

目次

气候变化对中国夏季臭氧影响 胡安琪, 谢晓栋, 龚康佳, 侯宇晖, 胡建林 (1801)
基于 EOF 分解和 KZ 滤波的 2019 ~ 2021 年中国臭氧时空变化及驱动因素分析 王浩琪, 张裕芬, 罗忠伟, 王艳阳, 戴启立, 毕晓辉, 吴建会, 冯银厂 (1811)
华北工业城市夏季大气臭氧生成机制及减排策略 郑镇森, 窦建平, 张国涛, 李丽明, 徐勃, 杨文, 白志鹏 (1821)
2015 ~ 2020 年中国城市 PM_{2.5}-O₃ 复合污染时空演变特征 牛笑笑, 钟艳梅, 杨璐, 易嘉慧, 慕航, 吴倩, 洪松, 何超 (1830)
2015 ~ 2021 年京津冀及周边地区 PM_{2.5} 和臭氧复合污染时空特征分析 宋小涵, 燕丽, 刘伟, 贺晋瑜, 王亚晨, 黄同林, 李园园, 陈敏, 孟静静, 侯战方 (1841)
2000 ~ 2020 年中国典型经济区 PM_{2.5} 时空变化及其与植被景观格局的关系 徐勇, 李欣怡, 黄雯婷, 郭振东, 盘钰春, 郑志威, 戴强玉 (1852)
北京市核心区冬春季大气离子沉降量特征及来源解析 赵宇, 李贝贝, 黄玉虎, 梁静, 杨洪玲, 秦建平, 朱玲 (1865)
南京近郊农田大气颗粒物及金属干沉降输入特征 刘翠英, 靳浩, 樊建凌 (1873)
西安冬季 PM_{2.5} 中不同极性水溶性有机物的污染特征及氧化潜势 罗玉, 黄沙沙, 张甜, 孙健, 沈振兴 (1882)
机动车源和民用燃料源颗粒物中有机碳和元素碳的排放特征 王红磊, 刘思晗, 孙杰娟, 刘焕武, 赵天良, 裴宇僊, 可玥, 武自豪, 刘诗云 (1890)
伊犁河谷核心区春季 PM_{2.5} 组分特征及来源解析 谷超, 徐涛, 马超, 伊布提哈尔·加帕尔, 郭丽瑶, 李新琪, 杨文 (1899)
基于高空间分辨率的郑州市城镇居民 PM_{2.5} 暴露浓度与健康风险变化评估 李媛, 徐艺斐, 袁明浩, 苏方成, 王申博, 王克, 张瑞芹 (1911)
基于多源数据融合的河南省建材行业排放清单 刘晓, 胡京南, 王红梅, 杨丽, 张皓 (1924)
开封市城区冬季大气挥发性有机物污染特征及来源解析 施雨其, 郑凯允, 丁玮婷, 刘金平, 陈洪光, 高光, 王玲玲, 王楠, 马双良, 郑瑶, 谢绍东 (1933)
2020 年和 2021 年南京城区臭氧生成敏感性和 VOCs 来源变化分析 陆晓波, 王鸣, 丁峰, 喻义勇, 张哲海, 胡崑 (1943)
北京市城区夏季大气 VOCs 变化特征及臭氧生成潜势 张蕊, 孙雪松, 王裕, 王飞, 罗志云 (1954)
青岛市臭氧污染与非污染期间 VOCs 化学特征及来源解析 贾智海, 顾瑶, 孔翠丽, 宋江邦, 孟赫, 石来元, 吴建会, 刘保双 (1962)
基于总过氧自由基观测研究合肥市西郊夏季 O₃ 生成特征 俞辉, 韦娜娜, 徐学哲, 刘芊芊, 姚易辰, 赵卫雄, 张为俊 (1974)
“大气十条”政策的节能降碳效果评估与创新中介效应 李少林, 王齐齐 (1985)
北京市减排协同控制情景模拟和效应评估 俞珊, 张双, 张增杰, 翟培芝, 刘桐珊 (1998)
基于不同排放清单的长三角人为 CO₂ 排放模拟 马心怡, 黄文晶, 胡凝, 肖薇, 胡诚, 张弥, 曹畅, 赵佳玉 (2009)
武汉汉江水源地水质变化趋势及风险分析 卓海华, 姜保锋, 徐杰, 陈洁, 陈杰, 兰秀薇, 范文重, 欧阳雪姣, 兰静 (2022)
长江武汉段水源地典型抗生素及抗性基因污染特征与生态风险评价 李柏林, 张贺, 王俊, 沙雪妮, 陈晓飞, 卓海华 (2032)
陕北矿区典型河流多环芳烃的赋存特征、来源及毒性风险分析 吴喜军, 董颖, 赵健, 刘辉, 张亚宁 (2040)
典型湖泊有机聚集体时空特征及驱动因子 谢贵娟, 龚伊, 朱富成, 刘昌利, 卢宝伟, 邓辉, 汤祥明 (2052)
桂林市不同功能型公园水体微塑料的分布特征及风险评估 李沛钊, 吴莉, 黄菲菲, 林才霞, 舒小华, 张倩 (2062)
长江流域浮游植物群落的环境驱动及生态评价 张静, 胡愈忻, 胡圣, 黄杰 (2072)
环境异质性对三峡库区支流香溪河附石硅藻群落的影响及驱动作用 纪璐璐, 赵璐, 欧阳添, 杨宋琪, 郑保海, 杜雨欣, 李玉鑫, 李佳欣, 施军琼, 吴忠兴 (2083)
武汉市 3 种类型湖泊浮游植物群落特点及关键影响因素 张浩坤, 闵奋力, 崔慧荣, 彭雪, 张心怡, 张淑娟, 李竹栖, 葛芳杰, 张璐, 吴振斌, 刘碧云 (2093)
重金属污染对不同生境中微生物群落结构的影响 何一凡, 肖新宗, 王佳文 (2103)
亳清河水体细菌群落的结构和分布特征 王森, 陈建文, 张红, 李君剑 (2113)
微塑料暴露对小棒指软珊瑚 (*Sinularia microclavata*) 共附生细菌群落结构和功能的影响 刘敏, 车文学, 曾映旭, 边伟杰, 吕淑果, 穆军 (2122)
上海市从源头到龙头的饮用水新型污染物分布特征及健康风险评价 严棋 (2136)
铝改性生物炭对水体低浓度氟的吸附特性 刘艳芳, 高玮, 刘蕊, 尹思婕, 张妙雨, 刘晓帅, 李再兴 (2147)
典型雌激素在微塑料上的吸附特征及位点能量分布 刘姜艳, 郑密密, 胡嘉梧, 柳玉荣, 贺德春, 潘杰 (2158)
面向工业园区废水臭氧氧化深度处理性能评价的模型污染物选择与评估 辛勃, 单超, 吕路 (2168)
基于地理探测器和多源数据的耕地土壤重金属来源驱动因子及其交互作用识别 张宏泽, 崔文刚, 刘绥华, 崔瀚文, 黄月美 (2177)
基于 APCS-MLR 和 PMF 模型的煤矸山周边耕地土壤重金属污染特征及源解析 马杰, 沈智杰, 张萍萍, 刘萍, 刘今朝, 孙静, 王玲灵 (2192)
基于蒙特卡罗模拟的铅锌冶炼厂周边农田土壤重金属健康风险评估 黄剑波, 姜登登, 温冰, 王磊, 石佳奇, 周艳 (2204)
基于 BP 神经网络预测北京市加油站周边土壤多环芳烃含量 马赛炎, 魏海英, 马瑾, 刘奇缘, 吴颐杭, 屈雅静, 田雨欣, 赵文浩 (2215)
石家庄市土壤中喹诺酮类抗生素时空分布及其风险评估 赵鑫宇, 陈慧, 赵波, 宋圆梦, 卢梦淇, 崔建升, 张璐璐, 李双江 (2223)
典型黑色岩系地质高背景区土壤和农产品重金属富集特征与污染风险 邓帅, 段佳辉, 宁墨兔, 谭林, 蒲刚, 陈际行, 齐小兵, 蒋尚智, 谢桃园, 刘意章 (2234)
岩溶区不同母质土壤 Cd 地球化学特征及玉米籽实 Cd 含量预测 戴亮亮, 徐宏根, 巩浩, 彭志刚, 肖凯琦, 吴欢欢, 许青阳, 郭军, 汤媛媛, 张俊 (2243)
龙岩市不同利用类型土壤及农作物 Pb、Cd 和 As 污染风险与贡献分析 王蕊, 陈楠, 张二喜 (2252)
小麦籽粒镉含量影响因素 Meta 分析和决策树分析 刘娜, 张少斌, 郭欣宇, 宁瑞艳 (2265)
黄土高原次生林演替过程土壤有机碳库及其化学组成响应特征 刘涵宇, 刘颖异, 张琦, 封伦, 高起乾, 任成杰, 韩新辉 (2275)
短期氮磷添加对祁连山亚高山草地土壤呼吸组分的影响 江原, 甘小玲, 曹丰丰, 赵传燕, 李伟斌 (2283)
黄河源区斑块退化高寒草甸土壤微生物多样性对长期封育的响应 杨鹏年, 李希来, 李成一, 段成伟 (2293)
不同海拔鳧箭锦鸡儿根际和非根际土壤细菌群落多样性及 PICRUSt 功能预测 李媛媛, 徐婷婷, 艾喆, 魏卢璐, 马飞 (2304)
模拟酸雨及氮沉降对马尾松林土壤细菌群落结构及其多样性的影响 王楠, 钱少郁, 潘小承, 陈一磊, 白尚斌, 徐飞 (2315)
磷石膏和碱蓬对盐渍化土壤水盐及细菌群落结构的影响 刘月, 杨树青, 张万峰, 姜帅 (2325)
磷渣与化肥配施对稻田土壤微生物群落组成及多样性的影响 耿和田, 王旭东, 石思博, 叶正钱, 周文晶 (2338)
增氧对不同秸秆还田稻田田面水养分动态及温室气体排放的影响 胡锦涛, 薛利红, 钱聪, 薛利祥, 曹国帅 (2348)
外源褪黑素对胁迫下水稻幼苗生长和抗氧化系统的影响 储玉檀, 李颜, 黄益宗, 保琼莉, 孙红羽, 黄永春 (2356)
面向 2035 的节能与新能源汽车全生命周期碳排放预测评价 付佩, 兰利波, 陈颖, 郝卓, 邢云翔, 蔡旭, 张春梅, 陈轶嵩 (2365)
农田土壤微塑料分布、来源和行为特征 薄录吉, 李冰, 张凯, 马荣辉, 李彦, 王艳芹, 孙斌, 刘月岩 (2375)
农田土壤除草剂污染的修复技术研究进展 胡芳雨, 安婧, 王宝玉, 徐明恺, 张惠文, 魏树和 (2384)
我国黑土地农田土壤除草剂残留特征研究及展望 李睿, 吴秋梅, 赵归梅, 胡文友, 田康, 黄标, 吴祥为, 刘峰, 赵玉国, 赵永存 (2395)
《环境科学》征订启事(1910) 《环境科学》征稿简则(1984) 信息(2167, 2191, 2324)

2015 ~ 2021 年京津冀及周边地区 PM_{2.5} 和臭氧复合污染时空特征分析

宋小涵¹, 燕丽^{2*}, 刘伟², 贺晋瑜², 王亚晨¹, 黄同林¹, 李园园¹, 陈敏¹, 孟静静¹, 侯战方¹

(1. 聊城大学地理与环境学院, 聊城 252000; 2. 生态环境部环境规划院, 北京 100012)

摘要: 为了解京津冀及周边地区“2+26”城市 PM_{2.5} 和 O₃ 复合污染时空分布特征, 利用 ArcGIS 和 SPSS 软件对 2015 ~ 2021 年京津冀及周边地区“2+26”城市空气质量数据和气象数据进行关联性分析. 结果表明: ① 2015 ~ 2021 年 PM_{2.5} 污染持续减缓, 污染集中在区域中南部; O₃ 污染呈波动上升趋势, 空间分布呈现“西南低, 东北高”的格局. 季节变化来看, PM_{2.5} 浓度主要为: 冬季 > 春季 ≈ 秋季 > 夏季, O₃-8h 浓度为: 夏季 > 春季 > 秋季 > 冬季. ② “2+26”城市 PM_{2.5} 超标天数持续下降, O₃ 超标天数波动上升, 复合污染日下降趋势显著; PM_{2.5} 和 O₃ 污染在夏季呈强正相关, 相关系数最高达 0.52, 冬季呈强负相关. ③ 对比典型城市臭氧污染时期与复合污染时期气象条件, 复合污染发生的温度区间集中在 23.7 ~ 26.5℃、湿度 48% ~ 65% 和 S ~ SE 风向条件下.

关键词: 京津冀及周边地区; PM_{2.5}; 臭氧; 复合污染特征; 协同控制

中图分类号: X513; X515 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)04-1841-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202205089

Spatiotemporal Distribution Characteristics of Co-pollution of PM_{2.5} and Ozone over BTH with Surrounding Area from 2015 to 2021

SONG Xiao-han¹, YAN Li^{2*}, LIU Wei², HE Jin-yu², WANG Ya-chen¹, HUANG Tong-lin¹, LI Yuan-yuan¹, CHEN Min¹, MENG Jing-jing¹, HOU Zhan-fang¹

(1. School of Geography and Environment, Liaocheng University, Liaocheng 252000, China; 2. Chinese Academy of Environment Planning, Beijing 100012, China)

Abstract: PM_{2.5} and ozone co-pollution, which are harmful to not only human health but also the social economy, has become the pivotal issue in air pollution prevention and synergistic control, especially in Beijing-Tianjin-Hebei and its surrounding areas and “2+26” cities. It is necessary to analyze the correlation between PM_{2.5} and ozone concentration and explore the mechanism of PM_{2.5} and ozone co-pollution. In order to study the characteristics of PM_{2.5} and ozone co-pollution in Beijing-Tianjin-Hebei with its surrounding area, ArcGIS and SPSS software were used to analyze the correlation between air quality data and meteorological data of the “2+26” cities in Beijing-Tianjin-Hebei and its surrounding areas from 2015 to 2021. The results indicated: ① PM_{2.5} pollution constantly decreased from 2015 to 2021, and the pollution was concentrated in the central and southern parts of the region; ozone pollution showed a trend of fluctuation and presented a pattern of “low in the southwest and high in the northeast” spatially. In terms of seasonal variation, PM_{2.5} concentration was mainly in the order of winter > spring ≈ autumn > summer, and O₃-8h concentration was in the order of summer > spring > autumn > winter. ② In the research area, days with PM_{2.5} exceeding the standard continued to decline, whereas days with ozone exceeding the standard fluctuated, and days with co-pollution decreased significantly; there was a strong positive correlation between PM_{2.5} and ozone concentration in summer, with the highest correlation coefficient of 0.52, and a strong negative correlation in winter. ③ Comparing the meteorological conditions of typical cities during the ozone pollution period with that of the co-pollution period, the co-pollution occurred under the temperature range of 23.7-26.5℃, humidity of 48%-65%, and S-SE wind direction.

Key words: BTH with surrounding area; PM_{2.5}; ozone(O₃); co-pollution characteristics; synergistic control

近年来,随着《大气污染防治行动计划》和《打赢蓝天保卫战三年行动计划》的先后实施,我国大气细颗粒物(PM_{2.5})污染治理取得显著成效,PM_{2.5}浓度明显下降^[1].但大气污染形势依然严峻,秋冬季PM_{2.5}污染依然突出,臭氧(O₃)污染逐步显现^[2],在京津冀及周边地区O₃已替代PM_{2.5}成为夏季主要的大气污染物^[3~5].此外,以PM_{2.5}叠加O₃的复合污染现象逐渐凸显^[6].严重的复合污染问题不仅会影响人类身体健康^[7~9],还会给人类社会造成经济方面的损失^[10].目前,PM_{2.5}和O₃的协同控制已经成为大气污染防治的关键.

由于PM_{2.5}和O₃复合污染生成机制复杂^[11~13],且与气象因素高度相关^[14],因此,深入分析时空分

布特征和气象关联性,有助于区域大气污染精细化管理.目前,关于PM_{2.5}和O₃复合污染的时空分布、生成机制和气象因素已有研究.孙金金等^[15]研究表明气象条件的影响可以削弱PM_{2.5}和O₃的正协同关系,相对湿度是削弱正协同关系的主控因素;Dai等^[16]研究2013~2019年长三角地区PM_{2.5}和O₃的复合污染,结果表明PM_{2.5}和O₃之间为正相关关系且复合污染多发生在高温、高湿和低风速的天气;隋玫萱等^[17]研究2015年山东省PM_{2.5}和O₃复合污

收稿日期: 2022-05-08; 修订日期: 2022-06-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(72171157); 国家重点研发计划项目(2022YFC3703001)

作者简介: 宋小涵(2000~),女,硕士研究生,主要研究方向为大气复合污染特征分析, E-mail: 429455125@qq.com

* 通信作者, E-mail: yanli@caep.org.cn

染,发现其受夏季高温低湿的大陆气团控制的影响主要出现在夏季;赵淑婷等^[18]研究邯郸市复合污染,发现其复合污染多出现在春夏季节,主要受温度、湿度和气压的影响,风速影响较小;陈楠等^[19]研究发现,2015~2020年湖北省PM_{2.5}和O₃的相关性在夏季主要以正相关为主,冬季则以负相关为主. 尽管由于各地的产业结构不同,污染物特征各有不同,但是可以发现,大气污染普遍出现在高湿静稳的天气状况下^[20]. 前体物高浓度排放叠加不利扩散的气象条件,更易引发PM_{2.5}和O₃的复合污染.

京津冀及周边地区是我国大气复合污染问题最为突出的区域. 本文通过分析2015~2021年京津冀及周边地区空气质量的时空变化特征,并就各季节PM_{2.5}和O₃浓度进行相关性分析,探讨PM_{2.5}和O₃复合污染的成因机制,以期京津冀及周边地区开展PM_{2.5}和O₃污染协同防控提供依据.

1 材料与方法

1.1 数据来源

本研究数据包括京津冀及周边“2+26”城市2015~2021年大气常规6项污染物(PM_{2.5}、PM₁₀、NO₂、SO₂、CO和O₃)日均浓度和基础气象数据,并

依据《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)进行污染物超标的判别. 气温和风速数据来源于中国空气质量历史数据网站(<https://quoteoft.net/air/>),湿度数据来源于真气网(<https://m.zq12369.com/cityaqi.php>).

1.2 研究方法

利用ArcGIS 10.8对PM_{2.5}和O₃浓度进行时空变化特征分析;利用SPSS26.0软件对各城市分季节PM_{2.5}和O₃浓度进行皮尔森相关性分析. 根据我国《环境空气质量标准》(GB 3095-2012),将 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 大于 $75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 定义为PM_{2.5}超标日;将 $\rho(\text{O}_3-8\text{h})$ 大于 $160 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 定义为O₃超标日,将两者浓度同时超标定义为复合日. PM_{2.5}的年评价值按照标准采用全年各日浓度的算术平均值,限值 $35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,O₃的年评价值采用O₃日最大8h(O₃-8h)浓度平均值的全年第90百分位数^[21],限值 $160 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

1.3 研究区概况

如图1所示,京津冀及周边地区“2+26”城市(“2+26”城市),包括北京市、天津市、河北省的8个城市(石家庄市、唐山市、廊坊市、保定市、沧州市、衡水市、邢台市和邯郸市),山西省的4个城市

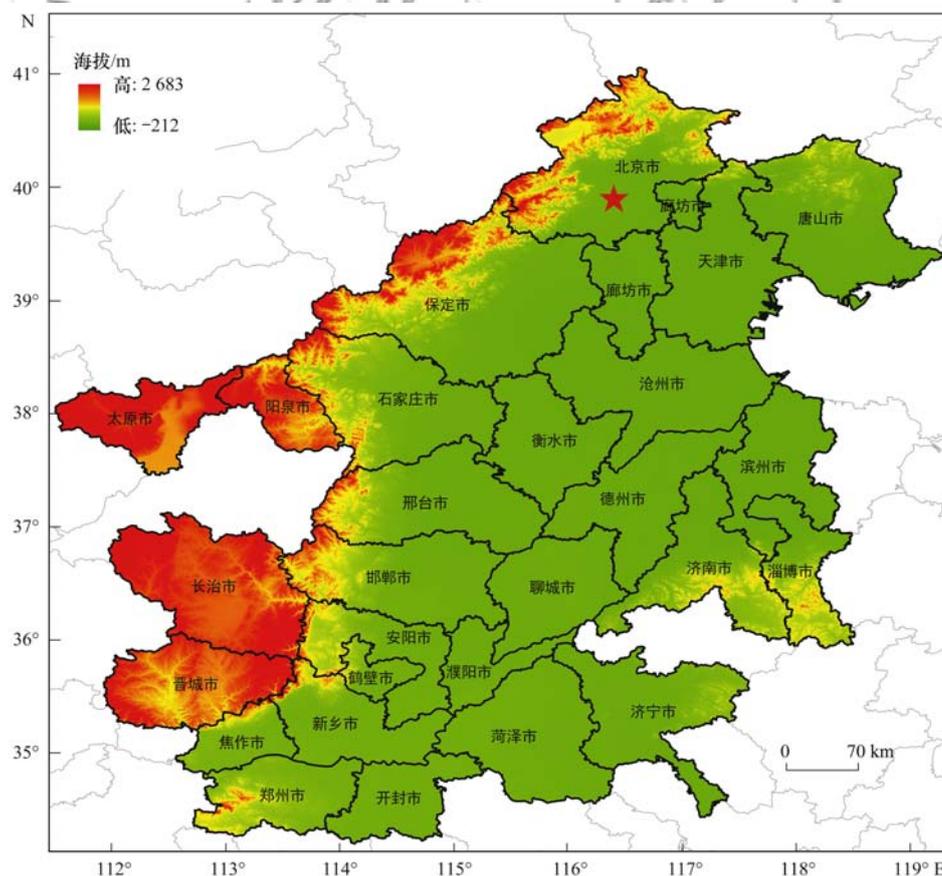


图1 研究区域示意

Fig. 1 Map of research area

(太原市、阳泉市、长治市和晋城市), 山东省的 7 个城市(济南市、淄博市、济宁市、德州市、聊城市、滨州市和菏泽市), 河南省的 7 个城市(郑州市、开封市、安阳市、鹤壁市、新乡市、焦作市和濮阳市).

2 结果与讨论

2.1 PM_{2.5}和 O₃ 浓度时空分布特征分析

2015 ~ 2021 年“2 + 26”城市 PM_{2.5}浓度年均值的时间变化如图 2 所示. 从整体上来看, 2015 ~ 2021 年“2 + 26”城市 PM_{2.5}浓度年均值呈逐步下降趋势, 从 2015 年的 83.8 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 下降至 2021 年的 45.4 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 年均降幅为 9.72%. 其中 2017 ~ 2018 年降幅最为明显, 为 17.14% (12.0 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), 推测这与 2017 年“2 + 26”城市采取的联合防治政策有关^[22]. 研究时段内仅 2021 年北京市 ρ (PM_{2.5}) (34.3 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 达到我国环境空气质量二级标准. 从空间分布来看(图 3), PM_{2.5}浓度年均值高值集中于研究区域中南部, 低值集中于北部, 与以往研究结果一致^[23]. 位于研究区域北部的保定市、北京市在 2015 ~ 2021 年 PM_{2.5}浓度降幅最大, 临近的廊坊市降幅亦居于较高位次. 中部区域的衡水市、邢台市、德州市、聊城市和济南市 PM_{2.5}浓度降幅次之, 其他城市降幅相对较低.

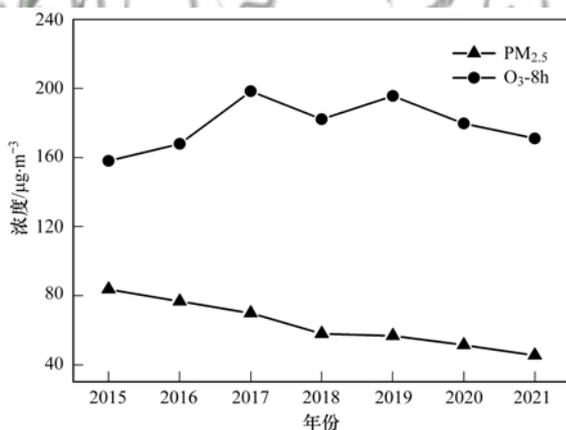


图 2 2015 ~ 2021 年京津冀及周边地区 PM_{2.5}浓度年均值及 O₃-8h 第 90 百分位数浓度的时间序列

Fig. 2 Time series of annual mean PM_{2.5} concentrations and O₃-8h 90th percentile concentrations in BTH and its surrounding area from 2015 to 2021

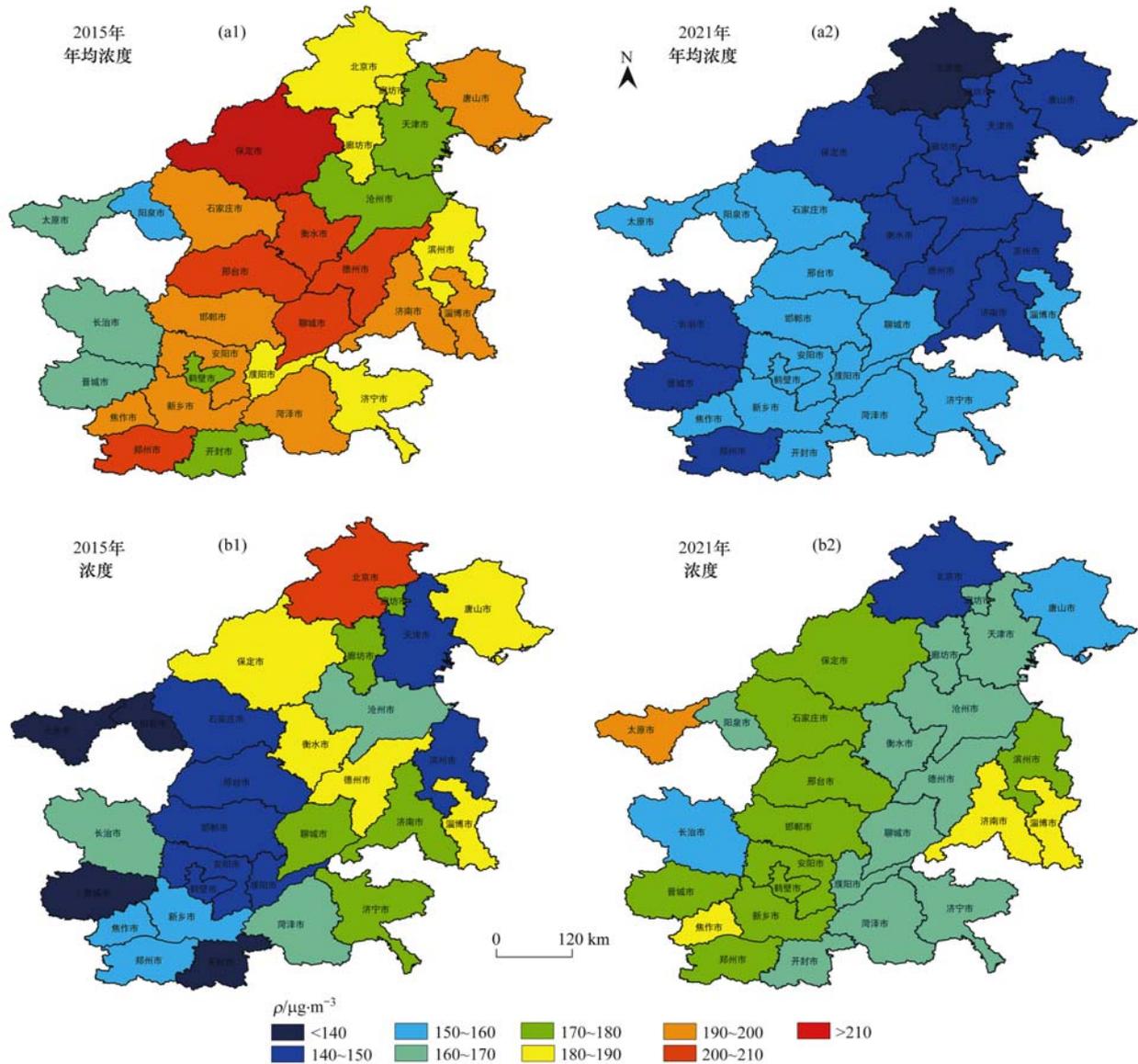
O₃-8h 第 90 百分位数在 2015 ~ 2021 年整体波动上升, 由 158.0 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 升至 171.1 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 浓度上升呈“M”型. 其中 2016 ~ 2017 年间涨幅最快, 为 18.25% (30.6 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$). 2017 年 O₃-8h 第 90 百分位数最高, 为 198.5 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 可能与当年 PM_{2.5}浓度迅速下降有关^[24]. 2019 年 O₃-8h 第 90 百分位数次

之, 为 195.7 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 或与当年极端高温天气利于 O₃ 的生成有关^[21]. 从空间分布来看(图 3), O₃-8h 第 90 百分位数呈现“西南低, 东北高”的空间分布格局. 2015 年仅西南部部分城市符合《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)二级标准 (160 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), 2021 年北京市、唐山市和长治市亦符合标准. 晋城市、太原市和阳泉市 O₃-8h 第 90 百分位数涨幅最大, 中北部部分城市呈负增长, 其中北京市在 2015 ~ 2021 年下降最快.

2015 ~ 2021 年“2 + 26”城市各季节 PM_{2.5}和 O₃-8h 变化趋势如图 4 所示. PM_{2.5}在各个季节的大小表现主要为: 冬季 > 春季 ≈ 秋季 > 夏季, 各季节在 2015 ~ 2021 年的降幅分别为春季 31.19% (22.7 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)、夏季 56.75% (34.4 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)、秋季 31.70% (32.5 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 和冬季 50.41% (63.7 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$). 2020 ~ 2021 年春季 PM_{2.5}上涨最快, 为 29.71% (11.5 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$). 比较 2020 年, 2021 年春季 PM_{2.5}增加明显, 与 2020 年新冠肺炎疫情期间响应管制措施, PM_{2.5}前体物污染排放减少有关^[25]. 2021 年夏季“2 + 26”城市全部达到二级标准 [ρ (PM_{2.5}) 为 35 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]. 从各城市来看, 2021 年冬季“2 + 26”城市中部区域的保定市、沧州市、邯郸市、衡水市、石家庄市和邢台市等降幅明显, 均在 30% 以上.

O₃-8h 在各个季节的大小基本特征为: 夏季 > 春季 > 秋季 > 冬季. 除春季外, 研究时段内其他季节 O₃-8h 整体呈波动上升趋势. 2015 ~ 2021 年春季 O₃-8h 下降 3.27% (5.3 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), 其他季节上涨幅度: 夏季为 12.59% (23.0 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), 秋季为 8.61% (11.5 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), 冬季为 32.73% (22.2 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$). 尽管冬季上涨幅度最高, 但各城市均在标准范围内, 而其他季节均出现城市 O₃-8h 超标的现象. 这是由于冬季气温较低, 不利于进行快速光化学反应^[26], 使得 O₃ 生成减缓有关. 2019 ~ 2020 年冬季 O₃-8h 上升, 疫情期间管控措施使 NO_x 浓度降低, 使得 NO 的滴定作用被削弱^[27], 臭氧浓度上升. 2018 ~ 2019 年秋季臭氧浓度上涨最快, 为 31.63% (44.8 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$). 从各城市来看, 2021 年秋季仅菏泽市、焦作市和滨州市未达标, 其余城市均达标.

2015 ~ 2021 年“2 + 26”城市 PM_{2.5}、O₃-8h、CO、SO₂ 和 NO₂ 月均浓度变化如图 5 所示. O₃-8h 的高值主要发生在 4 ~ 9 月期间, 与朱媛媛等^[28]研究的结果相似. 而 PM_{2.5}在 11 月至次年 2 月期间则最高, 与褚晰晰等^[29]研究的结果相似. NO₂、CO、SO₂ 和 PM_{2.5}的变化趋势基本一致, 四者和 O₃-8h 之间月均浓度变化呈现“此消彼长”的关系. O₃ 浓度高



(a) $PM_{2.5}$ 浓度年均值, (b) O_3 -8h 第 90 百分位数浓度

图 3 2015 年和 2021 年京津冀及周边地区 $PM_{2.5}$ 浓度年均值和 O_3 -8h 第 90 百分位数的空间分布对比

Fig. 3 Spatial distributions of annual mean $PM_{2.5}$ concentrations and O_3 -8h 90th percentile concentrations in BTH and its surrounding areas from 2015 to 2021

值多发生在暖季,较高温度、充足的太阳辐射等条件均有利于光的化学反应生成 O_3 . O_3 -8h 在 6 月达到峰值^[30],7 月和 8 月浓度逐渐下降,一方面由于太阳辐射减少,另一方面主要是由于“2+26”城市进入雨季,降水对 O_3 的雨除作用明显^[31,32]. $PM_{2.5}$ 高值多发生在冬季,一般由采暖季燃煤污染物排放叠加不利扩散的天气条件导致. 经过“2+26”城市实行“煤改电”等措施, $PM_{2.5}$ 浓度显著下降^[33]. SO_2 、 NO_2 和 CO 逐年下降,降幅明显,说明京津冀“2+26”城市联防联控具有一定成效. 有研究表明:“2+26”城市 O_3 的生成对挥发性有机物 (VOCs) 敏感^[34],尽管 NO_2 浓度排放下降,但在 VOCs 浓度较高水平下仍然能够进行光化学反应产生大量 O_3 ,致

使浓度上升^[35].

2.2 $PM_{2.5}$ 和 O_3 复合污染特征

2.2.1 $PM_{2.5}$ 和 O_3 污染物超标日特征

2015~2021 年“2+26”城市复合污染天数变化趋势如图 6 所示. 2015~2021 年“2+26”城市 $PM_{2.5}$ 超标天数持续下降, O_3 超标天数波动上升,复合污染日下降趋势显著. $PM_{2.5}$ 超标天数下降趋势明显,平均每个城市年均下降 17.8 d, O_3 超标天数年均上涨 2.1d,复合污染日年均降幅 3.7 d. 2020 年复合污染日已下降至 24 d,2021 年为 27 d. O_3 和 $PM_{2.5}$ 超标天数的比值显示,2019 年和 2020 年“2+26”城市 O_3 超标日频次略超过 $PM_{2.5}$ 超标天数,占主导地位,其他年份都为 $PM_{2.5}$ 超标天数超过 O_3 超标日.

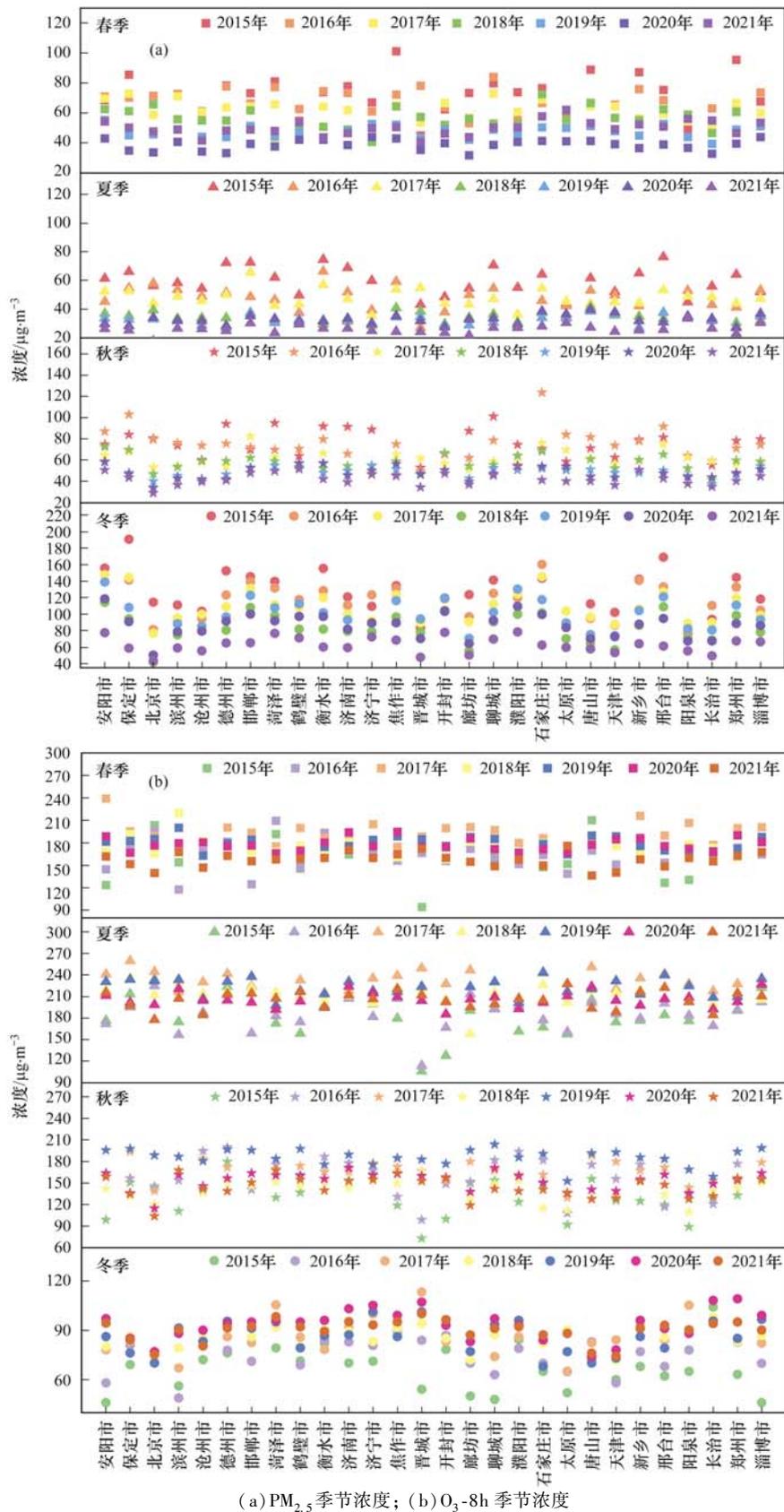


图 4 2015 ~ 2021 年京津冀及周边地区 PM_{2.5}和 O₃-8h 各季节分城市浓度变化

Fig. 4 Seasonal variations in PM_{2.5} and O₃-8h concentrations in each city in BTH with the surrounding area from 2015 to 2021

2015 ~ 2019 年 O₃ 和 PM_{2.5} 超标天数的比值持续走高,表明在此过程中 O₃ 污染和 PM_{2.5} 污染程度相比逐渐上升,2019 ~ 2021 年 O₃ 污染情况稍有改善.复

合污染日主要集中分布在 4 ~ 10 月,复合污染天数整体呈下降水平. 2019 年和 2020 年复合污染天数高值出现在 9 月,其余年份多出现在 4 月和 6 月.在

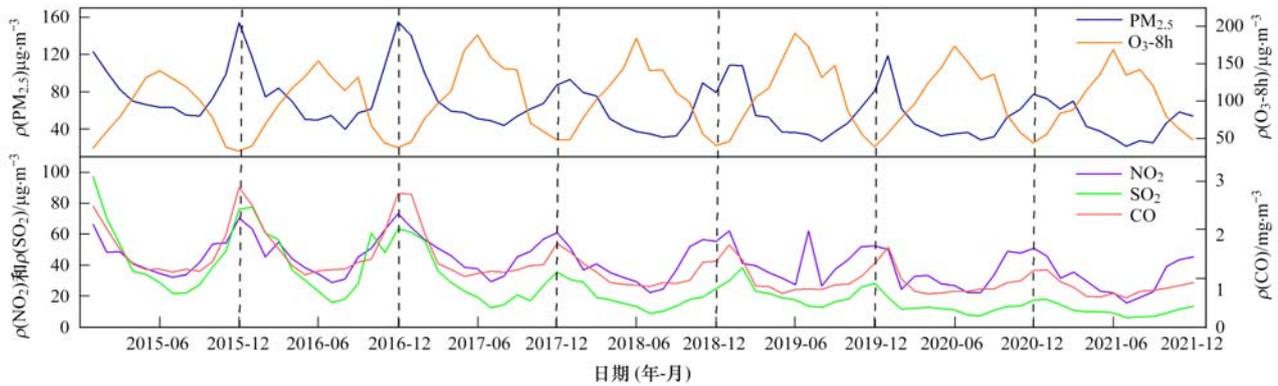


图5 2015~2021年京津冀及周边地区SO₂、CO、NO₂、PM_{2.5}和O₃-8h月均浓度变化

Fig. 5 Monthly variations in SO₂, CO, NO₂, PM_{2.5}, and O₃-8h concentrations averaged over BTH and its surrounding area from 2015 to 2021

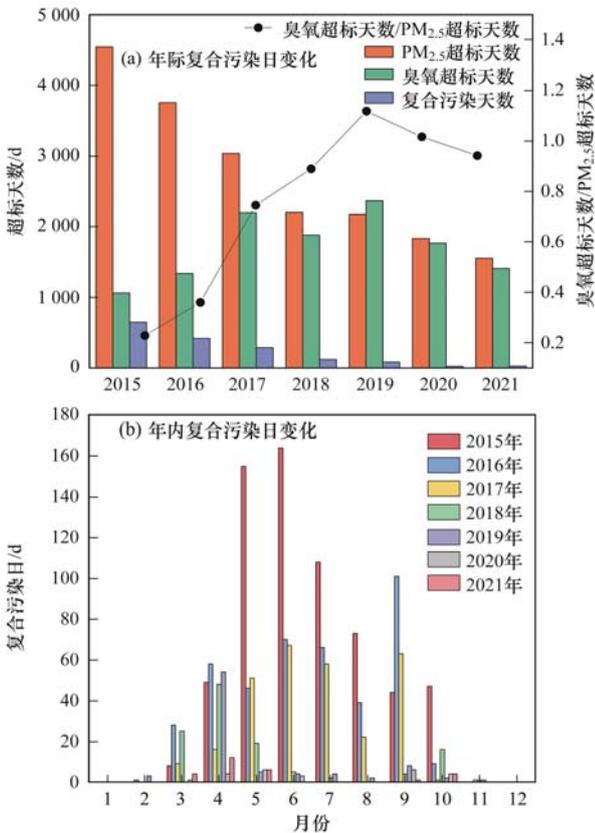


图6 2015~2021年京津冀及周边地区年际和年内复合污染日变化趋势

Fig. 6 Annually and monthly changing trend of co-polluted days in BTH and its surrounding area from 2015 to 2021

此期间对PM_{2.5}和O₃的协同控制对区域大气污染防治至关重要。

“2+26”城市各城市2015~2021年的复合污染日天数见表1。2015年德州市复合污染天数最多,为67 d。其次为衡水市、淄博市、聊城市、保定市和唐山市,复合污染日天数均超过40 d。晋城市复合污染日天数最少,为0 d。2015~2021年各城市复合污染日天数降幅明显,2021年菏泽市复合污染日天数最多,为4 d。到2021年,将近半数的城市复合

污染日天数为0 d,这些城市集中分布研究区域的北部。各城市复合污染日天数显著降低,“2+26”城市复合污染状况稳中向好。

2.2.2 PM_{2.5}和O₃相关性分析

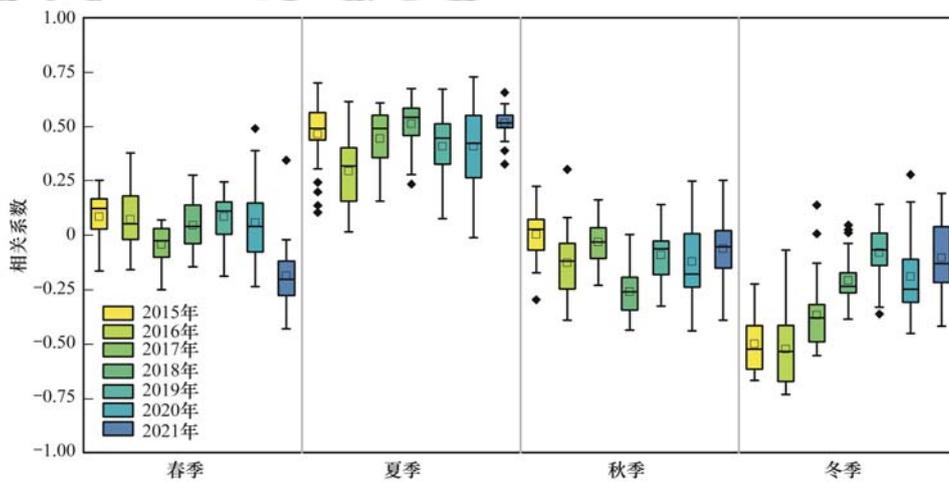
基于PM_{2.5}和O₃之间在生成过程和理化性质上的复杂影响,两者之间的浓度关系密切。计算“2+26”城市2015~2021年各城市每日PM_{2.5}和O₃-8h进行皮尔逊相关系数,检验两者之间的相关程度,各季节的相关系数的结果如图7所示。各季节基本呈现“夏正冬负”的相关性特征,与以往研究结果相似^[36]。夏季两者基本上全部呈正相关,且相关性最强。冬季两者以负相关为主,两者之间在冬季的相关系数自2019年出现反弹式上升。春季基本以弱正相关为主,2021年春季各城市平均相关系数由正数扭转为负数。秋季则以弱负相关为主,各年整体变化不大。

夏季高温天气下两者表现为强正相关关系^[37],2021年夏季各城市平均相关系数达到最高值0.52。大气总氧化剂O_x(O_x=O₃+NO₂)作为表征大气氧化性能力的存在^[38],其浓度的上升客观表明夏季大气氧化性能力的增强。强大气氧化性条件下,SO₂和NO₂能够转化为二次无机气溶胶并且部分VOCs转化为二次有机气溶胶,引起大气中PM_{2.5}污染。对比2015~2021年“2+26”城市PM_{2.5}与O₃-8h和O_x的相关系数发现(见表2),除2016年PM_{2.5}与O₃-8h和O_x的相关系数持平以外,在其他年份PM_{2.5}与O_x之间有更好地正向关系,表明夏季大气氧化能力的提升是造成复合污染的主要原因。并且随O₃浓度增加,两者相关性越强^[39]。

从空间上分析PM_{2.5}和臭氧的相关性,春季各城市平均相关系数以正值为主,呈微弱的正相关。2020年春季在研究区域北部的北京市($R = 0.49$, $P < 0.01$)、天津市($R = 0.31$, $P < 0.01$)和廊坊市($R = 0.35$, $P < 0.01$)一带相关系数较高,明显高于研究

表 1 2015 ~ 2021 年京津冀及周边地区各城市复合污染日天数/d
Table 1 Co-polluted days in every single city of BTH and its surrounding area from 2015 to 2021/d

城市	年份						
	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
安阳市	11	5	13	2	3	0	3
保定市	41	31	23	11	3	1	0
北京市	37	38	12	10	6	2	0
滨州市	16	12	13	11	0	1	2
沧州市	17	10	7	7	1	0	1
德州市	67	29	13	4	3	0	0
邯郸市	9	8	25	5	6	2	0
菏泽市	27	26	9	1	2	0	4
鹤壁市	4	2	1	0	2	1	0
衡水市	45	24	10	2	2	1	0
济南市	39	19	8	2	1	2	0
济宁市	27	6	2	0	6	1	1
焦作市	19	12	14	3	3	1	1
晋城市	0	8	18	2	3	2	0
开封市	6	6	5	2	3	0	1
廊坊市	30	16	12	3	2	0	0
聊城市	42	21	10	3	1	0	1
濮阳市	13	7	0	2	2	0	3
石家庄市	14	26	17	5	2	0	0
太原市	6	1	2	1	2	1	3
唐山市	40	23	12	11	9	3	1
天津市	12	12	10	8	8	1	0
新乡市	26	9	2	7	1	0	2
邢台市	12	11	12	4	5	0	0
阳泉市	5	18	10	6	2	1	1
长治市	15	5	10	0	0	0	0
郑州市	25	11	5	4	3	0	1
淄博市	43	22	13	4	2	4	2
总计	648	418	288	120	83	24	27



箱体区间集中在数据的 25% ~ 75% 范围之间, 方形为平均值, 菱形表示异常值

图 7 2015 ~ 2021 年京津冀及周边地区 PM_{2.5}与 O₃-8h 分季节皮尔森相关系数箱线图

Fig. 7 Boxplots of seasonal Pearson correlation coefficient of daily PM_{2.5} concentrations and O₃-8h concentrations in BTH and its surrounding area from 2015 to 2021

表 2 2015 ~ 2021 年京津冀及周边地区夏季 PM_{2.5}与 O₃-8h 和 O_x 的相关系数¹⁾

Table 2 Correlation coefficients of O₃-8h, O_x, and PM_{2.5} insummer season in BTH and its surrounding area from 2015 to 2021

项目	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	2021 年
R(PM _{2.5} -O ₃ -8h)	0.46 **	0.38 **	0.41 **	0.49 **	0.40 **	0.41 **	0.51 **
R(PM _{2.5} -O _x)	0.48 **	0.38 **	0.44 **	0.51 **	0.46 **	0.46 **	0.53 **

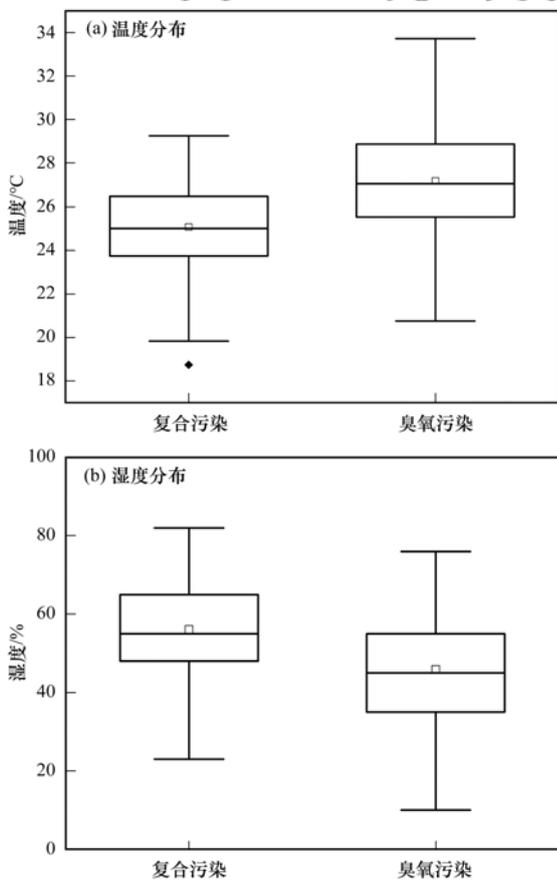
1) ** 表示 P < 0.01

区域南部. 夏季研究区域内部在空间上均呈现正相关关系, 在空间上具有均一性, 无明显的特殊值区域. 冬季整体以负相关为主, 2021 年在山东省西部的菏泽市、济南市、济宁市和聊城市一带出现负相关, 相关系数均在 -0.3 左右. 在 $PM_{2.5}$ 和臭氧的相关性分析上可以看到明显的区域性特征, 这是由于大气污染物的区域性传输的影响.

2.3 典型城市 $PM_{2.5}$ 和 O_3 复合污染的气象条件

气象条件在大气污染物的形成和去除过程中起到非常重要的作用^[40]. 本研究选取安阳市、保定市、北京市、济南市、太原市、唐山市、天津市、邢台市和郑州市共 9 个城市的气象要素数据, 通过对比复合污染 [区域 50% 以上城市 $\rho(PM_{2.5}) > 75 \mu g \cdot m^{-3}$, $\rho(O_3-8h) > 160 \mu g \cdot m^{-3}$] 和 O_3 污染 [区域 50% 以上城市 $\rho(PM_{2.5}) < 75 \mu g \cdot m^{-3}$, $\rho(O_3-8h) > 160 \mu g \cdot m^{-3}$] 发生时段 9 个城市的气象条件, 归纳总结复合污染天气易于发生的气象条件规律. 复合污染时期共选取 118 个样本, 臭氧污染时期共选取 114 个样本.

图 8(a) 为 9 个城市在复合污染和臭氧污染条



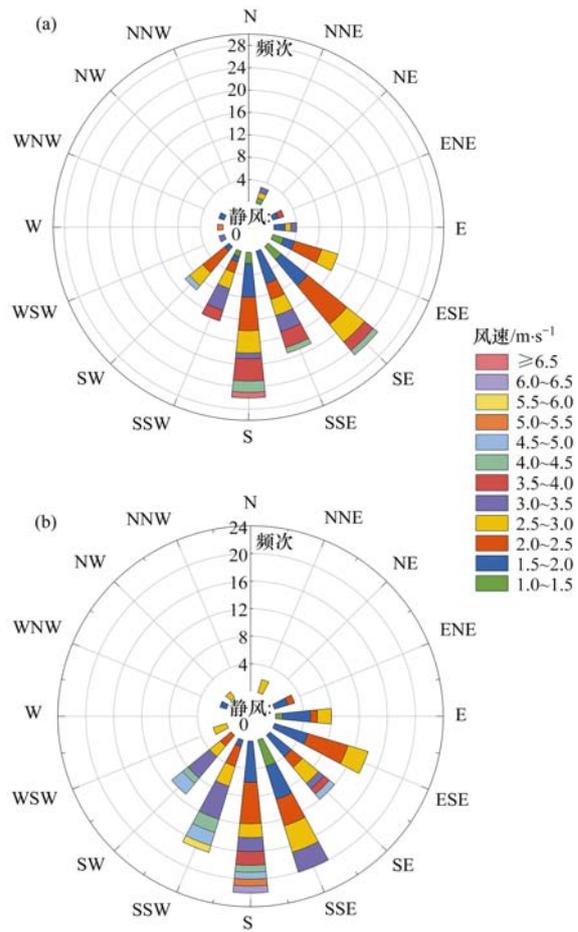
箱体区间集中在数据的 25%~75% 范围之间, 方形为平均值, 菱形表示异常值

图 8 2015~2021 年 9 个城市复合污染和臭氧污染时段温度和湿度分布

Fig. 8 Distribution of temperature and humidity during co-polluted period and ozone pollution period in nine cities from 2015 to 2021

件下气温箱线图, 箱体区间集中在数据的 25%~75% 范围之间. 复合污染时段温度的主要区间集中在 23.7~26.5℃ 之间, 整体低于臭氧污染发生的温度区间 25.5~28.9℃, 与已有研究的结果一致^[41]. 复合污染和臭氧污染发生的时间主要集中在夏季, 但臭氧污染发生的温度条件更高, 一方面在夏季较高的温度会促进化学反应及大气边界层的通量^[42], 另一方面, 较高的温度条件下会影响气/粒分配, 导致污染物向气态的分配, 为 O_3 的生成提供更多有利条件^[43].

图 8(b) 为 9 个城市在复合污染和臭氧污染条件下湿度箱线图. 复合污染时段湿度的主要区间集中在 48%~65% 之间, 整体高于臭氧污染发生的湿度区间 35%~55%. 高湿的环境条件下水汽充足, 削弱了紫外辐射, 不利于光化学反应的发生, O_3 生成受到抑制^[44]. 相对湿度对 $PM_{2.5}$ 和 O_3 浓度的作用完全相反, 和 $PM_{2.5}$ 浓度之间呈正向相关, 和 O_3 浓度之间呈负向相关, 这使得相对湿度对复合污染天气的作用具有复杂性^[45].



(a) 复合污染时段; (b) 臭氧污染时段

图 9 2015~2021 年 9 个城市复合污染和臭氧污染时段风向玫瑰图

Fig. 9 Wind rose during co-polluted period and ozone pollution period in nine cities from 2015 to 2021

复合污染和臭氧污染发生时段 9 个城市地面风向玫瑰图如图 9 所示. 复合污染和臭氧污染常发生于夏季及其前后, 此阶段风向均以 S 方向为主, 两个时期主要盛行风向相差不大. 风向会直接决定气团来向和气团性质, 在大气污染的区域性传输过程中起到重要作用. 复合污染时期风向集中分布在 S ~ SE 方向, 占比为 58.12%; 臭氧污染时期风向集中分布在 SSW ~ SSE 方向, 占比为 51.33%, 携带南方污染气团北上, 受到京津冀及周边地区“2 + 26”城市西部太行山脉地形的阻挡作用, 大量污染物在山前积累形成区域性污染过程^[46].

大气污染是多因素共同作用的结果, 气象因素中温度、湿度、风速、气压、降水和大气边界层高度等都会对污染物的清除和扩散产生影响^[47]. 不同污染物物化性质各异, 受到气象条件正负影响和敏感程度也各不相同, 大气复合污染形成机制十分复杂. 研究显示, PM_{2.5}和 O₃污染暴发前伴随着前体物 NO_x和 SO₂的高浓度现象的发生^[43], 因此在预测到不利气象条件发生前加强各类污染物的排放限制^[48], 逐步消除复合污染天气对京津冀及周边地区“2 + 26”城市的影响.

3 结论

(1) 2015 ~ 2021 年京津冀及周边地区 PM_{2.5}持续下降. 从空间上看, 污染区域主要集中在“2 + 26”城市区域内中南部, 北部污染程度较轻; O₃污染呈波动上升趋势, 空间分布呈现“西南低, 东北高”的格局; 从季节变化来看, PM_{2.5}在各个季节的大小表现主要为: 冬季 > 春季 ~ 秋季 > 夏季, O₃-8h 在各个季节的大小表现主要为: 夏季 > 春季 > 秋季 > 冬季; PM_{2.5}在 11 月至次年 2 月期间最高, O₃-8h 在 4 ~ 9 月期间最高, 两者浓度变化“此消彼长”.

(2) 2015 ~ 2021 年“2 + 26”城市 PM_{2.5}超标天数持续下降, O₃超标天数波动上升, 复合污染日下降趋势显著且多集中在各年的 4 ~ 10 月; 研究 PM_{2.5}与 O₃的相关性, 两者的浓度在夏季呈强正相关, 春季以弱正相关为主, 秋季则以弱负相关为主, 冬季两者以负相关为主; 从空间上看, 2021 年春季北京市、天津市和廊坊市一带出现了明显的正相关, 明显高于研究区域南部, 夏季强正相关具有区域上的一致性, 2021 年冬季强负相关区域集中在山东省西部的菏泽市、济南市、济宁市和聊城市一带.

(3) 复合污染时段温度的主要区间集中在 23.7 ~ 26.5℃之间, 湿度的主要区间集中在 48% ~ 65%, 风向集中分布在 S ~ SE 方向; 较之 O₃污染, 复合污染发生在较低温度、较高湿度和 S ~ SE 风向条件下.

(4) 随着重污染天气消除攻坚战不断推进, 聚焦京津冀及周边“2 + 26”城市细颗粒物、O₃污染和两种污染物叠加形成的复合污染天气. 复合污染天气多发生在各年的 4 ~ 10 月, 各城市之间在此期间加强协作, 共同推进挥发性有机物和氮氧化物前体物的协同减排, 以实现细颗粒物和臭氧协同控制.

(5) 由此可见, “十四五”期间, 京津冀及周边地区应聚焦秋冬季 PM_{2.5}污染, 持续开展攻坚行动, 强化中南部城市污染管控, 有效应对重污染天气; 夏季加强 O₃污染防治, 同时要强化东北部城市 O₃污染管控, 协同推动区域 PM_{2.5}和 O₃浓度双降, 基本消除重污染天气.

参考文献:

- [1] 孙峰, 姚欢, 刘保献, 等. 2013—2019 年京津冀及周边地区 PM_{2.5}重污染特征[J]. 中国环境监测, 2021, 37(4): 46-53. Sun F, Yao H, Liu B X, et al. Characteristics of PM_{2.5} heavy pollution in Beijing-Tianjin-Hebei and surrounding areas from 2013 to 2019[J]. Environmental Monitoring in China, 2021, 37(4): 46-53.
- [2] 鲁玺, 张少君, 邢佳, 等. 我国大气污染治理的进展与生态文明时代的机遇和挑战(英文)[J]. 工程, 2020, 6(12): 198-216. Lu X, Zhang S J, Xing J, et al. Progress of air pollution control in China and its challenges and opportunities in the ecological civilization era[J]. Engineering, 2020, 6(12): 198-216.
- [3] Zhao S P, Yin D Y, Yu Y, et al. PM_{2.5} and O₃ pollution during 2015-2019 over 367 Chinese cities: spatiotemporal variations, meteorological and topographical impacts [J]. Environmental Pollution, 2020, 264, doi:10.1016/j.envpol.2020.114694.
- [4] 符传博, 周航. 中国城市臭氧的形成机理及污染影响因素研究进展[J]. 中国环境监测, 2021, 37(2): 33-43. Fu C B, Zhou H. Research progress on the formation mechanism and impact factors of urban ozone pollution in China [J]. Environmental Monitoring in China, 2021, 37(2): 33-43.
- [5] 谢静晗, 李飒, 肖钟湧. 50 年来中国臭氧总量时空变化特征[J]. 中国环境科学, 2022, 42(7): 2977-2987. Xie J H, Li S, Xiao Z Y. Investigating the temporal and spatial variabilities of total ozone over China for the past 50 years [J]. China Environmental Science, 2022, 42(7): 2977-2987.
- [6] 姜华, 高健, 李红, 等. 我国大气污染协同防控理论框架初探[J]. 环境科学研究, 2022, 35(3): 601-610. Jiang H, Gao J, Li H, et al. Preliminary research on theoretical framework of cooperative control of air pollution in China [J]. Research of Environmental Sciences, 2022, 35(3): 601-610.
- [7] Wang F Y, Qiu X H, Cao J Y, et al. Policy-driven changes in the health risk of PM_{2.5} and O₃ exposure in China during 2013-2018 [J]. Science of the Total Environment, 2021, 757, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.143775.
- [8] 周骥, 付世华, 彭丽, 等. 臭氧和 PM_{2.5}对慢阻肺死亡影响及气温修饰效应[J]. 中国环境科学, 2021, 41(12): 5904-5911. Zhou J, Fu S H, Peng L, et al. Effect of ozone and PM_{2.5} on chronic obstructive pulmonary disease deaths and the effect modification by the air temperature [J]. China Environmental Science, 2021, 41(12): 5904-5911.
- [9] 陈菁, 彭金龙, 徐彦森. 北京市 2014 ~ 2020 年 PM_{2.5}和 O₃ 时空分布与健康效应评估[J]. 环境科学, 2021, 42(9): 4071-

4082.
Chen J, Peng J L, Xu Y S. Spatiotemporal distribution and health impacts of PM_{2.5} and O₃ in Beijing, from 2014 to 2020 [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(9): 4071-4082.
- [10] 徐靖雅, 么艳鑫, 王颖, 等. 2013—2018 年京津冀地区大气细颗粒物污染致居民健康危害的经济学评价[J]. *卫生研究*, 2021, **50**(6): 938-943, 951.
Xu J Y, Yao Y X, Wang Y, *et al.* Economic evaluation on the health hazards of residents caused by PM_{2.5} in Beijing, Tianjin and Hebei from 2013 to 2018 [J]. *Journal of Hygiene Research*, 2021, **50**(6): 938-943, 951.
- [11] 张涵, 姜华, 高健, 等. PM_{2.5}与臭氧污染形成机制及协同防控思路[J]. *环境科学研究*, 2022, **35**(3): 611-620.
Zhang H, Jiang H, Gao J, *et al.* Formation mechanism and management strategy of cooperative control of PM_{2.5} and O₃ [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2022, **35**(3): 611-620.
- [12] 李红, 彭良, 毕方, 等. 我国 PM_{2.5}与臭氧污染协同控制策略研究[J]. *环境科学研究*, 2019, **32**(10): 1763-1778.
Li H, Peng L, Bi F, *et al.* Strategy of coordinated control of PM_{2.5} and ozone in China [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, **32**(10): 1763-1778.
- [13] 王芑, 朱盛强, 张梦媛, 等. 大气氧化性及其对二次污染物形成的贡献[J/OL]. *科学通报*, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1784.n.20220307.1642.004.html>, 2022-03-10.
Wang P, Zhu S Q, Zhang M Y, *et al.* Atmospheric oxidation capacity and its contribution to secondary pollutants formation [J/OL]. *Chinese Science Bulletin*, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1784.n.20220307.1642.004.html>, 2022-03-10.
- [14] 张小曳, 徐祥德, 丁一汇, 等. 2013—2017 年气象条件变化对中国重点地区 PM_{2.5}质量浓度下降的影响[J]. *中国科学: 地球科学*, 2020, **50**(4): 483-500.
Zhang X Y, Xu X D, Ding Y H, *et al.* The impact of meteorological changes from 2013 to 2017 on PM_{2.5} mass reduction in key regions in China [J]. *Science China Earth Sciences*, 2019, **62**(12): 1885-1902.
- [15] 孙金金, 谢晓栋, 秦墨梅, 等. 不同时间尺度上 PM_{2.5}与臭氧协同关系及其影响因素分析[J/OL]. *科学通报*, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1784.N.20220218.1355.002.html>, 2022-02-18.
Sun J J, Xie X D, Qin M M, *et al.* Analysis of coordinated relationship between PM_{2.5} and ozone and its affecting factors on different timescales [J/OL]. *Chinese Science Bulletin*, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1784.N.20220218.1355.002.html>, 2022-02-18.
- [16] Dai H B, Zhu J, Liao H, *et al.* Co-occurrence of ozone and PM_{2.5} pollution in the Yangtze River Delta over 2013-2019: spatiotemporal distribution and meteorological conditions [J]. *Atmospheric Research*, 2021, **249**, doi:10.1016/j.atmosres.2020.105363.
- [17] 隋玫萱, 王颖樾, 唐晓, 等. 山东省 2015 年 PM_{2.5}和 O₃ 污染时空分布特征[J]. *中国环境监测*, 2019, **35**(2): 59-69.
Sui W X, Wang H Y, Tang X, *et al.* Spatial-temporal distribution characteristics of PM_{2.5} and O₃ over Shandong province in 2015 [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2019, **35**(2): 59-69.
- [18] 赵淑婷, 王丽涛, 齐孟姚, 等. 邯郸市 PM_{2.5}-O₃ 复合污染特征及相互影响研究[J]. *环境科学学报*, 2021, **41**(6): 2250-2261.
Zhao S T, Wang L T, Qi M Y, *et al.* Study on the characteristics and mutual influence of PM_{2.5}-O₃ complex pollution in Handan [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, **41**(6): 2250-2261.
- [19] 陈楠, 陈立, 王莉莉, 等. 2015—2020 年湖北省 PM_{2.5}和臭氧复合污染特征演变分析[J]. *环境科学研究*, 2022, **35**(3): 659-672.
Chen N, Chen L, Wang L L, *et al.* Characteristic and trend analysis of PM_{2.5} and ozone in air compound pollution in Hubei province during 2015-2020 [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2022, **35**(3): 659-672.
- [20] 罗菊英, 张仪, 刘希文. 结合源解析的大气污染相关气象要素特征分析[J]. *环境科学与技术*, 2020, **43**(5): 65-73.
Luo J Y, Zhang Y, Liu X W. Analysis of characteristics of meteorological elements related to air pollution based on source analysis [J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, **43**(5): 65-73.
- [21] 姜华, 常宏咪. 我国臭氧污染形势分析及成因初探[J]. *环境科学研究*, 2021, **34**(7): 1576-1582.
Jiang H, Chang H M. Analysis of China's ozone pollution situation, preliminary investigation of causes and prevention and control recommendations [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021, **34**(7): 1576-1582.
- [22] 王恰, 郑世林. “2+26”城市联合防治行动对京津冀地区大气污染物浓度的影响[J]. *中国人口·资源与环境*, 2019, **29**(9): 51-62.
Wang Q, Zheng S L. Impact of joint prevention and control action on atmospheric pollutant concentration in ‘2+26’ cities [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2019, **29**(9): 51-62.
- [23] 李慧, 王淑兰, 张文杰, 等. 京津冀及周边地区“2+26”城市空气质量特征及其影响因素[J]. *环境科学研究*, 2021, **34**(1): 172-184.
Li H, Wang S L, Zhang W J, *et al.* Characteristics and influencing factors of urban air quality in Beijing-Tianjin-Hebei and its surrounding areas (‘2+26’ cities) [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021, **34**(1): 172-184.
- [24] 关清, 郑有飞, 赵辉, 等. PM_{2.5}及气象要素对乌鲁木齐市臭氧的影响[J]. *科学技术与工程*, 2019, **19**(10): 275-281.
Guan Q, Zheng Y F, Zhao H, *et al.* Effects of PM_{2.5} and meteorological factors on ozone in Urumqi [J]. *Science Technology and Engineering*, 2019, **19**(10): 275-281.
- [25] 窦旺胜, 王成新, 刘照胜. 2020 年初京津冀及周边地区空气污染特征研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2020, **34**(11): 8-14.
Dou W S, Wang C X, Liu Z S. Study on the characteristics of air pollution in Beijing-Tianjin-Hebei region and the surrounding areas at early 2020 [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2020, **34**(11): 8-14.
- [26] 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.
- [27] 赵雪, 沈楠驰, 李令军, 等. COVID-19 疫情期间京津冀大气污染物变化及影响因素分析[J]. *环境科学*, 2021, **42**(3): 1205-1214.
Zhao X, Shen N C, Li L J, *et al.* Analysis of changes and factors influencing air pollutants in the Beijing-Tianjin-Hebei region during the COVID-19 pandemic [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(3): 1205-1214.
- [28] 朱媛媛, 刘冰, 桂海林, 等. 京津冀臭氧污染特征、气象影响及基于神经网络的预报效果评估[J]. *环境科学*, 2022, **43**(8): 3966-3976.
Zhu Y Y, Liu B, Gui H L, *et al.* Characteristics of ozone

- pollution, meteorological impact, and evaluation of forecasting result based on a neural network model in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(8): 3966-3976.
- [29] 褚晰晰, 殷丽娜, 邵盼阳, 等. 中国典型区域 2017—2020 年期间大气重污染的时空特征与演变[J]. *中华疾病控制杂志*, 2021, **25**(10): 1133-1138.
- Chu Y X, Yin L N, Shao P Y, *et al.* The spatio-temporal variation of heavy air pollution in typical regions of China from 2017 to 2020 [J]. *Chinese Journal of Disease Control & Prevention*, 2021, **25**(10): 1133-1138.
- [30] 李苹, 余晔, 赵素平, 等. 2015—2017 年中国近地面 O₃ 污染状况与影响因素分析[J]. *高原气象*, 2019, **38**(6): 1344-1353.
- Li P, Yu Y, Zhao S P, *et al.* Situation and influencing factors of ground-level ozone pollution in China from 2015 to 2017 [J]. *Plateau Meteorology*, 2019, **38**(6): 1344-1353.
- [31] 张森, 丁椿, 李彦, 等. 山东省 O₃ 时空分布及影响因素分析[J]. *环境科学*, 2021, **42**(12): 5723-5735.
- Zhang M, Ding C, Li Y, *et al.* Spatial and temporal distribution of ozone and influencing factors in Shandong province [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(12): 5723-5735.
- [32] 栗泽苑, 杨雷峰, 华道柱, 等. 2013—2018 年中国近地面臭氧浓度空间分布特征及其与气象因子的关系[J]. *环境科学研究*, 2021, **34**(9): 2094-2104.
- Li Z Y, Yang L F, Hua D Z, *et al.* Spatial pattern of surface ozone and its relationship with meteorological variables in China during 2013-2018 [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021, **34**(9): 2094-2104.
- [33] 张茹婷, 陈传敏, 吴华成, 等. 京津冀“煤改电”对 PM_{2.5} 浓度改善影响研究[J]. *中国环境科学*, 2022, **42**(3): 1022-1031.
- Zhang R T, Chen C M, Wu H C, *et al.* Research on the impact of “coal-to-electricity” policy on the improvement of PM_{2.5} concentration in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *China Environmental Science*, 2022, **42**(3): 1022-1031.
- [34] 张鸿宇, 王媛, 卢亚灵, 等. 我国臭氧污染控制分区及其控制类型识别[J]. *中国环境科学*, 2021, **41**(9): 4051-4059.
- Zhang H Y, Wang Y, Lu Y L, *et al.* Identification of ozone pollution control zones and types in China [J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(9): 4051-4059.
- [35] Li K, Jacob D J, Liao H, *et al.* Ozone pollution in the North China Plain spreading into the late-winter haze season [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2021, **118**(10), doi: 10.1073/pnas.2015797118.
- [36] 张运江, 雷若媛, 崔世杰, 等. 2015—2020 年我国主要城市 PM_{2.5} 和 O₃ 污染时空变化趋势和影响因素[J]. *科学通报*, 2022, **67**(18): 2029-2042.
- Zhang Y J, Lei R Y, Cui S J, *et al.* Spatiotemporal trends and impact factors of PM_{2.5} and O₃ pollution in major cities in China during 2015-2020 [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2022, **67**(18): 2029-2042.
- [37] Zhang J, Li Y P, Liu C Q, *et al.* A study of cross-correlations between PM_{2.5} and O₃ based on Copula and Multifractal methods [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2022, **589**, doi:10.1016/j.physa.2021.126651.
- [38] Qin M M, Hu A Q, Mao J J, *et al.* PM_{2.5} and O₃ relationships affected by the atmospheric oxidizing capacity in the Yangtze River Delta, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **810**, doi:10.1016/j.scitotenv.2021.152268.
- [39] 罗悦函, 赵天良, 孟凯, 等. 华北平原和山区城市 PM_{2.5} 和 O₃ 变化关系比较分析[J]. *中国环境科学*, 2021, **41**(9): 3981-3989.
- Luo Y H, Zhao T L, Meng K, *et al.* Comparative analysis of the relationship between PM_{2.5} and O₃ in plain and mountainous cities in North China [J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(9): 3981-3989.
- [40] 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.
- [41] 花丛, 江琪, 迟茜元, 等. 我国中东部地区 2015—2020 年夏半年 PM_{2.5} 和臭氧复合污染气象特征分析[J]. *环境科学研究*, 2022, **35**(3): 650-658.
- Hua C, Jiang Q, Chi X Y, *et al.* Meteorological characteristics of PM_{2.5}-O₃ air combined pollution in central and eastern China in the summer half years of 2015-2020 [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2022, **35**(3): 650-658.
- [42] Ma S M, Shao M, Zhang Y F, *et al.* Sensitivity of PM_{2.5} and O₃ pollution episodes to meteorological factors over the North China Plain [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **792**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.148474.
- [43] 张子睿, 胡敏, 尚冬杰, 等. 2013~2020 年北京大气 PM_{2.5} 和 O₃ 污染演变态势与典型过程特征[J/OL]. *科学通报*, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1784.N.20220216.1541.002.html>, 2022-02-17.
- Zhang Z R, Hu M, Shang D J, *et al.* The evolution trend and typical process characteristics of atmospheric PM_{2.5} and O₃ pollution in Beijing from 2013 to 2020 [J/OL]. *Chinese Science Bulletin*, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1784.N.20220216.1541.002.html>, 2022-02-17.
- [44] 何琰, 林惠娟, 曹舒娅, 等. 城市臭氧污染特征与高影响气象因子: 以苏州为例[J]. *环境科学*, 2023, **44**(1): 85-93.
- He Y, Lin H J, Cao S Y, *et al.* Characteristics of ozone pollution and high impact meteorological factors in urban cities: a case of Suzhou [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(1): 85-93.
- [45] 魏莉, 郑有飞, 赵辉. 2013~2016 年夏季南京臭氧和细颗粒物的污染特征及其相关性[J]. *科学技术与工程*, 2018, **18**(32): 104-113.
- Wei L, Zheng Y F, Zhao H. Pollution characteristics and correlation of ozone and fine particles in Nanjing during the summer of 2013 ~ 2016 [J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, **18**(32): 104-113.
- [46] Zhong J T, Zhang X Y, Wang Y Q. Relatively weak meteorological feedback effect on PM_{2.5} mass change in Winter 2017/18 in the Beijing area: observational evidence and machine-learning estimations [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **664**: 140-147.
- [47] 高婵娟, 赵敬超, 丁若男, 等. 2018 年吉林市大气污染物浓度变化及其与气象因素的相关性分析[J]. *环境工程*, 2021, **39**(5): 71-79.
- Gao C J, Zhao Q C, Ding R N, *et al.* Variations of atmospheric pollutants concentrations and their correlation with meteorological factor in Jilin city in 2018 [J]. *Environmental Engineering*, 2021, **39**(5): 71-79.
- [48] 殷丽娜, 褚晰晰, 段菁春, 等. “2+26”城市一次多因素叠加重污染过程的特征分析[J]. *环境科学研究*, 2019, **32**(12): 2022-2030.
- Yin L N, Chu Y X, Duan J C, *et al.* Characteristics of a multi-factor superimposing haze episode in ‘2+26’ cities [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, **32**(12): 2022-2030.

CONTENTS

Impact of Climate Change on Summer Ozone in China	HU An-qi, XIE Xiao-dong, GONG Kang-jia, <i>et al.</i>	(1801)
Spatial-temporal Variation and Driving Factors of Ozone in China from 2019 to 2021 Based on EOF Technique and KZ Filter	WANG Hao-qi, ZHANG Yu-fen, LUO Zhong-wei, <i>et al.</i>	(1811)
Photochemical Mechanism and Control Strategy Optimization for Summertime Ozone Pollution in an Industrial City in the North China Plain	ZHENG Zhen-sen, DOU Jian-ping, ZHANG Guo-tao, <i>et al.</i>	(1821)
Spatiotemporal Evolution Characteristics of PM _{2.5} -O ₃ Compound Pollution in Chinese Cities from 2015 to 2020	NIU Xiao-xiao, ZHONG Yan-mei, YANG Lu, <i>et al.</i>	(1830)
Spatiotemporal Distribution Characteristics of Co-pollution of PM _{2.5} and Ozone over BTH with Surrounding Area from 2015 to 2021	SONG Xiao-han, YAN Li, LIU Wei, <i>et al.</i>	(1841)
Spatio-temporal Variation in PM _{2.5} Concentration and Its Relationship with Vegetation Landscape Patterns in Typical Economic Zones in China from 2000 to 2020	XU Yong, LI Xin-yi, HUANG Wen-ting, <i>et al.</i>	(1852)
Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Ion Deposition During Winter and Spring in the Core Area of Beijing	ZHAO Yu, LI Bei-bei, HUANG Yu-hu, <i>et al.</i>	(1865)
Input Characteristics of Dry Deposition of Atmospheric Particulates and Metals in Farmland in the Suburb of Nanjing	LIU Cui-ying, JIN Hao, FAN Jian-ling	(1873)
Pollution Characterizations and Oxidative Potentials of Water-Soluble Organic Matters at Different Polarity Levels in Winter PM _{2.5} Over Xi'an	LUO Yu, HUANG Sha-sha, ZHANG Tian, <i>et al.</i>	(1882)
Emission Characteristics of Organic Carbon and Elemental Carbon in PM ₁₀ and PM _{2.5} from Vehicle Exhaust and Civil Combustion Fuels	WANG Hong-lei, LIU Si-han, SUN Jie-juan, <i>et al.</i>	(1890)
Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} in the Core Area of Ili River Valley in Spring	GU Chao, XU Tao, MA Chao, <i>et al.</i>	(1899)
Evaluation of Changes in PM _{2.5} Exposure Concentration and Health Risk for Urban Resident in Zhengzhou Based on High Spatial Resolution Grids	LI Yuan, XU Yi-fei, YUAN Ming-hao, <i>et al.</i>	(1911)
Emission Inventory of Building Material Industry in Henan Province Based on Multi-source Data Integration	LIU Xiao, HU Jing-nan, WANG Hong-mei, <i>et al.</i>	(1924)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Winter in Kaifeng City	SHI Yu-qi, ZHENG Kai-yun, DING Wei-ling, <i>et al.</i>	(1933)
Changes in O ₃ -VOCs-NO _x Sensitivity and VOCs Sources at an Urban Site of Nanjing Between 2020 and 2021	LU Xiao-bo, WANG Ming, DING Feng, <i>et al.</i>	(1943)
Variation Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient VOCs in Urban Beijing in Summer	ZHANG Rui, SUN Xue-song, WANG Yu, <i>et al.</i>	(1954)
Chemical Characteristics and Source Apportionment for VOCs During the Ozone Pollution Episodes and Non-ozone Pollution Periods in Qingdao	JIA Zhi-hai, GU Yao, KONG Cui-li, <i>et al.</i>	(1962)
Characteristics of O ₃ Production in the Western Suburb of Hefei in Summer Based on the Observation of Total Peroxy Radical	YU Hui, WEI Na-na, XU Xue-zhe, <i>et al.</i>	(1974)
Evaluation of Energy Saving and Carbon Reduction Effect of Air Pollution Prevention and Control Action Plan and Innovation Intermediary Effect	LI Shao-lin, WANG Qi-qi	(1985)
Scenario Simulation and Effects Assessment of Co-control on Pollution and Carbon Emission Reduction in Beijing	YU Shan, ZHANG Shuang, ZHANG Zeng-jie, <i>et al.</i>	(1998)
Simulation of Anthropogenic CO ₂ Emissions in the Yangtze River Delta Based on Different Emission Inventories	MA Xin-yi, HUANG Wen-jing, HU Ning, <i>et al.</i>	(2009)
Water Quality Change Trend and Risk Analysis of Wuhan Hanjiang River Water Source	ZHUO Hai-hua, LOU Bao-feng, XU Jie, <i>et al.</i>	(2022)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics and Resistance Genes in Different Water Sources in the Wuhan Section of the Yangtze River	LI Bo-lin, ZHANG He, WANG Jun, <i>et al.</i>	(2032)
Occurrence Characteristics, Sources, and Toxicity Risk Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Typical Rivers of Northern Shaanxi Mining Area, China	WU Xi-jun, DONG Ying, ZHAO Jian, <i>et al.</i>	(2040)
Spatio-temporal Characteristics of Organic Aggregates and the Driving Factors in Typical Lakes	XIE Gui-juan, GONG Yi, ZHU Fu-cheng, <i>et al.</i>	(2052)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Microplastics in Water of Different Functional Parks in Guilin	LI Pei-zhao, WU Li, HUANG Fei-fei, <i>et al.</i>	(2062)
Environmental Driving Factors and Assessment on the Aquatic Ecosystem of Periphytic Algae of Six Inflow Rivers in Yangtze River Basin	ZHANG Jing, HU Yu-xin, HU Sheng, <i>et al.</i>	(2072)
Influence and Driving of Environmental Heterogeneity on the Epilithic Diatom Community in Xiangxi River, a Tributary of the Three Gorges Reservoir Area	Ji Lu-lu, ZHAO Lu, OUYANG Tian, <i>et al.</i>	(2083)
Characteristics of Phytoplankton Communities and Key Impact Factors in Three Types of Lakes in Wuhan	ZHANG Hao-kun, MIN Fen-li, CUI Hui-rong, <i>et al.</i>	(2093)
Effects of Heavy Metal Pollution on the Structure of Microbial Communities in Different Habitats	HE Yi-fan, XIAO Xin-zong, WANG Jia-wen	(2103)
Structure and Distribution Characteristics of Bacterial Community in Boqing River Water	WANG Sen, CHEN Jian-wen, ZHANG Hong, <i>et al.</i>	(2113)
Effects of Microplastic Exposure on the Community Structure and Function of Symbiotic Bacteria in <i>Sinularia microclavata</i>	LIU Min, CHE Wen-xue, ZENG Ying-xu, <i>et al.</i>	(2122)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Emerging Contaminants from Raw Water to Drinking Water in Shanghai	YAN Qi	(2136)
Adsorption Characteristics of Fluoride in Low-Concentration Water by Aluminum and Zirconium-Modified Biochar	LIU Yan-fang, GAO Wei, LIU Rui, <i>et al.</i>	(2147)
Sorption Characteristics and Site Energy Distribution Theory of Typical Estrogens on Microplastics	LIU Jiang-yan, ZHENG Mi-mi, HU Jia-wu, <i>et al.</i>	(2158)
Selection and Evaluation of Model Pollutants for Performance Assessment of Advanced Treatment of Industrial Park Wastewater by Ozonation	XIN Bo, SHAN Chao, LÜ Lu	(2168)
Identifying Driving Factors and Their Interacting Effects on Sources of Heavy Metal in Farmland Soils with Geodetector and Multi-source Data	ZHANG Hong-ze, CUI Wen-gang, LIU Sui-hua, <i>et al.</i>	(2177)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in Farmland Soils Around the Gangue Heap of Coal Mine Based on APCS-MLR and PMF Receptor Model	MA Jie, SHEN Zhi-jie, ZHANG Ping-ping, <i>et al.</i>	(2192)
Contamination and Probabilistic Health Risk Assessment of Heavy Metals in Agricultural Soils Around a Lead-Zinc Smelter	HUANG Jian-bo, JIANG Deng-deng, WEN Bing, <i>et al.</i>	(2204)
Prediction of PAHs Content in Soil Around Gas Stations in Beijing Based on BP Neural Network	MA Sai-yan, WEI Hai-ying, MA Jin, <i>et al.</i>	(2215)
Spatial-temporal Distribution and Risk Assessment of Quinolones Antibiotics in Soil of Shijiazhuang City	ZHAO Xin-yu, CHEN Hui, ZHAO Bo, <i>et al.</i>	(2223)
Accumulation and Pollution Risks of Heavy Metals in Soils and Agricultural Products from a Typical Black Shale Region with High Geological Background	DENG Shuai, DUAN Jia-hui, NING Mo-huan, <i>et al.</i>	(2234)
Geochemical Characteristics of Cd in Different Parent Soils in Karst Area and Prediction of Cd Content in Maize	DAI Liang-liang, XU Hong-gen, GONG Hao, <i>et al.</i>	(2243)
Pollution Risk and Contribution Analysis of Pb, Cd, and As in Soils and Crops Under Different Land Use Types in Longyan City	WANG Rui, CHEN Nan, ZHANG Er-xi	(2252)
Influencing Factors of Cadmium Content in Wheat Grain: A Meta-analysis and Decision Tree Analysis	LIU Na, ZHANG Shao-bin, GUO Xin-yu, <i>et al.</i>	(2265)
Response Characteristics of Soil Organic Carbon Pool and Its Chemical Composition During Secondary Forest Succession in the Loess Plateau	LIU Han-yu, LIU Ying-yi, ZHANG Qi, <i>et al.</i>	(2275)
Effects of Short-Term Nitrogen and Phosphorus Addition on Soil Respiration Components in a Subalpine Grassland of Qilian Mountains	JIANG Yuan, GAN Xiao-ling, CAO Feng-feng, <i>et al.</i>	(2283)
Response of Soil Microbial Diversity to Long-term Enclosure in Degraded Patches of Alpine Meadow in the Source Zone of the Yellow River	YANG Peng-nian, LI Xi-lai, LI Cheng-yi, <i>et al.</i>	(2293)
Diversity and Predictive Functional of <i>Caragana jubata</i> Bacterial Community in Rhizosphere and Non-rhizosphere Soil at Different Altitudes	LI Yuan-yuan, XU Ting-ting, AI Zhe, <i>et al.</i>	(2304)
Effects of Simulated Acid Rain and Nitrogen Deposition on Soil Bacterial Community Structure and Diversity in the Masson Pine Forest	WANG Nan, QIAN Shao-yu, PAN Xiao-cheng, <i>et al.</i>	(2315)
Effects of Phosphogypsum and <i>Suaeda salsa</i> on the Soil Moisture, Salt, and Bacterial Community Structure of Salinized Soil	LIU Yue, YANG Shu-qing, ZHANG Wan-feng, <i>et al.</i>	(2325)
Effects of Combined Application of Fungal Residue and Chemical Fertilizer on Soil Microbial Community Composition and Diversity in Paddy Soil	GENG He-tian, WANG Xu-dong, SHI Si-bo, <i>et al.</i>	(2338)
Effects of Aeration on Surface Water Nutrient Dynamics and Greenhouse Gas Emission in Different Straw Returning Paddy Fields	HU Jin-hui, XUE Li-hong, QIAN Cong, <i>et al.</i>	(2348)
Effects of Exogenous Melatonin Treatment on the Growth and Antioxidant System of Rice Seedlings Under Antimony Stress	CHU Yu-tan, LI Yan, HUANG Yi-zong, <i>et al.</i>	(2356)
Life Cycle Prediction Assessment of Energy Saving and New Energy Vehicles for 2035	FU Pei, LAN Li-bo, CHEN Ying, <i>et al.</i>	(2365)
Distribution, Sources, and Behavioral Characteristics of Microplastics in Farmland Soil	BO Lu-ji, LI Bing, ZHANG Kai, <i>et al.</i>	(2375)
Research Progress on the Remediation Technology of Herbicide Contamination in Agricultural Soils	HU Fang-yu, AN Jing, WANG Bao-yu, <i>et al.</i>	(2384)
Research Progress and Prospect of Herbicide Residue Characteristics in Black Soil Region of China	LI Rui, WU Qiu-mei, ZHAO Gui-mei, <i>et al.</i>	(2395)