

北京城区PM_{2.5}各组分污染特征及来源分析

安欣欣, 曹阳, 王琴, 富佳明, 王陈婧, 景宽, 刘保献

PM_{2.5} 化学组成

SO₄²⁻ NH₄⁺ NO₃⁻
元素碳 Cl⁻ 有机物 地壳元素

源解析

二次
颗粒物

机动车

扬尘

工业

燃煤

生物质
燃烧



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年5月

第43卷 第5期
Vol.43 No.5

目次

北京城区 PM _{2.5} 各组分污染特征及来源分析	安欣欣, 曹阳, 王琴, 富佳明, 王陈婧, 景宽, 刘保献 (2251)
基于时空混合效应模型的京津冀 PM _{2.5} 浓度变化模拟	范丽行, 杨晓辉, 宋春杰, 李梦诗, 段继福, 王卫, 李夫星, 李伟妙 (2262)
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	赵安周, 相恺政, 刘宪锋, 张向蕊 (2274)
海-陆大气交汇作用下青岛冬季大气 PM _{2.5} 污染特征与来源解析	虞雄, 杨凌霄, 张婉, 齐安安, 王滢铭, 王鹏程, 黄琦, 赵彤, 张雄飞, 徐鹏, 张天琪, 王文兴 (2284)
硫酸盐非均相机制对颗粒物污染的影响: 上海典型污染事件的 WRF-Chem 模拟	张茹涵, 张皓然, 冯伟航, 汤克勤, 马亚平, 王红丽, 黄成, 胡建林, 张宏亮, 李楠 (2294)
省会城市不同功能区大气 PM _{2.5} 化学组分季节变化及来源分析	孙友敏, 范晶, 徐标, 李彦, 韩红, 张桂芹 (2304)
太原市冬季不同污染程度下 PM _{2.5} 的化学组成、消光特征及氧化潜势	任娇, 赵荣荣, 王铭, 张欢欢, 尹诗杰, 薛永刚 (2317)
郑州市冬季大气 PM _{2.5} 金属元素来源及健康风险评价	姚森, 王乾恒, 薛妍, 史来文, 张俊美, 杨书申 (2329)
淄博市冬季 PM _{2.5} 载体金属元素污染特征、生态风险评价及来源分析	白雯宇, 徐勃, 郭丽瑶, 殷宝辉, 马银红, 李丽明, 杨文, 赵雪艳 (2336)
承德市 PM _{2.5} 中多环芳烃的季节分布特征、来源解析及健康风险评价	贺博文, 聂赛赛, 李仪琳, 郭睿瑶, 姚波, 崔建升, 冯亚平, 王帅, 侯晓松 (2343)
珠三角大气中二噁英污染水平与区域迁移	付建平, 谢丹平, 黄锦琼, 杨艳艳, 冯桂贤, 周长风, 廖海婷, 青亮, 张漫雯, 吴明亮, 张素坤 (2355)
华北平原南部农村地区黑碳气溶胶浓度及来源	张玲, 孔少飞, 郑煌, 胡尧, 曾昕, 程溢, 祁士华 (2363)
基于模式过程分析技术天津地区 PM _{2.5} 污染气象成因分析	郝团, 蔡子颖, 韩素芹, 杨旭, 樊文雁, 姚青, 邱晓滨 (2373)
基于排放量和大气反应活性的 VOCs 污染源分级控制	陈鹏, 张月, 邢敏, 李珊珊 (2383)
基于复杂网络的中国臭氧拓扑特征	菅娜, 陈建华, 李冬, 王迪, 薛志钢 (2395)
基于前体物多情景排放的兰州市 2030 年夏季臭氧预测	陈天雷, 吴敏, 潘成珂, 常莉敏, 李洪, 刘鹏, 高宏, 黄韬, 马建民 (2403)
基于源反演和气溶胶同化方法天津空气质量模式预报能力改进	蔡子颖, 唐邈, 肖致美, 杨旭, 朱玉强, 韩素芹, 徐虹, 邱晓滨 (2415)
基于空气质量监测数据的钢铁行业污染源识别方法	石耀耀, 胡京南, 褚咏昕, 段青春, 胡丙鑫, 殷丽娜, 吕玲玲 (2427)
重污染天气应对“绩效分级、差异化管控”措施首次实践效果后评估	曾景海, 王灿 (2436)
黄河流域水污染风险分区	周夏飞, 曹国志, 於方, 杨威杉, 徐泽升 (2448)
黄河流域甘肃段工业行业水污染物空间排放特征	李雪迎, 杨曦, 乔琦, 刘丹丹, 张玥, 赵若楠, 白璐 (2459)
黄河沉积物重金属时空分布与污染评价	王韬轶, 潘保柱, 韩语, 王雨竹, 李晨辉, 杜蕾 (2467)
APCS-MLR 结合 PMF 模型解析厦门杏林湾近郊流域沉积物金属来源	沈宸宇, 闫钰, 于瑞莲, 胡恭任, 崔建勇, 颜妍, 黄华斌 (2476)
河流底泥 DOM、营养盐与重金属空间分异特征及响应关系	肖艳春, 于会彬, 宋永会 (2489)
太原市汾河河岸带土壤重金属分布特征、评价与来源解析	胡杰, 赵心语, 王婷婷, 苟奎贤, 王春玲 (2500)
洪泽湖溶解态有机质与重金属汞的结合特性	胡斌, 王沛芳, 张楠楠, 包天力, 金秋彤 (2510)
富营养化驱动下西凉湖百年生态演化轨迹	郑佳楠, 徐敏, 郑文秀, 朱可欣, 王荣, 张恩楼 (2518)
基于 DGT 技术的黄河上游典型水库沉积物氮磷释放与污染源解析	马玉坤, 朱翔, 庞晴晴, 孔明, 韩天伦, 彭福全, 谢磊, 汪龙眠, 徐斌, 何斐 (2527)
暴雨前后河南北部河流水质分异特征及其污染源解析	张彦, 邹磊, 梁志杰, 姜明, 李平, 黄仲冬, 齐学斌 (2537)
鄱阳湖流域水葫芦 (<i>Eichhornia crassipes</i>) 对水体微塑料的吸附截留效应	李文刚, 吴希恩, 简敏菲, 刘淑丽, 刘海球, 丁惠君 (2548)
太湖塑料添加剂时空分布和生态风险评价	刘舒娇, 丁剑楠, 石波哲, 张军毅, 庄严, 邹华 (2557)
骆马湖表层沉积物微塑料的分布、来源及储量	姚明轩, 白雪, 徐振佳, 李凤杰, 陆滢, 李畅, 华祖林 (2566)
太湖不同介质中磷的污染特征及其治理启示	蔡梅, 陆志华, 王元元, 钱旭 (2575)
辽河四平段流域河流沉积物微生物群落多样性和结构分析	李鹏洋, 安启睿, 王新皓, 孙思宇, 李青乾, 郑娜 (2586)
面源污染诱导嘉陵江沉积物中细菌群落结构与功能异变	薛玉琴, 徐飞, 刘坤和, 王佳颖, 竹兰萍, 朱志豪, 张拓 (2595)
微塑料对沉积物细菌群落组成和多样性的影响	李汶璐, 王志超, 杨文煊, 张博文, 李卫平 (2606)
白洋淀冬季沉积物好氧反硝化菌垂直分布特征及群落构建	张甜娜, 陈召莹, 张紫薇, 周石磊, 孟佳靖, 陈哲, 张一凡, 董宛佳, 崔建升 (2614)
人工诱导水库分层水体提前混合对细菌群落结构和代谢活性的影响	高悦, 黄廷林, 李楠, 齐允之, 司凡, 杨斌 (2624)
鄱阳湖典型区铜锈环螺体内微塑料分布特征	江为群, 胡启武, 简敏菲, 邹龙, 刘淑丽 (2633)
负载多壁碳纳米管的多孔 Ti/SnO ₂ -Sb-Ni 电极电催化氧化双酚 A	符远航, 刘安迪, 黄伟斌, 唐彬彬, 张进忠 (2640)
磁性 Mn _{0.6} Zn _{0.4} Fe ₂ O ₄ 催化 H ₂ O ₂ 降解亚甲基蓝效能及机制	徐冬莹, 余静, 郝旗, 杨迎春, 方淑红 (2650)
两种纳米颗粒对沸石吸附环丙沙星的影响	蒋兰翠, 孟昭福, 刘贤, 刘欣, 王新欣, 曹雪雯 (2662)
AMD 污泥复合材料吸附 As(V) 的机制及其影响因素	张亚辉, 张瑞雪, 吴攀, 陈世万, 杨艳, 安丽, 傅渝然, 张子豪 (2673)
三氯生及其降解中间产物对活性污泥中微生物群落变化和硝化反硝化功能基因的影响	卢英源, 董小琦, 彭星星, 贾晓珊 (2685)
污染场地风险管控可持续评价指标体系构建及关键影响因素分析	李笑诺, 易诗懿, 陈卫平 (2699)
基于生态功能的滨海湿地土壤质量综合评价方法构建及实证分析	张雪, 孔范龙, 姜志翔 (2709)
铜山矿区周边农田土壤重金属来源解析及污染评价	陈航, 王颖, 王澍 (2719)
典型铁、锰矿物对稻田土壤砷形态与酶活性的影响	周一敏, 黄雅媛, 刘凯, 赵儒乐, 李冰玉, 雷鸣 (2732)
两种油菜施肥水溶性壳聚糖修复典型铅污染农田土壤	孟晓飞, 郑国砥, 陈同斌, 杨俊兴, 郭俊梅, 刘杰 (2741)
基于贝叶斯理论的小麦籽粒镉铅超标风险预测	王天齐, 李艳玲, 杨阳, 牛硕, 王美娥, 陈卫平 (2751)
紫色土旱坡地油菜/玉米轮作下氮流失的年度变化特征	徐曼, 高明, 余添, 朱浩宇, 邓华, 王子芳 (2758)
不同原料生物炭的理化特性及其作炭基肥缓释载体的潜力评价	邢莉彬, 成洁, 耿增超, 张宏伟, 梁宏旭, 王强, 孙倩倩, 李艳 (2770)
木醋液酸化生物炭与氮素配施对盐渍土壤活性氮及氨挥发的影响	申书伟, 张丹丹, 王敏鸽, 王旭东 (2779)
生物可降解地膜覆盖对关中地区小麦-玉米农田温室气体排放的影响	郭怡婷, 罗晓琦, 王锐, 陈海心, 冯浩 (2788)
戴云山南坡不同海拔森林土壤微生物群落结构特征和影响因素	何中声, 王紫薇, 朱静, 陈佳嘉, 谷新光, 江蓝, 陈博, 吴则焰, 刘金福, 陈文伟 (2802)
模拟增温和降雨增加对撂荒草地土壤胞外酶活性及计量特征的影响	王兴, 钟泽坤, 简俊楠, 张硕宏, 杨改河, 任成杰, 冯永忠, 任广鑫, 王晓娇, 韩新辉 (2812)
中国主要城市的城市化对局地增温的贡献	李宇, 周德成, 闫章美, 张良侠 (2822)
《环境科学》征订启事 (2293)	
《环境科学》征稿简则 (2426)	
信息 (2585, 2672, 2708)	

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

赵安周^{1,2}, 相恺政¹, 刘宪锋³, 张向蕊¹

(1. 河北工程大学矿业与测绘工程学院, 邯郸 056038; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101; 3. 陕西师范大学地理科学与旅游学院, 西安 710119)

摘要: 京津冀城市群是中国三大城市群之一, 其城市化进程对大气污染造成了严重的影响。基于土地利用、站点实测和遥感反演的 $PM_{2.5}$ 浓度数据集, 辅以趋势分析和分段线性回归等方法, 分析了 2000 ~ 2018 年京津冀城市群 $PM_{2.5}$ 浓度的时空演变格局及其与城市扩张的关联。结果表明: ① 2000 ~ 2018 年京津冀城市群 $PM_{2.5}$ 浓度变化呈明显的阶段特征, 2000 ~ 2013 年 $PM_{2.5}$ 浓度呈显著增加的趋势 [$\text{slope} = 1.5980 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{a})^{-1}$, $P < 0.001$], 其中 69.97% 的区域呈显著增加趋势 ($P < 0.05$); 2013 ~ 2018 年 $PM_{2.5}$ 浓度呈显著减小的趋势 [$\text{slope} = -4.9908 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{a})^{-1}$, $P < 0.001$], 其中 85.81% 的区域呈显著减小的趋势 ($P < 0.05$); ② $PM_{2.5}$ 浓度整体呈从东南向西北递减的趋势, 高污染区 [$\rho(PM_{2.5}) > 70 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$] 主要集中在河北省的中南部地区。从不同的区域来看, 老城区 ($74.71 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) > 城市区域 ($72.72 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) > 新扩张城区 ($70.35 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) > 非城市区域 ($45.49 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$); ③ 京津冀城市群 13 个城市 $PM_{2.5}$ 浓度随城市发展强度 (UI) 的增加均呈显著增加的趋势 ($P < 0.05$)。从老城区和新扩张城区对比来看, 2000 年和 2018 年老城区的 $PM_{2.5}$ 浓度高于新扩张城。结果可为京津冀大气污染治理提供科学依据。

关键词: $PM_{2.5}$; 时空演变; 城市发展强度; 城镇用地; 京津冀城市群

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)05-2274-10 DOI: 10.13227/j.hjlx.202109226

Spatio-temporal Evolution Patterns of $PM_{2.5}$ and Relationship with Urban Expansion in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration from 2000 to 2018

ZHAO An-zhou^{1,2}, XIANG Kai-zheng¹, LIU Xian-feng³, ZHANG Xiang-rui¹

(1. School of Mining and Geomatics, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China; 2. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China)

Abstract: The Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration is one of the most important urban agglomerations in China, and the urbanization process has had a serious impact on air pollution. Exploring the relationship between urban expansion and fine particulate matter ($PM_{2.5}$) is crucial for air pollution prevention policy formulation and the health of urban residents. Land use, $PM_{2.5}$ data from ground-based monitoring, and remote sensing inversion from 2000 to 2018 were utilized to evaluate the spatio-temporal patterns of $PM_{2.5}$ concentrations and their relationships with urban expansion by trend analysis, the Mann Kendall nonparametric test, and a piecewise regression model. The results showed that: ① In general, two distinct periods existed with opposite trends; the positive trend [$\text{slope} = 1.5980 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{a})^{-1}$, $P < 0.001$] over 2000-2013 and the negative trend [$\text{slope} = -4.9908 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{a})^{-1}$, $P < 0.001$] over 2013-2018 were noteworthy in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration. From 2000 to 2013, Mann-Kendall nonparametric test results showed that $PM_{2.5}$ concentrations in 69.97% of the area increased significantly ($P < 0.05$). However, $PM_{2.5}$ concentrations in 85.81% of the area decreased significantly during 2013-2018. ② In terms of spatial variation, $PM_{2.5}$ was strikingly uneven and had a decreasing trend from southeast to northwest in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration, with a higher concentration ($PM_{2.5} > 70 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) in central and southern Hebei Province. The $PM_{2.5}$ concentrations of the urban, old urban, new urban, and non-urban areas from 2000 to 2018 demonstrated the following order: old urban ($74.71 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) > urban ($72.72 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) > new urban ($70.35 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) > non-urban ($45.49 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$). Human activities in old urban areas had a more significant impact on air pollution. ③ $PM_{2.5}$ concentrations in 2000 and 2018 increased significantly ($P < 0.05$), with elevating urban intensity (UI) for all the cities in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration. Comparing the old and new urban areas, $PM_{2.5}$ concentrations in old urban areas were significantly higher than those in new urban areas in 2000 and 2018. These results can offer scientific basis for air pollution control in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration.

Key words: $PM_{2.5}$; spatio-temporal patterns; urban intensity; urban land; Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration

$PM_{2.5}$ (fine particulate matter) 是指近地表空气中粒径 $\leq 2.5 \mu\text{m}$ 的颗粒, 相比于其他污染物 (NO_x 和 SO_x), 它可以长期悬浮在空气中, 不但会降低大气的能见度, 还会增加人类呼吸系统疾病的发病率, 严重影响人体健康^[1~4]。自 1978 年以来, 中国城市化水平迅速提高, 2018 年其城市化率已达到 59.58%, 预计到 2030 年将达到 65%^[3,5]。城市化的快速发展一方面提高了人们的生活水平, 同时也产

生了以 $PM_{2.5}$ 为主要污染物的城市大气环境污染问题^[6~9]。据统计, 2000 ~ 2017 年期间, 中国因 $PM_{2.5}$ 污染致死的人数增加了 36.10%^[10], 因此开展 $PM_{2.5}$

收稿日期: 2021-09-26; 修订日期: 2021-10-21

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42171212); 教育部人文社会科学青年项目 (18YJCZH257); 资源与环境信息系统国家重点实验室开放基金项目

作者简介: 赵安周 (1985 ~), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为城市扩张对生态环境的影响, E-mail: zhaanzhou@126.com

时空演变及其与城市化的关系的研究对城市环境的保护及居民健康具有重要的意义。

目前已有诸多研究针对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的时空演变及其与城市化的关联进行了分析^[11~13]。传统的研究主要采用站点实测数据来分析不同时间尺度的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度时空演变及影响因素^[14~16], 该方法结果准确, 但易受监测站点空间分布不均和迁站导致的数据时间一致性较差等问题, 尽管全国 338 个地级以上城市的 $\text{PM}_{2.5}$ 监测站点数目在 2016 年已经达到 1436 个, 但仍存在站点监测时间序列较短和空间连续性较差等问题^[17,18]。相比于站点监测, 卫星遥感数据由于其时空连续性好而被广泛应用在 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的反演及时空演变格局分析中^[19]。该方法主要是采用遥感反演的气溶胶光学厚度 (aerosol optical depth, AOD) 与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度之间构建定量模型来获取全球或区域的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度数据, 进而分析其时空演变及其与城市化的关联^[3]。如 Hammer 等^[20] 的研究利用遥感和地面监测数据等估算了全球 1998~2018 年 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化, 认为全球呈上升的趋势, 但在北美和欧洲等城市化水平高的地区呈下降趋势; Wu 等^[21] 的研究基于遥感和统计数据, 构建了中国地区城市化与站点实测的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度数据之间的环境库兹涅茨曲线框架, 认为经济城市化是影响 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的主要因素; Han 等^[6] 的研究分析了中国城市化对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的影响, 认为城市人口和第二产业等要素与城市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度显著相关; 王桂林等^[22] 的研究分析了 2000~2015 期间中国城市扩张对 $\text{PM}_{2.5}$ 的影响, 认为 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化与夜间灯光指数关联性最强。在京津冀城市群, 刘海猛等^[23] 的研究利用多种模型分析了 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度时空分异特征; 王桂林等^[24] 的研究分析了不透水表面和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度之间的关系, 认为不透水表面的扩张会加剧 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的聚集。综上, 国内外学者针对 $\text{PM}_{2.5}$ 时空演变及其与不同空间尺度城市化 (全球、区域、城市群和城市) 的关联进行了分析^[25~27], 但是缺乏分析不同城市区域 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度时空演变格局的研究, 从城乡梯度视角下分析 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度随城市发展强度变化的研究相对较少。

京津冀城市群是中国重要的经济核心区, 同时也是中国 $\text{PM}_{2.5}$ 污染最为严重的区域之一, 其 $\text{PM}_{2.5}$ 污染问题已成为政府和学术界普遍关注的焦点^[23]。鉴于此, 本文以京津冀城市群 13 个城市为研究对象, 首先利用已有的监测站点验证遥感反演的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度栅格数据, 分析其时空分异格局; 其次利用

2000 年和 2018 年土地利用数据构建该城市群的城市发展强度 (urban intensity, UI) 指数; 在此基础上, 探讨不同城市区域 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度值随 UI 的演变规律和差异, 以期京津冀城市群大气污染防治政策的制定提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

京津冀城市群 ($36^{\circ}05' \sim 42^{\circ}37' \text{N}$ 、 $113^{\circ}27' \sim 119^{\circ}50' \text{E}$) 地处华北平原北部, 总面积约 $2.16 \times 10^5 \text{ km}^2$, 2018 年常住人口约 11 270.1 万人, GDP 总量 85 139.9 亿元。该地区包括北京、天津两个直辖市和河北省的 11 个地市, 是中国三大城市群之一 (图 1)^[28,29]。气候类型属于温带季风气候, 夏季炎热多雨, 冬季寒冷干燥, 多年平均降水约 400~800 mm, 平均气温 12.3°C ^[30,31]。随着城市化进程的加快, 不透水表面面积迅速增加, 造成该地区环境污染问题日益突出, 以 $\text{PM}_{2.5}$ 污染为主的大气污染已成为中国污染最为严重的区域之一^[23]。

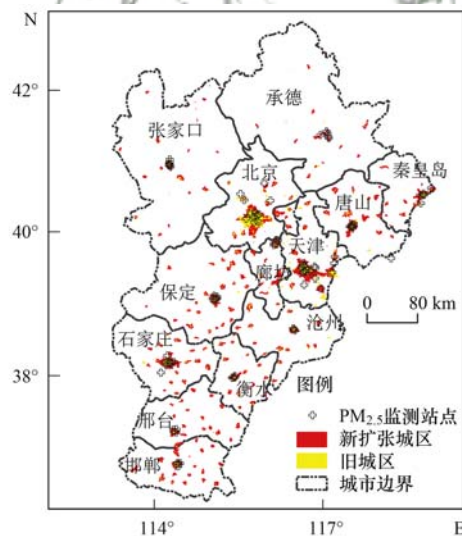


图 1 京津冀老城区、新扩张城区及 $\text{PM}_{2.5}$ 监测站点空间分布

Fig. 1 Spatial patterns of old urban areas, new urban areas, and $\text{PM}_{2.5}$ verification points in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration

1.2 数据来源

遥感反演的 $\text{PM}_{2.5}$ 栅格数据来源于华盛顿大学大气成分分析组 (<http://sites.wustl.edu/acag>), 该数据是基于多传感器获取的 AOD 产品, 利用化学传输和地理加权回归模型综合估算得到, 时间跨度为 2000~2018 年, 空间分辨率约 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$, 中国地区的产品编号为 V4. CH. 03, 该数据产品有效解决了中国高污染地区的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度低估问题, 具有较高的精度, 已被广泛应用在全球及区域的研究中^[20,32,33]。2013~2018 年京津冀城市群地面监测

PM_{2.5}浓度年数据来源于环境专业知识服务系统 (<http://envi.ckceest.cn/environment>).

2000年和2018年的土地利用类型数据来源于资源环境与科学数据中心 (<https://www.resdc.cn/>), 该数据是以 Landsat 遥感影像数据为主要信息源, 通过机器解译和目视解译的方法获取, 其一级分类包含耕地、林地、草地、水域、城乡建设用地和未利用地 6 大类, 二级分类包含城镇用地等 26 类. 空间分辨率为 30 m, 总体分类精度达到 90% 以上^[34,35].

1.3 研究方法

1.3.1 趋势分析

采用 Theil-Sen Median 趋势分析模拟 2000 ~ 2018 年研究区每个像元的 PM_{2.5} 浓度变化趋势, 该方法对离群数据和测量误差不敏感, 是一种稳健的非参数统计法, 可以综合反映 PM_{2.5} 浓度的长时间变化趋势, 具体计算方法如下^[36,37]:

$$\beta = \text{Median} \left(\frac{x_j - x_i}{j - i} \right) \quad \forall j > i \quad (1)$$

式中, β 为 PM_{2.5} 浓度的变化趋势; i 和 j 为时间序列数据, x_i 和 x_j 分别为第 i 年和第 j 年的 PM_{2.5} 浓度值. 当 $\beta > 0$ 时, 表示 PM_{2.5} 浓度呈增加的趋势; 当 $\beta < 0$ 时, 表示 PM_{2.5} 浓度呈减小的趋势; 当 $\beta = 0$ 时, 表示 PM_{2.5} 浓度无变化. 同时采用 Mann-Kendall 非参数检验进一步验证其变化趋势的显著性^[38].

1.3.2 分段线性回归

采用分段线性回归模型提取 2000 ~ 2018 年 PM_{2.5} 浓度变化的转折点, 其具体计算公式如下^[5]:

$$y = \begin{cases} \beta_0 + \beta_1 t + e_i, & t \leq \alpha, \\ \beta_0 + (\beta_1 + \beta_2)t - \beta_2 \alpha + e_i, & t > \alpha. \end{cases} \quad (2)$$

式中, y 为 PM_{2.5} 浓度值; t 表示年份; α 为提取出的 PM_{2.5} 浓度发生转折的时间; e_i 和 β_0 分别表示残差和截距; β_1 和 $\beta_1 + \beta_2$ 分别表示转折点前后的斜率; β_2 为斜率前后的差异. 定义 $P < 0.05$ 为显著变化.

1.3.3 城市区域的提取及 UI 计算

考虑到不透水表面可以直接反映城市化进程且易于利用遥感技术进行提取, 本文利用土地利用类型中的城镇用地数据来反映城市化进程^[5,24]. 首先将 2000 年和 2018 年土地利用类型数据中的城镇用地转为矢量数据, 定义 2000 年和 2018 年的城镇用地数据分别为老城区和城市区域, 2000 ~ 2018 年扩张的区域定为新扩张城区, 2018 年城镇用地数据以外的区域为非城市区域^[39]. 同时本文计算了 2000 年和 2018 年的 UI, 进一步分析 PM_{2.5} 浓度随不同等级 UI 的变化, 其具体计算公式如下^[40]:

$$UI_i = (UA_i / TA_i) \times 100\% \quad (3)$$

式中, UI_i 为 i 年城市发展强度, 可以综合反映人类活动强度; UA_i 和 TA_i 分别是指第 i 年区域 33×33 像元 ($990 \text{ m} \times 990 \text{ m}$) 范围内城镇用地面积和区域总面积. 为保持与 PM_{2.5} 栅格数据的空间分辨率一致, 利用 3 次卷积内插方法将 UI 的像元重采样为 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$. 同时将所计算的 UI 值以 1% 为间隔进行划分, 进一步分析 2000 年和 2018 年 PM_{2.5} 浓度随连续 UI 的变化趋势.

2 结果与分析

2.1 PM_{2.5} 栅格数据验证

图 2 显示了 2013 ~ 2018 年京津冀城市群站点

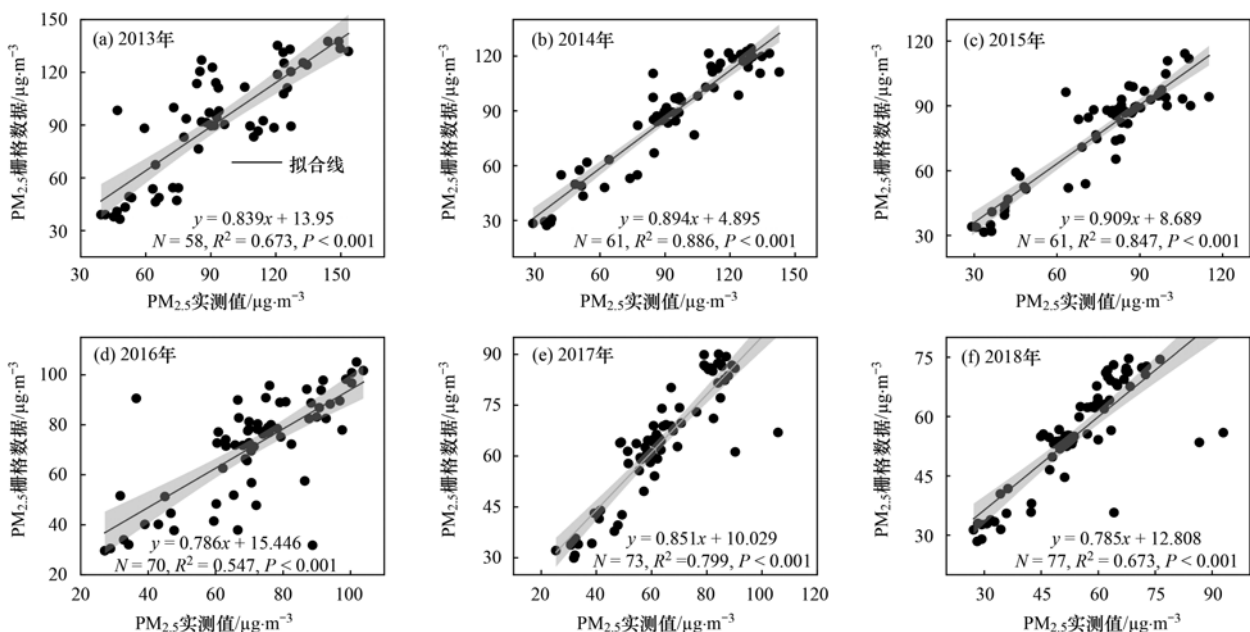


图 2 2013 ~ 2018 年京津冀城市群站点实测 PM_{2.5} 年数据与遥感反演栅格数据拟合散点图

Fig. 2 Fit scatter plots of PM_{2.5} observed values and remote sensing inversion data from 2003 to 2018

实测 $\text{PM}_{2.5}$ 年均值与遥感反演栅格数据拟合的散点图. 可以看出, 拟合的 R^2 值均大于 0.50, 最大值出现在 2014 年 ($R^2 = 0.886$), 最小值出现在 2016 年 ($R^2 = 0.547$), 二者的相关性在所有年份均通过了 0.001 置信水平检验, 表明该遥感反演的栅格数据可以准确呈现京津冀城市群 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的空间分布情况.

2.2 $\text{PM}_{2.5}$ 时空演变特征

2.2.1 $\text{PM}_{2.5}$ 总体变化特征

2000~2018 年京津冀城市群 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度呈不显著增加的趋势 ($\text{slope} = 0.4550 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $P = 0.186$). 分段线性回归结果显示该城市群 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化可以分为两个阶段: ① 2000~2013 年 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度呈显著增加的趋势, 由 2000 年的 $26.92 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 增至 2013 年的 $60.49 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 增速为 $1.5980 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{a})^{-1}$ ($P < 0.001$); ② 2013~2018 年 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化区域与前一阶段相反, 呈显著下降的趋势, 由 2013 年的 $60.49 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 下降至 2018 年的 $35.65 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 其下降速率为 $-4.9908 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{a})^{-1}$ ($P < 0.001$, 图 3). 以上分析结果表明, 2000~2018 年京津冀城市群 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度不同阶段呈现相反的变化态势, 究其原因主要是由于京津冀城市群产业结构的调整和一系列环保政策的实施等^[41,42].

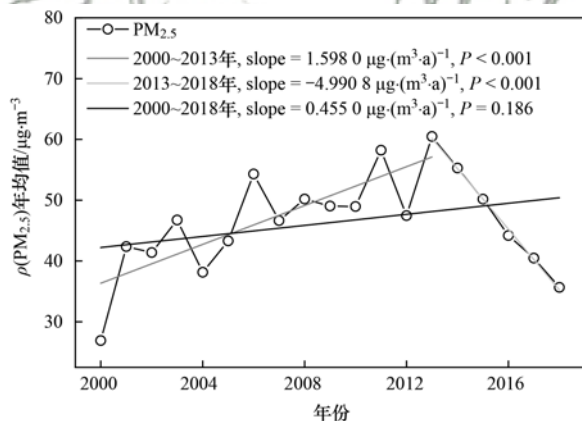


图 3 2000~2018 京津冀城市群 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度年际变化

Fig. 3 Temporal change trend of $\text{PM}_{2.5}$ concentration in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration from 2000 to 2018

为进一步分析不同等级 $\text{PM}_{2.5}$ 的时间演变趋势, 依据中国《环境空气质量标准》(GB 3095-2012) 将京津冀城市群 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度划分为 7 个区间, 2000~2018 年各区间栅格的面积占比如图 4 所示. $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 年均值在 $0 \sim 15 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $16 \sim 25 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 面积比例呈波动变化的趋势, 最大值分别出现在 2000 年 (37.40%) 和 2009 年 (16.54%), 最小值分别出现在 2011 年 (10.91%) 和 2000 年 (9.73%); $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 年均值在 $26 \sim 35$ 、 $36 \sim 50$ 和 $51 \sim 70$

$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的面积比例均呈先减少后增加的趋势, 最大值分别出现在 2003 年 (11.54%)、2000 年 (28.90%) 和 2001 年 (36.21%), 最小值分别出现在 2006 年 (8.10%)、2006 年 (9.22%) 和 2013 年 (8.12%); $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 年均值在 $71 \sim 100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间的高污染区面积比例集中涌现在 2005~2016 年, 其面积比例高于 20%; $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 年均值高于 $100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的极高污染区面积比例最大的出现在 2013 年 (22.04%), 其次为 2011 年 (15.74%), 其余年份比例均低于 10%. 上述结果表明 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 年均值低于 $50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的低污染区面积比例呈先减少后增加的趋势, 而高于 $50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的中高污染区呈先增加后减少的趋势.

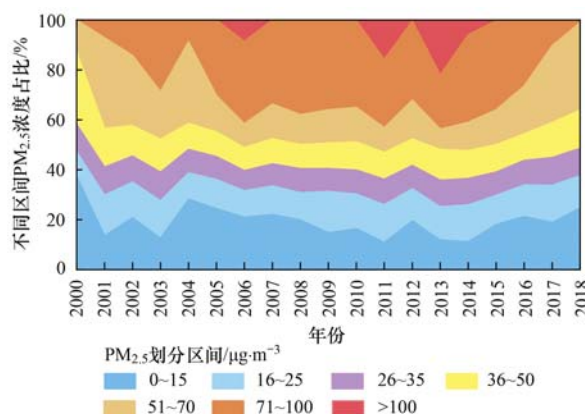


图 4 2000~2018 年京津冀城市群不同区间 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度时间演变

Fig. 4 Temporal change trend of $\text{PM}_{2.5}$ concentration by range in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration from 2000 to 2018

2.2.2 $\text{PM}_{2.5}$ 时空格局特征

2000~2018 年京津冀城市群 $\text{PM}_{2.5}$ 的空间变化特征如图 5 所示. 2000 年 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 值高于 $50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的区域主要分布在京津冀城市群南部的石家庄、衡水、邢台和邯郸等地 [图 5(a)]; 到 2005 年, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 值高于 $70 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的高污染区域开始大范围出现, 主要集中在京津冀城市群中南部地区 [图 5(b)]; 到 2010 年, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 值高于 $70 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的高污染区域继续蔓延至天津南部, 石家庄中部部分地区的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度甚至高于 $100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ [图 5(c)]; 到 2015 年, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 值高于 $70 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的高污染区域蔓延至北京的东南部地区, 高于 $100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的极高污染区域主要零星分布在保定和衡水等地 [图 5(d)]; 到 2018 年, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 值高于 $70 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的高污染区域呈减小的趋势, 仅分布在石家庄中部地区 [图 5(e)]. 总体来看, 2000~2018 年期间京津冀城市群 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度空间分布呈现由东南向西北递减的趋势, 中高污染区 [$\rho(\text{PM}_{2.5})$ 值 $> 50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$] 主要集中在河北省的中南部地区, 除

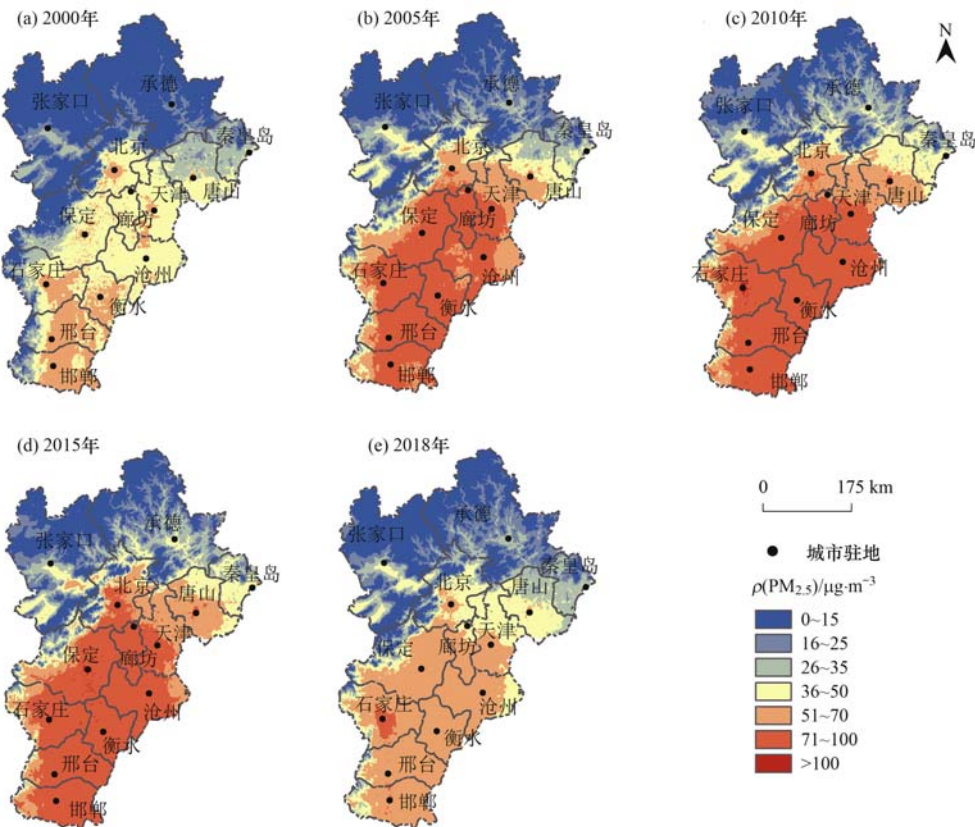


图5 2000~2018年京津冀城市群 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度空间变化特征

Fig. 5 Spatial distributions of $\text{PM}_{2.5}$ concentration in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration from 2000 to 2018

张家口、承德、北京西北部和秦皇岛北部外,其他地区均超过 $35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的国家标准。

不同时间段京津冀城市群像元尺度 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的变化趋势及显著性空间分布如图6所示。可以看出,2000~2018年期间,多数像元的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化并不显著,显著增加($P < 0.05$)的面积仅为3.36%,主要零星分布在保定、石家庄、邯郸和承德等地[图6(c)和6(f)]。分时间段来看,2000~2013年期间99.55%区域的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度呈增加的趋势,其中69.97%的像元呈显著增加的趋势($P < 0.05$),主要分布在邯郸、邢台、保定、石家庄、衡水、沧州、天津、唐山、以及北京、承德和张家口的东南部地区[图6(a)和6(d)];2013~2018年期间,99.94%区域的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度呈减小的趋势,其中85.81%的像元呈显著减少的趋势($P < 0.05$)[图6(b)和6(e)]。总体来看,京津冀城市群 $\text{PM}_{2.5}$ 的空间分布也呈明显的阶段特征,由于《京津冀地区生态环境保护整体方案》和《大气污染防治行动计划》等一系列减排及环保措施的实施,2013~2018年京津冀城市群大部分地区的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度呈显著减小的趋势,大气治理效果显著。

2.3 城市扩张对 $\text{PM}_{2.5}$ 的影响

2000~2018年,城市区域、老城区、新扩张城

区和非城市区域的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度均呈现先增加、后减少的变化趋势(图7)。城市区域、老城区、新扩张城区和非城区的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 最大值均出现在2013年,其值分别达到93.37、95.08、90.97和59.47 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,最小值均出现在2000年,其值分别为49.12、51.77、46.20和26.22 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。从 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 多年均值来看,老城区($74.71 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)>城市区域($72.72 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)>新扩张城区($70.35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)>非城市区域($45.49 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$),其值均大于 $35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的国家标准。以上分析结果表明,中心城区尤其是老城区的人类活动对大气污染具有更显著影响。

为进一步分析京津冀城市群不同城市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度随UI的变化趋势,将所计算的2000年和2018年京津冀城市群UI以1%为间隔进行等间隔划分,分析2000年和2018年13个城市的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度随UI的变化趋势(表1)。可以看出,2000年和2018年,13个城市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度随UI的增加均呈显著增加的趋势($P < 0.05$),进一步表明城市发展强度的增强会加重大气污染。在2000年,增加速率最大的城市为秦皇岛($\text{slope} = 0.1731$, $P < 0.01$),最小的为天津($\text{slope} = 0.0387$, $P < 0.01$);在2018年,增加速率最大的城市为唐山($\text{slope} = 0.1200$, $P < 0.01$),

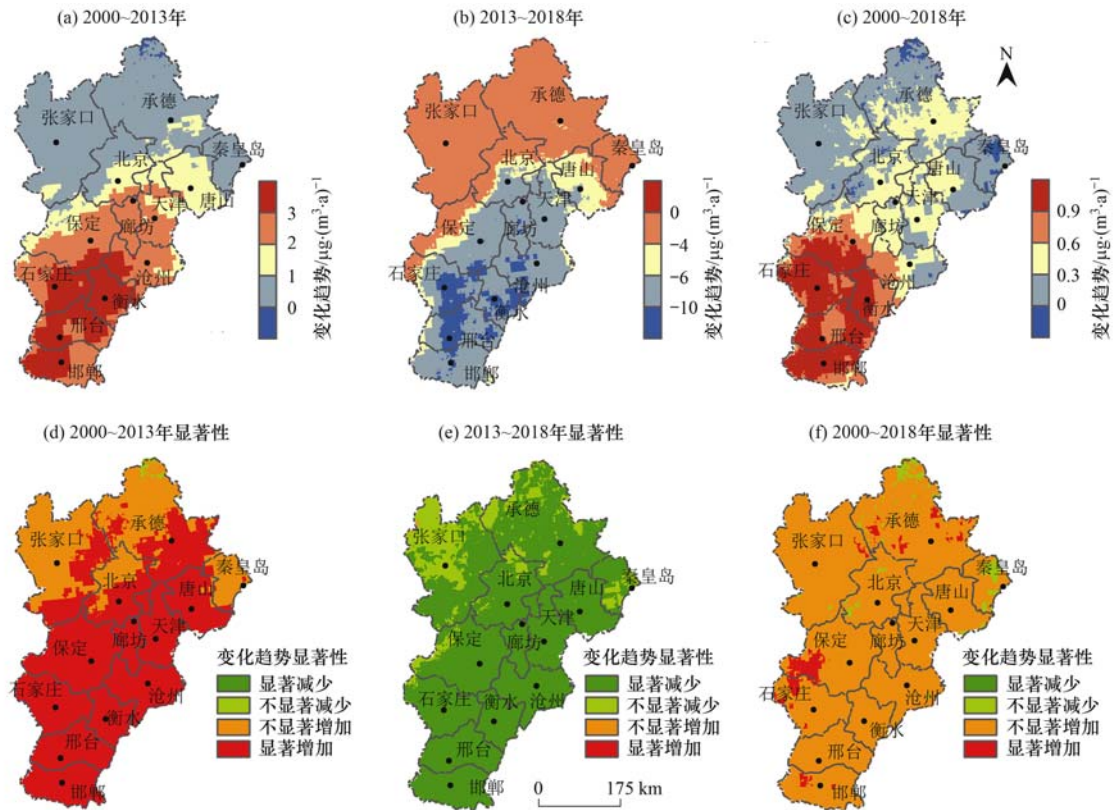


图 6 2000 ~ 2013、2013 ~ 2018 和 2000 ~ 2018 年京津冀城市群 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度空间变化趋势及显著性

Fig. 6 Spatial patterns of trends and significance in $\text{PM}_{2.5}$ concentration in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration during 2000-2013, 2013-2018, and 2000-2018

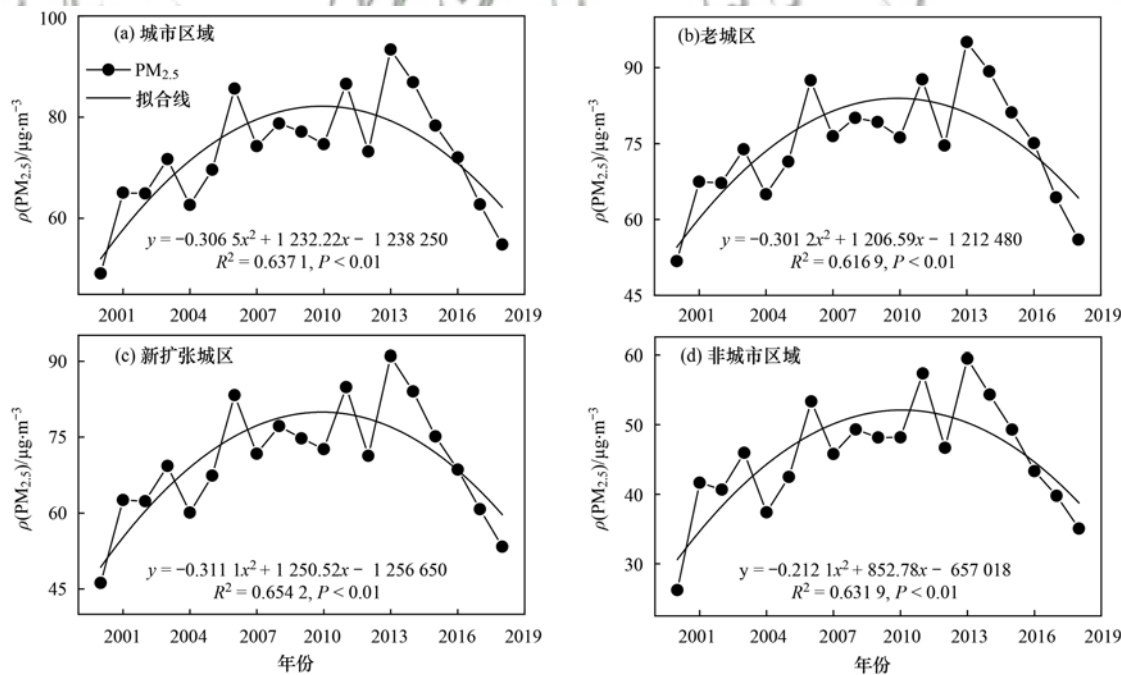


图 7 2000 ~ 2018 年期间京津冀城市群城市区域、老城区、新扩张城区和非城市区域 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化趋势

Fig. 7 Temporal trends of $\text{PM}_{2.5}$ concentration in urban, old urban, new urban, and non-urban areas in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration from 2000 to 2018

最小的为廊坊 (slope = 0.016 1, $P < 0.05$).

2.4 老城区和新扩张城区 $\text{PM}_{2.5}$ 对比研究

从新扩张城区和老城区的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度来看,

2000 年和 2018 年老城区的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 值分别为 $51.77 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $56.02 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 新扩张城区的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 值分别为 $46.20 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $53.35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,

表 1 2000 年和 2018 年京津冀城市群 13 个城市 PM_{2.5} 浓度随城市发展强度的变化趋势

Table 1 Change trends of PM_{2.5} concentration in 13 cities of the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration in 2000 and 2018

城市名称	2000 年		2018 年	
	slope/ $\mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{a})^{-1}$	<i>r</i>	slope/ $\mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{a})^{-1}$	<i>r</i>
北京	0.112 8**	0.799 7	0.051 6**	0.583 3
天津	0.038 7**	0.435 0	0.023 5**	0.367 3
石家庄	0.080 6**	0.517 2	0.037 3**	0.427 5
承德	0.096 8*	0.313 6	0.094 6**	0.579 5
张家口	0.089 8**	0.379 8	0.069 1**	0.327 4
秦皇岛	0.173 1**	0.651 8	0.055 3**	0.606 9
唐山	0.162 7**	0.702 0	0.120 0**	0.681 9
廊坊	0.090 3**	0.458 2	0.016 1*	0.214 3
保定	0.117 6**	0.601 8	0.061 1**	0.551 0
沧州	0.088 5**	0.734 5	0.033 7**	0.585 8
衡水	0.083 5**	0.594 4	0.035 7**	0.595 3
邢台	0.077 3**	0.587	0.036 1**	0.566 2
邯郸	0.091 6**	0.582 9	0.047 9**	0.427 2

1) * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$

老城区的 PM_{2.5} 浓度总体高于新扩张城区. 从二者的差值来看,其 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 值由 2000 年的 $5.54 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 下降到 2018 年的 $2.62 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (图 8). 从不同城市来看,在 2000 年,除承德外,其他 12 个城市的老城区 PM_{2.5} 浓度均高于新扩张城区; 2018 年,除承德、石家庄和天津外,其他 9 个城市的老城区 PM_{2.5} 浓度均高于新扩张城区(表 2).

3 讨论

科学辨识 PM_{2.5} 浓度的时空演变规律,准确掌握其与城市扩张的关系,是京津冀城市群城市化进程与环境保护相互协调发展的关键. 基于 PM_{2.5} 遥感反演栅格数据、站点实测数据和土地利用数据,本文系统评估了京津冀城市群 PM_{2.5} 浓度时空演变及其与城市扩张的关系,研究结果可为城市化进程中的

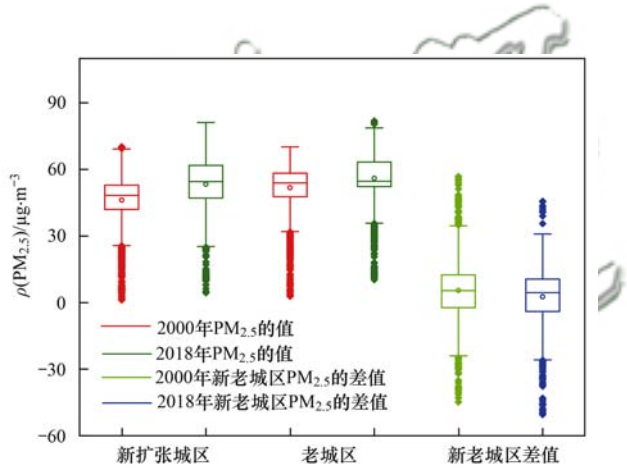


图 8 2000 年和 2018 年京津冀城市群老城区和新扩张城区 PM_{2.5} 浓度比较

Fig. 8 Comparisons of PM_{2.5} concentration and differences between the old and new urban areas of Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration in 2000 and 2018

表 2 2000 年和 2018 年京津冀城市群 13 个城市老城区和新城区 PM_{2.5} 值及其差值/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

Table 2 Comparisons of PM_{2.5} concentration and differences between old and new urban areas of 13 cities in 2000 and 2018/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

城市名称	老城区		新扩张城区		老城区和新城区差值	
	2000 年	2018 年	2000 年	2018 年	2000 年	2018 年
北京	55.29	52.89	47.26	49.17	8.03	3.72
天津	47.75	53.04	47.34	53.71	0.41	-0.67
石家庄	55.53	70.35	54.07	70.63	1.46	-0.28
承德	17.85	26.63	18.47	28.69	-0.62	-2.06
张家口	24.64	32.71	20.18	28.61	4.46	4.10
秦皇岛	44.35	38.86	35.65	33.66	8.7	5.20
唐山	49.85	53.24	43.18	45.96	6.67	7.28
廊坊	49.66	52.93	45.86	50.96	3.80	1.97
保定	55.85	63.95	50.08	60.00	5.77	3.95
沧州	52.31	59.12	47.63	56.10	4.68	3.02
衡水	55.46	64.33	51.51	60.69	3.95	3.64
邢台	59.01	68.55	54.85	65.06	4.16	3.49
邯郸	60.27	68.91	55.15	64.65	5.12	4.26

产业结构调整、城市空间优化和城市群地区大气联动治理提供科学参考依据. 本研究引入遥感反演的栅格 PM_{2.5} 浓度数据可在一定程度上弥补监测站点稀疏和区域信息失真等问题. 本文得出的 PM_{2.5} 浓度时空演变格局与已有的研究成果一致, 且能从更长时间序列(2000~2018 年)和更细空间尺度(像元尺度)反映监测点较为稀疏地区的 PM_{2.5} 浓度时空格局^[43~45]. 本研究结果同时表明不同的区域(城市区域、老城区、新扩张城区和非城市区域)的 PM_{2.5} 浓度均呈现先增加后减少的变化趋势, 老城区的 PM_{2.5} 浓度高于其他地区, 主要是由于老城区为城市的中心区域, 人口密度大, 建筑物密集, 气象扩散条件较差, 对大气污染的影响显著^[23]; 从 PM_{2.5} 浓度随不同等级 UI 的变化趋势和新老城区对比来看, 京津冀城市群 13 个城市的 PM_{2.5} 浓度随 UI 的增加均呈现增加的趋势, 老城区 PM_{2.5} 浓度高于新扩张城区, 进一步表明人类活动、经济发展等城市化进程对 PM_{2.5} 浓度的影响显著^[21]. 然而, 京津冀城市群 PM_{2.5} 浓度变化除受城市发展的影响外, 大气环流、地形地貌条件和土地利用/覆盖等因素也会影响其时空演变^[46~48], 同时不同城市由于产业结构和能源消费结构等差距较大, 导致 PM_{2.5} 浓度的驱动因素也不尽相同^[49], 未来研究应持续关注不同城市影响 PM_{2.5} 浓度的主控要素, 合理布局城市基础设施, 调整产业结构, 减少大气污染物排放, 促进城市精细化管理, 最终实现城市的可持续发展.

4 结论

(1) 2000~2018 年京津冀城市群 PM_{2.5} 浓度呈明显的阶段性特征, 2000~2013 年 PM_{2.5} 浓度呈显著增加的趋势, 69.97% 区域的 PM_{2.5} 浓度呈显著增加的趋势 ($P < 0.05$); 2013~2018 年 PM_{2.5} 浓度呈显著减小的趋势, 85.81% 区域的 PM_{2.5} 浓度呈显著减小的趋势.

(2) 空间分析结果表明 PM_{2.5} 浓度整体呈现从东南向西北递减的趋势, 高污染区 [$\rho(\text{PM}_{2.5}) > 70 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$] 主要集中在河北省中南部地区的邯郸、邢台、石家庄、衡水、沧州、保定和廊坊等地.

(3) 2000~2018 年期间, 城市区域、老城区、新扩张城区和非城市区域的 PM_{2.5} 浓度均呈先增加、后减少的变化趋势; 中心城区尤其是老城区的人类活动对大气污染具有更显著影响. 从 PM_{2.5} 浓度随连续 UI 变化的趋势来看, 2000 年和 2018 年, 京津冀城市群 13 个城市 PM_{2.5} 浓度随 UI 的增加均呈显著增加的趋势 ($P < 0.05$).

(4) 2000 年和 2018 年京津冀城市群老城区的 PM_{2.5} 浓度高于新扩张城区. 在 2000 年, 除承德外, 其他城市的老城区 PM_{2.5} 浓度均高于新扩张城区; 2018 年, 除承德、石家庄和天津外, 其他 9 个城市老城区 PM_{2.5} 浓度均高于新扩张城区.

参考文献:

- [1] Han L J, Zhou W Q, Pickett S T A, et al. An optimum city size? The scaling relationship for urban population and fine particulate (PM_{2.5}) concentration[J]. *Environmental Pollution*, 2016, **208**: 96-101.
- [2] Pope III C A, Dockery D W. Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect[J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2006, **56**(6): 709-742.
- [3] 韩立建. 城市化与 PM_{2.5} 时空格局演变及其影响因素的研究进展[J]. *地理科学进展*, 2018, **37**(8): 1011-1021.
Han L J. Relationship between urbanization and urban air quality: An insight on fine particulate dynamics in China[J]. *Progress in Geography*, 2018, **37**(8): 1011-1021.
- [4] 张梦娇, 苏方成, 徐起翔, 等. 2013-2017 年中国 PM_{2.5} 污染防治的健康效益评估[J]. *环境科学*, 2021, **42**(2): 513-522.
Zhang M J, Su F C, Xu Q X, et al. Health impact attributable to the control of PM_{2.5} pollution in China during 2013-2017[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(2): 513-522.
- [5] 赵安周, 刘宪锋, 裴韬, 等. 京津冀地区不透水表面覆盖率的时空演变及其对植被的影响[J]. *地理研究*, 2021, **40**(6): 1582-1595.
Zhao A Z, Liu X F, Pei T, et al. Spatiotemporal evolution of impervious surface percentage and its impact on vegetation in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. *Geographical Research*, 2021, **40**(6): 1582-1595.
- [6] Han L J, Zhou W Q, Li W F, et al. Impact of urbanization level on urban air quality: A case of fine particles (PM_{2.5}) in Chinese cities[J]. *Environmental Pollution*, 2014, **194**: 163-170.
- [7] Liang Z, Wang W Z, Wang Y Y, et al. Urbanization, ambient air pollution, and prevalence of chronic kidney disease: A nationwide cross-sectional study[J]. *Environment International*, 2021, **156**, doi: 10.1016/j.envint.2021.106752.
- [8] Chen G J, Hu Y, Zhang R, et al. Evolution of south-north transport and urbanization effects on pm_{2.5} distribution with increased pollution levels in Beijing[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2021, **72**, doi: 10.1016/j.scs.2021.103060.
- [9] Shi K F, Shen J W, Wang L, et al. A multiscale analysis of the effect of urban expansion on PM_{2.5} concentrations in China: Evidence from multisource remote sensing and statistical data[J]. *Building and Environment*, 2020, **174**, doi: 10.1016/j.buildenv.2020.106778.
- [10] Yue H B, He C Y, Huang Q X, et al. Stronger policy required to substantially reduce deaths from PM_{2.5} pollution in China[J]. *Nature Communications*, 2020, **11**, doi: 10.1038/s41467-020-15319-4.
- [11] 李梦真, 张廷斌, 易桂花, 等. 四川盆地 PM_{2.5} 浓度时空变化特征遥感监测与影响因子分析[J]. *环境科学*, 2021, **42**(7): 3136-3146.
Li M Z, Zhang T B, Yi G H, et al. Spatio-temporal variation characteristics monitored by remotely sensed technique of PM_{2.5} concentration and its influencing factor analysis in Sichuan basin, China[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(7): 3136-3146.
- [12] 郭向阳, 穆学青, 丁正山, 等. 长三角多维城市化对 PM_{2.5} 浓

- 度的非线性影响及驱动机制[J]. 地理学报, 2021, **76**(5): 1274-1293.
- Guo X Y, Mu X Q, Ding Z S, *et al.* Nonlinear effects and driving mechanism of multidimensional urbanization on PM_{2.5} concentrations in the Yangtze River Delta[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, **76**(5): 1274-1293.
- [13] Wang Y X, Yao L, Xu Y, *et al.* Potential heterogeneity in the relationship between urbanization and air pollution, from the perspective of urban agglomeration [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, **298**, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.126822.
- [14] 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.
- Cheng 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.
- [15] 史宇, 张建辉, 罗海江, 等. 北京市2012-2013年秋冬季大气颗粒物污染特征分析[J]. 生态环境学报, 2013, **22**(9): 1571-1577.
- Shi Y, Zhang J H, Luo H J, *et al.* Analysis of characteristics of atmospheric particulate matter pollution in Beijing during the fall and winter of 2012 to 2013 [J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2013, **22**(9): 1571-1577.
- [16] Cao R, Li B, Wang Z Y, *et al.* Using a distributed air sensor network to investigate the spatiotemporal patterns of PM_{2.5} concentrations[J]. *Environmental Pollution*, 2020, **264**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114549.
- [17] 周亮, 周成虎, 杨帆, 等. 2000-2011年中国PM_{2.5}时空演化特征及驱动因素解析[J]. 地理学报, 2017, **72**(11): 2079-2092.
- Zhou L, Zhou C H, Yang F, *et al.* Spatio-temporal evolution and the influencing factors of PM_{2.5} in China between 2000 and 2011 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, **72**(11): 2079-2092.
- [18] 何映月, 张松林. 2000~2016年中国PM_{2.5}时空格局[J]. 中国环境科学, 2020, **40**(8): 3284-3293.
- He Y Y, Zhang S L. Spatiotemporal pattern of PM_{2.5} from 2000 to 2016 in China[J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(8): 3284-3293.
- [19] He Q Q, Gao K, Zhang L, *et al.* Satellite-derived 1-km estimates and long-term trends of PM_{2.5} concentrations in China from 2000 to 2018[J]. *Environment International*, 2021, **156**, doi: 10.1016/j.envint.2021.106726.
- [20] Hammer M S, Van Donkelaar A, Li C, *et al.* Global estimates and long-term trends of fine particulate matter concentrations (1998-2018)[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, **54**(13): 7879-7890.
- [21] Wu J S, Zheng H Q, Zhe F, *et al.* Study on the relationship between urbanization and fine particulate matter (PM_{2.5}) concentration and its implication in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, **182**: 872-882.
- [22] 王桂林, 张炜. 中国城市扩张及空间特征变化对PM_{2.5}污染的影响[J]. 环境科学, 2019, **40**(8): 3447-3456.
- Wang G L, Zhang W. Effects of urban expansion and changes in urban characteristics on PM_{2.5} pollution in China [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(8): 3447-3456.
- [23] 刘海猛, 方创琳, 黄解军, 等. 京津冀城市群大气污染的时空特征与影响因素解析[J]. 地理学报, 2018, **73**(1): 177-191.
- Liu H M, Fang C L, Huang J J, *et al.* The spatial-temporal characteristics and influencing factors of air pollution in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, **73**(1): 177-191.
- [24] 王桂林, 杨昆, 杨扬. 京津冀地区不透水表面扩张对PM_{2.5}污染的影响研究[J]. 中国环境科学, 2017, **37**(7): 2470-2481.
- Wang G L, Yang K, Yang Y. The spatio-temporal variation of PM_{2.5} pollution and the its correlation with the impervious surface expansion[J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(7): 2470-2481.
- [25] Yang D Y, Ye C, Wang X M, *et al.* Global distribution and evolvement of urbanization and PM_{2.5} (1998-2015) [J]. *Atmospheric Environment*, 2018, **182**: 171-178.
- [26] Luo X M, Sun K, Li L, *et al.* Impacts of urbanization process on PM_{2.5} pollution in "2 + 26" cities [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, **284**, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124761.
- [27] 杨文涛, 譙鹏, 刘贤赵, 等. 2011-2017年中国PM_{2.5}多尺度时空分异特征分析[J]. 环境科学, 2020, **41**(12): 5236-5244.
- Yang W T, Qiao P, Liu X Z, *et al.* Analysis of multi-scale spatio-temporal differentiation characteristics of PM_{2.5} in China from 2011 to 2017[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(12): 5236-5244.
- [28] Chen M X, Guo S S, Hu M G, *et al.* The spatiotemporal evolution of population exposure to PM_{2.5} within the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration, China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, **265**, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121708.
- [29] 赵安周, 裴韬, 曹森, 等. 京津冀城市扩张对植被和地表城市热岛的影响[J]. 中国环境科学, 2020, **40**(4): 1825-1833.
- Zhao A Z, Pei T, Cao S, *et al.* Impacts of urbanization on vegetation growth and surface urban heat island intensity in the Beijing-Tianjin-Hebei[J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(4): 1825-1833.
- [30] 路洁, 刘晶, 刘明阳, 等. 近55年京津冀地区降水多尺度分析[J]. 水利水运工程学报, 2020, (6): 23-31.
- Lu J, Liu J, Liu M Y, *et al.* Multi-scale analysis of precipitation in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration in the past 55 years[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2020, (6): 23-31.
- [31] 王金杰, 赵安周, 胡小枫. 京津冀植被净初级生产力时空分布及自然驱动因子分析[J]. 生态环境学报, 2021, **30**(6): 1158-1167.
- Wang J J, Zhao A Z, Hu X F. Spatiotemporal distribution of vegetation net primary productivity in Beijing-Tianjin-Hebei and natural driving factors[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2021, **30**(6): 1158-1167.
- [32] 王迪, 韩立建, 李世玉, 等. 城市群空气污染综合评估范式与应用——以京津冀城市群PM_{2.5}污染为例[J]. 生态学报, 2021, **41**(11): 4278-4287.
- Wang D, Han L J, Li S Y, *et al.* Comprehensive evaluation model for air pollution and its application: an example of PM_{2.5} pollution in city cluster of Beijing, Tianjin and Hebei Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, **41**(11): 4278-4287.
- [33] Van Donkelaar A, Martin R V, Li C, *et al.* Regional estimates of chemical composition of fine particulate matter using a combined geoscience-statistical method with information from satellites, models, and monitors[J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, **53**(5): 2595-2611.
- [34] 杨浩, 王子羿, 王婧, 等. 京津冀城市群土地利用变化对热环境的影响研究[J]. 自然资源学报, 2018, **33**(11): 1912-1925.

- Yang H, Wang Z Y, Wang J, *et al.* Study on the influence of land use change on the thermal environment in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration [J]. *Journal of Natural Resources*, 2018, **33**(11): 1912-1925.
- [35] 刘纪远, 宁佳, 匡文慧, 等. 2010-2015 年中国土地利用变化的时空格局与新特征 [J]. *地理学报*, 2018, **73**(5): 789-802.
- Liu J Y, Ning J, Kuang W, *et al.* Spatio-temporal patterns and characteristics of land-use change in China during 2010-2015 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, **73**(5): 789-802.
- [36] Zhao A Z, Yu Q Y, Wang D L, *et al.* Spatiotemporal dynamics of ecosystem water use efficiency over the Chinese Loess Plateau base on long-time satellite data [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, doi: 10.1007/s11356-021-15801-6.
- [37] Fensholt R, Proud S R. Evaluation of earth observation based global long term vegetation trends-Comparing GIMMS and MODIS global NDVI time series [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, **119**: 131-147.
- [38] Kendall M G, Gibbons J D. Rank correlation methods [M]. 5th ed. London, UK: Edward Arnold, 1990. 320.
- [39] Zhou W Q, Yu W J, Qian Y G, *et al.* Beyond city expansion: multi-scale environmental impacts of urban megaregion formation in China [J]. *National Science Review*, 2021, doi: 10.1093/nsr/nwab107.
- [40] Zhou D C, Zhao S Q, Liu S G, *et al.* Spatiotemporal trends of terrestrial vegetation activity along the urban development intensity gradient in China's 32 major cities [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **488-489**: 136-145.
- [41] 祝丽云, 李彤, 马丽岩, 等. 产业结构调整对雾霾污染的影响——基于中国京津冀城市群的实证研究 [J]. *生态经济*, 2018, **34**(10): 141-148.
- Zhu L Y, Li T, Ma L Y, *et al.* The influence of industrial structure adjustment on haze pollution: an empirical study of Jing-Jin-Ji region [J]. *Ecological Economy*, 2018, **34**(10): 141-148.
- [42] Tong D, Geng G N, Jiang K J, *et al.* Energy and emission pathways towards $PM_{2.5}$ air quality attainment in the Beijing-Tianjin-Hebei region by 2030 [J]. *Science of the Total Environment*, **692**: 361-370.
- [43] Du Y Y, Wan Q, Liu H M, *et al.* How does urbanization influence $PM_{2.5}$ concentrations? Perspective of spillover effect of multi-dimensional urbanization impact [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, **220**: 974-983.
- [44] Yan D, Lei Y L, Shi Y K, *et al.* Evolution of the spatiotemporal pattern of $PM_{2.5}$ concentrations in China-A case study from the Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *Atmospheric Environment*, 2018, **183**: 225-233.
- [45] Xue W H, Zhang J, Zhong C, *et al.* Spatiotemporal $PM_{2.5}$ variations and its response to the industrial structure from 2000 to 2018 in the Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, **279**, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123742.
- [46] 周丽霞, 吴涛, 蒋国俊, 等. 长三角地区 $PM_{2.5}$ 浓度对土地利用/覆盖转换的空间异质性响应 [J]. *环境科学*, 2022, **43**(3), doi: 10.13227/j. hjkx. 202106039.
- Zhou L X, Wu T, Jiang G J, *et al.* Spatial heterogeneity of $PM_{2.5}$ concentration in response to land use/cover conversion in the Yangtze River Delta region [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(3), doi: 10.13227/j. hjkx. 202106039.
- [47] 蔡子颖, 郝团, 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), doi: 10.13227/j. hjkx. 202108182.
- Cai Z Y, Hao J, Han S Q, *et al.* Analysis of change and driving factors of $PM_{2.5}$ mass concentration in Tianjin in the from 2000 to 2020 [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(3), doi: 10.13227/j. hjkx. 202108182.
- [48] 杨伟, 姜晓丽. 华北地区大气细颗粒物 ($PM_{2.5}$) 年际变化及其对土地利用/覆被变化的响应 [J]. *环境科学*, 2020, **41**(7): 2995-3003.
- Yang W, Jiang X L. Interannual characteristics of fine particulate matter in north China and its relationship with land use and land cover change [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(7): 2995-3003.
- [49] Chen J, Zhou C S, Wang S J, *et al.* Impacts of energy consumption structure, energy intensity, economic growth, urbanization on $PM_{2.5}$ concentrations in countries globally [J]. *Applied Energy*, 2018, **230**: 94-105.

CONTENTS

Chemical Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} in Urban Area of Beijing	AN Xin-xin, CAO Yang, WANG Qin, <i>et al.</i> (2251)
Modeling of PM _{2.5} Concentrations in the Beijing-Tianjin-Hebei Region Using a Space-time Linear Mixed Effects Model	FAN Li-hang, YANG Xiao-hui, SONG Chun-jie, <i>et al.</i> (2262)
Spatio-temporal Evolution Patterns of PM _{2.5} and Relationship with Urban Expansion in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration from 2000 to 2018	ZHAO An-zhou, XIANG Kai-zheng, LIU Xian-feng, <i>et al.</i> (2274)
Characteristics and Source Analysis of PM _{2.5} in Qingdao in Winter Under the Action of Sea-Land-Atmosphere Convergence	TUO Xiong, YANG Ling-xiao, ZHANG Wan, <i>et al.</i> (2284)
Impacts of Heterogeneous Uptake Pathway on Sulfate Formation: A Case Study in Shanghai Based on WRF-Chem	ZHANG Ru-han, ZHANG Hao-ran, FENG Wei-hang, <i>et al.</i> (2294)
Source Apportionment and Seasonal Changes in PM _{2.5} Chemical Components from Different Functional Areas of a Provincial Capital City	SUN You-min, FAN Jing, XU Biao, <i>et al.</i> (2304)
Chemical Compositions, Light Extinction Effect, and Oxidative Potential of PM _{2.5} Under Different Pollution Levels During Winter in Taiyuan	REN Jiao, ZHAO Rong-rong, WANG Ming, <i>et al.</i> (2317)
Source Apportionment and Health Risk Assessment of Metal Elements in Ambient PM _{2.5} in the Winter of Zhengzhou	YAO Sen, WANG Qian-heng, XUE Yan, <i>et al.</i> (2329)
Characteristics, Ecological Risk Assessment, and Sources of the Polluted Metallic Elements in PM _{2.5} During Winter in Zibo City	BAI Wen-yu, XU Bo, GUO Li-yao, <i>et al.</i> (2336)
Seasonal Distribution Characteristics, Source Analysis, and Health Risk Evaluation of PAHs in PM _{2.5} in Chengde	HE Bo-wen, NIE Sai-sai, LI Yi-lin, <i>et al.</i> (2343)
Pollution Level and Regional Migration of PCDD/Fs in Ambient Air from Pearl River Delta, China	FU Jian-ping, XIE Dan-ping, HUANG Jin-qiong, <i>et al.</i> (2355)
Concentrations and Sources of Black Carbon Aerosols in Rural Areas of Southern North China Plain	ZHANG Ling, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i> (2363)
Research on Causes of Severely Polluted Weather in Tianjin Based on Process Analytical Technology	HAO Jian, CAI Zi-ying, HAN Su-qin, <i>et al.</i> (2373)
Classification Control of Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission Pollution Sources Based on Emission Amounts and Atmospheric Reactivity	CHEN Peng, ZHANG Yue, XING Min, <i>et al.</i> (2383)
Complex Networks Reveal the Characteristics of Ozone in China	YING Na, CHEN Jian-hua, LI Dong, <i>et al.</i> (2395)
Ozone Simulation of Lanzhou City Based on Multi-scenario Emission Forecast of Ozone Precursors in the Summer of 2030	CHEN Tian-lei, WU Min, PAN Cheng-ke, <i>et al.</i> (2403)
Improvement of Environmental Model Prediction Based on Inversion and Aerosol Assimilation	CAI Zi-ying, TANG Miao, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i> (2415)
Method of Identifying Air Pollution from Iron and Steel Industry Based on Ambient Air Quality Monitoring Data Analysis	SHI Yao-peng, HU Jing-nan, CHU Yang-xi, <i>et al.</i> (2427)
Assessment of "Differentiated Response Requirement Based on Performance Grading" Policy During Heavy Air Pollution Alert	ZENG Jing-hai, WANG Can (2436)
Risk Zoning of Water Pollution in the Yellow River Basin	ZHOU Xia-fei, CAO Guo-zhi, YU Fang, <i>et al.</i> (2448)
Emission Characteristics of Industrial Water Pollutants in Gansu Section of the Yellow River Basin	LI Xue-ying, YANG Xi, QIAO Qi, <i>et al.</i> (2459)
Spatial-temporal Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in Sediments of the Yellow River	WANG Tao-yi, PAN Bao-zhu, HAN Xu, <i>et al.</i> (2467)
APCS-MLR Combined with PMF Model to Analyze the Source of Metals in Sediment of Xinglin Bay Suburban Watershed, Xiamen	SHEN Chen-yu, YAN Yu, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (2476)
Spatial Differentiation Characteristics and Response Relationship of DOM, Nutrients, and Heavy Metals in River Sediments	XIAO Yan-chun, YU Hui-bin, SONG Yong-hui (2489)
Distribution Characteristics, Evaluation, and Source Analysis of Heavy Metals in Soils of Fenhe Riparian Zone in Taiyuan City	HU Jie, ZHAO Xin-yu, WANG Ting-ting, <i>et al.</i> (2500)
Binding Affinity Between Heavy Metal Hg and Dissolved Organic Matter in Hongze Lake	HU Bin, WANG Pei-fang, ZHANG Nan-nan, <i>et al.</i> (2510)
Ecosystem Evolutionary Trajectory of Lake Xiliang over the Past Century Driven by Eutrophication	ZHENG Jia-nan, XU Min, ZHENG Wen-xiu, <i>et al.</i> (2518)
Sediment Release and Pollution Source Analysis of Typical Reservoirs in the Upper Reaches of the Yellow River Based on DGT Technology	MA Yu-shen, ZHU Xiang, PANG Qing-qing, <i>et al.</i> (2527)
Differential Characteristics and Source Identification of Water Quality of the Rivers in Northern Henan Before and After Rainstorm	ZHANG Yan, ZOU Lei, LIANG Zhi-jie, <i>et al.</i> (2537)
Adsorption and Interception Effects of <i>Eichhornia crassipes</i> on Microplastics in Water of the Poyang Lake Basin	LI Wen-gang, WU Xi-en, JIAN Min-fei, <i>et al.</i> (2548)
Spatiotemporal Distribution and Ecological Risk Assessment of Plastic Additives in Taihu Lake	LIU Shu-jiao, DING Jian-nan, SHI Jun-zhe, <i>et al.</i> (2557)
Distribution Characteristics, Sources, and Storage of Microplastics in Surface Sediments of Luoma Lake	YAO Ming-xuan, BAI Xue, XU Zhen-jia, <i>et al.</i> (2566)
Pollution Characteristics of Phosphorus in Different Media in Taihu Lake and Its Treatment Enlightenment	CAI Mei, LU Zhi-hua, WANG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (2575)
Analysis on Diversity and Structure of Microbial Community in River Sediment of Siping Section of Liaohe River	LI Peng-yang, AN Qi-rui, WANG Xin-hao, <i>et al.</i> (2586)
Non-point Source Pollution (NPSP) Induces Structural and Functional Variation in Bacterial Communities in Sediments of Jialing River	XUE Yu-qin, XU Fei, LIU Kun-he, <i>et al.</i> (2595)
Effects of Microplastics on Bacterial Community Composition and Diversity in Sediments	LI Wen-lu, WANG Zhi-chao, YANG Wen-huan, <i>et al.</i> (2606)
Vertical Distribution Characteristics and Community Construction of Aerobic Denitrification Bacteria from the Sediments of Baiyangdian Lake During the Winter Freezing Period	ZHANG Tian-na, CHEN Zhao-ying, ZHANG Zi-wei, <i>et al.</i> (2614)
Effect of Induced Mixing on Bacterial Community Structure and Metabolic Activity in Reservoir	GAO Yue, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2624)
Distribution Characteristics of Microplastics in <i>Bellamyia aeruginosa</i> in Typical Area of Poyang Lake	JIANG Wei-qun, HU Qi-wu, JIAN Min-fei, <i>et al.</i> (2633)
Electrocatalytic Oxidation of Bisphenol A by Porous Ti/SnO ₂ -Sb-Ni Electrode Loaded with Multi-wall Carbon Nanotubes	FU Yuan-hang, LIU An-di, HUANG Wei-bin, <i>et al.</i> (2640)
Efficiency and Mechanism of Degradation of Methylene Blue with H ₂ O ₂ Catalyzed by Magnetic Mn _{0.4} Zn _{0.4} Fe ₂ O ₄ @SiO ₂	XU Dong-ying, YU Jing, HAO Qi, <i>et al.</i> (2650)
Effect of Two Types of Nanoparticles on the Adsorption of Ciprofloxacin on Zeolite	JIANG Lan-cui, MENG Zhao-fu, LIU Xian, <i>et al.</i> (2662)
Adsorption Mechanisms and Effect Factors of As(V) by AMD Sludge Composite Material	ZHANG Ya-hui, ZHANG Rui-xue, WU Pan, <i>et al.</i> (2673)
Shifts in Microbial Community and Variation in Functional Genes for Nitrification and Denitrification in Activated Sludge Affected by Triclosan and Its Transformed Intermediates	LU Ying-yuan, DONG Xiao-qi, PENG Xing-xing, <i>et al.</i> (2685)
Construction of Sustainability Evaluation Index System for Contaminated Site Risk Management and Analysis on Key Influential Factors	LI Xiao-nuo, YI Shi-yi, CHEN Wei-ping (2699)
Construction and Empirical Analysis of a Comprehensive Evaluation Method of Coastal Wetland Soil Quality Based on Ecological Functions	ZHANG Xue, KONG Fan-long, JIANG Zhi-xiang (2709)
Source Analysis and Pollution Assessment of Heavy Metals in Farmland Soil Around Tongshan Mining Area	CHEN Hang, WANG Ying, WANG Shu (2719)
Effects of Typical Iron and Manganese Minerals on Arsenic Speciation and Enzyme Activities in Paddy Soil	ZHOU Yi-min, HUANG Ya-yuan, LIU Kai, <i>et al.</i> (2732)
Phytoremediation Efficiency of Two Cultivars of <i>Brassica napus</i> L. Under Water-soluble Chitosan Treatment in Typical Pb-contaminated Farmland Soils	MENG Xiao-fei, ZHENG Guo-di, CHEN Tong-bin, <i>et al.</i> (2741)
Risk Prediction of Cadmium and Lead in Wheat Grains Based on Bayes Theorem	WANG Tian-qi, LI Yan-ling, YANG Yang, <i>et al.</i> (2751)
Interannual Variation Characteristics of Nitrogen Loss Under Rapeseed/Maize Rotation in Purple Soil Sloping Field	XU Man, GAO Ming, YU Luo, <i>et al.</i> (2758)
Physicochemical Properties of Biochars Prepared from Different Feedstocks and Evaluation of Its Potential as A Slow-release Carriers for Biochar-based Fertilizers	XING Li-bin, CHENG Jie, GENG Zeng-chao, <i>et al.</i> (2770)
Effects of Combined Application of Wood Vinegar-Acidified Biochar and Nitrogen on Active Nitrogen and Ammonia Volatilization in Saline Soil	SHEN Shu-wei, ZHANG Dan-dan, WANG Min-ge, <i>et al.</i> (2779)
Effects of Biodegradable Plastic Film Mulching on Greenhouse Gas Emissions Under Wheat-Maize Rotation System in the Guanzhong Plain	GUO Yi-ting, LUO Xiao-qi, WANG Rui, <i>et al.</i> (2788)
Forest Soil Microbial Community Structure Characteristics and Its Influencing Factors at Different Elevations on the Southern Slope of Daiyun Mountain	HE Zhong-sheng, WANG Zi-wei, ZHU Jing, <i>et al.</i> (2802)
Effects of Simulated Warming and Increased Precipitation on Soil Extracellular Enzyme Activity and Enzymatic Stoichiometry of Abandoned Grassland	WANG Xing, ZHONG Ze-kun, JIAN Jun-nan, <i>et al.</i> (2812)
Contribution of Urbanization to Local Warming in Major Cities of China	LI Yu, ZHOU De-cheng, YAN Zhang-mei, <i>et al.</i> (2822)