

目次

2013~2020年天津市PM_{2.5}-O₃污染变化趋势和影响因素分析 肖致美, 李亚菲, 高璟赞, 李鹏, 蔡子颖, 郑乃源, 张裕芬, 戴运峰 (4211)

2015~2020年济南市O₃污染趋势及敏感性变化分析 孙晓艳, 孙军, 郭萌萌, 刘杨, 王宝琳, 范国兰, 许宏宇, 姜腾龙 (4220)

南京市南部地区O₃污染特征、生成敏感性及传输影响分析 郑新梅, 胡崑, 王鸣, 谢放尖, 王艳 (4231)

天津市“十三五”期间O₃污染特征和驱动因子 李源, 肖致美, 毕晓辉, 蔡子颖, 徐虹, 高璟赞, 郑乃源, 杨宁 (4241)

基于随机森林的南京市PM_{2.5}和O₃对减排的响应 尚永杰, 茅宇豪, 廖宏, 胡建林, 邹泽庸 (4250)

基于四维通量法的佛山臭氧污染输送量化 吴莉萍, 莫海华, 杨丽婷, 蔡梓桐, 吴国彤, 白玉洁, 邓思欣, 司徒淑婷, 常鸣, 王雪梅 (4262)

污染地块VOCs源衰减对室内蒸气入侵风险的影响 钟茂生, 汪洋, 姜林, 张丽娜, 马琳, 张瑞环, 赵莹, 李吉鸿 (4271)

2017~2020年长江流域水体污染物通量时空变化特征分析 郭朝臣, 雷坤, 李晓光, 周波, 吕旭波 (4279)

滹沱河流域山区地表水-地下水水化学空间变化特征、影响因素及其来源 孔晓乐, 常玉儒, 刘夏, 赵小宁, 沈彦军 (4292)

重庆东南部岩溶水金属元素空间分布、源解析及健康风险评价 谢浩, 邹胜章, 李军, 申豪勇, 林永生, 周长松, 朱丹尼, 王志恒 (4304)

衡水市桃城区浅层地下水咸化成因 何锦, 张怀胜, 蔡五田, 王雨山 (4314)

吐鲁番南盆地平原区地下水污染风险评价 白凡, 周金龙, 周殿竹, 韩双宝, 孙英 (4325)

金属硫化物矿山水系统中微生物群落组成及多样性 丁聪聪, 朱旭炎, 赵兴青, 陆金, 周宇斌, 张欣怡, 王霄鹏 (4334)

白洋淀上覆水及沉积物中微塑料赋存特征 程昕煜, 杨丽虎, 宋献方 (4344)

基于溶解性有机物分子指纹特征解析城市河道污染来源与机制 朱奕, 叶建锋, 孙晓楠, 胡曙煜, 陈勋, 唐建飞, 陈浩 (4353)

甾体激素在污水处理厂中的赋存特征和行为归趋 刘媛媛, 冯慧, 张云, 叶亮, 钟琴, 邹华 (4364)

博鳌近岸海域表层沉积物中持久性有机污染物的分布、来源与生态风险评价 郝润波, 符国伟, 宋艳伟, 傅开哲, 袁坤 (4374)

太原市耕地土壤PAHs的含量、分布、源解析与风险评价 吴张伟, 段永红, 刘立文, 徐立帅, 陈香玲, 姚旭红 (4387)

雄安新区土壤氟地球化学特征及健康风险评价 郭志娟, 刘飞, 周亚龙, 王乔林, 王成文 (4397)

基于APCS-MLR和PMF模型解析黄河下游文化公园土壤重金属污染特征及来源分析 段海静, 马嘉玉, 彭超月, 刘德新, 王玉龙, 李旭辉, 马建华 (4406)

锰矿区周边农田土壤重金属污染特征、来源解析及风险评价 余高, 陈芬, 张晓东, 孙约兵 (4416)

老工业城市土壤-作物系统重金属的迁移累积及风险协同评价 王莹, 董爱俊, 杨建锋, 马彦斌, 王泽晶, 杨凡燕 (4429)

畜禽粪肥还田四环素类抗生素(TCs)在土壤-蔬菜系统的分布特征及风险评估 丁丹, 黄晓依, 顾静仪, 陈澄宇, 龙新亮, 曾巧云 (4440)

地质高背景区外源污染叠加条件下大白菜对Cd、Pb、Zn累积途径探究 简槐良, 刘鸿雁, 梅雪, 毛诗佳, 刘芳, 张秋野, 敬鹏 (4448)

微塑料与铅复合污染对玉米种子萌发与生长的影响 马贵, 廖彩云, 周悦, 丁家富, 周炎炎, 王展, 马燕 (4458)

施加Fe₃O₄/桑秸秆生物炭对土壤团形态和水稻砷含量的影响 阮麟乔, 梁美娜, 丁艳梅, 曹海燕, 刘崇敏, 成官文, 朱义年, 王敦球 (4468)

生物炭与氮肥配施对镉污染水稻土修复效应及机制 张丽, 李如霞, 何玉玺, 姚彦坡, 林大松 (4479)

不同氮肥配施生物炭对镉污染土壤青菜镉吸收的影响 李平, 聂浩, 郎漫, 朱燕菊, 姜海波, 李楠 (4489)

椰纤维生物炭及其硝酸改性对稻田土壤中Pb钝化的影响 侯正伟, 李建宏, 李财生, 张婧旻, 林清火, 赵庆杰, 吴治澎, 王禹 (4497)

生物炭施用对微塑料污染石灰性土壤理化性质和细菌群落的影响 冉泰山, 龙健, 廖洪凯, 李娟, 杨国梅, 赵雨鑫 (4507)

改性生物炭负载零价铁对土壤中三氯乙烯的去除及微生物响应 陆海楠, 理鹏, 郭琳, 徐佳成, 杨洁, 黄沈发, 柯天英 (4519)

改性酒糟生物炭对紫色土养分及酶活性的影响 由乐林, 谢永红, 王子芳, 杨文娜, 高明 (4530)

化肥减量配施生物炭和秸秆增加了坡耕地土壤中流磷流失风险 赖佳鑫, 邓华, 朱浩宇, 黄容, 龙翼, 王子芳, 高明 (4541)

污泥和鸡粪生物炭制备及其老化过程中的碳损失 张滢, 张长浩, 张秀芳, 段文焱, 陈芳媛 (4554)

化肥和有机肥配施生物炭对根际土壤反硝化势和反硝化细菌群落的影响 谢军, 王子芳, 王莹燕, 熊子怡, 高明 (4565)

黄河下游谷子花生间作农田土壤细菌群落结构与功能预测 刘柱, 南镇武, 林松明, 孟维伟, 于海秋, 谢立勇, 张正, 万书波 (4575)

微咸水灌溉下微生物菌肥对盐渍土壤理化性质和细菌群落的影响 刘月, 杨树青, 张万锋, 姜帅 (4585)

高效石油降解菌修复石油污染土壤与强化机制分析 姚贞先, 王丽萍, 李丹, 李亚平, 何士龙, 赵雅琴 (4599)

土地集约利用程度对华北潮土农田土壤微生物群落丰度和死生物物质积累的影响 李胜君, 盛美君, 李刚, 王蕊, 李洁, 张贵龙, 修伟明 (4611)

中国省域碳达峰路径与政策 苗安康, 袁越, 吴涵, 马欣, 邵辰宇 (4623)

基于碳减排成本的我国省域碳补偿机制 钟诗雨, 张晓敏, 吴佳, 郭娜, 封强, 傅泽强 (4637)

不同施肥措施下长江经济带地区农田土壤有机碳含量的变化分析 刘欣宇, 卢江, 孟璇, 刘铮, 宋鹏, 李季, 田光明 (4647)

中国西北地区多情景土地利用优化与碳储量评估 陈宁, 辛存林, 唐道斌, 张亮, 辛顺杰 (4655)

陕西渭北旱塬区生境质量及碳储量时空演变分析与模拟 古圳威, 刘京, 陈怡, 卢新冉, 王思轶 (4666)

气候变暖对四川盆地水稻土有机碳含量变化的影响 李艾雯, 宋靛颖, 冉敏, 李文丹, 张元媛, 李呈吉, 史文娇, 李启权 (4679)

降水改变下撂荒草地的化学计量失衡改变调节土壤呼吸 王佳懿, 王兴, 王源苗, 房景博, 夏开拉·阿克拜, 祖丽皮耶·居热艾提, 杨改河, 任成杰, 韩新辉 (4689)

水盐环境对黄河口淡水湿地土壤碳、氮、磷生态化学计量特征的影响 秦纪法, 张佳彭, 桑奕, 杨云斐, 杨继松, 王志康, 栗云召, 周迪, 于君宝 (4698)

中国省域土壤重金属空间分布特征及分区管控对策 石航源, 王鹏, 郑家桐, 肖荣波, 邓一荣, 庄长伟 (4706)

壬基酚的环境生物地球化学研究进展及对新污染物管理的建议 洪亚军, 冯承莲, 徐大勇, 吴丰昌 (4717)

微塑料的形成机制及其环境分布特征研究进展 张龙飞, 刘玉环, 阮榕生, 赵蓝天, 王允圃, 张琦, 曹雷鹏, 崔宪, 巫小丹, 郑洪立 (4728)

生物炭添加对土壤温室气体排放影响的长短期效应研究进展 周咏春, 吴柳林, 李丹阳, 郭思伯, 陈志敏, 李正龙, 赵研 (4742)

铁基双金属催化剂活化过硫酸盐去除水中抗生素研究进展 魏健, 张新怡, 郭壮, 宋永会 (4751)

畜禽粪便污染的环境风险与资源化治理技术分析 安婧, 丁子明, 高程程, 胡芳雨, 魏树和 (4764)

《环境科学》征订启事(4230) 《环境科学》征稿简则(4303) 信息(4506, 4678, 4741)

2013 ~ 2020 年天津市 PM_{2.5}-O₃ 污染变化趋势和影响 因素分析

肖致美¹, 李亚菲², 高璟贇¹, 李鹏¹, 蔡子颖³, 郑乃源¹, 张裕芬^{2*}, 戢运峰^{1*}

(1. 天津市生态环境监测中心, 天津 300191; 2. 南开大学环境科学与工程学院, 国家环境保护城市空气颗粒物污染防治重点实验室, 天津 300071; 3. 天津市环境气象中心, 天津 300074)

摘要: 基于 2013 ~ 2020 年高时空分辨率的 PM_{2.5} 和 O₃ 在线监测数据以及气象观测数据, 利用 KZ (Kolmogorov-Zurbenko) 滤波耦合逐步回归等技术, 对天津市 PM_{2.5} 和 O₃ 浓度变化趋势、相互关系和影响因素进行了分析。结果表明, 与 2013 年相比, 2020 年天津市 PM_{2.5} 浓度下降 50.0%, O₃ 浓度上升 25.8%。从月际变化来看, 与 2013 ~ 2017 年相比, 2018 ~ 2020 年天津市 PM_{2.5} 浓度月际间差异逐渐缩小, O₃ 浓度从 4 月开始出现明显上升, 污染发生时间节点提前。O₃ 与 PM_{2.5} 的相关性呈现明显的季节性分布特征, 冬季整体呈负相关, 夏季正相关且相关性比其他季节高。不同季节 O₃ 与 PM_{2.5} 之间的拟合斜率与相关性系数整体呈正比例关系, 拟合斜率与相关性系数的比值逐年升高说明 PM_{2.5} 对 O₃ 生成的抑制作用逐年降低。2013 ~ 2020 年, 天津市 PM_{2.5} 浓度时间序列的长期分量呈显著下降趋势, 其中污染源减排起主导作用, 气象因素对 PM_{2.5} 长期分量的贡献在 -3 ~ 6 μg·m⁻³。PM_{2.5}/CO 与 NO₂/SO₂ 之间关系由 2013 ~ 2017 年间的负相关转变为 2018 ~ 2020 年正相关, 说明受减排的影响, NO_x 对 PM_{2.5} 中二次组分形成的贡献潜势逐渐增加, PM_{2.5} 中主要二次组分由硫酸盐逐渐转向硝酸盐。2013 ~ 2020 年天津市 O₃ 浓度时间序列的长期分量整体表现为上升趋势, 前体物排放对 O₃ 长期分量的贡献在 2013 ~ 2018 年上升, 2019 年后开始降低; 气象因素对 O₃ 长期分量的贡献呈现明显的阶段性变化特点, 2013 ~ 2016 年下降, 2016 ~ 2020 年上升。与 2013 ~ 2015 年相比, 2016 ~ 2020 年夏季典型时段 (11:00 ~ 16:00) O₃-NO₂ 间的拟合曲线向 NO₂ 低值方向偏移, 反映出该时段 NO_x 的减排取得一定效果, 2019 ~ 2020 年的拟合曲线整体下移, 说明近两年 NO_x 和 VOCs 减排效果较明显, 对降低 O₃ 有重要作用。

关键词: 天津; PM_{2.5}; 臭氧(O₃); 变化趋势; 影响因素

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)08-4211-09 DOI: 10.13227/j.hjkk.202210215

Analysis of Change Trend and Influencing Factors of PM_{2.5}-O₃ Pollution in Tianjin from 2013 to 2020

XIAO Zhi-mei¹, LI Ya-fei², GAO Jing-yun¹, LI Peng¹, CAI Zi-ying³, ZHENG Nai-yuan¹, ZHANG Yu-fen^{2*}, JI Yun-feng^{1*}

(1. Tianjin Eco-Environmental Monitoring Center, Tianjin 300191, China; 2. State Environmental Protection Key Laboratory of Urban Ambient Air Particulate Matter Pollution Prevention and Control, College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China; 3. Tianjin Environmental Meteorological Center, Tianjin 300074, China)

Abstract: The change trend, relationship, and influencing factors of PM_{2.5} and O₃ concentrations were analyzed by using a Kolmogorov-Zurbenko (KZ) filter coupled with stepwise multiple linear regression analysis and the spatiotemporal resolution monitoring data of PM_{2.5} and O₃ and meteorological data observed in Tianjin from 2013 to 2020. The results showed that a significant decreasing trend of PM_{2.5} concentrations by 50.0% was observed from 2013 to 2020, whereas an increasing trend for O₃ concentrations by 25.8% was observed from 2013 to 2020. Compared with that in 2013 to 2017, the monthly difference in PM_{2.5} concentrations gradually narrowed from 2018 to 2020, whereas the concentration of O₃ had increased significantly since April, and the occurrence time of O₃ pollution was advanced. The correlation coefficient patterns of O₃ and PM_{2.5} showed obvious seasonal distribution characteristics. The correlation coefficients were negatively correlated in winter and positively correlated in the summer, and the correlation coefficients in summer were generally higher than those in other seasons. The correlation coefficients between O₃ and PM_{2.5} in different seasons were positively proportional to the fitting slope. The ratios of the fitting slope to correlation coefficients showed an increasing trend, which might reflect that the inhibitory effect of PM_{2.5} on O₃ formation in the PM_{2.5}-O₃ interaction mechanism might have been weakened due to the impact of emission reduction. A significant decreasing trend was observed for the long-term trend components of the PM_{2.5} concentration time series; emission reduction played a leading role, and meteorological factors contributed -3 to 6 μg·m⁻³. The changes in the relationship between the PM_{2.5}/CO ratio versus NO₂/SO₂ from negative to positive were observed from 2013-2017 to 2018-2020 in Tianjin, which could indicate the enhanced contribution potential of nitrogen oxides to the main secondary component formation of PM_{2.5} under the current emission reduction scenarios, and the main secondary components of PM_{2.5} in Tianjin gradually changed from sulfate to nitrate. An overall upward trend was observed for the long-term trend components of the O₃ concentration time series from 2013 to 2020, and the contribution of precursor emissions to the long-term component of O₃ increased from 2013 to 2018 and began to decrease after 2019. The contribution of meteorological factors to the long-term component of O₃ presented an obvious stage change, showing a downward trend from 2013 to 2016 and an upward trend from 2016 to 2020. The O₃ concentration presented a non-linear relationship with NO₂ during the period of intense atmospheric photochemical processes (11:00-16:00) in summer. Compared with that in 2013-2015, the fitting curve of O₃ and NO₂ showed an obvious offset to the low value of NO₂ from 2016 to 2020, which reflected that the NO_x emission reduction in this period achieved certain results. Compared with that in 2018, the fitting curve of O₃ and NO₂ moved downward from 2019 to 2020, which may reflect

收稿日期: 2022-10-20; 修订日期: 2022-11-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(42177465); 天津市科技计划项目(21YFNSN00200)

作者简介: 肖致美(1972 ~), 女, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为 PM_{2.5} 和 O₃ 污染协同防控, E-mail: xiaozhimei01@163.com

* 通信作者, E-mail: zhafox@nankai.edu.cn; yf_2100@163.com

that NO_x and VOCs emission reduction had a non-negligible effect on the O_3 decline at this stage.

Key words: Tianjin; $\text{PM}_{2.5}$; ozone (O_3); change trend; influencing factors

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》深入实施,我国环境空气质量逐年改善,城市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度平均值、以 $\text{PM}_{2.5}$ 为首要污染物的超标天数和重污染的天数明显减少^[1]. 在 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度改善的同时,我国城市臭氧(O_3)浓度逐年上升^[1~8],近年来还出现了以 O_3 为首要污染物的重度污染天气^[1], O_3 已成为继 $\text{PM}_{2.5}$ 之后影响城市环境空气质量的重要污染物^[1,6~9], $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 已成为制约我国城市环境空气质量改善的重要因素.

环境空气中 $\text{PM}_{2.5}$ 的浓度受大气扩散条件和污染物排放(包括一次颗粒物和二次颗粒物气态前体物)的共同影响^[10~14],基于数值分析研究表明,污染源排放是影响 $\text{PM}_{2.5}$ 长期趋势变化的主要因素^[13,14~20],其贡献率可高达 80%~90%^[13,15~17]. 环境空气中 O_3 主要是气态前体物 NO_x 和 VOCs 通过光化学反应产生^[21],同样受气象条件(温度、太阳辐射强度)和污染物(NO_x 和 VOCs)排放的共同影响^[5~8,22],有研究表明我国京津冀和长三角区域夏季 O_3 浓度的增加主要归因于近年来人为排放的影响^[5,23~26]. $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 之间存在错综复杂的关系,一方面,颗粒物通过衰减太阳辐射抑制大气光化学反应,削弱臭氧的生成和积累^[27,28],另一方面, NO_2 在颗粒物表面通过非均相反应产生的 HONO,可进一步光解成 $\cdot\text{OH}$,从而导致的大气氧化性及颗粒物物理化学性质的改变,可能会促进臭氧和二次气溶胶的生成^[29~31]. 近年来,我国华北区域 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的大幅下降也是导致 O_3 污染加剧原因之一^[5,23]. 为解决当前大气污染问题,进一步改善环境空气质量, $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 的协同控制已成为“十四五”期间我国大气污染防治的主要方向. 当前对于 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 变化趋势及其影响因素的研究主要从气象条件和人为排放等方面开展,针对 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 单项污染物,研究时间主要为 2018 年以前^[6~8,10,13,15~17,20,22~23,26]. 2018 年实施《打赢蓝天保卫战三年行动计划》以来,我国城市 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 浓度均发生较大变化^[1],新形势下 $\text{PM}_{2.5}$ - O_3 变化趋势及其影响因素研究尤为重要.

天津市位于京津冀区域的中北部,工业发达,是京津冀区域大气污染较重的城市之一^[1]. 2013 年以来天津市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度逐年下降,2020 年 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 达 $48 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ^[32],较 2013 年下降 50%,但依然远高于国家二级标准限值;2020 年 $\rho(\text{O}_3)$ 达 $190 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ^[32],较 2013 年上升 25.8%,是国家二级标准

限值的 1.19 倍, $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 复合污染特点凸显. 近年来天津市关于 $\text{PM}_{2.5}$ 的研究主要集中在污染特征、变化趋势、来源解析和减排效果评估方面^[18,33~39], O_3 的研究主要集中在 O_3 与 VOCs 污染特征与来源分析^[40~43],缺少 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 长期变化趋势及其影响因素的系统性研究. 本文在前期研究的基础上^[44,45],分析 2013~2020 年以来气象条件和人为排放因素对 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 变化趋势的影响以及 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 相互作用,进一步明确减排措施对空气质量改善的效果,以期“十四五”期间 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 的协同控制提供科学依据.

1 材料与方 法

1.1 采样及分析方法

污染物浓度数据来源于天津市环境空气质量监测网络国控评价点,监测点位分布见图 1. 采用美国 Thermo 公司 TEOM 1405F 监测 $\text{PM}_{2.5}$ 、Thermo 49i 监测 O_3 、Thermo 42i 监测 NO_x 、Thermo 43i 监测 SO_2 和 Thermo48i 监测 CO,时间分辨率为 1 h. $\text{PM}_{2.5}$ 监测仪器每月更换采样滤膜,对采样流量进行校准,每季度进行压力传感器和温度传感器校验,每半年进行比例系数(K_0)校验,质量控制均严格按照《环境空气颗粒物(PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$)连续自动监测系统运行和质控技术规范》(HJ 817-2018)要求进行. SO_2 、

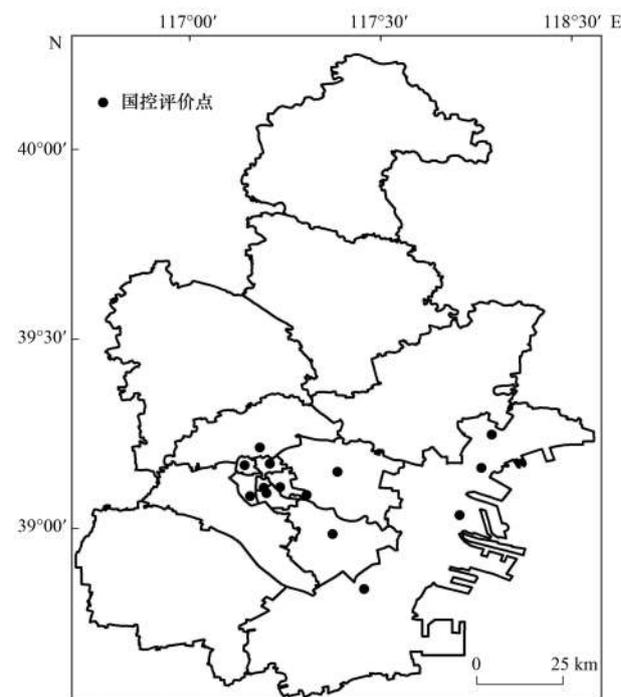


图 1 监测点位分布示意

Fig. 1 Location of the sampling station

NO₂、CO 和 O₃ 监测仪器每天进行自动校准,质量控制均严格按照《环境空气气态污染物(SO₂、NO₂、O₃、CO)连续自动监测系统运行和质控技术规范》(HJ 818-2018)要求进行。近地面气象要素数据(包括大气压、风速、气温、相对湿度、降水量和总云量)来源于天津市气象观测站(站台编号 54527)。

1.2 研究方法

滤波技术可以将时间序列分解为不同周期的波动,由于其在复杂生态系统趋势检测方面的可靠性,该方法已被广泛应用到大气环境领域中研究污染物的趋势变化^[46~49]。本研究采用 Kolmogorov-Zurbenko (KZ) 滤波分析和逐步多元线性回归分析方法相结合,分析人为排放与气象条件对 PM_{2.5} 和 O₃ 趋势变化的贡献。为降低迭代移动平均(m)可能对检测突变产生影响,Zurbenko 等^[50]提出了增强的 KZ 滤波技术,设置动态变量 m 。本研究采用增强的 KZ 滤波技术,主要原理如下:假设污染物观测浓度时间序列为 $X(t)$,则该原始序列可被 KZ 滤波分解为:

$$X(t) = E(t) + S(t) + W(t) \quad (1)$$

式中, $X(t)$ 为污染物浓度的原始时间序列, $E(t)$ 为长期分量,受污染物排放长期趋势和气象条件的影响, $S(t)$ 为季节分量,受季节性循环的影响; $W(t)$ 为短期分量,主要受天气系统和污染物短期排放波动的影响。KZ 滤波以 m 个数据点为滑动平均窗口长度进行 p 次迭代运算,计算如式(2)所示:

$$Y_i = \frac{1}{m} \sum_{j=-k}^k X_{i+j} \quad (2)$$

式中, Y_i 为经过第 i 次滤波后的时间序列, k 为对 X_i 进行滤波时两端滑动窗口的长度 [$k = (m - 1) / 2$]。每次滤波计算的结果作为下一次滤波计算的输入项,进行 p 次迭代计算后,得到最终的滤波结果 $KZ_{(m,p)}$,参数 m 和 p 为可控制不同时间尺度过程的滤波, $KZ_{(m,p)}$ 将波长小于 N 的滤波宽度滤除:

$$m \times \sqrt{p} \leq N \quad (3)$$

原始时间序列可做如下分解:

$$X_b(t) = E(t) + S(t) = KZ_{(15,5)}[X(t)] \quad (4)$$

$$E(t) = KZ_{(365,3)}[X(t)] \quad (5)$$

$$S(t) = X_b(t) - E(t) \quad (6)$$

$$W(t) = X(t) - X_b(t) \quad (7)$$

式中, $KZ_{(365,3)}$ 为可获得长期分量, $KZ_{(15,5)}$ 为可获得基线时间序列 $X_b(t)$ 。长期分量趋势变化中包括排放 $E_{EMI}(t)$ 和气象条件 $E_{MET}(t)$ 两类因素的影响,为进一步剥离排放和气象条件对污染物长期分量变化趋势变化的影响,本研究利用逐步多元线性回归分析方法,分别针对气象因子与污染物浓度短期分量

和基线分量,建立二者之间的回归模型。参与逐步回归的气象要素包含:温度[PM_{2.5}选用的是日均气温(T_{ave})],O₃日最大 8 h 滑动平均(O₃)选用的是日最高气温(T_{max})]、相对湿度(RH)、风速(WS)和总云量(TCC),其中湿度和风速为日均值,总云量为每日 14:00 的观测值,将上述气象因子的时间序列分解为短期分量、季节分量及长期分量,各分量的尺度选择与污染物浓度时间序列分解时相同,回归模型如下:

$$X_i = \beta_0 + \sum_{i=1}^4 \beta_i MET_i(t) + \varepsilon(t) \quad (8)$$

式中, β_0 和 β_i 为回归系数; MET_i 为第 i 个气象因子的短期分量或基线分量, X_i 为污染物浓度的短期分量或基线分量; $\varepsilon(t)$ 为模型残差项。总残差为基线变量残差和短期分量回归的残差之和,利用 $KZ_{(365,3)}$ 对总残差进行滤波分析可获得污染源排放对污染物浓度长期分量的影响 $E_{EMI}(t)$, $E(t)$ 与 $E_{EMI}(t)$ 间的差值为气象因素对污染物浓度长期分量的影响趋势 $E_{MET}(t)$ 。2013~2020 年 $E_{EMI}(t)$ 和 $E_{MET}(t)$ 可反映排放和气象条件对污染物长期趋势变化的相对贡献。

在污染物浓度及气象因子的时间序列分解的基础上,分别从短期分量和基线分量尺度,建立气象因子与污染物之间的多元线性回归模型。PM_{2.5}基线分量与气象因子之间的回归方程为: $y = -28.107 - 2.215 T_{ave} + 1.291RH + 18.721WS + 0.051TCC$,拟合优度 R^2 为 0.48。O₃基线分量与气象因子之间的回归方程为: $y = 27.564 + 3.709 T_{max} - 0.591RH + 3.723WS + 0.416TCC$,拟合优度 R^2 为 0.85。气象因子的基线分量对 O₃ 的拟合效果远高于对 PM_{2.5} 的拟合效果,说明在季节尺度上气象要素对 O₃ 的影响更为显著。

2 结果与讨论

2.1 2013~2020 年 PM_{2.5} 和 O₃ 浓度及其相互关系的变化

2013~2020 年,天津市 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 由 2013 年的 $96 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 降至 2020 年的 $48 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,累计下降 50.0%; $\rho(\text{O}_3)$ 由 2013 年的 $151 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 升至 2020 年的 $190 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,累计上升 25.8%,2017~2020 年均超过国家二级标准限值($160 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,图 2)。从月度分布上看,PM_{2.5} 浓度高值主要集中在秋冬季(1~3 月和 10~12 月),这与秋冬季北方城市采暖、污染物排放量大和大气扩散条件差有关;O₃ 浓度高值主要集中在春夏季(5~8 月),与春夏季气温升高、太阳辐射增强和光化学反应强有关。

从年度变化趋势上看(图2),PM_{2.5}和O₃浓度呈现明显阶段化变化特点.前期(2013~2015年)PM_{2.5}浓度下降幅度较大,2015年较2013年下降27.1%;中期(2015~2018年)下降幅度降低,2018年较2015年下降25.7%;后期(2018~2020年)下降幅度进一步减缓,2020年较2018年仅下降7.7%,PM_{2.5}浓度的持续下降,但改善空间缩小.从月际变化趋势看(图3),与前中期相比,后期PM_{2.5}浓度月际间差异逐渐缩小,月变化曲线趋于平缓,说明后期秋冬季PM_{2.5}浓度防控效果较好.O₃浓度与PM_{2.5}浓度变化趋势不同(图2),前期O₃浓度略下降,2015年较2013年下降6.0%;中期明显上升,2018年ρ(O₃)达到峰值(201 μg·m⁻³),较2015年上升41.5%;后期O₃浓度稳中略降,2020年较2018略降5.5%.从月际变化趋势看(图3),与前中

期相比,后期臭氧浓度从4月开始出现明显上升,说明后期天津市O₃污染加重,发生时间节点提前.

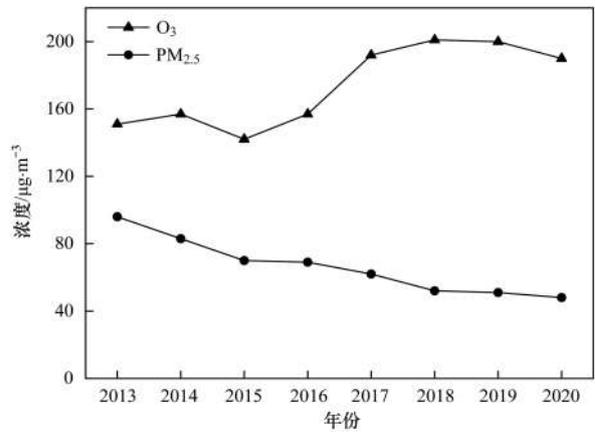


图2 2013~2020年天津市PM_{2.5}和O₃浓度

Fig. 2 PM_{2.5} and O₃ concentrations from 2013 to 2020 in Tianjin

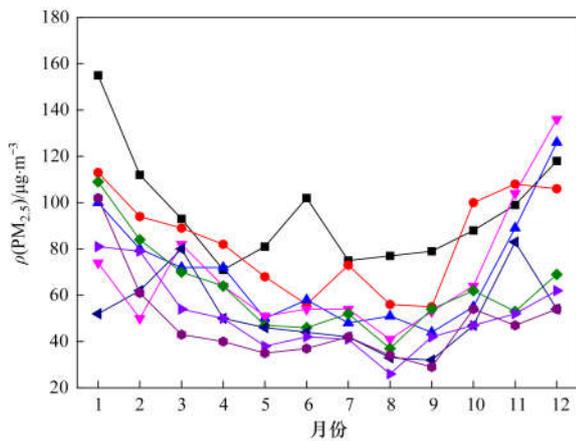
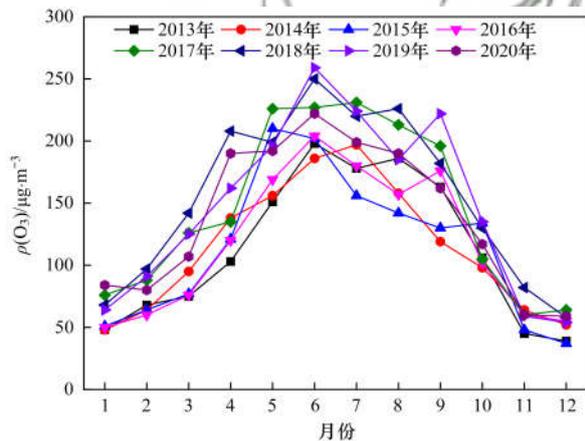


图3 2013~2020年天津市PM_{2.5}和O₃浓度月变化

Fig. 3 Monthly variation in PM_{2.5} and O₃ concentrations from 2013 to 2020 in Tianjin



从O₃与PM_{2.5}相关性上看,二者之间的相关性呈明显季节性分布特点(表1),冬季二者的相关性在整体呈负相关,这主要与PM_{2.5}中二次化学成分的生成机制有关,有研究表明我国北部城市冬季液相化学过程是PM_{2.5}生成的重要途径^[51,52],可导致PM_{2.5}与O₃呈负相关;夏季O₃与PM_{2.5}之间呈正相关且相关性系数相比其他季节较高,表明夏季二次

光化学过程对PM_{2.5}的生成有较重要的作用^[45].O₃与PM_{2.5}之间的拟合斜率与相关性系数可间接表征PM_{2.5}对抑制O₃生成的影响^[53],天津市不同季节O₃与PM_{2.5}之间的拟合斜率与相关性系数整体呈正比例关系,拟合斜率与相关性系数的比值呈现逐年升高的趋势,说明PM_{2.5}对O₃生成的抑制作用呈逐年降低的趋势^[53],这与2013以来天津市PM_{2.5}浓度逐

表1 2013~2020年天津市不同季节O₃与PM_{2.5}日均值的拟合斜率和相关性系数

Table 1 Curve fitting slopes and the correlation coefficient of O₃ and daily mean PM_{2.5} in different seasons from 2013 to 2020 in Tianjin

年份	春季			夏季			秋季			冬季		
	拟合斜率 (s)	相关性系数 (r)	s/r									
2013	0.04	0.05	0.8	0.46	0.34	1.4	-0.04	-0.05	0.8	-0.10	-0.46	0.2
2014	0.15	0.14	1.1	0.51	0.34	1.5	-0.13	-0.26	0.5	-0.14	-0.63	0.2
2015	0.12	0.08	1.5	0.89	0.53	1.7	0.11	0.14	0.8	-0.15	-0.59	0.3
2016	-0.05	-0.06	0.8	0.89	0.38	2.3	-0.19	-0.19	1.0	-0.16	-0.72	0.2
2017	0.07	0.07	1.0	1.36	0.50	2.7	0.11	0.07	1.6	-0.18	-0.50	0.4
2018	0.24	0.21	1.1	2.05	0.59	3.5	-0.15	-0.15	1.0	-0.10	-0.18	0.6
2019	0.30	0.22	1.4	1.32	0.43	3.1	0.04	0.02	2.0	-0.05	-0.14	0.4
2020	0.59	0.31	1.9	0.80	0.27	3.0	0.19	0.15	1.3	-0.04	-0.11	0.4

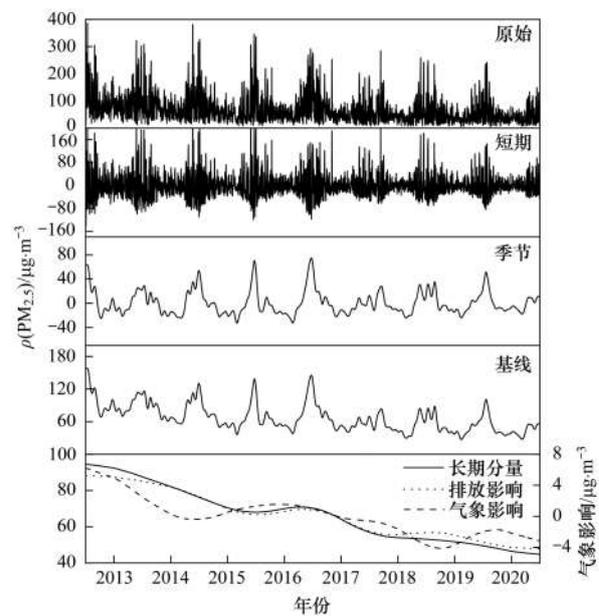
年下降有关. 另一方面, O₃ 浓度的升高, 大气氧化性增强, 可促进 PM_{2.5} 的生成并提高 PM_{2.5} 中二次组分的占比^[54,55], 有研究表明, “十三五期间” 天津市 PM_{2.5} 中二次组分(二次无机组分和二次有机组分) 的占比由 2017 年的 43.6% 升至 2019 年的 44.2%^[34].

2.2 气象条件和人为减排对 PM_{2.5} 变化趋势的影响

天津市 2013~2020 年 PM_{2.5} 浓度原始时间序列、各分量(短期、季节、基线) 时间序列的变化趋势以及污染排放和气象因素对长期分量的贡献见图 4. 总体来看, 各分量加和对 PM_{2.5} 原始时间序列总方差的贡献可达 94%, 而各分量之间协方差之和仅占总方差的 6%, 说明原始时间序列经分解之后, 各分量之间基本满足相互独立, 即各分量引起的浓度变化互不“干扰”, 滤波结果可靠.

分析各分量对 PM_{2.5} 总方差的贡献可知, 短期分量对总方差的贡献最大, 约为 71%, 其次是季节分量的贡献, 为 16%, 长期分量的贡献最小, 为 7%. 表明 PM_{2.5} 浓度时间序列的波动主要是由于短期变化主导的, 即与天气过程有关的短期波动是影响 PM_{2.5} 浓度变化的主要原因, 尤其是在冬季, 其波动幅度最大, 一方面与冬季不利的气象条件有关, 另一方面冬季采暖燃煤等排放的增加也会加重 PM_{2.5} 污染水平. 定量分析污染源排放和气象条件对 PM_{2.5} 长期分量的贡献发现: 2013~2020 年天津市 PM_{2.5} 长期分量变化呈明显下降趋势, 其中污染减排起主导作用, 气象因素对 PM_{2.5} 长期分量的贡献在 -3~6 μg·m⁻³. 以上结果表明近年来人为减排是天津地区 PM_{2.5} 长期变化趋势的主要驱动因子, 对 PM_{2.5} 污染治理成效显著.

城市中 CO 主要来源于燃烧源的一次排放, PM_{2.5} 与 CO 比值的增量(归一化的 PM_{2.5} 与 CO 比值: 即原始比值与期间平均值之比) 可近似认为是 PM_{2.5} 中主要二次颗粒物组分的增量^[56,57]. 采用归一化的 PM_{2.5} 与 CO 比值和 NO₂ 与 SO₂ 比值间的关系



长期分量和排放影响对应左侧纵坐标轴;
气象影响(即气象因素对 PM_{2.5} 浓度
长期分量变化的影响)对应右侧纵坐标轴

图 4 2013~2020 年天津市 PM_{2.5} 浓度时间序列趋势分析

Fig. 4 Temporal trends of PM_{2.5} concentrations
from 2013 to 2020 in Tianjin

分析定性 PM_{2.5} 浓度与气态前体物的关系变化^[53]. 2013~2017 年 PM_{2.5} 与 CO 比值增量随 NO₂ 与 SO₂ 比值的升高整体呈现降低趋势(表 2), 说明此期间 PM_{2.5} 中的二次组分受以 SO₂ 为前体物的二次组分(SO₄²⁻) 影响较大^[58~61]; 2018~2020 年二者的比值总体呈现正相关(表 2), 说明 PM_{2.5} 中二次组分的形成主要受以 NO_x 为前体物的二次组分(NO₃⁻) 主导, 氮氧化物对 PM_{2.5} 的贡献权重逐渐增加. 有研究表明^[39], 天津市 PM_{2.5} 中 SO₄²⁻ 占比由 2011 年 17.0% 降至 2020 年的 6.6%, NO₃⁻ 占比由 2011 年的 14.6% 升至 2020 年的 17.1%, 反映出天津市 PM_{2.5} 中主要二次组分由硫酸盐逐渐转向硝酸盐, 说明 2013~2020 年天津市针对 SO₂ 的减排成效显著, 而针对 NO_x 的减排成效相对较低.

表 2 2013~2020 年天津市归一化的 PM_{2.5} 与 CO 比值和 NO₂ 与 SO₂ 比值间的关系

Table 2 Relationship between the normalized PM_{2.5}/CO and the NO₂/SO₂ from 2013 to 2020 in Tianjin

年份	$\rho(\text{NO}_2)$ / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	$\rho(\text{SO}_2)$ / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	$\rho(\text{NO}_2)/\rho(\text{SO}_2)$	$\rho(\text{PM}_{2.5})$ / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	$\rho(\text{CO})$ / $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	$\rho(\text{PM}_{2.5})/\rho(\text{CO})$ (归一化)
2013	54	59	0.92	96	3.7	0.99
2014	54	49	1.10	83	2.9	1.10
2015	42	29	1.45	70	3.1	0.87
2016	48	21	2.29	69	2.7	0.98
2017	50	16	3.13	62	2.8	0.85
2018	47	12	3.92	52	1.9	1.05
2019	42	11	3.82	51	1.8	1.08
2020	39	8	4.88	48	1.7	1.08

2.3 气象条件和人为减排对 O₃ 变化趋势的影响

图5为天津市 O₃ 浓度时间序列的分解结果, KZ 滤波对 O₃ 浓度时间序列的分解效果也很好, 各分量加和对 O₃ 浓度原始时间序列总方差的贡献达 95%, 其中季节分量对总方差贡献最大, 约为 60%, 其次是短期分量贡献, 为 31%, 长期分量贡献为 4%. O₃ 浓度时间序列的波动主要是由季节变化引起的, 与太阳辐射强度及温度的季节变化有关. 2013~2020 年天津市 O₃ 浓度时间序列的长期分量整体表现为上升趋势, 其中 2013~2018 年由污染源排放所引起 O₃ 长期分量的变化呈上升趋势, 近地面 O₃ 污染治理十分复杂, O₃ 的形成对其气态前体物 (NO_x 和 VOCs) 十分敏感且呈非线性关系^[62,63], 不仅受 VOCs 与 NO_x 浓度的约束, VOCs/NO_x 的比值变化也可能造成 O₃ 浓度的升高^[64~66]; 2019 年后污染源排放对 O₃ 长期分量的贡献开始降低. 气象因素对 O₃ 长期分量的贡献呈现明显的阶段性变化特点, 2013~2016 年气象因素对长期分量的贡献呈下降趋势, 此阶段污染源排放影响是 O₃ 浓度上升的主导因素, 有研究也表明 2015~2016 年气象条件不利于 O₃ 生成^[67]; 2016~2019 年气象因素对 O₃ 长期分量的贡献呈上升趋势, 特别是 2019~2020 年呈明显上升趋势, 而 2019~2020 年 O₃ 浓度却呈下降趋势, 这也从侧面印证了此阶段污染源减排的效果.

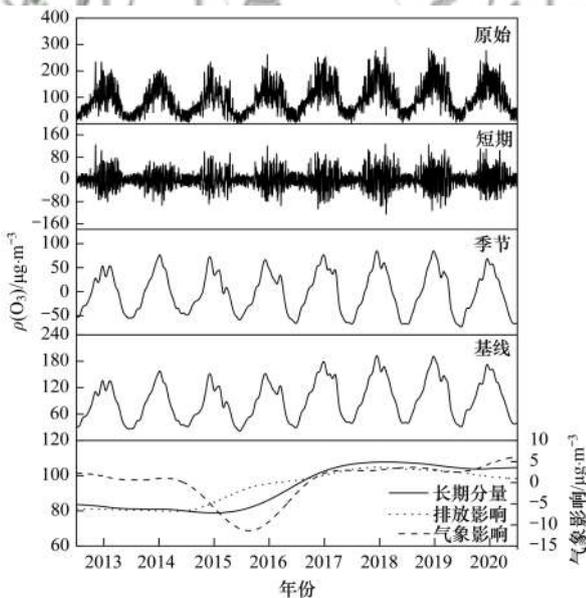


图5 2013~2020年天津市 O₃ 浓度时间序列趋势分析

Fig. 5 Temporal trends of O₃ concentrations from 2013 to 2020 in Tianjin

为进一步说明污染源减排对 O₃ 浓度影响, 选取夏季光化学过程较强的时段 (11:00~16:00), 分析

O₃ 与其前体物之间的关系变化, 结果表明, 除 2020 年外, 2013~2019 年 O₃ 与 NO₂ 之间的拟合曲线总体呈对数正态分布, 二者间的关系可以间接表征 O₃ 对其前体物的响应关系^[62,68,69] (图6). 当 O₃ 随着 NO₂ 升高而升高时, 表明 O₃ 的生成对 NO_x 浓度较敏感 (近似视为 NO_x 控制区), 而当 O₃ 随着 NO₂ 升高而降低时, 则表明 O₃ 的生成对 VOCs 浓度水平较敏感 (近似视为 VOCs 控制区). 2013~2020 年天津市 O₃ 与 NO₂ 之间的拟合曲线呈现出明显的阶段性特点, 与 2013~2015 年相比, 2016~2019 年拟合曲线明显向 NO₂ 低值方向偏移, 说明 2016~2019 年 NO_x 减排取得一定效果, 此阶段 O₃ 浓度的上升除与 PM_{2.5} 浓度的大幅下降^[5,23] 和气象影响有关外, NO_x 排放量下降大和 VOCs 排放量下降小导致的 VOCs/NO_x 比值变化可能也是重要原因之一^[64~66]. 与 2018 年相比, 2019~2020 年拟合曲线的高值整体下移, 说明此阶段 NO_x 和 VOCs 减排对降低 O₃ 有一定的作用.

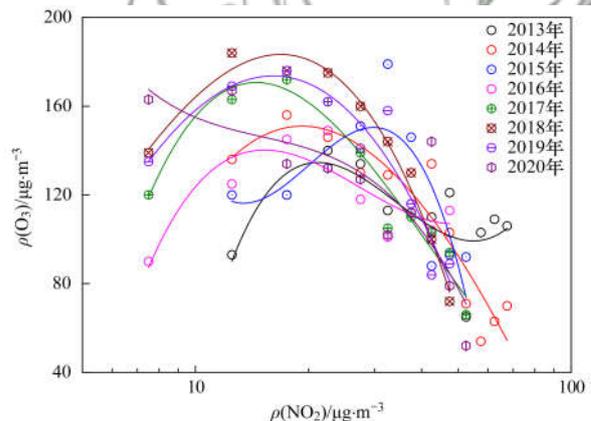


图6 2013~2020年天津市夏季 O₃ 与 NO₂ 在光化学较强烈时段 (11:00~16:00) 的关系

Fig. 6 Relationship between O₃ and NO₂ of intense photochemical period (11:00-16:00) in summer from 2013 to 2020 in Tianjin

3 结论

(1) 2013~2020 年天津市 PM_{2.5} 浓度明显下降, O₃ 浓度上升. 与 2013~2017 年相比, 2018~2020 年天津市 PM_{2.5} 浓度月际间差异逐渐缩小, O₃ 浓度从 4 月开始出现明显上升, 污染发生时间节点提前. 冬季 O₃ 与 PM_{2.5} 的相关性呈负相关, 夏季正相关且相比其他季节较高. 不同季节 O₃ 与 PM_{2.5} 之间的拟合斜率与相关性系数整体呈正比例关系, 拟合斜率与相关性系数的比值逐年升高, 说明 PM_{2.5} 对 O₃ 生成的抑制作用逐年降低.

(2) 2013~2020 年天津市 PM_{2.5} 浓度时间序列的长期分量呈显著下降趋势, 污染减排是驱动

PM_{2.5} 长期趋势变化的主导因素. PM_{2.5} 与 CO 比值和 NO₂ 与 SO₂ 比值关系由 2013~2017 年负相关转变为 2018~2020 年正相关, 说明 NO_x 对 PM_{2.5} 中二次组分形成的贡献潜势逐渐增加, PM_{2.5} 中主要二次组分由硫酸盐逐渐转向硝酸盐.

(3) 2013~2020 年天津市 O₃ 浓度时间序列的长期分量整体呈上升趋势, 污染源排放所引起 O₃ 长期分量的变化在 2013~2018 年上升, 2019 年后开始降低; 气象因素对 O₃ 长期分量的贡献在 2013~2016 年下降, 2016~2020 年上升. 夏季典型时段 O₃-NO₂ 间的拟合曲线在 2016~2020 年明显向 NO₂ 低值方向偏移, 反映出该时段 NO_x 的减排取得一定效果, 2019~2020 年的拟合曲线整体下移, 说明此阶段 NO_x 和 VOCs 减排对降低 O₃ 有一定的作用.

参考文献:

- [1] 中国环境监测总站. 2013-2016 中国环境状况公报, 2017-2020 年中国生态环境状况公报 [EB/OL]. <http://www.cnemc.cn/jcbg/zghjzkgb/>, 2022-08-12.
- [2] Lyu X, Wang N, Guo H, *et al.* Causes of a continuous summertime O₃ pollution event in Jinan, a central city in the North China Plain [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, **19**(5): 3025-3042.
- [3] Qu Y W, Wang T J, Cai Y F, *et al.* Influence of atmospheric particulate matter on ozone in Nanjing, China: observational study and mechanistic analysis [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2018, **35**(11): 1381-1395.
- [4] Tan Z F, Lu K D, Jiang M Q, *et al.* Exploring ozone pollution in Chengdu, southwestern China: a case study from radical chemistry to O₃-VOC-NO_x sensitivity [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **636**: 775-786.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 孟晓艳, 李婧妍, 解淑艳, 等. 2017-2019 年中国 337 个城市及重点区域臭氧污染状况分析 [J]. *中国环境监测*, 2021, **37**(3): 9-17.
Meng X Y, Li J Y, Xie S Y, *et al.* Analysis of ozone pollution in 337 cities and key regions of China in 2017-2019 [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2021, **37**(3): 9-17.
- [9] Cleaner air for China [J]. *Nature Geoscience*, 2019, **12**(7), doi: 10.1038/s41561-019-0406-7.
- [10] 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*, 2020, **62**(12): 1885-1902.
- [11] 蔡子颖, 姚青, 韩素芹, 等. 21 世纪以来天津细颗粒物气象扩散能力趋势分析 [J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(6): 2040-2046.
Cai Z Y, Yao Q, Han S Q, *et al.* The trends of fine particulate meteorological diffusivity in Tianjin from 21th [J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(6): 2040-2046.
- [12] 姚青, 蔡子颖, 刘敬乐, 等. 气象条件对 2009-2018 年天津地区 PM_{2.5} 质量浓度的影响 [J]. *环境科学学报*, 2020, **40**(1): 65-75.
Yao Q, Cai Z Y, Liu J L, *et al.* Effects of meteorological conditions on PM_{2.5} concentration in Tianjin from 2009 to 2018 [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(1): 65-75.
- [13] Zhang Q, Zheng Y X, Tong D, *et al.* Drivers of improved PM_{2.5} air quality in China from 2013 to 2017 [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, **116**(49): 24463-24469.
- [14] 蔡子颖, 郝国, 韩素芹, 等. 2000~2020 年天津 PM_{2.5} 质量浓度演变及驱动因子分析 [J]. *环境科学*, 2022, **43**(3): 1129-1139.
Cai Z Y, Hao J, Han S Q, *et al.* Analysis of change and driving factors of PM_{2.5} mass concentration in Tianjin from 2000 to 2020 [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(3): 1129-1139.
- [15] Cheng J, Su J P, Cui T, *et al.* Dominant role of emission reduction in PM_{2.5} air quality improvement in Beijing during 2013-2017: a model-based decomposition analysis [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, **19**(9): 6125-6146.
- [16] Chen Z Y, Chen D L, Kwan M P, *et al.* The control of anthropogenic emissions contributed to 80% of the decrease in PM_{2.5} concentrations in Beijing from 2013 to 2017 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, **19**(21): 13519-13533.
- [17] Zhai S X, Jacob D J, Wang X, *et al.* Fine particulate matter (PM_{2.5}) trends in China, 2013-2018: separating contributions from anthropogenic emissions and meteorology [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, **19**(16): 11031-11041.
- [18] 肖致美, 徐虹, 蔡子颖, 等. 天津市“十三五”期间 PM_{2.5} 减排效果评估 [J]. *环境科学*, 2023, **44**(6): 3054-3062.
Xiao Z M, Xu H, Cai Z Y, *et al.* Assessment of emission reduction effect of major air pollution control measures on PM_{2.5} concentrations during 13th Five-Year Period in Tianjin [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(6): 3054-3062.
- [19] Wang J D, Zhao B, Wang S X, *et al.* Particulate matter pollution over China and the effects of control policies [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **584-585**: 426-447.
- [20] Cai S Y, Wang Y J, Zhao B, *et al.* The impact of the “air pollution prevention and control action plan” on PM_{2.5} concentrations in Jing-Jin-Ji region during 2012-2020 [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **580**: 197-209.
- [21] 唐孝炎, 张远航, 邵敏. 大气环境化学 [M]. (第二版). 北京: 高等教育出版社, 2006. 272-273.
- [22] 刘长焕, 邓雪娇, 朱彬, 等. 近 10 年中国三大经济区太阳总辐射特征及其与 O₃、PM_{2.5} 的关系 [J]. *中国环境科学*, 2018, **38**(8): 2820-2829

- Liu C H, Deng X J, Zhu B, *et al.* Characteristics of GSR of China's three major economic regions in the past 10 years and its relationship with O₃ and PM_{2.5} [J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(8): 2820-2829.
- [23] Li K, Jacob D J, Liao H, *et al.* Anthropogenic drivers of 2013-2017 trends in summer surface ozone in China [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, **116**(2): 422-427.
- [24] Chen X K, Jiang Z, Shen Y N, *et al.* Chinese regulations are working—Why is surface ozone over industrialized areas still high? Applying lessons from Northeast US air quality evolution [J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, **48**(14), doi: 10.1029/2021GL092816.
- [25] Li K, Jacob D J, Shen L, *et al.* Increases in surface ozone pollution in China from 2013 to 2019: anthropogenic and meteorological influences [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2020, **20**(19): 11423-11433.
- [26] Wang Y H, Gao W K, Wang S, *et al.* Contrasting trends of PM_{2.5} and surface-ozone concentrations in China from 2013 to 2017 [J]. *National Science Review*, 2020, **7**(8): 1331-1339.
- [27] Real E, Sartelet K. Modeling of photolysis rates over Europe: impact on chemical gaseous species and aerosols [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, **11**(4): 1711-1727.
- [28] Dickerson R R, Kondragunta S, Stenchikov G, *et al.* The impact of aerosols on solar ultraviolet radiation and photochemical smog [J]. *Science*, 1997, **278**(5339): 827-830.
- [29] 朱彤, 尚静, 赵德峰. 大气复合污染及灰霾形成中非均相化学过程的作用[J]. *中国科学: 化学*, 2010, **40**(12): 1731-1740.
- Zhu T, Shang J, Zhao D F. The roles of heterogeneous chemical processes in the formation of an air pollution complex and gray haze [J]. *Science China Chemistry*, 2011, **54**(1): 145-153.
- [30] Li Y, An J L, Kajino M, *et al.* Impacts of additional HONO sources on O₃ and PM_{2.5} chemical coupling and control strategies in the Beijing-Tianjin-Hebei region of China [J]. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 2015, **67**(1), doi: 10.3402/tellusb.v67.23930.
- [31] Li K, Jacob D J, Liao H, *et al.* A two-pollutant strategy for improving ozone and particulate air quality in China [J]. *Nature Geoscience*, 2019, **12**(11): 906-910.
- [32] 天津市生态环境局. 2020年天津市生态环境状况公报[EB/OL]. http://sthj.tj.gov.cn/YWgz7406/HJZL9827/HJZKGB866/TJSLNHJZKGB6653/202109/t20210902_5577540.html, 2022-08-30.
- [33] 肖致美, 毕晓辉, 冯银厂, 等. 天津市大气颗粒物污染特征与来源构成变化[J]. *环境科学研究*, 2014, **27**(3): 246-252.
- Xiao Z M, Bi X H, Feng Y C, *et al.* Variations of characteristics and sources of ambient particulate matter pollution in Tianjin City [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2014, **27**(3): 246-252.
- [34] 肖致美, 徐虹, 李立伟, 等. 基于在线观测的天津市PM_{2.5}污染特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(10): 4355-4363.
- Xiao Z M, Xu H, Li L W, *et al.* Characterization and source apportionment of PM_{2.5} based on the online observation in Tianjin [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(10): 4355-4363.
- [35] 元洁, 刘保双, 程渊, 等. 2017年1月天津市区PM_{2.5}化学组分特征及高时间分辨率来源解析研究[J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(3): 1090-1101.
- Yuan J, Liu B S, Cheng Y, *et al.* Study on characteristics of PM_{2.5} and chemical components and source apportionment of high temporal resolution in January 2017 in Tianjin urban area [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(3): 1090-1101.
- [36] Liu B S, Yang J M, Yuan J, *et al.* Source apportionment of atmospheric pollutants based on the online data by using PMF and ME2 models at a megacity, China [J]. *Atmospheric Research*, 2017, **185**: 22-31.
- [37] Xu H, Xiao Z M, Chen K, *et al.* Spatial and temporal distribution, chemical characteristics, and sources of ambient particulate matter in the Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **658**: 280-293.
- [38] 肖致美, 徐虹, 李鹏, 等. 天津市典型区域PM_{2.5}中水溶性离子污染特征[J]. *环境科学研究*, 2019, **32**(8): 1324-1332.
- Xiao Z M, Xu H, Li P, *et al.* Characterization of water-soluble ions in typical regional PM_{2.5} in Tianjin city [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, **32**(8): 1324-1332.
- [39] 王雪涵, 张文慧, 毕晓辉, 等. 2001-2020年天津市大气污染特征的演变与防治历程[J]. *环境科学研究*, 2022, **35**(4): 945-955.
- Wang X H, Zhang W H, Bi X H, *et al.* Characteristics evolution and prevention development of ambient pollution in Tianjin, China [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2022, **35**(4): 945-955.
- [40] 王文美, 高璟贇, 肖致美, 等. 天津市夏季不同臭氧浓度级别VOCs特征及来源[J]. *环境科学*, 2021, **42**(8): 3585-3594.
- Wang W M, Gao J Y, Xiao Z M, *et al.* Characteristics and sources of VOCs at different ozone concentration levels in Tianjin [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(8): 3585-3594.
- [41] 关玉春, 肖致美, 陈魁, 等. 天津市臭氧污染特征与影响因素分析[J]. *中国环境监测*, 2017, **33**(4): 40-49.
- Guan Y C, Xiao Z M, Chen K, *et al.* Characteristics of ozone pollution and its influencing factors in Tianjin [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2017, **33**(4): 40-49.
- [42] 李源, 孔君, 徐虹, 等. 天津市臭氧污染特征及来源解析研究[J]. *环境污染与防治*, 2019, **41**(6): 647-651.
- Li Y, Kong J, Xu H, *et al.* Analysis of ozone pollution characteristic in Tianjin and its source apportionment [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2019, **41**(6): 647-651.
- [43] 高璟贇, 肖致美, 徐虹, 等. 2019年天津市挥发性有机物污染特征及来源[J]. *环境科学*, 2021, **42**(1): 55-64.
- Gao J Y, Xiao Z M, Xu H, *et al.* Characterization and source apportionment of atmospheric VOCs in Tianjin in 2019 [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(1): 55-64.
- [44] 肖致美, 李源, 孔君, 等. 天津市PM_{2.5}-O₃复合污染特征及气象影响分析[J]. *环境科学*, 2022, **43**(6): 2928-2936.
- Xiao Z M, Li Y, Kong J, *et al.* Characteristics and meteorological factors of PM_{2.5}-O₃ compound pollution in Tianjin [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(6): 2928-2936.
- [45] 肖致美, 徐虹, 高璟贇, 等. 天津市PM_{2.5}-O₃复合污染特征及来源分析[J]. *环境科学*, 2022, **43**(3): 1140-1150.
- Xiao Z M, Xu H, Gao J Y, *et al.* Characteristics and sources of PM_{2.5}-O₃ compound pollution in Tianjin [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(3): 1140-1150.
- [46] Lu H C, Chang T S. Meteorologically adjusted trends of daily maximum ozone concentrations in Taipei, Taiwan [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(35): 6491-6501.
- [47] Seo J, Park D S R, Kim J Y, *et al.* Effects of meteorology and emissions on urban air quality: a quantitative statistical approach to long-term records (1999-2016) in Seoul, South Korea [J].

- Atmospheric Chemistry and Physics, 2018, **18** (21): 16121-16137.
- [48] Zheng H, Kong S F, Zheng M M, *et al.* A 5.5-year observations of black carbon aerosol at a megacity in Central China; levels, sources, and variation trends [J]. Atmospheric Environment, 2020, **232**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.117581.
- [49] Cheng N L, Cheng B F, Li S S, *et al.* Effects of meteorology and emission reduction measures on air pollution in Beijing during heating seasons [J]. Atmospheric Pollution Research, 2019, **10** (3): 971-979.
- [50] Zurbenko I, Porter P S, Gui R, *et al.* Detecting discontinuities in time series of upper-air data; development and demonstration of an adaptive filter technique [J]. Journal of Climate, 1996, **9** (12): 3548-3560.
- [51] Sun Y L, Du W, Fu P Q, *et al.* Primary and secondary aerosols in Beijing in winter: sources, variations and processes [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2016, **16** (13): 8309-8329.
- [52] Shang D J, Peng J F, Guo S, *et al.* Secondary aerosol formation in winter haze over the Beijing-Tianjin-Hebei Region, China [J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2021, **15** (2), doi: 10.1007/s11783-020-1326-x.
- [53] 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.
- [54] Yang Y, Wang Y H, Huang W, *et al.* Parameterized atmospheric oxidation capacity and speciated OH reactivity over a suburban site in the North China Plain: a comparative study between summer and winter [J]. Science of the Total Environment, 2021, **773**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.145264.
- [55] Liu Z R, Wang Y S, Hu B, *et al.* Elucidating the quantitative characterization of atmospheric oxidation capacity in Beijing, China [J]. Science of the Total Environment, 2021, **771**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.145306.
- [56] Huang X, Ding A J, Gao J, *et al.* Enhanced secondary pollution offset reduction of primary emissions during COVID-19 lockdown in China [J]. National Science Review, 2021, **8**(2), doi: 10.1093/nsr/nwaa137.
- [57] Wu J M, Zhang Y J, Wang T, *et al.* Rapid improvement in air quality due to aerosol-pollution control during 2012-2018: an evidence observed in Kunshan in the Yangtze River Delta, China [J]. Atmospheric Pollution Research, 2020, **11** (4): 693-701.
- [58] Ding A J, Huang X, Nie W, *et al.* Significant reduction of PM_{2.5} in eastern China due to regional-scale emission control: evidence from SORPES in 2011-2018 [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2019, **19**(18): 11791-11801.
- [59] Li J Y, Gao W K, Cao L M, *et al.* Significant changes in autumn and winter aerosol composition and sources in Beijing from 2012 to 2018: effects of clean air actions [J]. Environmental Pollution, 2021, **268**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.115855.
- [60] Zhai S X, Jacob D J, Wang X, *et al.* Control of particulate nitrate air pollution in China [J]. Nature Geoscience, 2021, **14** (6): 389-395.
- [61] Chu B W, Ma Q X, Liu J, *et al.* Air pollutant correlations in China: secondary air pollutant responses to NO_x and SO₂ control [J]. Environmental Science & Technology Letters, 2020, **7** (10): 695-700.
- [62] Sillman S, He D Y. Some theoretical results concerning O₃-NO_x-VOC chemistry and NO_x-VOC indicators [J]. Journal of Geophysical Research, 2002, **107** (D22), doi: 10.1029/2001JD001123.
- [63] Shao M, Wang W J, Yuan B, *et al.* Quantifying the role of PM_{2.5} dropping in variations of ground-level ozone: inter-comparison between Beijing and Los Angeles [J]. Science of the Total Environment, 2021, **788**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.147712.
- [64] Sun J, Shen Z X, Wang R N, *et al.* A comprehensive study on ozone pollution in a megacity in North China Plain during summertime: observations, source attributions and ozone sensitivity [J]. Environment International, 2021, **146**, doi: 10.1016/j.envint.2020.106279.
- [65] Xu J M, Tie X X, Gao W, *et al.* Measurement and model analyses of the ozone variation during 2006 to 2015 and its response to emission change in megacity Shanghai, China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2019, **19** (14): 9017-9035.
- [66] Wang N, Lyu X, Deng X J, *et al.* Aggravating O₃ pollution due to NO_x emission control in eastern China [J]. Science of the Total Environment, 2019, **677**: 732-744.
- [67] Ding J, Dai Q L, Fan W Y, *et al.* Impacts of meteorology and precursor emission change on O₃ variation in Tianjin, China from 2015 to 2021 [J]. Journal of Environmental Sciences, 2023, **126**: 506-516.
- [68] Chen S Y, Wang H C, Lu K D, *et al.* The trend of surface ozone in Beijing from 2013 to 2019; indications of the persisting strong atmospheric oxidation capacity [J]. Atmospheric Environment, 2020, **242**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.117801.
- [69] Schroeder J R, Crawford J H, Fried A, *et al.* New insights into the column CH₂O/NO₂ ratio as an indicator of near-surface ozone sensitivity [J]. Journal of Geophysical Research, 2017, **122** (16): 8885-8907.

CONTENTS

Analysis of Change Trend and Influencing Factors of PM _{2.5} -O ₃ Pollution in Tianjin from 2013 to 2020	XIAO Zhi-mei, LI Ya-fei, GAO Jing-yun, <i>et al.</i> (4211)
Changes in Ozone Pollution Trend Characteristics and Sensitivity in Jinan from 2015 to 2020	SUN Xiao-yan, SUN Jun, GUO Meng-meng, <i>et al.</i> (4220)
Analysis of O ₃ Pollution Characteristics, Formation Sensitivity, and Transport Impact in Southern Nanjing	ZHENG Xin-mei, HU Kun, WANG Ming, <i>et al.</i> (4231)
Characteristics and Driving Factors of O ₃ Pollution During 13 th Five-Year Period in Tianjin	LI Yuan, XIAO Zhi-mei, BI Xiao-hui, <i>et al.</i> (4241)
Response of PM _{2.5} and O ₃ to Emission Reductions in Nanjing Based on Random Forest Algorithm	SHANG Yong-jie, MAO Yu-hao, LIAO Hong, <i>et al.</i> (4250)
Quantification of Ozone Pollution Transport Based on Four-dimensional Flux Method in Foshan, China	WU Li-ping, MO Hai-hua, YANG Li-ting, <i>et al.</i> (4262)
Effects of Source Depletion on Vapor Intrusion Risk Assessment	ZHONG Mao-sheng, WANG Yang, JIANG Lin, <i>et al.</i> (4271)
Spatiotemporal Variation Characteristics of Main Pollutant Fluxes in the Yangtze River Basin from 2017 to 2020	GUO Chao-chen, LEI Kun, LI Xiao-guang, <i>et al.</i> (4279)
Spatial Variation Characteristics, Influencing Factors, and Sources of Hydrogeochemical of Surface Water and Groundwater in Mountainous Area of Hutuo River	KONG Xiao-le, CHANG Yu-ru, LIU Xia, <i>et al.</i> (4292)
Spatial Distribution, Source Analysis, and Health Risk Assessment of Metal Elements in Karst Water in Southeastern Chongqing	XIE Hao, ZOU Sheng-zhang, LI Jun, <i>et al.</i> (4304)
Mechanism of Salinization of Shallow Groundwater in Taocheng District, Hengshui City	HE Jin, ZHANG Huai-sheng, CAI Wu-tian, <i>et al.</i> (4314)
Assessment of Groundwater Contamination Risk in the Plain Area of Southern Turpan Basin	BAI Fan, ZHOU Jin-long, ZHOU Yin-zhu, <i>et al.</i> (4325)
Microbial Community Composition and Diversity in Metal Sulfide Mine Water Systems	DING Cong-cong, ZHU Xu-yan, ZHAO Xing-qing, <i>et al.</i> (4334)
Occurrence Characteristics of Microplastics in Baiyangdian Lake Water and Sediments	CHENG Xin-yu, YANG Li-hu, SONG Xian-fang (4344)
Analyzing the Pollution Sources and Mechanisms of Urban Rivers Based on Identifying the Molecular Signature of Dissolved Organic Matter	ZHU Yi, YE Jian-feng, SUN Xiao-nan, <i>et al.</i> (4353)
Occurrence and Fate of Steroid Hormones in Sewage Treatment Plants	LIU Yuan-yuan, FENG Hui, ZHANG Hui, <i>et al.</i> (4364)
Distribution, Source, and Ecological Risk Assessment of Persistent Organic Pollutants in Surface Sediments of Boao Coastal Waters	HAO Run-bo, FU Guo-wei, SONG Yan-wei, <i>et al.</i> (4374)
Content, Distribution, Source Analysis, and Risk Assessment of PAHs in Arable Soils of Taiyuan	WU Zhang-wei, DUAN Yong-hong, LIU Li-wen, <i>et al.</i> (4387)
Potential Ecological Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in Soil-crop System in Xiong'an New District	GUO Zhi-juan, LIU Fei, ZHOU Ya-long, <i>et al.</i> (4397)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Soils in Yellow River Cultural Park Based on APCS-MLR and PMF Receptor Model	DUAN Hai-jing, MA Jia-yu, PENG Chao-yue, <i>et al.</i> (4406)
Pollution Characteristics, Source Analysis, and Risk Assessment of Heavy Metals in the Surrounding Farmlands of Manganese Mining Area	YU Gao, CHEN Fen, ZHANG Xiao-dong, <i>et al.</i> (4416)
Translocation, Accumulation, and Comprehensive Risk Assessment of Heavy Metals in Soil-Crop Systems in an Old Industrial City, Shizuishan, Ningxia, Northwest China	WANG Ying, DONG Ai-jun, YANG Jian-feng, <i>et al.</i> (4429)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Tetracycline Antibiotics (TCs) in Soil-Vegetable System with Soil Fertilized with Animal Manure	DING Dan, HUANG Xiao-yi, GU Jing-yi, <i>et al.</i> (4440)
Accumulation Pathway of Cd, Pb, and Zn in Chinese Cabbage under the Condition of Exogenous Pollution Superposition in High Geological Background Area	JIAN Huai-liang, LIU Hong-yan, MEI Xue, <i>et al.</i> (4448)
Effects of Combined Pollution of Microplastics and Lead on Maize Seed Germination and Growth	MA Gui, LIAO Cai-yun, ZHOU Yue, <i>et al.</i> (4458)
Application of Fe ₃ O ₄ /Mulberry Stem Biochar Effects on Soil Arsenic Species and Rice Arsenic Content	RUAN Lin-qiao, LIANG Mei-na, DING Yan-mei, <i>et al.</i> (4468)
Remediation Effect and Mechanism of Biochar in Combination with Nitrogen Fertilizer on Cd-contaminated Paddy Soil	ZHANG Li, LI Ru-xia, HE Yu-lei, <i>et al.</i> (4479)
Effects of Combined Application of Different Nitrogen Fertilizers and Biochar on Cadmium Uptake by Pakchoi (<i>Brassica chinensis</i> L.) in Cadmium Contaminated Soil	LI Ping, NIE Hao, LANG Man, <i>et al.</i> (4489)
Effect of Coconut Fiber Biochar and Its Nitrate Modification on Pb Passivation in Paddy Soils	HOU Zheng-wei, LI Jian-hong, LI Cai-sheng, <i>et al.</i> (4497)
Effects of Biochar Application on Physicochemical Properties and Bacterial Communities of Microplastic-contaminated Calcareous Soil	RAN Tai-shan, LONG Jian, LIAO Hong-kai, <i>et al.</i> (4507)
Effects of Modified Biochar-Supported Zero-Valent Iron on the Removal of Trichloroethylene and Responses of Microbial Community in Soil	LU Hai-nan, LI Peng, GUO Lin, <i>et al.</i> (4519)
Effects of Modified Distiller's Lees Biochar on Nutrients and Enzyme Activities in Purple Soil	YOU Le-lin, XIE Yong-hong, WANG Zi-fang, <i>et al.</i> (4530)
Biochar or Straw Substituting Chemical Fertilizer Increase the Risk of Phosphorus Loss in Subsurface Runoff in Sloping Farmland	LAI Jia-xin, DENG Hua, ZHU Hao-yu, <i>et al.</i> (4541)
Carbon Loss During Preparation and Aging of Sludge Livestock Manure Biochars	ZHANG Ying, ZHANG Chang-hao, ZHANG Xiu-fang, <i>et al.</i> (4554)
Effect of Chemical Fertilizer and Manure Combined with Biochar on Denitrification Potential and Denitrifying Bacterial Community in Rhizosphere Soil	XIE Jun, WANG Zi-fang, WANG Ying-yan, <i>et al.</i> (4565)
Soil Bacterial Community Structure and Function Prediction of Millet/Peanut Intercropping Farmland in the Lower Yellow River	LIU Zhu, NAN Zhen-wu, LIN Song-ming, <i>et al.</i> (4575)
Effects of Microbial Fertilizer on Physicochemical Properties and Bacterial Communities of Saline Soil Under Brackish Water Irrigation	LIU Yue, YANG Shu-qing, ZHANG Wan-feng, <i>et al.</i> (4585)
Remediation of Petroleum-contaminated Soil by Highly Efficient Oil-degrading Bacteria and Analysis of Its Enhancement Mechanism	YAO Zhen-xian, WANG Li-ping, LI Dan, <i>et al.</i> (4599)
Impacts of Land Use Intensification Level on Fluvo-aquic Cropland Soil Microbial Community Abundance and Necromass Accumulation in North China	LI Sheng-jun, SHENG Mei-jun, LI Gang, <i>et al.</i> (4611)
Pathway and Policy for China's Provincial Carbon Emission Peak	MIAO An-kang, YUAN Yue, WU Han, <i>et al.</i> (4623)
Carbon Offsetting Mechanism of China Province Based on Carbon Reduction Cost	ZHONG Shi-yu, ZHANG Xiao-min, WU Jia, <i>et al.</i> (4637)
Analysis on Change in Soil Organic Carbon Content of Farmland in Yangtze River Economic Belt Under Different Fertilizing Measures	LIU Xin-yu, LU Jiang, MENG Xuan, <i>et al.</i> (4647)
Multi-scenario Land Use Optimization and Carbon Storage Assessment in Northwest China	CHEN Ning, XIN Cun-lin, TANG Dao-bin, <i>et al.</i> (4655)
Analysis and Simulation of the Spatiotemporal Evolution of Habitat Quality and Carbon Storage in the Weibei Dry Plateau Region of Shaanxi	GU Zhen-wei, LIU Jing, CHEN Yi, <i>et al.</i> (4666)
Impact of Climate Warming on Paddy Soil Organic Carbon Change in the Sichuan Basin of China	LI Ai-wen, SONG Liang-ying, RAN Min, <i>et al.</i> (4679)
Stoichiometric Imbalance of Abandoned Grassland Under Precipitation Changes Regulate Soil Respiration	WANG Jia-yi, WANG Xing, WANG Yuan-zhuo, <i>et al.</i> (4689)
Effects of Water-salt Environment on Freshwater Wetland Soil C, N, and P Ecological Stoichiometric Characteristics in the Yellow River Estuary Wetland	QIN Ji-fa, ZHANG Jia-peng, SANG Luan, <i>et al.</i> (4698)
Spatial Distribution of Soil Heavy Metals and Regional Control Strategies in China at Province Level	SHI Hang-yuan, WANG Peng, ZHENG Jia-tong, <i>et al.</i> (4706)
Comprehensive Review on Environmental Biogeochemistry of Nonylphenol and Suggestions for the Management of Emerging Contaminants	HONG Ya-jun, FENG Cheng-lian, XU Da-yong, <i>et al.</i> (4717)
Research Progress on Distribution Characteristics and Formation Mechanisms of Microplastics in the Environment	ZHANG Long-fei, LIU Yu-huan, RUAN Rong-sheng, <i>et al.</i> (4728)
Review on the Long-term and Short-term Effects of Biochar Addition on Soil Greenhouse Gas Emissions	ZHOU Yong-chun, WU Liu-lin, LI Dan-yang, <i>et al.</i> (4742)
Iron-based Bimetallic Catalysts for Persulfate Activation to Remove Antibiotics in Water: A Review	WEI Jian, ZHANG Xin-yi, GUO Zhuang, <i>et al.</i> (4751)
Analysis of the Environmental Risk of Livestock Manure Pollution and Resource Treatment Technology	AN Jing, DING Zi-ming, GAO Cheng-cheng, <i>et al.</i> (4764)