

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

中国主要城市土壤重金属累积特征与风险评价

彭驰, 何亚磊, 郭朝晖, 肖细元, 张严



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年1月

第43卷 第1期

Vol.43 No.1

目次

中国主要城市土壤重金属累积特征与风险评价 ..... 彭驰, 何亚磊, 郭朝晖, 肖细元, 张严 ( 1 )  
植物生长调节剂在土壤中的环境行为综述 ..... 陈亮, 侯杰, 胡晓蕾, 张纪兆, 王浩达 ( 11 )  
基于铁泥的磁性水处理材料制备及应用进展 ..... 曾辉平, 翟龙雪, 李冬, 张杰 ( 26 )  
不同臭氧度量指标对我国人群总死亡影响的 Meta 分析 ..... 阮芳芳, 刘纪新, 陈芷薇, 曾贤刚 ( 37 )  
北京市海坨山冬季不同污染过程下气溶胶化学组分及其潜在来源分析 ..... 赵德龙, 王飞, 刘丹彤, 田平, 盛久江, 周崑, 肖伟, 杜远谋, 卢俐, 黄梦宇, 何晖, 丁德平 ( 46 )  
武汉冬季大气 PM<sub>2.5</sub> 小时分辨率源贡献识别及潜在影响域分析 ..... 蒋书凝, 孔少飞, 郑煌, 曾昕, 陈楠, 祁士华 ( 61 )  
运城市 PM<sub>2.5</sub> 时空分布特征和潜在源区季节分析 ..... 王斌涛, 张强, 温肖宇, 冀乃超, 赵文婷, 罗淑贞, 陈志, 翟程凯 ( 74 )  
中国东部冷锋推进中的 PM<sub>2.5</sub> 三维结构变化特征 ..... 牟南南, 朱彬, 卢文 ( 85 )  
粤港澳大湾区大气中硝基多环芳烃污染特征与风险评估 ..... 李彦希, 谢丹平, 黎玉清, 金梦, 丁紫荣, 闫雅楠, 赵波 ( 93 )  
西南地区大型综合工业区和周边区域大气 VOCs 污染特征及健康风险评估 ..... 李陵, 张丹, 胡伟, 徐芹, 吴虹, 袁睿, 蒲茜, 郝宇杭, 唐志欣, 赖明敏 ( 102 )  
拉萨市挥发性有机物的组成特征、季节变化和来源解析 ..... 余家燕, 韩燕, 陈木兰, 张惠芳, 陈阳, 刘建国 ( 113 )  
杭州 COVID-19 期间大气 VOCs 体积分数变化特征 ..... 林旭, 严仁嫦, 金嘉佳, 许凯儿, 何曦, 叶辉, 何纪平 ( 123 )  
上海城郊夏季大气 VOCs 在臭氧生成中的作用 ..... 金丹 ( 132 )  
铜川市秋冬季大气 VOCs 特征及其 O<sub>3</sub> 和 SOA 形成潜势分析 ..... 易宵霄, 李姜豪, 李光华, 路珍珍, 孙智钢, 高健, 邓顺熙 ( 140 )  
电子垃圾拆解回收 VOCs 排放特征与排放因子 ..... 谢丹平, 黄忠辉, 刘旺, 聂鹏, 黄钟坤, 贺辉, 陈晓燕 ( 150 )  
不同传输通道下珠江三角洲臭氧与前体物非线性响应关系 ..... 伍永康, 陈伟华, 颜丰华, 毛敬英, 袁斌, 王伟文, 王雪梅 ( 160 )  
淄博市城郊臭氧污染特征及影响因素分析 ..... 王雨燕, 杨文, 王秀艳, 王帅, 白瑾丰, 程颖 ( 170 )  
昭通市周边扬尘重金属污染特征及健康风险 ..... 庞晓晨, 韩新宇, 史建武, 包宇斋, 宁平, 张朝能, 向峰 ( 180 )  
城市路面积尘微塑料污染特征 ..... 方芹, 牛司平, 陈予东, 于江华 ( 189 )  
塔里木河流域东部降水稳定同位素特征与水汽来源 ..... 宋洋, 王圣杰, 张明军, 石玉东 ( 199 )  
赤水河流域水体抗生素污染特征及风险评估 ..... 吴天宇, 李江, 杨爱江, 李彦澄, 陈瑀, 何强, 马凯, 胡霞, 王斌, 艾佳, 钟雄 ( 210 )  
无定河流域地表水地下水的水化学特征及控制因素 ..... 李书鉴, 韩晓, 王文辉, 李志 ( 220 )  
白洋淀府河影响区沉积物营养盐和重金属污染特征及风险评估 ..... 陈兴宏, 李立青, 张美一, 张伟军, 王东升, 王洪杰 ( 230 )  
九龙江口红树林湿地表层沉积物中微塑料赋存特征与重金属的关系 ..... 刘倡君, 罗专溪, 闫钰, 林惠荣, 胡恭任, 于瑞莲 ( 239 )  
北京市北运河水系底栖动物群落与水环境驱动因子的关系及水生态健康评价 ..... 胡小红, 左德鹏, 刘波, 黄振芳, 徐宗学 ( 247 )  
城市河道再生水特征水质因子空间变异机制分析 ..... 刘全忠, 彭柯, 苏振华, 邸琰茗, 郭道宇 ( 256 )  
苏州景观河道表层沉积物间隙水-上覆水中 DOM 特性分析 ..... 李超男, 何杰, 朱学惠, 李学艳 ( 267 )  
苏州城区雨水管道沉积物典型污染物分布特征 ..... 叶蓉, 盛铭军, 姜永波, 武宇圣, 黄天寅 ( 277 )  
信号分子强化改性挂膜沸石持续抑制沉积物中氨氮释放 ..... 徐金兰, 许洋, 李修民, 国森, 刘成海 ( 285 )  
三峡水库调度对支流水体叶绿素 a 和环境因子垂向分布的影响 ..... 田盼, 李亚莉, 李莹杰, 李虹, 王丽婧, 宋林旭, 纪道斌, 赵星星 ( 295 )  
李家河水库春季分层期 nirS 型反硝化菌群特征分析 ..... 梁伟光, 黄廷林, 张海涵, 杨尚业, 刘凯文, 李程遥, 温成成, 李伟涛, 蔡晓春 ( 306 )  
岗南水库沉积物好氧反硝化菌群落时空分布特征 ..... 张紫薇, 陈召莹, 张甜娜, 周石磊, 崔建升, 罗晓 ( 314 )  
宁夏地区地下水金属元素分布特征及健康风险评估 ..... 王晓东, 田伟, 张雪艳 ( 329 )  
快速城镇化三角洲地区高碘地下水赋存特征及驱动因素:以珠江三角洲为例 ..... 吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 周冰, 李备 ( 339 )  
长三角一体化示范区青浦区水环境中 22 种 PPCPs 的多介质分布特征及风险评估 ..... 张智博, 段艳平, 沈嘉豪, 俞文韬, 罗鹏程, 涂耀仁, 高峻 ( 349 )  
洞庭湖及入湖河流中 209 种多氯联苯同类物分布特征与风险评估 ..... 黄智峰, 郑丙辉, 尹大强, 崔婷婷, 赵兴茹 ( 363 )  
基于流量和溶存浓度的河流水系氧化亚氮释放量估算 ..... 李冰清, 胡敏鹏, 王铭烽, 张育福, 吴昊, 周佳, 吴锴彬, 戴之舟, 陈丁江 ( 369 )  
三峡库区万州段河流水-气界面 CO<sub>2</sub> 通量支干流对比及影响机制初探 ..... 秦宇, 欧阳常悦, 王雨潇, 方鹏 ( 377 )  
功能化凹凸棒吸附材料的制备及其对重金属废水中 Pb<sup>2+</sup> 的吸附行为 ..... 廖晓峰, 钟静萍, 陈云嫩, 邱延省, 任嗣利 ( 387 )  
铁氮共掺杂生物炭对二级水溶解性有机物的吸附特性与长效性评价 ..... 吴晨曦, 许路, 金鑫, 石烜, 金鹏康 ( 398 )  
沸石悬浮填料生物移动床的亚硝化特性 ..... 邓翠兰, 郭露, 汪晓军, 陈振国 ( 409 )  
温度对 ANAMMOX 生物膜工艺的脱氮影响与菌群结构分析 ..... 吴珊, 王淑雅, 王芬, 季民 ( 416 )  
填料对 ANAMMOX 污泥活性恢复的影响及菌群特征 ..... 罗景文, 杨津津, 李绍康, 赵昕宇, 杨一飞, 韩嘉琛, 李翔 ( 424 )  
基于 PMF 模型的宁南山区小流域土壤重金属空间分布及来源解析 ..... 夏子书, 白一茹, 王幼奇, 高小龙, 阮晓晗, 钟艳霞 ( 432 )  
浙中典型硫铁矿田土壤重金属含量特征及健康风险 ..... 成晓梦, 孙彬彬, 吴超, 贺灵, 曾道明, 赵辰 ( 442 )  
农产品视角的城郊黑土地田土壤重金属风险分区 ..... 吴松泽, 王冬艳, 李文博, 王兴佳, 闫卓冉 ( 454 )  
基于 DGT 技术的广西碳酸盐岩区稻米镉含量主控因素 ..... 宋波, 肖乃川, 马丽钧, 李龙, 陈同斌 ( 463 )  
调理剂耦合水分管理对双季稻镉和铅累积的阻控效应 ..... 李林峰, 王艳红, 李义纯, 唐明灯, 李奇, 艾绍英 ( 472 )  
设施叶菜类蔬菜重金属镉、铅和砷累积特征及健康风险评估 ..... 董俊文, 高培培, 孙洪欣, 周昶, 张香玉, 薛培英, 刘文菊 ( 481 )  
电子垃圾拆解固废渣-土壤-蔬菜中多氯联苯污染特征与健康风险评估 ..... 张亚萍, 吕占禄, 王先良, 张晗, 郭凌川, 丁秀丽, 张金良 ( 490 )  
雷州半岛南部典型农用地土壤-作物的有机氯农药残留特征和健康风险评估 ..... 梁晓晖, 解启来, 郑芊, 杨北辰, 叶金明, 唐成金 ( 500 )  
重金属含量对城市土壤真菌群落结构的影响 ..... 郭大陆, 张建, 申思, 余子洁, 杨军顺, 罗红燕 ( 510 )  
长期施肥对黄土高原梯田土壤养分特征和微生物资源限制的影响 ..... 吴春晓, 高小峰, 闫本帅, 梁彩群, 陈佳瑞, 王国梁, 刘国彬 ( 521 )  
土地利用变化后不同种植年限香榧土壤微生物群落的组成及多样性 ..... 姜霓雯, 梁辰飞, 张勇, 蒋仲龙, 董佳琦, 吴家森, 傅伟军 ( 530 )  
化肥和有机肥配施生物炭对土壤磷酸酶活性和微生物群落的影响 ..... 杨文娜, 余添, 罗东海, 熊子怡, 王莹燕, 徐曼, 王子芳, 高明 ( 540 )  
秦岭中段撂荒地植被恢复过程中土壤微生物代谢特征 ..... 薛悦, 康海斌, 杨航, 冰德叶, 晁志, 张凯, 王得祥 ( 550 )  
全生物降解地膜原料颗粒对土壤性质、小麦生长和养分吸收转运的影响 ..... 闫文豪, 王春丽, 王莉玮, 易廷辉, 卞京军, 支梅, 孙琪惠, 宿锦锦, 赵秀兰 ( 560 )  
秸秆还田对冬小麦-夏玉米农田土壤固碳、氧化亚氮排放和全球增温潜势的影响 ..... 万小楠, 赵珂悦, 吴雄伟, 白鹤, 杨学云, 顾江新 ( 569 )

# 铜川市秋冬季大气 VOCs 特征及其 O<sub>3</sub> 和 SOA 形成潜势分析

易霄霄<sup>1,2</sup>, 李姜豪<sup>1,2</sup>, 李光华<sup>1</sup>, 路珍珍<sup>1</sup>, 孙智钢<sup>1</sup>, 高健<sup>1</sup>, 邓顺熙<sup>1,2\*</sup>

(1. 长安大学水利与环境学院, 西安 710064; 2. 长安大学旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 西安 710064)

**摘要:** VOCs 是 O<sub>3</sub> 和 SOA 形成的重要前体物, 可增强大气氧化性, 促进二次污染物形成, 影响区域空气质量和人体健康. 为研究铜川市秋冬季 VOCs 特征及其对 O<sub>3</sub> 和 SOA 生成的潜力, 利用 TH-300B 在线监测系统监测了铜川市区 102 种 VOCs 的体积分数, 并结合最大增量反应活性系数法和气溶胶生成系数法分别计算 VOCs 的 O<sub>3</sub> 及 SOA 生成潜力. 结果表明, 铜川市秋季和冬季  $\varphi$ (TVOC) 分别为  $(50.52 \pm 16.81) \times 10^{-9}$  和  $(63.21 \pm 35.24) \times 10^{-9}$ , O<sub>3</sub> 生成潜势分别为  $138.43 \times 10^{-9}$  和  $137.123 \times 10^{-9}$ , SOA 生成潜势分别为  $3.098 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  和  $0.612 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . 秋季 VOCs 中含量最多的 2 种组分为烷烃 (26.19%) 和芳香烃 (26.04%), 冬季 VOCs 中含量最多的组分为烷烃 (48.88%). 反-2-戊烯、甲苯和间/对-二甲苯是秋季 OFPs 最大的 3 个成分, 乙烯、乙炔和丙烯是冬季 OFPs 最大的 3 个成分. 甲苯、间/对-二甲苯和乙苯是秋冬季 SOAFPs 最大的 3 个成分. 交通排放是秋冬季 VOCs 的主要来源, 生物质燃烧/燃煤排放具有季节性差异, 是冬季 VOCs 的主要来源. 该结果可为铜川市等“一市一策”管控污染物排放、改善环境空气质量提供技术依据.

**关键词:** 挥发性有机物 (VOCs); 臭氧 (O<sub>3</sub>); 臭氧生成潜势 (OFP); 二次有机气溶胶 (SOA); 铜川市

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)01-0140-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202104180

## Characteristics of VOCs and Formation Potentials of O<sub>3</sub> and SOA in Autumn and Winter in Tongchuan, China

YI Xiao-xiao<sup>1,2</sup>, LI Jiang-hao<sup>1,2</sup>, LI Guang-hua<sup>1</sup>, LU Zhen-zhen<sup>1</sup>, SUN Zhi-gang<sup>1</sup>, GAO Jian<sup>1</sup>, DENG Shun-xi<sup>1,2\*</sup>

(1. School of Water and Environment, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effects in Arid Region, Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

**Abstract:** Volatile organic compounds (VOCs) are the main precursors of tropospheric O<sub>3</sub> and secondary organic aerosol (SOA), which can enhance atmospheric oxidation, promote the formation of secondary pollutants, and affect regional air quality and human health. In order to gain insights on VOCs characteristics and their potentials for O<sub>3</sub> and SOA formation, the volume fraction of 102 VOCs in autumn and winter in the urban area of Tongchuan were monitored using the TH-300B online monitoring system. The maximum incremental reactivity (MIR) coefficient and the fractional aerosol coefficient (FAC) were used to estimate the ozone formation potential (OFP) and SOA formation potential (SOAFP), respectively. The  $\varphi$ (TVOC, total VOCs) were  $(50.52 \pm 16.81) \times 10^{-9}$  in autumn and  $(63.21 \pm 35.24) \times 10^{-9}$  in winter. The OFPs were  $138.43 \times 10^{-9}$  in autumn and  $137.123 \times 10^{-9}$  in winter, and the SOAFPs were  $3.098 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  and  $0.612 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , respectively. Alkanes (26.19%) and aromatics (26.04%) were the most abundant species in autumn, and alkanes (48.88%) were the most abundant species in winter. Trans-2-pentene, toluene, and *m/p*-xylene were the most reactive species in terms of OFPs in autumn, and ethylene, acetylene, and propylene were the top three species contributing to the total OFPs in winter. Toluene, *m/p*-xylene, and ethylbenzene contributed the most to the total SOAFPs in both of autumn and winter. Traffic emissions were considered as the major source of VOCs in both seasons. VOCs from biomass/coal combustion emissions showed seasonal differences, which were more prominent in winter. The results can provide references for the “one city, one policy” to mitigate regional VOCs pollution and improve ambient air quality.

**Key words:** volatile organic compounds (VOCs); ozone (O<sub>3</sub>); ozone formation potential (OFP); secondary organic aerosol (SOA); Tongchuan

大气中的挥发性有机物 (VOCs) 在光化学反应下可形成臭氧 (O<sub>3</sub>) 和二次有机气溶胶 (secondary organic aerosol, SOA), 而含不同类型官能团的 VOCs 在大气中形成二次光化学氧化剂 O<sub>3</sub> 和 SOA 的作用不同<sup>[1]</sup>. 按官能团的不同, VOCs 可分为烷烃、烯烃、炔烃、芳香烃、卤代烃、醛和酮等. 研究不同官能团的 VOCs 对 O<sub>3</sub> 和 SOA 的生成潜势具有重要意义.

国内一些学者基于 VOCs 和 O<sub>3</sub> 的观测数据, 对一些城市区域开展了大量研究. 烷烃仍是北京<sup>[2,3]</sup>、天津<sup>[4-6]</sup>、南京<sup>[7,8]</sup>、深圳<sup>[9,10]</sup>、成都<sup>[11]</sup>、太原<sup>[12]</sup>和珠三角<sup>[13]</sup>等地区 VOCs 中含量最多的组分. 但目

前也有研究表明一些其他 VOCs 组分是 VOCs 中含量最多的组分, 重庆主城区<sup>[14]</sup> VOCs 中 OVOCs 含量最高 (38.91%); 济源市疫情防控期间 OVOCs 含量最多 (41.6%)<sup>[15]</sup>, 相比疫情防控前 OVOCs 的占比增加 31.4%; 连云港市不同功能区的 VOCs 的组分占比有类似性<sup>[16]</sup>, 都以醛酮含量最多 (39.29% ~ 45.94%); 桂林 VOCs 中芳烃含量最高

收稿日期: 2021-04-19; 修订日期: 2021-06-12

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFC0212206); 陕西省重点产业创新链 (群) 研发计划项目 (2018ZDCXL-SF-02-01)

作者简介: 易霄霄 (1998 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气污染防治, E-mail: 2020129076@chd.edu.cn

\* 通信作者, E-mail: dengshunxi@aliyun.com

(65.75%)<sup>[17]</sup>. 烯烃和芳香烃仍是大多数地区 O<sub>3</sub> 生成活性最大的物种, 芳香烃对 SOAFPs 的贡献仍最大. 陕西关中平原作为全国大气污染防治的重点区域也开展了相关研究, 但主要集中在省会城市西安. Song 等<sup>[18]</sup> 的研究表明西安市 VOCs 中烷烃(25.7%~39.7%)和 OVOCs(22.8%~47.4%)含量占优势, 乙烯、乙醛、异戊二烯和间/对-二甲苯是西安 OFPs 的最大贡献者, 贡献率为 44.2%~54.5%. 来源解析结果表明, 机动车排放是西安市 VOCs 的主要来源. Liu 等<sup>[19]</sup> 的研究发现西安市 O<sub>3</sub> 日平均浓度范围为 1~120.3 μg·m<sup>-3</sup>, 年平均浓度为 37.2 μg·m<sup>-3</sup>, O<sub>3</sub> 的生成受 VOCs 控制. Sun 等<sup>[20,21]</sup> 利用 HERM 和 PMF 模型分别对西安夏季 VOCs 进行源解析, 表明机动车尾气排放是 VOCs 最大来源. 李琦等<sup>[22]</sup> 和闫东杰等<sup>[23]</sup> 分别编制了西安市 2016 年和 2014 年的 VOCs 排放清单, 2016 年 VOCs 人为源排放总量为 119.187 × 10<sup>3</sup> t, 2014 年为 115.1 × 10<sup>3</sup> t, 其中有机溶剂的使用对西安市 VOCs 贡献最大. 此外还有学者对关中的渭南市<sup>[24]</sup> 和宝鸡市<sup>[25,26]</sup> 进行研究. 铜川市位于关中平原向陕北黄土高原的过渡地带, 地势

西北高、东南低, 地势相差悬殊, 容易引起污染物的积聚. 相对于关中平原其他城市, 铜川空气污染物浓度低, 属于相对清洁城市, 但目前尚未有铜川市 VOCs 特征及 O<sub>3</sub> 和 SOA 生成潜势的研究. 因此本研究在铜川市秋冬季开展 VOCs 浓度和成分的观测分析, 识别生成 O<sub>3</sub> 和 SOA 的关键物种, 以期精准减排, 改善环境空气质量提供技术依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 观测地点

观测地点位于铜川市生态环境局(东经 108°57'18", 北纬 34°53'53", 海拔高度 710 m, 图 1), 采样高度距地面 2.5 m. 该测点位于铜川市中心, 具有典型的城区特点, 周围分布着居民区、商业区和文教区. 观测点东北方 3 km 处有一印刷厂, 西南方 7.8 km 处有一电厂, 西北方 12.5 km 处有一煤厂. 观测点距离东南方的 G65 高速公路和 G210 国道约 2.9 km, 距离西南方的 G65W 高速公路约 4.4 km. 观测点周边多种混合污染源的环境现状能够较好地代表典型的城市功能混合环境.

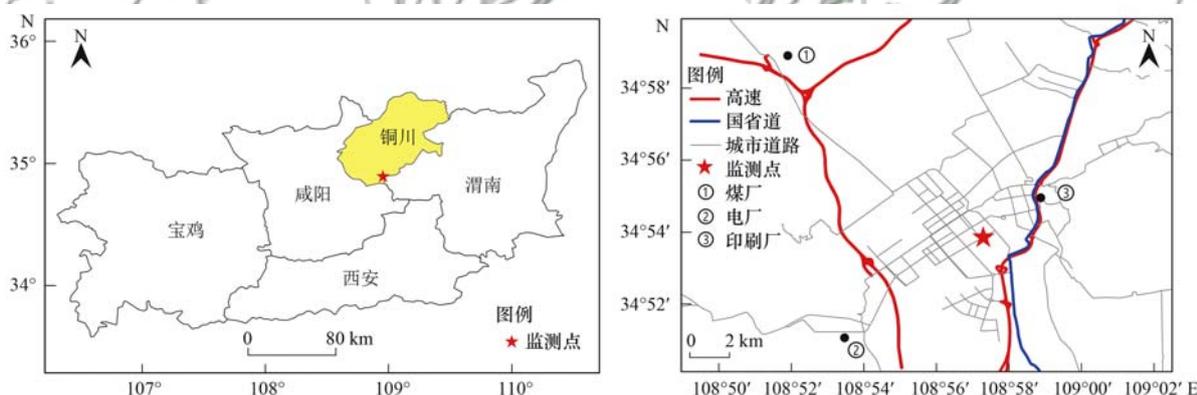


图 1 铜川市采样点地理位置示意

Fig. 1 Sampling site in Tongchuan in this study

### 1.2 观测方法

VOCs 的观测在 2017 年 10 月和 2018 年 1 月进行. 秋季的采样时间为 2017 年 10 月 1~12 日(共 11 d, 10 月 8 日数据丢失), 冬季采样时间为 2018 年 1 月 9~18 日(共 10 d), 每日 24 h 连续采样, 采样时间间隔为 1 h.

VOCs 样品采用 TH-300B 大气环境挥发性有机物(C<sub>2</sub>~C<sub>12</sub>)在线监测系统(武汉天虹, 中国)进行采样与分析. 环境空气通过采样系统采集后, 进入浓缩系统, 在超低温条件下, 空气中的 VOCs 在空毛细管捕集柱中被冷冻捕集; 然后快速加热解析, 使化合物进入 GCMS 分析系统; 经色谱柱分离后被 FID 和 MS 检测器检测. TH-300B 采用电制冷超低温冷阱 + FID/MS 双路检测专利技术, 具有检出限低、重

复性好, 数据完整性高和色谱分辨率高的优点. TH-300B 在线监测系统, 1 h 采集一次空气样品, 每次采样 5 min, 流量为 60 mL·min<sup>-1</sup>, 每个样品的采样分析周期为 1 h, 质量控制与标定详见文献[11].

在 VOCs 采样期间, 常规空气质量因子和气象要素的观测点位于铜川市新区管委会(东经 108°56'04", 北纬 34°54'21"), 距离 VOCs 观测点 1.6 km. 数据来源于中国环境监测总站“全国城市空气质量实时发布平台”(http://106.37.208.233:20035/).

### 1.3 分析方法

#### 1.3.1 OFP

本文共有 93 种 VOCs 参与 OFP 计算:

$$\text{OFP}_i = [\text{VOC}]_i \times \text{MIR}_i \quad (1)$$

式中,  $\text{OFP}_i$  是 VOC 种类  $i$  的  $\text{O}_3$  生成潜势,  $10^{-9}$ ;  $[\text{VOC}]_i$  是 VOC 种类  $i$  的实测体积分数,  $10^{-9}$ ;  $\text{MIR}_i$  是 VOC 种类  $i$  的最大增量反应活性系数<sup>[27]</sup>.

### 1.3.2 动力学模拟(EKMA)

经典动力学模拟法(empirical kinetics modeling approach, EKMA)可描述  $\text{O}_3$  与前体物之间的敏感性关系. 具体方法见文献[28,29].

### 1.3.3 SOAFP

本研究中 SOA 与 VOCs 浓度之间的关系通过实验建立,可避免考虑 VOCs 生成 SOA 复杂反应的具体过程. 本文基于 Grosjean 的烟雾箱实验<sup>[30]</sup>,采用气溶胶生成系数(FAC)<sup>[30,31]</sup>来估算 VOCs 的 SOAFP. 本文共有 28 种 VOCs 参与 SOAFP 计算:

$$\text{SOAFP}_i = \text{FAC}_i \times [\text{VOC}]_i / (1 - F_{\text{VOC}_i}) \quad (2)$$

式中,  $\text{SOAFP}_i$  是 VOC 种类  $i$  的 SOA 生成潜势,  $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $[\text{VOC}]_i$  是 VOC 种类  $i$  的质量浓度,  $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $F_{\text{VOC}_i}$  是 VOC 种类  $i$  参与反应的分数, %;

$\text{FAC}_i$  是 VOC 种类  $i$  的 SOA 生成系数, %.

$$[\text{VOC}]_i = C_i \times \frac{M_i}{22.4} \quad (3)$$

式中,  $C_i$  是 VOC 种类  $i$  的环境体积分数,  $10^{-9}$ ;  $M_i$  是 VOC 种类  $i$  的相对分子质量.

## 2 结果与讨论

### 2.1 观测期间气象条件

秋季观测期间,在采样点测得的平均气温为  $12.2^\circ\text{C}$ ,相对湿度为  $77.0\%$ ;冬季测得的平均气温为  $-0.6^\circ\text{C}$ ,相对湿度为  $43.6\%$ (表 1). 两季观测期间风速均小于  $1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,风向与铜川川道走向一致,秋季主导风为西南风,冬季主导风为北风(图 2). 在这种小风、污染物传输过程较弱,气温与相对湿度差异较大的气象条件下测得的 VOCs 能够较好地表征城市 VOCs 排放特征和季节变化对 VOCs 浓度的影响.

表 1 观测期间测点温度、相对湿度、风速、气压、光照和紫外辐射

Table 1 Temperature, relative humidity, wind direction, wind speed, air pressure, solar radiation, and ultraviolet radiation during the observation period in Tongchuan

季节	温度/ $^\circ\text{C}$	相对湿度/ $\%$	风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	气压/kPa	光照/ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	紫外辐射/ $\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$
秋季	$12.2 \pm 3.7$	$77.0 \pm 7.0$	$1.23 \pm 0.71$	$934 \pm 4$	$22.84 \pm 78.98$	$51.66 \pm 152.34$
冬季	$-0.6 \pm 3.5$	$43.6 \pm 9.0$	$1.46 \pm 0.56$	$936 \pm 5$	$37.72 \pm 79.63$	$31.55 \pm 56.93$

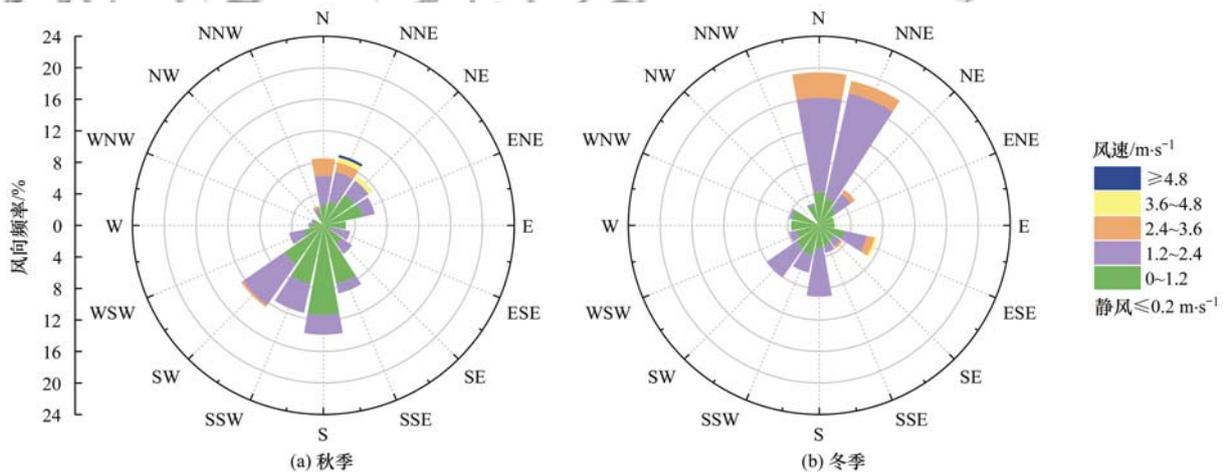


图 2 铜川市观测期间风速与风向

Fig. 2 Wind rose diagram during Tongchuan observation period

## 2.2 VOCs 体积分数与特征分析

### 2.2.1 观测期间大气污染物浓度变化

铜川市观测期间共测得 102 种 VOCs 成分,依据官能团的不同,大致分为 7 类,包括 29 种烷烃、12 种烯烃、1 种炔烃、16 种芳香烃、31 种卤代烃、12 种 OVOCs 和乙腈. 用 TVOC 代表观测期间测出的 102 种 VOCs 的总体积分数,铜川市秋季  $\varphi(\text{TVOC})$  为  $(50.52 \pm 16.81) \times 10^{-9}$ ,冬季为  $(63.21$

$\pm 35.24) \times 10^{-9}$ . 同期测得的其他常规空气污染物,秋季  $\rho(\text{NO}_x)$ 、 $\rho(\text{CO})$ 、 $\rho(\text{PM}_{2.5})$  和  $\rho(\text{SO}_2)$  分别为:  $(39.37 \pm 20.04) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $(1.41 \pm 0.39) \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $(30.43 \pm 20.82) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  和  $(15.16 \pm 5.89) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,冬季分别为:  $(87.16 \pm 55.24) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $(1.89 \pm 0.78) \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $(82.56 \pm 66.83) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  和  $(46.33 \pm 26.01) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ (图 3). 秋季  $\rho(\text{O}_3)$  为  $(34.17 \pm 18.08) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,冬季为  $(58.59 \pm 28.59) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ (图

3). 冬季高前体物浓度 (VOCs 和 NO<sub>x</sub>) 导致冬季 O<sub>3</sub> 浓度更高.

观测期间  $\varphi$  (TVOC) 峰值出现在 1 月 15 日 18:00, 为  $190.27 \times 10^{-9}$ ,  $\rho$  (O<sub>3</sub>) 峰值出现在 1 月 14 日 16:00, 为  $136 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $\rho$  (PM<sub>2.5</sub>) 峰值出现在 1 月

15 日 19:00, 为  $397 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . 秋季和冬季 NO/NO<sub>2</sub> 比值分别为 0.169 和 0.178. 间/对-二甲苯和乙苯的来源相似且排放比率恒定, 秋季和冬季 X/E 的比值分别为 2.04 和 2.11 (X/E < 3), 表明 VOCs 大部分来自城市人为排放过程<sup>[32-34]</sup>.

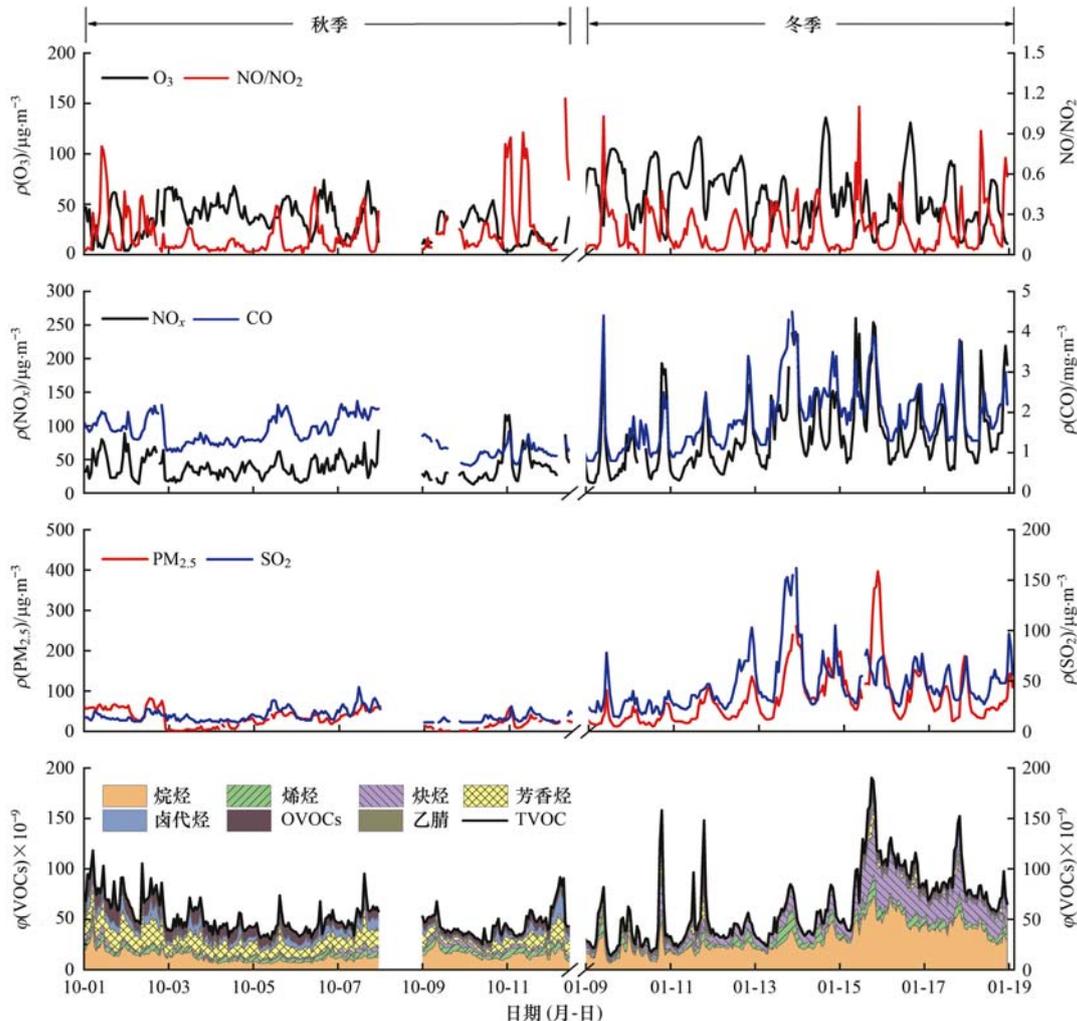


图3 铜川市观测期间 O<sub>3</sub>、NO/NO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、CO、PM<sub>2.5</sub>、SO<sub>2</sub> 和 TVOC 时间序列

Fig. 3 Times series of O<sub>3</sub>, NO/NO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO, PM<sub>2.5</sub>, SO<sub>2</sub>, and TVOC during the observation period in Tongchuan

图4为冬季观测期间污染物(NO<sub>x</sub>、O<sub>3</sub>、NO、NO/NO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>和VOCs)浓度、光照和紫外辐射强度的日变化.可见,冬季观测期间, $\varphi$ (TVOC)呈单峰型,峰值出现在19:00,为 $(106.48 \pm 52.56) \times 10^{-9}$ .O<sub>3</sub>日变化趋势呈单峰型,峰值出现在16:00,日间浓度高夜间浓度低.日间平均最高 $\rho$ (O<sub>3</sub>)为 $(98.3 \pm 25.4) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,夜间平均最低为 $(31.1 \pm 23.5) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ .早晨07:00~08:00太阳升起,伴随着太阳辐射的增强与O<sub>3</sub>前体物(VOCs和NO<sub>x</sub>)排放增加,光化学反应增强,O<sub>3</sub>浓度开始上升,至16:00O<sub>3</sub>峰值浓度出现.17:00后随着光照、紫外线趋弱,气温逐渐下降,光化学反应产生O<sub>3</sub>的驱动力减弱,加之O<sub>3</sub>自身的汇过程与扩散导致其浓度逐

步下降.

在07:00~10:00时段 $\rho$ (NO)和 $\rho$ (NO<sub>2</sub>)逐渐上升至峰值( $33.50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $69.70 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ),峰值处NO/NO<sub>2</sub>的比值为0.44,这可能受机动车早高峰排放增加影响.10:00后浓度开始下降,由于光照与气温的增强,反应速率增强,NO和NO<sub>2</sub>作为主要光化学反应前体物而被消耗,浓度逐渐降低.在18:00~21:00时段NO<sub>2</sub>、NO浓度和NO/NO<sub>2</sub>比值升高,且NO<sub>2</sub>浓度处于一个较高水平,这主要与机动车晚高峰排放增加及光化学消耗减少有关.

### 2.2.2 VOCs成分分析

观测期间铜川市秋季和冬季大气中的 $\varphi$ (TVOC)分别为 $(50.52 \pm 16.81) \times 10^{-9}$ 和 $(63.21$

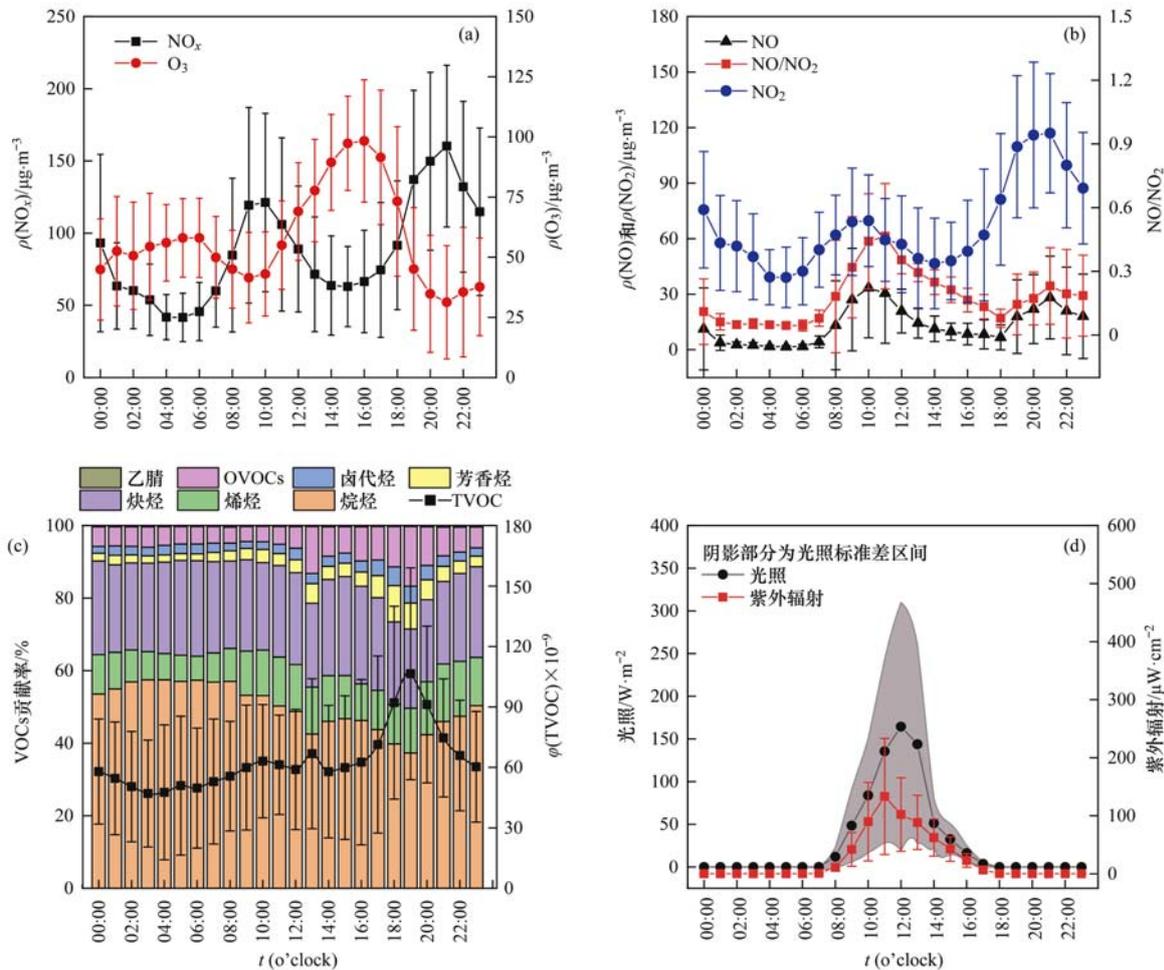


图4 铜川市冬季观测期间  $\text{NO}_x$ 、 $\text{O}_3$ 、 $\text{NO}$ 、 $\text{NO}/\text{NO}_2$ 、 $\text{NO}_2$ 、VOCs、光照和紫外辐射的日变化

Fig. 4 Diurnal variation in  $\text{NO}_x$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}/\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ , VOCs, sun radiation, and ultraviolet radiation during the observation period in Tongchuan

$\pm 35.24) \times 10^{-9}$ . 乙腈是本研究中唯一检测到的含氮化合物,是生物质燃烧的示踪剂<sup>[35]</sup>,秋冬季  $\phi$ (乙腈)分别为  $0.61 \times 10^{-9}$  和  $0.20 \times 10^{-9}$ .

观测期间秋季和冬季各 VOCs 组分的体积分数及贡献率见表 2. 铜川市秋季大气 VOCs 中的主要成分为 26.19% 的烷烃和 26.04% 的芳香烃,冬季为 48.88% 的烷烃. 通常乙烷来源于汽油车尾气和天然气挥发; 丙烷和丁烷来源于汽车尾气和液化石油气挥发; 异戊烷和正戊烷来源于汽油车尾气/挥发,环戊烷来源于工业生产; C6 ~ C8 的烷烃是重要的工业原料,在化工有机合成领域广泛使用; C9 ~ C12 的烷烃来自柴油车燃烧排放<sup>[25,34,36,37]</sup>.

冬季  $\phi$ (乙炔) [ $(15.44 \pm 11.88) \times 10^{-9}$ ] 约为秋季 [ $(2.38 \pm 1.65) \times 10^{-9}$ ] 的 6.5 倍,乙炔主要来源于化石燃料(如煤炭)的燃烧,故冬季采暖燃煤排放对乙炔有较大影响. 秋季  $\phi$ (芳香烃) [ $(13.16 \pm 6.65) \times 10^{-9}$ ] 约为冬季 [ $(2.62 \pm 3.63) \times 10^{-9}$ ] 的 5 倍,秋季  $\phi$ (卤代烃) [ $(6.46 \pm 4.23) \times 10^{-9}$ ] 约为冬季 [ $(1.92 \pm 2.11) \times 10^{-9}$ ] 的 3 倍. 秋季在西南风的

表 2 铜川市观测期间 VOCs 组分体积分数及贡献率

Table 2 Volume fraction and contribution rate of VOCs in Tongchuan during observation period

组分	秋季		冬季	
	体积分数 $\times 10^{-9}$	贡献率 /%	体积分数 $\times 10^{-9}$	贡献率 /%
烷烃	13.23	26.19	30.90	48.88
烯烃	4.85	9.60	7.25	11.47
炔烃	2.38	4.72	15.44	24.43
芳香烃	13.16	26.04	2.62	4.14
卤代烃	6.46	12.78	1.92	3.03
OVOCs	9.83	19.45	4.88	7.71
乙腈	0.61	1.22	0.20	0.32
TVOC	50.52	100.00	63.21	100.00

主导下,铜川周边城市咸阳、西安的工业排放对铜川有一定影响. 光化学反应的二次转化过程是大气中 OVOCs 的重要来源<sup>[38,39]</sup>, 秋季  $\phi(\text{OVOCs})$  [ $(9.83 \pm 4.20) \times 10^{-9}$ ] 约为冬季 [ $(4.88 \pm 7.40) \times 10^{-9}$ ] 的 2 倍,且秋季温度和紫外辐射均高于冬季,表明秋季二次光化学反应强于冬季.

### 2.2.3 VOCs 特征比值分析

VOCs 的人为排放源大致分为三类, 生物质燃烧/燃煤源、交通源和工业和溶剂挥发源; 苯、甲苯和乙苯的相对比值可用来识别污染源<sup>[14]</sup>. 苯、甲苯和乙苯相对比例在生物质燃烧/燃煤源中为 0.69:0.27:0.04, 在交通源中为 0.31:0.59:0.10, 在工业和溶剂挥发源中为 0.06:0.59:

0.35<sup>[40]</sup>. 采用苯、甲苯和乙苯比值的分析结果如图 5 所示. 从中可见, 铜川市秋季三角图中散点主要集中在红色区域, 表明秋季观测期间 VOCs 的排放源主要为交通源; 冬季三角图中散点主要集中在红色和绿色区域, 表明冬季观测期间 VOCs 的排放源主要为交通源和生物质燃烧/燃煤源.

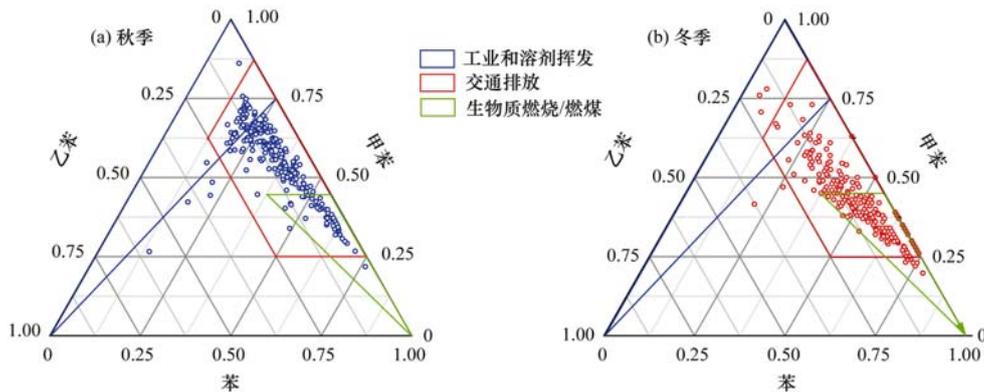


图 5 铜川市观测期间苯、甲苯和乙苯的相对组成

Fig. 5 Initial proportions of benzene, toluene, and ethylbenzene during the observation period in Tongchuan

## 2.3 O<sub>3</sub> 和 SOA 生成潜势

### 2.3.1 EKMA 曲线

铜川市秋冬季 EKMA 曲线如图 6 所示, O<sub>3</sub> 等值

曲线转折点的连线即为 O<sub>3</sub> 体积分数的脊线. 脊线上 VOCs/NO<sub>x</sub> 比值 ( $k$ ) 相同, 当 VOCs/NO<sub>x</sub> 比值小于  $k$  时, 属于 VOCs 控制区; 当 VOCs/NO<sub>x</sub> 比值大于  $k$  时, 属于 NO<sub>x</sub> 控制区. 铜川市秋季  $k = 6.0$ , 计算得到的 VOCs/NO<sub>x</sub> 比值范围为 0.6 ~ 8.6, 平均值为 3.2 (图 7), 故秋季属于 VOCs 控制区. 冬季  $k = 5.5$ , VOCs/NO<sub>x</sub> 比值范围 0.4 ~ 6.9, 平均值为 1.9 (图 7), 故冬季也处于 VOCs 控制区.

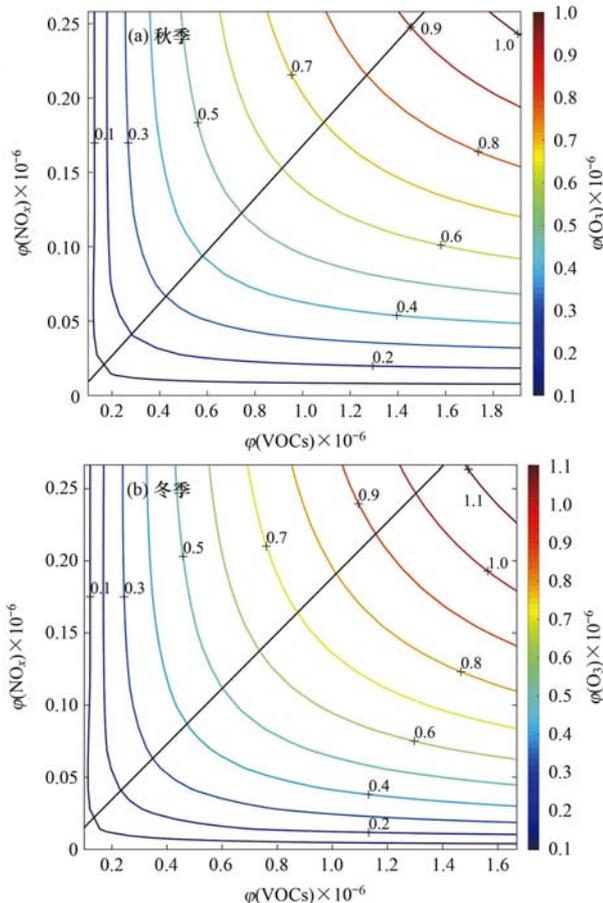


图 6 铜川市观测期间 EKMA 曲线

Fig. 6 EKMA curve of Tongchuan city during observation period

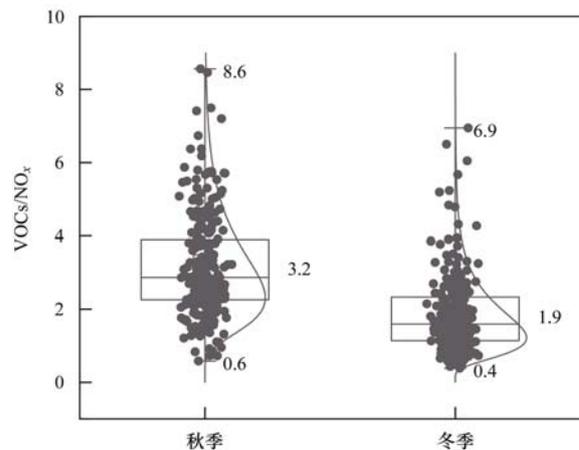


图 7 铜川市观测期间 VOCs/NO<sub>x</sub> 比值

Fig. 7 VOCs/NO<sub>x</sub> ratios during the observation period in Tongchuan

### 2.3.2 VOCs 的 OFPs

采用最大增量反应活性系数 (MIR) 法计算的铜川市大气 VOCs 成分的 OFPs 见图 8. 铜川市秋季总 OFPs 为  $138.43 \times 10^{-9}$ , 芳香烃对 OFPs 贡献率最大 (39.57%), 其次是烯烃 (34.44%). 冬季总 OFPs 为

$137.123 \times 10^{-9}$ , 烯烃贡献率最大(49.89%), 其次是烷烃(16.89%)。烷烃对 VOCs 的贡献率在秋季和冬季分别为 26.19% 和 48.88%, 而秋冬季烯烃对 VOCs 的贡献率分别为 9.60% 和 11.47%。烷烃对 OFPs 的贡献率在秋季和冬季分别为 9.25% 和 16.89%, 而秋冬季烯烃对 OFPs 的贡献率分别为

34.44% 和 49.89%。可见, VOCs 贡献率较低的烯烃(约 9%~11%)贡献了较高的 OFPs(约 34%~50%), 而 VOCs 贡献率较高的烷烃(约 26%~49%)对总 OFPs 的贡献较低(9%~17%)。由于烯烃属于不饱和烃, 化学性质比烷烃活泼, 生成  $O_3$  的活性强。

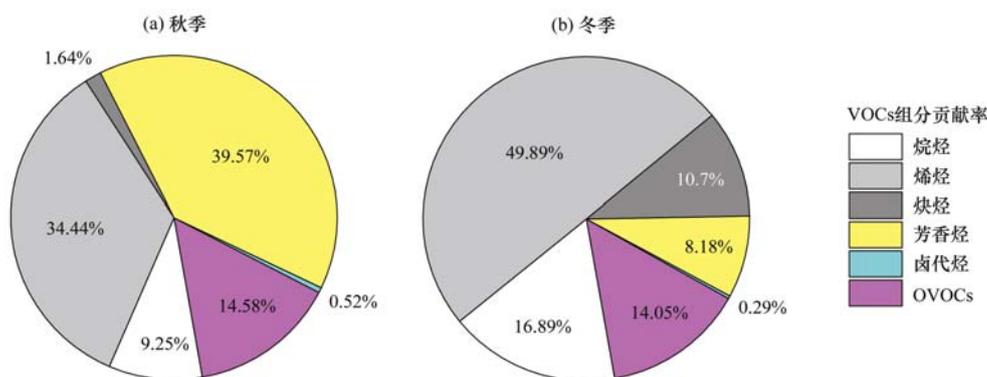


图 8 铜川市观测期间 VOCs 对 OFPs 的贡献率

Fig. 8 Contribution rate of VOCs to OFPs during the observation period in Tongchuan

表 3 为铜川市与其他城市前 10 位 OFPs 最大物种的对比。铜川市秋季 OFPs 最大的 10 种 VOCs 占 TVOC 的 29.65%, 占总 OFPs 的 71.06%。冬季 10 种 VOCs 占 TVOC 的 76.41%, 占总 OFPs 的 80.99%。其他城市前 10 位 OFPs 中都以烯烃和芳香烃为主。铜川市和宝鸡市<sup>[25]</sup>前 10 位 OFPs 物质具有相似性, 丙醛和正己醛是两个城市  $O_3$  生成的特征物种, 表明两城市 VOCs 排放源具有相似性。丙醛来源于柴油车排放<sup>[41,42]</sup>, 正己醛来源于食品包装、油毡生产和

油漆溶剂使用<sup>[43,44]</sup>。

铜川市秋季  $O_3$  生成活性前 3 位的 VOCs 成分为反-2-戊烯(17.23%)、甲苯(13.75%)和间/对-二甲苯(9.02%), 对应冬季为乙烯(34.83%)、乙炔(10.70%)和丙烯(7.05%)。汽油的挥发是反-2-戊烯的主要来源, 机动车尾气排放和溶剂使用是甲苯和间/对-二甲苯的主要来源。乙烯和丙烯通常来源于汽车尾气排放、石化工业排放和生物质燃烧, 乙炔通常来源于汽油车尾气、煤和生物质的燃烧<sup>[45,46]</sup>。

表 3 铜川市及其他城市 OFPs 最大的 10 种 VOCs

Table 3 Ten VOCs with the largest contribution to OFPs in Tongchuan and other cities

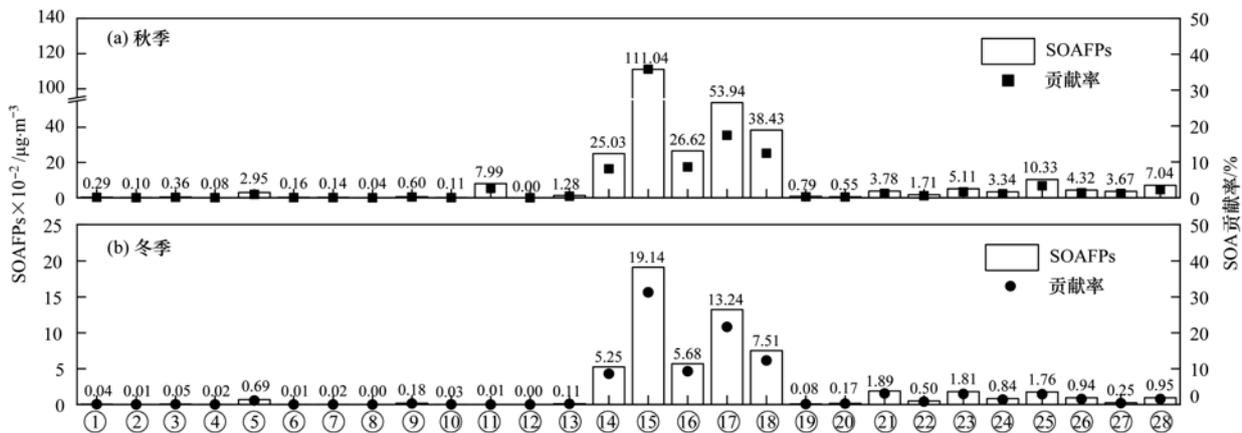
排序	铜川市		宝鸡市 <sup>[25]</sup>		西安市 <sup>[22]</sup>	兰州市 <sup>[47]</sup>	北京市 <sup>[48]</sup>		武汉 <sup>[49]</sup>
	2017年10月	2018年1月	2017年10月	2017年12月	2016年	2013年	2016年秋季	2017年冬季	2016~2017年
1	反-2-戊烯	乙烯	乙烯	乙烯	间/对-二甲苯	顺-2-丁烯	间/对-二甲苯	乙烯	正己烷
2	甲苯	乙炔	反-2-戊烯	丙烯	甲苯	丙烯	丙烯	间/对-二甲苯	乙炔
3	间/对-二甲苯	丙烯	甲苯	乙炔	邻-二甲苯	间-二甲苯	乙烯	丙烯	丙烯
4	乙烯	正丁烷	丙醛	丙醛	1,2,4-三甲基苯	1-丁烯	甲苯	甲苯	甲苯
5	邻-二甲苯	丙醛	间/对-二甲苯	正丁烷	丙烯	环己烷	异戊二烯	邻-二甲苯	间/对-二甲苯
6	丙醛	正己醛	邻-二甲苯	甲苯	乙苯	异丙苯	邻-二甲苯	1-丁烯	丙烷
7	正己醛	异丁烷	顺-2-戊烯	1-丁烯	1,2,5-三甲基苯	反-2-丁烯	1,2,4-三甲基苯	1,2,4-三甲基苯	乙炔
8	1,2,4-三甲基苯	乙烷	1-己烯	正己醛	1,2,3-三甲基苯	邻-二甲苯	1-丁烯	间乙基甲苯	异丁烷
9	丙烯	甲苯	乙炔	顺-2-丁烯	对-乙基甲苯	甲苯	反-2-戊烯	1,2,3-三甲基苯	正丁烷
10	乙苯	间/对-二甲苯	1,2,4-三甲基苯	间/对-二甲苯	1-丁烯	1,2,5-三甲基苯	间乙基甲苯	正丁烷	邻-二甲苯

### 2.3.3 VOCs 的 SOAFPs

大气中的高碳烷烃、烯烃和芳香烃等挥发性有机物可以被氧化成二次有机气溶胶(SOA)。有研究发现<sup>[50]</sup>, SOA 是  $PM_{2.5}$  的重要成分。为探究铜川市大气中 VOC 物种对 SOA 的贡献, 估算了测得的 102 种 VOCs 的 SOAFPs。秋冬季 102 种 VOCs 中共有 28 种 VOCs 成分对 SOA 生成有贡献, 包括 12 种烷烃、

15 种芳香烃和异戊二烯(图 9)。

铜川市在秋季和冬季总 SOAFPs 分别为  $3.098 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  和  $0.612 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。秋季芳香烃对 SOA 的贡献率为 95.45%, 冬季为 98.09%, 这与其他地区的研究结果相似<sup>[48,51,52]</sup>。甲苯、间/对-二甲苯和邻-二甲苯是铜川市秋冬两季 SOAFPs 最大的 3 种物质, 贡献率分别为 35.84%、17.41% 和 12.41% (秋季),



①甲基环戊烷,②环己烷,③2,2,4-三甲基戊烷,④正庚烷,⑤甲基环己烷,⑥2-甲基庚烷,⑦3-甲基庚烷,⑧辛烷,⑨正壬烷,⑩正癸烷,⑪十一烷,⑫十二烷,⑬异戊二烯,⑭苯,⑮甲苯,⑯乙苯,⑰间/对-二甲苯,⑱邻-二甲苯,⑲异丙苯,⑳正丙基苯,㉑3-乙基甲苯,㉒4-乙基甲苯,㉓1,3,5-三甲基苯,㉔2-乙基甲苯,㉕1,2,4-三甲基苯,㉖1,2,3-三甲基苯,㉗1,3-二乙基苯,㉘1,4-二乙基苯; 柱子上数字代表 VOCs 物种的 SOAFPs

图9 铜川市观测期间 VOCs 的 SOAFPs

Fig. 9 SOAFPs of VOCs during the observation period in Tongchuan

31.28%、21.64% 和 12.28% (冬季)。因此减少芳香烃尤其是苯系物的排放是铜川市控制 SOA 形成的有效途径。

### 3 结论

(1) 在铜川市秋季观测期间,  $\varphi(\text{TVOC})$  为  $(50.52 \pm 16.81) \times 10^{-9}$ ,  $\varphi(\text{烷烃})$  为  $(13.23 \times 10^{-9})$  略高于  $\varphi(\text{芳香烃})$  为  $(13.16 \times 10^{-9})$ , 明显高于  $\varphi(\text{OVOCs})$  ( $9.83 \times 10^{-9}$ )、 $\varphi(\text{卤代烃})$  ( $6.46 \times 10^{-9}$ )、 $\varphi(\text{烯烃})$  ( $4.85 \times 10^{-9}$ )、 $\varphi(\text{乙炔})$  ( $2.38 \times 10^{-9}$ ) 和  $\varphi(\text{乙腈})$  ( $0.61 \times 10^{-9}$ )。在冬季观测期间,  $\varphi(\text{TVOC})$  为  $(63.21 \pm 35.24) \times 10^{-9}$ ,  $\varphi(\text{烷烃})$  ( $30.90 \times 10^{-9}$ ) 显著高于  $\varphi(\text{乙炔})$  ( $15.44 \times 10^{-9}$ )、 $\varphi(\text{烯烃})$  ( $7.25 \times 10^{-9}$ )、 $\varphi(\text{OVOCs})$  ( $4.88 \times 10^{-9}$ )、 $\varphi(\text{芳香烃})$  ( $2.62 \times 10^{-9}$ )、 $\varphi(\text{卤代烃})$  ( $1.92 \times 10^{-9}$ ) 和  $\varphi(\text{乙腈})$  ( $0.20 \times 10^{-9}$ )。

(2) 铜川市秋冬季  $\rho(\text{O}_3)$  分别为  $(34.17 \pm 18.08) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  和  $(58.59 \pm 28.59) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。秋季总 OFPs 为  $138.43 \times 10^{-9}$ , 芳香烃贡献率最大 (39.57%); 冬季总 OFPs 为  $137.123 \times 10^{-9}$ , 烯烃贡献率最大 (49.89%)。丙醛和正己醛是铜川市秋冬季 O<sub>3</sub> 生成的特征物种。铜川市秋季 28 种 VOCs 的 SOAFPs 为  $3.098 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 冬季为  $0.612 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ; 芳香烃是秋季和冬季 SOAFPs 贡献率最大的 VOCs 物种, 分别占 95.45% 和 98.09%。烯烃和芳香烃是铜川市 O<sub>3</sub> 和 SOA 生成的关键活性物质。

(3) 在秋季, 反-2-戊烯、甲苯、间/对-二甲苯、乙苯和邻-二甲苯、丙醛、正己醛、1,2,4-三甲基苯、丙烯和乙苯对 O<sub>3</sub> 生成的贡献率为 71.06%; 而在冬

季, 乙烯、乙炔、丙烯、正丁烷、丙醛、正己醛、异丁烷、乙烷、甲苯和间/对-二甲苯对 O<sub>3</sub> 生成的贡献率为 80.99%。在秋季甲苯、间/对-二甲苯、邻-二甲苯、乙苯和苯对 SOA 生成的贡献率为 82.33%, 在冬季为 83.07%。甲苯、间/对-二甲苯、邻-二甲苯和乙苯是铜川市 O<sub>3</sub> 及 SOA 生成的双控物种, 控制这些污染物的排放可协同控制铜川市 O<sub>3</sub> 及 SOA 的生成。

### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] Liu Y F, Song M D, Liu X G, et al. Characterization and sources of volatile organic compounds (VOCs) and their related changes during ozone pollution days in 2016 in Beijing, China[J]. Environmental Pollution, 2020, 257, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113599.
- [4] 王文美, 高璟贇, 肖致美, 等. 天津市夏季不同臭氧浓度级别 VOCs 特征及来源[J]. 环境科学, 2021, 42(8): 3585-3594.  
Wang W M, Gao J Y, Xiao Z M, et al. Characteristics and sources of VOCs at different ozone concentration levels in Tianjin[J]. Environmental Science, 2021, 42(8): 3585-3594.
- [5] 罗瑞雪, 刘保双, 梁丹妮, 等. 天津市郊夏季的臭氧变化特征及其前体物 VOCs 的来源解析[J]. 环境科学, 2021, 42(1): 75-87.  
Luo R X, Liu B S, Liang D N, et al. Characteristics of ozone and source apportionment of the precursor VOCs in Tianjin suburbs in summer[J]. Environmental Science, 2021, 42(1): 75-87.

- [6] 姚青, 韩素芹, 张裕芬, 等. 天津夏季郊区 VOCs 对臭氧生成的影响[J]. 环境科学, 2020, **41**(4): 1573-1581.  
Yao Q, Han S Q, Zhang Y F, *et al.* Effects of VOCs on ozone formation in the Tianjin suburbs in summer[J]. Environmental Science, 2020, **41**(4): 1573-1581.
- [7] Fan M Y, Zhang Y L, Lin Y C, *et al.* Source apportionments of atmospheric volatile organic compounds in Nanjing, China during high ozone pollution season[J]. Chemosphere, 2021, **263**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.128025.
- [8] Mozaffar A, Zhang Y L, Fan M Y, *et al.* Characteristics of summertime ambient VOCs and their contributions to O<sub>3</sub> and SOA formation in a suburban area of Nanjing, China[J]. Atmospheric Research, 2020, **240**, doi: 10.1016/j.atmosres.2020.104923.
- [9] 林理量, 程勇, 曹礼明, 等. 深圳臭氧污染日的 VOCs 组成与来源特征[J]. 中国环境科学, 2021, **41**(8): 3484-3492.  
Lin L L, Cheng Y, Cao L M, *et al.* The characterization and source apportionment of VOCs in Shenzhen during ozone polluted period[J]. China Environmental Science, 2021, **41**(8): 3484-3492.
- [10] 陈雪, 黄晓锋, 朱波, 等. 深圳市秋季 VOCs 污染空间分布特征与关键减排物种识别[J]. 中国环境科学, 2021, **41**(9): 4069-4076.  
Chen X, Huang X F, Zhu B, *et al.* Spatial distribution characteristics of VOCs pollution and identification of key pollution species in autumn Shenzhen[J]. China Environmental Science, 2021, **41**(9): 4069-4076.
- [11] 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 Sciences, 2019, **32**(4): 619-626.
- [12] 李如梅, 闫雨龙, 王成, 等. 基于观测数据的太原市城区夏季 VOCs 来源及其对 O<sub>3</sub> 生成的贡献研究[J]. 中国环境科学, 2021, doi: 10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20210222.004.  
Li R M, Yan Y L, Wang C, *et al.* Source apportionment of VOCs and its contribution to O<sub>3</sub> production based on observation during summertime in urban area of Taiyuan [J]. China Environmental Science, 2021, doi: 10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20210222.004.
- [13] 邓思欣, 刘永林, 司徒淑娉, 等. 珠三角产业重镇大气 VOCs 污染特征及来源解析[J]. 中国环境科学, 2021, **41**(7): 2993-3003.  
Deng S X, Liu Y L, Situ S P, *et al.* Characteristics and source apportionment of volatile organic compounds in an industrial town of Pearl River Delta[J]. China Environmental Science, 2021, **41**(7): 2993-3003.
- [14] 李陵, 李振亮, 张丹, 等. 重庆市主城区 O<sub>3</sub> 污染时期大气 VOCs 污染特征及来源解析[J]. 环境科学, 2021, **42**(8): 3595-3603.  
Li L, Li Z L, Zhang D, *et al.* Pollution characteristics and source apportionment of atmospheric VOCs during ozone pollution period in the main urban area of Chongqing[J]. Environmental Science, 2021, **42**(8): 3595-3603.
- [15] 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.
- [16] 王伶俐, 李海燕, 陈程, 等. 长三角北部沿海城市 2018 年大气 VOCs 分布特征[J]. 环境科学学报, 2020, **40**(4): 1385-1400.  
Wang L R, Li H Y, Chen C, *et al.* Distributions of VOCs in a coastal city in the northern Yangtze River Delta during 2018[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, **40**(4): 1385-1400.
- [17] Zhang X F, Yin Y Y, Wen J H, *et al.* Characteristics, reactivity and source apportionment of ambient volatile organic compounds (VOCs) in a typical tourist city[J]. Atmospheric Environment, 2019, **215**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2019.116898.
- [18] Song M D, Li X, Yang S D, *et al.* Spatiotemporal variation, sources, and secondary transformation potential of volatile organic compounds in Xi'an, China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2021, **21**(6): 4939-4958.
- [19] Liu S, Cheng Y, Yan L, *et al.* Characteristic and sources of atmospheric ozone in Xi'an[J]. Indoor and Built Environment, 2019, **28**(9): 1254-1262.
- [20] Sun J, Shen Z X, Zhang Y, *et al.* Profiles and source apportionment of nonmethane volatile organic compounds in winter and summer in Xi'an, China, based on the hybrid environmental receptor model [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2021, **38**(1): 116-131.
- [21] Sun J, Shen Z X, Zhang Y, *et al.* Urban VOC profiles, possible sources, and its role in ozone formation for a summer campaign over Xi'an, China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, **26**(27): 27769-27782.
- [22] 李琦, 桂丽, 刘明, 等. 西安人为源 VOCs 排放特征及其对 O<sub>3</sub> 和 SOA 生成潜势的影响[J]. 环境科学研究, 2019, **32**(2): 253-262.  
Li Q, Gui L, Liu M, *et al.* Emission characteristics of anthropogenic VOCs in Xi'an city and its contribution to ozone formation potential and secondary organic aerosols formation potential [J]. Research of Environmental Sciences, 2019, **32**(2): 253-262.
- [23] 闫东杰, 苏航, 黄学敏, 等. 西安市人为源挥发性有机物排放清单及研究[J]. 环境科学学报, 2017, **37**(2): 446-452.  
Yan D J, Su H, Huang X M, *et al.* VOCs emission inventory of anthropogenic sources in Xi'an [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, **37**(2): 446-452.
- [24] Hui L R, Ma T, Gao Z J, *et al.* Characteristics and sources of volatile organic compounds during high ozone episodes: a case study at a site in the eastern Guanzhong Plain, China [J]. Chemosphere, 2021, **265**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.129072.
- [25] 张瑞旭, 刘焕武, 邓顺熙, 等. 宝鸡市秋冬季大气 VOCs 浓度特征及其 O<sub>3</sub> 和 SOA 生成潜势[J]. 中国环境科学, 2020, **40**(3): 983-996.  
Zhang R X, Liu H W, Deng S X, *et al.* Characteristics of VOCs and formation potential of O<sub>3</sub> and SOA in autumn and winter in Baoji, China[J]. China Environmental Science, 2020, **40**(3): 983-996.
- [26] Xue Y G, Ho S S H, Huang Y, *et al.* Source apportionment of VOCs and their impacts on surface ozone in an industry city of Baoji, northwestern China [J]. Scientific Reports, 2017, **7**, doi: 10.1038/s41598-017-10631-4.
- [27] Carter W P L. Updated maximum incremental reactivity scale and hydrocarbon bin reactivities for regulatory applications [R]. California: California Environmental Protection Agency, 2010.
- [28] 崔金梦, 王体健, 李秋潼, 等. 连云港市挥发性有机化合物

- 的组分特征及来源解析[J]. 环境科学, 2020, **41**(9): 3941-3950.
- Cui J M, Wang T J, Li Q T, *et al.* Component characteristics and source appointment of volatile organic compounds in Lianyungang city[J]. Environmental Science, 2020, **41**(9): 3941-3950.
- [29] Swackhamer D L. Rethinking the ozone problem in urban and regional air pollution; national research council. National academy press (1991)[J]. Journal of Aerosol Science, 1993, **24**(7): 977-978.
- [30] Grosjean D, Seinfeld J H. Parameterization of the formation potential of secondary organic aerosols [J]. Atmospheric Environment (1967), 1989, **23**(8): 1733-1747.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] Song M D, Tan Q W, Feng M, *et al.* Source apportionment and secondary transformation of atmospheric nonmethane hydrocarbons in Chengdu, Southwest China [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2018, **123**(17): 9741-9763.
- [35] Li L Y, Chen Y, Zeng L M, *et al.* Biomass burning contribution to ambient volatile organic compounds (VOCs) in the Chengdu-Chongqing Region (CCR), China [J]. Atmospheric Environment, 2014, **99**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2014.09.067.
- [36] Li B W, Ho S S H, Xue Y G, *et al.* Characterizations of volatile organic compounds (VOCs) from vehicular emissions at roadside environment; The first comprehensive study in northwestern China[J]. Atmospheric Environment, 2017, **161**: 1-12.
- [37] Sun J, Wu F K, Hu B, *et al.* VOC characteristics, emissions and contributions to SOA formation during hazy episodes [J]. Atmospheric Environment, 2016, **141**: 560-570.
- [38] Liu Y, Yuan B, Li X, *et al.* Impact of pollution controls in Beijing on atmospheric oxygenated volatile organic compounds (OVOCs) during the 2008 Olympic Games; observation and modeling implications[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2015, **15**(6): 3045-3062.
- [39] Xia S Y, Wang C, Zhu B, *et al.* Long-term observations of oxygenated volatile organic compounds (OVOCs) in an urban atmosphere in southern China, 2014-2019 [J]. Environmental Pollution, 2021, **270**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.116301.
- [40] Zhang Z, Zhang Y L, Wang X M, *et al.* Spatiotemporal patterns and source implications of aromatic hydrocarbons at six rural sites across China's developed coastal regions [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2016, **121**(11): 6669-6687.
- [41] Tsai J H, Chang S Y, Chiang H L. Volatile organic compounds from the exhaust of light-duty diesel vehicles [J]. Atmospheric Environment, 2012, **61**: 499-506.
- [42] Jhang S R, Chen K S, Lin S L, *et al.* Evaluation of the reduction in carbonyl emissions and ozone formation potential from the exhaust of a heavy-duty diesel engine by hydrogen-diesel dual fuel combustion [J]. Applied Thermal Engineering, 2018, **132**: 586-594.
- [43] Ranci re F, Dassonville C, Roda C, *et al.* Contribution of ozone to airborne aldehyde formation in Paris homes [J]. Science of the Total Environment, 2011, **409**(20): 4480-4483.
- [44] Lehtonen M, Kek al inen S, Nikkil  I, *et al.* Active food packaging through controlled *in situ* production and release of hexanal [J]. Food Chemistry: X, 2020, **5**, doi: 10.1016/j.fochx.2019.100074.
- [45] 曾沛, 郭海, 梁胜文, 等. 武汉市大气 VOCs 污染特征及其对臭氧生成的影响 [J]. 环境科学与技术, 2018, **41**(7): 117-124.
- Zeng P, Guo H, Liang S W, *et al.* Ambient volatile organic compounds and their contributions to ozone formation in Wuhan [J]. Environmental Science & Technology, 2018, **41**(7): 117-124.
- [46] 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.
- [47] Jia C H, Mao X X, Huang T, *et al.* Non-methane hydrocarbons (NMHCs) and their contribution to ozone formation potential in a petrochemical industrialized city, Northwest China [J]. Atmospheric Research, 2016, **169**: 225-236.
- [48] Li Q Q, Su G J, Li C Q, *et al.* An investigation into the role of VOCs in SOA and ozone production in Beijing, China [J]. Science of the Total Environment, 2020, **720**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137536.
- [49] 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.
- [50] Hu W W, Hu M, Deng Z Q, *et al.* The characteristics and origins of carbonaceous aerosol at a rural site of PRD in summer of 2006 [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2012, **12**(4): 1811-1822.
- [51] 段玉森. 基于 SOA 和 O<sub>3</sub> 生成潜势的上海市 VOCs 优控物种研究 [J]. 中国环境监测, 2020, **36**(2): 138-147.
- Duan Y S. Study on the priority species of VOCs based on SOA and O<sub>3</sub> formation potential [J]. Environmental Monitoring in China, 2020, **36**(2): 138-147.
- [52] 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.

## CONTENTS

Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Urban Soils of Major Cities in China .....	PENG Chi, HE Ya-lei, GUO Zhao-hui, <i>et al.</i> ( 1 )
Environmental Behaviors of Plant Growth Regulators in Soil; A Review .....	CHEN Liang, HOU Jie, HU Xiao-lei, <i>et al.</i> ( 11 )
Preparation and Application of Magnetic Water Treatment Materials Based on Iron Sludge .....	ZENG Hui-ping, ZHAI Long-xue, LI Dong, <i>et al.</i> ( 26 )
Meta-analysis of the Impact of Different Ozone Metrics on Total Mortality in China .....	RUAN Fang-fang, LIU Ji-xin, CHEN Zhi-wei, <i>et al.</i> ( 37 )
Variation Characteristics and Potential Sources of the Mt. Haituo Aerosol Chemical Composition in Different Pollution Processes During Winter in Beijing, China .....	ZHAO De-long, WANG Fei, LIU Dan-tong, <i>et al.</i> ( 46 )
Real-time Source Apportionment of PM <sub>2.5</sub> and Potential Geographic Origins of Each Source During Winter in Wuhan .....	JIANG Shu-ning, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i> ( 61 )
Spatiotemporal Distribution and Seasonal Characteristics of Regional Transport of PM <sub>2.5</sub> in Yuncheng City .....	WANG Yun-tao, ZHANG Qiang, WEN Xiao-yu, <i>et al.</i> ( 74 )
Three-dimensional Structure Variation of PM <sub>2.5</sub> During Cold Front Advance in Eastern China .....	MOU Nan-nan, ZHU Bin, LU Wen ( 85 )
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Nitrated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Atmosphere of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area .....	LI Yan-xi, XIE Dan-ping, LI Yu-qing, <i>et al.</i> ( 93 )
Atmospheric VOCs Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Large-scale Integrated Industrial Area and Surrounding Areas in Southwest China .....	LI Ling, ZHANG Dan, HU Wei, <i>et al.</i> ( 102 )
Characteristics and Source Apportionment of Ambient VOCs in Lhasa .....	YU Jia-yan, HAN Yan, CHEN Mu-lan, <i>et al.</i> ( 113 )
Variation Characteristics of Ambient Volatile Organic Compounds (VOCs) Volume Fraction During Hangzhou COVID-19 Period .....	LIN Xu, YAN Ren-chang, JIN Jia-jia, <i>et al.</i> ( 123 )
Role of Atmospheric VOCs in Ozone Formation in Summer in Shanghai Suburb .....	FANG Qin, NIU Si-ping, CHEN Yu-dong, <i>et al.</i> ( 132 )
Characteristics of VOCs and Formation Potentials of O <sub>3</sub> and SOA in Autumn and Winter in Tongchuan, China .....	YI Xiao-xiao, LI Jiang-hao, LI Guang-hua, <i>et al.</i> ( 140 )
Emission Characteristics and Emission Factors of Volatile Organic Compounds from E-waste Dismantling and Recycling Processes .....	XIE Dan-ping, HUANG Zhong-hui, LIU Wang, <i>et al.</i> ( 150 )
Nonlinear Response Relationship Between Ozone and Precursor Emissions in the Pearl River Delta Region Under Different Transmission Channels .....	WU Yong-kang, CHEN Wei-hua, YAN Feng-hua, <i>et al.</i> ( 160 )
Characteristics of Ozone Pollution and Influencing Factors in Urban and Suburban Areas in Zibo .....	WANG Yu-yan, YANG Wen, WANG Xiu-yan, <i>et al.</i> ( 170 )
Pollution Characteristics and Health Risk of Heavy Metals in Fugitive Dust Around Zhaotong City .....	PANG Xiao-chen, HAN Xin-yu, SHI Jian-wu, <i>et al.</i> ( 180 )
Characteristics of Microplastic Present in Urban Road Dust .....	FANG Qin, NIU Si-ping, CHEN Yu-dong, <i>et al.</i> ( 189 )
Stable Isotopes of Precipitation in the Eastern Tarim River Basin and Water Vapor Sources .....	SONG Yang, WANG Sheng-jie, ZHANG Ming-jun, <i>et al.</i> ( 199 )
Characteristics and Risk Assessment of Antibiotic Contamination in Chishui River Basin, Guizhou Province, China .....	WU Tian-yu, LI Jiang, YANG Ai-jiang, <i>et al.</i> ( 210 )
Hydrochemical Characteristics and Controlling Factors of Surface Water and Groundwater in Wuding River Basin .....	LI Shu-jian, HAN Xiao, WANG Wen-hui, <i>et al.</i> ( 220 )
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Nutrients and Heavy Metals in Sediments of the Fuhe River Influenced Area, Baiyangdian Lake .....	CHEN Xing-hong, LI Li-qing, ZHANG Mei-yi, <i>et al.</i> ( 230 )
Occurrence Characteristics of Microplastics in Mangrove Sediments in the Jiulong River Estuary and the Association with Heavy Metals .....	LIU Chang-jun, LUO Zhuan-xi, YAN Yu, <i>et al.</i> ( 239 )
Quantitative Analysis of the Correlation Between Macroenthos Community and Water Environmental Factors and Aquatic Ecosystem Health Assessment in the North Canal River Basin of Beijing .....	HU Xiao-hong, ZUO De-peng, LIU Bo, <i>et al.</i> ( 247 )
Analysis on the Spatial Variability Mechanism of the Characteristic Water Quality Factors of Urban River Channel Reclaimed Water .....	LIU Quan-zhong, PENG Ke, SU Zhen-hua, <i>et al.</i> ( 256 )
DOM Characteristics Analysis of Surface Sediment-overlying Water in Suzhou Landscape River Course .....	LI Chao-nan, HE Jie, ZHU Xue-hui, <i>et al.</i> ( 267 )
Distribution of Typical Pollutants from Rainwater Sewer Sediments in Suzhou City .....	YE Rong, SHENG Ming-jun, JIANG Yong-bo, <i>et al.</i> ( 277 )
Persistent Inhibition of Ammonium Released from Contaminated Sediments Through a Modified Zeolite and Biofilm System Enhanced by Signaling Molecules .....	XU Jin-lan, XU Yang, LI Xiu-min, <i>et al.</i> ( 285 )
Effects of the Three Gorges Reservoir Operation on Vertical Distribution of Chlorophyll a and Environmental Factors in Tributaries .....	TIAN Pan, LI Ya-li, LI Ying-jie, <i>et al.</i> ( 295 )
Characteristic Analysis of <i>nirS</i> Denitrifying Bacterial Community in Lijiahe Reservoir During Stratification .....	LIANG Wei-guang, HUANG Ting-lin, ZHANG Hai-han, <i>et al.</i> ( 306 )
Spatial and Temporal Distribution of Aerobic Denitrification Bacterial Community in Sediments of Gangan Reservoir .....	ZHANG Zi-wei, CHEN Zhao-ying, ZHANG Tian-na, <i>et al.</i> ( 314 )
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Metal Elements for Groundwater in the Ningxia Region of China .....	WANG Xiao-dong, TIAN Wei, ZHANG Xue-yan ( 329 )
Geochemical Characteristics and Driving Factors of High-Iodine Groundwater in Rapidly Urbanized Delta Areas: A Case Study of the Pearl River Delta .....	LU Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i> ( 339 )
Multimedia Distribution Characteristics and Risk Assessment of 22 PPCPs in the Water Environment of Qingpu District, Yangtze River Delta Demonstration Area .....	ZHANG Zhi-bo, DUAN Yan-ping, SHEN Jia-hao, <i>et al.</i> ( 349 )
Distribution Characteristics and Risk Assessment of 209 Polychlorinated Biphenyls in Dongting Lake and the Inflow Rivers .....	HUANG Zhi-feng, ZHENG Bing-hui, YIN Da-qiang, <i>et al.</i> ( 363 )
Estimation of Nitrous Oxide Emission from River System Based on Water Discharge and Dissolved Nitrous Oxide Concentration .....	LI Bing-qing, HU Min-peng, WANG Ming-feng, <i>et al.</i> ( 369 )
Comparison Between Tributary and Main Stream and Preliminary Influence Mechanism of CO <sub>2</sub> Flux Across Water-air Interface in Wanzhou in the Three Gorges Reservoir Area .....	QIN Yu, OUYANG Chang-yue, WANG Yu-xiao, <i>et al.</i> ( 377 )
Preparation of Functional Attapulgite Composite and Its Adsorption Behaviors for Congo Red .....	LIAO Xiao-feng, ZHONG Jing-ping, CHEN Yun-nen, <i>et al.</i> ( 387 )
Adsorption Characteristics and Long-term Effectiveness Evaluation of Iron-nitrogen Co-doped Biochar for Secondary Water-Soluble Organic Matter .....	WU Chen-xi, XU Lu, JIN Xin, <i>et al.</i> ( 398 )
Nitritation Performance of Zeolite Moving Bed Biofilm Reactor for Ammonium Wastewater Treatment .....	DENG Cui-lan, GUO Lu, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i> ( 409 )
Effect of Temperature on ANAMMOX Process in Sequencing Batch Biofilm Reactors; Nitrogen Removal Performance and Bacterial Community .....	WU Shan, WANG Shu-ya, WANG Fen, <i>et al.</i> ( 416 )
Effects of Carriers on ANAMMOX Sludge Activity Recovery and Microbial Flora Characteristics .....	LUO Jing-wen, YANG Jin-jin, LI Shao-kang, <i>et al.</i> ( 424 )
Spatial Distribution and Source Analysis of Soil Heavy Metals in a Small Watershed in the Mountainous Area of Southern Ningxia Based on PMF Model .....	XIA Zi-shu, BAI Yi-ru, WANG You-qi, <i>et al.</i> ( 432 )
Heavy Metal Concentration Characteristics and Health Risks of Farmland Soils in Typical Pyrite Mining Area of the Central Zhejiang Province, China .....	CHENG Xiao-meng, SUN Bin-bin, WU Chao, <i>et al.</i> ( 442 )
Risk Zoning of Heavy Metals in a Peri-urban Area in the Black Soil Farmland Based on Agricultural Products .....	WU Song-ze, WANG Dong-yan, LI Wen-bo, <i>et al.</i> ( 454 )
Main Control Factors of Cadmium Content in Rice in Carbonate Rock Region of Guangxi Based on the DGT Technique .....	SONG Bo, XIAO Nai-chuan, MA Li-jun, <i>et al.</i> ( 463 )
Inhibitory Effects of Soil Amendment Coupled with Water Management on the Accumulation of Cd and Pb in Double-Cropping Rice .....	LI Lin-feng, WANG Yan-hong, LI Yi-chun, <i>et al.</i> ( 472 )
Characteristics and Health Risk Assessment of Cadmium, Lead, and Arsenic Accumulation in Leafy Vegetables Planted in a Greenhouse .....	DONG Jun-wen, GAO Pei-pei, SUN Hong-xin, <i>et al.</i> ( 481 )
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Polychlorinated Biphenyls in E-waste Disposal Residue-Soil-Vegetable .....	ZHANG Ya-ping, LU Zhan-lu, WANG Xian-jiang, <i>et al.</i> ( 490 )
Soil-crop Distribution and Health Risk Assessment of Organochlorine Pesticides on Typical Agricultural Land in Southern Leizhou Peninsula .....	LIANG Xiao-hui, XIE Qi-lai, ZHENG Qian, <i>et al.</i> ( 500 )
Effects of Heavy Metal Content on Fungal Community Structure in Urban Soil .....	GUO Da-lu, ZHANG Jian, SHEN Si, <i>et al.</i> ( 510 )
Effects of Long-term Fertilization on Soil Nutrient Characteristics and Microbial Resource Restrictions in a Terrace on the Loess Plateau .....	WU Chun-xiao, GAO Xiao-feng, YAN Ben-shuai, <i>et al.</i> ( 521 )
Microbial Composition and Diversity in Soil of <i>Torreya grandis</i> cv. <i>Merrillii</i> Relative to Different Cultivation Years After Land Use Conversion .....	JIANG Ni-wen, LIANG Chen-fei, ZHANG Yong, <i>et al.</i> ( 530 )
Effect of Combined Application of Biochar with Chemical Fertilizer and Organic Fertilizer on Soil Phosphatase Activity and Microbial Community .....	YANG Wen-na, YU Luo, LUO Dong-hai, <i>et al.</i> ( 540 )
Extracellular Enzyme Stoichiometry and Microbial Metabolism Limitation During Vegetation Restoration Process in the Middle of the Qinling Mountains, China .....	XUE Yue, KANG Hai-bin, YANG Hang, <i>et al.</i> ( 550 )
Effects of Biodegradable Film Raw Material Particles on Soil Properties, Wheat Growth, and Nutrient Absorption and Transportation .....	MIN Wen-hao, WANG Chun-li, WANG Li-wei, <i>et al.</i> ( 560 )
Effects of Stalk Incorporation on Soil Carbon Sequestration, Nitrous Oxide Emissions, and Global Warming Potential of a Winter Wheat-Summer Maize Field in Guanzhong Plain .....	WAN Xiao-nan, ZHAO Ke-yue, WU Xiong-wei, <i>et al.</i> ( 569 )