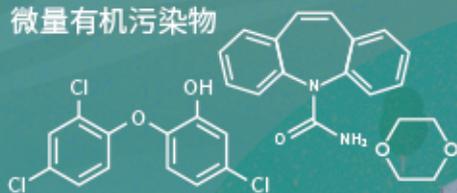


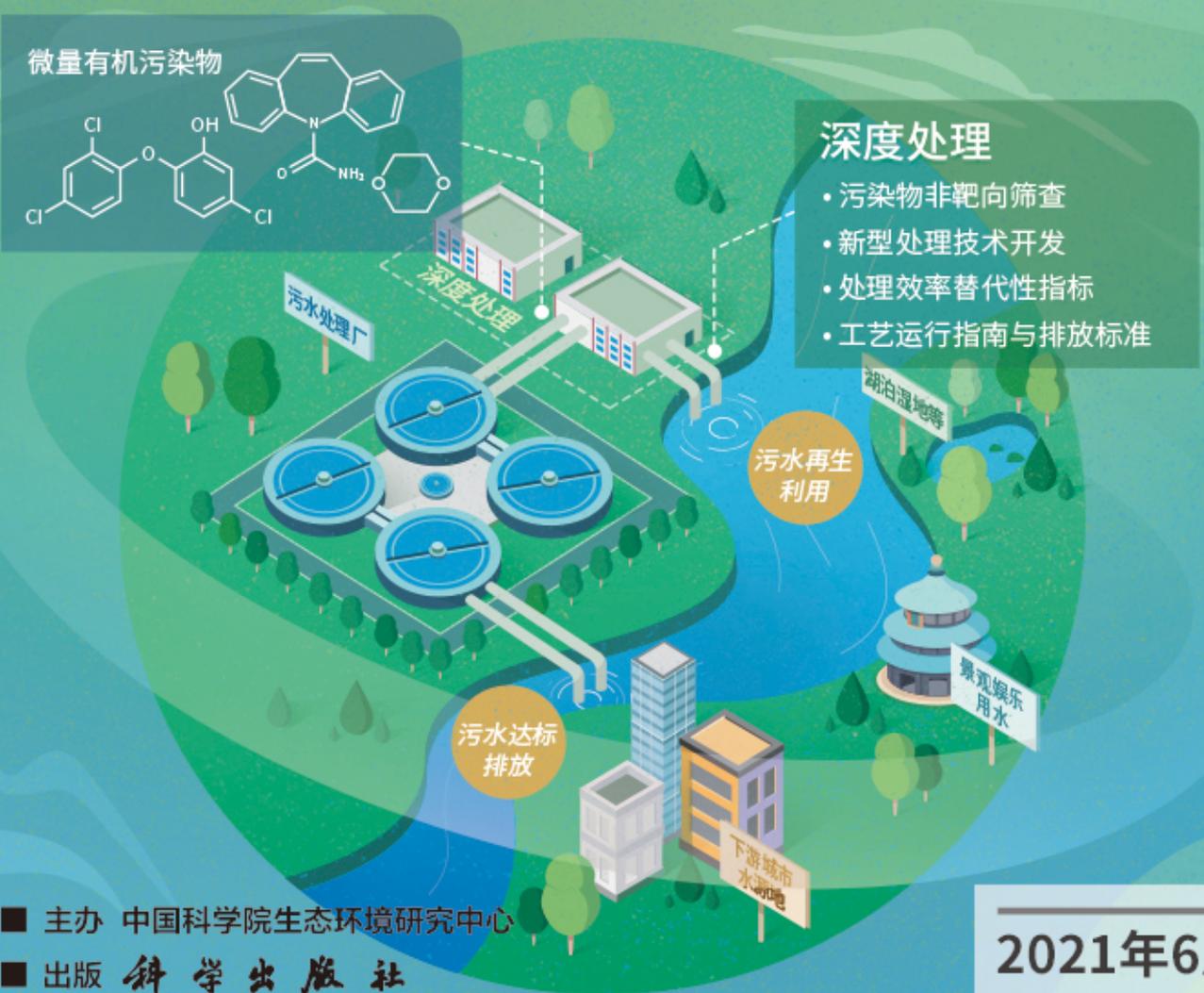
城市污水再生处理中微量有机污染物控制的关键难题与解决思路
王文龙, 吴乾元, 杜焯, 黄南, 陆韻, 魏东斌, 胡洪营

微量有机污染物



深度处理

- 污染物非靶向筛查
- 新型处理技术开发
- 处理效率替代性指标
- 工艺运行指南与排放标准



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2021年6月

第42卷 第6期
Vol.42 No.6

目次

综述与专论

- 城市环境生物安全研究的进展与挑战 苏建强, 安新丽, 胡安谊, 朱永官 (2565)
- 城市污水再生处理中微量有机污染物控制的关键难题与解决思路 王文龙, 吴乾元, 杜焯, 黄南, 陆韻, 魏东斌, 胡洪莹 (2573)
- 污泥 EPS 作为阻燃剂的机制归纳与潜力分析 郝晓地, 赵梓丞, 李季, 时琛, 吴远远 (2583)

研究报告

- 北京大气 PM_{2.5} 携带金属浓度、来源及健康风险的城郊差异 周安琪, 刘建伟, 周旭, 毕思琪, 张博哈, 高越, 曹红斌 (2595)
- 京津冀及周边 MAIAC AOD 和 PM_{2.5} 质量浓度特征及相关性分析 金国因, 杨兴川, 晏星, 赵文吉 (2604)
- 天津市 PM_{2.5} 中二次硝酸盐形成及防控 肖致美, 武婷, 卫昱婷, 徐虹, 李立伟, 李鹏, 陈魁, 邓小文 (2616)
- 南京市大气细颗粒物 (PM_{2.5}) 中硝基多环芳烃污染特征与风险评估 傅银银, 文浩哲, 王向华, 于南洋, 李冰, 韦斯 (2626)
- 汾渭平原吸收性气溶胶时空演化及潜在源区分析 刘旻霞, 李亮, 于瑞新, 宋佳颖, 张国娟, 穆若兰, 徐璐 (2634)
- 西南典型区域夏季大气含氧挥发性有机化合物来源解析 陈木兰, 王赛男, 陈天舒, 朱波, 彭超, 周佳维, 车汉雄, 黄汝辉, 杨复沫, 刘合凡, 谭钦文, 韩丽, 陈军辉, 陆克定, 陈阳 (2648)
- 气溶胶中溶解性有机质 (DOM) 液相氧化 陶冶, 陈彦彤, 李楠旺, 张敬宇, 叶招莲, 盖鑫磊 (2659)
- 基于 MERRA-2 再分析资料的上海市近 40 年大气黑碳浓度变化及潜在来源解析 曹闪闪, 段玉森, 高婵婵, 苏玲, 杨怡萱, 张洋, 蔡超琳, 刘敏 (2668)
- 石家庄市臭氧和二氧化氮的时空演替特征及来源解析 王帅, 聂赛赛, 冯亚平, 崔建升, 陈静, 刘大喜, 石文雅 (2679)
- 基于光化学指数的邯郸市臭氧生成敏感性 牛元, 程水源, 欧盛菊, 姚诗音, 沈泽亚, 关攀博 (2691)
- 基于 Landsat 数据的关中盆地腹地 AOD 时空格局及城市化对其影响 郑玉蓉, 王旭红, 张秀, 胡贵贵, 梁秀娟, 牛林芝, 韩海青 (2699)
- 基于卫星遥感和地面观测的人为源 VOCs 区域清单多维校验 王玥, 魏巍, 任云婷, 王晓琦, 陈赛赛, 程水源 (2713)
- 中原城市群国家干线公路 SOA 生成潜势估算 王娜萍, 李海萍, 张帆 (2721)
- 北京市“大气十条”实施的空气质量改善效益 卢亚灵, 范朝阳, 蒋洪强, 牛传真, 李勃 (2730)
- 工业大气污染源排放绩效定量评价及应用 李廷昆, 冯银厂, 吴建会, 毕晓辉, 张裕芬 (2740)
- 基于生态风险的我国水环境高风险抗生素筛选排序 周力, 刘珊, 郭家骅, 李琦 (2748)
- 基于 RDA-REM 模型的我国再生水开发利用潜力 郑锦涛, 马涛, 刘九夫, 彭安帮, 邓晰元, 郑皓 (2758)
- 基于模型研究质量评价的 SWAT 模型参数取值特征分析 荣易, 秦成新, 杜鹏飞, 孙博 (2769)
- 大型浅水湖泊水质模型边界负荷敏感性分析 王亚宁, 李一平, 程月, 唐春燕, 陈刚 (2778)
- 不同流域水陆过渡带磷有效态的特征对比及环境意义 朱海, 袁旭音, 叶宏萌, 成瑾, 毛志强, 韩年, 周慧华 (2787)
- 基于不同赋权方法的北运河上游潜在非点源污染风险时空变化特征分析 李华林, 张建军, 张耀方, 常国梁, 时迪迪, 徐文静, 宋卓远, 于佩丹, 张守红 (2796)
- 长期施肥和耕作下紫色土坡耕地径流 TN 和 TP 流失特征 吴小雨, 李天阳, 何丙辉 (2810)
- 渭河和泾河流域浅层地下水水化学特征和控制因素 刘鑫, 向伟, 司炳成 (2817)
- 太湖流域上游南苕溪水夏季水体溶存二氧化碳和甲烷浓度特征及影响因素 梁佳辉, 田琳琳, 周钟昱, 张海阔, 张方方, 何圣嘉, 蔡廷江 (2826)
- 低温期浅水湖泊氮的分布及无机氮扩散通量: 以白洋淀为例 文艳, 单保庆, 张文强 (2839)
- 覆盖条件下底泥微环境对内源磷释放的影响 陈姝彤, 李大鹏, 徐楚天, 张帅, 丁玉琴, 孙培荣, 黄勇 (2848)
- 圩区河道底泥腐殖酸对重金属和抗生素的共吸附 薛向东, 杨宸豪, 于荐麟, 庄海峰, 方程冉 (2856)
- 两种 PPCPs 对雅鲁藏布江沉积物硝化作用的影响 凌欣, 徐慧平, 陆光华 (2868)
- 铁碳微电解及沸石组合人工湿地的废水处理效果 赵仲婧, 郝庆菊, 张尧钰, 熊维霞, 曾唯, 陈俊江, 江长胜 (2875)
- CDs-BOC 复合催化剂可见光下活化过硫酸盐降解典型 PPCPs 雷倩, 许路, 艾伟, 李志敏, 杨磊 (2885)
- pg-C₃N₄/BiOBr/Ag 复合材料的制备及其光催化降解磺胺甲噁唑 杨利伟, 刘丽君, 夏训峰, 朱建超, 高生旺, 王洪良, 王书平 (2896)
- 海藻酸钠负载硫化零价铁对水体中 Cr(VI) 的还原去除 王旭, 杨欣楠, 黄币娟, 刘壮, 牟诗萌, 程敏, 谢燕华 (2908)
- 超顺磁性纳米 Fe₃O₄@SiO₂ 功能化材料对镉的吸附机制 张立志, 易平, 方丹丹, 王强 (2917)
- 典型药物在医院废水和城市污水处理厂中的污染特征及去除情况 叶璞, 游文丹, 杨滨, 陈阳, 汪立高, 赵建亮, 应光国 (2928)
- 印染废水循环利用抗生素抗性基因丰度变化特性 徐瑶瑶, 王锐, 金鑫, 石炬, 王岩, 金鹏康 (2937)
- 短程硝化反硝化除磷颗粒污泥的同步驯化 王文琪, 李冬, 高鑫, 刘博, 张杰 (2946)
- 厌氧氨氧化颗粒污泥的长期保藏及快速活性恢复 李冬, 刘名扬, 张杰, 曾辉平 (2957)
- 市政污泥热解过程中重金属迁移特性及环境效应评估 姜媛媛, 王彦, 段文焱, 左宁, 陈芳媛 (2966)
- 不同作物农田土壤抗生素抗性基因多样性 黄福义, 周曙仝, 王佳妮, 苏建强, 李虎 (2975)
- 宁夏养牛场粪污和周边土壤中抗生素及抗生素抗性基因分布特征 张俊华, 陈睿华, 刘吉利, 尚天浩, 沈聪 (2981)
- 温度和搅拌对牛粪厌氧消化系统抗生素抗性基因变化和微生物群落的影响 许继飞, 张秋萍, 朱天骄, 秦帅, 朱文博, 庞小可, 赵吉 (2992)
- 小麦秸秆生物质炭施用对不同耕作措施土壤碳含量变化的影响 刘振杰, 李鹏飞, 黄世威, 金相乐, 张阿凤 (3000)
- 农牧交错带典型区土壤氮磷空间分布特征及其影响因素 张燕江, 王俊鹏, 王瑜, 张兴昌, 甄庆, 李鹏飞 (3010)
- 汞矿区周边土壤重金属空间分布特征、污染与生态风险评价 王锐, 邓海, 贾中民, 王佳彬, 余飞, 曾琴琴 (3018)
- 调理剂对磷镉富集土壤中两种元素交互作用的影响 黄洋, 胡学玉, 曹坤坤, 张敏, 胡晓晓, 王子劲 (3028)
- S-烯丙基-L-半胱氨酸缓解水稻种子幼根和幼芽镉胁迫机制 程六龙, 黄永春, 王常荣, 刘仲齐, 黄益宗, 张长波, 王晓丽 (3037)
- 连续 4 个生长季大气 CO₂ 升高与土壤铅 (Pb) 污染耦合下刺槐幼苗根际土壤微生物特征 贾夏, Lkhagvajargal Khadkurel, 赵永华, 张春燕, 张宁静, 高云峰, 王子威 (3046)
- 嗜热脂肪地芽孢杆菌对聚苯乙烯的降解性能 邢睿智, 赵子强, 赵文琪, 陈志, 陈金凤, 周顺桂 (3056)
- 冬青和女贞叶表面颗粒物微形态及叶际细菌群落结构 李慧娟, 徐爱玲, 乔凤祿, 蒋敏, 宋琪 (3063)
- 罗红霉素对大型溛孳殖生长及抗氧化系统的影响 张凌玉, 刘建超, 冷阳, 陆光华 (3074)
- 中国粮食作物产量和木本植物生物量与地表臭氧污染响应关系 冯兆忠, 彭金龙 (3084)

基于 Landsat 数据的关中盆地腹地 AOD 时空格局及城市化对其影响

郑玉蓉^{1,2,3}, 王旭红^{1,2,3*}, 张秀^{1,2,3}, 胡贵贵^{1,2}, 梁秀娟^{1,2,3}, 牛林芝^{1,2,3}, 韩海青^{1,2,3}

(1. 西北大学城市与环境学院, 西安 710127; 2. 西北大学陕西省地表系统与环境承载力重点实验室, 西安 710127; 3. 西北大学陕西西安城市生态系统定位观测研究站, 西安 710127)

摘要: 气溶胶光学厚度 (aerosol optical depth, AOD) 是气溶胶最基本的光学特性之一, 表征气溶胶对光的消减作用, 对区域大气污染有一定的指示作用. 首先, 以 2000 ~ 2019 年长时间序列 MOD09A1 产品数据为基础, 利用 ASTER 波谱数据库, 构建了 Landsat TM/OLI 蓝光波段地表反射率数据集, 利用深蓝算法 (deep blue algorithm, DB) 对关中盆地腹地 AOD 进行了反演估算. 其次, 通过测算 2000 ~ 2019 多年平均/各年平均 AOD 和季节 AOD 值, 研究分析了 AOD 空间分布特征和时间变化趋势; 利用经验正交函数分析方法 (empirical orthogonal function, EOF) 剖析了 AOD 主要的空间分布模式. 最后, 探索分析了城市化对 AOD 时空分布特征的影响. 结果表明: ① 研究区多年平均 AOD 空间分布受地形和人类活动影响显著, 低海拔且人类活动强度大的盆地内部 AOD 值和变化幅度均高于周围山系. AOD 呈现出明显的季节差异性: 春季 (0.34) > 夏季 (0.33) > 秋季 (0.23) > 冬季 (0.12), 夏季 AOD 区域差异性最大. ② 年均 AOD 呈先增大后减小再增大的变化趋势, 2005 年达到最大值; 春夏两季 AOD 数值分布离散, 而冬季则表现为低值集聚的状态. ③ EOF 分析结果表明, 研究区 AOD 存在 3 种主要的空间分布模式: 第一, AOD 空间分布模式表现为区域一致型, 特征向量空间分布与海拔梯度一致, 反映了不同海拔下 AOD 变化程度的差异; 第二, 以秦岭山脉为界, 大致呈现南北反相的分布特征, 反映出关中盆地地域发展的独特性和与南部秦岭山区的差异性; 第三, “东南-西北”的分布格局, 表明了 AOD 在“城镇-乡村”呈反相变化趋势; ④ 研究区 AOD 值与常住人口密度 ($R^2 = 0.707, P < 0.05$)、不透水面密度 ($R^2 = 0.377, P < 0.05$) 以及工业 POI 密度 ($R^2 = 0.727, P < 0.05$) 呈正相关关系, 说明城市化对 AOD 时空分布有一定影响. 本研究对加强关中盆地空气质量监测和城市生态环境建设具有重要的意义.

关键词: 气溶胶光学厚度 (AOD); 深蓝算法 (DB); 经验正交函数分析方法 (EOF); 时空变化; 城市化

中图分类号: X87 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)06-2699-14 DOI: 10.13227/j.hjxx.202010018

Spatiotemporal Distribution of Aerosol Optical Depth Based on Landsat Data in the Hinterland of the Guanzhong Basin and Its Relationship with Urbanization

ZHENG Yu-rong^{1,2,3}, WANG Xu-hong^{1,2,3*}, ZHANG Xiu^{1,2,3}, HU Gui-gui^{1,2}, LIANG Xiu-juan^{1,2,3}, NIU Lin-zhi^{1,2,3}, HAN Hai-qing^{1,2,3}

(1. College of Urban and Environmental Science, Northwest University, Xi'an 710127, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity, Northwest University, Xi'an 710127, China; 3. Shaanxi Xi'an Urban Forest Ecosystem Research Station, Northwest University, Xi'an 710127, China)

Abstract: Aerosol optical depth (AOD) is one of the most fundamental optical properties of aerosols that characterizes the attenuation of light by aerosols and is an indicator of regional air pollution. Based on the blue band surface reflectance database from the MOD09A1 products for the period 2000-2019 and the ASTER spectral database, AOD was estimated from Landsat TM/OLI data using the deep blue algorithm (DB). Multi-year average/annual average and seasonal AOD values for the period 2000-2019 were then calculated to analyze the spatial characteristics and temporal variations of AOD using the empirical orthogonal function method (EOF). Furthermore, the impacts of urbanization on the spatio-temporal distribution of AOD were analyzed. The obtained results are summarized as follows: ① The multi-year average AOD spatial distribution in the hinterland of the Guanzhong Basin was significantly affected by topography and human activities, with higher AOD values and variations in areas of low altitude and high-intensity human activities compared to the surrounding mountains. Thus, changes in AOD in the study area are mainly affected by anthropogenic factors. AOD also showed significant seasonal variations, whereby spring (0.34) > summer (0.33) > autumn (0.23) > winter (0.12), and the largest regional differences occurred in summer; ② The annual average AOD (from 2000-2019) showed the trend of “increase-decrease-increase”, and reached a maximum in 2005, with the high AOD area gradually moving to the south. The distribution of AOD values in spring and summer was relatively discrete, while it is in a low-value agglomeration state in winter; ③ Three main AOD spatial distribution modes were identified based on the EOF, which had cumulative contribution rate of 83.0%. The spatial distribution trend of AOD showed regional consistency, with feature vectors consistent with the altitude, thus reflecting the difference of AOD at different altitudes. Taking the Qinling Mountains as the dividing line, the AOD presented the “north-south” pattern, AOD showed a “north-south”

收稿日期: 2020-10-07; 修订日期: 2020-11-19

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41971387, 41071271); 陕西省自然科学基金研究计划项目 (2020JM-430)

作者简介: 郑玉蓉 (1996 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为城市环境遥感, E-mail: 3246671038@qq.com

* 通信作者, E-mail: jzy_wxh@nwu.edu.cn

pattern, reflecting the uniqueness of the regional development in the Guanzhong Basin compared to the southern Qinling Mountains. The “southeast-northwest” distribution pattern indicated that the AOD presented a reverse change trend between urban and non-urban; and ④ The results of correlation analysis between the AOD and urbanization revealed a positive correlation with permanent population density ($R^2 = 0.707$, $P < 0.05$), impervious surface density ($R^2 = 0.377$, $P < 0.05$), and industrial POI density ($R^2 = 0.727$, $P < 0.5$). These results are significant for improving the monitoring of air quality in the Guanzhong Basin and for the construction of an urban ecological environment.

Key words: aerosol optical depth (AOD); deep blue algorithm (DB); empirical orthogonal function (EOF); spatial and temporal changes; urbanization

大气气溶胶是指悬浮于空气中的气态或固态微粒,其尺度范围大约在 $0.001 \sim 10 \mu\text{m}$ 之间,可分为人为源和自然源^[1]. 大气中气溶胶含量虽少,但却对人体健康、气候变化和大气物理化学过程有重要作用^[2,3]. 气溶胶对太阳辐射的多次吸收改变了地面吸收太阳辐射能量,同时气溶胶作为云的凝结核,改变了云的辐射特性和变化周期^[4],间接影响了局地气候. 由于大气气溶胶短暂的生命周期以及物理和化学特征的高度时空可变性^[5],气溶胶辐射强迫作用有较大的不确定性,是目前造成地气总净辐射强迫估计值和预测气候变化不确定性的主要原因之一^[6,7],其时空分布特征、辐射强迫和气候效应对于研究全球、区域气候特征和变化有着重要的意义^[8],因此大气气溶胶越来越成为研究的难点和热点.

气溶胶光学厚度(aerosol optical depth, AOD)是描述地球大气系统中气溶胶光学特性的重要参数之一,主要用来描述气溶胶对光的消减作用,反映了大气的污染程度,预示着空气质量. 目前气溶胶光学厚度的遥感研究方法主要包括地基站点量测和卫星遥感观测这 2 种. 地基站点量测是获取 AOD 最精确和最直接的方式,但地面监测太阳光度计运行成本高、站点分布不均匀且空间连续性差,无法满足区域性 AOD 监测和反演的要求. 卫星遥感因实时性、连续性、覆盖范围广和可获得性等优点,为气溶胶的反演和应用提供了有效的数据源,因而受到越来越多的重视,特别是随着遥感技术和数据处理方法的不断完善,使得实时和动态地获取不同时空尺度上气溶胶光学特性成为可能. 随着卫星遥感应用的不断深入,学者们提出并发展了多种 AOD 反演算法,包括暗目标算法(dark target, DT)^[9]、结构函数法^[10]、偏振特性遥感法^[11]、云顶 AOD 法^[12]和深蓝算法(deep blue, DB)^[13,14]. 然而,这些算法都有特定的使用条件和研究区域,且大多数算法对高反射率目标区域适用性较差,针对亮地表的陆地气溶胶反演,DB 算法已成功应用于撒哈拉沙漠、阿拉伯半岛等干旱和半干旱地区^[15],该算法基于特定时期内地表反射率不变或者变化不大的假设前提,利用事先建立的地表反射率数据库来实现 AOD 的反演. 为了提

高反射率且结构复杂的城市区域 AOD 反演效果,学者们对 DB 算法不断完善和发展,提出了不同的地表数据集构建方法,现已被应用于中高分辨率遥感气溶胶光学厚度的反演中,成为高反射率且地表结构复杂的小范围区域 AOD 反演的重要方法^[15,16],极大提高了 AOD 的反演精度.

MODIS 气溶胶产品数据因其长时间序列、高时间分辨率、可靠数据精度、产品类型多、反演算法多样且针对性较强等优势而得到广泛应用^[17-21],该产品对大范围区域内气溶胶光学特征的描述有一定意义,但由于卫星空间分辨率低,对小范围小区域且地表复杂区域的 AOD 反演存在细节描述较差等问题^[22,23]. 基于此,学者们提出并不断完善中高分辨率遥感卫星 AOD 反演方法,其中 Landsat 系列数据因其空间分辨率高、时间序列较长,而得到广泛应用^[22-24]. 从国内的研究来看,基于 Landsat 卫星影像,利用深蓝算法的城市地区高分辨 AOD 反演已经取得一定成果,但大多数集中于对我国中东部发达城市,在我国西部地区研究较少.

近些年,我国的城市化水平不断提高,城市化率从 1998 年的 33.4% 提高到 2019 年的 60.6%,年均增长为 1.3 个百分点(<http://data.stats.gov.cn>),到 2018 年底,我国城市建成区面积是 1998 年的 2.7 倍^[25]. 随着城市化进程的不断加速,大气颗粒物逐渐成为影响城市环境的首要污染物,灰霾天气频发,呈现出多发性、严重化、区域化等诸多特点,城市污染已由点源污染演变为区域污染,导致了生物多样性减少、城市热岛等一系列的环境问题. 特别是受工业化的影响而导致的能源消耗和排放剧增,大量的工业废气、汽车尾气、建筑扬尘的排放给城市生态环境带来威胁,因此定量探究城市化背景下 AOD 时空变化,对城市化进程中城市生态环境建设具有重要的意义. 基于此,本文首先利用 2000 ~ 2019 年典型年份的 MOD09A1 数据,构建 500 m 月尺度的蓝光波段地表反射率数据集,分析不同地物在 Landsat TM/OLI 传感器蓝波段和 MODIS 传感器蓝光波段的光谱响应差异,实现波段修正. 然后,使用 Landsat 系列影像和 DB 算法对关中盆地主要城市群在内的区域 AOD 进行反演估

计, 基于经验正交函数分析模型 (empirical orthogonal function, EOF) 对研究区 AOD 时空分布格局和变化趋势进行分析. 最后, 通过定量分析 AOD 和研究区人口密度、不透水面覆盖率以及工业 POI 密度之间的相关性, 揭示城市化背景下 AOD 时空变化的主要影响因素.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于关中盆地腹地, 地理位置为 $107.68^{\circ} \sim 109.89^{\circ} \text{E}$, $33.74^{\circ} \sim 35.50^{\circ} \text{N}$, 是陕西省重要的工业基地. 地形条件复杂, 北临黄土高原沟壑区, 中部为渭河平原, 南部为秦岭山脉, 海拔介于

208 ~ 3537m 之间. 随着工业迅速发展、城市化过程的不断加速, 研究区人为污染排放源 (如煤炭化石燃烧、工业废气和汽车尾气等) 不断增加, 对城市公共健康和城市生态环境造成很大的影响. 此外, 西窄、东宽和南北高的特殊喇叭口状地形阻隔了污染物的扩散, 加之关中城市群年静风频率很高, 全年主导风向为东北风, 特殊地形和不利的天气条件影响下, 气溶胶扩散条件差, 扩散动力弱, 从而导致重雾-霾天气频发^[26], 已成为我国雾-霾日数最多的地区之一^[27]. 研究区范围内的主要区县共 34 个, 包括西安市全部区县、咸阳市全部区县、渭南市的临渭区、富平县和蒲城县、铜川市的耀州区、王益区和印台区, 见图 1.

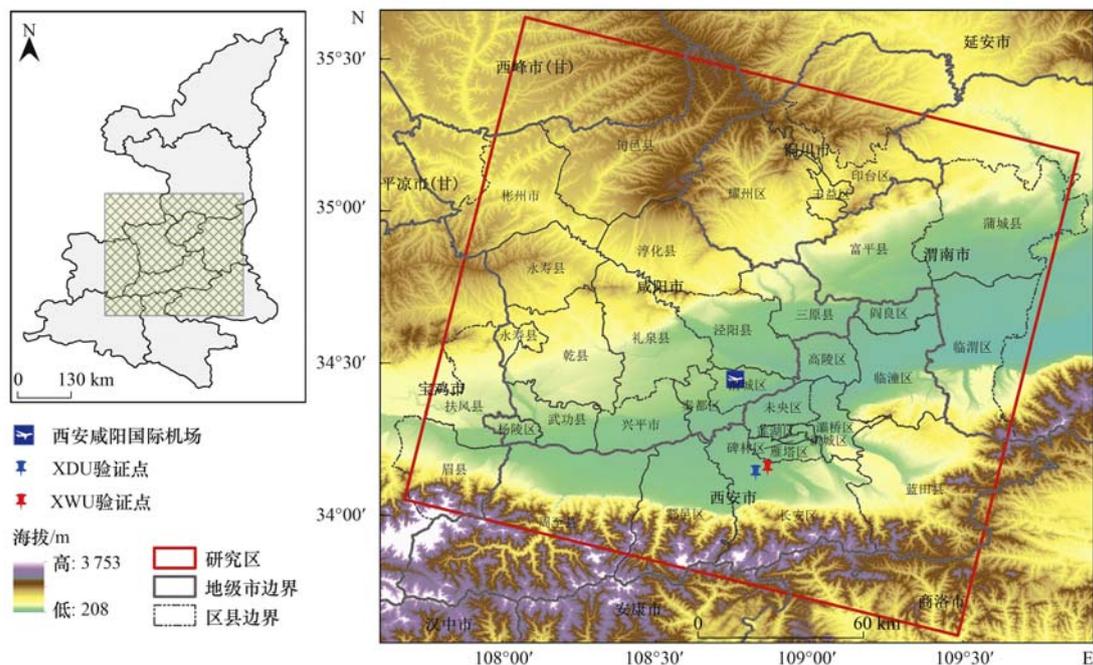


图 1 研究区概况示意

Fig. 1 Overview map of the study area

1.2 数据来源

1.2.1 Landsat 系列产品

Landsat 系列数据来自 USGS 官网 (<http://www.usgs.gov/>), 空间分辨率为 30 m. 分别下载研究区 2000、2005 和 2010 年的 Landsat TM 以及 2015 年和 2019 年的 Landsat OLI 晴空优质影像数据 (表 1). 对于影像出现缺失的月份, 采用前后 1 a 的影像予以补充^[15] (2000 年数据缺失严重, 采用后两年的予以补充), 确保每个月尽量有一景影像. 对其进行预处理后用于 AOD 的反演.

1.2.2 MOD09A1 数据

MOD09A1 地表反射率产品数据来自 NOAA 官网 (<https://ladsweb.nascom.nasa.gov/arch/>), 下载研究区 2000 ~ 2019 年的 MOD09A1 地表反射率产品

数据, 基于绝大部分地物在短时间内地表反射率保持不变的特点, 采用最小值合成法获取 500m 分辨率蓝光波段最小值地表反射率月产品数据集, 通过波段修正来构建 Landsat 系列数据蓝光波段真实地表反射率数据集, 该方法可以有效地消除云的影响^[15].

1.2.3 MOD04_L2 产品数据

MODIS C6.1 版 MOD04_L2 气溶胶产品数据来自 NOAA 官网 (<https://ladsweb.nascom.nasa.gov/arch/>), 分辨率为 10 km, 该产品提供了基于 DT 算法、DB 算法和暗像元-深蓝算法相融合的 3 种日产品 AOD 数据, 下载与 Landsat 卫星过境时间相同的 MOD04_L2 数据, 选择其中基于 DB 算法的 AOD 产品进行反演精度验证.

表 1 气溶胶反演采用的 Landsat TM/OLI 数据

Table 1 Landsat TM/OLI images used for AOD retrieval

成像日期 (年-月-日)	太阳方位角 /(°)	太阳高度角 /(°)	云量/%	成像日期 (年-月-日)	太阳方位角 /(°)	太阳高度角 /(°)	云量/%
2000-05-20	115.1	62.5	0.00	2010-11-08	156.6	35.5	0.00
2000-12-30	152.1	26.8	15.00	2010-11-24	157.4	31.6	0.00
2001-01-15	149.6	27.9	0.00	2011-01-11	152.8	28.5	2.00
2001-03-04	140.4	40.5	1.00	2011-04-17	132.6	57.4	2.00
2001-03-20	136.9	46.4	0.00	2011-06-04	114.6	66.1	3.00
2002-06-11	108.8	63.7	1.00	2014-05-11	127.4	65.2	0.68
2002-07-29	113.9	59.7	11.00	2014-11-03	159.0	37.8	1.12
2002-08-30	128.3	53.9	1.00	2014-11-19	160.1	33.5	0.32
2002-10-01	142.4	45.4	0.00	2014-12-05	159.8	30.3	0.21
2002-10-17	147.5	40.5	23.00	2014-12-21	158.3	28.7	0.25
2002-11-02	150.9	35.7	18.00	2015-04-28	132.4	62.1	0.09
2004-01-24	147.9	29.1	1.00	2015-07-01	114.6	67.4	7.93
2004-02-09	144.8	32.8	1.00	2015-08-02	123.6	63.6	21.63
2004-04-29	124.8	59.5	1.00	2015-10-21	156.7	41.9	7.56
2004-05-31	113.0	64.4	17.00	2016-01-25	152.9	31.5	2.91
2005-03-31	136.4	51.4	14.00	2016-03-13	144.4	46.5	6.79
2005-06-19	110.9	65.8	4.00	2016-05-16	125.2	66.2	0.43
2005-09-07	137.0	54.0	4.00	2016-06-17	115.2	68.2	0.00
2005-10-09	149.9	44.5	1.00	2018-10-29	158.2	39.3	0.04
2005-10-25	153.9	39.5	2.00	2019-01-17	154.2	30.2	0.04
2005-11-26	157.2	31.0	0.00	2019-03-06	145.8	43.6	24.33
2006-07-24	117.7	63.8	3.00	2019-04-07	139.0	55.5	0.14
2006-08-09	124.5	61.3	11.00	2019-05-09	128.3	64.8	43.71
2006-12-15	157.6	28.7	3.00	2019-05-25	121.9	67.3	1.67
2008-12-04	155.8	29.2	1.00	2019-06-10	116.7	68.2	31.79
2009-01-21	149.9	29.5	1.00	2019-07-28	121.6	64.5	10.48
2009-06-14	111.8	66.1	1.00	2019-08-13	128.9	61.7	2.76
2009-06-30	111.1	65.4	0.00	2019-08-29	136.9	58.1	2.10
2010-03-13	141.7	45.2	10.00	2019-09-30	150.9	48.8	3.23
2010-04-30	128.3	61.4	0.00	2019-12-03	160.0	30.7	1.67
2010-06-17	112.1	66.4	1.00	2020-02-05	151.0	34.1	21.97
2010-10-07	149.8	45.4	1.00	2020-02-21	148.2	38.9	4.01

1.2.4 CE-318 太阳光度计观测数据

选取 2 个地面监测站点(西北大学和西安电子科技大学校内)CE-318 太阳光度计的实测数据作为辅助数据,对 Landsat 卫星 DB 算法反演的 AOD 数据进行验证。CE-318 太阳光度计是一种自动跟踪扫描太阳辐射计,主要用于反演计算大气透过率、气溶胶光学厚度和大气可降水量等。由于 Landsat 系列卫星反演结果为 550 nm 波段处的 AOD,而 CE-318 太阳光度计没有 550 nm 处 AOD 的直接观测结果,为统一比较,根据 Ångström 指数公式^[28],利用 440 nm 和 670 nm 处的地基观测数据计算获取太阳光度计在波长为 550 nm 处的 AOD 值,计算公式为:

$$\tau(\lambda) = \beta \cdot \lambda^\alpha$$

式中, $\tau(\lambda)$ 为波长 λ 处 AOD 值, α 为 Ångström 指数, β 为大气浑浊度系数。

为降低时间尺度的影响,对卫星过境前后 30 min 内实测 AOD 550 nm 地基观测结果进行平

均^[15]。

1.2.5 气象数据

气象数据采用 GLDAS 数据(<https://disc.gsfc.nasa.gov/hydrology>),该数据是利用 GLDAS 与 Noah 相结合的空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 的 v2.1 产品,该数据已通过大量验证^[29,30],可用于气象因子和 AOD 相关关系分析。

1.2.6 城市化相关数据

选择能够表征城市化水平的相关数据,包括人口数量(2005 年仅有西安市各区县的人口数据)、不透水面面积和 POI 点数据(包括工厂 POI、产业园 POI 和工业园 POI)。人口数据来自陕西省统计年鉴(<http://tjj.shaanxi.gov.cn/>)和各地级市的统计年鉴数据;不透水面数据来自宫鹏等^[31]提供的全球不透水面数据集(Global Artificial Impervious Areas, GAIA)(<http://data.ess.tsinghua.edu.cn/>),空间分辨率为 30 m,该数据集给出了及时、准确的

不透水面信息; POI 数据通过百度地图 API 获取 (<http://lbsyun.baidu.com/>); 以这些数据作为辅助数据来探讨城市化对 AOD 影响。

1.3 研究方法

1.3.1 基于 Landsat TM/OLI 数据的 AOD 反演

由于暗像元算法等其他算法受地表反射率的限制,无法满足对城市等高反射率复杂地表 AOD 研究. 因此本文选用深蓝算法对关中盆地 AOD 进行估算,详细 AOD 反演方法见文献[15]. 查找表构建和地表反射率确定这两部分是深蓝算法的关键步骤,其中,地表真实反射率的估算是影响 AOD 反演精度的核心步骤,考虑到不同传感器的波谱响应函数存在差异,参照田信鹏等[22]所使用的方法,利用 ENVI 中自带的 ASTER 波谱数据库中的植被、土壤、岩石等不同典型地物的光谱曲线,通过卷积运算模拟建立了 MODIS 和 Landsat OLI 及 TM5 蓝光波段光谱转换统计模型,结果如图 2 所示。

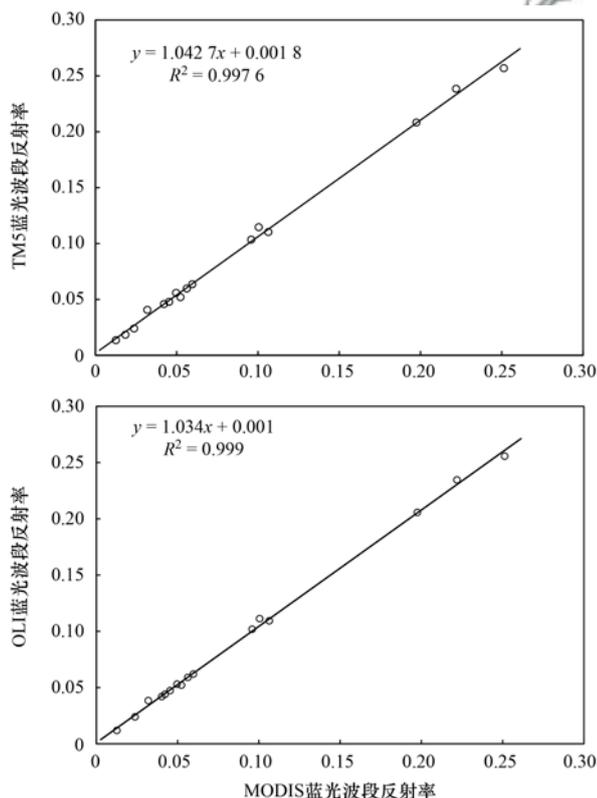


图 2 MODIS 和 Landsat 系列卫星蓝光波段地表反射率线性回归分析

Fig. 2 Linear regression analysis of MODIS and Landsat OLI/TM5 blue band reflectance data

从图 2 中可以看出,MODIS 与 TM5、OLI 传感器在蓝光波段的反射率存在一定的差异,TM5 和 OLI 数据的反射率略大于 MODIS 产品,回归分析结果表明得到的 MODIS、OLI 和 TM5 蓝波段地表反射率转换模型的拟合度都在 99% 以上,两者具有较强的相关性。

1.3.2 经验正交函数分析方法

经验正交函数分析方法 (EOF) 由 Pearson 提出[32], 20 世纪 50 年代被 Loren[33] 引入气象学研究中,现在已被地学相关的研究所广泛应用[34,35]. EOF 分析方法是了解释单独场的时空分布格局,对分布不规则的要素场进行时空分解,识别出主要的相互正交的空间分布型,得到的各特征向量(空间模态和时间系数)相互正交,其中特征向量在一定程度上可反映要素场的空间分布模式,时间系数反映相应空间模态随时间的权重变化[36].

1.3.3 单因素方差分析

方差分析是英国统计学家 R. A. Fisher 于 1923 年提出的一种统计方法,单因素方差分析 (one way ANOVA) 是对单因素的实验结果进行分析,其通过 F 值或 P 值检验某个因素对结果是否有显著性影响、影响的力度以及各来源变量对变异结果的贡献程度,这种检验是对整体结果的验证. 本文利用单因素方差分析方法对城市化指示指标(常住人口密度、不透水面密度和 POI 密度)对 AOD 的影响程度进行量化,采用 Fisher 最小显著性差异 (LSD) 方法检验不同等级城市化指标对应 AOD 的组间差异。

1.3.4 Pearson 相关分析方法

皮尔逊相关系数 (Pearson correlation coefficient), 常被用来度量两个变量之间的相关性(线性相关),其值介于 $-1 \sim 1$ 之间,其绝对值越大,两个变量的相关性越大,系数为 0 意味着两个变量之间无线性关系. 本文利用 Pearson 相关分析方法来量化气象因子和城市化指示因子对 AOD 的影响程度。

2 结果与分析

2.1 精度验证

由于关中盆地没有 Aeronet 站点分布,利用卫星过境时间与 CE-318 太阳光度计实测、MOD04_L2 过境时间重合的数据对反演结果进行精度验证(图 3). 由图 3(a) 和 3(b) 可知, AOD 反演结果与两个地面监测站数据具有良好的相关性 (R^2 分别为 0.973 和 0.975), 且整体误差较小 (RMSE 分别为 0.098 和 0.075). MODIS 气溶胶产品数据 (MOD04_L2) 已得到广泛地应用和验证[37,17~21], 将遥感影像反演 AOD 与 MOD04_L2 气溶胶产品数据进行反演对比发现两者结果整体变化趋势基本一致 [$R^2 = 0.942$, RMSE = 0.084, 图 3(c)]. 无论是 CE-318 太阳光度计观测数据还是 MOD04_L2 数据, 都与 Landsat 系列数据反演 AOD 的趋势一致, 且参与对

比验证的数据点多位于 MODIS 气溶胶产品的误差线范围内,表明深蓝算法在研究区反演的 AOD 数据质量较为可信。

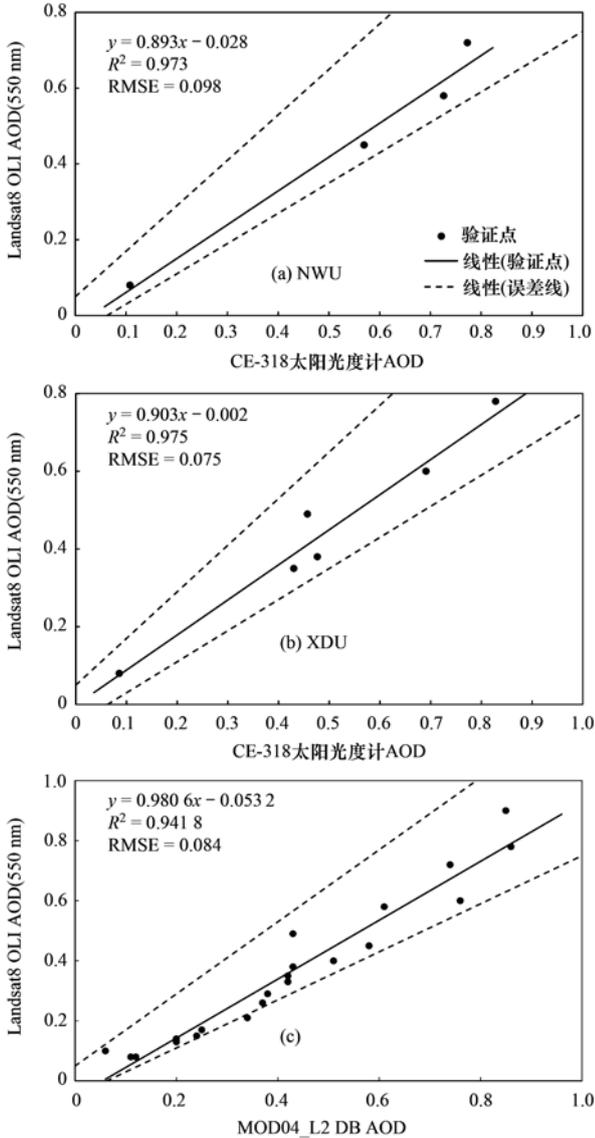


图3 Landsat 反演结果与 CE-318 太阳光度计观测值及 MOD04 产品对比结果

Fig. 3 Comparison between AOD retrieved from Landsat images, CE-318 solar photometer observations, and the MOD04 product

2.2 AOD 空间分布特征

整体来讲,多年平均 AOD 的空间分布受海拔影响显著(图 4),二者呈反相分布:低海拔的关中盆地内 AOD 浓度普遍较高,而高海拔的南北山脉 AOD 普遍较低,盆地内部和南北山脉之间分界线明显,且盆地内部和山脉之间 AOD 变化梯度较为平滑. AOD 大于 0.5 的高值区离散分布于盆地腹地,这些都是低海拔地区,相较而言高海拔的北部山区和南部秦岭山脉的 AOD 浓度普遍偏低;次高值和次低值区域分别以高值区和低值区为靶区随海拔梯度向外扩张,表明地形对 AOD 的空间分布特征有显著影响。

同时,盆地内部工业较为发达区县的 AOD 普遍高于周围区县,且高值中心与工业 POI 点位分布较为吻合,表明 AOD 空间分布受局地排放源的影响也很大.此外,在西安市中心新城区、碑林区和莲湖区 AOD 值较低,这可能是因为这些区县属于建成区,建筑扬尘排放很少,且这些区域污染工厂分布较少,工业污染物排放源较少,这种分布特征和研究区城市规划发展战略相吻合。

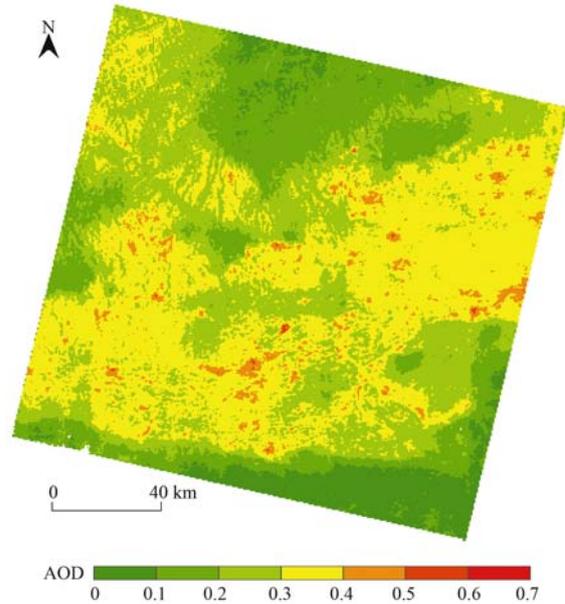


图4 多年平均 AOD 空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of multi-year mean AOD

由图 5 可知,2000 ~ 2019 年年均 AOD 空间分布呈现明显的区域差异性.人类活动较少的且海拔较高的北山山系和南部秦岭山脉 AOD 值变化较小,且一直为 AOD 的低值中心;而在经济发展较快,人口密度大的盆地内部 AOD 值变化很明显,表明地形和人类活动对 AOD 空间分布的影响极为显著.从 2000 ~ 2019 年 AOD 高值区域逐渐南移,进一步说明了关中城市群快速扩张、工业快速发展等所产生的建筑扬尘、工厂废气和汽车尾气等局地人为污染物排放源对 AOD 分布特征的影响.同时通过与研究区矢量数据和 POI 点位数据的叠加分析发现,咸阳市渭城区是污染较为严重的区域,常年 AOD 居于高值,这主要是由于渭城区地处关中-天水经济区和西咸新区的核心区,经济发展较快,工业污染源点多,加之在常年主导风向的影响下,北部黄土高原扬沙和扬尘以及周围区县工业污染物的排放、扩散和输送使得渭城区成为气溶胶受体区域,进一步加剧了该区域的污染程度.其中西安咸阳国际机场一直为渭城区 AOD 高值中心,对渭城区 AOD 的贡献最大,主要是机场内大量的尾气的排放加之巨大的客流量都使得该区域成为 AOD 高值的集中区域,这进

一步说明了人类活动对 AOD 变化的影响. 此外, 在盆地内部东部 AOD 稍大于西部, 且在东部城市 AOD 的变化幅度和年际空间差异性更大, 这可能是因为这些区域是煤炭和钢铁等重型工业的集中分布

区域且关中盆地东部为整个关中城市群污染物以及陕北沙尘向下输送的通道, 在西风带环流和秦岭山脉的共同影响下成为自然源大粒子和人为源细粒子的汇集区^[38].

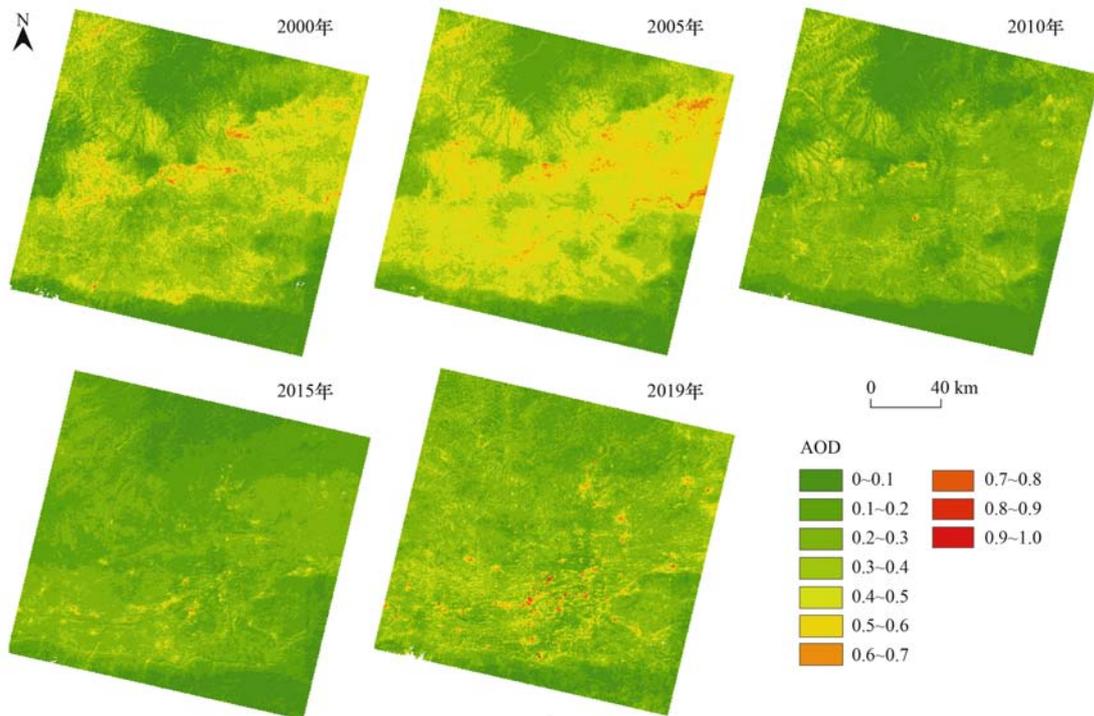


图5 典型年份年均 AOD 空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of annual average AOD in typical years

整体来看, 研究区不同季节 AOD 的空间分布与大尺度地形分布特征相吻合, 但 AOD 呈现出明显的季节差异性(图 6), 均值排序为春季(0.34) > 夏季(0.33) > 秋季(0.23) > 冬季(0.12). 春季相较于其他三季, AOD 值最高. 这主要是由于研究区位于黄土高原下游地区, 春季温度回暖, 但地表植被覆盖低, 黄土高原西北地区冷气团活动形成扬沙甚至沙尘暴, 在大气环流作用下向关中地区输送^[27,39], 使得关中地区成为气溶胶的受体地区. 夏季 AOD 浓度较高源于夏季的高温(表 2), 夏季 AOD 与气温呈显著正相关关系($P = 0.55$), 高温天气和丰富的水汽使得“气-粒”转换作用更易发生, 有助于气溶胶粒子的生长^[40,41]. 同时静风天气增加, 风速减弱, 且易出现逆温现象导致气溶胶扩散动力减弱, 使得大气污染物更易堆积^[42]; 同时, 关中盆地是陕西省粮食作物的主要产区, 大量的焚烧秸秆加剧了气溶胶的载荷^[43], 人类活动对 AOD 的影响逐渐突出; 但夏季降水增多, 降水量对 AOD 的冲刷沉降作用($P = -0.363$)减弱一部分 AOD, 使夏季 AOD 浓度低于春季. 秋冬季 AOD 和气温、相对湿度呈显著正相关关系, 表明该季节 AOD 浓度空间分布受气温和湿度影响较大. 冬季是研究区污染相对较严重的季节, 但

冬季的 AOD 值偏低, 这可能是因为冬季边界层高度相对夏季偏低^[44], 污染物相对夏季更集中于近地面, 且部分重度污染天气发生时天空云量相对较多, 卫星观测无法得到准确的光学厚度值^[45]等原因造成的.

表 2 AOD 与气象因素的皮尔逊相关系数¹⁾

Table 2 The P values of significant differences of between AOD and meteorological factors

	降水量	风速	气温	相对湿度
春季	0.202	-0.009	0.358	0.624
夏季	-0.363	-0.170	0.550	0.206
秋季	0.204	-0.127	0.868	0.618
冬季	-0.114	-0.365	0.633	0.555

1) 以上相关系数均 0.01 水平(双侧)上显著相关

2.3 AOD 时间变化特征与分析

为进一步探究研究区年际、年度 AOD 季节分布特征和变化趋势, 利用箱体图对每个季节 AOD 值进行统计分析(图 7).

研究区年均 AOD 呈波动变化, 2000、2005、2010、2015 和 2019 年年均 AOD 依次为 0.29、0.36、0.21、0.19 和 0.29, 2000~2010 年, AOD 减小幅度最大, 2015~2019 年 AOD 表现出增加态势, AOD 增加幅度达到最大, 年际 AOD 增幅依次为

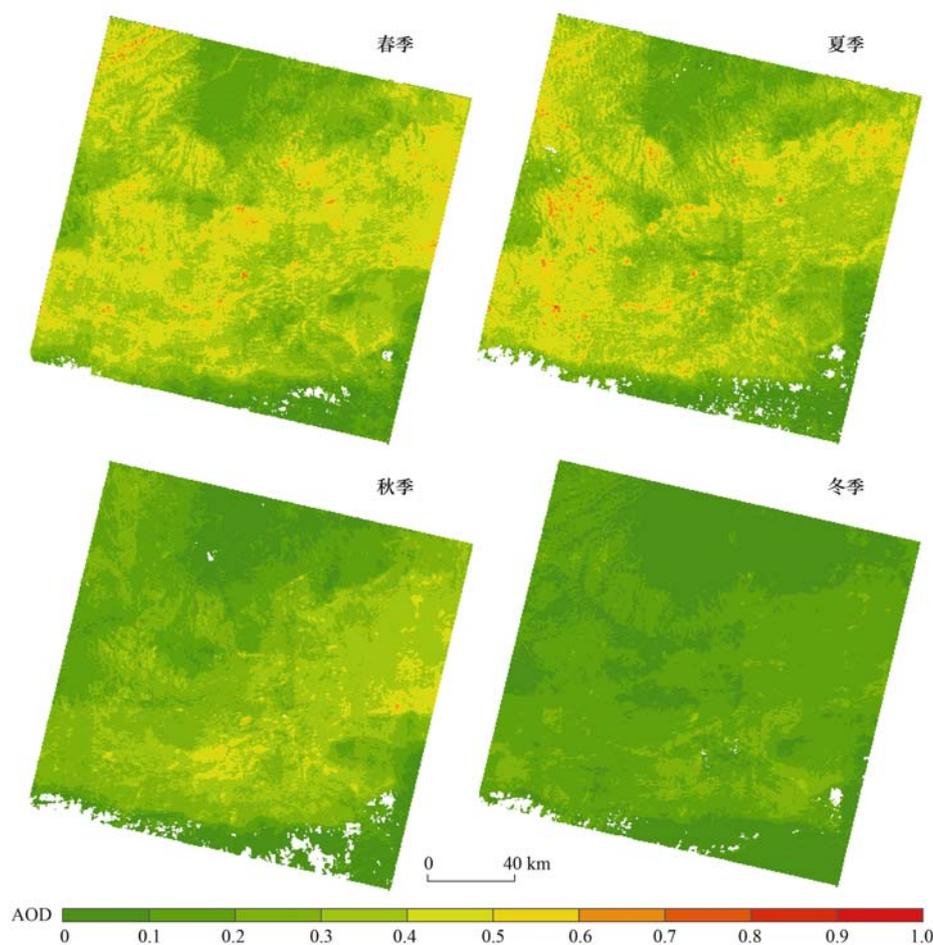


图 6 多年季均 AOD 空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of AOD in different seasons

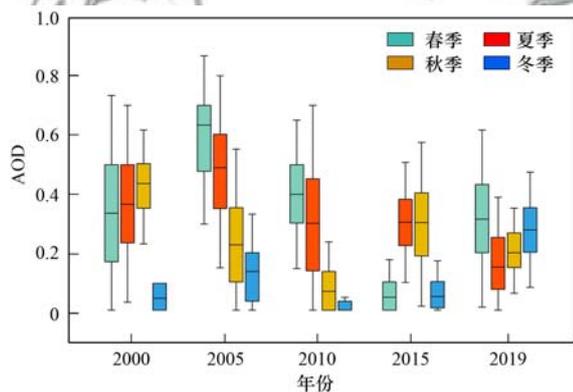


图 7 各年份季均 AOD 统计分析

Fig. 7 Statistical analysis of AOD in each season

24.14%、-41.67%、-9.52% 和 36.84%。

各年份 AOD 存在较大的季节差异性,根据不同年份 AOD 的季节变化趋势,可归为 3 种主要变化类型:第一种为“倒 V”型:如 2000 年和 2015 年,夏秋季 AOD 达到高峰,秋季最高;第二种为“一字”递减型,如 2005 年和 2010 年,AOD 呈逐渐减小趋势,AOD 春季最高,冬季最小且 AOD 空间差异性小;第 3 种为“正 V”型,如 2019 年,春冬两季达到高峰,春季最高。同时,2019 年各个季节 AOD 均值最为接

近,变化幅度较之前明显减小,AOD 季节差异最小。

从季节的变化趋势来看,研究区夏季 AOD 在逐年减小,这说明研究区夏季能见度逐渐变好,这可能与近几年环境保护、植树护林、限行、排放规模管控等政策有一定的关系。2005 年春天 AOD 值出现了异常高值,平均值达到 0.59,较前后两个季节存在明显的差异,这可能是由于秸秆焚烧、沙尘暴和短期污染控制等突变因素导致的^[46]。不同年份的春夏两季 AOD 置信区间和方差较其他季节更大,说明夏季不同地区的 AOD 空间差异较大,且高值区、低值区空间分布离散度较大。相较之下,冬季 AOD 空间异质性最小,且冬季 AOD 值较其他季节明显减小,整个区域呈现低值聚类的状态,这可能是由于冬季人类活动较少,城区生产经济活动减少、雨雪量增加以及数据缺失严重等原因造成的。

2.4 基于 EOF 的 AOD 空间分布模式分析

利用经验正交函数分解方法 (EOF) 将季均 AOD 分解成空间特征向量和时间系数。特征向量能够反映气溶胶光学厚度变化的空间分布特征,特征向量的大小反映出气溶胶光学厚度的变化程度,数

值越大的地方是 AOD 变化的最敏感区域. 时间系数作为特征向量的权重, 反映了不同时间 AOD 分布对该特征向量分布贡献的大小. 由于前 3 个特征向量累计方差贡献率达到 83.0%, 所以, 对前 3 个特征向量进行空间插值分析得到 AOD 的 3 种主要空间分布结构(图 8), 结合各特征向量对应的时间系数(图 9)来分析研究区 AOD 主要的空间分布模式.

EOF 第一模态(PC1)的方差贡献率为 74.0%, 远大于其余各模态的贡献率, 反映了 AOD 在研究区的主要模态特征. 整体来看, PC1 在空间上均为负值, 表明 AOD 空间变化呈现出区域一致性. 同时, 特征向量空间分布与海拔变化梯度相吻合, 海拔越高的区域值越大, 高值中心在南部秦岭山脉, 关中盆地城市群为低值中心. 时间系数有正有负并表现为倒“S”波浪形[图 9(a)], 表明 AOD 空间分布存在比较明显的年际变化. 2000 年和 2005 年时间系数大多为负值, 2005~2010 年之间时间系数由负转正, 2010 年之后时间系数主要为正值. 随着季节更替, 2005 年和 2010 年时间系数逐步增大, 2010 年冬季时间系数达到最大, 说明在 2005 年和 2010 年不同海拔下的 AOD 变化差异随季节逐渐增大. 时间系数为正的年份高海拔地区 AOD 变化明显, 低海拔地区 AOD 变化不明显, 时间系数为负的年份, 变化正好相反. 随着时间的推移, 不同季节的时间系数波动范围变小, 表明不同海拔区域四季 AOD 空间变化的差异性逐渐变小, 进一步表明不同海拔下造成 AOD 变化的排放源类型逐渐趋于一致.

第二模态(PC2)的方差贡献率为 5.1%. 从空间分布上看, PC2 模态以秦岭山脉为界, 大致呈现南北反相的分布特征, 高值中心集中分布在关中盆地中东部, 其他区域表现为多低值中心, 表明了 AOD 的第二模态空间分布差异大, 具有明显的地域差异性; 其时间系数在变化范围上要比 PC1 时间系数小, 时间系数曲线整体上呈“W”型下降趋势[图 9(b)], 2010 年冬季之前时间系数以正值为主, 并伴有波动, 2010 年冬季之后大多为负值. 这说明 2010 年冬季之前关中盆地中东部 AOD 值较高, 其他地区 AOD 较低, 2010 年冬季之后这一空间分布格局发生改变, AOD 高值由关中盆地中东部转移到其他地区. 时间系数为正的年份关中盆地中东部 AOD 较大, 其他地区 AOD 较小, 时间系数为负的年份, 空间分布正好相反. 时间系数的变化趋势可以大致反映出关中盆地地域发展的差异性和独特性及其与南部秦岭山脉的差异性, 2010 年之前以关中盆地中东部城市发展较为迅速, 2010 年之后关中盆地中西部城市发展进程逐渐加快.

第三模态(PC3)的方差贡献率仅为 3.9%, 是该研究区 AOD 特征的第三重要模态, 总体上呈现“西北-东南”相异的分布格局, 高值集中于该区域的东南方向, 表现为多高值中心, 特征值低值集中在西北方向, 该模态空间分布格局与城乡空间分布较吻合, 可以表明 AOD 在城区和非城区呈反相变化趋势. 其时间系数较第一、第二模态波动范围更小[图 9(c)], 2015 年之前时间系数小幅度正负波动, 2015 年之后, 时间系数由负转正, 大多为正值, 这说明 2015 年之后主要呈现城区 AOD 较高, 非城区 AOD 较低分布格局. 时间系数为正的年份, 城区 AOD 较高, 非城区 AOD 较低, 时间系数为负的年份, 非城区 AOD 较高, 城区 AOD 较低.

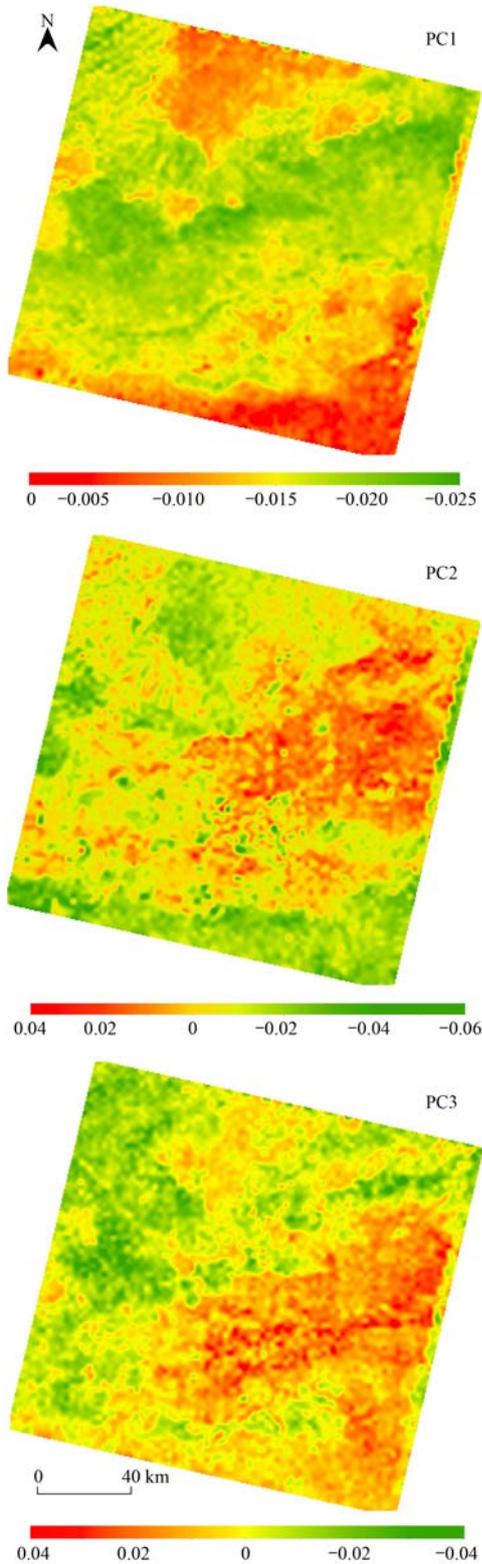
3 AOD 与城市化的关系

3.1 AOD 城乡差异分析

为分析 AOD 的城乡差异性, 选择 GAIA 城市边界数据对城区和非城区进行划分后, 分别计算各年份季均 AOD 值(图 10). 可以看出: 除 2005 年春季和 2010 年冬季, 城区的 AOD 值均高于非城区, 这两个季节的城乡异常现象进一步说明了该时期异常人类活动或突发事件等偶然因素的存在. 不同季节城乡 AOD 差异性较大, 季均 AOD 城乡差值排序为秋季(0.13) > 夏季(0.09) > 冬季(0.07) > 春季(0.05). 2000、2005、2010、2015 和 2019 年年均 AOD 城乡差值依次为 0.02、0.07、0.04、0.09 和 0.10, 表明 AOD 城乡差异整体上呈现逐年增大的趋势.

3.2 AOD 与城市化表征因子的关系

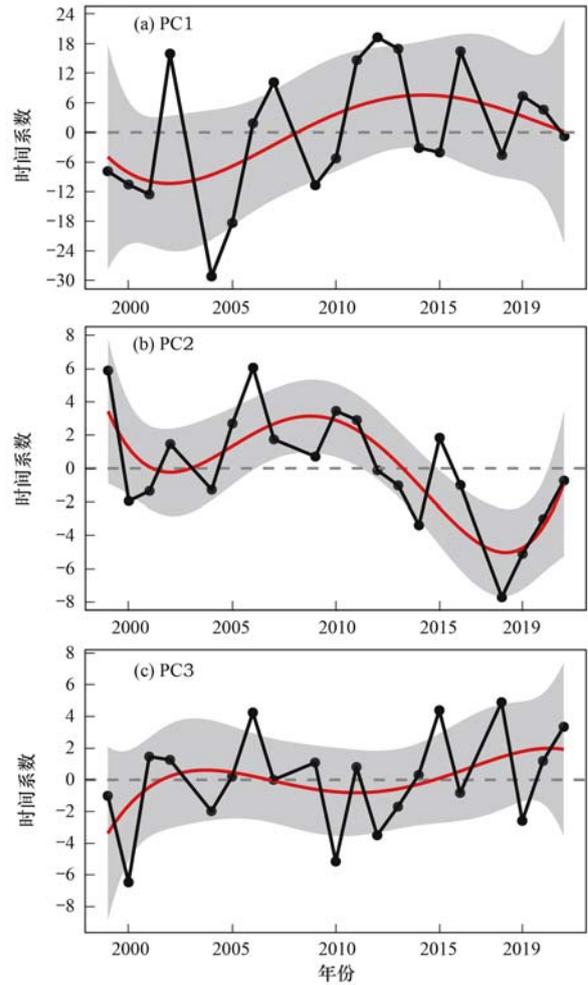
选取研究区各区县常住人口数、不透水面面积和 POI 数量作为城市化程度和城市发展的表征因子, 分析各因子时空分布及变化趋势. 同时, 分别计算不同区县的人口密度、不透水面密度和 POI 密度来量化比较 AOD 与各因子间的相关关系, 揭示城市化对 AOD 的影响. 常住人口数量是衡量城市化水平的一个重要指标, 通过对典型年份人口数的统计分析得出, 从 2000~2019 年, 34 个区县中有 21 个区县人口数量呈正增长趋势, 其中人口增长最快的 3 个区县为雁塔区、未央区和灞桥区, 这 3 个区 2019 年人口数较 2000 年分别增长了 54.81 万、31.70 万和 18.32 万人; 泾阳县等 13 个区县人口数量呈负增长趋势, 其中人口减少最多的依次为泾阳县、杨陵区 and 渭城区, 2019 年人口数量较 2000 年分别减少了 17.10 万、15.68 万和 15.32 万人. 不透水面扩张对区域环境变化有着重要作用, 是衡量城市化程度的重要指标, 研究的 34 个区县 2000 年不透水面总面积为 650.481 km², 2018 年增长到 2 035.212



图例表示 AOD 各 EOF 模态特征向量值的大小
图 8 AOD 变化的 EOF 模态空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of EOF mode of AOD changes

km², 增加了 1 384. 732 km², 年均增长率达到 11. 20%. 由图 11 (a) 可以看出, 不透水面扩张以西安市北部、咸阳市南部的区县最为显著, 不同区县的不透水面扩张存在明显的差异. 通过对 34 个区县 POI 点数量进行统计可以发现 [图 11 (b)], POI 点



灰色区域表示 95% 置信区间, 红色线条表示拟合曲线, 黑色线条表示时间系数数值的大小
图 9 特征向量对应的时间系数

Fig. 9 Time coefficient corresponding to feature vectors

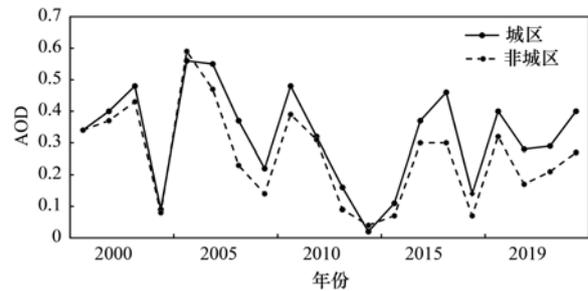


图 10 城区与非城区 AOD 变化

Fig. 10 AOD changes in urban and non-urban areas

以长安区、鄠邑区、秦都区分布较多, 中部和南部各区县较北部区县 POI 点较多, 这主要受益于更有优势的区位条件以及便利的交通条件.

分别计算 34 个区县的人口密度、不透水面密度和 POI 密度, 分别将它们分为 5 个等级, 进一步计算不同的因子等级与 AOD 值之间的相关性 (图 12), 分析各因子对 AOD 的影响程度. 为保证每一等级至少包含两个区县数据, 采用平均分配的方式进行等级划分, 每个等级的区县个数分别为 7、7、7、7

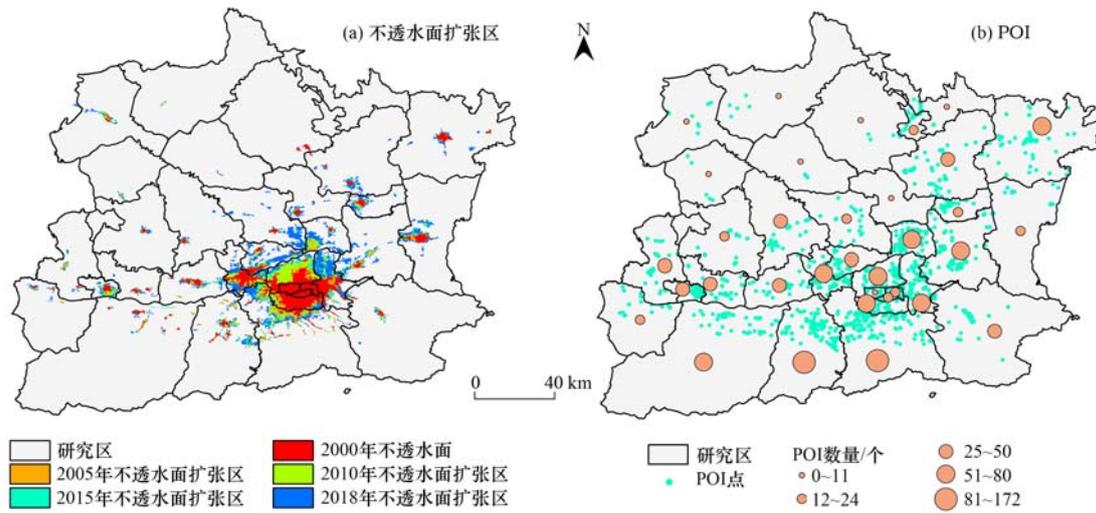


图 11 各研究区县不透水面扩张和 POI 点空间分布

Fig. 11 Spatial distribution of impervious surface expansion and POI points in each study district

和 6 个. 人口密度分为: $0 \sim 0.027$ 、 $0.027 \sim 0.045$ 、 $0.045 \sim 0.08$ 、 $0.08 \sim 0.271$ 和 $0.271 \sim 2.79$ 万人· km^{-2} ;不透水面密度分为 $0 \sim 0.005$ 、 $0.005 \sim 0.012$ 、 $0.012 \sim 0.036$ 、 $0.036 \sim 0.34$ 和 $0.34 \sim 1$; POI 密度划分以下等级: $0 \sim 0.01$ 、 $0.01 \sim 0.028$ 、 $0.028 \sim 0.09$ 、 $0.09 \sim 0.27$ 和 $0.27 \sim 0.63$ 个· km^{-2} .

采用单因素方差分析分别对上述多个城市组进行比较,采用 Fisher 最小显著性差异检验组间差异. 采用 Pearson 相关分析方法对 AOD 与城市化指标(人口密度、不透水面密度和 POI 密度)进行相关分

析,探讨城市化对 AOD 的影响. 通过相关分析发现,人口密度和 AOD 呈现显著的正相关关系 [$R^2 = 0.707, P < 0.05$, 图 12(a)],且不同人口密度组的 AOD 之间存在显著差异性 ($F = 7.676, P = 0.000$),比如人口密度为 $0 \sim 0.027$ 和 $0.027 \sim 0.045$ 组别的 AOD 明显小于人口密度后 3 个组别的 AOD. 不透水面密度和 AOD 也呈现显著的正相关关系 [$R^2 = 0.377, P < 0.05$, 图 12(b)],并且在不同等级不透水面分组中存在显著的差异 ($F = 3.333, P = 0.023$),不透水面密度范围在 $0 \sim 0.005$ 的 AOD 组别明显小于不透水面密度后 3 个组别的 AOD,不透水面密度为 $0.005 \sim 0.012$ 组别的 AOD 明显小于范围在 $0.012 \sim 0.036$ 和 $0.036 \sim 0.340$ 的组别. AOD 和 POI 密度呈现一定的正相关关系 [$R^2 = 0.727, P < 0.5$, 图 12(c)],但不同 POI 密度等级间 AOD 没有明显的差别 ($F = 1.697, P = 0.178$).

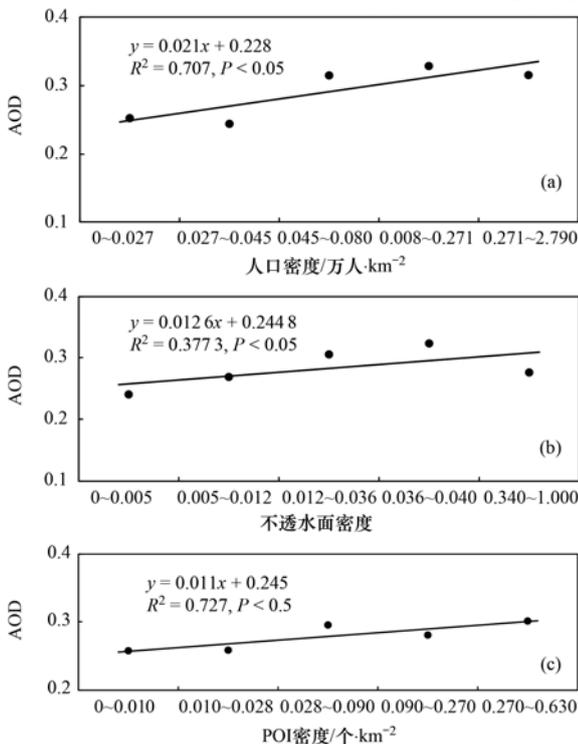


图 12 AOD 与人口密度、不透水面密度和 POI 密度的相关性

Fig. 12 Correlation between AOD, population density, impervious surface density, and POI density

4 结论

(1) 多年平均 AOD 空间分布受地形和人类活动的影响显著,低海拔且人类活动强度大的关中盆地腹地 AOD 值较高,而高海拔且人口密度低的南北山脉 AOD 值较低,AOD 大于 0.5 的高值区离散分布于盆地腹地且与工业 POI 点位分布较为吻合. 2000 ~ 2019 年研究区腹部变化程度高于南北山脉,且 AOD 高值区域逐渐南移. 研究区 AOD 呈现出明显的季节差异性:春季 > 夏季 > 秋季 > 冬季,且夏季 AOD 的空间差异最大.

(2) 年均 AOD 呈波动变化,2005 年 AOD 取得最大值,2000 ~ 2010 年,AOD 减小幅度最大 (-41.67%),2015 ~ 2019 年 AOD 表现出增加态势,AOD 增加幅度达到最大(36.84%). 相较而言春

夏两季 AOD 空间异质性大,且夏季 AOD 逐年减小,而冬季多呈现 AOD 低值聚集的状态。

(3)对季均 AOD 进行 EOF 分解得到前 3 个主要分量,累计贡献率达到 83.0%,反映出了研究区 AOD 的 3 种主要的空间变化模态。第一模态表明,AOD 空间变化整体上呈现一致性特点,特征向量空间分布与海拔梯度一致,反映了不同海拔下 AOD 变化程度的差异。时间系数的减小说明了不同海拔下四季 AOD 空间变化的差异性逐渐变小;第二模态以秦岭山脉为界,大致呈现南北反相的分布特点,高值中心集中分布在关中盆地中东部,其他区域表现为多低值中心,时间系数的变化反映出关中盆地地域发展的独特性和与南部秦岭山区的差异性;第三模态呈现“西北-东南”相异的分布特点,空间分布格局与城乡空间分布接近,可以表明 AOD 在城区和非城区呈现的反相变化趋势。

(4)研究区 AOD 和人口密度、不透水面密度呈现显著正相关关系,且不同人口密度或不透水面密度等级 AOD 之间存在显著差异性;POI 点密度和 AOD 呈现一定的正相关关系,但不同 POI 密度组间的 AOD 无明显差别。

参考文献:

- [1] 王贺,曹念文,王鹏,等.南京地区大气气溶胶综合观测与对比分析[J].遥感学报,2017,21(1):125-135.
Wang H, Cao N W, Wang P, et al. Aerosol comprehensive observation and analysis in Nanjing area[J]. Journal of Remote Sensing, 2017, 21(1): 125-135.
- [2] Haywood J, Boucher O. Estimates of the direct and indirect radiative forcing due to tropospheric aerosols: a review [J]. Reviews of Geophysics, 2000, 38(4): 513-543.
- [3] Scott C E, Arnold S R, Monks S A, et al. Substantial large-scale feedbacks between natural aerosols and climate[J]. Nature Geoscience, 2018, 11: 44-48.
- [4] Kaufman Y J, Nakajima T. Effect of Amazon smoke on cloud microphysics and albedo-analysis from satellite Imagery [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 1993, 32(4): 729-744.
- [5] Deng X L, Shi C E, Wu B W, et al. Analysis of aerosol characteristics and their relationships with meteorological parameters over Anhui Province in China [J]. Atmospheric Research, 2012, 109-110: 52-63.
- [6] 葛邦宇,杨磊库,陈兴峰,等.暗目标法的 Himawari-8 静止卫星数据气溶胶反演[J].遥感学报,2018,22(1):38-50.
Ge B Y, Yang L K, Chen X F, et al. Study on aerosol optical depth retrieval over land from Himawari-8 data based on dark target method[J]. Journal of Remote Sensing, 2018, 22(1): 38-50.
- [7] Wu J S, Liang J T, Zhou L G, et al. Impacts of AOD correction and spatial scale on the correlation between high-resolution AOD from Gaofen-1 satellite and in situ PM_{2.5} measurements in Shenzhen city, China [J]. Remote Sensing, 2019, 11(19), doi: 10.3390/rs11192223.
- [8] He Q Q, Gu Y F, Zhang M. Spatiotemporal patterns of aerosol optical depth throughout China from 2003 to 2016[J]. Science of the Total Environment, 2019, 653: 23-35.
- [9] Kaufman Y J, Tanré D, Remer L A, et al. Operational remote sensing of tropospheric aerosol over land from EOS moderate resolution imaging spectroradiometer [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1997, 102(D14): 17051-17067.
- [10] Tanre D, Deschamps P Y, Devaux C, et al. Estimation of Saharan aerosol optical thickness from blurring effects in thematic mapper data [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1988, 93(D12): 15955-15964.
- [11] Deuzé J L, Bréon F M, Devaux C, et al. Remote sensing of aerosols over land surfaces from POLDER-ADEOS-1 polarized measurements [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2001, 106(D5): 4913-4926.
- [12] Waquet F, Riedi J, Labonnote L C, et al. Aerosol remote sensing over clouds using a-train observations [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2008, 66(8): 2468-2480.
- [13] Hsu N C, Tsay S C, King M D, et al. Aerosol properties over bright-reflecting source regions [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004, 42(3): 557-569.
- [14] Hsu N C, Jeong M J, Bettenhausen C, et al. Enhanced deep blue aerosol retrieval algorithm: the second generation [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2013, 118(16): 9296-9315.
- [15] 陈香月,丁建丽,王敬哲,等.艾比湖流域气溶胶光学厚度时空演变及影响因素[J].环境科学,2019,40(11):4824-4832.
Chen X Y, Ding J L, Wang J Z, et al. Spatiotemporal evolution and driving mechanism of aerosol optical depth in the Ebinur Lake basin [J]. Environmental Science, 2019, 40(11): 4824-4832.
- [16] 王中挺,厉青,王桥,等.利用深蓝算法从 HJ-1 数据反演陆地气溶胶[J].遥感学报,2012,16(3):596-610.
Wang Z T, Li Q, Wang Q, et al. HJ-1 terrestrial aerosol data retrieval using deep blue algorithm [J]. Journal of Remote Sensing, 2012, 16(3): 596-610.
- [17] 张瑞芳,于兴娜.河南省气溶胶光学特性的时空变化特征[J].环境科学,2020,41(2):600-608.
Zhang R F, Yu X N. Spatio-temporal distribution and variation characteristics of aerosol optical properties in Henan Province [J]. Environmental Science, 2020, 41(2): 600-608.
- [18] Filonchyk M, Yan H W, Zhang Z R. Analysis of spatial and temporal variability of aerosol optical depth over China using MODIS combined dark target and deep blue product [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2019, 137(3-4): 2271-2288.
- [19] Wei J, Peng Y R, Guo J P, et al. Performance of MODIS Collection 6.1 Level 3 aerosol products in spatial-temporal variations over land [J]. Atmospheric Environment, 2019, 206: 30-44.
- [20] 胡俊,亢燕铭,陈勇航,等.基于 MODIS_C006 的乌鲁木齐 10 年气溶胶光学厚度变化特征[J].环境科学,2018,39(8):3563-3570.
Hu J, Kang Y M, Chen Y H, et al. Analysis of aerosol optical depth variation characteristics for 10 years in Urumqi based on MODIS_C006 [J]. Environmental Science, 2018, 39(8): 3563-3570.
- [21] 赵仕伟,高晓清.利用 MODIS C6 数据分析中国西北地区气溶胶光学厚度时空变化特征[J].环境科学,2017,38(7):2637-2646.
Zhao S W, Gao X Q. Analysis of spatio-temporal distribution and variation characteristics of aerosol optical depth over the northwest

- of China by MODIS C6 product [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(7): 2637-2646.
- [22] 田信鹏, 孙林, 刘强, 等. 北京地区 Landsat 8 OLI 高空间分辨率气溶胶光学厚度反演[J]. *遥感学报*, 2018, **22**(1): 51-63.
Tian X P, Sun L, Liu Q, *et al.* Retrieval of high-resolution aerosol optical depth using Landsat 8 OLI data over Beijing [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2018, **22**(1): 51-63.
- [23] 姜晓晨, 邓正栋, 王大庆, 等. 基于 Landsat 8 OLI 可见光波段反演陆地气溶胶光学厚度[J]. *红外技术*, 2019, **41**(6): 527-534.
Jiang X C, Deng Z D, Wang D Q, *et al.* Aerosol optical depth retrieval over land based on Landsat 8 OLI visible bands imagery [J]. *Infrared Technology*, 2019, **41**(6): 527-534.
- [24] Sun K, Chen X L, Zhu Z M, *et al.* High resolution aerosol optical depth retrieval using Gaofen-1 WFV camera data [J]. *Remote Sensing*, 2017, **9**(1), doi: 10.3390/rs11192223.
- [25] Wei K, Ouyang C J, Duan H T, *et al.* Reflections on the Catastrophic 2020 Yangtze River Basin Flooding in Southern China [J]. *The Innovation*, 2020, **1**(2), doi: 10.1016/j.xinn.2020.100038.
- [26] 王钊, 彭艳, 车慧正, 等. 近 10 年关中盆地 MODIS 气溶胶的时空变化特征[J]. *高原气象*, 2013, **32**(1): 234-242.
Wang Z, Peng Y, Che H Z, *et al.* Analyses on spatial and temporal characteristics of AOD in Guanzhong region of Shaanxi Province using long term MODIS data [J]. *Plateau Meteorology*, 2013, **32**(1): 234-242.
- [27] Bei N F, Zhao L N, Xiao B, *et al.* Impacts of local circulations on the wintertime air pollution in the Guanzhong Basin, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **592**: 373-390.
- [28] Ångström A. The parameters of atmospheric turbidity [J]. *Tellus*, 1964, **16**(1): 64-75.
- [29] 邓明珊, 孟宪红, 马英赛, 等. 基于 GLDAS 产品的青藏高原土壤湿度特征分析[J]. *干旱气象*, 2018, **36**(4): 595-602.
Deng M S, Meng X H, Ma Y S, *et al.* Analysis on soil moisture characteristics of Tibetan Plateau based on GLDAS [J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2018, **36**(4): 595-602.
- [30] 牛林芝, 王旭红, 韩海青, 等. 中亚五国气溶胶光学厚度时空分布特征研究[J]. *环境科学学报*, 2021, **41**(2): 321-333.
Niu L Z, Wang X H, Han H Q, *et al.* Spatiotemporal distribution of aerosol optical depth in the five Central Asian countries [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, **41**(2): 321-333.
- [31] Liu H, Gong P, Wang J, *et al.* Annual dynamics of global land cover and its long-term changes from 1982 to 2015 [J]. *Earth System Science Data*, 2020, **12**(2): 1217-1243.
- [32] Pearson K. LIII. On lines and planes of closest fit to systems of points in space [J]. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 1901, **2**(11): 559-572.
- [33] Lorenz E N. Empirical orthogonal functions and statistical weather prediction [R]. *Science Report 1, Statistical Forecasting Project, Massachusetts: Department of Meteorology*, 1956. 1-49.
- [34] 敖雪, 翟晴飞, 崔妍, 等. 基于 EOF 分解的辽宁省城市化气候效应检测[J]. *地理科学进展*, 2020, **39**(9): 1532-1543.
Ao X, Zhai Q F, Cui Y, *et al.* Detection of urbanization effect on the climate change in Liaoning Province based on empirical orthogonal function methods [J]. *Progress in Geography*, 2020, **39**(9): 1532-1543.
- [35] 张丽亚, 周伟东, 吴润. 1980~2013 年华东小雨减少及其主要影响因子分析[J]. *大气科学*, 2019, **43**(5): 1005-1018.
Zhang L Y, Zhou W D, Wu J. Analysis of climatic factors influencing the decrease in light rain over Eastern China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2019, **43**(5): 1005-1018.
- [36] 沈国强, 郑海峰, 雷振锋. 基于 SPEI 指数的 1961-2014 年东北地区气象干旱时空特征研究[J]. *生态学报*, 2017, **37**(17): 5882-5893.
Shen G Q, Zheng H F, Lei Z F. Spatiotemporal analysis of meteorological drought (1961-2014) in Northeast China using a standardized precipitation evapotranspiration index [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(17): 5882-5893.
- [37] Zhao C, Liu Z R, Wang Q, *et al.* High-resolution daily AOD estimated to full coverage using the random forest model approach in the Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *Atmospheric Environment*, 2019, **203**: 70-78.
- [38] 王钊, 彭艳, 张树誉. MODIS 资料反演 AOD 及其在区域大气污染监测中的应用[J]. *高原气象*, 2008, **27**(4): 911-917.
Wang Z, Peng Y, Zhang S Y. Retrieval of aerosol optical depth over Shaanxi using MODIS data and its application to an aerosol pollution event [J]. *Plateau Meteorology*, 2008, **27**(4): 911-917.
- [39] 董自鹏, 李星敏, 杜川利, 等. 西安地区气溶胶光学特性研究[J]. *高原气象*, 2013, **32**(3): 856-864.
Dong Z P, Li X M, Du C L, *et al.* Study on aerosol optical property in Xi'an region [J]. *Plateau Meteorology*, 2013, **32**(3): 856-864.
- [40] 吴萍, 丁一汇, 柳艳菊, 等. 中国中东部冬季霾日的形成与东亚冬季风和大气湿度的关系[J]. *气象学报*, 2016, **74**(3): 352-366.
Wu P, Ding Y H, Liu Y J, *et al.* Influence of the East Asian winter monsoon and atmospheric humidity on the winter time haze frequency over central-eastern China [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2016, **74**(3): 352-366.
- [41] 刘海知, 郭海燕, 马振峰, 等. 2001~2017 年全国气溶胶光学厚度时空分布及变化趋势[J]. *环境科学*, 2019, **40**(9): 3886-3897.
Liu H Z, Guo H Y, Ma Z F, *et al.* Temporal-spatial characteristics and variability in aerosol optical depth over China during 2001-2017 [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(9): 3886-3897.
- [42] Wei N, Wang N L, Huang X, *et al.* The effects of terrain and atmospheric dynamics on cold season heavy haze in the Guanzhong Basin of China [J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2020, **11**(10): 1805-1819.
- [43] 董自鹏, 余兴, 李星敏, 等. 基于 MODIS 数据的陕西省气溶胶光学厚度变化趋势与成因分析[J]. *科学通报*, 2014, **59**(3): 306-316.
Dong Z P, Yu X, Li X M, *et al.* Analysis of variation trends and causes of aerosol optical depth in Shaanxi Province using MODIS data [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, **58**(35): 4486-4496.
- [44] 杜川利, 唐晓, 李星敏, 等. 城市边界层高度变化特征与颗粒物浓度影响分析[J]. *高原气象*, 2014, **33**(5): 1383-1392.
Du C L, Tang X, Li X M, *et al.* Calculations of planetary boundary layer height and its relationship with particle size concentration in Xi'an city [J]. *Plateau Meteorology*, 2014, **33**

- (5): 1383-1392.
- [45] 彭艳. 关中盆地气溶胶变化特征及其与气象因子关系[D]. 西安: 中国科学院地球环境研究所, 2017.
- Peng Y. The characteristics of aerosol particles and their interactions with meteorological parameters in the Guanzhong Basin of China [D]. Xi'an; Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, 2017.
- [46] 刘状, 孙曦亮, 刘丹, 等. 2001-2017年中国北方省份气溶胶光学厚度的时空特征[J]. 环境科学学报, 2018, 38(8): 3177-3184.
- Liu Z, Sun X L, Liu D, *et al.* Spatio-temporal characteristics of aerosol optical depth over Beijing-Tianjin-Hebei-Shandong-Henan-Shanxi-Shaanxi region during 2001- 2017 [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, 38(8): 3177-3184.

《环境科学》征稿简则

1. 来稿报道成果要有创新性,论点明确,文字精炼,数据可靠.全文不超过8 000字(含图、表、中英文摘要及参考文献).国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、国际合作项目或其它项目请在来稿中注明(在首页以脚注表示).作者投稿时请先登陆我刊网站(www.hjxx.ac.cn)进行注册,注册完毕后以作者身份登录,按照页面给出的提示信息投稿即可.

2. 稿件请按GB 7713-87《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》中学术论文的规范撰写.论文各部分的排列顺序为:题目;作者姓名;作者工作单位、地址、邮政编码;中文摘要;关键词;中图分类号;英文题目;作者姓名及单位的英译名;英文摘要;关键词;正文;致谢;参考文献.

3. 论文题目应简练并准确反映论文内容,一般不超过20字,少用副标题.

4. 中文摘要不少于300字,以第三人称写.摘要内容包括研究工作的目的、方法、结果(包括主要数据)和结论,重点是结果和结论.英文摘要与中文对应,注意人称、时态和语言习惯,以便准确表达内容.

5. 前言包括国内外前人相关工作(引文即可)和本工作的目的、特点和意义等.科普知识不必赘述.

6. 文中图表应力求精简,同一内容不得用图表重复表达,要有中英文对照题目.图应大小一致,曲线粗于图框,图中所有字母、文字字号大小要统一.表用三线表.图表中术语、符号、单位等应与正文一致.

7. 计量单位使用《中华人民共和国法定计量单位》(SI).论文中物理计量单位用字母符号表示,如mg(毫克),m(米),h(小时)等.科技名词术语用国内通用写法,作者译的新名词术语,文中第一次出现时需注明原文.

8. 文中各级标题采用1, 1.1, 1.1.1的形式,左起顶格书写,3级以下标题可用(1), (2)……表示,后缩2格书写.

9. 文中外文字母、符号应标明其大小写,正斜体.生物的拉丁学名为斜体.缩略语首次出现时应给出中文全称,括号内给出英文全称和缩略语.

10. 未公开发表资料不列入参考文献,可在出现页以脚注表示.文献按文中出现的先后次序编排.常见文献书写格式为:
期刊:作者(外文也要姓列名前).论文名[J].期刊名,年,卷(期):起页-止页.

图书:作者.书名[M].出版地:出版社,年.起页-止页.

会议文集:作者.论文名[A].见(In):编者.文集名[C].出版地:出版社(单位),年.起页-止页.

学位论文:作者.论文名[D].保存地:保存单位,年份.

报告:作者.论文名[R].出版地:出版单位,出版年.

专利:专利所有者.专利题名[P].专利国别:专利号,出版日期.

11. 来稿文责自负,切勿一稿多投.编辑对来稿可作文字上和编辑技术上的修改和删节.在3个月内未收到本刊选用通知,可来电询问.

12. 投稿请附作者单位详细地址,邮编,电话号码,电子邮箱等.编辑部邮政地址:北京市2871信箱;邮编:100085;电话:010-62941102,010-62849343;传真:010-62849343;E-mail:hjxx@cees.ac.cn;网址:www.hjxx.ac.cn

CONTENTS

Advances and Challenges in Biosafety Research for Urban Environments	SU Jian-qiang, AN Xin-li, HU An-yi, <i>et al.</i>	(2565)
Key Problems and Novel Strategy of Controlling Emerging Trace Organic Contaminants During Municipal Wastewater Reclamation	WANG Wen-long, WU Qian-yuan, DU Ye, <i>et al.</i>	(2573)
Mechanisms Summary and Potential Analysis of EPS as a Flame Retardant	HAO Xiao-di, ZHAO Zi-cheng, LI Ji, <i>et al.</i>	(2583)
Concentrations, Sources, and Health Risks of PM _{2.5} Carrier Metals in the Beijing Urban Area and Suburbs	ZHOU An-qi, LIU Jian-wei, ZHOU Xu, <i>et al.</i>	(2595)
MAIAC AOD and PM _{2.5} Mass Concentrations Characteristics and Correlation Analysis in Beijing-Tianjin-Hebei and Surrounding Areas	JIN Jian-nan, YANG Xing-chuan, YAN Xing, <i>et al.</i>	(2604)
Formation and Prevention of Secondary Nitrate in PM _{2.5} in Tianjin	XIAO Zhi-mei, WU Ting, WEI Yu-ting, <i>et al.</i>	(2616)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Nitro Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM _{2.5} of Nanjing, China	FU Yin-yin, WEN Hao-zhe, WANG Xiang-hua, <i>et al.</i>	(2626)
Spatio-temporal Patterns and Potential Sources of Absorbing Aerosols in the Fenwei Plain	LIU Min-xia, LI Liang, YU Rui-xin, <i>et al.</i>	(2634)
Sources Apportionment of Oxygenated Volatile Organic Compounds (OVOCs) in a Typical Southwestern Region in China During Summer	CHEN Mu-lan, WANG Sai-nan, CHEN Tian-shu, <i>et al.</i>	(2648)
Aqueous-phase Oxidation of Dissolved Organic Matter (DOM) from Extracts of Ambient Aerosols	TAO Ye, CHEN Yan-tong, LI Nan-wang, <i>et al.</i>	(2659)
Changes and Potential Sources of Atmospheric Black Carbon Concentration in Shanghai over the Past 40 Years Based on MERRA-2 Reanalysis Data	CAO Shan-shan, DUAN Yu-sen, GAO Chan-chan, <i>et al.</i>	(2668)
Spatio-Temporal Evolution Characteristics and Source Apportionment of O ₃ and NO ₂ in Shijiazhuang	WANG Shuai, NIE Sai-sai, FENG Ya-ping, <i>et al.</i>	(2679)
Applying Photochemical Indicators to Analyze Ozone Sensitivity in Handan	NIU Yuan, CHENG Shui-yuan, OU Sheng-ju, <i>et al.</i>	(2691)
Spatiotemporal Distribution of Aerosol Optical Depth Based on Landsat Data in the Hinterland of the Guanzhong Basin and Its Relationship with Urbanization	ZHENG Yu-rong, WANG Xu-hong, ZHANG Xiu, <i>et al.</i>	(2699)
Multidimensional Verification of Anthropogenic VOCs Emissions Inventory Through Satellite Retrievals and Ground Observations	WANG Yue, WEI Wei, REN Yun-ting, <i>et al.</i>	(2713)
Estimation of the SOA Formation Potential of the National Trunk Highway in Central Plains Urban Agglomeration	WANG Na-ping, LI Hai-ping, ZHANG Fan, <i>et al.</i>	(2721)
Economic Benefit of Air Quality Improvement During Implementation of the Air Pollution Prevention and Control Action Plan in Beijing	LU Ya-ling, FAN Zhao-yang, JIANG Hong-qiang, <i>et al.</i>	(2730)
Emission Performance Quantitative Evaluation and Application of Industrial Air Pollution Sources	LI Ting-kun, FENG Yin-chang, WU Jian-hui, <i>et al.</i>	(2740)
Screening and Sequencing High-risk Antibiotics in China's Water Environment Based on Ecological Risks	ZHOU Li, LIU Shan, GUO Jia-hua, <i>et al.</i>	(2748)
China's Reuse Water Development and Utilization Potential Based on the RDA-REM Model	ZHENG Jin-tao, MA Tao, LIU Jiu-fu, <i>et al.</i>	(2758)
Characteristic Analysis of SWAT Model Parameter Values Based on Assessment of Model Research Quality	RONG Yi, QIN Cheng-xin, DU Peng-fei, <i>et al.</i>	(2769)
Sensitivity Analysis of Boundary Load Reduction in a Large Shallow Lake Water Quality Model	WANG Ya-ning, LI Yi-ping, CHENG Yue, <i>et al.</i>	(2778)
Comparison of Available Nitrogen and Phosphorus Characteristics in the Land-Water Transition Zone of Different Watersheds and Their Environmental Significance	ZHU Hai, YUAN Xu-yin, YE Hong-meng, <i>et al.</i>	(2787)
Analysis of Spatial-Temporal Variation Characteristics of Potential Non-point Source Pollution Risks in the Upper Beiyun River Basin Using Different Weighting Methods	LI Hua-lin, ZHANG Jian-jun, ZHANG Yao-fang, <i>et al.</i>	(2796)
Characteristics of Runoff-related Total Nitrogen and Phosphorus Losses Under Long-term Fertilization and Cultivation on Purple Soil Sloping Croplands	WU Xiao-yu, LI Tian-yang, HE Bing-hui, <i>et al.</i>	(2810)
Hydrochemistry and Its Controlling Factors and Water Quality Assessment of Shallow Groundwater in the Weihe and Jinghe River Catchments	LIU Xin, XIANG Wei, SI Bing-cheng, <i>et al.</i>	(2817)
Characteristics and Drivers of Dissolved Carbon Dioxide and Methane Concentrations in the Nantiaoxi River System in the Upper Reaches of the Taihu Lake Basin During Summer-Autumn	LIANG Jia-hui, TIAN Lin-lin, ZHOU Zhong-yu, <i>et al.</i>	(2826)
Nitrogen Distribution and Inorganic Nitrogen Diffusion Flux in a Shallow Lake During the Low Temperature Period: A Case Study of the Baiyangdian Lake	WEN Yan, SHAN Bao-qing, ZHANG Wen-qiang, <i>et al.</i>	(2839)
Effects of Sediment Microenvironment on Sedimentary Phosphorus Release Under Capping	CHEN Shu-tong, LI Da-peng, XU Chu-tian, <i>et al.</i>	(2848)
Coadsorption of Heavy Metal and Antibiotic onto Humic Acid from Polder River Sediment	XUE Xiang-dong, YANG Chen-hao, YU Jian-lin, <i>et al.</i>	(2856)
Effects of Two PPCPs on Nitrification in Sediments in the Yarlung Zangbo River	LING Xin, XU Hui-ping, LU Guang-hua, <i>et al.</i>	(2868)
Wastewater Treatment Effects of Ferric-carbon Micro-electrolysis and Zeolite in Constructed Wetlands	ZHAO Zhong-jing, HAO Qing-ju, ZHANG Yao-yu, <i>et al.</i>	(2875)
CDS-BOC Nanophotocatalyst Activating Persulfate Under Visible Light for the Efficient Degradation of Typical PPCPs	LEI Qian, XU Lu, AI Wei, <i>et al.</i>	(2885)
Preparation of pg-C ₃ N ₄ /BiOBr/Ag Composite and Photocatalytic Degradation of Sulfamethoxazole	YANG Li-wei, LIU Li-jun, XIA Xun-feng, <i>et al.</i>	(2896)
Sodium Alginate Loading of Zero-Valent Iron Sulfide for the Reduction of Cr(VI) in Water	WANG Xu, YANG Xin-nan, HUANG Bi-jian, <i>et al.</i>	(2908)
Adsorption Mechanism of Cadmium by Superparamagnetic Nano-Fe ₃ O ₄ @SiO ₂ Functionalized Materials	ZHANG Li-zhi, YI Ping, FANG Dan-dan, <i>et al.</i>	(2917)
Pollution Characteristics and Removal of Typical Pharmaceuticals in Hospital Wastewater and Municipal Wastewater Treatment Plants	YE Pu, YOU Wen-dan, YANG Bin, <i>et al.</i>	(2928)
Abundance Change of Antibiotic Resistance Genes During PDWW Recycling and Correlations with Environmental Factors	XU Yao-yao, WANG Rui, JIN Xin, <i>et al.</i>	(2937)
Simultaneous Domestication of Short-cut Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Granules	WANG Wen-qi, LI Dong, GAO Xin, <i>et al.</i>	(2946)
Long-term Storage and Rapid Activity Recovery of ANAMMOX Granular Sludge	LI Dong, LIU Ming-yang, ZHANG Jie, <i>et al.</i>	(2957)
Migration and Environmental Effects of Heavy Metals in the Pyrolysis of Municipal Sludge	JIANG Yuan-yuan, WANG Yan, DUAN Wen-yang, <i>et al.</i>	(2966)
Profiling of Antibiotic Resistance Genes in Different Croplands	HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yi-dan, WANG Jia-ni, <i>et al.</i>	(2975)
Distribution Characteristics of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Manure and Surrounding Soil of Cattle Farms in Ningxia	ZHANG Jun-hua, CHEN Rui-hua, LIU Ji-li, <i>et al.</i>	(2981)
Effects of Temperature and Stirring on the Changes of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in Anaerobic Digestion of Dairy Manure	XU Ji-fei, ZHANG Qiu-ping, ZHU Tian-jiao, <i>et al.</i>	(2992)
Effects of Wheat Straw-derived Biochar Application on Soil Carbon Content Under Different Tillage Practices	LIU Zhen-jie, LI Peng-fei, HUANG Shi-wei, <i>et al.</i>	(3000)
Spatial Patterns of Nitrogen and Phosphorus in Soil and Their Influencing Factors in a Typical Agro-pastoral Ecotone	ZHANG Yan-jiang, WANG Jun-peng, WANG Yu, <i>et al.</i>	(3010)
Spatial Distribution Characteristics, Pollution, and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals Around Mercury Mining Areas	WANG Rui, DENG Hai, JIA Zhong-min, <i>et al.</i>	(3018)
Interaction and Mechanism Between Conditioning Agents and Two Elements in the Soil Enriched with Phosphorus and Cadmium	HUANG Yang, HU Xue-yu, CAO Kun-kun, <i>et al.</i>	(3028)
Mechanism of S-allyl-L-cysteine Alleviating Cadmium Stress in Seedling Roots and Buds of Rice Seedlings	CHENG Liu-long, HUANG Yong-chun, WANG Chang-rong, <i>et al.</i>	(3037)
Consecutive 4-year Elevated Atmospheric CO ₂ on Shaped Microbial Communities in the Rhizosphere Soil of <i>Robinia pseudoacacia</i> L. Seedlings Grown in Pb-contaminated Soils	JIA Xia, Lkhagvajargal Khadkhurel, ZHAO Yong-hua, <i>et al.</i>	(3046)
Biodegradation of Polystyrene by <i>Geobacillus stearothermophilus</i>	XING Rui-zhi, ZHAO Zi-qiang, ZHAO Wen-qi, <i>et al.</i>	(3056)
Micro-morphological Characteristics of Particles on Holly and Ligustrum Leaf Surfaces and Seasonal Changes in Bacterial Communities	LI Hui-juan, XU Ai-ling, QIAO Feng-lu, <i>et al.</i>	(3063)
Effects of Roxithromycin on Reproduction, Growth, and Anti-oxidation System of <i>Daphnia magna</i>	ZHANG Ling-yu, LIU Jian-chao, LENG Yang, <i>et al.</i>	(3074)
Relationship Between Relative Crop Yield/Woody Plant Biomass and Ground-level Ozone Pollution in China	FENG Zhao-zhong, PENG Jin-long, <i>et al.</i>	(3084)