

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

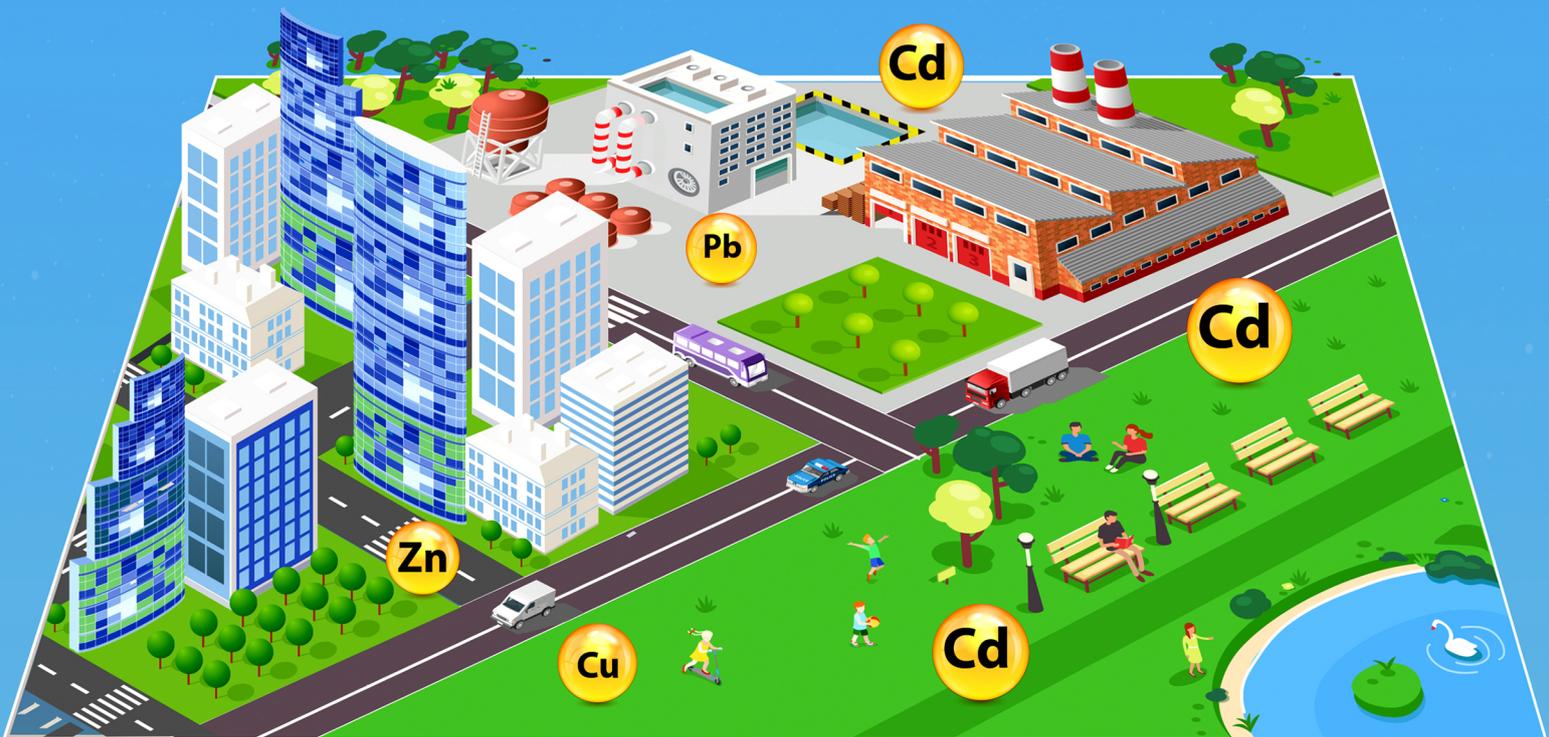
ENVIRONMENTAL SCIENCE

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 ..... 王姝涛, 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 )

# 淄博市城郊臭氧污染特征及影响因素分析

王雨燕<sup>1</sup>, 杨文<sup>2</sup>, 王秀艳<sup>1\*</sup>, 王帅<sup>1</sup>, 白瑾丰<sup>1</sup>, 程颖<sup>1</sup>

(1. 南开大学环境科学与工程学院, 天津 300350; 2. 中国环境科学研究院, 北京 100012)

**摘要:** 本文基于淄博市2019年18个自动监测站连续1 a的O<sub>3</sub>与前体物(NO<sub>x</sub>、VOCs和CO),及常规气象监测数据(气温、相对湿度、风速和能见度),选取城区和郊区代表性站点,研究了O<sub>3</sub>与前体物的污染特征以及O<sub>3</sub>生成的影响因素.结果表明,淄博市2019年O<sub>3</sub>-8h浓度超标率为25.8%,超标天多出现在5~9月;城区NO<sub>x</sub>浓度高于郊区,而O<sub>3</sub>和VOCs浓度较低;各污染物的小时变化率具有明显的季节特征,秋冬季节O<sub>3</sub>上升和前体物下降时间均较春夏季节晚1 h左右,且O<sub>3</sub>生成累积的高峰时段缩短,城区O<sub>3</sub>浓度的整体上升速率高于郊区;对O<sub>3</sub>及各影响因素的相关性分析、偏相关分析及线性回归分析得到,O<sub>3</sub>与前体物和相对湿度呈负相关,与能见度、气温和风速呈正相关,各因素间存在相互影响;城区站点O<sub>3</sub>生成的主控因子有相对湿度、NO<sub>x</sub>、能见度和VOCs等,郊区站点为相对湿度、气温、NO<sub>x</sub>和VOCs等.

**关键词:** 挥发性有机物(VOCs); 臭氧(O<sub>3</sub>); 污染特征; 影响因素; 相关性分析

中图分类号: X515 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)01-0170-10 DOI: 10.13227/j.hjkk.202105009

## Characteristics of Ozone Pollution and Influencing Factors in Urban and Suburban Areas in Zibo

WANG Yu-yan<sup>1</sup>, YANG Wen<sup>2</sup>, WANG Xiu-yan<sup>1\*</sup>, WANG Shuai<sup>1</sup>, BAI Jin-feng<sup>1</sup>, CHENG Ying<sup>1</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300350, China; 2. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

**Abstract:** In this study, we obtained monitoring data of O<sub>3</sub> and its precursors (NO<sub>x</sub>, VOCs, and CO), as well as meteorological data (temperature, relative humidity, wind speed, and visibility), in 2019 to analyze the characteristics of O<sub>3</sub> pollution and the influencing factors in urban and suburban areas. The results showed that the O<sub>3</sub> episodes accounted for 25.8% of the whole observation period, mostly occurring from May to September. The concentration of NO<sub>x</sub> in urban areas was higher than that in suburban areas, whereas the concentrations of O<sub>3</sub> and VOCs were lower. The hourly rate of variation in each pollutant had obvious seasonal characteristics; for example, the time of O<sub>3</sub> rise and precursor decline in autumn and winter was approximately 1 h later than that in summer, and the peak period of O<sub>3</sub> generation and accumulation was shortened. The increase rate in O<sub>3</sub> in urban areas was higher than that in suburban areas. Correlation analysis and partial correlation analysis were used to study the relationship between O<sub>3</sub> and its influencing factors. The results showed that O<sub>3</sub> was negatively correlated with precursors and relative humidity and positively correlated with visibility, temperature, and wind speed, and these factors interacted with each other. According to the multivariate linear regression analysis, the main controlling factors in urban areas were relative humidity, NO<sub>x</sub>, visibility, and VOCs, whereas in suburban areas they were relative humidity, temperature, NO<sub>x</sub>, and VOCs.

**Key words:** volatile organic compounds (VOCs); ozone (O<sub>3</sub>); pollution characteristics; influencing factors; correlation analysis

近年来,随着我国大气污染防治工作的加强,PM<sub>2.5</sub>及其它常规污染物已取得明显改善,而臭氧(O<sub>3</sub>)浓度却呈上升趋势<sup>[1,2]</sup>,已成为不少地区的首要污染物<sup>[3,4]</sup>.近地面O<sub>3</sub>浓度高、持续时间长且危害性大,威胁人类健康甚至生命<sup>[5~7]</sup>,同时O<sub>3</sub>还是光化学烟雾的主要成分,可破坏空气质量,对生态系统造成不利影响,因此O<sub>3</sub>控制成为目前研究热点<sup>[8~10]</sup>.

O<sub>3</sub>是重要的二次污染物,具有强氧化性,主要由其前体物VOCs、NO<sub>x</sub>和CO通过一系列复杂的光化学反应产生<sup>[11]</sup>,O<sub>3</sub>与前体物之间呈高度的非线性关系,因此,控制前体物排放对降低O<sub>3</sub>浓度具有重要意义.其中,VOCs由于其不同物种的化学结构特征和光化学反应活性不同,对O<sub>3</sub>形成的贡献也存在差异,许多研究得到烯烃和芳香烃是O<sub>3</sub>形成潜势较高的物质<sup>[12,13]</sup>.

此外,气象因素对O<sub>3</sub>的生成也有重要影响,人们从O<sub>3</sub>与前体物VOCs和NO<sub>x</sub>的排放特征及相关性<sup>[14~16]</sup>、O<sub>3</sub>与其它大气污染物以及与气象要素的关系<sup>[17,18]</sup>等方面做了许多研究.程念亮等<sup>[19]</sup>的研究认为北京地区O<sub>3</sub>浓度与气压、湿度和能见度成反比,与风速和温度成正比;Wang等<sup>[20]</sup>的研究得到各影响因素之间存在相互作用,O<sub>3</sub>浓度受到风速和日照时长等气象因素的共同作用;王玫等<sup>[21]</sup>的研究指出对于京津冀地区,不同季节影响O<sub>3</sub>浓度的主导因素不同,春、夏、秋季节气温是影响O<sub>3</sub>浓度变化的主要因素,而冬季为相对湿度与风速;Liu等<sup>[22]</sup>对全国的O<sub>3</sub>浓度和影响因素进行了研究,得到气象和前体物及其相互作用对O<sub>3</sub>浓度的影响具

收稿日期: 2021-05-03; 修订日期: 2021-06-21

基金项目: 大气重污染成因与治理攻关项目(DQGG0107-20)

作者简介: 王雨燕(1996~),女,硕士研究生,主要研究方向为大气污染控制,E-mail:15364519618@163.com

\* 通信作者,E-mail:wangsy@nankai.edu.cn

有较大的区域性差异. 因此对不同地区  $O_3$  污染特征及与气象因子和前体物关系的研究是非常有必要的.

本文通过淄博市环境自动监测系统, 获取全市 18 个监测站点连续 1 a 的污染物和气象数据, 分析了淄博市 2019 年  $O_3$  污染情况; 分别选取城市和郊区两个代表性站点, 研究了  $O_3$  与前体物的浓度水平和变化特征, 结合 VOCs 反应活性分析、 $O_3$  及其影响因素的相关性分析和多元线性回归分析等方法, 分析了前体物和气象因素对  $O_3$  生成的影响. 本研究结果可用于识别不同地区大气  $O_3$  形成的关键因素, 以为减轻淄博  $O_3$  污染提供技术支持.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域

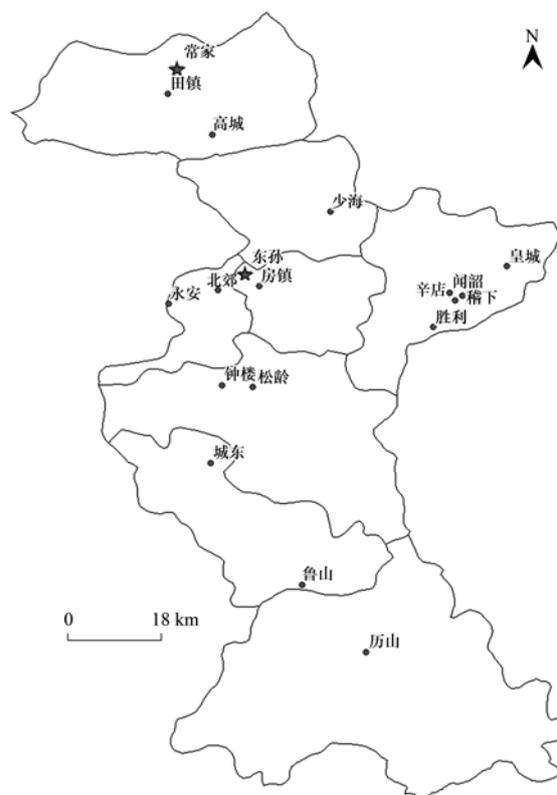
淄博市位于山东省中部 ( $35^{\circ}55'20'' \sim 37^{\circ}17'14''$  N,  $117^{\circ}32'15'' \sim 118^{\circ}31'00''$  E), 属温带季风气候, 年平均气温  $13.9^{\circ}\text{C}$ , 南部主要为山地, 北部为平原. 淄博是一个典型的重化工城市, 工业是主要的经济支柱, 石化、陶瓷、医药和建材等行业成为山东省乃至全国重要的生产基地. 经济的快速发展也引发了一系列的空气污染问题, 尤其是 2017 ~ 2019 年期间,  $O_3$  浓度同比分别上升 12.2%、4.1% 和 10.9%, 且超过环境空气质量二级标准,  $O_3$  污染严重.

淄博市 18 个 VOCs 在线监测站点及其分布如图 1 所示, 从北到南依次为高青县 3 个, 桓台县 1 个, 临淄区 5 个, 张店区 2 个, 周村区 2 个, 淄川区 2 个, 博山区 2 个以及沂源县 1 个, 同时获取各站点的常规气态污染物和气象数据. 通过分析各站点的地理位置、经济和产业发展, 选取城区和郊区的代表站点进行研究. 东孙站点 ( $37^{\circ}01'14''$  N,  $117^{\circ}56'57''$  E) 位于张店区东孙路, 是主城区所在地, 附近有较多居民区, 同时东部临近高速公路, 交通便利; 常家站点 ( $37^{\circ}12'58''$  N,  $117^{\circ}49'50''$  E) 位于高青县北部, 距县城 5 km, 自然资源丰富, 主要发展生态农业及生态旅游.

### 1.2 数据获取

本文选取气温、相对湿度、风速和能见度作为气象因子<sup>[23,24]</sup>,  $\text{NO}_x$ 、CO、VOCs 和  $O_3$  作为污染物因子<sup>[25,26]</sup>. 这些数据通过淄博市环境自动监测系统获取, 连续在线观测时间为 2019 年, 时间分辨率为 1 h.

VOCs 在线监测仪器分别为 Synspec GC-955 型 (615/815 系列) 气相色谱仪及 Thermost-5900 型 VOCs 在线分析仪, 分析方法均为 GC-FID. 为了保证数据可比性, 本文所选城、郊站点的分析仪器均为



红色五角星为所选代表性站点, 北侧常家为郊区站点, 中部东孙为城区站点

图 1 淄博市在线监测站点分布示意

Fig. 1. Distribution of monitoring stations in Zibo

Thermos-5900. 检测物种为美国 EPA 光化学评价监测站规定的 56 种 VOCs (PAMs), 其中烷烃类 29 种, 烯烃类 10 种, 炔烃类为乙炔, 芳香烃类 16 种. 为了保证测量数据的准确性和可靠性, 对各站点的自动检测仪器进行定期检查和校准. 每周进行单点校准, 每月进行 5 点校准定量 VOCs 浓度, 保证线性相关系数高于 0.99, 线性响应关系明显. 分析结束后, 根据各物质在标准谱图中的保留时间, 对得到的样品谱图的峰窗漂移情况进行人为检查和修正, 保证数据的准确性. 同时, 在数据处理前剔除异常值, 保证数据的有效性.

### 1.3 数据分析

#### 1.3.1 VOCs 的 $O_3$ 生成潜势计算

VOCs 物种繁多、组成复杂, 不同种类的 VOCs 光化学反应活性差异较大, 对  $O_3$  生成的贡献也不尽相同. 基于每个单独化合物的浓度和最大增量反应活性 (MIR) 是计算  $O_3$  形成潜势 (OFP) 的一种常用的方法, 通过估计在最佳条件下每个化合物的最大  $O_3$  产量, 从而可以确定  $O_3$  形成的最重要物种, 计算公式如下:

$$\text{OFP} = \text{MIR} \times \rho(\text{VOCs}) \quad (1)$$

式中, OFP 为某物种的  $O_3$  生成潜势,  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ;  $\rho(\text{VOCs})$  是该物种的实际检出浓度,  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ; MIR

为该物种的反应系数,各物种的 MIR 值主要由 Carter<sup>[27]</sup> 实验模拟计算得到。

### 1.3.2 O<sub>3</sub> 影响因素分析

不同气象因子及前体物与 O<sub>3</sub> 之间存在密切的相互作用,为避免各因素之间的相互影响而导致的分析结果偏差,本研究采用偏相关分析检验各变量(前体物、气象参数)与 O<sub>3</sub> 生成之间的关系。首先对所有变量进行两两相关分析,当两个变量都与第三个变量相关时,可以将第三个变量作为控制变量,从而分析前两个变量是否相关,该方法可以在一定程度上消除多变量间相互干扰的影响,进而分析各变量与 O<sub>3</sub> 生成的相关性。最后,结合多元线性回归方法,定量分析不同地区影响 O<sub>3</sub> 浓度的主导因子,使结果更加合理可靠。

## 2 结果与讨论

### 2.1 淄博市 O<sub>3</sub> 总体污染特征

统计分析表明,根据我国《环境空气质量标准》(GB 3095-2012),淄博市 2019 年 18 个监测站点 O<sub>3</sub> 日最大 8 h 滑动平均值(O<sub>3</sub>-8h) 超过国家二级标准(160 μg·m<sup>-3</sup>) 的平均超标天数为 94 d,占监测总天数的 25.8%,超标现象主要出现在 5~9 月。根据我国《环境空气质量评价技术(试行)》(HJ 663-2013) 规定,以第 90 百分位 ρ(O<sub>3</sub>-8h) 作为判定城市 O<sub>3</sub> 年度、季度和月度是否超标的指标,计算结果表明,全市 18 个站点全年 90 百分位的 ρ(O<sub>3</sub>-8h) 范围为 183~227 μg·m<sup>-3</sup>, 年均评价结果均为超标,整体污染情况严重。淄博市 2019 年 ρ(O<sub>3</sub>-8h) 与超标天数的月变化情况如图 2 所示。

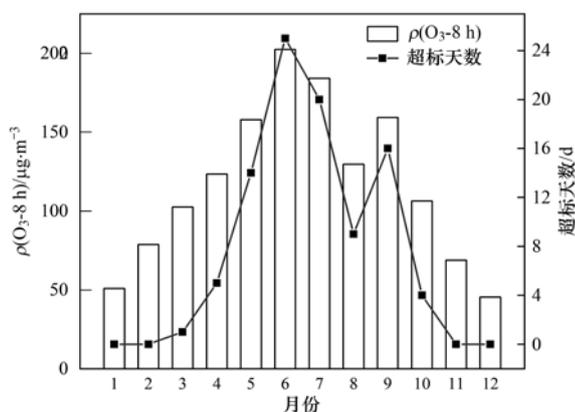


图 2 ρ(O<sub>3</sub>-8h) 与超标天数月变化

Fig. 2 Monthly average of ρ(O<sub>3</sub>-8h) and excessive days

图 2 显示,淄博市 2019 年 ρ(O<sub>3</sub>-8h) 月变化呈现“M”型分布特征,全年出现两个峰值,1~6 月 ρ(O<sub>3</sub>-8h) 持续上升,在 6 月达到全年最高值 202.42 μg·m<sup>-3</sup>,而后开始下降,9 月稍有反弹,ρ(O<sub>3</sub>-8h)

比 8 月高 29.60 μg·m<sup>-3</sup>,这主要是由于气象条件的影响。经统计,8 月阴雨天气较多,总降雨 12 d,其中连续降雨 5 d,8 月平均相对湿度较高为 77%,高于 7 月和 9 月,平均气温为 25.5℃,低于 7 月的气温,同时降水通过冲刷降低 O<sub>3</sub> 前体物浓度而影响 O<sub>3</sub> 生成,因此,8 月 ρ(O<sub>3</sub>-8h) 明显降低,该变化趋势同样在京津冀<sup>[20]</sup>、江苏<sup>[28]</sup> 和南京<sup>[29]</sup> 等地被发现。同时 ρ(O<sub>3</sub>-8h) 也呈现出较明显的季节特征,夏季最高为 172.08 μg·m<sup>-3</sup>,冬季最低为 58.34 μg·m<sup>-3</sup>。O<sub>3</sub>-8h 月均超标天数与浓度的变化特征相一致,6 月和 7 月的超标天数最多为 25 d 和 20 d,其次为 9 月超标 16 d,秋末和冬季时段(11、12、1 和 2 月)未出现超标现象。

### 2.2 城、郊站点前体物及 O<sub>3</sub> 浓度变化特征

#### 2.2.1 日变化特征

如图 3 所示,城区和郊区两站点前体物与 O<sub>3</sub> 浓度的日变化特征较为相似,但变化幅度与浓度水平均存在差异。两站点 NO<sub>x</sub>、CO 和 VOCs 浓度均表现为白天低,夜间高,而 O<sub>3</sub> 浓度变化特征相反。城区站点的 NO<sub>x</sub> 浓度和变化幅度明显高于郊区,VOCs 和 O<sub>3</sub> 浓度低于郊区,分析其原因一方面是由于城区 NO/NO<sub>x</sub> 的比值较高,高浓度的 NO 会大量消耗 O<sub>3</sub>,使得 O<sub>3</sub> 浓度下降,另一方面则是因为通常郊区的植被覆盖率较高,VOCs 排放量高于城区,通过光化学反应促进 O<sub>3</sub> 的生成<sup>[30]</sup>。两站点 VOCs 和 CO 的浓度变化均呈现出较明显的双峰趋势,分别在 07:00~09:00 和 19:00 之后出现峰值,城区站点 VOCs 早高峰出现时间较郊区晚 1~2 h,且夜间和凌晨的 NO<sub>x</sub> 浓度较高,这可能是由于 NO<sub>x</sub> 主要来源于汽车尾气,其排放水平依赖于道路交通,由于城区货车、柴油车交通管制,夜间 19:00 之后及凌晨才可进入城区,因此使得 NO<sub>x</sub> 排放较高。两站点的 O<sub>3</sub> 浓度变化均呈现出明显的单峰分布特征,峰值出现在 13:00~16:00,总体表现出 O<sub>3</sub> 与前体物浓度变化趋势对应相反的特征。

O<sub>3</sub> 作为一种典型的二次污染物,主要是由其前体污染物在大气中的光化学反应产生的,其单峰变化模式主要是由于太阳辐射和温度变化的影响。在 O<sub>3</sub> 生成积累阶段(07:00~14:00),由于太阳辐射增强,VOCs 与 NO<sub>x</sub> 发生光化学反应,VOCs 与 ·OH 反应生成 RO<sub>2</sub>,RO<sub>2</sub> 可将 NO 氧化成 NO<sub>2</sub>,NO<sub>2</sub> 通过光解生成 NO 和 O 原子,O 原子与 O<sub>2</sub> 反应生成 O<sub>3</sub>,使得该时段内 VOCs 和 NO<sub>x</sub> 浓度降低,O<sub>3</sub> 浓度升高,14:00~15:00 出现峰值;随着午后太阳辐射降低,光化学反应减弱,O<sub>3</sub> 浓度下降,前体物浓度上升;傍晚起,由于交通晚高峰的到来,VOCs 和 NO<sub>x</sub>

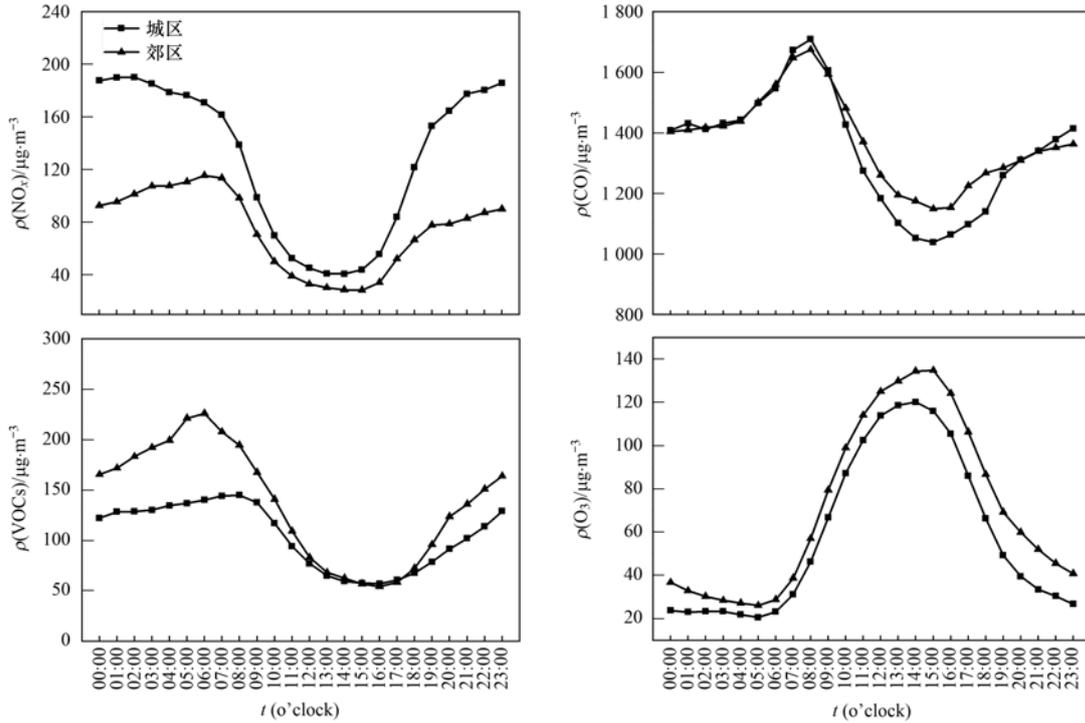


图3 城、郊站点前体物及 O<sub>3</sub> 日均浓度变化

Fig. 3 Daily average of precursors and O<sub>3</sub> in urban and suburban areas

排放增加,消耗减少,NO 经 O<sub>3</sub> 氧化生成 NO<sub>2</sub>,使得前体物浓度累积升高,而 O<sub>3</sub> 浓度下降.

2.2.2 时变化特征

为进一步研究不同季节 O<sub>3</sub> 及前体物浓度的小时变化特征,使用小时浓度变化率进行定量分析,即当前时刻的气体浓度相对前一时刻的相对变化比

率,计算公式如下:

$$d[X]/dt = [X]_t - [X]_{t-1} \quad (2)$$

式中,[X]<sub>t</sub> 和 [X]<sub>t-1</sub> 表示第 t 时刻和 t-1 时刻对应的 O<sub>3</sub> 及其前体物浓度.

城区与郊区站点各季节 NO<sub>x</sub>、CO 及 VOCs 浓度下降与 O<sub>3</sub> 浓度上升的小时变化速率见图 4 和图 5.

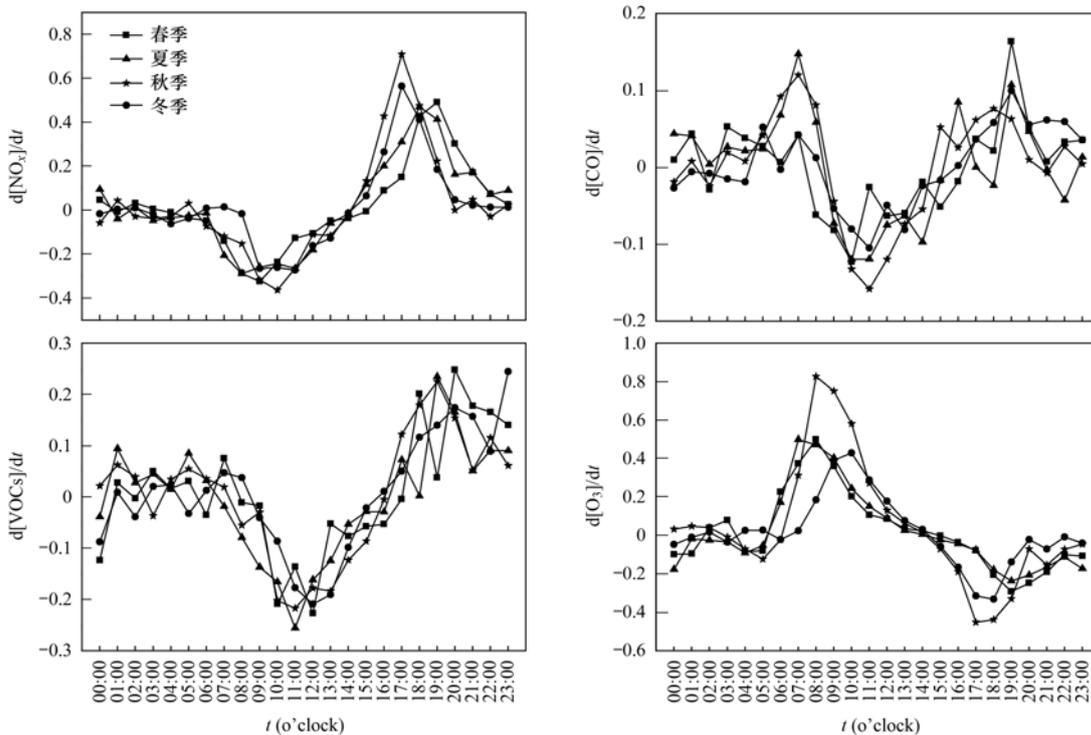


图4 城区前体物与 O<sub>3</sub> 浓度小时变化率

Fig. 4 Hourly change rate of precursors and O<sub>3</sub> in urban areas

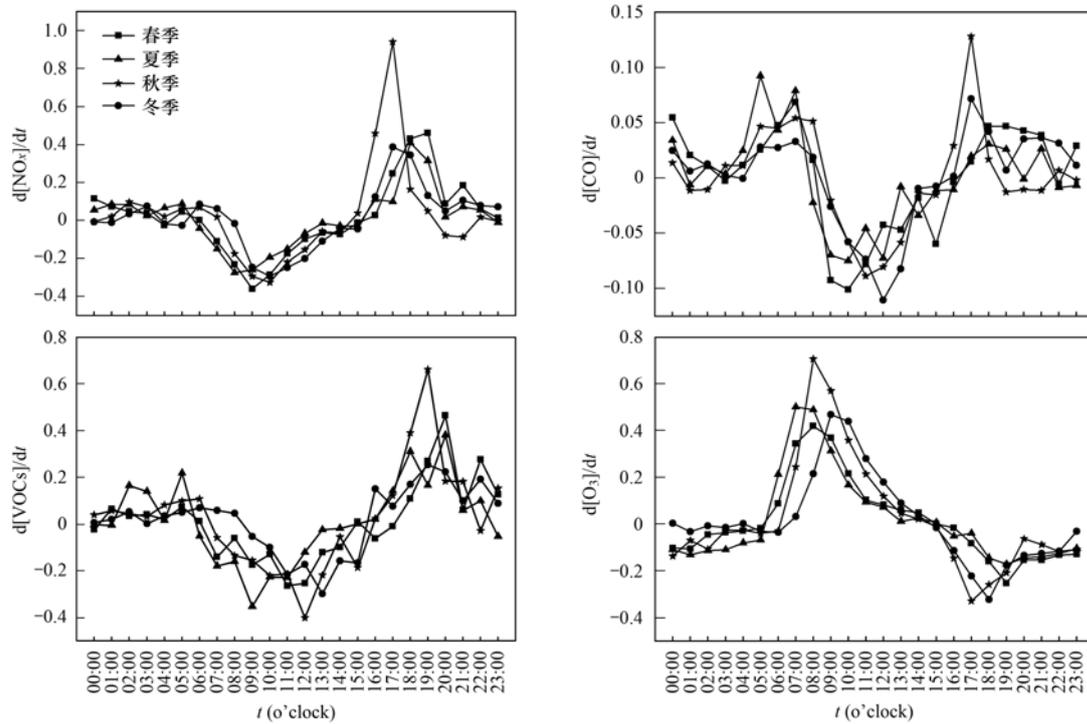
图5 郊区前体物与  $O_3$  浓度小时变化率Fig. 5 Hourly change rate of precursors and  $O_3$  in suburban areas

图5表明,前体物与 $O_3$ 浓度的小时变化率表现出明显的季节特征.从变化速率上看,不考虑输送的影响, $O_3$ 浓度的正变化率( $d[X]/dt > 0$ )表明 $O_3$ 的光化学生成在浓度变化中起主要作用,负变化率( $d[X]/dt < 0$ )表明 $O_3$ 的反应消耗损失占主导.城区与郊区 $O_3$ 浓度上升的平均小时变化速率均为秋季最高,春季最低,城区全年 $O_3$ 上升速率整体高于郊区约5%,上升时间低于郊区约1 h,郊区 $O_3$ 浓度积累更高.对于前体物来说,负小时变化率表明因光化学反应而消耗,浓度降低,正变化率表明浓度升高.对于城区站点, $NO_x$ 浓度的平均小时变化速率始终高于VOCs和CO,即光化学反应速率最快,在 $O_3$ 上升最快的秋季, $NO_x$ 与VOCs的消耗速率也最快,平均小时变化率分别为19.0%和13.4%.对于郊区站点,同样为秋季 $NO_x$ 与VOCs下降速率最快分别为18.4%和18.2%.CO浓度的平均小时变化率较低,且负值出现时间较 $NO_x$ 和VOCs略晚,主要原因可能是由于CO在大气化学反应中惰性相对较大,对 $O_3$ 浓度变化影响不及其他前体物所导致.

从变化时间上看,夏季从06:00~15:00期间, $O_3$ 小时变化率为正值, $O_3$ 持续产生并大量积累,城区和郊区 $\rho(O_3)$ 分别升高了 $140.16 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $147.13 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,而秋季累积时间缩短为07:00~14:00,两站点 $\rho(O_3)$ 累积量分别为 $100.30 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $105.67 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ .经统计分析,秋季影响 $O_3$ 光化

学反应的气象因素变化较夏季快,两站点秋季气温和相对湿度等因素的变化率均较夏季高2%~3%, $O_3$ 产生时间较夏季短,因此总体表现出秋季 $O_3$ 小时变化率较高但整体浓度水平不及夏季的现象.同时,VOCs组成及 $O_3$ 生成潜势变化也是影响 $O_3$ 生成的重要因素.下面就 $O_3$ 生成影响因素展开分析.

### 2.3 VOCs组成及 $O_3$ 生成潜势

图6表示了城区和郊区站点各季节不同种类VOCs的质量分数及依据公式(1)计算得到的OFP贡献情况.

由图6(a)可知,城区站点各季节的VOCs组成均以烷烃和芳香烃类为主;烷烃从春季到冬季逐渐升高,浓度为 $43.95 \sim 72.70 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,质量分数为50%以上;其次是芳香烃,夏季最低( $25.18 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ),质量分数为30.8%,秋季最高( $50.05 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ),质量分数为39.4%;烯烃浓度较低,质量分数为10%左右.郊区站点的VOCs排放组成表现为夏季以烷烃和烯烃为主,其他季节以烷烃和芳香烃为主;烷烃明显高于其他组分,质量分数达60%~70%以上,夏季浓度最高( $110.51 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ),春季最低( $75.09 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ );烯烃浓度夏季最高 $16.40 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,质量分数为11.1%;芳香烃为冬季最高( $36.07 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ),质量分数为26.2%,夏季最低( $14.24 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ),质量分数为9.6%.图6(b)为两站点四季各类VOCs的OFP贡献比,其中,城区站点

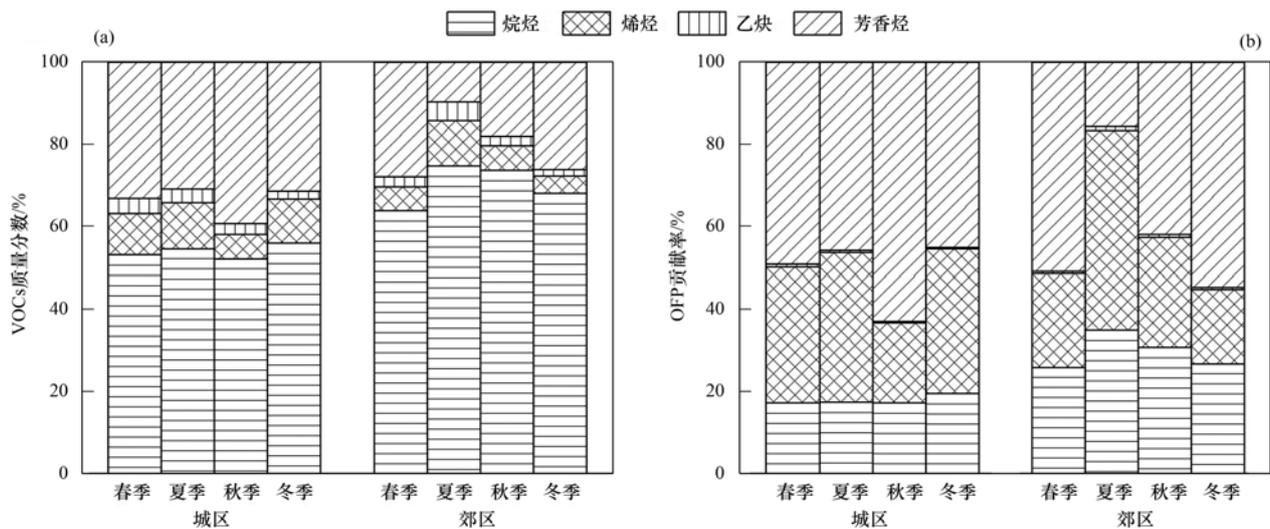


图6 城、郊站点不同季节各类 VOCs 质量分数与 OFP 贡献比

Fig. 6 Mass fractions of various VOCs and their OFP contributions in different seasons in urban and suburban areas

四季 OFP 贡献均以芳香烃为主,  $O_3$  生成贡献比秋季最高为 63.0%, 冬季最低为 45.0%, 其次为烯烃, 贡献比夏季最高(36.2%), 秋季最低(19.4%); 郊区站点春、秋、冬三季的 OFP 以芳香烃贡献比最高, 分别为 50.9%、42.0% 和 54.9%, 其次为烷烃, 夏季则表现为烯烃的  $O_3$  生成贡献比最高为 48.4%, 烷烃次之, 为 34.8%。

两站点烷烃的排放浓度均远高于烯烃和芳香烃, 但其  $O_3$  生成潜势却低于二者, 或略高于烯烃, 这主要是由于烯烃和芳香烃的高反应性, 在光化学反应中更易被消耗生成较高浓度的  $O_3$ , 故而对  $O_3$  生成的贡献更大. 表 1 分别列出了城、郊两站点 VOCs 质量分数及 OFP 贡献比较高的前 10 物种。

表 1 城、郊站点 VOCs 质量分数和 OFP 贡献比前 10 物种

Table 1 Top ten species of VOCs mass fraction and OFP contribution in urban and suburban areas

城区				郊区			
物种	VOCs 质量分数/%	物种	OFP 贡献比/%	物种	VOCs 质量分数/%	物种	OFP 贡献比/%
甲苯	11.7	间/对-二甲苯	13.4	丙烷	13.3	间/对-二甲苯	12.2
丙烷	8.4	甲苯	11.8	乙烷	9.8	甲苯	8.9
正丁烷	6.1	乙烯	10.5	正丁烷	7.4	乙烯	7.2
乙烷	6.0	异戊二烯	6.8	甲苯	6.9	异戊二烯	6.0
苯	5.1	丙烯	5.1	正庚烷	5.2	丙烯	5.2
间/对-二甲苯	4.9	邻-二甲苯	4.8	异丁烷	4.4	正丁烷	3.6
异戊烷	3.9	1,2,4-三甲苯	3.8	异戊烷	4.3	邻-二甲苯	3.2
异丁烷	3.5	间-乙基甲苯	2.5	间/对-二甲苯	3.4	丙烷	3.1
乙烯	3.2	1,3,5-三甲苯	2.4	正戊烷	3.3	1,2,4-三甲苯	3.0
正戊烷	2.9	正丁烷	2.3	2,2-二甲基丁烷	3.1	异戊烷	2.9
合计	55.7	合计	63.4	合计	61.2	合计	55.2

表 1 显示, 城区站点 VOCs 质量分数排放前 10 物种中包含 6 种烷烃, 3 种芳香烃及乙烯, 其中甲苯质量分数最高 11.7%, 其次为丙烷, 质量分数为 8.4%; OFP 贡献比前 10 物种中包含 6 种芳香烃, 3 种烯烃及正丁烷, 其中间/对-二甲苯、甲苯和乙烯贡献比均大于 10%。对于郊区站点, VOCs 质量分数前 10 物种中包含 8 种烷烃, 2 种芳香烃, 其中丙烷质量分数最高为 13.3%, 芳香烃中以甲苯排放浓度

最高, 质量分数为 6.9%; OFP 贡献前 10 物种中包含 4 种芳香烃, 3 种烯烃及 3 种烷烃, 其中间/对-二甲苯贡献 12.2%, 其次为甲苯(8.9%) 和乙烯(7.2%) 等。可以看出, 城区与郊区站点的 VOCs 主要活性物种具有一定相似性, 间/对-二甲苯和甲苯等苯系物对  $O_3$  生成贡献较大, 这些物质多作为溶剂使用行业的原辅材料<sup>[31]</sup>, 因此应加强该类行业的管控。同时, 异戊二烯的排放浓度虽然较低, 但 OFP 的

贡献比超过 6%, 因此, 也需要关注异戊二烯的排放.

## 2.4 气象因素对 $O_3$ 生成的影响

气象条件在  $O_3$  形成、沉降、传输和稀释中扮

演着重要角色, 对于不同的情况和地区, 影响  $O_3$  浓度的主导因素不同. 本研究主要分析气温、相对湿度、风速和能见度要素对  $O_3$  及前体物浓度的影响, 见图 7.

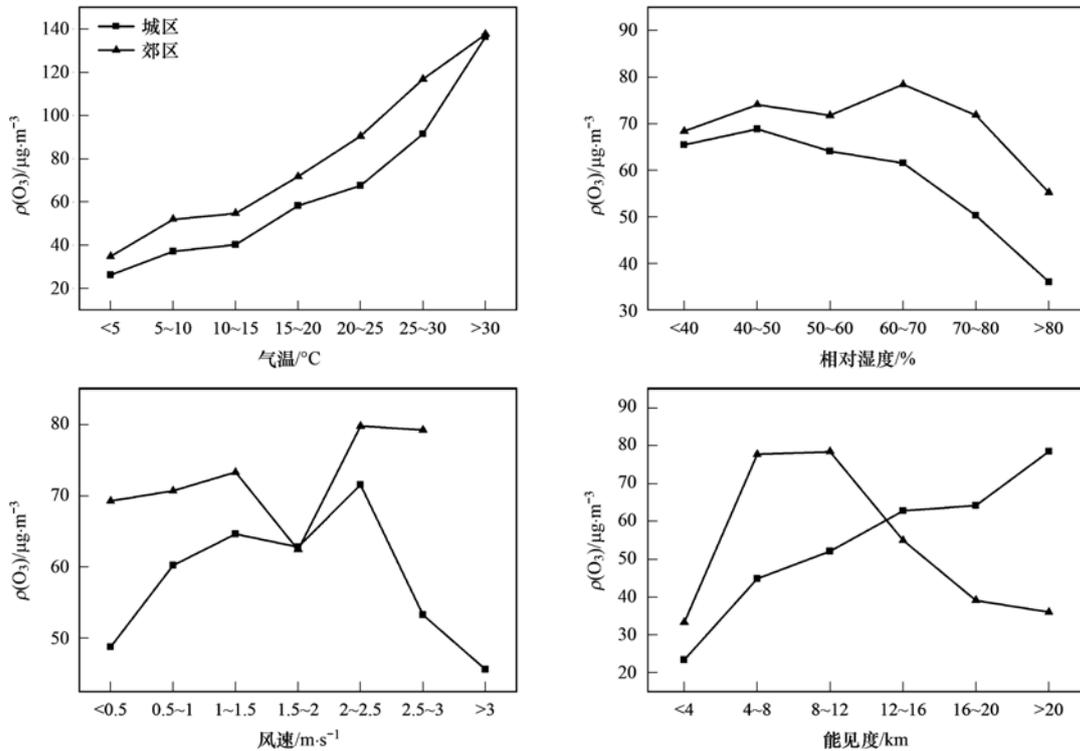


图 7 城、郊站点  $O_3$  浓度与气象因素的变化

Fig. 7 Changes in  $O_3$  concentration and meteorological conditions in urban and suburban areas

从图 7 可以看出, 城、郊站点  $O_3$  浓度与气温均表现为正相关, 即随着温度升高,  $O_3$  浓度明显升高. 城区站点  $O_3$  浓度随气温的变化率较郊区略微平缓, 当气温大于  $15^\circ\text{C}$  时, 两站点的  $O_3$  浓度上升加快, 气温超过  $30^\circ\text{C}$  时, 城区与郊区站点的  $\rho(O_3)$  超过  $100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 超标率分别高达 88.9% 和 90%, 高温可以加快光化学反应速率从而促进  $O_3$  的生成. 同时, 高温通常与静稳、晴朗或高紫外线辐射的大气条件有关, 该条件利于前体物反应生成  $O_3$ .

城区站点  $O_3$  浓度与相对湿度整体呈负相关趋势, 当相对湿度为 40% ~ 50% 时,  $\rho(O_3)$  最高为  $68.90 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 而后随着相对湿度增加,  $O_3$  浓度逐渐下降, 且在大于 70% 后, 下降速率加快. 对于郊区站点而言,  $O_3$  浓度随相对湿度的增加整体表现为先升高后降低的趋势, 当相对湿度范围在 60% ~ 70% 时,  $\rho(O_3)$  值最高为  $78.47 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 而后随着相对湿度增加  $O_3$  浓度下降.

对于能见度而言, 城区站点  $O_3$  浓度随着能见度的增加而增加, 能见度大于 20 km 时对应  $\rho(O_3)$  最高为  $78.52 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . 郊区站点在 0 ~ 12

km 范围内  $O_3$  浓度随着能见度的增加而明显上升, 8 ~ 12 km 时  $\rho(O_3)$  最高  $78.45 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 而后随着能见度的增加  $O_3$  浓度逐渐降低, 这可能是受到与  $O_3$  产生相关的其他因素的综合影响. 总体结果表明, 能见度越高越有利于城区站点  $O_3$  的生成, 而对于郊区站点,  $O_3$  产生的最适宜能见度水平为 8 ~ 12 km.

风速对  $O_3$  污染的影响主要表现为迁移和稀释作用, 包括对流层顶端高浓度  $O_3$  的垂直输送和水平方向的传输扩散. 图 7 表明, 城区与郊区两站点  $O_3$  浓度随风速的变化趋势相同, 当风速为  $1.5 \sim 2.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时  $O_3$  浓度出现一个较为明显的下降, 低于该风速区间时  $O_3$  浓度随着风速增加而增加, 在风速为  $2 \sim 2.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  范围时  $O_3$  浓度最高, 而后随着风速增加  $O_3$  浓度降低. 这种现象主要是由  $O_3$  垂直和水平扩散作用的相对强弱导致的, 当风速较小时,  $O_3$  垂直向下的输送作用强于水平方向的扩散作用, 有利于  $O_3$  积累, 此时随着风速增加输送作用增加, 使得  $O_3$  浓度升高; 当风速显著增强时, 水平方向上的输送逐渐加强并成为主导, 该作用可对  $O_3$  进行稀释,

使得浓度下降。

## 2.5 O<sub>3</sub> 生成影响因素的相关性分析

由于 O<sub>3</sub> 污染的季节性特征明显,因此,选取污染较为严重的夏季(6~8月),通过讨论 O<sub>3</sub> 与气象条件及其他污染物的关系,更好地了解 O<sub>3</sub> 生成的影响因素。考虑到各气象因素与前体物之间相互作用密切,本文结合偏相关分析,排除多个变量之间可能产生相互干扰的影响,在对部分变量进行控制的条件下,衡量其中某个变量与 O<sub>3</sub> 生成的相关程度,使结果更加合理可靠。相关性和偏相关性分析结果见表 2 和表 3。

表 2 表明,城区和郊区两站点的 O<sub>3</sub> 与其前体物

及气象因素均呈显著相关( $P < 0.05$ ),O<sub>3</sub> 与前体物呈显著负相关性,与能见度、气温和风速呈正相关性,与相对湿度呈负相关,两站点前体物与 O<sub>3</sub> 的相关程度表现为: NO<sub>x</sub> > VOCs > CO。城区站点气象因素与 O<sub>3</sub> 浓度的相关程度由高到低依次为:相对湿度(-0.761) > 气温(0.705) > 能见度(0.335) > 风速(0.325),郊区为:相对湿度(-0.588) > 气温(0.518) > 风速(0.409) > 能见度(0.342),可见相对湿度和气温为影响 O<sub>3</sub> 生成的关键因素。气象因素对前体物的影响情况与 O<sub>3</sub> 相反,能见度、气温和风速与前体物呈负相关,相对湿度呈正相关,其中气温对前体物的影响程度最高。

表 2 城、郊站点 O<sub>3</sub> 生成影响因素相关性分析<sup>1)</sup>

Table 2 Correlation analysis between O<sub>3</sub> and influencing factors in urban and suburban areas

项目		NO <sub>x</sub>	CO	VOCs	能见度	风速	气温	湿度
城区	相关系数	-0.618**	-0.181**	-0.322**	0.335**	0.325**	0.705**	-0.761**
	显著性	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
郊区	相关系数	-0.562**	-0.061*	-0.544**	0.342**	0.409**	0.518**	-0.588**
	显著性	0.000	0.023	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

1) \* 表示相关性在 0.05 上显著(双尾), \*\* 表示相关性在 0.01 上显著(双尾)

表 3 城、郊站点 O<sub>3</sub> 生成影响因素的偏相关性分析

Table 3 Partial correlation analysis between O<sub>3</sub> and influencing factors in urban and suburban areas

局部相关因素		城区	郊区
O <sub>3</sub> 与 NO <sub>x</sub>	相关系数	-0.593	相关系数 -0.386
	显著性	0.000	显著性 0.000
O <sub>3</sub> 与 CO	相关系数	-0.038	相关系数 0.251
	显著性	0.275	显著性 0.000
O <sub>3</sub> 与 VOCs	相关系数	0.076	相关系数 -0.097
	显著性	0.028	显著性 0.000
O <sub>3</sub> 与能见度	相关系数	-0.398	相关系数 -0.090
	显著性	0.000	显著性 0.001
O <sub>3</sub> 与气温	相关系数	0.207	相关系数 0.489
	显著性	0.000	显著性 0.000
O <sub>3</sub> 与风速	相关系数	-0.092	相关系数 -0.011
	显著性	0.007	显著性 0.682
O <sub>3</sub> 与相对湿度	相关系数	-0.699	相关系数 -0.597
	显著性	0.000	显著性 0.000

偏相关分析结果表明,两站点 O<sub>3</sub> 与 NO<sub>x</sub> 表现为负相关,但相关性系数有所降低,城区的 O<sub>3</sub> 与 CO 相关性消失,与 VOCs 表现出较弱的正相关;郊区站点 O<sub>3</sub> 与 VOCs 的负相关性降低,与 CO 呈正相关。气象条件中,城区站点各气象因素均对 O<sub>3</sub> 生成的影响都具有独立性,气温和相对湿度对 O<sub>3</sub> 生成的影响不变,但相关系数降低,而能见度和风

速对 O<sub>3</sub> 浓度则表现为负相关,郊区站点能见度对 O<sub>3</sub> 浓度的影响同样表现出负相关性,与风速的相关性消失。可以看出,控制变量后,各因素对 O<sub>3</sub> 生成的影响发生一定变化,比如相关程度减弱,相关性改变,这表明各因素间存在较为明显的相互影响现象。

## 2.6 O<sub>3</sub> 生成影响因素的回归分析

通过以上研究发现,前体物和气象因素都会不同程度地影响 O<sub>3</sub> 浓度。为进一步探索不同站点 O<sub>3</sub> 浓度与各影响因子之间的定量关系,分析影响 O<sub>3</sub> 浓度的主导因子,采用多元线性回归法,并得到线性拟合方程。

两站点 O<sub>3</sub> 回归方程拟合结果见表 4,相关系数 R<sup>2</sup> 表示线性回归方程对于各站点的适用程度, R<sup>2</sup> 大于 0.4 表示模型是较合理的,两站点的拟合效果均较好。各因素的系数可以反映其对 O<sub>3</sub> 浓度的相对重要性, P < 0.05 时表明该因素可以有效预测 O<sub>3</sub> 的变异。另外,通过标准化系数,可在一定程度上反映各个因素对 O<sub>3</sub> 影响程度的大小,标化系数越大,该因素的作用越强。表 4 中,城区 O<sub>3</sub> 生成的主控因子有相对湿度、NO<sub>x</sub>、能见度和 VOCs 等,郊区为相对湿度、气温、NO<sub>x</sub> 和 VOCs 等。由回归方程和 2.5 节的偏相关分析可以看出,两站点 VOCs 对 O<sub>3</sub> 生成的作用情况相反,说明两地区处于不同的 O<sub>3</sub> 生成控制区。因此,在控制 O<sub>3</sub> 时,可以根据不同区域影响较

表 4 O<sub>3</sub> 与各要素拟合关系Table 4 Fitting relationship between O<sub>3</sub> and each factors in urban and suburban areas

站点	因素	系数	标准化系数	R <sup>2</sup>	回归方程
城区	NO <sub>x</sub>	-0.821	-0.439	0.801	[O <sub>3</sub> ] = -0.821[NO <sub>x</sub> ] + 0.041[VOCs] - 1.513 × 能见度 - 0.578 × 风速 + 2.316 × 气温 - 2.951 × 相对湿度 + 304.221
	VOCs	0.041	0.036		
	能见度	-1.513	-0.260		
	风速	-0.578	-0.047		
	气温	2.316	0.141		
	相对湿度	-2.951	-0.717		
郊区	NO <sub>x</sub>	-1.100	-0.337	0.679	[O <sub>3</sub> ] = -1.100[NO <sub>x</sub> ] - 0.049[VOCs] + 28.988[CO] - 0.949 × 能见度 + 4.676 × 气温 - 1.597 × 相对湿度 + 117.174
	VOCs	-0.049	-0.077		
	CO	28.988	0.156		
	能见度	-0.949	-0.063		
	气温	4.676	0.404		
	相对湿度	-1.597	-0.458		

大的因素,采取相应的控制对策.

### 3 结论

(1)淄博市2019年18个监测站点O<sub>3</sub>-8h平均超标天数为94 d,超标率25.8%,多出现在5~9月.从月变化看,全年O<sub>3</sub>-8h浓度的月变化呈现“M”型分布特征,分别在6月和9月出现峰值,8月由于降水较多,导致O<sub>3</sub>浓度明显降低.

(2)O<sub>3</sub>与前体物浓度日变化特征较为明显,NO<sub>x</sub>、CO和VOCs浓度均表现为白天低,夜间高,而O<sub>3</sub>浓度变化特征相反.城区站点的NO<sub>x</sub>浓度和变化幅度明显高于郊区,VOCs和O<sub>3</sub>浓度低于郊区.O<sub>3</sub>及前体物浓度的小时变化情况存在明显的季节特征,两站点O<sub>3</sub>浓度的平均上升速率和前体物的平均下降速率均为秋季最高,城区全年整体O<sub>3</sub>上升速率高于郊区约5个百分点.秋冬季节O<sub>3</sub>浓度上升和前体物浓度下降时间均较春夏季节晚1 h左右,且O<sub>3</sub>生成累积的高峰时段缩短,是秋季O<sub>3</sub>小时变化率较高但整体浓度水平不及夏季的原因.

(3)通过VOCs反应活性分析,得到间/对-二甲苯和甲苯等苯系物具有较高的O<sub>3</sub>生成潜势,应重点监测,同时,对涉及这类物质的溶剂使用行业应加强管控,以减少污染源.其次为乙烯、异戊二烯及丙烯等烯烃,也是活性较高的物种,石化行业是其主要为源.

(4)城区和郊区两站点O<sub>3</sub>与前体物呈显著负相关性,与能见度、气温和风速呈正相关性,与相对湿度呈负相关.气象因素对前体物的影响情况与O<sub>3</sub>相反,其中气温对前体物的影响程度最高.通过偏相关分析,得到各因素与O<sub>3</sub>的相关程度发生改变,表明不同因素间存在较为明显的相互影响.通过回归分析得到两站点的O<sub>3</sub>预测方程,城区站点以相对湿度、NO<sub>x</sub>、能见度和VOCs为重要因素;郊区站点影

响O<sub>3</sub>浓度的主控因子有相对湿度、气温、NO<sub>x</sub>和VOCs.城区和郊区的VOCs对O<sub>3</sub>生成影响的差异,说明两地区处于不同的O<sub>3</sub>生成控制区,综合而言,应减少VOCs、NO<sub>x</sub>的排放来控制O<sub>3</sub>浓度.

#### 参考文献:

- [1] Wang M, Chen W T, Zhang L, *et al.* Ozone pollution characteristics and sensitivity analysis using an observation-based model in Nanjing, Yangtze River Delta Region of China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2020, **93**: 13-22.
- [2] 王旭东,尹沙沙,杨健,等.郑州市臭氧污染变化特征、气象影响及输送源分析[J]. *环境科学*, 2021, **42**(2): 604-615.
- [3] Wang X D, Yin S S, Yang J, *et al.* Characteristics, meteorological influences, and transport source of ozone pollution in Zhengzhou city[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(2): 604-615.
- [4] 李凯,刘敏,梅如波.泰安市大气臭氧污染特征及敏感性分析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(8): 3539-3546.
- [5] Li K, Liu M, Mei R B. Pollution characteristics and sensitivity analysis of atmospheric ozone in Taian city[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(8): 3539-3546.
- [6] 刘营营,王丽涛,齐孟姚,等.邯郸大气VOCs污染特征及其在O<sub>3</sub>生成中的作用[J]. *环境化学*, 2020, **39**(11): 3101-3110.
- [7] Liu Y Y, Wang L T, Qi M Y, *et al.* Characteristics of atmospheric VOCs and their role in O<sub>3</sub> generation in Handan[J]. *Environmental Chemistry*, 2020, **39**(11): 3101-3110.
- [8] Jung S W, Lee K, Cho Y S, *et al.* Association by spatial interpolation between ozone levels and lung function of residents at an industrial complex in South Korea[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2016, **13**(7), doi: 10.3390/ijerph13070728.
- [9] Lefohn A S, Malley C S, Simon H, *et al.* Responses of human health and vegetation exposure metrics to changes in ozone concentration distributions in the European Union, United States, and China[J]. *Atmospheric Environment*, 2017, **152**: 123-145.
- [10] Liu H, Liu S, Xue B R, *et al.* Ground-level ozone pollution and its health impacts in China[J]. *Atmospheric Environment*, 2018, **173**: 223-230.
- [11] Wang T, Xue L K, Brimblecombe P, *et al.* Ozone pollution in China: a review of concentrations, meteorological influences,

- chemical precursors, and effects [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **575**: 1582-1596.
- [9] Yu X, Unger N, Harper K, *et al.* Ozone and haze pollution weakens net primary productivity in China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, **17**(9): 6073-6089.
- [10] Chen X, Situ H P, Zhang Q, *et al.* The synergetic control of NO<sub>2</sub> and O<sub>3</sub> concentrations in a manufacturing city of southern China [J]. *Atmospheric Environment*, 2019, **201**: 402-416.
- [11] 胡子梅, 周国柱, 葛朝军, 等. 蚌埠市臭氧污染评价及一次持续性污染过程分析 [J]. *环境科学学报*, 2019, **39**(5): 1402-1411.
- Hu Z M, Zhou G Z, Ge Z J, *et al.* Ozone pollution assessment and a continuous pollution process analysis in Bengbu [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, **39**(5): 1402-1411.
- [12] Yang Y C, Liu X G, Zheng J, *et al.* Characteristics of one-year observation of VOCs, NO<sub>x</sub>, and O<sub>3</sub> at an urban site in Wuhan, China [J]. *Journal of environmental sciences*, 2019, **79**: 297-310.
- [13] Tan Z F, Lu K D, Jiang M Q, *et al.* Exploring ozone pollution in Chengdu, southwestern China: a case study from radical chemistry to O<sub>3</sub>-VOC-NO<sub>x</sub> sensitivity [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **636**: 775-786.
- [14] Pu X, Wang T J, Huang X, *et al.* Enhanced surface ozone during the heat wave of 2013 in Yangtze River Delta region, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **603-604**: 807-816.
- [15] Tong L, Zhang H L, Yu J, *et al.* Characteristics of surface ozone and nitrogen oxides at urban, suburban and rural sites in Ningbo, China [J]. *Atmospheric Research*, 2017, **187**: 57-68.
- [16] 齐艳杰, 于世杰, 杨健, 等. 河南省臭氧污染特征与气象因子影响分析 [J]. *环境科学*, 2020, **41**(2): 587-599.
- Qi Y J, Yu S J, Yang J, *et al.* Analysis of characteristics and meteorological influence factors of ozone pollution in Henan province [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(2): 587-599.
- [17] Li K, Jacob D J, Liao H, *et al.* Anthropogenic drivers of 2013-2017 trends in summer surface ozone in China [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, **116**(2): 422-427.
- [18] Jia M W, Zhao T L, Cheng X H, *et al.* Inverse relations of PM<sub>2.5</sub> and O<sub>3</sub> in air compound pollution between cold and hot seasons over an urban area of East China [J]. *Atmosphere*, 2017, **8**(3), doi: 10.3390/atmos8030059.
- [19] 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.
- [20] Wang Z B, Li J X, Liang L W. Spatio-temporal evolution of ozone pollution and its influencing factors in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **256**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113419.
- [21] 王玫, 郑有飞, 柳艳菊, 等. 京津冀臭氧变化特征及与气象要素的关系 [J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(7): 2689-2698.
- Wang M, Zheng Y F, Liu Y J, *et al.* Characteristics of ozone and its relationship with meteorological factors in Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(7): 2689-2698.
- [22] Liu P F, Song H Q, Wang T H, *et al.* Effects of meteorological conditions and anthropogenic precursors on ground-level ozone concentrations in Chinese cities [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **262**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114366.
- [23] 吴进, 李琛, 马志强, 等. 基于天气分型的上甸子大气本底站臭氧污染气象条件 [J]. *环境科学*, 2020, **41**(11): 4864-4873.
- Wu J, Li C, Ma Z Q, *et al.* Influence of meteorological conditions on ozone pollution at Shangdianzi station based on weather classification [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(11): 4864-4873.
- [24] 杨娜, 王春迎, 刘孟雄, 等. 洛阳市臭氧污染特征及其与气象因子的关系 [J]. *气象与环境科学*, 2019, **42**(4): 90-95.
- Yang N, Wang C Y, Liu M X, *et al.* Characteristics of ozone pollution in Luoyang and its correlation with meteorological elements [J]. *Meteorological and Environmental Sciences*, 2019, **42**(4): 90-95.
- [25] 严茹莎, 王红丽, 黄成, 等. 上海市夏季臭氧污染特征及削峰方案 [J]. *环境科学*, 2021, **42**(8): 3577-3584.
- Yan R S, Wang H L, Huang C, *et al.* Characteristics and control strategies on summertime peak ozone concentration in Shanghai [J]. *Environmental Sciences*, 2021, **42**(8): 3577-3584.
- [26] 丁博昊, 赖丽芳. 珠海市不同前体物削减比例对臭氧的影响 [J]. *环境科学导刊*, 2019, **38**(S1): 51-53.
- Ding B H, Lai L F. Impact of different precursors reduction ratio on ozone in Zhuhai [J]. *Environmental Science Survey*, 2019, **38**(S1): 51-53.
- [27] Carter W P L. Development of the SAPRC-07 chemical mechanism and updated ozone reactivity scales [R]. California: University of California, 2010.
- [28] 严文莲, 刘端阳, 康志明, 等. 江苏臭氧污染特征及其与气象因子的关系 [J]. *气象科学*, 2019, **39**(4): 477-487.
- Yan W L, Liu D Y, Kang Z M, *et al.* The characteristics of ozone pollution and its relationship with meteorological factors in Jiangsu [J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2019, **39**(4): 477-487.
- [29] 陆晓波, 丁峰, 朱志锋, 等. 南京市臭氧污染现状及变化特征的研究 [J]. *环境监测管理与技术*, 2019, **31**(2): 11-15.
- [30] 王占山, 李云婷, 陈添, 等. 北京市臭氧的时空分布特征 [J]. *环境科学*, 2014, **35**(12): 4446-4453.
- Wang Z S, Li Y T, Chen T, *et al.* Temporal and spatial distribution characteristics of ozone in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(12): 4446-4453.
- [31] 王银海, 董莉, 刘景洋, 等. 典型溶剂使用行业 O<sub>3</sub> 和 SOA 生成潜势分析 [J]. *现代化工*, 2020, **40**(11): 14-19.
- Wang Y H, Dong L, Liu J Y, *et al.* Analysis and research on generation potential of ozone and SOA in typical solvent use industries [J]. *Modern Chemical Industry*, 2020, **40**(11): 14-19.

## 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-pe, 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 )