

目次

基于时间序列分解的京津冀区域PM _{2.5} 和O ₃ 空间分布特征	姚青, 丁净, 杨旭, 蔡子颖, 韩素芹 (2487)
基于随机森林的北京城区臭氧敏感性分析	周红, 王鸣, 柴文轩, 赵昕 (2497)
基于随机森林模型的四川盆地臭氧污染预测	杨晓彤, 康平, 王安怡, 臧增亮, 刘浪 (2507)
海口市臭氧浓度统计预报模型的构建与效果评估	符传博, 林建兴, 唐家翔, 丹利 (2516)
京津冀地区2015~2020年臭氧浓度时空分布特征及其健康效益评估	高冉, 李琴, 车飞, 张艳平, 祖永刚, 刘芬 (2525)
2022年北京市城区PM _{2.5} 水溶性离子含量及其变化特征	陈圆圆, 崔迪, 赵泽熙, 常森, 景宽, 沈秀娥, 刘保献 (2537)
郑州市冬春季PM _{2.5} 中金属元素污染特征、来源及健康风险评估	陶杰, 闫慧姣, 徐艺斐, 荆海涛 (2548)
淄博市供暖前后PM _{2.5} 中多环芳烃及其衍生物污染特征、来源及健康风险	孙港立, 吴丽萍, 徐勃, 高玉宗, 赵雪艳, 姬亚芹, 杨文 (2558)
西安市采暖季过渡期高时间分辨率细颗粒物组分特征及来源解析	李萌津, 张勇, 张倩, 田杰, 李丽, 刘卉昆, 冉伟康, 王启元 (2571)
天津冬季两个典型污染过程高浓度无机气溶胶成因及来源分析	卢苗苗, 韩素芹, 刘可欣, 唐晓, 孔磊, 丁净, 樊文雁, 王自发 (2581)
基于空间尺度效应的山东省PM _{2.5} 浓度时空变化及空间分异地理探测	徐勇, 韦梦新, 邹滨, 郭振东, 李沈鑫 (2596)
我国典型化工行业VOCs排放特征及其对臭氧生成潜势	武婷, 崔焱文, 肖威德, 翟增秀, 韩萌 (2613)
廊坊秋季大气污染过程中VOCs二次气溶胶生成潜势及来源分析	张敬巧, 刘铮, 丁文文, 朱瑶, 曹婷, 凌德印, 王淑兰, 王宏亮 (2622)
景观格局对河流水质影响的尺度效应 Meta 分析	王玉仓, 杜晶晶, 张禹, 吴昊, 胡敏韵, 陈丁江 (2631)
白洋淀夏季汛期入淀河流水体溶解性有机物的光谱特征及来源	孟佳靖, 宴红, 陈哲, 周石磊, 底怡玲, 武辰彬, 王晨光, 张家丰, 崔建升 (2640)
北京市丰台区永定河以东浅层地下水水化学演变规律及成因分析	胡昱欣, 周瑞静, 宋炜, 杨全合, 王鑫茹 (2651)
庐庐断裂带(安徽段)浅层地下水水化学特征、控制因素及水质评价	刘海, 魏伟, 宋阳, 徐洁, 管政亭, 黄健敏, 赵国红 (2665)
农药施用对兴凯湖水中农药残留的影响及其风险评价	王蔚青, 徐雄, 刘权震, 林利华, 吕婧, 王东红 (2678)
黄河兰州段河岸带土壤中微生物与耐药基因的赋存特征	韦程宸, 魏枫沂, 夏慧, 黄魁 (2686)
基于多源数据的巢湖蓝藻水华时空分布及驱动因素分析	金晓龙, 邓学良, 戴睿, 徐倩倩, 吴月, 范裕祥 (2694)
再生水构建水环境中沉水植物附着细菌群落特征	贺赞, 李雪梅, 李宏权, 魏琳琳, 姜春晖, 姜大伟, 李魁晚 (2707)
水位波动和植被恢复对三峡水库消落带土壤原核微生物群落结构的交互影响	梅渝, 黄平, 王鹏, 朱凯 (2715)
银川市典型湖泊沉积物细菌群落结构及其对重金属的响应关系	蒙俊杰, 刘双羽, 邱小琼, 周娟娟 (2727)
热水解时间对污泥厌氧消化系统微生物群落结构影响分析	张含, 张涵, 王佳伟, 高金华, 文洋, 李相昆, 任征然 (2741)
市政污水中吗啡来源辨析	邵雪婷, 赵悦彤, 蒋冰, 裴伟, 李彦莹, 谭冬芹, 王德高 (2748)
滦河流域生态环境动态遥感评价	李艳翠, 袁金国, 刘博涵, 郭豪 (2757)
黄河流域生态系统服务价值时空演化及影响因素	王奕洪, 孙学堂 (2767)
基于贝叶斯网络的生态系统服务权衡协同关系强度及其空间格局优化:以汾河流域为例	蔡进, 危小建, 江平, 梁玉琦 (2780)
贵州高原典型喀斯特县域生境质量时空演变及定量归因	李月, 冯霞, 吴路华, 罗光杰, 罗红芬 (2793)
2000~2021年黄土高原生态分区NEP时空变化及其驱动因子	周怡婷, 严俊霞, 刘菊, 王瑛 (2806)
基于SSP-RCP情景的黄土高原土地变化模拟及草原碳储量	崔伟, 董燕, 张露尹, 王荣臻 (2817)
京津冀城市群建设用地扩张多情景模拟及其对生态系统碳储量的影响	武爱彬, 陈辅国, 赵艳霞, 秦彦杰, 刘欣, 郭小平 (2828)
西南岩溶区土地利用变化对团聚体稳定性及其有机碳的影响	江可, 贾亚男, 杨琰, 陈坚淇, 禹朴家 (2840)
不同土地利用方式下土壤有机质分子组成变化的整合分析	黄世威, 赵一锴, 朱馨雨, 刘贺雷, 刘姣姣, 陈稍, 陈佳永, 张阿凤 (2848)
基于改进麻雀搜索算法优化BP神经网络的土壤有机质空间分布预测	胡志瑞, 赵万伏, 宋根先, 王芳, 林妍敏 (2859)
不同有机物料施用对菜地磷累积和转化的影响	孙凯, 崔玉涛, 李顺晋, 魏冰丽, 王媛, 杨宏博, 王孝忠, 张伟 (2871)
集约化柑橘种植抑制土壤磷循环微生物活性	周连吴, 曾全超, 梅唐英泽, 汪明霞, 谭文峰 (2881)
控释掺混肥对麦玉米轮作体系作物产量和温室气体排放的影响	高玮, 王学霞, 谢建治, 陈延华, 倪小会, 王甲辰, 董艳芳, 李子双, 曹兵 (2891)
生物炭对黄绵土中NO ₃ -N运移过程影响及模拟	白一茹, 刘旭, 张钰涵, 张睿媛, 马艳, 王幼奇 (2905)
中国农田土壤重金属污染分析与评价	杨雳, 白宗旭, 薄文浩, 林静, 杨俱佳, 陈涛 (2913)
城市土壤和地表灰尘重金属污染研究进展与展望	王晓雨, 刘恩峰, 杨祥梦, 王碧莲, 林锦阔, 颜梦霞, 毕世杰 (2926)
场地重金属污染土壤固化及MICP技术研究进展	陈玥如, 高文艳, 陈虹任, 薛生国, 吴川 (2939)
黄河流域山东段近河道煤矿区土壤重金属污染特征及源解析	戴文婷, 张晖, 吴霞, 钟鸣, 段桂兰, 董霁红, 张培培, 樊洪明 (2952)
拒马河流域河流沉积物与土壤重金属含量及风险评价	韩双宝, 袁磊, 张秋霞, 郑焰, 李甫成 (2962)
银川市黄河滩区土壤重金属污染特征、生态风险评估及来源解析	于路加, 马海军, 王翠平 (2971)
基于源导向和蒙特卡洛模型的广东省某城市土壤重金属健康风险评估	陈莲, 邹子航, 张培珍, 王雨菡, 王振江, 林森, 唐翠明, 罗国庆, 钟建武, 李智毅, 王圆 (2983)
西南典型碳酸盐岩高地背景区农田重金属化学形态、影响因素及回归模型	唐瑞玲, 徐进力, 刘彬, 杜雪苗, 顾雪, 于林松, 毕婧 (2995)
贵州省水田土壤-水稻Hg含量特征与安全种植区划	韦美溜, 周浪, 黄燕玲, 庞瑞, 王佛鹏, 宋波 (3005)
柠檬酸辅助甜高粱对南方典型母质土壤的镉修复效应	刘梦宇, 罗绪锋, 辜娇峰, 易轩韬, 周航, 曾鹏, 廖柏寒 (3016)
改性酒糟生物炭对紫色土壤镉形态及水稻吸收镉的影响	肖乃川, 王子芳, 杨文娜, 谢永红, 代文才, 高明 (3027)
生物炭对四环素和铜复合污染土壤生菜生长及污染物累积的影响	郑晨格, 裴欢欢, 张亚珊, 李嘉欣, 刘奋武, 乔星星, 秦俊梅 (3037)
基于Meta分析的蚯蚓堆肥对堆肥质量和重金属的影响效应	姜继韶, 侯睿, 崔慧林, 闫广轩, 刘栋 (3047)
微塑料对土壤N ₂ O排放及氮素转化的影响研究进展	刘一戈, 杨安琪, 陈舒欣, 牛英奕, 卢瑛, 李博 (3059)
土地利用对洱海罗时江小流域土壤微塑料污染的影响	戴柳云, 侯磊, 王化, 符立松, 王艳霞, 李晓琳, 王万宾, 梁启斌 (3069)
养殖海湾淤泥质海岸沉积物微塑料污染特征	宋可心, 贺金成, 李昌文, 解思琦, 刘宝堃, 黄伟, 冯志华 (3078)
聚乙烷微塑料对盐渍化土壤微生物群落的影响	李志超, 李哲, 李嘉晨, 屈忠义, 杨文煊, 李卫平 (3088)
鄱阳湖候鸟栖息地微塑料表面细菌群落结构特征与生态风险预测	俞锦丽, 赵俊凯, 罗思琦, 朱颖婷, 张文慧, 胡启武, 刘淑丽 (3098)
粤闽浙沿海重点城市道路交通节能减排路径	徐艺诺, 翁大维, 王硕, 胡喜生, 王占永, 张园园, 张兰怡 (3107)
电动重卡替代柴油重卡的全生命周期碳减排效益分析	徐圆圆, 龚德鸿, 黄正光, 杨浪 (3119)

基于时间序列分解的京津冀区域PM_{2.5}和O₃空间分布特征

姚青, 丁净, 杨旭, 蔡子颖, 韩素芹

(天津市环境气象中心, 中国气象局-南开大学大气环境与健康研究联合实验室, 天津 300074)

摘要: 京津冀区域大气污染分布呈现明显的空间差异, 厘清不同时间尺度下PM_{2.5}和O₃浓度分布有助于制定科学有效的污染防治措施. 采用STL方法分解PM_{2.5}和O₃浓度, 获取长期分量、季节分量和短期分量, 研究其变化趋势与空间分布特征. 结果表明, 2017~2021年京津冀区域PM_{2.5}浓度下降幅度高于O₃, 春、夏季PM_{2.5}和O₃浓度呈正相关, 秋、冬季呈现负相关, 短期分量和季节分量分别对PM_{2.5}和O₃浓度的贡献最大. PM_{2.5}的季节分量、短期分量以及O₃的长期分量和短期分量均存在2个主成分, 对应河北省中南部和京津冀区域北部, 在不同时间尺度上京津冀区域PM_{2.5}和O₃均存在次区域分布. 与原始序列相比, 长期分量能够更好地反映PM_{2.5}和O₃浓度的演变趋势; 季节分量和短期分量的标准差可用于衡量各城市PM_{2.5}和O₃浓度波动情况, 太行山前各城市PM_{2.5}浓度季节分量和短期分量标准差较高, 唐山的O₃浓度短期分量的标准差最高.

关键词: 时间序列分解; PM_{2.5}; 臭氧(O₃); 京津冀区域; 空间分布

中图分类号: X513; X515 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)05-2487-10 DOI: 10.13227/j.hjks.202306169

Spatial Distribution Characteristics of PM_{2.5} and O₃ in Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on Time Series Decomposition

YAO Qing, DING Jing, YANG Xu, CAI Zi-ying, HAN Su-qin

(CMA-NKU Cooperative Laboratory for Atmospheric Environment-Health Research, Tianjin Environmental Meteorology Center, Tianjin 300074, China)

Abstract: Notably, clear spatial differences occur in the distribution of air pollution among cities in the Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) Region. Clarifying the concentration distribution of PM_{2.5} and O₃ at different time scales is helpful to formulate scientific and effective pollution prevention and control measures. Here, the concentrations of PM_{2.5} and O₃ were decomposed using a seasonal-trend decomposition procedure based on the loess (STL) method; their long-term, seasonal, and short-term components were obtained; and their temporal and spatial distribution characteristics were studied. The results showed that the decrease in PM_{2.5} concentration in the BTH Region from 2017 to 2021 was higher than that of O₃. There was a positive correlation between PM_{2.5} and O₃ concentrations in spring and summer and a negative correlation in autumn and winter. The short-term component and seasonal component had the greatest contribution to PM_{2.5} and O₃ concentrations, respectively. There were two principal components in the seasonal and short-term components of PM_{2.5} and the long-term and short-term components of O₃, corresponding to the central and southern part of Hebei Province and the northern part of the BTH Region. Sub-regional distribution of PM_{2.5} and O₃ in the BTH Region at different time scales were found. Compared with that in the original series, the long-term component could better reflect the evolution trend of PM_{2.5} and O₃ concentrations, and the standard deviation (SD) of the seasonal component and short-term component could be used to measure the fluctuation in PM_{2.5} and O₃ concentrations in various cities. The SD of the seasonal and short-term components of the PM_{2.5} concentration in every city in front of Taihang Mountain was higher, and the SD of the short-term component of the O₃ concentration in Tangshan was the highest.

Key words: time series decomposition; PM_{2.5}; ozone(O₃); Beijing-Tianjin-Hebei Region; spatial distribution

2013年以来,我国施行了一系列严格的污染物排放标准和污染控制措施,重点区域PM_{2.5}浓度快速下降,但臭氧(O₃)浓度逐步上升,大气污染控制形势已由单一的PM_{2.5}控制转变为PM_{2.5}和O₃的协同控制^[1].据生态环境部发布的历年《中国生态环境状况公报》显示,大气污染防治行动计划实施之初(2013年)京津冀区域13个地级及以上城市仅有37.5%的日数达标,区域 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 平均值高达 $106\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ^[2],到2022年全国地级及以上城市空气质量优良天数比例提高到86.5%,京津冀及周边地区 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 平均值降低至 $44\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ^[3].2013年京津冀区域13个城市O₃年评价浓度为 $162\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ^[2],2017年则快速增长至 $193\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ^[4].尽管相比于2018年^[5],2022年京津冀及周边地区“2+26”城市O₃评价浓度有所降低^[3],

但京津冀区域PM_{2.5}重污染时有发生,O₃污染形势依然严峻^[6],PM_{2.5}和O₃协同控制是制约这一区域空气质量改善的关键因素^[7].

污染物排放、大气化学过程和气象条件变化是影响大气污染物浓度的主要因素,污染物排放超出环境容量导致污染天气^[8,9].污染物浓度存在多种时间尺度的叠加^[10],对污染物浓度原始时间序列进行不同时间尺度的分离能够获得其长期趋势、季节差异和短期波动特征^[11].国内外学者利用滤波方式,如

收稿日期: 2023-06-21; 修订日期: 2023-08-26

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(42130513);中国气象局创新发展专项(CXFZ2023P045);中国气象局-南开大学大气环境与健康研究联合实验室开放基金项目(CMANKU202207)

作者简介: 姚青(1980~),男,硕士,正高级工程师,主要研究方向为气溶胶与大气光化学,E-mail:yao.qing@163.com

使用 Kolmogorov-Zurbenko (KZ) 滤波法, 通过对污染物浓度进行不同时间尺度的分离, 得到关键气象要素对污染物浓度长期变化的影响^[12-16]. Ding 等^[17]采用 STL (Seasonal-Trend decomposition procedure based on Loess) 方法, 在剔除了气象波动后, 认为天津臭氧的变化在很大程度上由前体物排放变化驱动. 这种方法同时在 2020 年的一项全球性资料分析中得以应用^[18].

京津冀区域各城市 PM_{2.5} 和 O₃ 污染呈现明显的地理差异, PM_{2.5} 浓度高值区主要集中在区域中南部太行山脉山前的平原地区, 低值区主要集中在区域北部^[19]. 胡洛铭等^[20]的研究结果显示, 2014~2018 年京津冀地区不同区域增速差异明显, 高值区由单中心向双中心转变且逐渐形成了日益明显的沿海 O₃ 高浓度分布带. 这种大气污染物的空间分布差异不仅与排放和气象条件有关, 同时还受到城市经济产业结构, 以及渤海、太行山和燕山等大地形影响^[21]. 前期研究表明, 京津冀区域 PM_{2.5} 和 O₃ 空间分布具有明显的次区域特征, 且季节差异相对稳定^[22,23]. 本研究尝试通过 STL 方法分解 PM_{2.5} 和 O₃ 浓度, 获取其长期分量、季节分量和短期分量, 以研究其变化趋势和波动情况的空间分布特征, 以期为京津冀区域减排措施实施效果评估和污染防控措施的科学制定提供技术支撑.

1 材料与方法

1.1 研究区域与数据来源

京津冀区域 (BTH) 位于 113° 27' ~ 119° 50'E, 36° 05' ~ 42° 05'N, 东临渤海, 北枕燕山, 西倚太行, 地势西北高、东南低, 由西北向东南呈半环状逐级下降. 京津冀区域包括北京市 (BJ)、天津市 (TJ) 和河北省的保定 (BD)、廊坊 (LF)、唐山 (TS)、石家庄 (SJZ)、邯郸 (HD)、秦皇岛 (QHD)、张家口 (ZJK)、承德 (CD)、沧州 (CZ)、邢台 (XT) 和衡水 (HS) 这 11 个地级市以及定州和辛集这 2 个省直管市. 基于数据的连续性和完整性考虑, 本研究选取了该区域内的 68 个国控站, 其中北京市 12 个站, 天津市 9 个站, 河北省 47 个站, 本研究以北京市、天津市和河北省 11 个地级市作为该区域主要城市, PM_{2.5} 日均浓度和 O₃ 日最大 8 h 浓度平均值 (MDA8 O₃) 数据来源于中国环境监测总站 (<http://www.cnemc.cn/>) 全国空气质量实时发布平台, 各城市浓度平均值为该城市内各国控站点污染物浓度的算术平均值. 除北京和天津站点分布较为均匀外, 河北省各城市站点多集中在城区, 因而污染物浓度主要反映城市环境. 本文中的 O₃ 浓度均为 O₃ 日最大 8h 浓度平均值,

或基于该浓度的统计值.

1.2 研究方法

污染物浓度时间序列是多个不同时间尺度上物理和化学过程相互作用的结果^[15], 不同尺度气象要素对 PM_{2.5} 与 O₃ 浓度的影响不同. 假定给定空气污染物的时间序列是可加的, 由长期趋势、季节性和不规则的短期变量组成, 因此对应时刻 t 的污染物浓度 $X(t)$ 表示为:

$$X(t) = T(t) + S(t) + I(t) \quad (1)$$

式中, $T(t)$ 为时刻 t 下污染物浓度的长期分量, 表示污染物浓度的长期演变趋势, 通常由排放和/或气候变化驱动的持续增加或减少导致. $S(t)$ 为时刻 t 下污染物浓度的季节分量, 表示由季节变化引起的污染物浓度变化, 通常没有年际差异. $I(t)$ 为时刻 t 下污染物浓度的短期分量, 反映了数据的随机性, 可用于表征去除趋势和季节性成分后时间序列的其余部分, 通常归因于气象和排放的短期变化^[17]. 此外, 长期分量和季节性分量之和被定义为原始时间序列的基线.

$$\text{Baseline}(t) = T(t) + S(t) \quad (2)$$

采用 STL 方法, 一种适应性强且稳健的时间序列分解方法^[24], 将京津冀区域各城市以及整体平均的 PM_{2.5} 和 O₃ 浓度分离为长期分量、季节分量和短期分量.

主成分分析法 (principal component analysis, PCA) 在损失很少信息的前提下将多个指标转化为少数互不相关的综合因子, 从而达到“降维”的目的, 被广泛应用于气象学和空气污染来源解析研究中. 选取普通克里金插值方法进行 PM_{2.5} 和 O₃ 浓度的长期分量、季节分量和短期分量及其标准差的空间表达, 该方法基于半变异函数理论, 对有限区域范围变量取值进行无偏最优估计^[25], 可以反映空间变量的相关性和变异性, 能够补充站点分布较少的问题.

2 结果与讨论

2.1 相关性分析

图 1 给出了 2017~2021 年京津冀区域不同城市各季节 PM_{2.5} 和 O₃ 浓度平均值及其相关系数. 从中可知, 京津冀区域 13 个城市 PM_{2.5} 和 O₃ 浓度春季和夏季均呈现正相关 ($R > 0$), 其中春季介于 0.02~0.17, 夏季介于 0.21~0.66, 秋季 [图 1(c)] 除秦皇岛 R 为正值 (0.07) 外, 其余城市均为负值 (-0.22~-0.05), 冬季 [图 1(d)] 负相关性进一步增强 (-0.36~-0.17), 这与孙金金等^[26]在日均时间尺度上对华北平原 PM_{2.5} 和 O₃ 浓度相关系数获得的分析结果类似, 裘彦挺

等^[27]则在更大空间尺度上证实了这种时空分布性。有研究表明春夏季 PM_{2.5} 和 O₃ 浓度正相关^[28], 一方面两者具有共同的前体物(NO_x 和 VOCs), 在特定气象条件和大气强氧化性的促进作用下, 通过多相反应形成二次 PM_{2.5} 和 O₃, 体现出二者的同源性, 另一方面高浓度的地表 O₃ 可通过促进 SO₂ 和 NO_x 的气相氧化反应和颗粒物表面的非均相化学反应过程等, 促进 SO₄²⁻ 和 NO₃⁻ 等二次组分生成^[29], 而秋冬季较弱的光照强度以及一次排放导致的高浓度 PM_{2.5} 影响太阳辐射, 并可为非均相反应过程提供反应表面, 改变大气自由基浓度, 从而影响 O₃ 浓度^[30]。此外, 不同季节气象条件还可以改变前体物排放和化学反应速率, 影响不同相污染物的输送和扩散和沉降等过程, 从而影响两者浓度^[31]。夏季京津冀区域 PM_{2.5} 和 O₃ 浓度呈

现明显的正相关, 表明区域性特征突出, 如图 1(b) 中的阴影部分, 区域北部的张家口、承德和秦皇岛等城市 PM_{2.5} 和 O₃ 浓度呈现高相关($R > 0.5$), 以上城市处于首都生态涵养区内, PM_{2.5} 排放强度较低, 有研究表明, 夏季 PM_{2.5} 浓度较低易导致气溶胶单次散射反照率较低^[32], 对光照强度的削弱有限, 而 HO₂· 浓度未被显著降低, 在较强的光化学反应条件下, 这些前体物通过光化学反应同时促进 O₃ 与 PM_{2.5} 中二次组分的生成, 导致二者具有较强的正相关关系^[33]。春季、秋季和冬季则未能通过显著性检验($P > 0.05$), 这与京津冀区域受排放、地理因素和大气扩散条件等因素影响形成的次区域有关, 这种次区域划分可以通过主成分分析实现, 并应用于 O₃ 背景浓度^[22] 和 PM_{2.5} 污染典型城市筛选^[23] 中。

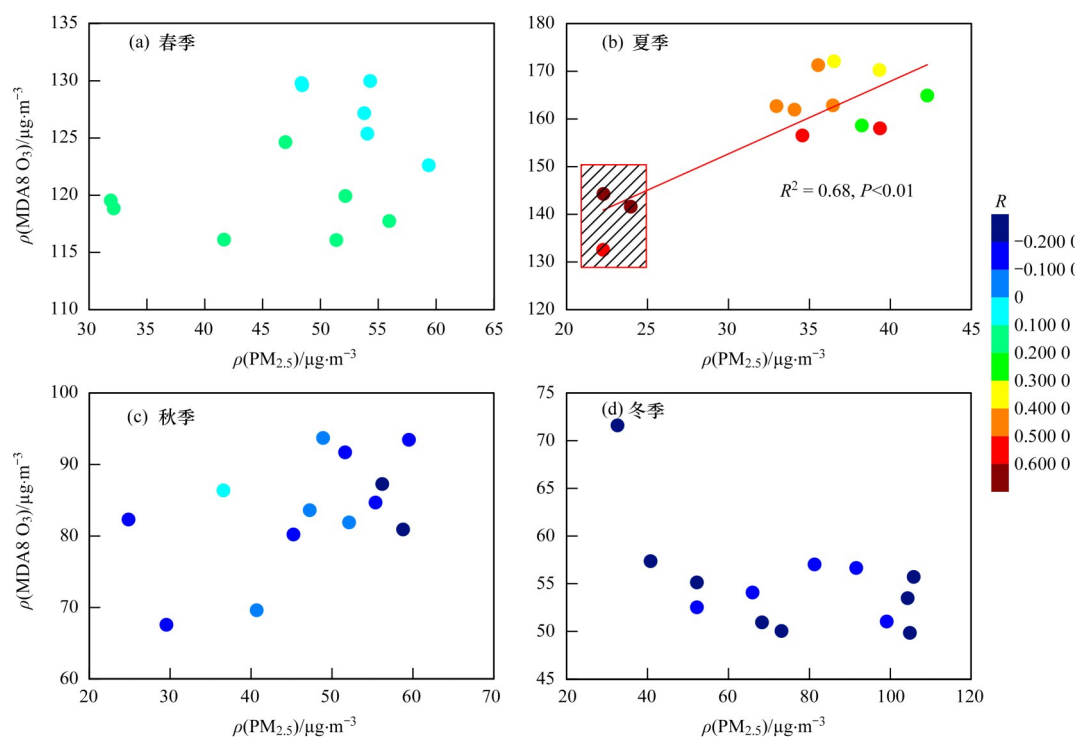


图1 京津冀区域不同城市 MDA8 O₃ 与 PM_{2.5} 浓度的关系

Fig. 1 Relationship between MDA8 O₃ and PM_{2.5} concentration in different cities in the BTH Region

2.2 时间序列分解

图2给出了2017~2021年京津冀区域13个城市 PM_{2.5} 和 O₃ 浓度平均值的时间序列分解结果。京津冀区域 PM_{2.5} 浓度呈下降趋势, 变幅为 $-6.66 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{a})^{-1}$ ($R^2 = 0.075$, $P < 0.01$), 经时间序列分解后, PM_{2.5} 浓度的长期分量呈显著下降趋势, 变幅 [$k = -6.10 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{a})^{-1}$] 略低于原始序列, 但可决系数 ($R^2 = 0.934$, $P < 0.01$) 明显增加。由于研究方法的特性, 季节分量未能体现出年际差异。PM_{2.5} 浓度基线变幅 [$-6.80 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{a})^{-1}$, $R^2 = 0.184$, $P < 0.01$] 与前二者相当。2020~2021年 PM_{2.5} 短期分量的波动幅度低于2017~2019年, 这可能与 COVID-19 期间经

济活动减弱有关^[18]。与 PM_{2.5} 不同, 京津冀区域 O₃ 原始序列则呈波动下降趋势, 变幅为 $-3.35 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{a})^{-1}$ ($R^2 = 0.008$, $P < 0.01$), 经时间序列分解后, O₃ 浓度的长期分量变化趋势 [$k = -2.28 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{a})^{-1}$, $R^2 = 0.707$, $P < 0.01$] 和基线变化趋势 [$k = -3.23 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{a})^{-1}$, $R^2 = 0.009$, $P < 0.01$] 的下降趋势近似, 短期分量未能通过显著性检验 ($P > 0.05$)。

理想状态下, 原始序列分解出的长期分量、季节分量和短期分量之间相互独立, 各分量方差之和等于原始序列方差, 但实际分解过程中难以达到完全独立, 各分量方差之和一般小于原始序列方差^[34]。

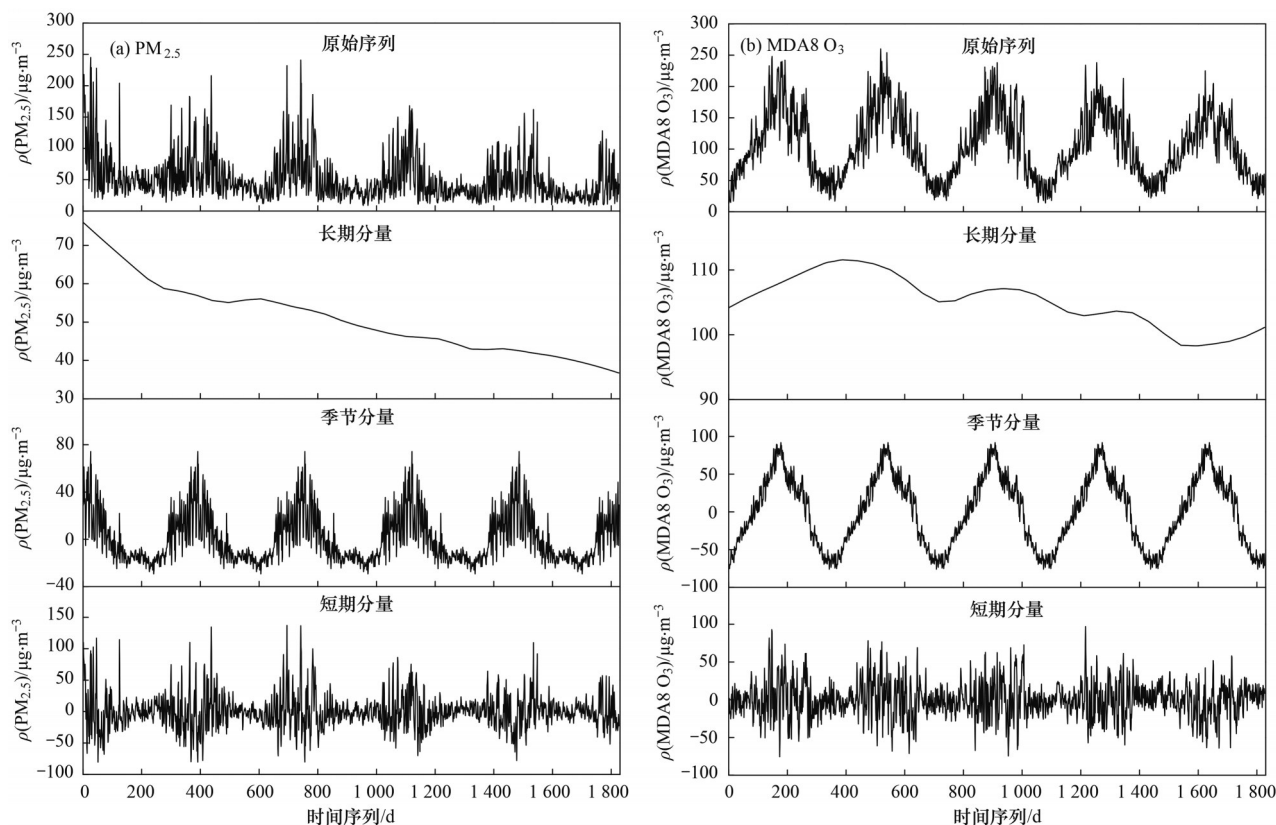


图2 京津冀区域 $\text{PM}_{2.5}$ 和 MDA8 O_3 浓度的原始序列、长期分量、季节分量和短期分量

Fig. 2 Original $\text{PM}_{2.5}$ and MDA8 O_3 series in the BTH Region and their decomposed long-term, seasonal, and short-term components

STL的分解效果可以通过各分量方差贡献率之和来体现, 其值越接近 100%, 说明分解效果越好^[10]. 京津冀区域 $\text{PM}_{2.5}$ 经 STL 分解后, 长期分量、季节分量和短期分量方差对原始序列的贡献依次为 6.76%, 33.47% 和 57.86%, 仅有 1.92% 的方差未能解释, 区域整体 O_3 各分量对原始序列的贡献依次为 0.56%, 79.04% 和 19.73%, 仅有 0.61% 的方差未能解释, 表明分解效果较好. $\text{PM}_{2.5}$ 浓度时间序列的高频波动主要由排放源的短期变化与中小尺度天气系统引起^[35]. 这与秦人洁等^[10]、荆琦等^[36]和张运江等^[37]的研究结果近似. 与 $\text{PM}_{2.5}$ 分解结果不同, O_3 季节分量方差对总方差的贡献最大, 长期分量方差的贡献很小, 与京津冀区域近地面 O_3 浓度波动受太阳辐射和温度控制的大气光化学反应强度影响有关, 张运江等^[37]在国内 4 城市的研究结果显示, 2015 ~ 2020 年北京 MDA8 O_3 季节分量方差对总方差的贡献为 67.63%, 高于华中地区的南京 (51.74%) 和武汉 (52.80%), 远高于华南地区的深圳 (25.69%), 不同纬度下太阳辐射和气温可能是造成这一差异的重要原因.

图 3 给出了京津冀区域不同城市 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 各分量方差对总方差的贡献率. 短期分量对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度波动的贡献最高 (52.03% ~ 73.92%), 季节分量次之 (19.52% ~ 39.45%), 长期分量最低 (1.35% ~ 9.17%).

各城市差异较为明显, 北京、张家口、天津和承德等京津冀区域北部城市短期分量方差占比高于河北省中南部地区, 季节分量贡献则成相反趋势. 季节分量对 O_3 浓度波动的贡献占有绝对优势 (64.74% ~ 76.33%), 短期分量贡献次之 (21.97% ~ 34.24%), 长期分量的贡献很小 (0.29% ~ 1.40%), 石家庄、保定和邢台等河北省中南部城市的季节分量方差对总方差的贡献率高于秦皇岛、承德和唐山等北部城市, 短期分量方差对总方差的贡献率则呈相反趋势. 考虑到气象条件波动是造成短期分量变化的主要因素, 研究区域大小会影响气象条件变化幅度, 从而改变短期分量的占比, 本研究以京津冀区域作为整体得到的 O_3 季节分量方差贡献率 (79.04%) 高于各城市贡献率 (64.74% ~ 76.33%), 而短期分量方差贡献率 (19.73%) 低于各城市贡献率 (21.97% ~ 34.24%), 与余益军等^[38]采用各城市贡献率平均值作为京津冀区域贡献率不同, 本研究采用的处理方式会增大季节分量对总方差的贡献, 使得季节变化的作用更加显著.

2.3 主成分分析

表 1 ~ 4 给出了京津冀区域各城市不同分量的主成分分析结果. 从表 1 可知, 未经旋转前, $\text{PM}_{2.5}$ 的长期分量仅有 1 个主成分, 季节分量和短期分量均有 2

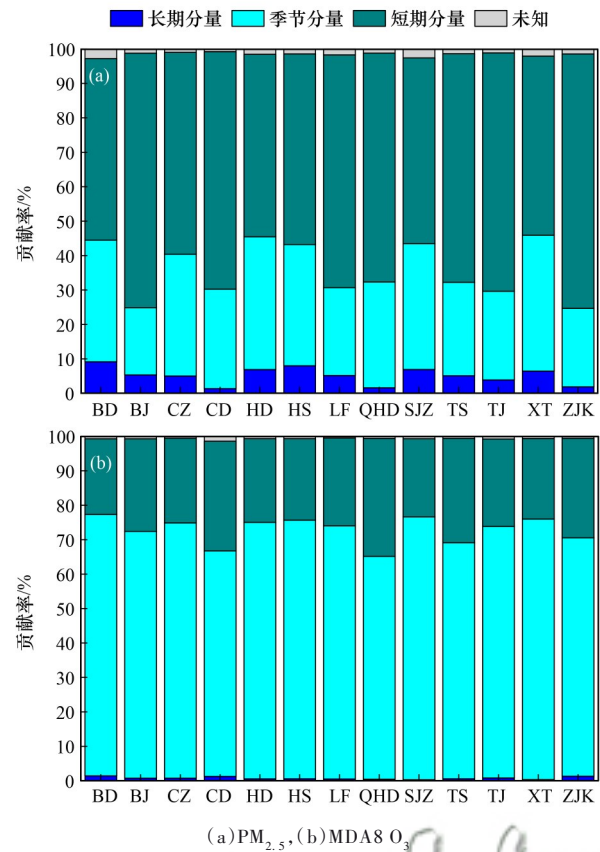


图3 京津冀区域不同城市PM_{2.5}和MDA8 O₃各分量方差对总方差的贡献率
Fig. 3 Contribution rate of variance of PM_{2.5} and MDA8 O₃ components total variance in the BTH Region

个主成分，三者累计可解释方差可达81%以上，表2显示O₃的季节分量仅有1个主成分，各分量累计可解释方差可达到78%以上，这表明主成分分析可以获得京津冀区域PM_{2.5}和O₃时空分布的大部分信息.为更好地阐明每个主成分对原始变量的影响，采用旋转算法来获得旋转后的因子载荷，以提高各因子的解释力，并赋予各城市在主成分PC1和PC2的空间载荷系数.表3和表4给出了采用具有Kaiser

标准化的正交旋转后的主成分方差和累计方差，可代表每个变量对特定主成分的贡献.经旋转后获得了PM_{2.5}的季节分量和短期分量，以及O₃的长期分量和短期分量，由于近年来京津冀区域整体PM_{2.5}浓度显著降低^[2-5]，而O₃季节差异过于显著，这两个分量无需进一步旋转，因而仅有1个主成分.

图4给出了京津冀区域各城市主成分系数经旋转后的空间载荷系数，以≥0.7作为各主成分的高空间载荷.图4(a)显示PM_{2.5}季节分量主要存在2个主成分，PC1高载荷在河北省中南部6城市(石家庄、保定、沧州、衡水、邯郸和邢台)高度聚集，PC2高载荷分布于北京、张家口和承德，秦皇岛、唐山、天津和廊坊等城市的空间载荷则介于二者之间，略偏向于京津冀北部地区，PC1可解释的方差高于PC2，表明河北省中南部6城市是京津冀区域PM_{2.5}浓度季节分量的主要贡献者，短期分量亦呈现类似的规律，这种明显的次区域分布在此前对京津冀区域各城市PM_{2.5}分季节的主成分分析^[23]中已有所体现，本研究对各城市PM_{2.5}浓度进行时间序列分解仍然可以得到类似的结果，表明次区域划分在不同时间尺度上仍然成立.图4(c)和4(d)给出了O₃长期分量和短期分量主成分系数经旋转后的空间载荷系数，与PM_{2.5}类似，O₃各分量的PC1和PC2依然集中分布于河北省中南部地区和北部城市.樊文雁等^[39]的研究显示京津冀区域不同城市O₃输送来源地的差异与该城市所处地理位置有关，相对位置和大地形是造成不同城市O₃来源地差异的重要影响因素，如区域内各城市对北京、廊坊、承德和张家口等城市O₃浓度的影响高于50%，而河北省南部各城市则更易受到山东和河南等地影响.这种空间分布特征表明京津冀区域大气污染联防联控治工作中可以考虑采用主成分方法将研究区域划分为彼此相对独立的两个次区域，以降低区域选取过大或过小造成的决策成本.

表1 京津冀区域各城市PM_{2.5}未经旋转的主成分分析结果
Table 1 Principal component analysis results without orthogonal rotation for PM_{2.5} in the BTH Region

PM _{2.5}	主成分	特征值(>1)	可解释方差/%	累计可解释方差/%
长期分量	PC1	12.006	92.353	92.353
	PC2	10.231	78.698	78.698
季节分量	PC1	1.228	9.447	88.145
	PC2	9.255	71.190	71.190
短期分量	PC1	1.356	10.427	81.617
	PC2			

2.4 空间分布

长期而言，区域空气质量的改善主要依赖于污染物排放和净生成量的降低，污染物浓度年均值和超标情况多用来评价大气污染治理效果，PM_{2.5}和O₃的浓度水平和变化趋势能够较好地代表长时间尺度

污染物浓度的平均状态.图5给出了京津冀区域各城市PM_{2.5}长期分量的时间变化情况，整体而言，京津冀区域PM_{2.5}浓度的长期分量呈连续快速下降趋势，年均降低6.10 μg·m⁻³，略低于原始序列降幅，多数城市高于或略低于区域平均值，2017年石家庄和保

表2 京津冀区域各城市MDA8 O₃未经旋转的主成分分析结果

Table 2 Principal component analysis results without orthogonal rotation for MDA8 O₃ in the BTH Region

MDA8 O ₃	主成分	特征值(> 1)	可解释方差/%	累计可解释方差/%
长期分量	PC1	9.470	72.844	72.844
	PC2	1.876	14.432	87.276
季节分量	PC1	12.480	95.997	95.997
短期分量	PC1	8.668	66.677	66.677
	PC2	1.485	11.423	78.100

表3 京津冀区域各城市PM_{2.5}经旋转的主成分分析结果

Table 3 Principal component analysis results with orthogonal rotation method with Kaiser Standardization for PM_{2.5} in the BTH Region

PM _{2.5}	主成分	特征值(> 1)	可解释方差/%	累计可解释方差/%
长期分量	PC1	12.006	92.353	92.353
季节分量	PC1	6.529	50.221	50.221
	PC2	4.930	37.923	88.145
短期分量	PC1	5.401	41.543	41.543
	PC2	5.210	40.074	81.617

表4 京津冀区域各城市MDA8 O₃经旋转的主成分分析结果

Table 4 Principal component analysis results with orthogonal rotation method with Kaiser Standardization for MDA8 O₃ in the BTH Region

MDA8 O ₃	主成分	特征值(> 1)	可解释方差/%	累计可解释方差/%
长期分量	PC1	6.193	47.636	47.636
	PC2	5.153	39.640	87.276
季节分量	PC1	12.480	95.997	95.997
短期分量	PC1	5.344	41.106	41.106
	PC2	4.809	36.993	78.100

定PM_{2.5}浓度长期分量下降趋势明显,张家口、承德和秦皇岛的长期分量显著低于区域平均值,并且降幅平缓,与这些城市PM_{2.5}浓度水平较低,减排区间收窄有关.随着区域大气污染持续治理,各城市长期分量存在日渐趋同的趋势,研究初期除张家口、承德和秦皇岛等城市外,多数城市长期分量集中在70~110 μg·m⁻³,经过5 a治理则降低至35~50 μg·m⁻³,其中保定长期分量降幅最大,达到-9.96 μg·(m³·a)⁻¹;石家庄次之,为-9.46 μg·(m³·a)⁻¹;北京降幅为-6.35 μg·(m³·a)⁻¹,居于区域平均水平;承德和张家口最低,分别为-1.38 μg·(m³·a)⁻¹和-1.73 μg·(m³·a)⁻¹.各城市PM_{2.5}长期分量的相对标准差也反映出不同城市间的降幅差异,如保定和石家庄的相对标准差分别为25.5%和21.6%,均明显高于张家口(10.8%)和承德(8.3%).图6给出了各城市O₃长期分量的时间变化情况,京津冀区域年均降低2.28 μg·m⁻³,明显低于原始序列降幅.与PM_{2.5}不同,O₃浓度的长期分量呈现缓慢波动下降特征,2018年各城市O₃浓度长期分量达到峰值后,逐年缓慢下降,但2021年出现增高趋势,各城市O₃长期分量的相对标准差(3.1%~6.8%)较小,表明近年来O₃浓度基本维持稳定,突出显示出遏制O₃污染的复杂性和艰巨性.相比于原始数据,经时间序列分解得到的

长期分量由于分离出季节和短期气象因素的影响,能够更好地反映污染物浓度的演变趋势.

由于长期资料的季节分量和短期分量平均值均接近于0,无法给出统计意义下的平均状态,为考察其空间差异,采用季节分量和短期分量的标准差来初步判断京津冀区域PM_{2.5}和O₃季节尺度和短期内波动情况及其空间差异.如图7所示,河北中南部城市PM_{2.5}浓度的季节分量标准差高于北部地区,如石家庄标准差为32.54 μg·m⁻³,达到张家口标准差(10.57 μg·m⁻³)的3倍,各城市PM_{2.5}浓度的短期分量标准差则较为接近,呈现太行山前城市最高,其他城市依次降低,张家口和承德最低等特点.O₃季节分量标准差的空间分布特征与PM_{2.5}近似,以保定、石家庄和邢台为高值中心,张家口为低值中心,而O₃浓度短期分量标准差以唐山最高,这可能与太行山、渤海等大地形造成的复杂区域输送特性有关^[39].汾渭平原的研究表明,PM_{2.5}与地形起伏度有显著的负空间自相关关系^[40],不同地形城市(如喇叭口地形、峡谷地形和平原地形城市)的污染物受到的传输路径不同^[41].地理因素对城市大气污染物时空分布的影响较为复杂^[42,43],同时京津冀区域受城市化影响,污染物空间分布及其输送路径具有独特性^[44~46],需要针对具体城市,结合多源资料,进一

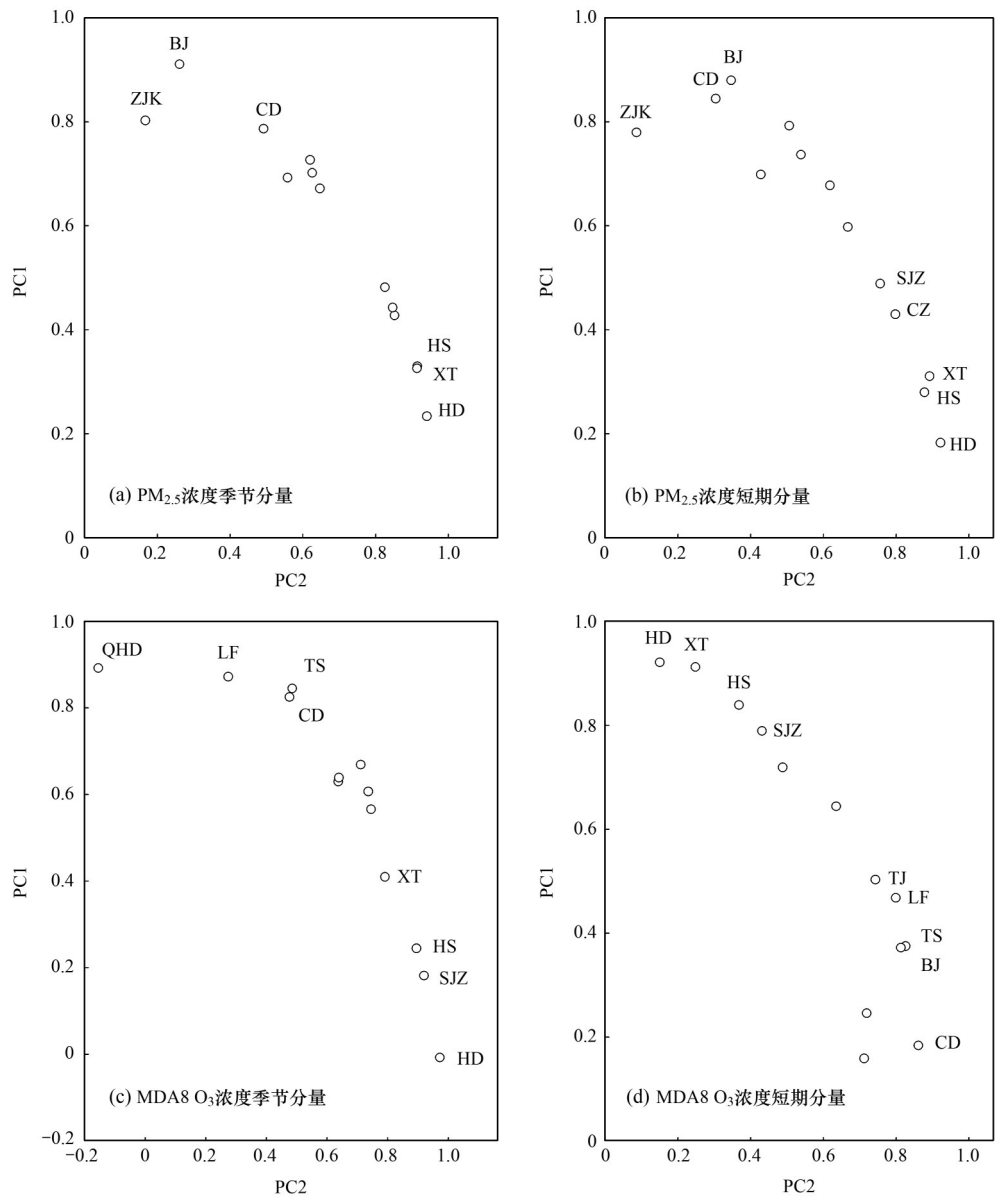


图 4 京津冀区域 $\text{PM}_{2.5}$ 和 MDA8 O_3 浓度各分量经旋转后主成分的空间载荷系数
Fig. 4 Spatial distribution of principal components with orthogonal rotation in the BTH Region

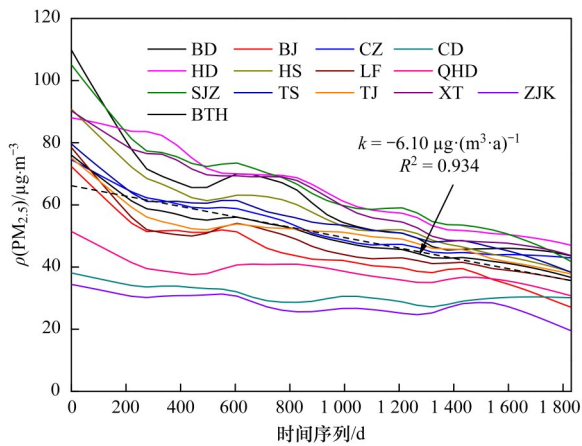


图 5 京津冀区域各城市 $\text{PM}_{2.5}$ 长期分量的时间变化
Fig. 5 Temporal variation in long-term components of $\text{PM}_{2.5}$ in the BTH Region

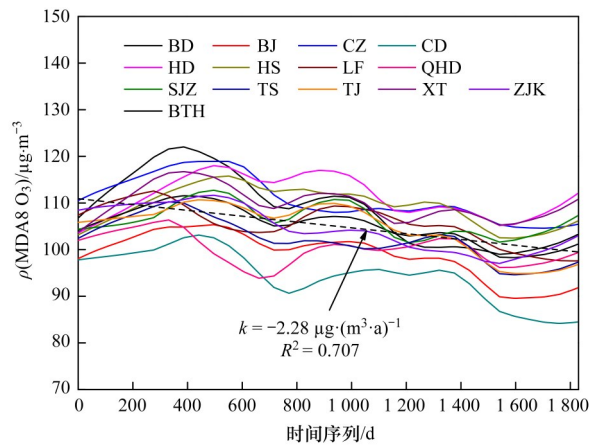


图 6 京津冀区域各城市 MDA8 O_3 浓度长期分量的时间变化
Fig. 6 Temporal variation in long-term components of MDA8 O_3 in the BTH Region

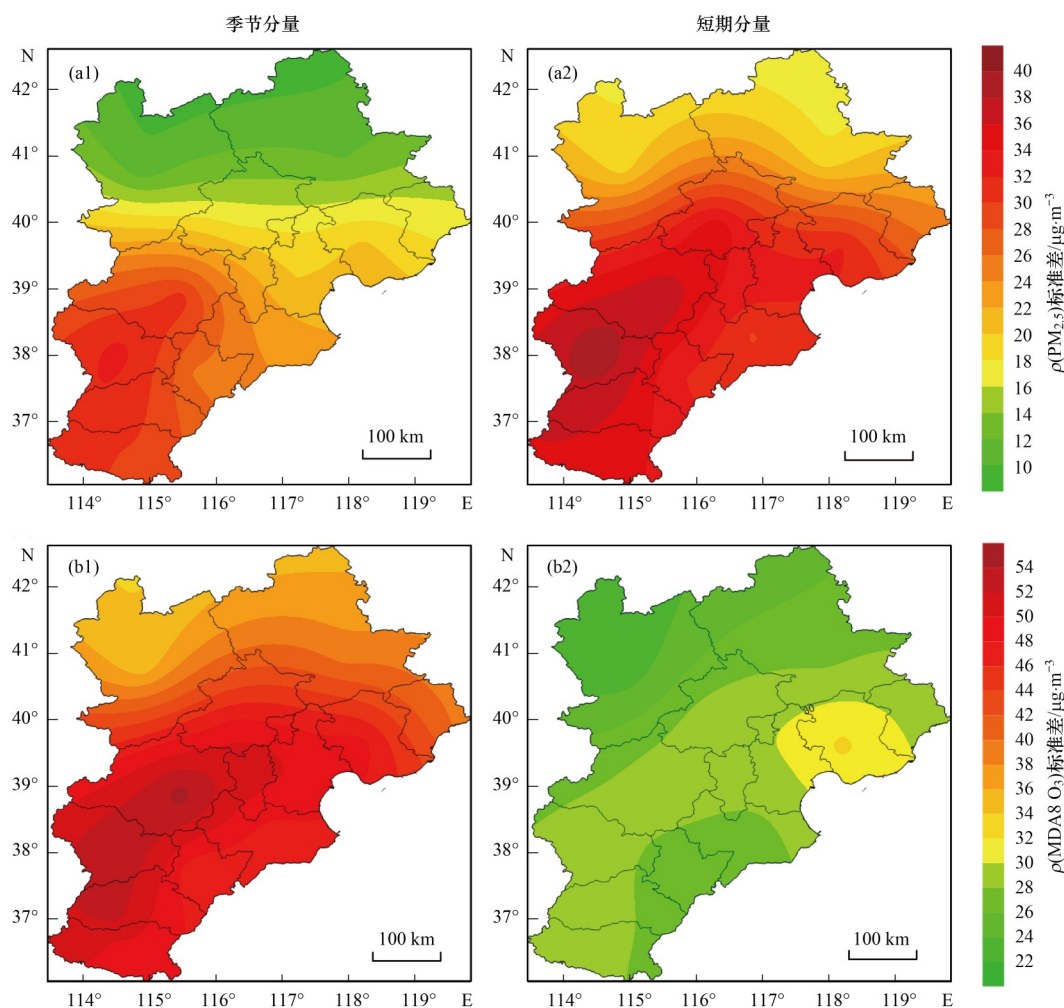


图7 京津冀区域PM_{2.5}和MDA8 O₃季节分量和短期分量的标准差

Fig. 7 Standard deviation in seasonal and short-term components of PM_{2.5} and MDA8 O₃ in the BTH Region

步详细地分析和研究。

3 结论

(1) 2017 ~ 2021 年京津冀区域 PM_{2.5} 浓度呈逐日下降趋势 [$-6.66 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{a})^{-1}$], O₃ 浓度呈波动下降趋势 [$-3.35 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{a})^{-1}$], 各城市春、夏季 PM_{2.5} 和 O₃ 浓度呈正相关, 秋、冬季呈现负相关。

(2) 经 STL 分解后, 长期分量、季节分量和短期分量方差对京津冀区域 PM_{2.5} 浓度原始序列的贡献依次为 6.76%、33.47% 和 57.86%, 对 MDA8 O₃ 浓度原始序列的贡献依次为 0.56%、79.04% 和 19.73%。

(3) 主成分系数经旋转后的空间载荷系数表明, PM_{2.5} 浓度的季节分量、短期分量以及 MDA8 O₃ 浓度的长期分量和短期分量均存在 2 个主成分, 对应河北省中南部和京津冀区域北部, 在不同尺度上京津冀区域 PM_{2.5} 和 O₃ 均存在次区域分布。

(4) 与原始数据相比, 长期分量能够更好地反映 PM_{2.5} 和 MDA8 O₃ 浓度的演变趋势; 季节分量和短期分量的标准差可用于初步判断各城市 PM_{2.5} 和

MDA8 O₃ 浓度波动情况, 太行山前各城市是 PM_{2.5} 浓度季节分量和短期分量标准差高值区, 唐山的 MDA8 O₃ 浓度短期分量的标准差最高。

参考文献:

- [1] 董赵鑫, 丁点, 姜越琪, 等. PM_{2.5} 和臭氧对前体物减排和气象变化的响应及其政策启示[J]. 环境科学研究, 2023, 36(2): 223-236.
Dong Z X, Ding D, Jiang Y Q, *et al.* Responses of PM_{2.5} and O₃ to emission reduction and meteorology variation and their policy implications [J]. Research of Environmental Sciences, 2023, 36(2): 223-236.
- [2] 环境保护部. 2013 中国环境状况公报[R]. 北京: 环境保护部, 2014. 20-22.
- [3] 生态环境部. 2022 中国生态环境状况公报[R]. 北京: 生态环境部, 2023. 3-16.
- [4] 生态环境部. 2017 中国生态环境状况公报[R]. 北京: 生态环境部, 2018. 7-13.
- [5] 生态环境部. 2018 中国生态环境状况公报[R]. 北京: 生态环境部, 2019. 7-15.
- [6] Wang Z B, Li J X, Liang L W. Spatio-temporal evolution of ozone pollution and its influencing factors in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration [J]. Environmental Pollution, 2020, 256, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113419.
- [7] 宋小涵, 燕丽, 刘伟, 等. 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[J]. 环境科学, 2023, **44**(4): 1841-1851.
- Song X H, Yan L, Liu W, *et al.* Spatiotemporal distribution characteristics of co-pollution of PM_{2.5} and ozone over BTH with surrounding area from 2015 to 2021 [J]. Environmental Science, 2023, **44**(4): 1841-1851.
- [8] Sun J J, Liang M J, Shi Z H, *et al.* Investigating the PM_{2.5} mass concentration growth processes during 2013-2016 in Beijing and Shanghai[J]. Chemosphere, 2019, **221**: 452-463.
- [9] 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.
- [10] 秦人洁, 张洁琼, 王雅倩, 等. 基于KZ滤波法的河北省PM_{2.5}和O₃浓度不同时间尺度分析研究[J]. 环境科学学报, 2019, **39**(3): 821-831.
- Qin R J, Zhang J Q, Wang Y Q, *et al.* Study on different time scales of PM_{2.5} and O₃ concentrations in Hebei Province based on KZ filter [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, **39**(3): 821-831.
- [11] Rao S T, Zurbenko I G. Detecting and tracking changes in ozone air quality[J]. Air & Waste, 1994, **44**(9): 1089-1092.
- [12] 王浩琪, 张裕芬, 罗忠伟, 等. 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[J]. 环境科学, 2023, **44**(4): 1811-1820.
- Wang H Q, Zhang Y F, Luo Z W, *et al.* Spatial-temporal variation and driving factors of ozone in China from 2019 to 2021 based on EOF technique and KZ filter[J]. Environmental Science, 2023, **44**(4): 1811-1820.
- [13] 张洁琼, 王雅倩, 高爽, 等. 不同时间尺度气象要素与空气污染关系的KZ滤波研究[J]. 中国环境科学, 2018, **38**(10): 3662-3672.
- Zhang J Q, Wang Y Q, Gao S, *et al.* Study on the relationship between meteorological elements and air pollution at different time scales based on KZ filtering [J]. China Environmental Science, 2018, **38**(10): 3662-3672.
- [14] 郑小华, 李明星, 娄盼星. 不同时间尺度下汾渭平原臭氧浓度变化及气象环境影响[J]. 高原气象, 2021, **40**(4): 954-964.
- Zheng X H, Li M X, Lou P X. Different-scale changes in ozone concentration and meteorological environment in Fenwei Plain [J]. Plateau Meteorology, 2021, **40**(4): 954-964.
- [15] Rao S T, Zurbenko I G, Neagu R, *et al.* Space and time scales in ambient ozone data [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1997, **78**(10): 2153-2166.
- [16] Henneman L R F, Holmes H A, Mulholland J A, *et al.* Meteorological detrending of primary and secondary pollutant concentrations: method application and evaluation using long-term (2000-2012) data in Atlanta [J]. Atmospheric Environment, 2015, **119**: 201-210.
- [17] 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.
- [18] Torkmahalleh M A, Akhmetvaliyeva Z, Omran A D, *et al.* Global air quality and COVID-19 pandemic: do we breathe cleaner air? [J]. Aerosol and Air Quality Research, 2021, **21**(4), doi: 10.4209/aaqr.200567.
- [19] 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.
- [20] 胡洛铭, 李奕璇, 施念郁, 等. 京津冀地区臭氧浓度时空变化特征[J]. 环境科学与技术, 2019, **42**(11): 1-7, 39.
- Hu L M, Li Y X, Shi N F, *et al.* Spatio-temporal change characteristics of ozone concentration in Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. Environmental Science & Technology, 2019, **42**(11): 1-7, 39.
- [21] 徐祥德, 王寅钧, 赵天良, 等. 中国大地形东侧霾空间分布“避风港”效应及其“气候调节”影响下的年代际变异[J]. 科学通报, 2015, **60**(12): 1132-1143.
- Xu X D, Wang Y J, Zhao T L, *et al.* “Harbor” effect of large topography on haze distribution in eastern China and its climate modulation on decadal variations in haze [J]. Chinese Science Bulletin, 2015, **60**(12): 1132-1143.
- [22] 姚青, 马志强, 郝天依, 等. 京津冀区域臭氧时空分布特征及其背景浓度估算[J]. 中国环境科学, 2021, **41**(11): 4999-5008.
- Yao Q, Ma Z Q, Hao T Y, *et al.* Temporal and spatial distribution characteristics and background concentration estimation of ozone in Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. China Environmental Science, 2021, **41**(11): 4999-5008.
- [23] 姚青, 唐颖潇, 蔡子颖, 等. 京津冀区域典型城市PM_{2.5}污染特征及其成因研究[J]. 环境科学学报, 2022, **42**(7): 43-52.
- Yao Q, Tang Y X, Cai Z Y, *et al.* Evaluation of PM_{2.5} pollution characteristics and formation mechanisms of typical cities in Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022, **42**(7): 43-52.
- [24] Cleveland R B, Cleveland W S, McRae J E, *et al.* STL: A seasonal-trend decomposition procedure based on loess [J]. Journal of official statistics 1990, **6**(1): 3-33.
- [25] 杨兴川, 赵文吉, 熊秋林, 等. 2016年京津冀地区PM_{2.5}时空分布特征及其与气象因素的关系[J]. 生态环境学报, 2017, **26**(10): 1747-1754.
- Yang X C, Zhao W J, Xiong Q L, *et al.* Spatio-temporal distribution of PM_{2.5} in Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) area in 2016 and its relationship with meteorological factors [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2017, **26**(10): 1747-1754.
- [26] 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]. 科学通报, 2022, **67**(18): 2018-2028.
- 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]. Chinese Science Bulletin, 2022, **67**(18): 2018-2028.
- [27] 裘彦庭, 吴志军, 尚冬杰, 等. 我国城市大气PM_{2.5}与O₃浓度相关性的时空特征分析[J]. 科学通报, 2022, **67**(18): 2008-2017.
- Qiu Y T, Wu Z J, Shang D J, *et al.* The temporal and spatial distribution of the correlation between PM_{2.5} and O₃ contractions in the urban atmosphere of China [J]. Chinese Science Bulletin, 2022, **67**(18): 2008-2017.
- [28] Meng Z, Dabdub D, Seinfeld J H. Chemical coupling between atmospheric ozone and particulate matter [J]. Science, 1997, **277**(5322): 116-119.
- [29] Lu K D, Fuchs H, Hofzumahaus A, *et al.* Fast photochemistry in wintertime haze: consequences for pollution mitigation strategies [J]. Environmental Science & Technology, 2019, **53**(18): 10676-

- 10684.
- [30] 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.
- [31] Shi Z H, Huang L, Li J Y, *et al.* Sensitivity analysis of the surface ozone and fine particulate matter to meteorological parameters in China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2020, **20**(21): 13455–13466.
- [32] Bian J C, Pan L L, Paulik L, *et al.* In situ water vapor and ozone measurements in Lhasa and Kunming during the Asian summer monsoon [J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, **39**(19), doi: 10.1029/2012GL052996.
- [33] Wang D F, Zhou B, Fu Q Y, *et al.* Intense secondary aerosol formation due to strong atmospheric photochemical reactions in summer: observations at a rural site in eastern Yangtze River Delta of China [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **571**: 1454–1466.
- [34] Fang C S, Qiu J X, Li J, *et al.* Analysis of the meteorological impact on PM_{2.5} pollution in Changchun based on KZ filter and WRF-CMAQ [J]. *Atmospheric Environment*, 2022, **271**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2021.118924.
- [35] 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.
- [36] 荆琦, 盛立芳, 张玮航, 等. 2018–2021年京津冀及周边地区“2+26”城市PM_{2.5}与O₃污染特征及气象影响[J]. *环境科学研究*, 2023, **36**(5): 875–886.
- Jing Q, Sheng L F, Zhang W H, *et al.* Characteristics of PM_{2.5} and O₃ pollution and related meteorological impacts in “2+26” cities of Beijing-Tianjin-Hebei and its surrounding areas from 2018 to 2021 [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2023, **36**(5): 875–886.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] 樊文雁, 蔡子颖, 姚青, 等. 区域输送对天津臭氧污染的影响[J]. *中国环境科学*, 2022, **42**(11): 4991–4999.
- Fan W Y, Cai Z Y, Yao Q, *et al.* Effect of regional transport on ozone pollution in Tianjin [J]. *China Environmental Science*, 2022, **42**(11): 4991–4999.
- [40] 黄小刚, 赵景波, 孙从建, 等. 汾渭平原PM_{2.5}空间分布的地形效应[J]. *环境科学*, 2021, **42**(10): 4582–4592.
- Huang X G, Zhao J B, Sun C J, *et al.* Orographic influences on the spatial distribution of PM_{2.5} on the Fen-Wei Plain [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(10): 4582–4592.
- [41] 徐丹妮, 王瑾婷, 袁自冰, 等. 汾渭平原复杂地形影响下冬季PM_{2.5}污染分布特征、来源及成因分析[J]. *环境科学学报*, 2021, **41**(4): 1184–1198.
- Xu D N, Wang J T, Yuan Z B, *et al.* Temporal-spatial variations, source apportionment, and formation mechanisms of PM_{2.5} pollution over Fenwei Plain, China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, **41**(4): 1184–1198.
- [42] 杨文涛, 黄慧坤, 魏东升, 等. 大气污染联合治理分区视角下的中国PM_{2.5}关联关系时空变异特征分析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(5): 2066–2074.
- Yang W T, Huang H K, Wei D S, *et al.* Spatio-temporal variation of PM_{2.5} related relationships in China from the perspective of air pollution regional linkage control and prevention [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(5): 2066–2074.
- [43] 王雁, 郭伟, 闫世明, 等. 太行山两侧污染物传输对横谷城市气溶胶的影响分析[J]. *环境科学*, 2021, **42**(9): 4104–4115.
- Wang Y, Guo W, Yan S M, *et al.* Influence of pollutant transport from both sides of the Taihang Mountains on cross-valley urban aerosols [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(9): 4104–4115.
- [44] 姚青, 杨旭, 唐颖潇, 等. 京津冀城市群冬季二次PM_{2.5}的时空分布特征[J]. *环境科学*, 2023, **44**(5): 2421–2429.
- Yao Q, Yang X, Tang Y X, *et al.* Spatio-temporal distribution characteristics of secondary aerosol in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration in winter [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(5): 2421–2429.
- [45] 齐鹏, 周颖, 程水源, 等. 城区与郊区PM_{2.5}污染及传输特征差异性[J]. *环境科学*, 2022, **43**(11): 5018–5029.
- Qi P, Zhou Y, Cheng S Y, *et al.* Difference in PM_{2.5} pollution and transport characteristics between urban and suburban areas [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(11): 5018–5029.
- [46] 赵安周, 相恺政, 刘宪锋, 等. 2000 ~ 2018年京津冀城市群PM_{2.5}时空演变及其与城市扩张的关联[J]. *环境科学*, 2022, **43**(5): 2274–2283.
- Zhao A Z, Xiang K Z, Liu X F, *et al.* Spatio-temporal evolution patterns of PM_{2.5} and relationship with urban expansion in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration from 2000 to 2018 [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(5): 2274–2283.

CONTENTS

Spatial Distribution Characteristics of PM _{2.5} and O ₃ in Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on Time Series Decomposition	YAO Qing, DING Jing, YANG Xu, <i>et al.</i>	(2487)
Ozone Sensitivity Analysis in Urban Beijing Based on Random Forest	ZHOU Hong, WANG Ming, CHAI Wen-xuan, <i>et al.</i>	(2497)
Prediction of Ozone Pollution in Sichuan Basin Based on Random Forest Model	YANG Xiao-tong, KANG Ping, WANG An-yi, <i>et al.</i>	(2507)
Establishment and Effective Evaluation of Haikou Ozone Concentration Statistical Prediction Model	FU Chuan-bo, LIN Jian-xing, TANG Jia-xiang, <i>et al.</i>	(2516)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Ozone Concentration and Health Benefit Assessment in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from 2015 to 2020	GAO Ran, LI Qin, CHE Fei, <i>et al.</i>	(2525)
Water-soluble Inorganic Ion Content of PM _{2.5} and Its Change Characteristics in Urban Area of Beijing in 2022	CHEN Yuan-yuan, CUI Di, ZHAO Ze-xi, <i>et al.</i>	(2537)
Pollution Characteristics, Source, and Health Risk Assessment of Metal Elements in PM _{2.5} Between Winter and Spring in Zhengzhou	TAO Jie, YAN Hui-jiao, XU Yi-fei, <i>et al.</i>	(2548)
Characteristics, Sources Apportionment, and Health Risks of PM _{2.5} -bound PAHs and Their Derivatives Before and After Heating in Zibo City	SUN Gang-li, WU Li-ping, XU Bo, <i>et al.</i>	(2558)
Components Characteristic and Source Apportionment of Fine Particulate Matter in Transition Period of Heating Season in Xi'an with High Time Resolution	LI Meng-jin, ZHANG Yong, ZHANG Qian, <i>et al.</i>	(2571)
Source and Cause Analysis of High Concentration of Inorganic Aerosol During Two Typical Pollution Processes in Winter over Tianjin	LU Miao-miao, HAN Su-qin, LIU Ke-xin, <i>et al.</i>	(2581)
Spatial-temporal Variation and Spatial Differentiation Geographic Detection of PM _{2.5} Concentration in the Shandong Province Based on Spatial Scale Effect	XU Yong, WEI Meng-xin, ZOU Bin, <i>et al.</i>	(2596)
Characteristics of VOCs Emissions and Ozone Formation Potential for Typical Chemicals Industry Sources in China	WU Ting, CUI Huan-wen, XIAO Xian-de, <i>et al.</i>	(2613)
Formation Potential of Secondary Organic Aerosols and Sources of Volatile Organic Compounds During an Air Pollution Episode in Autumn, Langfang	ZHANG Jing-qiao, LIU Zheng, DING Wen-wen, <i>et al.</i>	(2622)
Scale Effects of Landscape Pattern on Impacts of River Water Quality: A Meta-analysis	WANG Yu-cang, DU Jing-jing, ZHANG Yu, <i>et al.</i>	(2631)
Spectral Characteristics and Sources of Dissolved Organic Matter in Inflow Rivers of Baiyangdian Lake Water in Summer Flood Season	MENG Jia-jing, DOU Hong, CHEN Zhe, <i>et al.</i>	(2640)
Analysis on Hydrochemical Evolution of Shallow Groundwater East of Yongding River in Fengtai District, Beijing	HU Yu-xin, ZHOU Rui-jing, SONG Wei, <i>et al.</i>	(2651)
Hydrochemical Characteristics, Controlling Factors and Water Quality Evaluation of Shallow Groundwater in Tan-Lu Fault Zone (Anhui Section)	LIU Hai, WEI Wei, SONG Yang, <i>et al.</i>	(2665)
Effects of Pesticides Use on Pesticides Residues and Its Environmental Risk Assessment in Xingkai Lake (China)	WANG Wei-qing, XU Xiong, LIU Quan-zhen, <i>et al.</i>	(2678)
Characteristics of Microorganisms and Antibiotic Resistance Genes of the Riparian Soil in the Lanzhou Section of the Yellow River	WEI Cheng-chen, WEI Feng-yi, XIA Hui, <i>et al.</i>	(2686)
Analysis of the Spatiotemporal Distribution of Algal Blooms and Its Driving Factors in Chaohu Lake Based on Multi-source Datasets	JIN Xiao-long, DENG Xue-liang, DAI Rui, <i>et al.</i>	(2694)
Characteristics of Epiphytic Bacterial Community on Submerged Macrophytes in Water Environment Supplemented with Reclaimed Water	HE Yun, LI Xue-mei, LI Hong-quan, <i>et al.</i>	(2707)
Effects of Water Level Fluctuations and Vegetation Restoration on Soil Prokaryotic Microbial Community Structure in the Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir	MEI Yu, HUANG Ping, WANG Peng, <i>et al.</i>	(2715)
Bacterial Community Structure of Typical Lake Sediments in Yinchuan City and Its Response to Heavy Metals	MENG Jun-jie, LIU Shuang-yu, QIU Xiao-cong, <i>et al.</i>	(2727)
Effect of Thermal Hydrolysis Pretreatment Time on Microbial Community Structure in Sludge Anaerobic Digestion System	ZHANG Han, ZHANG Han, WANG Jia-wei, <i>et al.</i>	(2741)
Source Apportionment of Morphine in Wastewater	SHAO Xue-ting, ZHAO Yue-tong, JIANG Bing, <i>et al.</i>	(2748)
Ecological Environment Dynamical Evaluation of Hutuo River Basin Using Remote Sensing	LI Yan-cui, YUAN Jin-guo, LIU Bo-han, <i>et al.</i>	(2757)
Spatiotemporal Evolution and Influencing Factors of Ecosystem Service Value in the Yellow River Basin	WANG Yi-qi, SUN Xue-ying	(2767)
Ecosystem Service Trade-off Synergy Strength and Spatial Pattern Optimization Based on Bayesian Network: A Case Study of the Fenhe River Basin	CAI Jin, WEI Xiao-jian, JIANG Ping, <i>et al.</i>	(2780)
Spatial-temporal Evolution and Quantitative Attribution of Habitat Quality in Typical Karst Counties of Guizhou Plateau	LI Yue, FENG Xia, WU Lu-hua, <i>et al.</i>	(2793)
Spatio-temporal Variation in NEP in Ecological Zoning on the Loess Plateau and Its Driving Factors from 2000 to 2021	ZHOU Yi-ting, YAN Jun-xia, LIU Ju, <i>et al.</i>	(2806)
Land Change Simulation and Grassland Carbon Storage in the Loess Plateau Based on SSP-RCP Scenarios	CUI Xie, DONG Yan, ZHANG Lu-yin, <i>et al.</i>	(2817)
Multi-scenario Simulation of Construction Land Expansion and Its Impact on Ecosystem Carbon Storage in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration	WU Ai-bin, CHEN Fu-guo, ZHAO Yan-xia, <i>et al.</i>	(2828)
Effects of Land Use Change on Soil Aggregate Stability and Soil Aggregate Organic Carbon in Karst Area of Southwest China	JIANG Ke, JIA Ya-nan, YANG Yan, <i>et al.</i>	(2840)
Integrated Analysis of Soil Organic Matter Molecular Composition Changes Under Different Land Uses	HUANG Shi-wei, ZHAO Yi-kai, ZHU Xin-yu, <i>et al.</i>	(2848)
Prediction Spatial Distribution of Soil Organic Matter Based on Improved BP Neural Network with Optimized Sparrow Search Algorithm	HU Zhi-rui, ZHAO Wan-fu, SONG Yin-xian, <i>et al.</i>	(2859)
Effects of Application of Different Organic Materials on Phosphorus Accumulation and Transformation in Vegetable Fields	SUN Kai, CUI Yu-tao, LI Shun-jin, <i>et al.</i>	(2871)
Intensive Citrus Cultivation Suppresses Soil Phosphorus Cycling Microbial Activity	ZHOU Lian-hao, ZENG Quan-chao, MEI Tang-ying-ze, <i>et al.</i>	(2881)
Effects of Controlled-release Blended Fertilizer on Crop Yield and Greenhouse Gas Emissions in Wheat-maize Rotation System	GAO Wei, WANG Xue-xia, XIE Jian-zhi, <i>et al.</i>	(2891)
Effect of Biochar on NO ₃ ⁻ -N Transport in Loessial Soil and Its Simulation	BAI Yi-ru, LIU Xu, ZHANG Yu-han, <i>et al.</i>	(2905)
Analysis and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Farmland Soil in China: A Meta-analysis	YANG Li, BAI Zong-xu, BO Wen-hao, <i>et al.</i>	(2913)
Critical Review on Heavy Metal Contamination in Urban Soil and Surface Dust	WANG Xiao-yu, LIU En-feng, YANG Xiang-meng, <i>et al.</i>	(2926)
Research Progress on Solidification and MICP Remediation of Soils in Heavy Metal Contaminated Site	CHEN Yue-ru, GAO Wen-yan, CHEN Hong-ren, <i>et al.</i>	(2939)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Soil Heavy Metal in Coal Mine Area near the Yellow River in Shandong	DAI Wen-ting, ZHANG Hui, WU Xia, <i>et al.</i>	(2952)
Heavy Metal Content and Risk Assessment of Sediments and Soils in the Juma River Basin	HAN Shuang-bao, YUAN Lei, ZHANG Qiu-xia, <i>et al.</i>	(2962)
Characteristics, Ecological Risk Assessment, and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in the Yellow River Floodplain of Yinchuan City	YU Lu-jia, MA Hai-jun, WANG Cui-ping	(2971)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soils of a City in Guangdong Province Based on Source Oriented and Monte Carlo Models	CHEN Lian, ZOU Zi-hang, ZHANG Pei-zhen, <i>et al.</i>	(2983)
Chemical Speciation, Influencing Factors, and Regression Model of Heavy Metals in Farmland of Typical Carbonate Area with High Geological Background, Southwest China	TANG Rui-ling, XU Jin-li, LIU Bin, <i>et al.</i>	(2995)
Hg Content Characteristics and Safe Planting Zoning of Paddy Soil and Rice in Guizhou Province	WEI Mei-liu, ZHOU Lang, HUANG Yan-ling, <i>et al.</i>	(3005)
Cadmium Phytoremediation Effect of Sweet Sorghum Assisted with Citric Acid on Typical Parent Soil in Southern China	LIU Meng-yu, LUO Xu-feng, GU Jiao-feng, <i>et al.</i>	(3016)
Effects of Modified Distillers' Grains Biochar on Cadmium Forms in Purple Soil and Cadmium Uptake by Rice	XIAO Nai-chuan, WANG Zi-fang, YANG Wen-na, <i>et al.</i>	(3027)
Effects of Biochar on Growth and Pollutant Accumulation of Lettuce in Soil Co-contaminated with Tetracycline and Copper	ZHENG Chen-ge, PEI Huan-huan, ZHANG Ya-shan, <i>et al.</i>	(3037)
Effects of Vermicomposting on Compost Quality and Heavy Metals: A Meta-analysis	JIANG Ji-shao, HOU Rui, CUI Hui-lin, <i>et al.</i>	(3047)
Advances in the Effects of Microplastics on Soil N ₂ O Emissions and Nitrogen Transformation	LIU Yi-ge, YANG An-qi, CHEN Shu-xin, <i>et al.</i>	(3059)
Effects of Land Use Patterns on Soil Microplastic Pollution in the Luoshijiang Sub-watershed of Erhai Lake Basin	DAI Liu-yun, HOU Lei, WANG Hua, <i>et al.</i>	(3069)
Characteristics of Microplastic Pollution in Sediment of Silty Coast in Culture Bay	SONG Ke-xin, HE Jin-cheng, LI Chang-wen, <i>et al.</i>	(3078)
Effect of Polyethylene Microplastics on the Microbial Community of Saline Soils	WANG Zhi-chao, LI Zhe, LI Jia-chen, <i>et al.</i>	(3088)
Characterization of Microplastic Surface Bacterial Community Structure and Prediction of Ecological Risk in Poyang Lake, China	YU Jin-li, ZHAO Jun-kai, LUO Si-qi, <i>et al.</i>	(3098)
Energy-saving and Emission Reduction Path for Road Traffic in Key Coastal Cities of Guangdong, Fujian and Zhejiang	XU Yi-nuo, WENG Da-wei, WANG Shuo, <i>et al.</i>	(3107)
Life Cycle Carbon Reduction Benefits of Electric Heavy-duty Truck to Replace Diesel Heavy-duty Truck	XU Yuan-yuan, GONG De-hong, HUANG Zheng-guang, <i>et al.</i>	(3119)