

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

基于高分影像的城市水体遥感综合分级方法

杨子谦, 刘怀庆, 吕恒, 李云梅, 朱利, 周亚明, 李玲玲, 毕顺



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年5月

第42卷 第5期

Vol.42 No.5

目次

北京冬季 PM_{2.5} 中有机气溶胶的化学特征和来源解析 徐楠, 王甜甜, 李晓, 唐荣志, 郭松, 胡敏 (2101)

北京地区 2019 年 2~3 月供暖结束后两次污染过程特征分析 尹晓梅, 蒲维维, 王继康, 刘湘雪, 乔林 (2110)

北京 2019 年冬季一次典型霾污染特征与成因分析 廉涵阳, 杨欣, 张普, 陈义珍, 杨小阳, 赵好希, 何友江, 赵丹婷 (2121)

青岛沿海地区夏季和冬季新粒子生成特征对比 孙悦, 朱玉姣, 孟赫, 刘兵, 刘玉虹, 董灿, 姚小红, 王文兴, 薛丽坤 (2133)

太原市城乡居民采暖季室内灰尘中重金属的污染特征及其生态风险评价 黄浩, 徐子琪, 严俊霞, 赵秀阁, 王丹璐 (2143)

西安市新装修公共场所空气污染物浓度分析及健康风险评价 范洁, 樊灏, 沈振兴, 党文鹏, 郑伟, 王志华, 付毅 (2153)

超低排放典型燃烧源颗粒物及水溶性离子排放水平与特征 胡月琪, 王铮, 郭建辉, 冯亚君, 丁萌萌, 颜旭 (2159)

合肥市夏季大气颗粒物中微生物群落的高通量测序分析 姜少毅, 孙博文, 代海涛, 王润芳, 马大卫, 朱仁斌 (2169)

郑州市细颗粒物时空差异及管控措施影响 董喆, 袁明浩, 苏方成, 张剑飞, 孙佳侯, 张瑞芹 (2179)

2016~2019 年江西省臭氧污染特征与气象因子影响分析 钱悦, 许彬, 夏玲君, 陈燕玲, 邓力琛, 王欢, 张根 (2190)

天山北坡城市群气溶胶光学特性时空分布特征 张喆, 丁建丽, 王瑾杰, 陈香月, 刘兴涛, 阿提干·吾斯曼 (2202)

基于高分影像的城市水体遥感综合分级方法 杨子谦, 刘怀庆, 吕恒, 李云梅, 朱利, 周亚明, 李玲玲, 毕顺 (2213)

太湖水体 Chl-a 预测模型 ARIMA 的构建及应用优化 李娜, 李勇, 冯家成, 单雅洁, 钱佳宁 (2223)

松花湖水水质空间差异及富营养化空间自相关分析 丁洋, 赵进勇, 张晶, 付意成, 彭文启, 陈渠昌, 李艳艳 (2232)

会仙岩溶湿地丰平枯水期地表水污染及灌溉适用性评价 朱丹尼, 邹胜章, 李军, 樊连杰, 赵一, 谢浩, 朱天龙, 潘民强, 徐利 (2240)

京杭大运河中下游段天然水化学变化特征及驱动因素 程中华, 邓义祥, 卓小可, 代丹, 于涛 (2251)

次降雨过程中不同土地利用配置对径流中氮流失的影响 罗义峰, 陈方鑫, 周豪, 龙翼, 严冬春, 谭文浩, 李丹丹, 陈晓燕 (2260)

碳氮同位素解析典型岩溶流域地下水中硝酸盐来源与归趋 任坤, 潘晓东, 梁嘉鹏, 彭聪, 曾洁 (2268)

冰封状态下达里湖冰-水中浮游细菌群落结构差异 李文宝, 杨旭, 田雅楠, 杜蕾 (2276)

城市再生水河道沉积物细菌群落空间变化分析:以京津冀北运河为例 邱莹, 靳燕, 苏振华, 邱琰若, 赵栋梁, 郭道宇 (2287)

太湖春夏两季反硝化与厌氧氨氧化速率的空间差异及其影响因素 赵锋, 许海, 詹旭, 朱广伟, 郭宇龙, 康丽娟, 朱梦圆 (2296)

三峡库区典型支流水库浮游动植物群落结构特征及其与环境因子的关系 陈莎, 谢青, 付梅, 江韬, 王永敏, 王定勇 (2303)

铁硫改性生物炭去除水中的磷 桑倩倩, 王芳君, 赵元添, 周强, 蔡雨麒, 邓颖, 田文清, 陈永志, 马娟 (2313)

钢渣对水体中磷的去除性能及机制解析 罗晓, 张峻搏, 何磊, 杨雪晶, 吕鹏翼 (2324)

BS-18 两性修饰膨润土对四环素和诺氟沙星复合污染的吸附 王新欣, 孟昭福, 刘欣, 王腾, 胡啸龙, 孙秀贤 (2334)

Ag₃PO₄/g-C₃N₄ 复合光催化剂的制备及其可见光催化性能 高闯闯, 刘海成, 孟无霜, 郝双玲, 薛婷婷, 陈国栋, Joseph Acquah (2343)

可见光驱动下罗丹明 B 自活化过硫酸盐降解双酚 A 张怡晨, 白雪, 石娟, 金鹏康 (2353)

铁钛共掺杂氧化铝诱发表面双反应中心催化臭氧氧化去除水中污染物 张帆, 宋阳, 胡春, 吕来 (2360)

硫化铁铜双金属复合材料的制备及除铬机制 屈敏, 王源, 陈辉霞, 王兴润, 徐红彬 (2370)

电催化-生物电化学耦合系统处理青霉素废水的机制 曲有鹏, 吕江维, 董跃, 冯玉杰, 张杰 (2378)

缺氧/好氧交替连续流的生活污水好氧颗粒污泥运行及污染物去除机制 李冬, 杨敬畏, 李悦, 李帅, 张诗睿, 王文强, 张杰 (2385)

反硝化除磷污泥聚集体内原位除磷活性及有机物浓度的影响 吕永涛, 姜晓童, 徒彦, 王旭东, 潘永宝, 刘爽, 崔双科, 王磊 (2396)

基于臭氧旁路处理的污泥原位减量技术工艺 薛冰, 刘宾寒, 韦婷婷, 王先恺, 陈思思, 董滨 (2402)

活性炭对城市有机固废厌氧消化过程抗生素抗性基因行为特征的影响 马佳莹, 王盼亮, 汪冰寒, 苏应龙, 谢冰 (2413)

6 种农业废弃物初期碳源及溶解性有机物释放机制 凌宇, 闫国凯, 王海燕, 董伟羊, 王欢, 常洋, 李丛宇 (2422)

中国典型农田土壤有机碳密度的空间分异及影响因素 李成, 王让会, 李兆哲, 徐扬 (2432)

不同水分条件和微生物生物量水平下水稻土有机碳矿化及其影响因子特征 刘琪, 李宇虹, 李哲, 魏晓梦, 祝贞科, 吴金水, 葛体达 (2440)

青藏高原林地土壤的氮转化特征及其影响因素分析:以祁连山和藏东南地区为例 何芳, 张丽梅, 申聪聪, 陈金全, 刘四义 (2449)

基于物元可拓模型的兰州市主城区公园表土重金属污染评价 胡梦瑶, 李春艳, 李娜娜, 吉天琪, 郑登友 (2457)

长期施用化肥和有有机肥对稻田土壤重金属及其有效性的影响 夏文建, 张丽芳, 刘增兵, 张文学, 蓝贤瑾, 刘秀梅, 刘佳, 刘光荣, 李祖章, 王萍 (2469)

川南山区土壤与农作物重金属特征及成因 韩伟, 王成文, 彭敏, 王乔林, 杨帆, 徐仁廷 (2480)

宁东能源化工基地核心区表层土壤中多环芳烃的空间分布特征、源解析及风险评价 杨帆, 罗红雪, 钟艳霞, 王幼奇, 白一茹 (2490)

重金属钝化剂阻控生菜 Cd 吸收的功能稳定性和适用性 鹿发虎, 吴雪姣, 孔雪菲, 曾亮, 王晓宇, 陈兆进, 姚伦广, 韩辉 (2502)

典型污染稻田水分管理对水稻镉累积的影响 张雨婷, 田应兵, 黄道友, 张泉, 许超, 朱挥华, 朱奇宏 (2512)

油茶果壳改性生物炭吸附性能及其耦合淹水对土壤 Cd 形态影响 蔡彤, 杜辉辉, 刘孝利, 铁柏清, 杨宇 (2522)

土地利用变化对松花江下游湿地土壤真菌群落结构及功能的影响 徐飞, 张拓, 怀宝东, 隋文志, 杨雪 (2531)

渔业复垦塌陷地抗生素抗性基因与微生物群落 程森, 路平, 冯启言 (2541)

3 种常用除草剂对细菌抗生素耐药性的影响 李曦, 廖汉鹏, 崔鹏, 白玉丹, 刘晨, 文畅, 周顺桂 (2550)

污水再生利用微生物控制标准及其制定方法探讨 陈卓, 崔琦, 曹可凡, 陆韻, 巫寅虎, 胡洪营 (2558)

《环境科学》征订启事 (2439) 《环境科学》征稿简则 (2479) 信息 (2152, 2231, 2286)

2016 ~ 2019 年江西省臭氧污染特征与气象因子影响分析

钱悦¹, 许彬², 夏玲君^{1*}, 陈燕玲¹, 邓力琛¹, 王欢¹, 张根^{3*}

(1. 江西省生态气象中心, 南昌 330096; 2. 江西省气候中心, 南昌 330096; 3. 中国气象科学研究院, 灾害天气国家重点实验室, 北京 100081)

摘要: 利用 2016 ~ 2019 年生态环境部环境监测总站提供的江西省 11 个设区市的监测数据及同期的国家气象观测站常规观测资料, 研究江西省臭氧污染特征与气象因子的关系. 结果表明, 江西省近几年臭氧污染日益严重, 2016 年全省臭氧(日最大 8 h 滑动平均值)平均浓度为 $80.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 到 2019 年上升至 $98.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 平均年增长率为 $6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 2019 年江西省 11 个设区市 O_3 超标总天数为 475 d, 占总超标天数的 72.6%. 2016 ~ 2018 年 O_3 月平均浓度具有典型的季节变化特征: 夏季 > 春季 > 秋季 > 冬季, 2019 年秋季由于降水量显著减少、日照时数增多和气温升高等气象条件导致秋季近地面臭氧浓度异常升高, 其平均浓度高于其它季节. 臭氧浓度总体与气温、日照时数呈正相关, 与相对湿度呈负相关, 当气温高于 30°C 、相对湿度在 20% ~ 40% 区间、风速在 $2 \sim 3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 区间时易出现高浓度臭氧污染. 江西省臭氧浓度呈现一定的空间分布特征: 赣东北地区低于其他地区, 南部城市高于北部城市. 其中, 赣州市臭氧污染较为严重, 其 2019 年平均浓度居全省最高, 为 $104.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 基于后向轨迹 HYSPLIT 模型和潜在源解析 PSCF 对赣州市进行分析, 研究结果表明赣州市臭氧污染的主要潜在贡献源区存在一定的季节差异: 春季臭氧污染的外来输送源主要来自广东中部和江西北部地区, 夏季主要来自江西北部地区, 而秋季则主要来自广东北部和安徽中部地区.

关键词: 臭氧; 气象因素; 变化特征; 江西省; 后向轨迹聚类分析; 潜在源贡献

中图分类号: X515 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)05-2190-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.202007309

Characteristics of Ozone Pollution and Relationships with Meteorological Factors in Jiangxi Province

QIAN Yue¹, XU Bin², XIA Ling-jun^{1*}, CHEN Yan-ling¹, DENG Li-chen¹, WANG Huan¹, ZHANG Gen^{3*}

(1. Jiangxi Ecological Meteorology Center, Nanchang 330096, China; 2. Jiangxi Provincial Climate Center, Nanchang 330096, China; 3. State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Based on the pollutant data provided by the environmental monitoring stations and the routine observation data of 11 national meteorological stations in Jiangxi Province from 2016 to 2019, the characteristics of ozone pollution and the relationships with meteorological factors were investigated in this study. The results showed that ozone pollution has become increasingly severe in Jiangxi Province in recent years. The annual mean concentration of ozone in Jiangxi Province (the maximum daily 8 h average) was $80.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ in 2016 and reached up to $98.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ in 2019, with an average annual growth rate of $6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. The number of over-standard days of ozone was 475 d, accounting for 72.6% of 2019 in Jiangxi Province. The average concentrations observed in summer were higher than those observed in the other seasons during 2016 to 2018, but in 2019, higher ozone concentrations were observed in autumn owing to the lower precipitation, more sufficient sunshine, and the resulting higher air temperature. Overall, the ozone concentrations were found to be positively correlated with air temperature and sunshine but negatively correlated with relative humidity in Jiangxi Province. A high ozone concentration usually appeared with an air temperature higher than 30°C , relative humidity of 20% - 40%, and wind speed of $2 \sim 3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. The spatial distribution of the ozone concentrations exhibited distinct characteristics with higher values observed in southern Jiangxi relative to those in the northern areas and lower values in northeastern Jiangxi compared with those in other regions. More serious ozone pollution was found in Ganzhou among the 11 cities in Jiangxi Province, with the highest annual concentration of $104.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ observed in 2019. The results of the model analyses, including the HYSPLIT backward trajectory model and potential source contribution function model, indicated that there was a significant difference in the potential source contribution of ozone pollution in Ganzhou on seasonal scales, specifically in central Guangdong and the northwest of Jiangxi Province in spring, the northwest parts of Jiangxi Province in summer, and the north of Guangdong and central Anhui Province in autumn.

Key words: ozone pollution; meteorological factor; variation characteristic; Jiangxi Province; backward trajectory cluster analysis; potential source contribution

对流层大气臭氧(O_3)是城市光化学烟雾污染最重要的指示剂,其主要由自然源和人为活动排放产生的氮氧化物(NO_x)和挥发性有机物(VOCs)等在太阳辐射的作用下经过一系列复杂的光化学反应而生成. 当近地面 O_3 超过一定浓度时,对大气化学过程、气候变化、人体健康、生态环境、农作物以及社

收稿日期: 2020-07-31; 修订日期: 2020-10-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(41775127, 42075112); 江西省气象科技重点项目(201801); 中国气象科学研究院基本科研业务费专项(2020Z002); 江苏省大气环境监测与污染控制高新技术研究重点实验室开放基金项目(KHK1903)

作者简介: 钱悦(1994 ~), 女, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为大气污染特征研究及模拟, E-mail: qy_yue@126.com

* 通信作者, E-mail: 32899694@qq.com; zhanggen@cma.gov.cn

会经济产生非常重要的影响^[1~5]。此外,近地面高浓度 O₃ 可增强大气氧化性,促进二次有机气溶胶生成,从而增加重污染天气发生的频率和强度。

近年来,随着城市化和工业化进程的加速,我国大气污染已呈现出煤烟型污染和光化学污染共存的区域性复合型污染,其中 O₃ 污染问题已逐渐成为我国大气环境研究的热点。现有研究表明我国近地面臭氧浓度超标现象已较为普遍,城市及区域性臭氧污染呈加剧态势^[6,7],不同城市臭氧的变化亦与气象要素和地理环境等因素有关。其中我国华东、华南和华北地区的臭氧污染问题尤为突出^[8~16]。除受前体物排放的影响外,臭氧浓度变化与气象条件之间的关系十分紧密,臭氧与相对湿度、温度和风速等均具有显著的相关性,且存在明显的季节变化特征;严文莲等^[17]对江苏地区的研究发现臭氧存在“周末效应”;易睿等^[18]的研究发现长三角地区臭氧污染呈现较为明显的连片分布特征;张宇静等^[19]的研究发现 PM_{2.5} 和 O₃ 的相互作用呈现相反的季节变化;王俏丽等^[20]的研究发现舟山市本地臭氧形成主要受 VOCs 浓度控制,源解析结果表明舟山市全年外来源占总贡献的 69.46%。余钟奇等^[21]根据 2016~2017 年的相关数据分析发现,2017 年上海市 O₃ 日最大 8 h 滑动平均值(MDA8)年均浓度为 115 μg·m⁻³,同比增幅超过 10%,2017 年下半年西太平洋副热带高压偏西偏强,上海地区风速风向、温度、水汽、光照和辐射条件均有利于 O₃ 浓度上升。胡子梅等^[22]的研究发现 O₃ 污染过程期间,蚌埠市近地面以 1~3 m·s⁻¹ 小风为主,O₃ 在不同风向超标率不同。与发达地区相似,城市化进程的加速亦导致我国中东部地区大气污染物排放增加,进而形成较为严重的臭氧污染问题。然而,与京津冀、长三角和珠三角地区相比而言,缺乏对该区域 O₃ 污染变化趋势、季节特征及其影响因素等相关研究。

作为我国中东部地区重要的省份,江西省位于长江中游地区,地形较为复杂,东、西、南三面环山,中部丘陵和河谷平原交错分布。江西大部分地区全年日照时数在 1 600~2 100 h;夏季受副热带高压控制,极端最高气温在 40℃ 以上;秋季副热带高压北跳,江西多地处于副热带高压脊区,以晴好干旱天气为主,相对湿度较小;夏秋季不利的气象条件容易导致臭氧的生成和累积。目前对于江西省臭氧变化特征的研究较为匮乏,仅柴敏平等^[23]利用 2015 年 1 月至 2017 年 8 月的臭氧监测数据研究了江西省 11 个设区市臭氧污染状况及其时空分布特征,发现臭氧总超标天数由 44 d(2015 年)增加为 149 d

(2017 年 1~8 月),增加了 3.4 倍,臭氧污染状况整体呈加重趋势。本文利用 2019 年江西省 11 个设区市的监测数据分析发现 2019 年臭氧污染形势较为严峻,尤其在秋季臭氧浓度在华东区域位居前列,而 2019 年江西省秋季最高气温、相对湿度、降水量以及日照时数历史排位均在前三。为探究江西省臭氧污染特征及其影响因素,本研究利用 2016~2019 年江西省 11 个设区市的监测数据以及同期的气象资料从年际变化特征、气象条件的影响以及 O₃ 污染潜在源区等方面进行分析,以为江西省空气质量预报及改善提供参考并对臭氧污染治理及防控措施提供科学的理论依据和管理决策参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域与数据

本文的研究区域为江西省 11 个设区市,空气质量监测点有 60 个,气象站 11 个,站点分布如图 1 所示。本研究所用的污染物浓度数据来源于 2016~2019 年生态环境部环境监测总站提供的江西省 11 个设区市的监测数据,同期气象数据(日照时数、气温、相对湿度、风向、风速和降水资料)来源于基本气象站日均值和逐小时观测数据。HYSPLIT 轨迹模型中使用的气象数据来自美国大气和海洋研究中心(NOAA)全球同化资料(GDAS 数据),空间分辨率为 1°×1°。数据经过严格筛选及异常值排除且符合相应规范和标准。

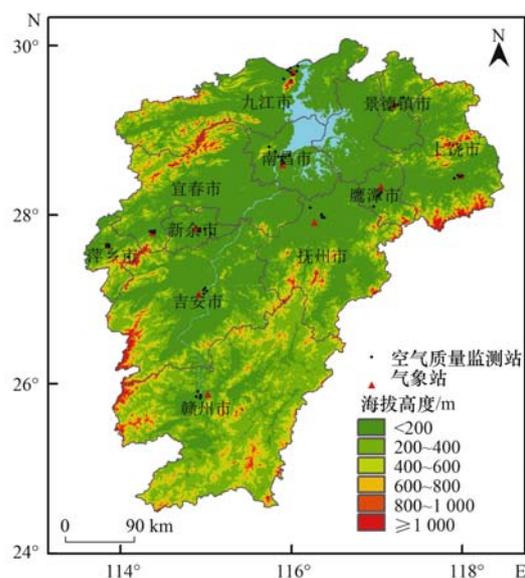


图 1 江西省空气质量监测站点和气象站点分布示意图

Fig. 1 Air quality and meteorological monitoring stations in Jiangxi Province

1.2 研究方法

监测指标的含义和评价方法参考《环境空气质

量标准》(GB 3095-2012)、《环境空气质量评价技术规范》(试行)(HJ 633-2012)和《环境空气质量指数(AQI)技术规范》(试行)(HJ 633-2012). 本文中的 O_3 浓度日均值是指日最大8 h滑动平均值(MDA8),月均值指一个日历月内各日平均浓度算数平均值,季均值指的是一个日历季内各日平均浓度算数平均值,年均值指一个历年内各日平均浓度算数平均值. 臭氧小时浓度分析使用的是臭氧小时监测值. 近地面 O_3 浓度日超标指 O_3 MDA8浓度高于 $160 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, O_3 小时浓度超标指臭氧小时浓度高于 $200 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 春季为3~5月,夏季为6~8月,秋季为9~11月,冬季为12月~次年2月.

本文使用了HYSPLIT后向轨迹模型及聚类分析,HYSPLIT模型最初由美国国家海洋大气研究中心空气资源实验室(NOAA)和澳大利亚气象局合作研发,目前HYSPLIT 4.9版本集合了欧拉和拉格朗日两种方法,拉格朗日方法用于处理气团平流和扩散,而欧拉方法用于浓度计算. 该模式在处理气象要素输入场、多种物理过程和各类大气污染物排放源等问题上考虑得较为成熟,目前在国内外被广泛应用于大气污染物来源及输送路径等方面的研究^[24]. 本文以赣县(25.87°N , 115.02°E)为轨迹起始点,研究时段为2019年臭氧污染较重的季节(春季、夏季和秋季),选取每天的24个时刻计算48 h后向轨迹,本次模拟的高度设为100 m,然后利用MeteoInfo软件中的Trajstat^[25]模块进行聚类分析,得出气团轨迹分析结果,再进行PSCF分析,轨迹的覆盖区域为($10^\circ\sim 40^\circ\text{N}$, $106^\circ\sim 130^\circ\text{E}$),网格分辨率为 $0.1^\circ\times 0.1^\circ$.

本研究使用了潜在源贡献因子方法(PSCF),利用气流轨迹来分析计算潜在源区的地理位置和空间分布,也被称为滞留时间分析法^[26]. 将研究区分为 $i\times j$ 个网格(i 、 j 分别为经度和纬度),对研究期间经过该网格内的气流轨迹进行计算,统计污染轨迹出现的概率. 该方法假设气团后向轨迹在某个网格中有停留,那么气团会接收来自该网格的排放,随后经过传输对受点的污染物浓度产生贡献^[27]. 将经过网格(i 、 j)的所有轨迹数记为 n_{ij} ,将经过网格(i 、 j)且对应的污染物质量浓度超过给定阈值的轨迹数,即污染轨迹数被记为 m_{ij} ,PSCF _{ij} 计算公式为:

$$\text{PSCF}_{ij} = m_{ij}/n_{ij} \quad (1)$$

式中,PSCF _{ij} 为网格(i 、 j)污染轨迹出现概率.

PSCF值表示的是一种条件概率,对于某些网格,因轨迹总体停留时间少(n_{ij} 较小),计算结果的不确定性较大. 为减少不确定性,通常引入 W_{ij} (权重因子)来降低由于某些网格内气体停留时间较短而

引起PSCF值的波动,则用 W_{ij} 来计算PSCF,以减小不确定性. W_{ij} 的规定如下:

$$W_{ij} = \begin{cases} 1.00 & n_{ij} > 80, \\ 0.70 & 20 < n_{ij} \leq 80, \\ 0.42 & 10 < n_{ij} \leq 20, \\ 0.05 & n_{ij} \leq 10. \end{cases} \quad (2)$$

加入权重后的PSCF值可以表示为:

$$\text{WPSCF}_{ij} = W_{ij} \times \text{PSCF}_{ij} \quad (3)$$

式中,WPSCF _{ij} 为网格(i 、 j)权重污染轨迹出现概率.

2 结果与讨论

2.1 臭氧污染特征

2.1.1 臭氧污染年变化特征

据统计分析,近几年江西省臭氧浓度明显上升,2018年全省以臭氧为首要污染物的平均天数为109 d,到2019年增加至138 d;2018年以 $\text{PM}_{2.5}$ 为首要污染物的平均天数88 d,到2019年下降至70 d;从2018年开始以 O_3 MDA8为首要污染物的天数已超过以 $\text{PM}_{2.5}$ 为首要空气污染物的天数,成为江西省最主要的大气污染物. 2019年江西省11个设区市超标总天数(轻度及轻度以上)为654 d,其中 O_3 MDA8超标总天数为475 d,占2019年总超标天数的72.6%; $\text{PM}_{2.5}$ 超标总天数为153 d; PM_{10} 超标总天数为23 d. 2019年 O_3 污染已经明显多于 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 污染.

与华东区域各省市的月均 O_3 MDA8浓度第90百分位数进行对比可知(图2),江西省与其他省市变化特征较为相似,在5~6月出现第一个峰值,在9月出现第二个峰值,但江西省9~11月 O_3 MDA8浓度第90百分位数在华东区域处于较高水平,这与江西省秋季异常高温少雨干燥的气候特征相关.

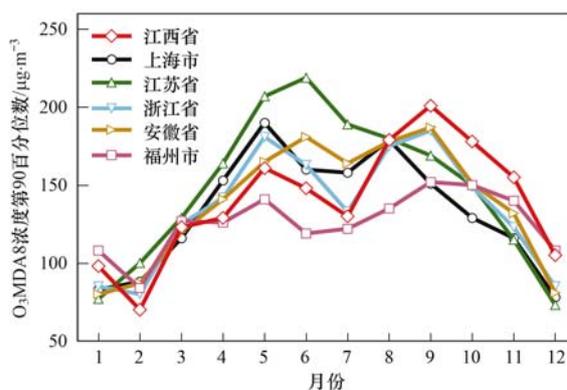


图2 2019年华东区域月均 O_3 MDA8浓度第90百分位数

Fig. 2 The 90th percentile of O_3 MDA8 monthly concentrations over East China in 2019

图3为2016~2019年江西省11个设区市 O_3 和

PM_{2.5} 超标天数分布和年平均浓度变化,可以看出,江西省 PM_{2.5} 超标天数除了南昌市、九江市和鹰潭市在 2019 年略有上升外其余城市近几年呈下降趋势,而 O₃ 超标天数均逐年上升. 2019 年全省 O₃ 超标天数年平均达到了 43.2 d,较 2018 年平均上升了 23.6 d. 江西省臭氧浓度的空间分布特征为赣东北地区低于其他地区,南部城市高于北部城市. 2016 年全省 O₃

MDA8 年平均浓度为 80.1 μg·m⁻³,2019 年全省 O₃ MDA8 年平均浓度上升至 98.2 μg·m⁻³,平均每年上升速率为 6 μg·m⁻³,其中 2019 年赣州市 O₃MDA8 年平均浓度为全省最高,为 104.2 μg·m⁻³. 近几年臭氧浓度明显上升,到 2019 年已成为继 PM_{2.5} 后又一影响优良天数的重要因素. 2019 年江西省 O₃ 超标现象普遍存在,值得进一步关注.

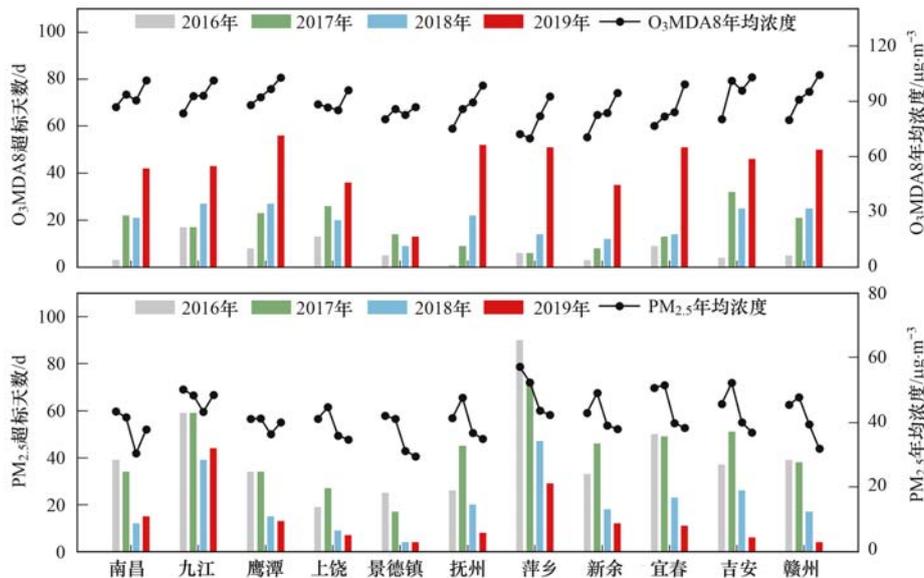


图 3 2016 ~ 2019 年江西省 11 个设区市 O₃ MDA8 和 PM_{2.5} 超标天数分布和浓度年变化

Fig. 3 Annual variations in the over-standard days and the average concentration of O₃ MDA8 and PM_{2.5} from 2016 to 2019 in Jiangxi Province

2.1.2 臭氧污染月变化特征

进一步分析可以看出,江西省不同设区市 O₃ MDA8 月均浓度变化差异显著(图 4). O₃ MDA8 月均浓度呈“M”双峰型,11 个设区市 O₃ MDA8 月变化特征较为相似,冬季 O₃ MDA8 整体浓度处于较低水平,但赣州市冬季 O₃ MDA8 月均浓度高于其他城市;春季 3 ~ 5 月,江西省各设区市 O₃ 处于上升阶段;夏季 6 ~ 7 月, O₃ 浓度有所下降;而 8 ~ 9 月,江

西省各设区市 O₃ MDA8 浓度持续升高,2019 年 9 月达到 4 a 中月均浓度最高值,萍乡市 O₃ MDA8 月均浓度(173 μg·m⁻³)为各设区市中最高,景德镇市 O₃ 月均浓度(126 μg·m⁻³)为各设区市月均值最低;在 9 月达到峰值后 O₃ 浓度开始回落.

图 5 为 2016 ~ 2019 年江西省臭氧浓度变化和气象要素的月变化,从 O₃ MDA8 月变化来看,臭氧浓度存在明显的季节变化特征. 2016、2018 和 2019

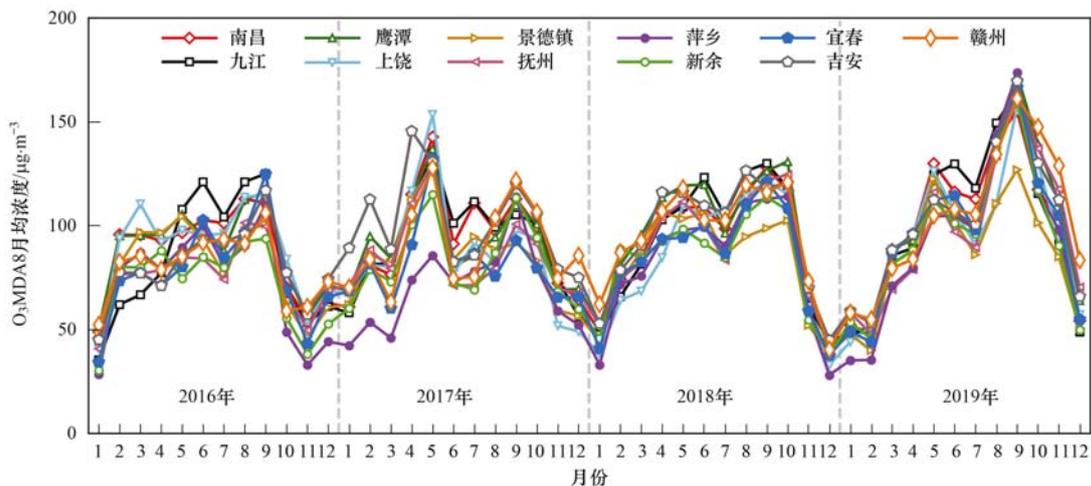
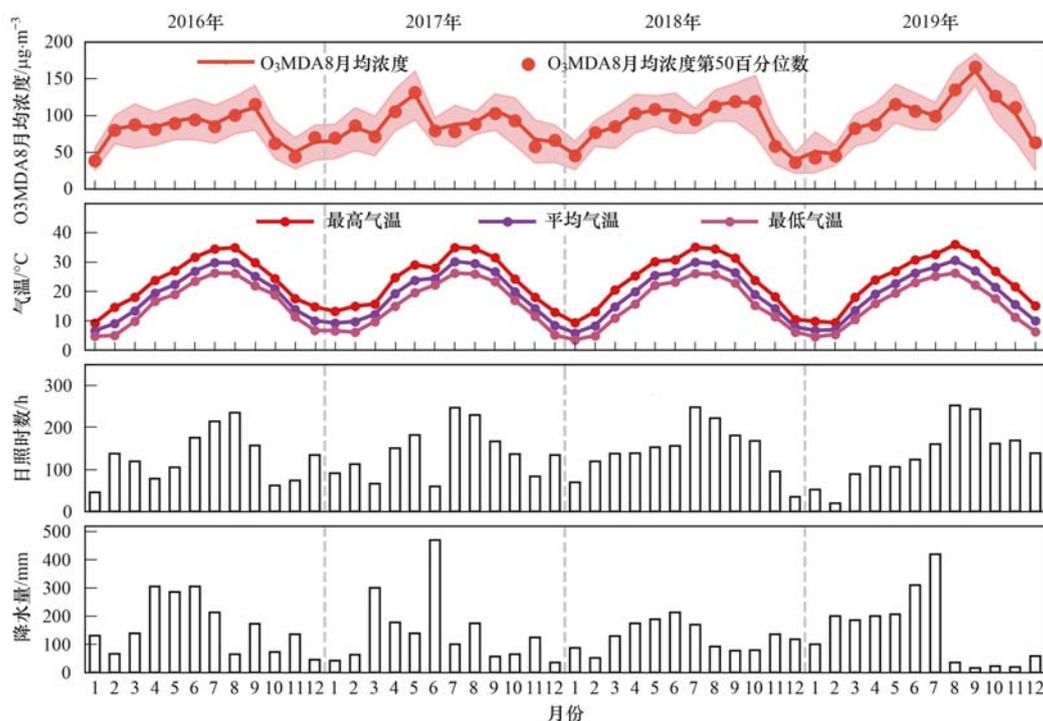


图 4 2016 ~ 2019 年江西省 11 个设区市 O₃ MDA8 月均浓度变化

Fig. 4 Monthly average distribution of O₃ MDA8 from 2016 to 2019 in Jiangxi Province

年全省 O_3 MDA8 月均浓度均在 9 月达到全年最高, 而 2017 年最值出现在 5 月. 每年的 6~7 月臭氧浓度有所降低, 这与进入梅雨期相关; 冬季臭氧浓度较低是由于日照时数减少, 太阳辐射减弱, 气温较低, 导致光化学反应速率降低从而使臭氧浓度大幅度下降. 根据 2016~2019 年江西省逐月的气象要素的变化可以看出, 6~7 月江西省正处于梅雨期, 月总降水量明显偏多, 日照时数偏少, 这种气象条件会导致臭氧浓度偏低. 2016~2019 年臭氧浓度总体呈上升的趋势. 2016~2018 年不同季节 O_3 的平均浓

度变化为夏季 > 春季 > 秋季 > 冬季, 春季(4~5 月) 臭氧浓度较高可能是由于高空出现对流层折叠效应, 有研究表明, 对流层顶折叠会造成平流层与对流层空气交换, 此交换会将平流层臭氧输送到对流层, 造成春季对流层臭氧浓度增加^[28,29]. 2019 年不同季节近地面臭氧的平均浓度变化为秋季 > 夏季 > 春季 > 冬季, 秋季近地面臭氧浓度有很大的提升, 这是由于 2019 年秋季降水量显著减少、日照时数增多和气温偏高等不利的气象条件导致秋季近地面臭氧异常升高.



图中阴影部分表示 O_3 MDA8 月均浓度第 25 百分位数到第 75 百分位数

图 5 2016~2019 年江西省 11 个设区市 O_3 MDA8 月均浓度、气温、日照时数和降水量月变化

Fig. 5 Monthly variations in the O_3 MDA8 average concentration, temperature, sunshine, and precipitation from 2016 to 2019 in Jiangxi Province

2.1.3 臭氧污染日变化特征

图 6 为 2016~2019 年江西省不同季节污染物浓度小时平均日变化, 结果显示, 臭氧浓度日变化特征呈单峰单谷分布, 臭氧浓度最低值出现在 07:00~08:00, 08:00 时后臭氧浓度逐渐升高, 到 13:00~16:00 臭氧浓度最高值出现(夏季臭氧浓度达到最高值出现的时间较早), 达到峰值后臭氧浓度逐渐降低. 臭氧的日变化主要分为 4 个阶段: 臭氧及其前体物的累积阶段、 NO_x 对臭氧抑制阶段、臭氧光化学生成阶段、臭氧消耗阶段. 臭氧前体物(NO_2) 日变化特征呈双峰分布, 第一个峰值一般出现在 09:00~10:00 这是由于城市早高峰引起的, 日出后太阳辐射增强, NO 发生光化学反应生成 NO_2 , 随着太阳辐射的减弱, 生成速率逐渐减慢, 夜间 NO 和 O_3 发生滴定反应生成 NO_2 , 造成 NO_2 的第二个峰值一般

出现在 20:00~21:00.

2.2 臭氧污染和气象条件之间的关系

近地面 O_3 浓度变化受气象条件的影响较大, 气象条件在臭氧的形成、传输、沉降和消散均起着重要的作用. 由于 2019 年江西省臭氧浓度增长较快, 显著高于其他年份, 为了更好地得到臭氧浓度和气象条件的关系, 选取 2019 年的监测数据及同期的气象数据进行分析, 分析近地面 O_3 与日照时数的关系时, 日照时数采用的是日数据, 近地面 O_3 浓度为 O_3 MDA8 浓度. 由于降水发生时污染物易发生湿沉降从大气中清除, 不利于臭氧的生成和积累, 导致近地面 O_3 浓度明显偏低, 而夜间生成 O_3 的光反应较弱, 所以夜间近地面 O_3 浓度明显偏低. 由于夜间和发生降水时近地面 O_3 浓度明显偏低, 为了更准确分析近地面臭氧与气象要素之间的关系, 小时数据仅采用

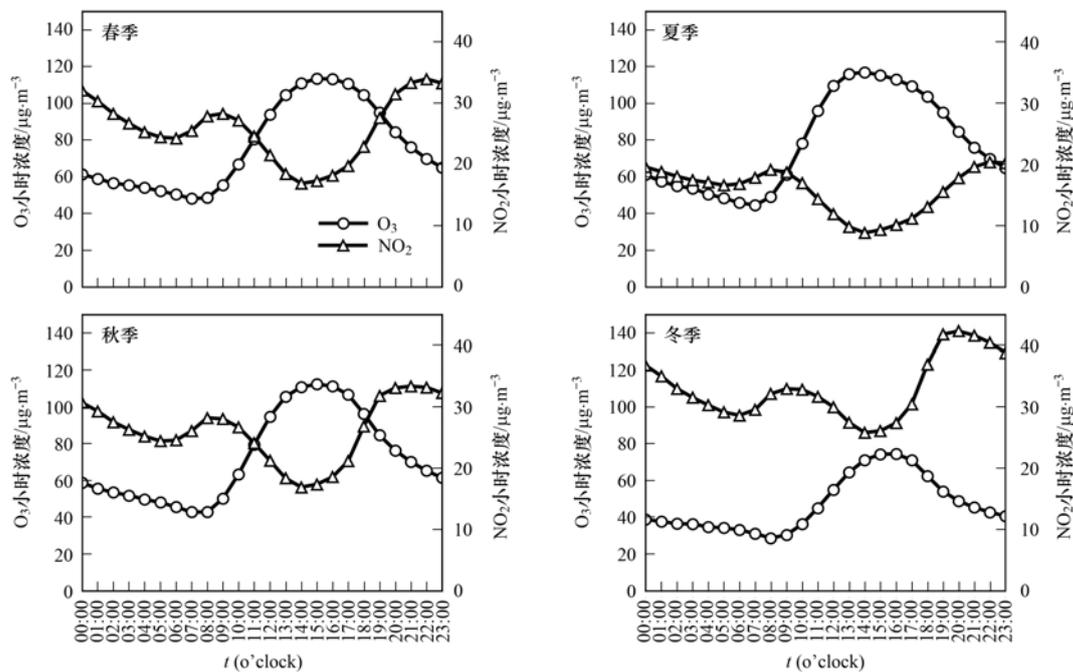


图6 2016~2019年江西省不同季节污染物浓度小时平均日变化

Fig. 6 Daily variations in the ozone and nitrogen dioxide concentrations in the four seasons from 2016 to 2019 in Jiangxi Province

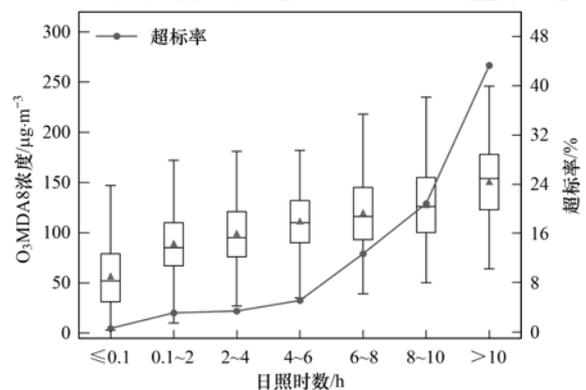
2019年江西省11个地市08:00~19:00时之间并剔除降水时段的逐时气象观测资料和与之相对应的近地面 O_3 小时浓度数据。

2.2.1 日照时数

日照时数在一定程度上反映了太阳辐射对臭氧浓度的影响,日照为光化学反应的发生提供了良好的反应条件,日照时数越长,有利于提高光反应速率,进而加快了臭氧的生成.图7为2019年江西省不同日照时数区间下臭氧浓度和超标率变化,从中可知,随着日照时数的增加, O_3 MDA8浓度增加, O_3 MDA8超标率也上升;当日照时数超过6h时,臭氧超标率明显上升;当日照时数大于10h时, O_3 MDA8平均浓度为 $150.8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,超标率达到了43.3%.臭氧浓度与日照时数呈显著的正相关(相关系数为0.69,在0.01水平上显著相关).但当日照时数小于0.1h时,近地面 O_3 MDA8平均浓度仍有少量超过 $160 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,超标率为0.6%.近地面臭氧浓度虽然与日照时数有很强的相关性,但是也受其他的外界条件影响,这可能与臭氧的水平垂直输送有关,还需要进一步研究分析。

2.2.2 气温

太阳辐射是臭氧发生光化学反应的重要条件之一,而气温能够较好地反映太阳辐射强度的变化,因此统计分析了2019年江西省不同温度区间下臭氧浓度和超标率变化.如图8所示,随着气温的增加,近地面 O_3 平均浓度也增加, O_3 超标率也上升,当气温小于 15°C 时,臭氧的平均质量浓度均小于 60



箱线图中每个箱的上缘、上边缘、中线、小三角、下边缘和下缘分别代表上限、上四分位、中位数、平均值、下四分位和下线,下同

图7 2019年江西省不同日照时数区间下 O_3 MDA8浓度和超标率变化

Fig. 7 Variations in O_3 MDA8 concentration and the over-standard rate with different sunshine hours in 2019 in Jiangxi Province

$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,无臭氧超标现象出现;当气温大于 15°C 时,臭氧开始出现超标现象;当温度为 $20\sim 25^\circ\text{C}$ 和 $30\sim 35^\circ\text{C}$ 时,臭氧超标率分别为0.2%、2.9%和8.2%;当温度超过 25°C 时,臭氧超标率开始大幅上升;当气温大于 35°C 时,臭氧的平均质量浓度为 $150.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,臭氧超标率达到了13.2%.近地面臭氧浓度与温度进行拟合分析可以得出,近地面臭氧浓度与气温呈显著的正相关性,相关系数为0.68,在0.01水平上显著相关。

2.2.3 相对湿度

大气中的水汽通过影响太阳辐射从而影响臭氧发生光化学反应,大气中的水汽在一定的条件下可

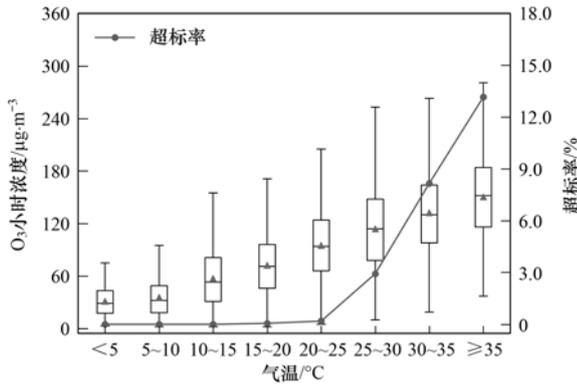


图 8 2019 年江西省不同温度区间下臭氧小时浓度和超标率变化
Fig. 8 Variations in the ozone concentration and the over-standard rate with different temperatures in 2019 in Jiangxi Province

通过反应消耗臭氧^[30]. 因此统计分析了 2019 年江西省不同相对湿度区间下臭氧质量浓度和超标率变化,由图 9 可知,随着相对湿度的增加,近地面 O₃ 平均浓度减少, O₃ 超标率也减少. 当相对湿度低于 60% 时,臭氧的平均质量浓度均大于 100 μg·m⁻³; 当相对湿度为 20%~30% 时,臭氧的平均质量浓度为 146.9 μg·m⁻³,臭氧超标率达到了 13.6%; 当相对湿度为 30%~40%、40%~50% 和 50%~60% 时,臭氧超标率分别为 10.3%、7.8% 和 3.7%; 当相对湿度大于 50%,臭氧超标率急剧下降. 另外,高相对湿度也有利于发生湿沉降作用,使臭氧浓度降低,因此高相对湿度不利于近地面臭氧浓度的积累.

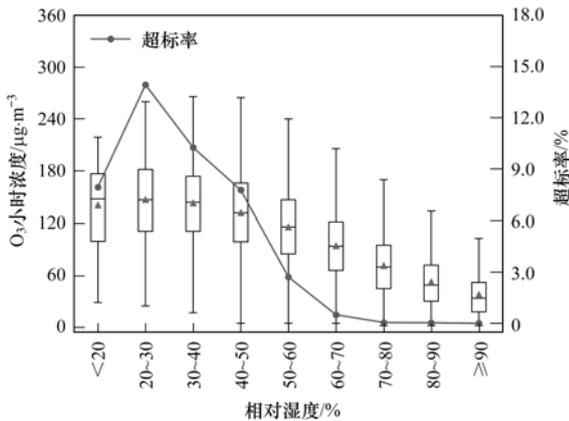
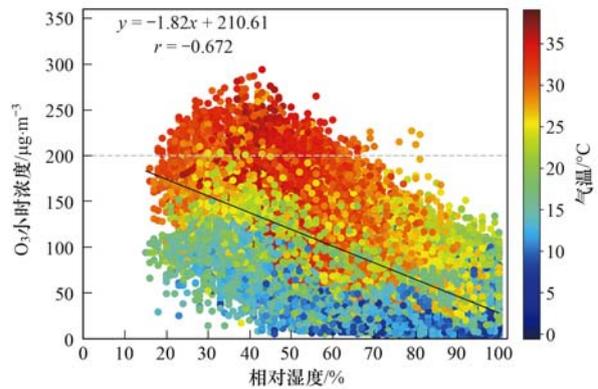


图 9 2019 年江西省不同湿度区间下臭氧小时浓度和超标率变化
Fig. 9 Variations in the ozone concentration and the over-standard rate with different relative humidities in 2019 in Jiangxi Province

图 10 为 2019 年江西省不同湿度和温度条件下对应的 O₃ 小时浓度分布,将近地面 O₃ 小时浓度与相对湿度进行拟合分析可以得出,近地面 O₃ 小时浓度与相对湿度呈显著的负相关性,相关系数为 -0.67,在 0.01 水平上显著相关. 由图 10 可知,当气温高于 30℃、相对湿度在 20%~40% 区间易出现高浓度臭氧污染. 同一相对湿度条件下,臭氧高污染区主要发生在温度的高值区域内.



实线代表 O₃ 小时浓度和相对湿度的线性拟合线,
虚线表示 O₃ 小时浓度的超标临界值

图 10 2019 年江西省不同湿度和温度条件下对应的臭氧小时浓度分布

Fig. 10 Ozone concentration distributions under different temperature and humidity conditions in 2019 in Jiangxi Province

2.2.4 风向风速

风向和风速对臭氧的浓度有一定的影响,不同的风向决定臭氧污染物的传输的来向,而不同的风速决定臭氧污染物的输送效率或者清除效率,风速在一定程度上反映了大气边界层内稳定度的强度^[31]. 图 11 为 2019 年江西省不同风速区间下臭氧浓度和超标率变化. 从中可知,当风速小于 3 m·s⁻¹ 时,随着风速的增加,近地面臭氧的超标率也增加; 当风速在 2~3 m·s⁻¹ 时,臭氧小时平均浓度为 103.2 μg·m⁻³,臭氧超标率最大,达到了 4.3%; 当风速大于 3 m·s⁻¹ 时,臭氧小时平均浓度略有下降,但臭氧超标率随风速的增加呈显著地下降趋势; 当风速为 3~4、4~5 和 5~6 m·s⁻¹ 时,臭氧超标率分别为 3.5%、3.1% 和 1.1%; 当风速大于 7 m·s⁻¹ 时,无臭氧超标现象发生. 当风速较大时,水平扩散作用又会使得臭氧浓度减少^[32].

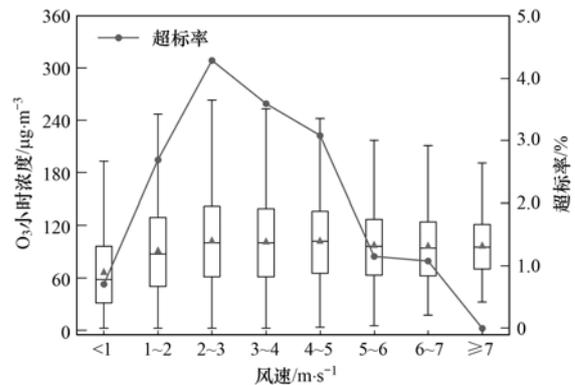


图 11 2019 年江西省不同风速区间下臭氧小时浓度和超标率变化
Fig. 11 Variations in the ozone concentration and the over-standard rate with different wind speeds in 2019 in Jiangxi Province

臭氧质量浓度的变化与风场和不同城市的下垫面特征如地形起伏、地表粗糙度等密切相关,不同地

形下的近地面风速、风向的变化对臭氧的影响十分复杂. 图 12 为 2019 年江西省 11 个设区市臭氧小时超标污染下不同风向的风向频率和平均风速, 从中可知, 在臭氧浓度超标的情况下, 江西大部分城市的主导风向为偏北风. 江西省地形较为复杂, 东、西、南三面环山, 中部丘陵和河谷平原交错分布, 北部为鄱阳湖. 不同城市由于地形的不同导致臭氧污染气象条件存在明显差异(图 1). 臭氧出现超标现象时, 对应不同风向时的平均速度基本在 $1 \sim 3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间, 但抚州市位于江西中部, 与其他城市相比在臭氧超标情况下整体风速偏高, 在 $\text{N} \sim \text{NNE}$ 和 $\text{NNW} \sim \text{N}$ 风向区间时, 风向频率分别为 20% 和 36%, 平均风速分别为 3.8 和 $4.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 同时上游地区对应南昌和

鹰潭市也属于臭氧浓度高值区, 当抚州市风速为 $3 \sim 4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、风向为偏北风时, 受上游污染源的影响容易造成本地臭氧浓度的增加, 产生臭氧高浓度的污染. 而赣州市在臭氧超标情况下, 偏北风和偏南风出现的频率均很高, 赣州市风向变化较为复杂.

2.3 后向轨迹与潜在源解析

2019 年赣州市臭氧为首要污染物的天数达到了 161 d, 超标天数达到了 50 d, 年平均浓度为 $104.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 均高于其他设区市. 赣州市位于江西省南部, 臭氧污染较为严重, 为了更深入地了解气团运动轨迹及污染物输送对本地臭氧浓度变化的影响, 利用后向轨迹及 PSCF 对赣州市臭氧浓度进行分析, 本研究时段为 2019 年臭氧污染较重的季节

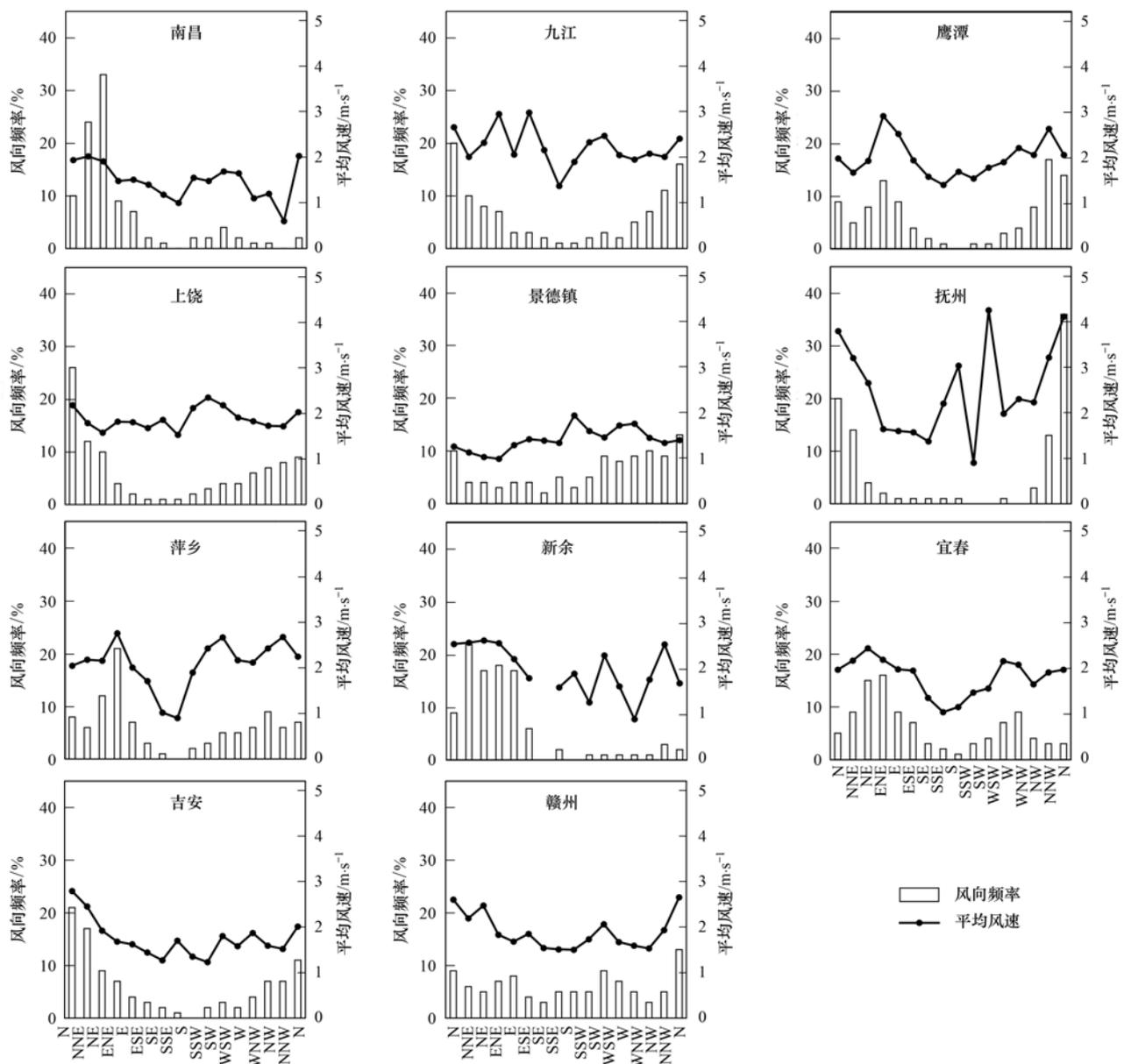


图 12 2019 年江西省 11 个设区市臭氧小时超标污染下不同风向的风向频率和平均风速

Fig. 12 Variations in the wind direction frequency and average wind speed under ozone over-standard pollution conditions in 2019 in Jiangxi Province

(春季、夏季和秋季,由于冬季臭氧质量浓度较低且无超标天数故不做分析),从区域尺度分析大气污染物输送对本地臭氧浓度的影响.图13为2019年赣州市不同季节后向轨迹聚类 and WPSCF 分析.由图13和表1可知,春季聚类后得到的5条轨迹 $\rho(O_3)$ 的平均值为 $70.8 \mu g \cdot m^{-3}$,其中轨迹1主要来自粤中和粤北部地区,对应的 $\rho(O_3)$ 最大,为 $85.1 \mu g \cdot m^{-3}$,出现的概率为20.0%;轨迹2、3和4均来自北部地区,其中轨迹3路径较长,表明风速较大易将苏西北、安徽、赣北等途经地区的污染物输送至本

地,轨迹2来自江西省赣北地区,对赣州市臭氧污染有一定的影响;夏季聚类后得到的6条轨迹 $\rho(O_3)$ 的平均值为 $89.8 \mu g \cdot m^{-3}$,受东南季风影响,赣州偏南气流加强,但是 $\rho(O_3)$ 浓度较高还是受偏北气流影响,其中轨迹6对应的 $\rho(O_3)$ 最大,为 $113.1 \mu g \cdot m^{-3}$,出现的概率为14.7%,轨迹从安徽东南部经江西北部地区到达赣州,这条轨迹虽然不是影响赣州的主要气团轨迹,但是气团沿该路径到达赣州,对赣州的臭氧浓度影响较大;轨迹2、4和5均来自南部地区,轨迹4和轨迹5的气团来自海上,由于海

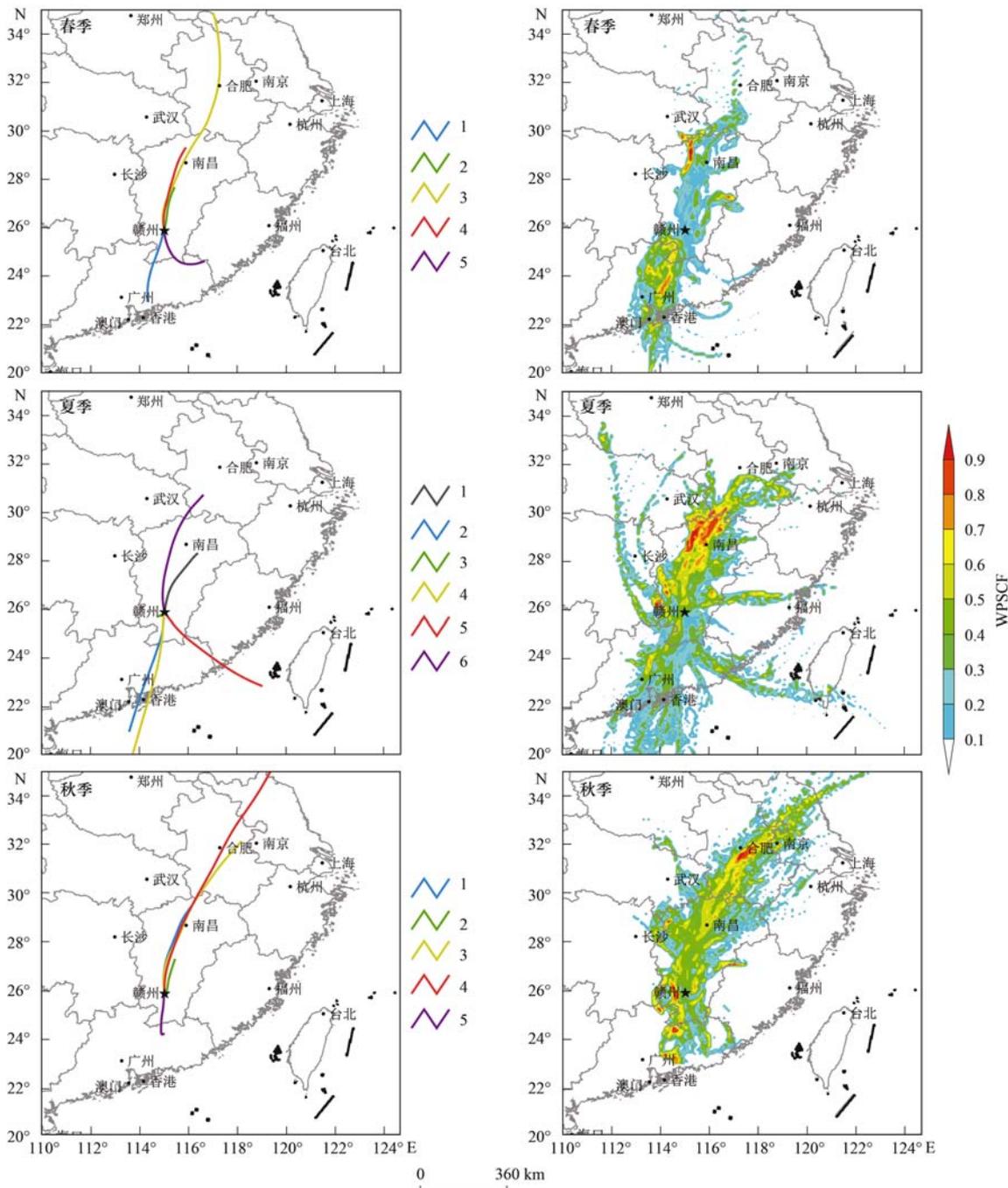


图13 2019年赣州市不同季节臭氧的后向轨迹聚类 and WPSCF 分析

Fig. 13 Backward trajectories and WPSCF model analysis in different seasons in Ganzhou in 2019

上的气团较清洁,所以这两条轨迹对应的臭氧浓度较低;秋季偏南气流逐渐减弱,偏北气流逐渐加强,聚类后得到的 5 条轨迹 $\rho(\text{O}_3)$ 的平均值为 $98.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 轨迹 1~4 的气团来源均来自北方,来自北方的概率总和为 91.4%,其中轨迹 4 对应的 $\rho(\text{O}_3)$ 最大,为 $111.9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,出现的概率为 10.9%; 轨迹 2 来自江西中部地区,路径较短,表明风速小,扩散稀释能力较弱,易将江西中部等途经地区的污染物输送至赣州; 轨迹 1 的气团来源主要还是来自江西西北部地区, $\rho(\text{O}_3)$ 的平均值为 $95.3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 出现概率为 53.9%。 轨迹 5 来自南方向,此路径污染物的来源主要是由广东北部输送至赣州形成聚积, $\rho(\text{O}_3)$ 的平均值为 $101.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 出现概率为 8.6%。

使用 PSCF 方法对赣州市 O_3 污染物进行潜在源区分析,赣州市 WPSCF 分布具有明显的季节性特征。春季 WPSCF 高值区主要分布在广东中部和江西西北部地区; 夏季潜在源区高值区主要位于赣州以北地区,主要分布在江西西北部地区,夏季潜在源区高值区分布范围较大; 秋季潜在源区高值区主要分布在安徽中部和广东北部地区。这也能更好地解释赣州市近地面 O_3 浓度变化。

表 1 2019 年赣州市不同季节后向轨迹聚类结果及其对应的 O_3 平均质量浓度

Table 1 Trajectory clustering characteristics and corresponding concentration of ozone in Ganzhou in 2019

季节	轨迹类型	轨迹数目 / 条	占比/%	$\rho(\text{O}_3)$ / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$
春季	1	441	20.0	85.1
	2	681	30.8	63.7
	3	139	6.3	77.3
	4	441	20.0	75.3
	5	506	22.9	62.1
夏季	1	397	18.0	96.3
	2	671	30.4	87.8
	3	416	18.8	87.8
	4	214	9.7	68.4
	5	185	8.4	71.0
	6	325	14.7	113.1
秋季	1	1176	53.9	95.3
	2	248	11.3	85.0
	3	335	15.3	105.6
	4	238	10.9	111.9
	5	187	8.6	101.6

3 结论

(1) 江西省近几年臭氧污染日益严重,从 2018 年开始以 O_3 MDA8 为首要污染物的天数已超过以 $\text{PM}_{2.5}$ 为首要空气污染物的天数,成为江西省最主要的大气污染物。江西省 O_3 浓度的空间分布特征为赣东北地区低于其他地区,南部城市高于北部城市。

2019 年全省 O_3 MDA8 超标总天数占总超标天数的 72.6%。2016~2019 年全省 O_3 MDA8 平均每年上升速率为 $6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,到 2019 年全省 O_3 MDA8 年平均浓度上升至 $98.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。2019 年江西省 9~11 月 O_3 MDA8 浓度第 90 百分位数在华东区域处于较高水平,这与江西省秋季异常高温少雨干燥的气候特征相关。

(2) 江西省臭氧月变化呈现双峰型,在 5 月和 9 月出现峰值,日变化特征呈单峰单谷分布。2016~2018 年不同季节 O_3 的平均浓度变化为夏季 > 春季 > 秋季 > 冬季,2019 年不同季节近地面臭氧的平均浓度为秋季 > 夏季 > 春季 > 冬季,这是由于 2019 年秋季日照时数增多、降水量显著减少和气温上升等不利的气象条件导致秋季近地面臭氧浓度异常升高。

(3) O_3 浓度总体与气温、日照时数呈正相关,与相对湿度呈负相关,当气温高于 30°C 、相对湿度在 20%~40% 区间、风速在 $2\sim 3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 区间时易出现高浓度 O_3 污染,且当偏北风为主导风向时,江西省大部分城市易出现 O_3 浓度超标情况。

(4) 结合后向轨迹 HYSPLIT 和潜在源解析 PSCF 对赣州市进行分析,发现广东、安徽和江西西北部地区为赣州市 O_3 污染的主要潜在贡献源区,春季 O_3 污染的外来输送源主要来自广东中部和江西西北部地区,夏季 O_3 污染的外来输送源主要来自江西西北部地区,秋季 O_3 污染的外来输送源主要来自广东北部和安徽中部地区。

参考文献:

- [1] 马明亮. 对流层臭氧时空分析影响因素研究及近地面臭氧估算[D]. 上海: 华东师范大学, 2019.
Ma M L. Temporal and spatial analysis of tropospheric ozone, simulation of influence factors and surface ozone estimation[D]. Shanghai: East China Normal University, 2019.
- [2] Wang X K, Lu W Z, Wang W J, et al. A study of ozone variation trend within area of affecting human health in Hong Kong[J]. Chemosphere, 2003, 52(9): 1405-1410.
- [3] Feng Z Z, Hu E Z, Wang X K, et al. Ground-level O_3 pollution and its impacts on food crops in China: a review [J]. Environmental Pollution, 2015, 199: 42-48.
- [4] 陈仁杰, 陈秉衡, 阚海东. 上海市近地面臭氧污染的健康影响评价[J]. 中国环境科学, 2010, 30(5): 603-608.
Chen R J, Chen B H, Kan H D. Health impact assessment of surface ozone pollution in Shanghai [J]. China Environmental Science, 2010, 30(5): 603-608.
- [5] 廖志恒, 范绍佳. 2006~2012 年珠江三角洲地区 O_3 污染对人群健康的影响[J]. 中国环境科学, 2015, 35(3): 897-905.
Liao Z H, Fan S J. Human health impact of exposure to ozone pollutant in Pearl River Delta region during 2006~2012 [J]. China Environmental Science, 2015, 35(3): 897-905.
- [6] 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.
- [7] 郭欣瞳, 宋宏权, 梁留科, 等. 2015-2017 年中国臭氧浓度时空变化特征[J]. *气象与环境科学*, 2020, **43**(3): 41-50.
Guo X T, Song H Q, Liang L K, *et al.* Spatial and temporal variations of ozone concentration in China during 2015-2017[J]. *Meteorological and Environmental Sciences*, 2020, **43**(3): 41-50.
- [8] 段晓瞳, 曹念文, 王潇, 等. 2015 年中国近地面臭氧浓度特征分析[J]. *环境科学*, 2017, **38**(12): 4976-4982.
Duan X T, Cao N W, Wang X, *et al.* Characteristics analysis of the surface ozone concentration of China in 2015 [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(12): 4976-4982.
- [9] 张倩倩, 张兴赢. 基于卫星和地面观测的 2013 年以来我国臭氧时空分布及变化特征[J]. *环境科学*, 2019, **40**(3): 1132-1142.
Zhang Q Q, Zhang X Y. Ozone spatial-temporal distribution and trend over China since 2013: insight from satellite and surface observation[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(3): 1132-1142.
- [10] 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.
- [11] 余益军, 孟晓艳, 王振, 等. 京津冀地区城市臭氧污染趋势及原因探讨[J]. *环境科学*, 2020, **41**(1): 106-114.
Yu Y J, Meng X Y, Wang Z, *et al.* Driving factors of the significant increase in surface ozone in the Beijing-Tianjin-Hebei Region, China, during 2013-2018[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(1): 106-114.
- [12] 欧盛菊, 魏巍, 王晓琦, 等. 华北地区典型重工业城市夏季近地面 O₃ 污染特征及敏感性[J]. *环境科学*, 2020, **41**(7): 3085-3094.
Ou S J, Wei W, Wang X Q, *et al.* Pollution characteristics and sensitivity of surface ozone in a typical heavy-industry city of the North China plain in summer[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(7): 3085-3094.
- [13] 邵平, 辛金元, 安俊琳, 等. 长三角工业区夏季近地层臭氧和颗粒物污染相互关系研究[J]. *大气科学*, 2017, **41**(3): 618-628.
Shao P, Xin J Y, An J L, *et al.* An analysis on the relationship between ground-level ozone and particulate matter in an industrial area in the Yangtze River delta during summer time[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2017, **41**(3): 618-628.
- [14] 周学思, 廖志恒, 王萌, 等. 2013-2016 年珠海地区臭氧浓度特征及其与气象因素的关系[J]. *环境科学学报*, 2019, **39**(1): 143-153.
Zhou X S, Liao Z H, Wang M, *et al.* Characteristics of ozone concentration and its relationship with meteorological factors in Zhuhai during 2013-2016[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, **39**(1): 143-153.
- [15] 刘建, 吴兑, 范绍佳, 等. 前体物与气象因子对珠江三角洲臭氧污染的影响[J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(3): 813-820.
Liu J, Wu D, Fan S J, *et al.* Impacts of precursors and meteorological factors on ozone pollution in Pearl River Delta[J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(3): 813-820.
- [16] 杨健, 尹沙沙, 于世杰, 等. 安阳市近地面臭氧污染特征及气象影响因素分析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(1): 115-124.
Yang J, Yin S S, Yu S J, *et al.* Characteristic of surface ozone and meteorological parameters analysis in Anyang City [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(1): 115-124.
- [17] 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.
- [18] 易睿, 王亚林, 张殷俊, 等. 长江三角洲地区城市臭氧污染特征与影响因素分析[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(8): 2370-2377.
Yi R, Wang Y L, Zhang Y J, *et al.* Pollution characteristics and influence factors of ozone in Yangtze River Delta [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(8): 2370-2377.
- [19] 张宇静, 赵天良, 殷翀之, 等. 徐州市大气 PM_{2.5} 与 O₃ 作用关系的季节变化[J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(6): 2267-2272.
Zhang Y J, Zhao T L, Yin C Z, *et al.* Seasonal variation of the relationship between surface PM_{2.5} and O₃ concentrations in Xuzhou [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(6): 2267-2272.
- [20] 王俏丽, 董敏丽, 李素静, 等. 舟山市臭氧污染分布特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2019, **40**(3): 1143-1151.
Wang Q L, Dong M L, Li S J, *et al.* Characteristics of ozone pollution distribution and source apportionment in Zhoushan [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(3): 1143-1151.
- [21] 余钟奇, 马井会, 毛卓成, 等. 2017 年上海臭氧污染气象条件分析及臭氧污染天气分型研究[J]. *气象与环境学报*, 2019, **35**(6): 46-54.
Yu Z Q, Ma J H, Mao Z C, *et al.* Study on the meteorological conditions and synoptic classifications of O₃ pollution in Shanghai in 2017 [J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2019, **35**(6): 46-54.
- [22] 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.
- [23] 柴敏平, 罗勇, 商娟, 等. 江西省城市空气臭氧污染状况及时空分布特征[J]. *江西科学*, 2018, **36**(1): 95-100.
Chai M P, Luo Y, Shang J, *et al.* Pollution status of ozone and its characteristics of temporal and spatial distribution in the cities of Jiangxi province [J]. *Jiangxi Science*, 2018, **36**(1): 95-100.
- [24] Draxler R R, Hess G D. Description of the HYSPLIT 4 modelling system [R]. Silver Spring, Maryland: NOAA, Air Resources Laboratory, 1997.
- [25] Wang Y Q, Zhang X Y, Draxler R R. TrajStat: GIS-based software that uses various trajectory statistical analysis methods to identify potential sources from long-term air pollution measurement data [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2009, **24**(8): 938-939.
- [26] Begum B A, Kim E, Jeong C H, *et al.* Evaluation of the potential source contribution function using the 2002 Quebec forest fire episode [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(20): 3719-3724.
- [27] Karaca F, Anil I, Alagha O. Long-range potential source contributions of episodic aerosol events to PM₁₀ profile of a megacity [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(36): 5713-

- 5722.
- [28] Monks P S. A review of the observations and origins of the spring ozone maximum[J]. *Atmospheric Environment*, 2000, **34**(21): 3545-3561.
- [29] Cooper O R, Moody J L. Meteorological controls on ozone at an elevated eastern united states regional background monitoring site [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2000, **105**(D5): 6855-6869.
- [30] 曹庭伟, 吴锴, 康平, 等. 成渝城市群臭氧污染特征及影响因素分析[J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(4): 1275-1284.
Cao T W, Wu K, Kang P, *et al.* Study on ozone pollution characteristics and meteorological cause of Chengdu-Chongqing urban agglomeration[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(4): 1275-1284.
- [31] 李顺姬, 李红, 陈妙, 等. 气象因素对西安市西南城区大气中臭氧及其前体物的影响[J]. *气象与环境学报*, 2018, **34**(4): 59-67.
Li S J, Li H, Chen M, *et al.* Effect of meteorological parameters on ozone and its precursors in the southwest urban area of Xi'an [J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2018, **34**(4): 59-67.
- [32] 徐锴, 刘志红, 何沐全, 等. 成都市夏季近地面臭氧污染气象特征[J]. *中国环境监测*, 2018, **34**(5): 36-45.
Xu K, Liu Z H, He M Q, *et al.* Meteorological characteristics of O₃ pollution near the ground in summer of Chengdu [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2018, **34**(5): 36-45.



CONTENTS

Chemical Characteristics and Source Apportionment of Organic Aerosols in Atmospheric PM _{2.5} in Winter in Beijing	XU Nan, WANG Tian-tian, LI Xiao, <i>et al.</i> (2101)
Characteristics of Two Pollution Episodes Before and After City Heating in Beijing from February to March of 2019	YIN Xiao-mei, PU Wei-wei, WANG Ji-kang, <i>et al.</i> (2110)
Analysis of Characteristics and Causes of a Typical Haze Pollution in Beijing in the Winter of 2019	LIAN Han-yang, YANG Xin, ZHANG Pu, <i>et al.</i> (2121)
New Particle Formation Events in Summer and Winter in the Coastal Atmosphere in Qingdao, China	SUN Yue, ZHU Yu-jiao, MENG He, <i>et al.</i> (2133)
Characteristics of Heavy Metal Pollution and Ecological Risk Evaluation of Indoor Dust from Urban and Rural Areas in Taiyuan City During the Heating Season	HUANG Hao, XU Zi-qi, YAN Jun-xia, <i>et al.</i> (2143)
Concentration Analysis and Health Risk Assessment of Air Pollutants in Newly Decorated Public Places in Xi'an	FAN Jie, FAN Hao, SHEN Zhen-xing, <i>et al.</i> (2153)
Emission Concentration and Characteristics of Particulate Matter and Water-Soluble Ions in Exhaust Gas of Typical Combustion Sources with Ultra-Low Emission	HU Yue-qi, WANG Zheng, GUO Jian-hui, <i>et al.</i> (2159)
High-Throughput Sequencing Analysis of Microbial Communities in Summertime Atmospheric Particulate Matter in Hefei City	JIANG Shao-yi, SUN Bo-wen, DAI Hai-tao, <i>et al.</i> (2169)
Spatiotemporal Variations in Fine Particulate Matter and the Impact of Air Quality Control in Zhengzhou	DONG Zhe, YUAN Ming-hao, SU Fang-cheng, <i>et al.</i> (2179)
Characteristics of Ozone Pollution and Relationships with Meteorological Factors in Jiangxi Province	QIAN Yue, XU Bin, XIA Ling-jun, <i>et al.</i> (2190)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Aerosol Optical Properties in Urban Agglomerations on the North Slope of the Tianshan Mountains	ZHANG Zhe, DING Jian-li, WANG Jin-jie, <i>et al.</i> (2202)
Comprehensive Classification Method of Urban Water by Remote Sensing Based on High-Resolution Images	YANG Zi-qian, LIU Huai-qing, LÜ Heng, <i>et al.</i> (2213)
Construction and Application Optimization of the Chl-a Forecast Model ARIMA for Lake Taihu	LI Na, LI Yong, FENG Jia-cheng, <i>et al.</i> (2223)
Spatial Differences in Water Quality and Spatial Autocorrelation Analysis of Eutrophication in Songhua Lake	DING Yang, ZHAO Jin-yong, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (2232)
Pollution and Irrigation Applicability of Surface Water from Wet, Normal, and Dry Periods in the Huixian Karst Wetland, China	ZHU Dan-ni, ZOU Sheng-zhang, LI Jun, <i>et al.</i> (2240)
Changes in Water Chemistry and Driving Factors in the Middle and Lower Reaches of the Beijing-Hangzhou Grand Canal	CHENG Zhong-hua, DENG Yi-xiang, ZHUO Xiao-ke, <i>et al.</i> (2251)
Effects of Different Land Use Practices on Nitrogen Loss from Runoff During Rainfall Events	LUO Yi-feng, CHEN Fang-xin, ZHOU Hao, <i>et al.</i> (2260)
Sources and Fate of Nitrate in Groundwater in a Typical Karst Basin: Insights from Carbon, Nitrogen, and Oxygen Isotopes	REN Kun, PAN Xiao-dong, LIANG Jia-peng, <i>et al.</i> (2268)
Changes in the Bacterioplankton Community Between "Ice" and "Water" in the Frozen Dali Lake	LI Wen-bao, YANG Xu, TIAN Ya-nan, <i>et al.</i> (2276)
Analysis of the Spatial Changes in Bacterial Communities in Urban Reclaimed Water Channel Sediments; A Case Study of the North Canal River	QIU Ying, JIN Yan, SU Zhen-hua, <i>et al.</i> (2287)
Spatial Differences and Influencing Factors of Denitrification and ANAMMOX Rates in Spring and Summer in Lake Taihu	ZHAO Feng, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i> (2296)
Structural Characteristics of Zooplankton and Phytoplankton Communities and Its Relationship with Environmental Factors in a Typical Tributary Reservoir in the Three Gorges Reservoir Region	CHEN Sha, XIE Qing, FU Mei, <i>et al.</i> (2303)
Application of Iron and Sulfate-Modified Biochar in Phosphorus Removal from Water	SANG Qian-qian, WANG Fang-jun, ZHAO Yuan-tian, <i>et al.</i> (2313)
Analysis of the Performance and Mechanism of Phosphorus Removal in Water by Steel Slag	LUO Xiao, ZHANG Jun-bo, HE Lei, <i>et al.</i> (2324)
Adsorption of BS-18 Amphoterically Modified Bentonite to Tetracycline and Norfloxacin Combined Pollutants	WANG Xin-xin, MENG Zhao-fu, LIU Xin, <i>et al.</i> (2334)
Preparation of Ag ₃ PO ₄ /g-C ₃ N ₄ Composite Photocatalysts and Their Visible Light Photocatalytic Performance	GAO Chuang-chuang, LIU Hai-cheng, MENG Wu-shuang, <i>et al.</i> (2343)
Activation of Permonosulfate by Rhodamine B for BPA Degradation Under Visible Light Irradiation	ZHANG Yi-chen, BAI Xue, SHI Juan, <i>et al.</i> (2353)
Fe-Ti Co-Doped Alumina-Induced Surface Dual Reaction Center for Catalytic Ozonation to Remove Pollutants from Water	ZHANG Fan, SONG Yang, HU Chun, <i>et al.</i> (2360)
Preparation of Sulfidated Copper-Iron Bimetallic Compositing Material and Its Mechanism for Chromium Removal	QU Min, WANG Yuan, CHEN Hui-xia, <i>et al.</i> (2370)
Mechanisms of Penicillin Wastewater Treatment by Coupled Electrocatalytic and Bioelectrochemical Systems	QU You-peng, LÜ Jiang-wei, DONG Yue, <i>et al.</i> (2378)
Aerobic Granular Sludge Operation and Nutrient Removal Mechanism from Domestic Sewage in an Anaerobic/Aerobic Alternating Continuous Flow System	LI Dong, YANG Jing-wei, LI Yue, <i>et al.</i> (2385)
In-situ Phosphorus Removal Activity and Impact of the Organic Matter Concentration on Denitrifying Phosphorus Removal in Sludge Aggregates	LÜ Yong-tao, JIANG Xiao-tong, TU Yan, <i>et al.</i> (2396)
In-situ Sludge Reduction Technology Based on Ozonation	XUE Bing, LIU Bin-han, WEI Ting-ting, <i>et al.</i> (2402)
Effects of Activated Carbon on the Fate of Antibiotic Resistance Genes During Anaerobic Digestion of the Organic Fraction of Municipal Solid Waste	MA Jia-ying, WANG Pan-liang, WANG Bing-han, <i>et al.</i> (2413)
Release Mechanisms of Carbon Source and Dissolved Organic Matter of Six Agricultural Wastes in the Initial Stage	LING Yu, YAN Guo-kai, WANG Hai-yan, <i>et al.</i> (2422)
Spatial Differentiation of Soil Organic Carbon Density and Influencing Factors in Typical Croplands of China	LI Cheng, WANG Rang-hui, LI Zhao-zhe, <i>et al.</i> (2432)
Characteristics of Paddy Soil Organic Carbon Mineralization and Influencing Factors Under Different Water Conditions and Microbial Biomass Levels	LIU Qi, LI Yu-hong, LI Zhe, <i>et al.</i> (2440)
Analysis of Nitrogen Transformation Characteristics and Influencing Factors of Forestland Soil in the Qinghai-Tibet Plateau; A Case Study of the Qilian Mountains and Southeast Tibet	HE Fang, ZHANG Li-mei, SHEN Cong-cong, <i>et al.</i> (2449)
Using the Matter-Element Extension Model to Assess Heavy Metal Pollution in Topsoil in Parks in the Main District Park of Lanzhou City	HU Meng-jun, LI Chun-yan, LI Na-na, <i>et al.</i> (2457)
Effects of Long-Term Application of Chemical Fertilizers and Organic Fertilizers on Heavy Metals and Their Availability in Reddish Paddy Soil	XIA Wen-jian, ZHANG Li-fang, LIU Zeng-bing, <i>et al.</i> (2469)
Characteristics and Origins of Heavy Metals in Soil and Crops in Mountain Area of Southern Sichuan	HAN Wei, WANG Cheng-wen, PNEG Min, <i>et al.</i> (2480)
Spatial Distribution Characteristics, Source Apportionment, and Risk Assessment of Topsoil PAHs in the Core Area of the Ningdong Energy and Chemical Industry Base	YANG Fan, LUO Hong-xue, ZHONG Yan-xia, <i>et al.</i> (2490)
Functional Stability and Applicability of Heavy Metal Passivators in Reducing Cd Uptake by Lettuce	PANG Fa-hu, WU Xue-jiao, KONG Xue-fei, <i>et al.</i> (2502)
Effects of Water Management on Cadmium Accumulation by Rice (<i>Oryza sativa</i> L.) Growing in Typical Paddy Soil	ZHANG Yu-ting, TIAN Ying-bing, HUANG Dao-you, <i>et al.</i> (2512)
Adsorption Properties of Oiltea Camellia Shell-Modified Biochar and Effects of Coupled Waterlogging on Soil Cd Morphology	CAI Tong, DU Hui-hui, LIU Xiao-li, <i>et al.</i> (2522)
Effects of Land Use Changes on Soil Fungal Community Structure and Function in the Riparian Wetland Along the Downstream of the Songhua River	XU Fei, ZHANG Tuo, HUAI Bao-dong, <i>et al.</i> (2531)
Distribution of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in a Fishery Reclamation Mining Subsidence Area	CHENG Sen, LU Ping, FENG Qi-yan (2541)
Effects of Three Commonly Used Herbicides on Bacterial Antibiotic Resistance	LI Xi, LIAO Han-peng, CUI Peng, <i>et al.</i> (2550)
Discussion of Microbial Control Standards of Water Reclamation and Formulation Methods	CHEN Zhuo, CUI Qi, CAO Ke-fan, <i>et al.</i> (2558)