

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

基于碳减排目标与排放标准约束情景的火电大气污染物减排潜力

李辉, 孙雪丽, 庞博, 朱法华, 王圣, 晏培



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年12月

第42卷 第12期
Vol.42 No.12

目次(卷终)

基于碳减排目标与排放标准约束情景的火电大气污染物减排潜力	李辉, 孙雪丽, 庞博, 朱法华, 王圣, 晏培 (5563)
汽修行业挥发性有机物排放与控制现状及对策	王海林, 杨涛, 聂磊, 方莉, 张中申, 郝郑平 (5574)
西宁市生物质燃烧源大气污染物排放清单	高玉宗, 姬亚芹, 林孜, 林宇, 杨益 (5585)
新冠疫情期间四川盆地空气质量及影响因素分析	陈军辉, 冯小琼, 李媛, 王书肖 (5594)
基于 iLME + Geoi-RF 模型的四川省 PM _{2.5} 浓度估算	吴宇宏, 杜宁, 王莉, 蔡宏, 周彬, 吴磊, 敖逍 (5602)
《大气污染防治行动计划》后期成都大气 PM _{2.5} 中水溶性无机离子特征	李佳琪, 张军科, 董贵明, 邓嘉琳, 刘子锐, 王跃思 (5616)
洛阳市大气细颗粒物化学组分特征及溯源分析	孙佳候, 董喆, 李利萍, 刘洋, 陈红阳, 张瑞芹 (5624)
北京市黑碳气溶胶浓度特征及其主要影响因素	曹阳, 安欣欣, 刘保献, 景宽, 王琴, 罗霄旭 (5633)
天津市郊夏季 VOCs 化学特征及其时间精细化的来源解析	王艺璇, 刘保双, 吴建会, 张裕芬, 冯银厂 (5644)
沈阳市挥发性有机物污染特征及反应活性	杜寒冰, 王男, 任万辉, 苏枞枞, 胡建林, 于兴娜 (5656)
典型化工集中区环境空气 SVOCs 污染特征及来源解析	葛祥, 吴健, 高松, 冯加良, 陈俊伟, 张舒惟, 焦正 (5663)
南京毒性挥发性有机化合物夏冬季源解析及健康风险评估	张子金, 林煜棋, 张煜烟, 曹梦瑶, 章炎麟 (5673)
基于排放清单和实地测试的工业 VOCs 排放特征: 以郑州市高新区为例	任何, 卢轩, 刘洋, 尹沙沙, 胡鹤霄 (5687)
我国水性建筑涂料 VOCs 排放特征及其环境影响	高美平, 王海林, 刘文文, 聂磊, 李国昊, 安小栓 (5698)
VOCs 源强不确定性对臭氧生成及污染防治影响的模拟分析	王峰, 汪健伟, 杨宁, 翟菁, 侯灿 (5713)
山东省 O ₃ 时空分布及影响因素分析	张森, 丁椿, 李彦, 王桂霞, 林晶晶, 孟赫, 许杨 (5723)
2020 年成都市典型臭氧污染过程特征及敏感性	钱骏, 徐晨曦, 陈军辉, 姜涛, 韩丽, 王成辉, 李英杰, 王波, 刘政 (5736)
基于高分辨率在线测量的轻型汽油车含氧挥发性有机物排放模型构建	郝钰琦, 袁自冰, 王梦雷, 沙青娥, 杜新悦, 刘元向, 刘学辉, 段乐君, 袁斌, 郑君瑜, 邵敏, 闫宇 (5747)
三重属性的承载力约束下中国水资源利用效率动态演进特征分析	张凯, 吴凤平, 成长春 (5757)
长江流域总氮排放量预测	丁肇慰, 郑华 (5768)
1980~2015 年长江流域净人为氮输入与河流氮输出动态特征	姚梦雅, 胡敏鹏, 陈丁江 (5777)
黄河水环境特征与氮磷负荷时空分布	韩谔, 潘保柱, 陈越, 刘亚平, 侯易明 (5786)
基于氮氧同位素解析不同降雨条件下硝酸盐污染源	邢子康, 余钟波, 衣鹏, 钱睿智, 王嘉毅 (5796)
水源水库真核微生物种群结构季相演替特征	张海涵, 黄鑫, 黄廷林, 刘凯文, 马曼丽, 刘祥, 苗雨甜, 宗容容 (5804)
达里湖表层水体浮游细菌群落结构的夏-冬季节差异	李文宝, 郭鑫, 张博尧, 杜蕾, 田雅楠 (5814)
尾水排放对受纳水体底栖生物膜细菌群落和水溶性有机质的影响机制	王钰涛, 范晨阳, 朱金鑫, 李轶, 王龙飞 (5826)
武汉典型饮用水水源中典型 POPs 污染特征与健康风险评估	张坤峰, 付青, 涂响, 昌盛, 樊月婷, 孙兴滨, 王山军 (5836)
上海沙田湖养殖区及周边水体中氟喹诺酮类抗性基因的分布特征及其与环境因子关系	徐慕, 李世豪, 马巾, 王丽卿, 张玮 (5848)
曝气人工湿地脱除低污染水中氮的影响因素	李琳琳, 李荣涛, 孔维静, 杨苹果, 杜志超, 毕斌, 卢少勇 (5857)
水平潜流人工湿地对畜禽养殖废水中特征污染物的去除	赵伟, 范增增, 杨新萍 (5865)
木屑生物炭对填料土的氮磷吸附及雨水滞留改良影响	孟依柯, 王媛, 汪传跃, 王报 (5876)
黑臭河道中聚乙烯醇/海藻酸钠固定微米沸石粉去除氨氮	魏超, 陈涛, 江桥, 王姝, 邱伟建, 成小英 (5884)
玉米秸秆生物炭对灰钙土吸附金霉素的影响	南志江, 蒋煜峰, 毛欢欢, 梁新茹, 邓雪儒 (5896)
饮用水砂滤池中微生物对微量污染物的降解潜力与途径	周洁, 王东麟, 林慧, 柏耀辉 (5905)
污水分析方法监测城市毒品滥用长期趋势	曹禹, 董小棠, 邵雪婷, 刘琳, 王德高 (5912)
阿奇霉素和铜对活性污泥古菌群落和 ARGs 的胁迫影响及后效应	高玉玺, 李星, 赵君如, 张忠兴, 樊晓燕 (5921)
典型冶炼行业场地土壤重金属空间分布特征及来源解析	李强, 曹莹, 何连生, 王耀峰, 龚成, 何书涵 (5930)
我国焦化场地多环芳烃和重金属分布情况及生态风险评价	王耀峰, 何连生, 姜登岭, 曹莹, 李强, 官健 (5938)
浙江省香榧主产区土壤重金属空间异质性及其生态风险	王敏, 董佳琦, 白龙龙, 张勇, 蒋仲龙, 姜雯雯, 吴家森, 张璐瑶, 方嘉, 傅伟军 (5949)
北方农田镉污染土壤玉米生产阈值及产区划分初探	管伟豆, 郭堤, 王萍, 张增强, 李荣华 (5958)
典型铅锌矿区耕地土壤团聚体重金属含量与农作物含量相关性及其风险评价	强瑞, 李英菊, 罗谦, 陈美凤, 李海燕, 黄先飞, 秦樊鑫 (5967)
雄安新区企业周边农田土壤-作物系统重金属污染风险及累积效应	周亚龙, 王乔林, 王成文, 刘飞, 宋云涛, 郭志娟, 杨志斌 (5977)
铜仁土壤-水稻重金属累积效应与安全种植区划	朱亮亮, 吴勇, 周浪, 唐乐斌, 宋波 (5988)
干湿交替对铈锰改性生物炭固定红壤 As 的影响	黄晓雅, 李莲芳, 朱昌雄, 黄金丽, 吴翠霞, 叶婧 (5997)
铵态氮肥和腐殖酸协同促进孔雀草对土壤中 Cd 的去除	王冰清, 阳琴, 李虹颖, 熊启中, 徐刚, 孙瑞波, 田达, 李军利, 郇建建, 叶新新 (6006)
稻田灌溉河流 CH ₄ 和 N ₂ O 排放特征及影响因素	吴双, 杨蔚桐, 盛扬悦, 方贤滔, 张天睿, 胡靖, 刘树伟, 邹建文 (6014)
节水灌溉和控释肥施用耦合措施对单季稻田 CH ₄ 和 N ₂ O 排放的影响	王永明, 徐永记, 纪洋, 冯彦房 (6025)
有机无机配施下西北旱区麦田土壤 N ₂ O 的排放特征及微生物特性	王楷, 史雷, 马龙, 王书婷, 张然, 郑伟, 李紫燕, 翟丙年 (6038)
不同秸秆还田方式对旱地红壤细菌群落、有机碳矿化及玉米产量的影响	孔培君, 郑洁, 栾璐, 陈紫云, 薛敬荣, 孙波, 蒋瑞霖 (6047)
氮磷添加对盐渍化草地土壤微生物特征的影响	杨建强, 刁华杰, 胡姝姝, 陈晓鹏, 王常慧 (6058)
化肥和有机肥配施生物炭对紫色土壤养分及磷赋存形态的影响	向书江, 余砾, 熊子怡, 罗东海, 王莹燕, 邓正昕, 王子芳, 高明 (6067)
浒苔生物炭与木醋液复配改良碱化土壤效果及提高油菜产量	王正, 孙兆军, Sameh El-Sawy, 王珍, 何俊, 韩磊, 邹本涛 (6078)
《环境科学》第42卷(2021年)总目录	(6091)
《环境科学》征订启事(5593) 《环境科学》征稿简则(5623) 信息(5643, 5835, 5883)	

山东省 O₃ 时空分布及影响因素分析

张淼¹, 丁椿², 李彦¹, 王桂霞¹, 林晶晶¹, 孟赫³, 许杨^{1*}

(1. 山东省生态环境监测中心, 济南 250101; 2. 中科三清科技有限公司, 北京 100029; 3. 山东省青岛生态环境监测中心, 青岛 266003)

摘要: 为认识山东省环境空气中 O₃ 的污染现状, 基于 2015 ~ 2019 年国省控环境空气自动监测站的 O₃ 监测数据、2019 ~ 2020 年 4 ~ 9 月气象代表站的气象数据及邻近环境空气站的 O₃ 监测数据, 探究了山东省 O₃ 时空分布特征及与气象因素的关系。结果表明, 山东省 O₃ 污染日益突出, 年均 $\rho(\text{O}_3\text{-}8\text{h})$ (90 百分位) 和 $\rho(\text{O}_x)$ (O₃ 与 NO₂ 之和) 升高速率分别为 7.6 $\mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{a})^{-1}$ 和 7.0 $\mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{a})^{-1}$, 年均 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 、 $\rho(\text{CO})$ (95 百分位数) 和 $\rho(\text{NO}_2)$ 均逐步下降, 下降速率均小于 $\rho(\text{O}_3)$ 上升速率。O₃ 污染呈现夏季高冬季低的“M 型”或“倒 V 型”月变化特征, 在 6 月或 9 月达到峰值, 且污染月呈提前出现趋势。山东省年均 $\rho(\text{O}_3\text{-}8\text{h})$ (90 百分位) 呈现“内陆高, 沿海低”的特点, 并有区域均匀性发展趋势。相关性分析表明, 山东省 $\rho(\text{O}_3\text{-}8\text{h})$ 总体与日最高温度呈正相关, 与相对湿度、气压和风速呈负相关, 其中日最高温度和相对湿度是 O₃-8h 主控气象因子, 气象因素对不同城市 O₃-8h 超标率的影响具有显著差异。

关键词: 臭氧(O₃); 污染特征; 时空分布; 气象因子; 山东省

中图分类号: X515 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)12-5723-13 DOI: 10.13227/j.hjxx.202102034

Spatial and Temporal Distribution of Ozone and Influencing Factors in Shandong Province

ZHANG Miao¹, DING Chun², LI Yan¹, WANG Gui-xia¹, LIN Jing-jing¹, MENG He³, XU Yang^{1*}

(1. Shandong Provincial Eco-Environment Monitoring Center, Jinan 250101, China; 2. Clear Science & Technology Co., Ltd., Beijing 100029, China; 3. Qingdao Eco-Environment Monitoring Center of Shandong Province, Qingdao 266003, China)

Abstract: Surface ozone pollution has emerged as a severe problem in China during the past several years, especially in Shandong Province. This study analyzed the temporal and spatial distribution of $\rho(\text{surface ozone, O}_3)$ concentration in Shandong Province and its relationship with meteorological factors, such as air temperature, relative humidity, air pressure, wind direction, and wind speed. Concentrations of PM_{2.5} and air pollutants from 2015 to 2019 were collected from the national and provincial ambient air monitoring network. Meteorological data from April to September 2019 to 2020 were also collected from the meteorological representative stations. The results showed that the ozone pollution in Shandong Province became increasingly serious in recent years. The annual concentration growth rate of $\rho(\text{O}_3\text{-}8\text{h})$ (90th percentile) and $\rho(\text{O}_x)$ (sum of ozone and NO₂) were 7.6 $\mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{a})^{-1}$ and 7.0 $\mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{a})^{-1}$, respectively. The annual concentrations of PM_{2.5} and ozone precursors (CO and NO₂) were gradually decreasing, and those decreasing rates were smaller than the growth rate of annual $\rho(\text{O}_3\text{-}8\text{h})$ (90th percentile). The variation pattern of monthly $\rho(\text{O}_3)$ concentrations were shown to be “M-type” or “inverted V-type”. The monthly $\rho(\text{O}_3\text{-}8\text{h})$ (90th percentile) was higher in summer and lower in winter. The monthly peaks in $\rho(\text{O}_3\text{-}8\text{h})$ (90th percentile) were found in June and September. Moreover, the occurrence of ozone-polluted days was a trend in advance. The spatial distribution of ozone concentration in Shandong Province was characterized as higher in the inland cities and lower in the coastal cities, and there was a trend of regional uniformity. Correlation analysis results showed that the concentration of $\rho(\text{O}_3)$ in Shandong Province was positively correlated with the maximum daily temperature and negatively related to the relative humidity, air pressure, and wind speed. The daily maximum temperature and relative humidity were the main meteorological factors. Additionally, the impact of meteorological factors on O₃ over the standard rate showed significant differences in different cities.

Key words: ozone (O₃); pollution characteristics; temporal and spatial distribution; meteorological factors; Shandong Province

对流层臭氧(O₃)是一种由氮氧化物(NO_x)和挥发性有机物(VOCs)等前体物经过一系列复杂的光化学反应生成的二次污染物, 不仅会影响环境空气质量, 也会对人体健康造成不同程度的危害^[1~5]。自 20 世纪 70 年代开始我国相继出现区域性光化学污染^[6~8], 2012 年生态环境部颁布的环境空气质量标准(GB 3095-2012)中首次将 O₃ 设为了常规监测项目^[9], O₃ 污染日益受到重视。近年来, 由细颗粒物(PM_{2.5})和 O₃ 引起的区域复合型大气污染问题日益凸显, 已成为制约空气质量持续改善的重要因素^[10~13], 因此研究区域长时间 O₃ 时空分布规律及变化趋势具有重要的现实和理论意义。

有研究发现 2016 ~ 2018 年全国 $\rho(\text{O}_3)$ (90 百分位数) 明显上升, 由 2016 年的 141.54 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 上升到 2018 年的 153.21 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ^[14], O₃ 污染呈逐年加重趋势^[15], 且呈现出明显的区域性特征。余益军等^[16]的研究指出, 京津冀及周边地区 $\rho(\text{O}_3)$ 较高的月份由单峰型(5 月)向双峰型(5 ~ 6 月和 9 月)演变, 且不同季节的 O₃ 主控气象因子不同, 春夏秋冬

收稿日期: 2021-02-04; 修订日期: 2021-05-17

基金项目: 2020 年度山东省自然科学基金重大基础研究项目(ZR2020ZD21)

作者简介: 张淼(1979 ~), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为环境空气质量预报与监测, E-mail: zhangmiao@shandong.cn

* 通信作者, E-mail: xuyang8659@163.com

均为气温主导,冬季为相对湿度与风速共同主导.赵伟等^[17]的研究指出了长三角地区 O_3 浓度月变化呈现不规则的“M 型”,在 5 月及 7~9 月出现峰值.蒲茜等^[18]的研究指出珠江三角洲地区 O_3 浓度呈秋季高,春季次之,冬夏季低的特点.赵辉等^[19]的研究指出成渝城市群 O_3 污染超标主要集中在 4~9 月,高浓度 O_3 出现时的天气类型以低压西北侧型、低压后部型和高压西侧型为主.孙银川等^[20]和闫慧等^[21]的研究指出 O_3 污染不仅与本地生成有关,也会受到区域传输的影响,而本文重点讨论山东省 O_3 污染的本地化特征,有助于推进区域性 O_3 联防联控. O_3 会受到多种气象因素的共同影响,通常在晴天少云高温低湿小风的气象条件下 O_3 浓度较高,但不同地区和城市之间存在一定差异^[22,23].近年,部分城市开展了气象因素对 O_3 浓度影响的定性及定量评估^[24~29],而本文从双变量及多元线性回归分析的角度评估气象因素对 O_3 的影响,对掌握 O_3 的消长规律具有重要意义.

山东省作为我国经济第三强省,工业和农业较发达,受 O_3 前体物的大量排放及区域传输的共同影响, O_3 污染日趋严峻,而且山东省地形和气候差异性较大, O_3 体现出一定的空间性特征,然而目前关于山东省 O_3 污染研究大多以单个城市为对象^[30~33],亟需对山东省 O_3 污染特征与影响因素开展研究.因此,本文以山东省为研究区域,基于长时间空气质量自动监测数据及气象数据,开展山东省

O_3 污染的时空分布特征和影响要素的定性定量评估研究,以期为本区域 O_3 问题识别及管控提供理论参考.

1 材料与方法

1.1 数据来源

选取山东省为研究区域,研究时段为 2015-01-01~2019-12-31, $PM_{2.5}$ 、 O_3 、 NO_2 和 CO 在线监测数据来源于山东省国省控城市环境空气质量自动监测点位(“空气站”),监测设备运行符合环境空气质量自动监测技术规范(HJ/T 193-2005)的相关要求.按照环境空气质量标准(GB 3095-2012)的要求,对原始数据进行质量控制.剔除原始数据中小时 $\rho(O_3) \leq 0$ 的值和缺测值;若日缺测数据超过 4 h,则剔除本日数据;若月 O_3 -8h 数据少于 27 个(2 月少于 25 个),则剔除本月数据;若年 O_3 -8h 数据少于 324 个,则剔除本空气站全年数据.城市每日 $\rho(O_3$ -8h)由各空气站的算术平均值得出,取当月和当年 $\rho(O_3$ -8h)的第 90 百分位数作为本月和本年的 $\rho(O_3)$.气象数据(温度 T 、相对湿度 RH、气压 p 和风速 v)取自山东省 16 市空气代表站的逐 3 h 数据,取算术平均值作为日均值,数据时间为 $\rho(O_3)$ 较高月份(2019-04-01~2019-09-31 和 2020-04-01~2020-09-31),选取与之距离最近的空气站同期 $\rho(O_3$ -8h)数据分析 O_3 与气象因子的关系,选取的气象代表站、临近空气站的点位名称及二者距离见表 1.

表 1 山东省各市气象代表站与临近空气站点名称及两点位距离

Table 1 Names and distances of meteorological representative sites and environmental monitoring sites in Shandong Province

气象代表站	临近空气站	距离/km	气象代表站	临近空气站	距离/km
东营	东营市环境局	1.3	淄博	人民公园	5.1
滨州	博兴一中	2.9	济南	东城逸家小学	0.9
聊城	聊大东校	4.3	泰安	市监测站	0.9
德州	太阳城中学	3.6	菏泽	市气象局	0.5
青岛	市北区南部	3.3	济宁	济宁农业技术学校	2.1
威海	文登开发区	3.1	临沂	沂河小区	2.5
烟台	工商学院	3.2	枣庄	枣庄市环保局	0.7
潍坊	潍坊市环保局	4.9	日照	日照职业技术学院	4.5

1.2 O_3 超标的界定

根据环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行)(HJ 633-2012),将日 O_3 -8h 污染划分为 5 个等级:优($0 \sim 100 \mu g \cdot m^{-3}$)、良($101 \sim 160 \mu g \cdot m^{-3}$)、轻度污染($161 \sim 215 \mu g \cdot m^{-3}$)、中度污染($216 \sim 265 \mu g \cdot m^{-3}$)和重度污染($266 \sim 800 \mu g \cdot m^{-3}$),当 $\rho(O_3$ -8h) 超过 $160 \mu g \cdot m^{-3}$ 时为 O_3 污染日,并根据环境空气质量评价技术规范(HJ 663-2013)来进行 O_3 月度及年度达标评价.

1.3 统计模型

1.3.1 线性回归分析

运用 Origin 8.5 软件进行相关分析,计算得出年均 $\rho(PM_{2.5})$ 、 $\rho(O_3$ -8h)(90 百分位)和 $\rho(NO_2)$ 以及 O_3 -8h 年污染天数的年际变化率及相关系数.

1.3.2 双变量与多元线性回归分析

双变量相关分析用于评估多个变量之间的两两相关关系,而多元线性回归分析方法是确定因变量和多个自变量之间相互依赖的定量关系的统计分析

方法^[34]. 假设因变量 y 和 k 个自变量 $x_1, x_2, \dots, x_k$ 之间存在线性相关关系, y 和 x 之间的函数关系如公式(1)所示:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (1)$$

式中, β_0 为回归常数, $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ 为回归系数, ε 为回归残差. 若对因变量进行 n 次观测, 其观测值为 $x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ik}$, 其中 $i = 1, 2, \dots, n$.

运用 SPSS (statistical product and service solutions) 22.0 软件进行双变量相关分析印证各气象因子(日最高温度、日均相对湿度、日均气压和日均风速)与 $\rho(\text{O}_3)$ 的线性关系, 进而初步构建 $\rho(\text{O}_3-8\text{h})$ 与各气象因子的标准化多元线性回归分析方程, 得到各因子的标准化回归系数, 并作为评价各因子影响 $\rho(\text{O}_3)$ 强弱的指标.

2 结果与讨论

2.1 O₃ 污染的时空分布

2.1.1 O₃ 及其他环境因子年变化趋势

由图 1 可以看出, 2015~2019 年的年均 $\rho(\text{O}_3-8\text{h})$ (90 百分位, 下同) 逐年升高, 由 $154 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 上升至 $186 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 尤其在 2017 和 2019 年较前一年升幅明显, 2015~2016 年均低于国家二级标准 ($160 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), 2017 年后均超过该标准, 由线性回归分析可知增长速率为 $7.6 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{a})^{-1}$. 作为 O₃ 的重要前体物, 年均 $\rho(\text{NO}_2)$ 和 $\rho(\text{CO})$ (95 百分位, 下同) 范围分别为 $33 \sim 37 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $1.5 \sim 2.1 \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 均低于国家二级标准, 且呈总体下降趋势, 与 2015 年相比, 2018 年分别下降 11% 和 29%, 2019 年两者变化均不明显, 说明山东省对 NO₂ 及 CO 管控均有一定效果, 其中 CO 更为显著. 尽管年均 $\rho(\text{NO}_2)$ 微降, 但由于年均 $\rho(\text{O}_3-8\text{h})$ 大幅上升, 山东省年均 $\rho(\text{O}_x)$ 由 $191 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 增长至 $221 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 由线性回归分析可知增长速率为 $7.0 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{a})^{-1}$, 说明山东省大气氧化性逐步加强. 对流层 O₃ 有着复杂的生成机制, O₃ 与其前体物 NO_x 和 VOCs 呈现非线性关系^[35], 但本文基于空气站自动监测数据进行研究, 缺乏 VOCs 监测数据, 今后拟开展 O₃ 与 NO_x 和 VOCs 之间的响应关系研究.

PM_{2.5} 和 O₃ 引起的区域复合型大气污染问题日益凸显, 两者均是影响我国环境空气质量重要的污染物. 山东省年均 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 由 2015 年的 $72 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 下降至 2018 年的 $47 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 2019 年有小幅反弹, 各年均超过国家二级标准年均浓度 ($35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), 由线性回归分析可知下降速率为 $6.1 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{a})^{-1}$, 小于年均 $\rho(\text{O}_3-8\text{h})$ 增长速率. 根据相关报道, PM_{2.5} 与 O₃ 存在一定的相互作用, 一方面, O₃ 主导大气氧化性,

大气氧化性的上升会显著促进 PM_{2.5} 的二次转化, 而对秋冬季雾-霾产生重要影响^[36]; 另一方面, PM_{2.5} 主要组分(如硫酸盐、硝酸盐和碳组分等)有较大的消光系数, 可显著降低紫外辐射强度从而直接影响光化学反应^[37], 另外, PM_{2.5} 也会影响云物理过程从而间接影响 O₃^[38], 因此更需采取针对性措施来加强 PM_{2.5} 和 O₃ 的协同管控.

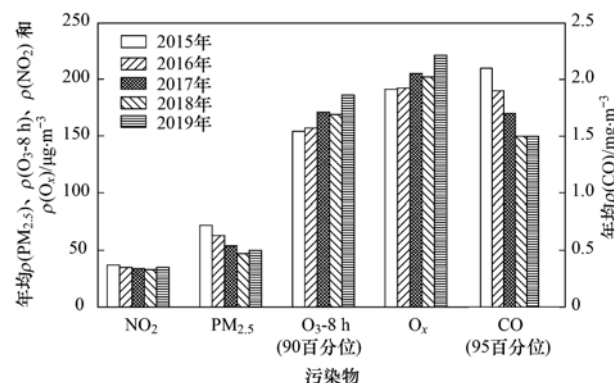


图 1 山东省 2015~2019 年的年均 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 、 $\rho(\text{O}_3-8\text{h})$ 、 $\rho(\text{NO}_2)$ 、 $\rho(\text{O}_x)$ 和 $\rho(\text{CO})$ 变化趋势

Fig. 1 Annual average concentrations of $\rho(\text{PM}_{2.5})$, $\rho(\text{O}_3-8\text{h})$, $\rho(\text{NO}_2)$, $\rho(\text{O}_x)$, and $\rho(\text{CO})$ from 2015 to 2019 in Shandong Province

2.1.2 O₃ 及其他环境因子月变化趋势

由图 2 可见, 各年月均 $\rho(\text{O}_3-8\text{h})$ (90 百分位, 下同) 最高值均出现在 6 月, 7~8 月迅速下降, 可能因为山东省 6 月气温高且太阳辐射强, 有利于 O₃ 生成, 而 7~8 月雨季降水量增多, 不利于 O₃ 生成, 对 O₃ 的湿清除作用较为明显. 2015~2019 年的每年 6 月的月均 $\rho(\text{O}_3-8\text{h})$ 分别为 186、181、209、214 和 215 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 呈总体上升趋势, 其中 2018 年增幅明显放缓, 可能与 2018 年 6 月上合组织青岛峰会期间, 山东省采取精细化 VOCs 和 NO_x 综合减排措施有关; 月均 $\rho(\text{O}_3-8\text{h})$ 最低值出现在 12 月或 1 月, 主要由于冬季气温低和太阳辐射弱, 不利于 O₃ 生成. 与 O₃ 相反, 月均 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 、 $\rho(\text{CO})$ (95 百分位, 下同) 和 $\rho(\text{NO}_2)$ 均在 12 月或 1 月达到峰值, 可能与冬季采暖及不利的大气扩散条件有关, 而它们分别在 8 月、5~8 月和 7 月达到谷值, 可能与夏季降雨量较大, 对这些污染物的湿清除作用增强有关.

月均 $\rho(\text{O}_3-8\text{h})$ 变化呈“M 型”或“倒 V 型”分布, 在 6 月或 9 月出现高峰, 说明夏季和秋季易出现 O₃ 高值. 将 $\rho(\text{O}_3-8\text{h})$ 超过 $160 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的月定义为 O₃ 污染月, 2015 年 O₃ 污染月为 5~9 月, 2016 年为 5~6 月和 9 月, 2017 年为 5~9 月, 2018 年和 2019 年均 4~9 月, 可见 O₃ 污染月有提前出现趋势. 分别计算春季(3~5 月)、夏季(6~8 月)、秋季(9~11 月)和冬季(12 月~次年 2 月)的季均 $\rho(\text{O}_3-$

8h) (90 百分位,下同),山东省 O_3 污染在夏季较重,冬季较轻,春季略高于秋季.其他环境因子中,月均 $\rho(PM_{2.5})$ 、 $\rho(CO)$ 和 $\rho(NO_2)$ 呈现“U 型”分布,冬季明显高于其他季节,与 O_3 均呈现明显的负相关关系,将各年的月均 $\rho(PM_{2.5})$ 、 $\rho(CO)$ 和 $\rho(NO_2)$ 分

别与 $\rho(O_3-8h)$ 进行线性拟合,拟合直线的 R^2 分别为 0.70、0.69 和 0.66,均通过显著性检验(见图 3),这与许多城市的结果相一致^[39,40],说明前体物排放是影响 $\rho(O_3)$ 的重要因素,且 $PM_{2.5}$ 与 O_3 的复合污染应受到进一步重视.

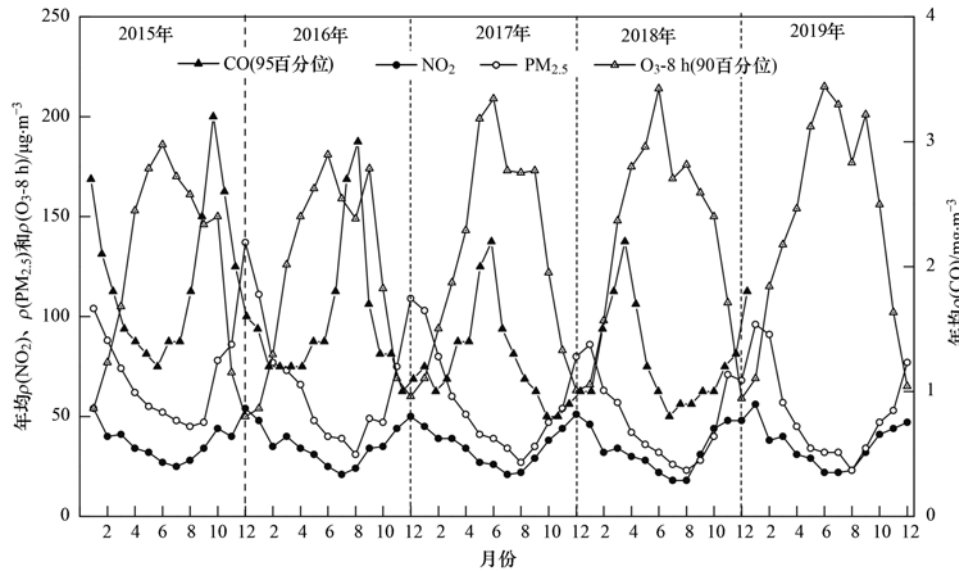


图2 山东省 2015~2019 年的月均 $\rho(NO_2)$ 、 $\rho(PM_{2.5})$ 、 $\rho(O_3-8h)$ 和 $\rho(CO)$ 变化趋势

Fig. 2 Monthly average concentrations of $\rho(NO_2)$, $\rho(PM_{2.5})$, $\rho(O_3-8h)$, and $\rho(CO)$ from 2015 to 2019 in Shandong Province

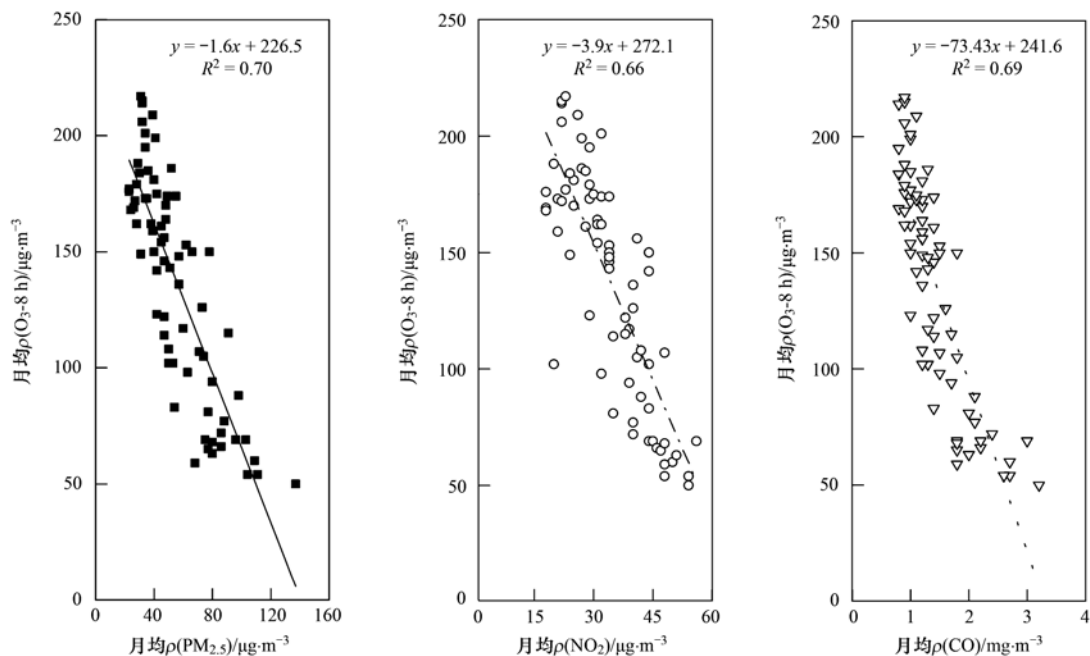


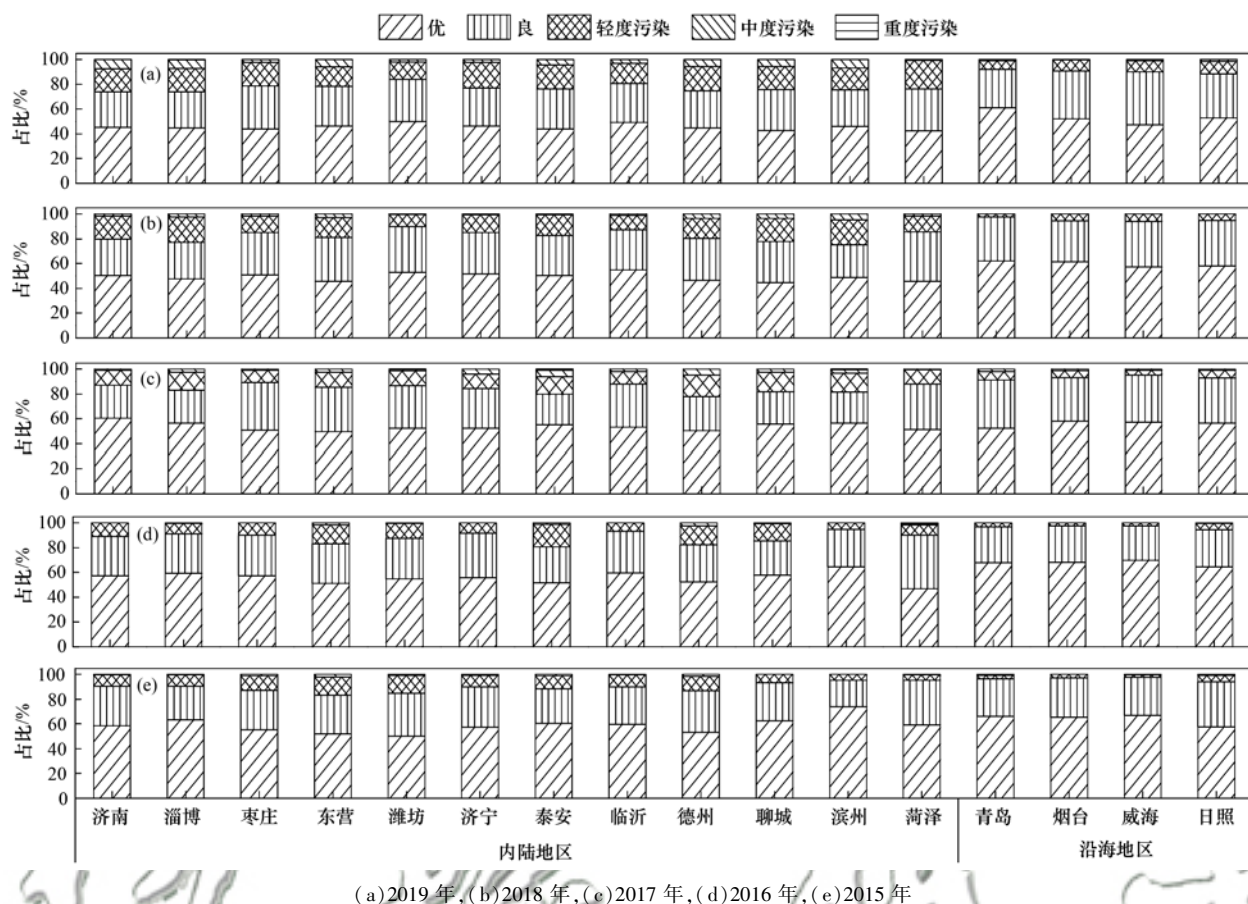
图3 月均 $\rho(CO)$ 、 $\rho(NO_2)$ 和 $\rho(PM_{2.5})$ 与 $\rho(O_3-8h)$ 的线性拟合

Fig. 3 Linear fitting of monthly average concentrations of $\rho(CO)$, $\rho(NO_2)$, $\rho(PM_{2.5})$, and $\rho(O_3-8h)$

2.1.3 O_3-8h 超标率变化趋势

统计 2015~2019 年山东省各市 O_3-8h 不同污染等级天数占比,如图 4 所示.各市 O_3-8h 达标率(优和良等级占比之和)大多超过 70%, O_3-8h 超标率相对较低,但呈逐年升高趋势,由 2015 年的 8.70% 上升至 2019 年的 19.56%,超标天中轻度污

染占比相对较大,且增长较为显著,中度污染占比次之,重度污染出现较少(共出现 7 d),其中低值 O_3 超标天增长更加显著.从空间范围上看,内陆城市 O_3-8h 超标率明显高于沿海城市,且呈快速增长趋势,济南、淄博、聊城、滨州和菏泽这 5 市 2019 年的 O_3-8h 超标率与 2015 年相比均增加 15% 以上,其中



(a)2019 年, (b)2018 年, (c)2017 年, (d)2016 年, (e)2015 年

图 4 山东省 2015 ~ 2019 年各市 O_3 -8h 不同污染等级天数占比

Fig. 4 Proportion of O_3 -8h exceeding the standard from 2015 to 2019 in Shandong Province

滨州 O_3 -8h 超标率增长 20%。沿海地区各市 O_3 -8h 超标率均低于 10%, 呈逐年微增趋势, 在 2017 年和 2019 年增加较快, 与 2.1.1 节中的统计结果相一致, 说明内陆地区与沿海地区相比, O_3 污染状况不容乐观, 值得进一步关注。

2.1.4 O_3 及其前体物污染空间分布变化趋势

利用 2015 ~ 2019 年国省控空气站监测数据来获得年均 $\rho(O_3-8h)$ 及其前体物 $\rho(NO_2)$ 的空间分布, 如图 5 所示。山东省各年 O_3 污染空间分布较为一致, 呈现“内陆高, 沿海低”的特点, 沿海地区受海风影响, 较低的气温、较高的相对湿度及较大的风速等较好地扩散条件, 不利于 O_3 的生成和积累^[41], $\rho(O_3)$ 相对较低。 O_3 前体物方面, 淄博年均 $\rho(NO_2)$ 高于全省平均水平, 在 $40 \sim 56 \mu g \cdot m^{-3}$ 之间, 可能与其以医药化工为主的经济结构有关; 烟台、青岛、威海、日照和枣庄这 5 市年均 $\rho(NO_2)$ 较低, 其中威海最低, 其他各市相差不大。从年际变化看, 2015 年, O_3 超标区域较为分散, 各市年均 $\rho(NO_2)$ 相差不大, 其中淄博和临沂明显高于全省水平。2016 年, O_3 超标区域有所扩大, 而各市年均 $\rho(NO_2)$ 有不同程度地降低, 其中淄博下降幅度较大。从 2017 年开始, 西部地区已呈现区域性 O_3 污染特征, 且年均浓度不断

加重, 沿海地区年均 $\rho(O_3)$ 相对较低, 但也呈逐年微增的趋势, 而各市年均 $\rho(NO_2)$ 在 2017 ~ 2018 年仍呈微降趋势, 2019 年有小幅反弹。由上可知, 山东省对 NO_2 的管控初见成效, 但 O_3 污染空间分布由点状向面状发展, 大气氧化性表现出均一化分布特征, 在 O_3 污染防治上更需发挥区域协同及联防联控的作用。另外, 文献[42]将山东省列为 VOCs 重点防治地区, 要求重点推进化工、石化和印刷等重点行业 VOCs 污染防治, 在进一步加强 NO_2 治理的同时, 更应注意 NO_2 与 VOCs 的联合管控。

2.2 气象要素对 O_3 的影响

2.2.1 O_3 与气象要素的相关性

O_3 是一种由大气光化学反应产生的二次污染物, 受气象因素影响较为显著^[43]。利用 $\rho(O_3)$ 较高月份 (2019-04-01 ~ 2019-09-31 和 2020-04-01 ~ 2020-09-31) 各市气象代表站的气象数据 (温度 T 、相对湿度 RH 、气压 p 和风速 v) 及邻近环境空气站 O_3 监测数据, 进行 SPSS 双变量相关分析可知, $\rho(O_3-8h)$ 与 T 、 RH 、 p 和 v 均显著相关, 显著性相关水平 P 均小于 0.01, Pearson 相关系数分别为 0.615、-0.292、-0.193 和 -0.168。考虑多个气象要素对 $\rho(O_3)$ 的共同影响, 初步构建山东省 16 市

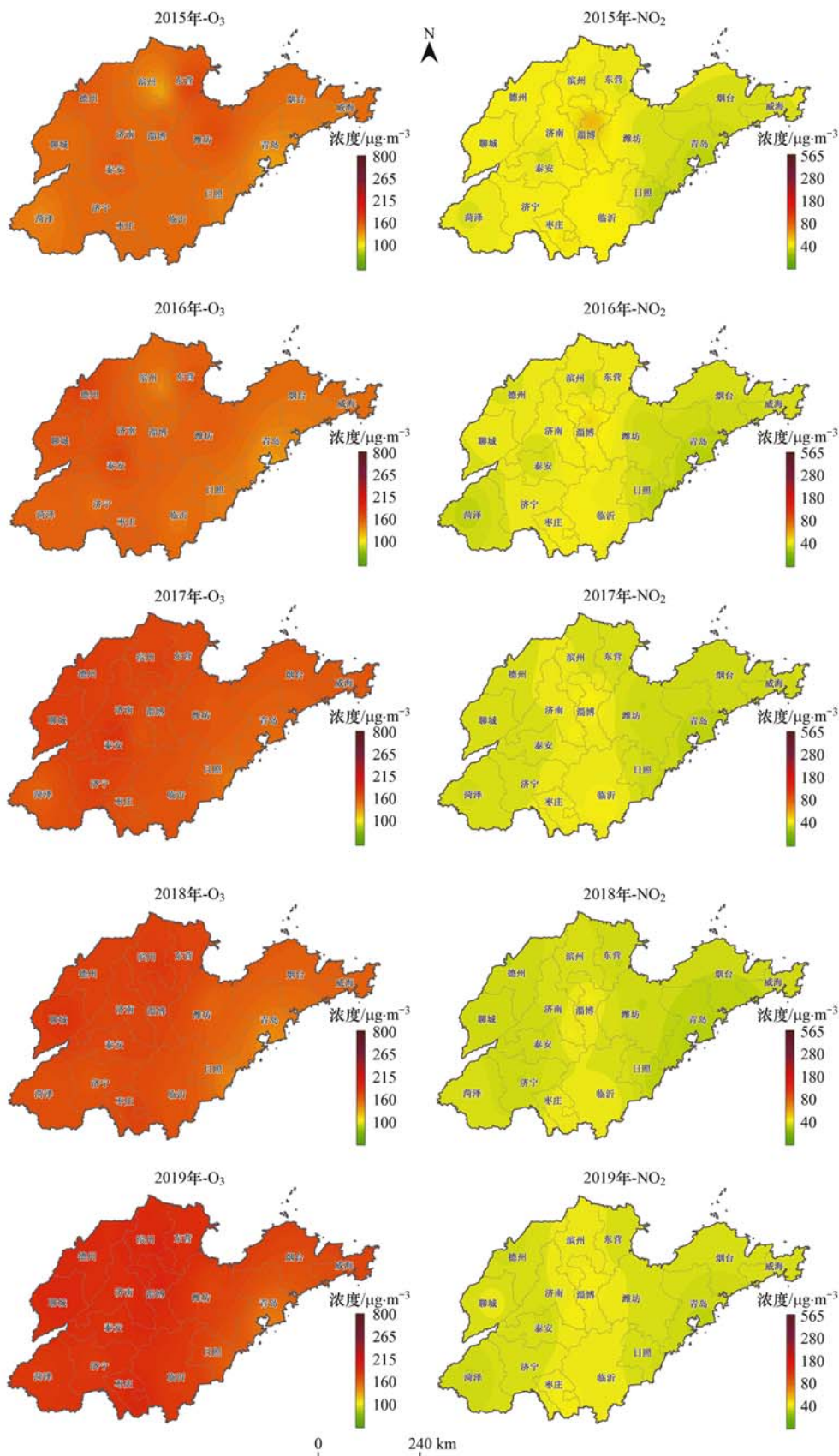


图 5 山东省 2015 ~ 2019 年的年均 $\rho(\text{O}_3\text{-}8\text{h})$ 和 $\rho(\text{NO}_2)$ 空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of annual average concentrations of $\rho(\text{O}_3\text{-}8\text{h})$ and $\rho(\text{NO}_2)$ from 2015 to 2019 in Shandong Province

基于气象因子的 $\rho(\text{O}_3\text{-}8\text{h})$ 的多元线性回归模型,此方法已被国内外较多研究中用于评估气象要素对污

染物浓度的影响^[44,45],但相关性分析并不能全面揭示其之间的复杂关系,今后拟开展数值模型对其形

成机制进行研究.

由表 2 可知,各市多元回归拟合直线均通过显著性检验($P < 0.05$),说明回归方程总体显著^[46,47],内陆城市拟合直线的拟合度(R^2 ,回归方程和与总平方和比值)均高于 0.40,而沿海城市拟合直线的 R^2 在 0.24 ~ 0.37 之间,说明多元线性回归方程对内陆城市 $\rho(\text{O}_3\text{-}8\text{h})$ 的解释度更高.由标准化回归系数结果可知,各市 $\rho(\text{O}_3\text{-}8\text{h})$ 与 RH 和 T 相关性较强,与 v 和 p 的相关性较弱,与双变量相关分析的结果类似,说明山东省 O₃ 的主控气象因子为相对湿度

和温度,风速和气压也有一定的影响.另外,不同区域的 O₃ 主控气象因子有所不同,内陆城市的 $\rho(\text{O}_3\text{-}8\text{h})$ 与 T 的标准化回归系数最高,均值为 0.58,最高达 0.70;与 RH 的标准化回归系数次之,均值为 -0.40,其中枣庄相关性最强(-0.51).沿海城市的 $\rho(\text{O}_3\text{-}8\text{h})$ 与 RH 的相关性最强, T 次之,标准化回归系数均值分别为 -0.52 和 0.25.与内陆城市相比,沿海城市 $\rho(\text{O}_3\text{-}8\text{h})$ 与 T 的标准化回归系数较低,与 RH 的标准化回归系数较高,体现出显著的区域性差异.

表 2 山东省各市 O₃-8h 与气象因素的多元线性回归结果

Table 2 Multiple linear regression results between O ₃ -8h and meteorological factors in each city in Shandong Province						
地区	城市	标准化回归系数				R^2
		风速	相对湿度	气压	日最高温度	
内陆地区	济南	-0.08	-0.30	0.01	0.68	0.59
	淄博	-0.17	-0.42	-0.08	0.56	0.52
	枣庄	-0.19	-0.51	-0.02	0.45	0.53
	东营	-0.15	-0.38	-0.04	0.61	0.49
	潍坊	-0.10	-0.47	-0.15	0.46	0.43
	济宁	-0.14	-0.45	-0.05	0.40	0.45
	泰安	-0.10	-0.36	0.07	0.66	0.54
	临沂	-0.22	-0.48	-0.04	0.49	0.53
	德州	-0.02	-0.29	0.07	0.70	0.52
	聊城	-0.11	-0.38	0.04	0.63	0.57
	滨州	-0.22	-0.34	-0.04	0.59	0.55
	菏泽	-0.10	-0.35	0.14	0.70	0.61
沿海地区	青岛	-0.12	-0.50	-0.09	0.23	0.32
	烟台	-0.14	-0.52	-0.11	0.24	0.24
	威海	-0.12	-0.50	-0.14	0.12	0.25
	日照	-0.26	-0.55	-0.04	0.41	0.37

2.2.2 不同气象因素区间对 O₃-8h 超标率的影响

按照不同的地形地貌分布特点,将山东省划分为 3 个区域:鲁中山区(济宁、临沂和潍坊等 6 市)、平原地区(滨州、东营和聊城等 6 市)和东部沿海地区(日照、青岛和威海等 4 市).按照环境空气质量标准(GB 3095-2012)中 $\rho(\text{O}_3\text{-}8\text{h})$ 标准($160\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)定义 O₃ 超标日,对不同区域不同气象因素(日最高温度、相对湿度、风速和气压)分布区间下 O₃-8h 超标平均概率进行统计分析.

2.2.2.1 日最高温度

太阳辐射强弱对光化学反应有重要的影响,而温度升高对 O₃ 生成速率有显著影响^[48],由于缺少太阳辐射资料,而温度又能反映太阳辐射的变化^[49],所以本文统计每日的日最高温度,并研究其对 $\rho(\text{O}_3\text{-}8\text{h})$ 的影响.由图 6 可见,当 T 在 15 ~ 20℃ 范围内,各市 O₃-8h 超标率极低,均小于 3%;当 T 在 20 ~ 25℃ 范围内,大部分城市开始出现 O₃ 超标,但超标率较低(平均 10% 左右),青岛和威海仍极少出现 O₃-8h 超标,超标率在 1% 左右;当 T 在 25 ~

30℃ 范围内,大部分城市 O₃-8h 超标率上升至 35% 左右,青岛和威海上升至 10% 左右;当 T 在 30 ~ 35℃ 范围内,大部分城市 O₃-8h 超标率显著抬升至 60% 左右,青岛和威海抬升至 25% 左右;当出现 T 在 35℃ 以上的高温天气时,各市 O₃-8h 超标率均较高,平均 85% 以上,而青岛和威海在统计范围内未出现 T 在 35℃ 以上的情况,因此其 O₃-8h 超标率最高区间出现在 30 ~ 35℃.由上可知,随着 T 的升高,各市 O₃ 超标率均呈现显著升高趋势,其中 30 ~ 35℃ 是各市 O₃-8h 超标率显著抬升的温度区间.

2.2.2.2 相对湿度

水汽不仅能通过水相变化不断吸收和放出能量,还可以与 O₃ 发生反应,是消耗近地面 O₃ 的方式之一,反应所生成的自由基是光化学反应中的重要因子^[50].由图 7 可见,鲁中山区和平原地区城市的 O₃-8h 超标率对相对湿度的响应较为一致,随着 RH 增加,O₃-8h 超标率先上升后下降. RH 在 20% ~ 40% 范围时,大部分城市 O₃-8h 超标率在 30% 左右; RH 在 40% ~ 60% 范围时,除临沂和滨州 2 市,

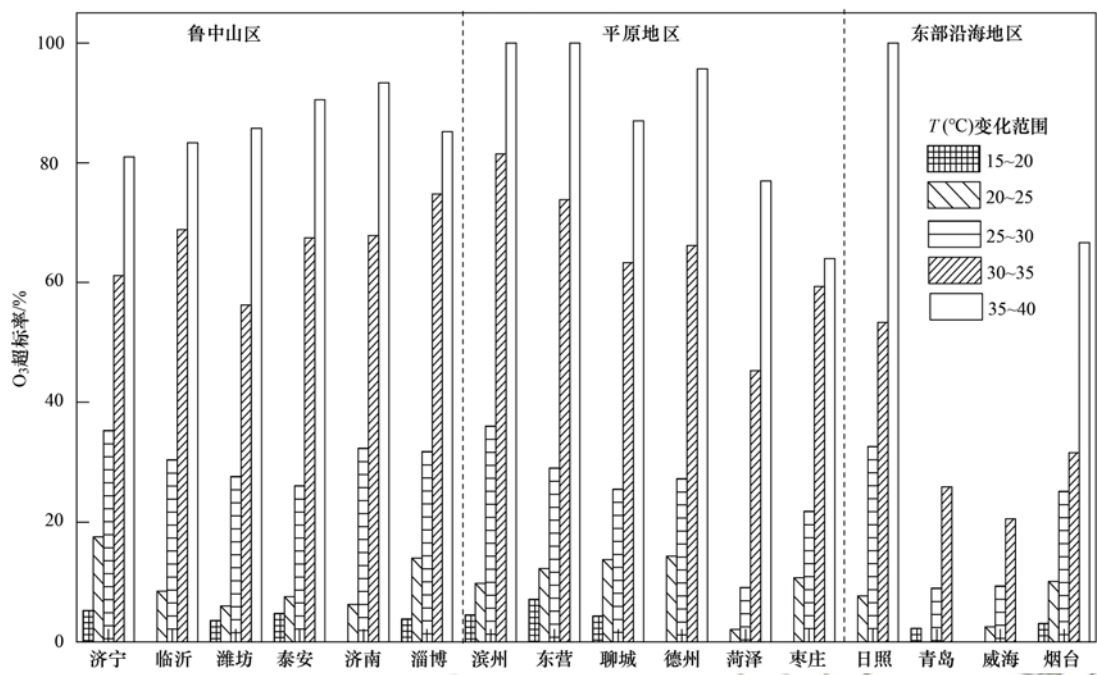


图 6 不同日最高温度区间的 O₃ 超标率

Fig. 6 Probability of ozone exceeding the standard at different daily maximum temperature ranges

其余城市 O₃-8h 超标率明显上升且达到峰值,均值在 50% 左右,其中济宁最高(65%); RH 在 60%~80% 范围时,O₃-8h 超标率下降至 40% 左右;当 RH 超过 80% 时,O₃-8h 超标率下降至 15% 以下,部分城市没有 O₃-8h 超标现象.这主要由于 RH 较大时空气云量较多,减少了到达地面的太阳辐射,另外,O₃ 也会与水汽发生非均相反应,因此高湿条件不利于 O₃ 的积累^[51,52].东部沿海地区中青岛、威海和烟台这 3 市 O₃-8h 超标率与 RH 呈现显著的负相关关系,低湿区间(20%~30%) O₃-8h 超标率较高,而日照整体地势背山面海,其 O₃-8h 超标率随 RH 的变

化特点与鲁中山区城市有一定的相似性.王政等^[53]对京津冀地区城市 O₃ 超标率随 RH 的变化规律的研究发现,北京和石家庄 O₃ 超标率随 RH 的增加而先增后减,与山东省内陆地区城市相似;而天津 O₃-8h 超标率随 RH 的增加而降低,与山东省东部沿海城市相似.

2.2.2.3 气压

由图 8 可见,随着日均气压(p)的升高,大部分城市 O₃-8h 超标率显著降低.当 p 在 990~1 000 hPa 范围时,少数中西部城市(如济南、聊城、德州和菏泽这 4 市) O₃-8h 超标率达到峰值;当 p 在

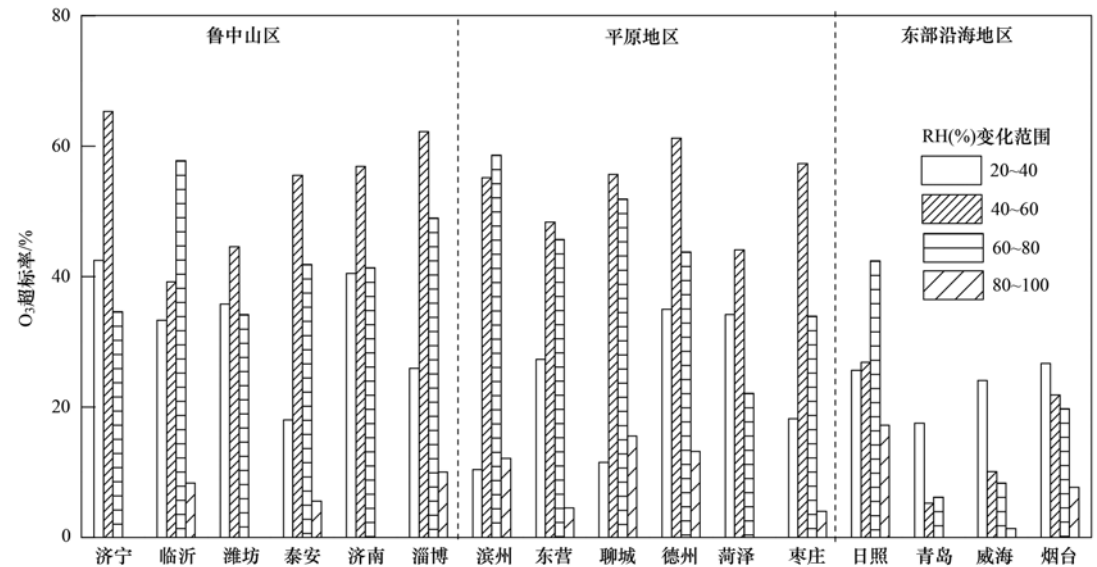


图 7 不同相对湿度区间的 O₃ 超标率

Fig. 7 Probability of ozone exceeding the standard at different relative humidity ranges

1 000 ~ 1 010 hPa 范围时,大部分城市 O_3 超标率达到峰值,其中鲁中山区和平原地区大部分城市的 O_3 -8h 超标率超过 40%,而东部沿海地区中的日照和烟台 2 市高于 20%;当 p 高于 1 010 hPa 时,大部分城市 O_3 -8h 超标率显著下降至 30% 以下,可见 1 010 hPa 是山东内陆地区 O_3 -8h 超标临界值. 对于沿海城市中的青岛和威海,其气压变化范围较小,在 1 000 ~ 1 020 hPa 之间,但也符合低压

下 O_3 -8h 超标率高的特点,这可能与区域夏季低压系统一般会带来高温及偏南气流有关,这与程念亮等^[54]的研究结论相一致. 另外,对于个别沿山及沿海城市(泰安和日照),当处于最低气压区间(990 ~ 1 000 hPa)时, O_3 -8h 超标率也较低,这可能是由于强低压系统下气流上升,容易成云致雨,对 O_3 有一定的湿清除作用,岳海燕等^[55]的研究也得到了类似的结论.

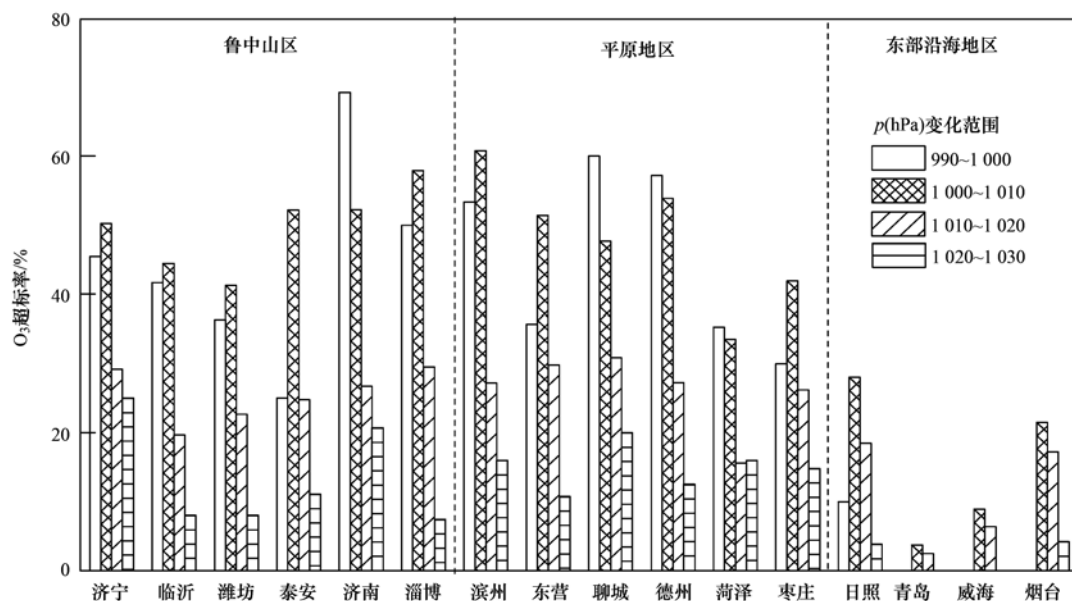


图 8 不同气压区间的 O_3 超标率

Fig. 8 Probability of ozone exceeding the standard at different air pressure ranges

2.2.2.4 风速

一般来说,风速较大时,大气扩散条件相对较好,有利于大气中 O_3 的扩散;风速较小时, O_3 容易积累. 由图 9 可见,随着日均风速(v)增大,各市 O_3 -8h 超标率均明显下降. 当 v 在 0 ~ 1 $m \cdot s^{-1}$ 范围时,大部分城市 O_3 -8h 超标率最高,内陆大多城市 O_3 -8h 超标率超过 40%,其中滨州最高(58%);当 v 在 1 ~ 2 $m \cdot s^{-1}$ 范围时,大部分城市 O_3 -8h 超标率降至 30% 左右,而平原地区部分城市(滨州、德州和东营

这 3 市)仍超过 40%;当 v 大于 3 $m \cdot s^{-1}$ 时,大部分城市 O_3 -8h 超标率显著降低至 20%. 东部沿海地区中日照与内陆城市的变化规律较为一致,其他沿海城市 O_3 -8h 超标率同风速总体呈现“两头高,中间低”的规律,即随着 v 的增加, O_3 -8h 超标率呈现先下降再上升的趋势,区域性特征明显.

2.2.2.5 风向

O_3 污染不仅与本地生成有关,区域间或区域内城市间的相互输送与影响也不容忽视. Li 等^[56]的研

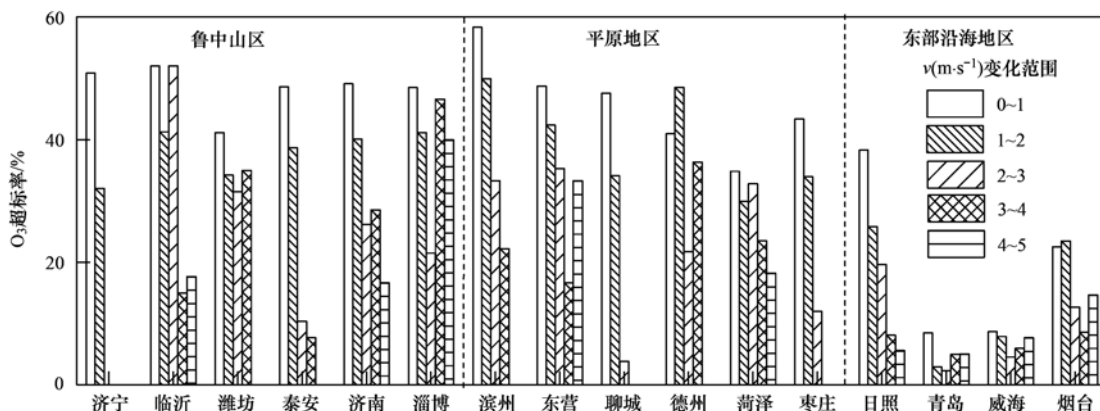


图 9 不同风速区间的 O_3 超标率

Fig. 9 Probability of ozone exceeding the standard at different wind speed ranges

究表明,外部输送对京津冀、长三角、珠三角和成渝地区的 O_3 污染有不同程度地贡献. Hu 等^[57]的研究表明,区域内城市间的大气污染输送对臭氧污染有着重要的贡献,近地面风速和风向的变化对 O_3 的影响十分复杂. 由图 10 可见,在 O_3 -8h 超标的情况下,大部分城市的主导风向为偏南风,包括 SE、SSE、S 和 SSE,另外,由于山东省地形较为复杂,中部山地突起,西南和西北低洼平坦,东部以丘陵为主且濒临渤海和黄海,不同城市由于不同的地形条件导致 O_3 污染气象条件有一定差异. O_3 -8h 超标时各风向对应的平均风速大多在 $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下,但烟台、威海和青岛这 3 市在 O_3 -8h 超标时平均风速较高,多在 $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上,主导风向为海上

偏东南风(SSE 和 S),说明沿海地区发生 O_3 污染时可能存在海上污染气团的输送,孟丽红等^[58]和王宏等^[59]对天津和福建等沿海地区的研究也得到了类似的结论. 中西部城市(如滨州、德州和济南等 5 市)在主导风向为偏东风向(E)时易出现 O_3 -8h 超标,说明内陆地区存在自东向西的 O_3 传输,而泰安在 O_3 -8h 超标情况下,西南风和东北风出现的概率均较高,可能是由于地形原因导致风向变化较为复杂. 周磊等^[60]的研究也发现地形是影响京津冀地区污染过程的重要因素,受山脉的阻挡作用影响,气流容易在山前形成回流,导致风速减小,污染物在太行山东侧和燕山南侧积累聚集,造成局地空气污染加重.

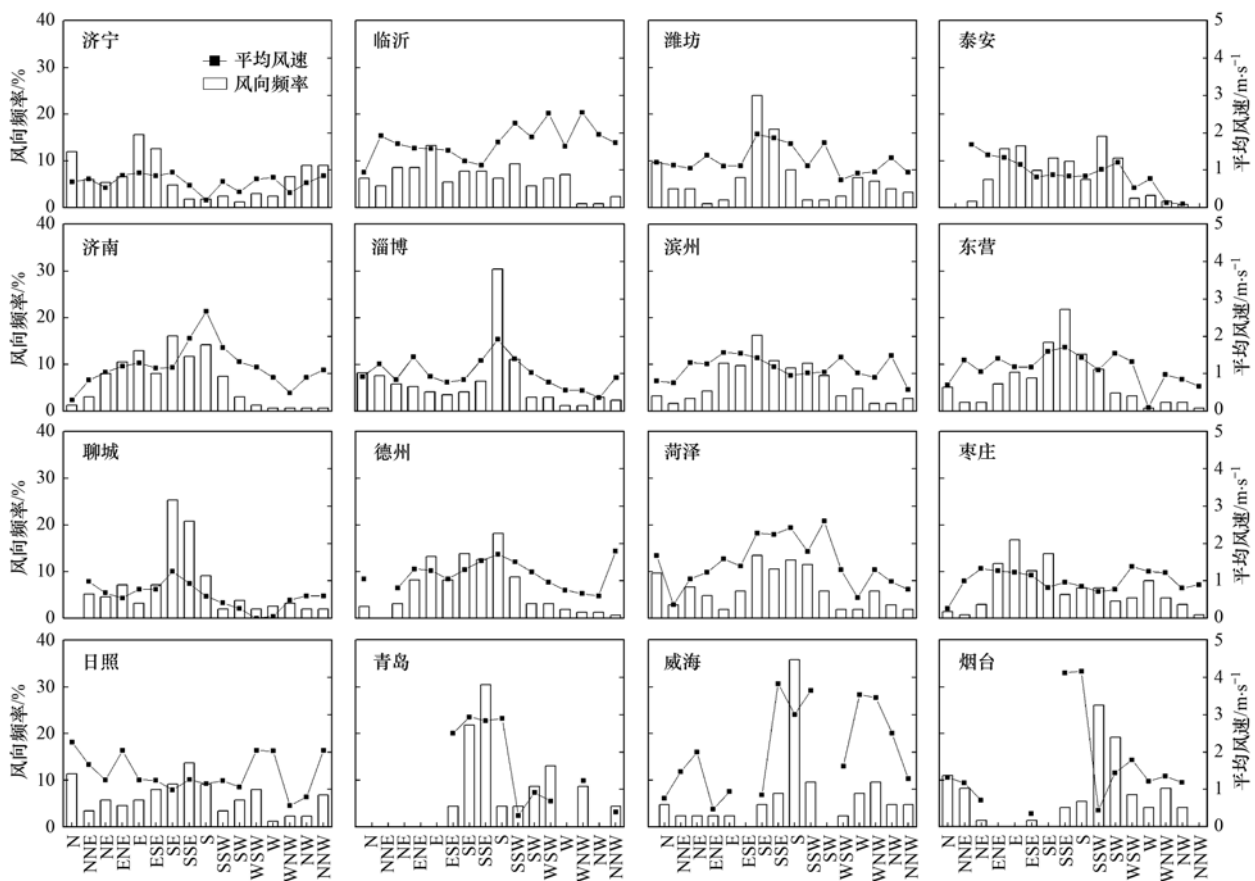


图 10 O_3 超标天的风向频率及其平均风速

Fig. 10 Wind direction frequency and average wind speed under the condition of O_3 exceeding the standard

3 结论

(1) 山东省 2015 ~ 2019 年的年均 $\rho(O_3-8h)$ (90 百分位)由 154 上升至 $186 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, O_3 污染呈现夏高冬低,春季略高于秋季的季节变化特征,在 6 月或 9 月达到峰值. 内陆地区 O_3 污染较沿海地区更为严重,低值 O_3 超标天增长显著.

(2) 山东省 2015 ~ 2019 年年均 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 及 $\rho(O_3 \text{ 前体物})$ [CO (95 百分位)和 NO_2]逐步下降,

下降速率小于 O_3 -8h(90 百分位)上升速率,与 O_3 -8h 呈现相反的月变化规律.

(3) 山东省 O_3 主控气象因子为气温和相对湿度,高温、低压、小风和偏南风向的气象条件下易出现 O_3 超标,不同城市超标率对气象因素的响应不同,内陆地区 O_3 超标率随 RH 的增加而先增加后降低,沿海地区 O_3 -8h 超标率随 RH 的增加而逐步降低.

参考文献:

[1] 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.
- 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.
- [2] 韩婷婷, 李颖若, 邱雨露, 等. 上甸子区域背景站 VOCs 污染特征及其对臭氧生成贡献[J]. 环境科学, 2020, **41**(6): 2586-2595.
- Han T T, Li Y R, Qiu Y L, *et al.* Characteristics of VOCs and their roles in ozone formation at a regional background Site in Beijing, China[J]. Environmental Science, 2020, **41**(6): 2586-2595.
- [3] Li Y, Shang Y, Zheng C J, *et al.* Estimated acute effects of ozone on mortality in a rural district of Beijing, China, 2005-2013; a time-stratified case-crossover study[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2018, **15**(11): 2460.
- [4] Hvidtfeldt U A, Sorensen M, Geels C, *et al.* Long-term residential exposure to PM_{2.5}, PM₁₀, black carbon, NO₂, and ozone and mortality in a Danish cohort[J]. Environment International, 2019, **123**: 265-272.
- [5] Moura B B, Alves E S, Marabesi M A, *et al.* Ozone affects leaf physiology and causes injury to foliage of native tree species from the tropical atlantic forest of southern Brazil[J]. Science of the Total Environment, 2018, **610-611**: 912-925.
- [6] 柴发合. 我国大气污染治理历程回顾与展望[J]. 环境与可持续发展, 2020, **45**(3): 5-15.
- Chai F H. Review and prospect on the atmospheric pollution control in China[J]. Environment and Sustainable Development, 2020, **45**(3): 5-15.
- [7] 马志强, 孟燕军, 林伟立. 气象条件对北京地区一次光化学烟雾与霾复合污染事件的影响[J]. 气象科技进展, 2013, **3**(2): 59-61.
- Ma Z Q, Meng Y J, Lin W L. Influence of meteorological factors on an episode of photochemical fog and haze in Beijing[J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2013, **3**(2): 59-61.
- [8] 王文兴, 柴发合, 任阵海, 等. 新中国成立 70 年来我国大气污染防治历程、成就与经验[J]. 环境科学研究, 2019, **32**(10): 1621-1635.
- Wang W X, Chai F H, Ren Z H, *et al.* Process, achievements and experience of air pollution control in China since the founding of the People's Republic of China 70 years ago[J]. Research of Environmental Sciences, 2019, **32**(10): 1621-1635.
- [9] GB 3095-2012, 环境空气质量标准[S].
- GB 3095-2012, Ambient air quality standard[S].
- [10] 姚诗音, 魏巍, 沈泽亚, 等. 我国典型钢铁工业城市夏季臭氧污染来源解析研究[J]. 中国环境科学, 2021, **41**(1): 37-48.
- Yao S Y, Wei W, Shen Z Y, *et al.* Source apportionment of ozone pollution in the typical steel industry city of China in summer[J]. China Environmental Science, 2021, **41**(1): 37-48.
- [11] 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.
- [12] 李红丽, 王杨君, 黄凌, 等. 中国典型城市臭氧与二次气溶胶的协同增长作用分析[J]. 环境科学学报, 2020, **40**(12): 4368-4379.
- Li H L, Wang Y J, Huang L, *et al.* Analysis of synergistic growth effects between ozone and secondary aerosol in typical cities in China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, **40**(12): 4368-4379.
- [13] 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.
- [14] 周明卫, 康平, 汪可可, 等. 2016~2018 年中国城市臭氧浓度时空聚集变化规律[J]. 中国环境科学, 2020, **40**(5): 1963-1974.
- Zhou M W, Kang P, Wang K K, *et al.* The spatio-temporal aggregation pattern of ozone concentration in China from 2016 to 2018[J]. China Environmental Science, 2020, **40**(5): 1963-1974.
- [15] Li K W, Chen L H, Han K, *et al.* Smog chamber study on aging of combustion soot in isoprene/SO₂/NO_x system: changes of mass, size, effective density, morphology and mixing state[J]. Atmospheric Research, 2017, **184**: 139-148.
- [16] 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.
- [17] 赵伟, 高博, 卢清, 等. 2006~2019 年珠三角地区臭氧污染趋势[J]. 环境科学, 2021, **42**(1): 97-105.
- Zhao W, Gao B, Lu Q, *et al.* Ozone pollution trend in the Pearl River Delta region during 2006-2019[J]. Environmental Science, 2021, **42**(1): 97-105.
- [18] 蒲茜, 李振亮, 张悦, 等. 重庆市 O₃ 污染日的大气环流分型与传输特征[J]. 中国环境科学, 2021, **41**(1): 18-27.
- Pu X, Li Z L, Zhang Y, *et al.* Characterization of atmospheric circulation and transmission in Chongqing city during ozone polluted days[J]. China Environmental Science, 2021, **41**(1): 18-27.
- [19] 赵辉, 郑有飞, 吴晓云, 等. 江苏省大气复合污染特征与相关气象驱动[J]. 中国环境科学, 2018, **38**(8): 2830-2839.
- Zhao H, Zheng Y F, Wu X Y, *et al.* Atmospheric compound pollution characteristics and the effects of meteorological factors in Jiangsu province[J]. China Environmental Science, 2018, **38**(8): 2830-2839.
- [20] 孙银川, 严晓瑜, 侯晓辉, 等. 中国典型城市 O₃ 与前体物变化特征及相关性研究[J]. 环境科学研究, 2020, **33**(1): 44-53.
- Sun Y C, Yan X Y, Gou X H, *et al.* Characteristics and correlation of ozone and its precursors in typical cities in China[J]. Research of Environmental Sciences, 2020, **33**(1): 44-53.
- [21] 闫慧, 张维, 侯墨, 等. 我国地级及以上城市臭氧污染来源及控制区划分[J]. 环境科学, 2020, **41**(12): 5215-5224.
- Yan H, Zhang W, Hou M, *et al.* Sources and control area division of ozone pollution in cities at prefecture level and above in China[J]. Environmental Science, 2020, **41**(12): 5215-5224.
- [22] 梁俊宁, 马启翔, 汪平, 等. 陕西省西咸新区空港新城夏季臭氧与气象因子关系分析[J]. 生态环境学报, 2019, **28**(10): 2020-2026.
- Liang J N, Ma Q X, Wang P, *et al.* Analysis of the relationship between ozone and meteorological factors in summer at airport new

- city of Xixian new area, China[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2019, **28**(10): 2020-2026.
- [23] 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.
- [24] 李全喜, 王金艳, 刘筱冉, 等. 兰州市区臭氧时空分布特征及气象和环境因子对臭氧的影响[J]. 环境保护科学, 2018, **44**(2): 78-84, 97.
- Li Q X, Wang J Y, Liu X R, *et al.* Temporal and spatial distribution of ozone and effects of meteorological and environmental factors on ozone in the urban areas of Lanzhou city[J]. Environmental Protection Science, 2018, **44**(2): 78-84, 97.
- [25] 黄小刚, 邵天杰, 赵景波, 等. 气象因素和前体物对中国东部 O₃ 浓度分布的影响[J]. 中国环境科学, 2019, **39**(6): 2273-2282.
- Huang X G, Shao T J, Zhao J B, *et al.* Impact of meteorological factors and precursors on spatial distribution of ozone concentration in eastern China[J]. China Environmental Science, 2019, **39**(6): 2273-2282.
- [26] 谢放尖, 陆晓波, 杨峰, 等. 2017 年春夏期间南京地区臭氧污染输送影响及潜在源区[J]. 环境科学, 2021, **42**(1): 88-96.
- Xie F J, Lu X B, Yang F, *et al.* Transport influence and potential sources of ozone pollution for Nanjing during spring and summer in 2017[J]. Environmental Science, 2021, **42**(1): 88-96.
- [27] 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.
- [28] 安俊琳, 王跃思, 朱彬. 主成分和回归分析方法在大气臭氧预报的应用——以北京夏季为例[J]. 环境科学学报, 2010, **30**(6): 1286-1294.
- An J L, Wang Y S, Zhu B. Principal component and multiple regression analysis predicting ozone concentrations; case study in summer in Beijing[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2010, **30**(6): 1286-1294.
- [29] 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.
- [30] 严茹莎. 德州市夏季臭氧敏感性特征及减排方案[J]. 环境科学, 2020, **41**(9): 3961-3968.
- Yan R S. Ozone sensitivity analysis and emission controls in Dezhou in summer[J]. Environmental Science, 2020, **41**(9): 3961-3968.
- [31] 张尚鹏, 廉丽姝, 张文华. 日照市空气质量变化特征及其与气象条件的关系[J]. 曲阜师范大学学报(自然科学版), 2018, **44**(4): 106-110.
- Zhang S P, Lian L S, Zhang W H. Characteristics of air quality in Rizhao and its relationship with meteorological conditions[J]. Journal of Qufu Normal University (Natural Science), 2018, **44**(4): 106-110.
- [32] 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.
- 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.
- [33] 杨帆, 王体健, 束蕾, 等. 青岛沿海地区一次臭氧重污染过程的特征及成因分析[J]. 环境科学学报, 2019, **39**(11): 3565-3580.
- Yang F, Wang T J, Shu L, *et al.* Characteristics and mechanisms for a heavy O₃ pollution episode in Qingdao coastal area[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, **39**(11): 3565-3580.
- [34] 宋晓辉, 杜亮亮, 李剑东, 等. 邯郸采暖期环境污染特征及空气质量预报方法研究[J]. 生态与农村环境学报, 2020, **36**(8): 998-1005.
- Song X H, Du L L, Li J D, *et al.* Study on characteristics of environmental pollution and methods of air quality prediction during heating period in Handan city[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2020, **36**(8): 998-1005.
- [35] 蒋美青, 陆克定, 苏榕, 等. 我国典型城市群 O₃ 污染成因和关键 VOCs 活性解析[J]. 科学通报, 2018, **63**(12): 1130-1141.
- Jiang M Q, Lu K D, Su R, *et al.* Ozone formation and key VOCs in typical Chinese city clusters[J]. Chinese Science Bulletin, 2018, **63**(12): 1130-1141.
- [36] 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, **5**(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.
- [37] Lu K D, Zhang Y H, Su H, *et al.* Oxidant (O₃ + NO₂) production processes and formation regimes in Beijing[J]. Journal of Geophysical Research, 2010, **115**(D7), doi: 10.1029/2009JD012714.
- [38] Tan Z F, Rohrer F, Lu K D, *et al.* Wintertime photochemistry in Beijing: observations of ROx radical concentrations in the North China Plain during the best-one campaign[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2018, **18**(16): 12391-12411.
- [39] Jia M W, Zhao T L, Cheng X H, *et al.* Inverse relations of PM_{2.5} and O₃ 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.
- [40] Zhu J, Chen L, Liao H, *et al.* Correlations between PM_{2.5} and ozone over China and associated underlying reasons[J]. Atmosphere, 2019, **10**(7), doi: 10.3390/atmos10070352.
- [41] 薛莲, 徐少才, 孙萌, 等. 气象要素及前体物对青岛市臭氧浓度变化的影响[J]. 中国环境监测, 2017, **33**(4): 179-185.
- Xue L, Xu S C, Sun M, *et al.* Effect of meteorological factors and precursors on the change of ambient air ozone concentrations in Qingdao[J]. Environmental Monitoring in China, 2017, **33**(4): 179-185.
- [42] 栾志强, 王喜芹, 李京芬. 2019 年 VOCs 减排控制行业发展评述及展望[J]. 中国环保产业, 2020, **26**(2): 27-29.
- Luan Z Q, Wang X Q, Li J F. Review and prospect of the development of VOCs emission reduction and control industry in 2019[J]. China Environmental Protection Industry, 2020, **26**(2): 27-29.

- [43] 于世杰, 尹沙沙, 张瑞芹, 等. 郑州市近地面臭氧污染特征及气象因素分析[J]. 中国环境监测, 2017, **33**(4): 140-149.
Yu S J, Yin S S, Zhang R Q, *et al.* Analysis on the characteristics of surface ozone pollution and meteorological factors in Zhengzhou[J]. Environmental Monitoring in China, 2017, **33**(4): 140-149.
- [44] Sicard P, Serra R, Rossello P. Spatiotemporal trends in ground-level ozone concentrations and metrics in France over the time period 1999-2012[J]. Environmental Research, 2016, **149**: 122-144.
- [45] 贾梦唯, 赵天良, 张祥志, 等. 南京主要大气污染物季节变化及相关气象分析[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(9): 2567-2577.
Jia M W, Zhao T L, Zhang X Z, *et al.* Seasonal variations in major air pollutants in Nanjing and their meteorological correlation analyses[J]. China Environmental Science, 2016, **36**(9): 2567-2577.
- [46] 陈兵红, 靳全锋, 柴红玲, 等. 浙江省大气 PM_{2.5} 时空分布及相关因子分析[J]. 环境科学学报, 2021, **41**(3): 817-829.
Chen B H, Jin Q F, Chai H L, *et al.* Spatiotemporal distribution and correlation factors of PM_{2.5} concentrations in Zhejiang province[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, **41**(3): 817-829.
- [47] 程麟钧, 王帅, 宫正宇, 等. 2008-2016 年臭氧监测试点城市的臭氧污染特征[J]. 中国环境监测, 2017, **33**(4): 26-32.
Cheng L J, Wang S, Gong Z Y, *et al.* Pollution trends of ozone in ozone monitoring pilot cities from 2008 to 2016[J]. Environmental Monitoring in China, 2017, **33**(4): 26-32.
- [48] 崔亚茹, 索娜, 王磊, 等. 秦皇岛市区大气臭氧生成过程及前体物敏感性研究[J]. 环境科学学报, 2020, **40**(11): 4105-4112.
Cui Y R, Suo N, Wang L, *et al.* Study of ozone generation and photochemical regimes in the urban atmosphere of Qinhuangdao[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, **40**(11): 4105-4112.
- [49] 严仁嫦, 叶辉, 林旭, 等. 杭州市臭氧污染特征及影响因素分析[J]. 环境科学学报, 2018, **38**(3): 1128-1136.
Yan R C, Ye H, Lin X, *et al.* Characteristics and influence factors of ozone pollution in Hangzhou[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, **38**(3): 1128-1136.
- [50] 王庆良, 李倩倩, 童东革, 等. 光化学反应中自由基的作用及反应影响因素的研究进展[J]. 环境化学, 2020, **39**(2): 301-316.
Wang Q L, Li Q Q, Tong D G, *et al.* Research progress on the influencing factors and the role of free radicals in photochemistry reaction[J]. Environmental Chemistry, 2020, **39**(2): 301-316.
- [51] 王川, 夏士勇, 曹礼明, 等. 深圳西部城区大气 O₃ 污染特征及超标成因[J]. 中国环境科学, 2020, **40**(4): 1414-1420.
Wang C, Xia S Y, Cao L M, *et al.* Study on the characteristics and the cause of atmospheric O₃ pollution in western urban of Shenzhen[J]. China Environmental Science, 2020, **40**(4): 1414-1420.
- [52] 黄凡, 周家斌, 李红, 等. 武汉市夏冬季典型大气污染过程的成因与来源分析[J]. 环境科学研究, 2020, **33**(2): 280-288.
Huang F, Zhou J B, Li H, *et al.* Analysis of causes and sources of typical air pollution events in summer and winter in Wuhan city[J]. Research of Environmental Sciences, 2020, **33**(2): 280-288.
- [53] 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.
- [54] 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.
- [55] 岳海燕, 顾桃峰, 王春林, 等. 台风“妮妲”过程对广州臭氧浓度的影响分析[J]. 环境科学学报, 2018, **38**(12): 4565-4572.
Yue H Y, Gu T F, Wang C L, *et al.* Influence of typhoon Nida process on ozone concentration in Guangzhou[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, **38**(12): 4565-4572.
- [56] Li J, Yang W Y, Wang Z F, *et al.* Modeling study of surface ozone source-receptor relationships in East Asia[J]. Atmospheric Research, 2016, **167**: 77-88.
- [57] Hu J, Li Y C, Zhao T L, *et al.* An important mechanism of regional O₃ transport for summer smog over the Yangtze River Delta in eastern China[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2018, **18**: 16239-16251.
- [58] 孟丽红, 李英华, 韩素芹, 等. 海陆风对天津市 PM_{2.5} 和 O₃ 质量浓度的影响[J]. 环境科学研究, 2019, **32**(3): 390-398.
Meng L H, Li Y H, Han S Q, *et al.* Influence of sea-land breeze on the concentrations of PM_{2.5} and O₃ in Tianjin city[J]. Research of Environmental Sciences, 2019, **32**(3): 390-398.
- [59] 王宏, 郑秋萍, 洪振宇, 等. 福建省沿海地区春季一次近地层 O₃ 超标成因分析[J]. 环境科学研究, 2020, **33**(1): 36-43.
Wang H, Zheng Q P, Hong Z Y, *et al.* Analysis of a springtime high surface ozone event over Fujian coastal Areas[J]. Research of Environmental Sciences, 2020, **33**(1): 36-43.
- [60] 周磊, 武建军, 贾瑞静, 等. 京津冀 PM_{2.5} 时空分布特征及其污染风险因素[J]. 环境科学研究, 2016, **29**(4): 483-493.
Zhou L, Wu J J, Jia R J, *et al.* Investigation of temporal-spatial characteristics and underlying risk factors of PM_{2.5} pollution in Beijing-Tianjin-Hebei Area[J]. Research of Environmental Sciences, 2016, **29**(4): 483-493.

CONTENTS

Emission Reduction Potential of Air Pollutants of Thermal Power Industry Based on Carbon Emission Reduction Target and Emission Standard Constraint Scenarios	LI Hui, SUN Xue-li, PANG Bo, <i>et al.</i> (5563)
Volatile Organic Compounds in the Vehicle Repairing Industry of China: Emission, Management, Purification, and Policy	WANG Hai-lin, YANG Tao, NIE Lei, <i>et al.</i> (5574)
Pollutant Emission Inventory of Biomass Combustion Sources in Xining City	GAO Yu-zong, JI Ya-qin, LIN Zi, <i>et al.</i> (5585)
Analysis of Air Quality and Influencing Factors in Sichuan Basin During the COVID-19 Outbreak	CHEN Jun-hui, FENG Xiao-qiong, LI Yuan, <i>et al.</i> (5594)
Estimation of PM _{2.5} Concentration in Sichuan Province Based on Improved Linear Mixed Effect Model and Geo-intelligent Random Forest	WU Yu-hong, DU Ning, WANG Li, <i>et al.</i> (5602)
Characterization of Water-soluble Inorganic Ions in Atmospheric PM _{2.5} in Chengdu During the Later Stage of the Air Pollution Prevention and Control Action Plan	LI Jia-qi, ZHANG Jun-ke, DONG Gui-ming, <i>et al.</i> (5616)
Characteristics of Chemical Composition and Source Apportionment of Atmospheric Fine Particulate Matter in Luoyang	SUN Jia-bin, DONG Zhe, LI Li-ping, <i>et al.</i> (5624)
Characteristics and Main Influencing Factors of Black Carbon Aerosol in Beijing	CAO Yang, AN Xin-xin, LIU Bao-xian, <i>et al.</i> (5633)
Chemical Characteristics and Source Apportionment with Temporal Refinement for VOCs in Tianjin Suburb in Summer	WANG Yi-xuan, LIU Bao-shuang, WU Jian-hui, <i>et al.</i> (5644)
Pollution Characteristics and Reactivity of Volatile Organic Compounds in Shenyang	DU Han-bing, WANG Nan, REN Wan-hui, <i>et al.</i> (5656)
Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric SVOCs Around Typical Chemical Industry Zones	GE Xiang, WU Jian, GAO Song, <i>et al.</i> (5663)
Source Analysis and Health Risk Assessment of Toxic Volatile Organic Compounds in Nanjing in Summer and Winter	ZHANG Zi-jin, LIN Yu-chi, ZHANG Yu-xian, <i>et al.</i> (5673)
Emission Characteristics of Industrial VOCs Based on Emission Inventory and Field Test: A Case Zhengzhou High-tech Zone	REN He, LU Xuan, LIU Yang, <i>et al.</i> (5687)
VOCs Emission Characteristics of Water-based Architectural Coatings and the Influence on the Atmospheric Environment in China	GAO Mei-ping, WANG Hai-lin, LIU Wen-wen, <i>et al.</i> (5698)
WRF-Chem Simulations of the Impacts of Uncertainty in VOCs Emissions on Ozone Formation and Control Strategies	WANG Feng, WANG Jian-wei, YANG Ning, <i>et al.</i> (5713)
Spatial and Temporal Distribution of Ozone and Influencing Factors in Shandong Province	ZHANG Miao, DING Chun, LI Yan, <i>et al.</i> (5723)
Chemical Characteristics and Contaminant Sensitivity During the Typical Ozone Pollution Processes of Chengdu in 2020	QIAN Jun, XU Chen-xi, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i> (5736)
Development of an Emission Model for Oxygenated Volatile Organic Compounds from Gasoline Vehicles Based on the Online Measurement	HAO Yu-qi, YUAN Zi-bing, WANG Meng-lei, <i>et al.</i> (5747)
Dynamic Evolution Characteristics of Water Resources Utilization Efficiency in China Under the Constraint of Triple Attribute Carrying Capacity	ZHANG Kai, WU Feng-ping, CHENG Chang-chun (5757)
Prediction of Total Nitrogen Load in Yangtze River Basin	DING Zhao-wei, ZHENG Hua (5768)
Dynamic of Net Anthropogenic Nitrogen Inputs and Riverine Nitrogen Export in the Yangtze River Basin in 1980-2015	YAO Meng-ya, HU Min-peng, CHEN Ding-jiang (5777)
Characteristics of Water Environment and Spatial-temporal Distribution of Nitrogen and Phosphorus Load in the Yellow River	HAN Xu, PAN Bao-zhu, CHEN Yue, <i>et al.</i> (5786)
Analysis of Nitrate Pollution Sources Under Different Rainfall Conditions Based on $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{18}\text{O}$ Values	XING Zi-kang, YU Zhong-bo, YI Peng, <i>et al.</i> (5796)
Seasonal Variation Characteristics of Eukaryotic Microbial Community Composition in the Source Water Reservoir	ZHANG Hai-han, HUANG Xin, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (5804)
Characteristics of Planktonic Bacteria Community Between Summer and Winter Surface Water in Dali Lake	LI Wen-bao, GUO Xin, ZHANG Bo-yao, <i>et al.</i> (5814)
Impacts of Wastewater Effluent Discharge on Bacteria Community and Water-soluble Organic Matter in Benthic Biofilm in Receiving River	WANG Yu-tao, FAN Chen-yang, ZHU Jin-xin, <i>et al.</i> (5826)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Typical POPs in Typical Drinking Water Sources in Wuhan	ZHANG Kun-feng, FU Qing, TU Xiang, <i>et al.</i> (5836)
Investigation on Fluoroquinolone Resistance Genes in the Intensive Aquaculture Area of Shatianhu Intensive Aquaculture Farm and Surrounding Waterbodies in Shanghai, China	XU Mu, LI Shi-hao, MA Jin, <i>et al.</i> (5848)
Influencing Factors of Nitrogen Removal from Low-Pollution Water by Aerated Constructed Wetland	LI Lin-lin, LI Rong-tao, KONG Wei-jing, <i>et al.</i> (5857)
Removal of Characteristic Pollutants in Livestock Wastewater by Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetlands	ZHAO Wei, FAN Zeng-zeng, YANG Xin-ping (5865)
Improvement of Nitrogen and Phosphorus Adsorption and Stormwater Retention Capacity by Hardwood Biochar as an Additive Material in Filler Soil	MENG Yi-ke, WANG Yuan, WANG Chuan-yue, <i>et al.</i> (5876)
Removal of Ammonia Nitrogen from Polyvinyl Alcohol/Sodium Alginate Fixed Micron Zeolite Powder in Black and Smelly Rivers	WEI Chao, CHEN Tao, JIANG Qiao, <i>et al.</i> (5884)
Effect of Corn Stalk Biochar on the Adsorption of Aureomycin from Sierozem	NAN Zhi-jiang, JIANG Yu-feng, MAO Huan-huan, <i>et al.</i> (5896)
Microbial Degradation Potential and Transformation Pathway of Micropollutants in Sand Filters of Drinking Water Treatment Plants	ZHOU Jie, WANG Dong-lin, LIN Hui, <i>et al.</i> (5905)
Long-term Trends in Illicit Drugs Abuse in the City Assessed by Wastewater Analysis	CAO Yu, DONG Xiao-tang, SHAO Xue-ting, <i>et al.</i> (5912)
Stress and Post Effects of Azithromycin and Copper on Archaeal Community and ARGs in Activated Sludge	GAO Yu-xi, LI Xing, ZHAO Jun-ru, <i>et al.</i> (5921)
Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Soil Heavy Metals at Typical Smelting Industry Sites	LI Qiang, CAO Ying, HE Lian-sheng, <i>et al.</i> (5930)
Distribution and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Heavy Metals in Coking Sites in China	WANG Yao-feng, HE Lian-sheng, JIANG Deng-ling, <i>et al.</i> (5938)
Spatial Variation and Risk Assessment of Heavy Metals in Soils of Main <i>Torreya grandis</i> Plantation Region in Zhejiang Province	WANG Min, DONG Jia-qi, BAI Long-long, <i>et al.</i> (5949)
Investigations on the Derivation of Safe Maize-Producing Threshold of Soil Cd Content and on Classification of Cd Contaminated Maize-Producing Areas in Northern China	GUAN Wei-dou, GUO Di, WANG Ping, <i>et al.</i> (5958)
Relationship Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metal Contents in Soil Aggregates and in Crops Around a Typical Pb-Zn Mining Area	QIANG Yu, LI Ying-ju, LUO Qian, <i>et al.</i> (5967)
Heavy Metal Pollution and Cumulative Effect of Soil-crop Systems Around Typical Enterprises in Xiong'an New District	ZHOU Ya-long, WANG Qiao-lin, WANG Cheng-wen, <i>et al.</i> (5977)
Heavy Metal Accumulation Effect and Safe Planting Zoning of Soil and Rice in Tongren	ZHU Liang-liang, WU Yong, ZHOU Lang, <i>et al.</i> (5988)
Effect of Dry-Wet Alternation on the Immobilization of Arsenic in Red Soil by Cerium Manganese Modified Biochar	HUANG Xiao-ya, LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, <i>et al.</i> (5997)
Ammonium Nitrogen Fertilizer and Humic Acid Synergically Promote the Removal of Cd from Soil by <i>Tagetes patula</i> L.	WANG Bing-qing, YANG Qin, LI Hong-ying, <i>et al.</i> (6006)
Characteristics and Influencing Factors of the Dissolved Methane and Nitrous Oxide Concentrations and Emissions from a Rice Paddy Drainage River in China	WU Shuang, YANG Wei-tong, SHENG Yang-yue, <i>et al.</i> (6014)
Coupling Effects of Water-saving Irrigation and Controlled-release Fertilizer (CRF) Application on CH ₄ and N ₂ O Emission in Single Cropping Paddy Field	WANG Yong-ming, XU Yong-ji, JI Yang, <i>et al.</i> (6025)
Effects of Manure Combined Chemical Fertilizers on Soil N ₂ O Emission and Microbial Characteristics of Wheat Crop System in Northwest Arid	WANG Kai, SHI Lei, MA Long, <i>et al.</i> (6038)
Effects of Different Types of Straw Returning on the Bacterial Community, Organic Carbon Mineralization and Maize Yield in Upland Red Soil	KONG Pei-jun, ZHENG Jie, LUAN Lu, <i>et al.</i> (6047)
Effects of Nitrogen and Phosphorus Additions on Soil Microorganisms in Saline-alkaline Grassland	YANG Jian-qiang, DIAO Hua-jie, HU Shu-ya, <i>et al.</i> (6058)
Effects of Combined Application of Biochar with Chemical Fertilizers and Organic Fertilizers on Nutrients and Phosphorus Forms in Purple Soils	XIANG Shu-jiang, YU Luo, XIONG Zi-yi, <i>et al.</i> (6067)
Effects of <i>Enteromorpha prolifera</i> Biochar and Wood Vinegar Co-application on Takyric Solonetz Improvement and Yield of Oil Sunflower	WANG Zheng, SUN Zhao-jun, Sameh El-Sawy, <i>et al.</i> (6078)