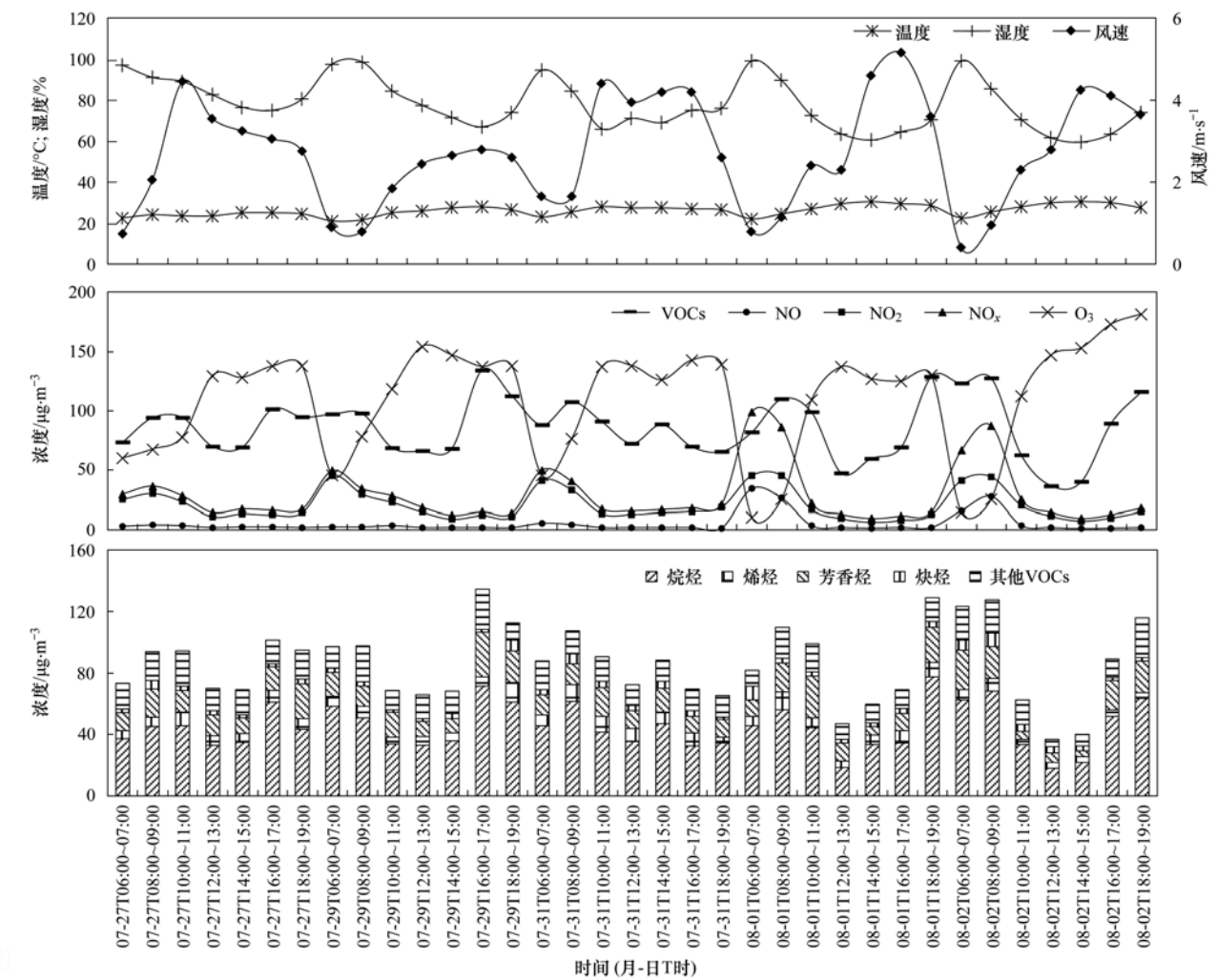


图3 VOCs及污染物浓度日变化特征
Fig. 3 Daily variation of VOCs and other pollutants

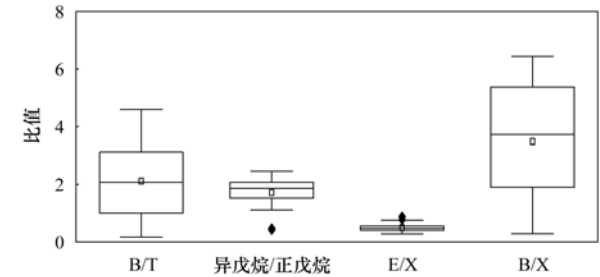


图4 VOCs特征物种比
Fig. 4 Diagnostic ratios of VOCs species

物。其中,甲基叔丁醚是常见的汽油添加剂,C3~C5类烷烃以及芳香烃为城市机动车尾气排放的主要物种^[14,22,33,34]。乙烷、丙烷、乙烯、丙烯、苯和乙炔在因子6中的占比较大,均为煤燃烧排放的典型物种,故因子6可能为燃煤源^[13]。虽然机动车尾气也会排放乙烷、乙烯、苯和乙炔等物种,但浓度显著低于燃煤源^[14]。此外,机动车还同时排放异戊烷、甲苯和三甲基苯等不容忽视的物种^[14],因子6中上述物种占比极小,因此判断因子6为燃煤源。

经计算(图6),阳泉市区夏季VOCs排放的最

主要来源为燃煤源(34.9%);机动车排放源(18.2%)、汽油挥发源(15.2%)以及工业排放源(13.6%)次之;植物排放源(9.2%)和溶剂使用源(9.0%)的贡献最低。因此,控制燃煤是阳泉市区夏季VOCs管控的重要途径,同时包括机动车排放和汽油挥发在内的机动车相关污染源和工业排放源的管控也不容忽视。

不同点位的VOCs源解析结果存在较大差异。如图7所示,燃煤源在大阳泉点位的贡献比例较高(52.3%),可能受附近存在的大面积煤矸石燃烧影响。白羊墅点位位于工业区且临近207国道,往来机动车尤其重型货车频繁,是机动车排放源(30.7%)和汽油挥发源(19.4%)的贡献比例显著高于其他点位的重要原因之一;此外点位附近加油站油气泄漏也会造成机动车相关污染源贡献比例高。大阳泉点位位于狮脑山,植被的大面积分布可能导致植物源排放在大阳泉点位的贡献比例(21.3%)显著高于其他点位。

不同臭氧浓度区间的VOCs源解析结果也存在

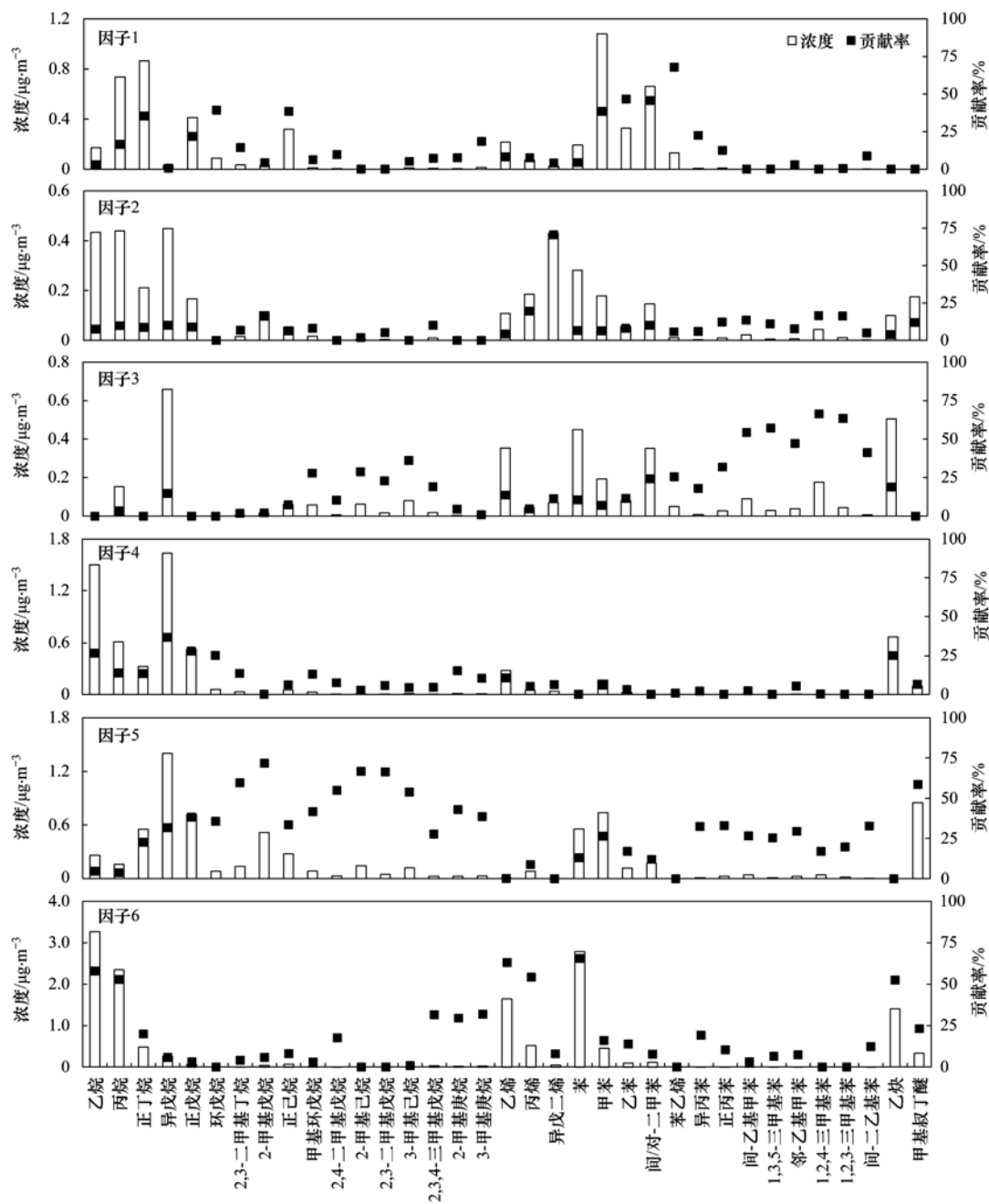


图5 各因子的 VOCs 化合物源谱

Fig. 5 Source profiles of VOCs in each factor

一定差异(图7),臭氧浓度小于 $160\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 时燃煤源贡献较大(28.9%~47.4%);臭氧浓度较高时($>160\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$),机动车排放源、汽油挥发源、植物源和工业排放源占比较大.分析表明,臭氧浓度较高时段多出现在中午以及下午,阳泉市盛行东风,且风速较大($>3.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$),区域传输影响使得燃煤源贡献较臭氧浓度低时显著降低.此外,臭氧浓度较高时,较高的温度有利于有机物挥发,可能是机动车排放源、汽油挥发源和植物排放源等排放源占比上升的原因.

基于上述 PMF 结果分析,燃煤源是阳泉市区重点 VOCs 管控源类,应加快市区矸石山治理和能源结

构调整,尽可能减少燃煤源 VOCs 大量排放问题.此外,机动车相关排放源和工业排放问题也不容忽视.

2.3 VOCs 环境影响分析

2.3.1 臭氧生成潜势分析

各 VOCs 组分对 3 个点位 OFP 的贡献如图 8 所示.阳泉市区 OFP 均值为 $156.6\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,其中烯烃对臭氧生成潜势的贡献率最大(40.5%),烷烃(26.6%)和芳香烃(28.4%)次之,炔烃(1.9%)贡献最小.大阳泉点位烯烃 OFP 占比最大,可能受点位周边矸石燃烧导致的乙烯浓度较高的影响.3 个点位 OFP 排名前 10 的物种相似,均包含乙烯、丙烯、1-丁烯、异戊二烯等烯烃,甲苯、间/对-二甲苯、

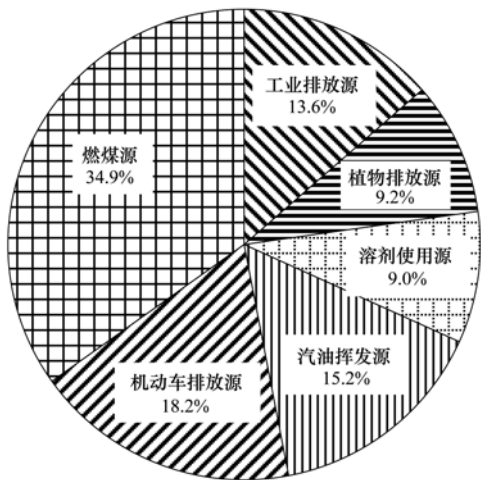


图 6 六类源对 VOCs 排放的贡献
Fig. 6 Contributions of six sources of VOCs

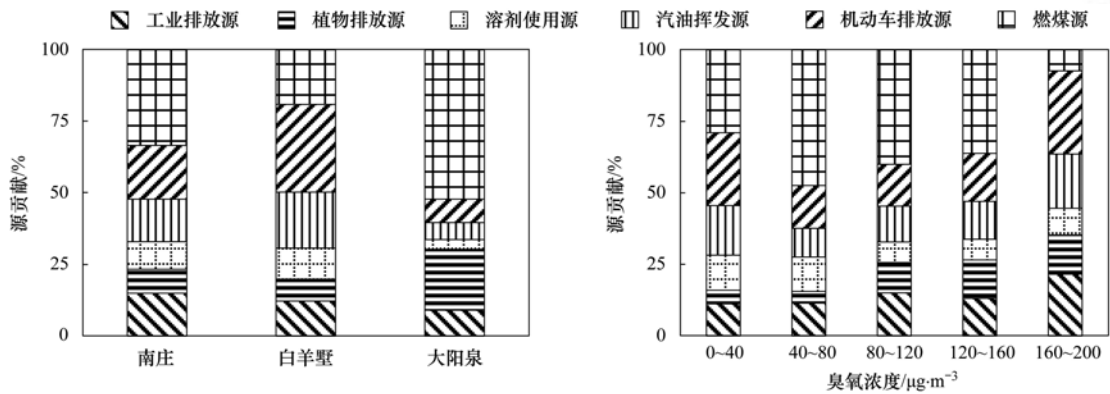


图 7 不同点位以及不同臭氧浓度下的源解析结果
Fig. 7 Source apportionment at different sampling sites and ozone concentrations

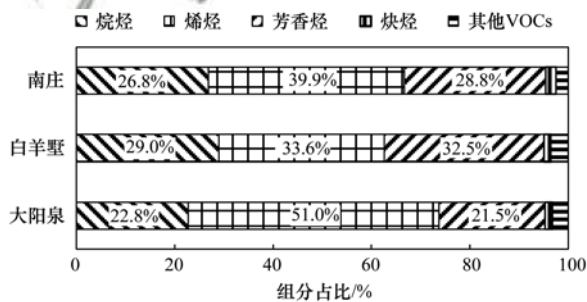


图 8 不同点位 VOCs 臭氧生成潜势贡献占比
Fig. 8 Contributions of main VOCs groups to OFP
at different sampling sites

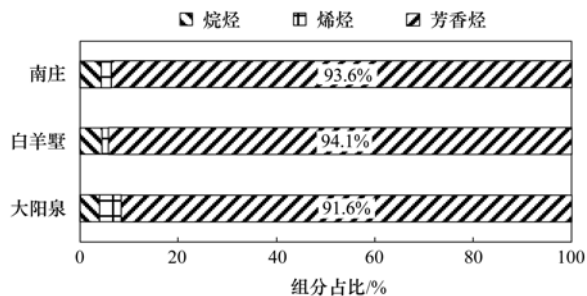


图 9 不同点位 VOCs 二次有机气溶胶生成潜势贡献占比
Fig. 9 Contributions of main VOCs groups to SOA_p
at different sampling sites

邻-二甲苯等芳香烃以及异丁烷、异戊烷等烷烃。10 种 OFP 优势物种浓度占比为 38.4%~40.7%，而 OFP 占比为 66.8%~77.3%，意味着控制关键 VOCs 物种排放可以有效降低臭氧污染问题，改善环境空气质量。

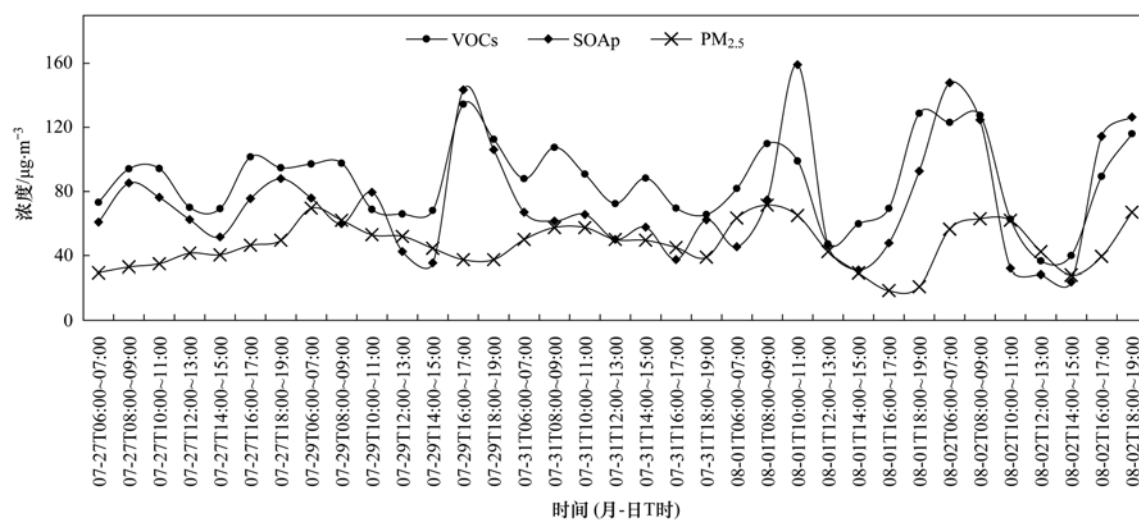
2.3.2 二次有机气溶胶生成潜势析

阳泉市区 SOA_p 均值为 68.7 μg·m⁻³，其中芳香烃(93.4%)的贡献最大，烷烃和烯烃的贡献较小(图9)，3 个点位 SOA_p 组分占比相似。3 个点位 SOA 生成潜势前 10 的物种组成相似，均包含苯、甲苯、乙苯、间/对-二甲苯、邻-二甲苯、间-乙基甲苯、1,2,4-三甲基苯等芳香烃以及异戊二烯。由此可见，控制芳香烃类物质排放不仅可以改善阳泉市区臭氧污染，对控制霾污染也有一定作用。

SOA_p、VOC 和 PM_{2.5} 浓度的时间变化序列如图 10 所示。SOA_p 与 VOCs 呈显著正相关($r=0.797, P<0.01$)，表明 SOA_p 的升高可能是由较高的 VOCs 水平引起的。PM_{2.5}、SOA_p 与 VOCs 浓度的变化趋势一致，说明 SOA_p 可能在 PM_{2.5} 的生成过程中产生了重要作用。由于 PM_{2.5} 生成过程中涉及复杂的多相物化反应，PM_{2.5} 高值相对 SOA_p 与 VOCs 的高值存在一定滞后效应。

3 结论

- (1) 观测期间，VOCs 平均总浓度为 (82.1 ± 22.7) μg·m⁻³，其中烷烃浓度占比最大(51.8%)，其次是芳香烃(17.8%)和烯烃(8.0%)，炔烃浓度占比最小(3.8%)。3 个点位组分占比存在空间差异，大阳泉点位烯烃的占比相对较高。阳泉市区炔烃浓度(3.1 μg·m⁻³)高于同类研究。
- (2) 特征比值苯/甲苯与异戊烷/正戊烷分别为 2.1 ± 1.3 和 1.7 ± 0.6，表明环境空气受燃烧源和机动车排放共同影响；乙苯与间/对-二甲苯以及苯与间/对-二甲苯均值分别为 0.5 ± 0.1 和 3.5 ± 1.9，表

图 10 SOA_p、PM_{2.5}和 VOCs 日变化特征Fig. 10 Daily variation of SOA_p, PM_{2.5}, and VOCs

明 VOCs 受老化气团控制。PMF 模型解析出阳泉市区主要有 6 类 VOCs 排放源：燃煤源贡献最大 (34.9%)，其次为机动车排放源 (18.2%)、汽油挥发源 (15.2%) 和工业排放源 (13.6%)，植物排放源 (9.2%) 和溶剂使用源 (9.0%) 贡献最小；不同点位和不同臭氧浓度下的 VOCs 源解析结果受到点位周围环境以及区域传输的影响而存在差异。

(3) 阳泉市区环境空气中 VOCs 的 OFP 均值为 $156.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，烯烃对其贡献最大；SOA_p 均值为 $68.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，芳香烃的贡献大于 90%，较高的 PM_{2.5} 浓度可能与较高的 VOCs 浓度水平有关。控制关键 VOCs 物种排放可以有效减少臭氧和霾污染问题，改善环境空气质量。

(4) 总之，燃煤排放对 VOCs 的贡献较高，因此控制燃煤源排放是阳泉市区 VOCs 管控重点，需加快矸石山治理和能源结构调整，同时机动车排放源、汽油挥发源和工业排放源的管控也不容忽视。

参考文献：

- [1] 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.
- [2] 王伯光, 张远航, 邵敏. 珠江三角洲大气环境 VOCs 的时空分布特征[J]. *环境科学*, 2004, **25**(S1): 7-15.
Wang B G, Zhang Y H, Shao M. Special and temporal distribution character of VOCs in the ambient air of Pearl River Delta Region[J]. *Environmental Science*, 2004, **25**(S1): 7-15.
- [3] 李磊, 赵玉梅, 王旭光, 等. 廊坊市夏季臭氧体积分数影响因素及生成敏感性[J]. *环境科学*, 2017, **38**(10): 4100-4107.
Li L, Zhao Y M, Wang X G, *et al.* Influence factors and sensitivity of ozone formation in Langfang in the summer[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(10): 4100-4107.
- [4] Zhang Q, Yuan B, Shao M, *et al.* Variations of ground-level O₃ and its precursors in Beijing in summertime between 2005 and 2011[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, **14**(12): 6089-6101.
- [5] Lu K D, Zhang Y H, Su H, *et al.* Regional ozone pollution and key controlling factors of photochemical ozone production in Pearl River Delta during summer time[J]. *Science China Chemistry*, 2010, **53**(3): 651-663.
- [6] 程念亮, 李云婷, 张大伟, 等. 2014 年北京市城区臭氧超标日浓度特征及与气象条件的关系[J]. *环境科学*, 2016, **37**(6): 2041-2051.
Cheng N L, Li Y T, Zhang D W, *et al.* Characteristics of ozone over standard and its relationships with meteorological conditions in Beijing City in 2014[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(6): 2041-2051.
- [7] 崔虎雄, 吴迺名, 高松, 等. 上海城区典型污染过程 VOCs 特征及臭氧潜势分析[J]. *环境科学*, 2011, **32**(12): 3537-3542.
Cui H X, Wu Y M, Gao S, *et al.* Characteristics of ambient VOCs and their role in O₃ formation: a typical air pollution episode in Shanghai urban area[J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(12): 3537-3542.
- [8] 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.
- [9] Norris G, Duvall R, Brown S, *et al.* EPA Positive Matrix Factorization (PMF) 5.0 fundamentals and user guide[R]. Washington, DC, USA: EPA, 2014.
- [10] Carter W P L. Development of ozone reactivity scales for volatile organic compounds[J]. *Air & Waste*, 1994, **44**(7): 881-899.
- [11] Grosjean D. *In situ* organic aerosol formation during a smog episode: estimated production and chemical functionality[J]. *Atmospheric Environment. Part A. General Topics*, 1992, **26**(6): 953-963.
- [12] Grosjean D, Seinfeld J H. Parameterization of the formation potential of secondary organic aerosols[J]. *Atmospheric Environment* (1967), 1989, **23**(8): 1733-1747.
- [13] Liu Y, Shao M, Fu L L, *et al.* Source profiles of volatile organic compounds (VOCs) measured in China: Part I[J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(25): 6247-6260.
- [14] 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.
- [15] Yan Y L, Peng L, Li R M, *et al.* Concentration, ozone formation potential and source analysis of volatile organic compounds (VOCs) in a thermal power station centralized area: a study in Shuozhou, China[J]. *Environmental Pollution*, 2017, **223**: 295-304.
- [16] 温彦平, 闫雨龙, 李丽娟, 等. 太原市夏季挥发性有机物污染特征及来源分析[J]. *太原理工大学学报*, 2016, **47**(3): 331-336.
Wen Y P, Yan Y L, Li L J, *et al.* Pollution characteristic and source analysis of volatile organic compounds in summer in Taiyuan[J]. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 2016, **47**(3): 331-336.
- [17] 杨笑笑, 汤莉莉, 张运江, 等. 南京夏季市区 VOCs 特征及 O₃ 生成潜势的相关性分析[J]. *环境科学*, 2016, **37**(2): 443-451.
Yang X X, Tang L L, Zhang Y J, *et al.* Correlation analysis between characteristics of VOCs and ozone formation potential in summer in Nanjing urban district[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(2): 443-451.
- [18] 周雪明, 项萍, 段菁春, 等. 佛山市冬夏季非甲烷烃污染特征研究[J]. *环境科学*, 2016, **37**(11): 4124-4132.
Zhou X M, Xiang P, Duan J C, *et al.* Pollution characteristics of non-methane hydrocarbons during winter and summer in Foshan city[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(11): 4124-4132.
- [19] 徐晨曦, 陈军辉, 韩丽, 等. 成都市 2017 年夏季大气 VOCs 污染特征、臭氧生成潜势及来源分析[J]. *环境科学研究*, 2019, **32**(4): 619-626.
Xu C X, Chen J H, Han L, *et al.* Analyses of pollution characteristics, ozone formation potential and sources of VOCs atmosphere in Chengdu city in summer 2017[J]. *Research of Environmental Science*, 2019, **32**(4): 619-626.
- [20] Huang Y S, Hsteh C C. Ambient volatile organic compound presence in the highly urbanized city: source apportionment and emission position[J]. *Atmospheric Environment*, 2019, **206**: 45-59.
- [21] Hu B Y, Xu H, Deng J J, *et al.* Characteristics and source apportionment of volatile organic compounds for different functional zones in a coastal city of southeast China[J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2018, **18**(11): 2840-2852.
- [22] 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.
- [23] Sweet C W, Vermette S J. Toxic volatile organic compounds in urban air in Illinois[J]. *Environmental Science & Technology*, 1992, **26**(1): 165-173.
- [24] Wang M, Shao M, Lu S H, *et al.* Evidence of coal combustion contribution to ambient VOCs during winter in Beijing[J]. *Chinese Chemical Letters*, 2013, **24**(9): 829-832.
- [25] Jobson B T, Parrish D D, Goldan P, *et al.* Spatial and temporal variability of nonmethane hydrocarbon mixing ratios and their relation to photochemical lifetime[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, **103**(D11): 13557-13567.
- [26] 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.
- [27] An J L, Zhu B, Wang H L, *et al.* Characteristics and source apportionment of VOCs measured in an industrial area of Nanjing, Yangtze River Delta, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **97**: 206-214.
- [28] An J L, Wang Y S, Wu F K, *et al.* Characterizations of volatile organic compounds during high ozone episodes in Beijing, China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2012, **184**(4): 1879-1889.
- [29] Yurdakul S, Civan M, Kuntasal Ö, *et al.* Temporal variations of VOC concentrations in Bursa atmosphere[J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2018, **9**(2): 189-206.
- [30] Liu P W G, Yao Y C, Tsai J H, *et al.* Source impacts by volatile organic compounds in an industrial city of southern Taiwan[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, **398**(1-3): 154-163.
- [31] 王铁宇, 李奇锋, 吕永龙. 我国 VOCs 的排放特征及控制对策研究[J]. *环境科学*, 2013, **34**(12): 4756-4763.
Wang T Y, Li Q F, Lü Y L. Characteristics and countermeasures of volatile organic compounds (VOCs) emission in China[J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(12): 4756-4763.
- [32] Zhong Z M, Sha Q E, Zheng J Y, *et al.* Sector-based VOCs emission factors and source profiles for the surface coating industry in the Pearl River Delta region of China[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **583**: 19-28.
- [33] 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.
- [34] Cai C J, Geng F H, Tie X X, *et al.* Characteristics and source apportionment of VOCs measured in Shanghai, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2010, **44**(38): 5005-5014.

CONTENTS

Contribution of Emissions from the Iron and Steel Industry to Air Quality in China	TANG Ling, XUE Xiao-da, BO Xin, <i>et al.</i> (2981)
Interannual Characteristics of Fine Particulate Matter in North China and Its Relationship with Land Use and Land Cover Change	YANG Wei, JIANG Xiao-li (2995)
Evaluation of the Reduction in PM _{2.5} Concentration During the National Traditional Games of Ethnic Minorities in Zhengzhou	WANG Shen-bo, LOU Ya-min, XU Yi-fei, <i>et al.</i> (3004)
Pollution Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in Chengdu in Summer and Winter	FENG Yan-peng, ZHANG Jun-ke, HUANG Xiao-juan, <i>et al.</i> (3012)
Analysis of Transport Pathways and Potential Sources of Atmospheric Particulate Matter in Zigong, in South of Sichuan Province	LEI Yu, ZHANG Xiao-ling, KANG Ping, <i>et al.</i> (3021)
Source Composition Spectrum of Volatile Organic Compounds in Typical Industries in Sichuan	XU Chen-xi, CHEN Jun-hui, HAN Li, <i>et al.</i> (3031)
Source Profiles of Industrial Emission-Based VOCs in Chengdu	ZHOU Zi-hang, DENG Ye, ZHOU Xiao-ling, <i>et al.</i> (3042)
Emission Characteristics and Risk Assessment of Volatile Organic Compounds from Typical Factories in Zhengzhou	QI Yi-jin, NI Jing-wei, ZHAO Dong-xu, <i>et al.</i> (3056)
Characteristics, Source Apportionment, and Environmental Impact of Volatile Organic Compounds in Summer in Yangquan	NIU Yue-yuan, LIU Zhuo-cheng, LI Ru-mei, <i>et al.</i> (3066)
Characteristics and Reactivity of VOCs in Hangzhou During a Typical Photochemical Pollution Episode	JING Sheng-ao, YE Xu-hong, GAO Ya-qin, <i>et al.</i> (3076)
Pollution Characteristics and Sensitivity of Surface Ozone in a Typical Heavy-Industry City of the North China Plain in Summer	OU Sheng-ju, WEI Wei, WANG Xiao-qi, <i>et al.</i> (3085)
Source Apportionment of Atmospheric Ammonia; Sensitivity Test Based on Stable Isotope Analysis in R Language	GU Meng-na, PAN Yue-peng, HE Yue-xin, <i>et al.</i> (3095)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Atmospheric Mercury Speciation in Suzhou	LU Ren-jie, WU Ye-zheng, ZHANG Xiao-jie, <i>et al.</i> (3102)
Emission Characteristics of Light-Duty Gasoline Vehicle Exhaust Based on Acceleration Simulation Mode	XIE Yan, LIAO Song-di, ZHU Man-ni, <i>et al.</i> (3112)
Comparative Analysis of NO _x Emission Characteristics of Non-Ultra-Low- and Ultra-Low-Emission Coal-Fired Power Units During the Start-Up Process	LI Hui, ZHU Fa-hua, SUN Xue-li, <i>et al.</i> (3121)
Source Identification and Pollution Characteristics of Heavy Metals in Suspended Particles of Urban Road Dust from Xingtai City	SONG Yi, LU Xin-wei, ZHOU Xiao, <i>et al.</i> (3130)
Impacts of Leaf Surface Micromorphology Variation on the Ability to Capture Particulate Matter	WEI Wen-jun, WANG Bing, NIU Xiang (3136)
Analysis of Hydrogen and Oxygen Stable Isotope Characteristics and Vapor Sources of Precipitation in the Guanzhong Plain	ZHAO Ming-hua, LU Yan-wei, Rachana Heng, <i>et al.</i> (3148)
Analysis of Nitrate Sources in Different Waters of a Karst Basin	TIAN Yong-zhu, HAN Zhi-wei, ZHAO Ran, <i>et al.</i> (3157)
Analysis of Nitrogen Pollution and Its Pollution Sources in the Muli River Basin	QI Ran, XU Fei-fei, YANG Fan, <i>et al.</i> (3165)
Temporal and Spatial Variation Patterns of the Environmental Elements in the Sediments of the Liaohe Estuary and the Related Influencing Factors	QI Yue, SUN Yong-guang, MA Gong-bo, <i>et al.</i> (3175)
Transport Characteristics of Phosphorus Sources at the Multi-scale Watershed and the Associated Ecological Effects on Poyang Lake	WANG Shuo-yue, GAO Yang, LU Yao, <i>et al.</i> (3186)
Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in the River of a Typical Bay Watershed	WANG Lei, WANG Wen-dong, LIU Dong, <i>et al.</i> (3194)
Concentrations of Typical Perfluoroalkyl Acids and Contributions of Their Precursors in the Water of the Le'an River in China	ZHANG Hui, WANG Shi-liang, YU Yang (3204)
Distribution Characteristics of Microplastics in Surface Water and Sediments of Haizhou Bay, Lianyungang	LI Zheng, GAO Chun-mei, YANG Jin-long, <i>et al.</i> (3212)
Profiles and Risk of Antibiotic Resistance Genes in Domestic Wells in the Maozhou River Basin	WU Dai-ling, ZOU Hai-yan, HE Lu-xi, <i>et al.</i> (3222)
Release Mechanisms of Iron and Manganese from Sediments in Jinpen Reservoir	LU Lin-chao, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (3231)
Characterization of Microplastic Pollution of Sediments from Urban Lakes	WANG Xuan, NIU Si-ping, SONG Xiao-long, <i>et al.</i> (3240)
Structural Characteristics of Microbial Communities in the Sediments of the Niyang River in Tibet	LIU Xiao-dan, HUANG Yi, WANG Yong-hua, <i>et al.</i> (3249)
Combined Effects of Erythromycin and Nutrients on Microalgae in Seawater	WANG Na, ZHAO Wei-hong, MIAO Hui (3257)
Longitudinal Distribution of Benthic Macroinvertebrates Affected by a Hydropower Plant Cascade in the Mudan River	WEN Jia-qi, WANG Hao-ran, CHEN Yong-can, <i>et al.</i> (3266)
Analysis of Rainwater Runoff Pollution Characteristics of Various Typical Underlying Surfaces in Ningbo	XU Yu-jie, GONG Yue-min, BI Jun-peng, <i>et al.</i> (3275)
Water Quality and Bacterial Population Driving Mechanism of Algae Vertical Succession in Stratified Reservoir	YAN Miao-miao, CHEN Sheng-nan, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (3285)
Distribution Characteristics of Disinfection By-Products and the Effects of Booster Chlorination in Long-Distance Water Supply Systems	BI Wei-wei, YE Sheng, YU Jian-quan, <i>et al.</i> (3297)
Occurrence and Prediction Model of Disinfection By-Products in Tap Water	LIU Jun-ping, CHEN Jing-ji, SONG Ya-li, <i>et al.</i> (3307)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Cadmium in Water by Alkali and Magnetic Composite Modified Wheat Straw Biochar	CUI Zhi-wen, REN Yan-fang, WANG Wei, <i>et al.</i> (3315)
Enhanced Chromate (VI) Removal Characteristics and Mechanism Using Graphene Oxide Immobilized Nanoscale Zero-Valent Iron Coupled with a Weak Magnetic Field (GO-nFe ⁰ /WMF)	JI Meng, BAO Jian-guo, ZHU Xiao-wei, <i>et al.</i> (3326)
Characteristics and Influencing Factors of Monothioarsenate Adsorption on Goethite	LIAO Dan-xue, SHAN Hui-mei, ZHANG Jin-xian, <i>et al.</i> (3337)
Fast Start-Up ANAMMOX Operation Strategy and Flora Characteristics of a Biofilter	WANG Xiao-tong, YANG Hong, SU Yang, <i>et al.</i> (3345)
Effects of Aeration Strategy on Denitrifying Performance of Activated Sludge Processes in Treating Low-Carbon-Source Municipal Wastewater	ZHANG Xin-ni, CHI Yu-lei, WANG Qian, <i>et al.</i> (3356)
Effect of Hydroxylamine on Community of ANAMMOX Sludge	XING Chong-yang, FAN Yu-chen, CHEN Xuan, <i>et al.</i> (3365)
Microbial Diversity of Filamentous Sludge Bulking at Low Temperature	GAO Chun-di, ZHANG Na, HAN Hui, <i>et al.</i> (3373)
Main Influencing Factors and Strengthening of Anaerobic Transformation of Excess Sludge in China	DONG Bin, GAO Jun, CHEN Si-si, <i>et al.</i> (3384)
Relationship Between CO ₂ and CH ₄ Emissions in Urban Rivers and Sewage Discharging from a Municipal Drainage Network	LI Lei, CHEN Hao, ZHU Yi, <i>et al.</i> (3392)
Effects of Controlled-Release Urea Application on N ₂ O Emission in Maize-Cultivated Sandy Loam Soil	JIANG You-jin, YUAN Jun-ji, DING Wei-xin, <i>et al.</i> (3402)
Greenhouse Gas Emissions for Typical Open-Field Vegetable Production in China	ZHANG Fen, CHENG Tai-hong, CHEN Xin-ping, <i>et al.</i> (3410)
Effects of Water Management on Soil Properties and Cd Behavior of Typical Paddy Soils	HUANG Jing, LI Xin-yang, WEN Sha, <i>et al.</i> (3418)
Effect of Mn-Modified Biochar on the Characteristics of Aggregate Structure and the Content of Cd in Weakly Alkaline Cd-Contaminated Soil	SUN Tong, FU Yu-tong, LI Ke, <i>et al.</i> (3426)
Effects of the Immobilization of Cadmium in Soil Alone or Combined with Foliar Application of Selenium on Cadmium Accumulation in the Plants of Different Genotypes of Tsai-tai	CAO Kun-kun, LI Cheng-cheng, HU Xue-yu, <i>et al.</i> (3434)
Effects of Foliar Spraying of 2,3-dimercaptosuccinic Acid on Cadmium Uptake, Transport, and Antioxidant System in Rice Seedlings	YANG Xiao-rong, HUANG Yong-chun, LIU Zhong-qi, <i>et al.</i> (3441)