

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

南京北郊大气降水中水溶性无机氮和有机氮沉降特征

张佳颖, 于兴娜, 张毓秀, 丁铖, 侯思宇



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年7月

第43卷 第7期

Vol.43 No.7

目次

两种模式下中国未来发电行业发展情景及其环境效益分析 ..... 刘春景, 吕建斌, 赵汶畅, 徐卿, 金玉佳(3375)

基于 LEAP 模型的兰州市道路交通温室气体与污染物协同减排情景模拟 ..... 庞可, 张芊, 马彩云, 祝禄祺, 陈恒蕤, 孔祥如, 潘峰, 杨宏(3386)

基于半级别的城市空气质量预报评估方法探讨 ..... 王晓彦, 朱莉莉, 许荣, 高愈霄, 朱媛媛, 汪巍, 刘冰(3396)

厦门港大气 PM<sub>2.5</sub> 中重金属污染特征及健康风险评价 ..... 肖思晗, 蔡美君, 李香, 黄屋, 王坚, 朱清墩, 吴水平(3404)

南京北郊大气降水中水溶性无机氮和有机氮沉降特征 ..... 张佳颖, 于兴娜, 张毓秀, 丁敏, 侯思宇(3416)

晋中盆地主要城市冬季 PM<sub>2.5</sub> 传输特征分析 ..... 王小兰, 王雁, 闫世明, 岳江, 郭伟, 郝振荣(3423)

鄂尔多斯市夏秋季黑碳气溶胶时间演变特征及其来源解析 ..... 孔祥晨, 张连霞, 张彩云, 王红磊, 许晶, 郑佳锋(3439)

济源冬季 VOCs 污染特征、来源和 SOAP ..... 王芳, 李利霞, 王红果, 赵宗生, 张建平, 张栋(3451)

长株潭城区 8 月 VOCs 污染特征及来源分析 ..... 罗达通, 张青梅, 刘湛, 尤翔宇, 黄杰, 宋云飞, 张敬巧(3463)

2019 年 7 月石家庄市 O<sub>3</sub> 生成敏感性 & 控制策略解析 ..... 朱家贤, 王晓琦, 欧盛菊, 张新宇(3473)

华北平原 AOD 时空演化与影响因素 ..... 郭霖, 孟飞, 马明亮(3483)

基于地基太阳光度计观测的长安区气溶胶光学特性变化及其与颗粒物浓度的关系 ..... 郑玉蓉, 王旭红, 崔思颖, 冯子豪, 张秀, 刘康(3494)

基于长时序“地-星”数据的京津冀大气污染时空分布及演变特征 ..... 王耀庭, 殷振平, 郑祚芳, 李炬, 李青春, 孟春雷, 李威(3508)

近十年洪泽湖富营养化状态变化趋势及原因分析 ..... 陈天宇, 刘常清, 史小丽, 李云, 范子武, 贾本有, 廖轶鹏(3523)

高原湖泊周边浅层地下水: 磷素时空分布及驱动因素 ..... 杨恒, 李桂芳, 叶远行, 陈清飞, 崔荣阳, 张丹, 陈安强(3532)

三峡水库不同支流库湾蓄水区溶解氧分层特性及差异性 ..... 纪道斌, 方娇, 龙良红, 杨正健, 赵星星, 杨霞, 郭亚丽(3543)

典型喀斯特城市湖库溶解性有机质成分特征及来源解析 ..... 倪茂飞, 周慧, 马永梅, 苏印, 王晓丹, 王志康(3552)

骆马湖表层水和沉积物中全氟化合物赋存特征、来源及健康风险评估 ..... 黄家浩, 吴玮, 黄天寅, 陈书琴, 项颂, 庞燕(3562)

千岛湖浮游植物群落结构的垂向分布特征及其影响因素 ..... 王吉毅, 霍翟, 国超旋, 朱广伟, 龚志军, 范亚文, 王建军(3575)

泗河水系沉积物磷的存在形态及其空间分布特征 ..... 张子涵, 张鑫茹, 贾传兴, 甘延东, 王世亮(3587)

降雨径流过程中土地利用优化配置对磷流失的影响 ..... 周豪, 陈方鑫, 罗义峰, 龙翼, 周继, 王小燕, 李丹丹, 陈晓燕(3597)

典型生物滞留设施重金属累积分布特征与风险评价 ..... 储杨阳, 杨龙, 周媛, 王喜龙, 王嗣禹, 张敏(3608)

筑坝蓄水对不同水深浮游微生物群落结构和种间互作模式的影响 ..... 王洵, 张佳佳, 袁秋生, 胡斌, 刘胜(3623)

天津独流减河流域不同等级河流沉积物细菌区系及功能辨识 ..... 刘嘉元, 丰玥, 杨雪纯, 张彦, 李德生, 刘福德(3635)

地表水悬浮态多环芳烃时空变化特征及主要输入源响应机制 ..... 彭珂醒, 李瑞飞, 周亦辰, 卓泽铭, 张晋, 李梅, 李雪(3645)

北京市通州区河流中微塑料组成的空间分布及潜在来源解析 ..... 门聪, 李颀, 左剑恶, 邢薇, 刘梦瑶, 魏凡钦, 胡嘉敏, 谢珍雯, 邢鑫, 沈杨贵(3656)

微塑料对鲫鱼生长、肝脏损伤和肠道微生物组成的影响 ..... 胡嘉敏, 左剑恶, 李金波, 张艳艳, 艾翔, 龚大惠, 张继文, 孙丁明(3664)

不同类型脱水药剂对底泥固化效果和理化性质的影响 ..... 任俊, 殷鹏, 王威振, 唐婉莹, 尹洪斌, 朱丽娟(3672)

微纳米粒径生物炭的结构特征及其对 Cd<sup>2+</sup> 吸附机制 ..... 马文艳, 裴刚刚, 高歌, 孙约兵(3682)

不同生物炭对磷的吸附特征及其影响因素 ..... 连神海, 张树楠, 刘锋, 邢宏霖, 吴金水(3692)

Mg-La-Fe/沸石复合材料的制备及其处理低浓度含磷废水的性能 ..... 印学杰, 宋小宝, 丁陈蔓, 冯彦房, 杨祺, 何世颖, 薛利红(3699)

一体式部分亚硝化-厌氧氨氧化工艺污泥膨胀发生和恢复过程中微生物群落演替及 PICRUS2 功能预测分析 ..... 李亚男, 闫冰, 郑蕊, 姚丽, 隋倩雯, 魏源送(3708)

丝状菌膨胀污泥好氧颗粒化稳定性及微生物多样性 ..... 高春娣, 杨箫阳, 欧家丽, 韩颖璐, 程丽阳, 彭永臻(3718)

2000~2020 年长江流域植被 NDVI 动态变化及影响因素探测 ..... 徐勇, 郑志威, 郭振东, 窦世卿, 黄雯婷(3730)

近 40 年来福建省水稻土有效磷富集效应及潜在生态风险评估 ..... 陈中星, 邱龙霞, 陈瀚闾, 范协裕, 毋亭, 沈金泉, 邢世和, 张黎明(3741)

土地利用变化对西南喀斯特土壤团聚体组成、稳定性以及 C、N、P 化学计量特征的影响 ..... 何宇, 盛茂银, 王轲, 王霖娇(3752)

长江经济带矿山土壤重金属污染及健康风险评价 ..... 张浙, 卢然, 伍思扬, 贾智彬, 王宁(3763)

煤矸石堆积区周边土壤重金属污染特征与植物毒性 ..... 尚誉, 桑楠(3773)

燃煤工业区不同土地利用类型土壤汞含量污染评价 ..... 李强, 姚万程, 赵龙, 张朝, 张恩月, 苏迎庆, 刘庚(3781)

广州市南沙区第四区剖面镉富集特征及生物有效性 ..... 王芳婷, 包科, 黄长生, 赵信文, 顾涛, 曾敏(3789)

黔西北山区耕地重金属健康风险评价及环境基准 ..... 徐梦琪, 杨文毅, 杨利玉, 陈勇林, 景灏楠, 吴攀(3799)

土壤重金属生物可利用性影响因素及模型预测 ..... 张加文, 田彪, 罗晶晶, 吴凡, 张聪, 刘征涛, 王晓南(3811)

添加有机物料对豫中烟田土壤呼吸的影响 ..... 鲁琪飞, 叶协锋, 韩金, 潘昊东, 张明杰, 王晶, 杨佳豪, 姚鹏伟, 李雪利(3825)

不同稻作系统土壤的 CH<sub>4</sub> 产生潜力与产生途径 ..... 沈皖豫, 黄琼, 马静, 张广斌, 徐华(3835)

东部平原矿区复垦土壤微生物群落特征及其组装过程 ..... 马静, 董文雪, 朱燕峰, 肖栋, 陈浮(3844)

同质环境下不同锦鸡儿属植物根际土壤细菌群落结构差异及其影响因素 ..... 李媛媛, 徐婷婷, 艾喆, 魏庐璐, 马飞(3854)

岩溶与非岩溶区水稻土团聚体细菌群落结构和功能类群比较 ..... 肖筱怡, 靳振江, 冷蒙, 李雪松, 熊丽媛(3865)

紫色土中微生物群落结构及功能特征对土壤 pH 的差异化响应 ..... 王智慧, 蒋先军(3876)

有机物料还田对稻田土壤 DOM 碳源代谢能力的影响 ..... 肖怡, 李峥, 黄容, 汤奥涵, 李冰, 王昌全(3884)

《环境科学》征订启事(3403) 《环境科学》征稿简则(3462) 信息(3493, 3655, 3834)

# 华北平原 AOD 时空演化与影响因素

郭霖<sup>1</sup>, 孟飞<sup>1,2</sup>, 马明亮<sup>1\*</sup>

(1. 山东建筑大学测绘地理信息学院, 济南 250101; 2. 华东师范大学地理信息科学教育部重点实验室, 上海 200241)

**摘要:** 深入了解大气气溶胶时空变化及其影响因素, 对控制大气污染, 改善大气环境具有重要意义。首先利用 2013 ~ 2019 年的 VIIRS IP 气溶胶光学厚度(AOD)数据分析华北平原 AOD 的时空变化规律。其次, 选取 SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、PM<sub>2.5</sub>、气象数据、NDVI、DEM、GDP 和 POPU 作为影响因素, 基于 XGBoost 模型分别建立华北平原 5 个代表城市的 AOD 与其影响因素之间的连接模型, 定量估算并揭示 AOD 时空分布规律背后各个影响因素的贡献。结果表明在空间分布上, 华北平原 AOD 以太行山脉为界, 呈现东南高西北低的格局。在时间变化上, 5 个城市 AOD 年均值整体呈下降趋势, AOD 月均值先上升后下降, 最高值出现在 7 月, 最低值出现在 12 月。此外, 建立的华北地区 5 个城市 AOD 估算模型精度较高, R<sup>2</sup> 在 0.60 ~ 0.67 之间。华北平原的 AOD 影响因素中, NO<sub>2</sub> 和 SO<sub>2</sub> 是对 5 个城市 AOD 贡献最大的影响因素, 此外, PM<sub>2.5</sub> 是另外一种重要的污染排放影响因素。气象因素方面, 温度(T)、相对湿度(RH)、风速(WS)和风向(WD)是其他 4 个重要的影响因素。华北 5 个代表城市 AOD 影响因素的贡献和重要性排序既有共性也有差异。

**关键词:** 气溶胶光学厚度(AOD); 华北平原; 时空变化; 统计建模; 影响因素分析

**中图分类号:** X122; X87 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2022)07-3483-11 **DOI:** 10.13227/j.hjxx.202109031

## Spatiotemporal Variation and Influencing Factors of AOD in the North China Plain

GUO Lin<sup>1</sup>, MENG Fei<sup>1,2</sup>, MA Ming-liang<sup>1\*</sup>

(1. School of Surveying and Geo-Informatics, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China; 2. Key Laboratory of Geographic Information Science, Ministry of Education, East China Normal University, Shanghai 200241, China)

**Abstract:** A better knowledge of the spatial and temporal variation in atmospheric aerosol and its influencing factors is of great significance to controlling atmospheric pollution and improving the atmospheric environment. First, the visible infrared imaging radiometer suite (VIIRS) intermediate product (IP) aerosol optical depth (AOD) data from 2013 to 2019 were used to analyze the temporal and spatial variation in AOD in the North China Plain. Secondly, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, PM<sub>2.5</sub>, meteorological data, NDVI, DEM, GDP, and POPU were selected as influencing factors, and the linkage models between AOD and its influencing factors were established based on the XGBoost model for each of the five representative cities in the North China Plain to quantitatively estimate and reveal the contribution of various influencing factors behind the temporal and spatial distribution in AOD. The results showed that in terms of spatial distribution, the AOD of the North China Plain was bounded by the Taihang Mountains, showing a pattern of high AOD in the southeast and low AOD in the northwest. In terms of temporal changes, the annual average value of AOD in the five cities showed an overall decreasing trend, and the monthly average value of AOD first increased and then decreased, with the highest value appearing in July and the lowest value in December. In addition, the AOD estimation model established in this paper for the five cities in North China had high accuracy, with R<sup>2</sup> ranging from 0.60 to 0.67. Among the factors influencing AOD in the North China Plain, NO<sub>2</sub> and SO<sub>2</sub> were the most influential factors contributing to AOD in the five cities. In addition, PM<sub>2.5</sub> was another important pollutant emission factor. In terms of meteorological factors, temperature (T), relative humidity (RH), wind speed (WS), and wind direction (WD) were the other four important influencing factors. There were both commonalities and differences in the rankings of the contribution and importance of AOD influencing factors in the five representative cities in North China.

**Key words:** aerosol optical depths(AOD); North China Plain; spatiotemporal variation; statistical modeling; analysis of influencing factors

大气气溶胶是由大气介质和混合于其中的固体或液体颗粒组成的体系,影响着大气中发生的许多物理化学过程<sup>[1]</sup>。气溶胶粒子不仅可以直接或间接影响地-气系统的辐射平衡,进而影响气候变化<sup>[2]</sup>;也会导致大气能见度的降低和空气质量下降<sup>[3]</sup>,从而对人体健康产生极大的威胁<sup>[4]</sup>。

由于技术的局限,现阶段近地面 PM<sub>2.5</sub> 数据空间范围不连续,空间代表性差<sup>[5]</sup>,卫星遥感监测 PM<sub>2.5</sub> 也存在难度<sup>[6]</sup>,难以获得大区域内较为准确的 PM<sub>2.5</sub> 浓度信息<sup>[7]</sup>。可以利用气溶胶光学厚度替代 PM<sub>2.5</sub> 作为监测大气环境质量的指标<sup>[8]</sup>。气溶胶光学厚度是描述地球大气系统中气溶胶光学性质的重要参数之一,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<sup>[9]</sup>。目前,地

基站点测量和卫星遥感观测是获取气溶胶光学厚度的两种重要手段<sup>[10]</sup>。地基站点观测是获取气溶胶光学厚度(aerosol optical depth, AOD)最精确和最直接的方式,但由于气溶胶在时间和空间上的分布具有差异性<sup>[11]</sup>,地基站点观测只能代表站点及站点周边较小空间范围内的 AOD 特征,在较大尺度上其空间代表性较差,而且地基观测站点难以连续覆盖全球范围。卫星遥感具有连续、动态、宏观和快速的

收稿日期: 2021-09-04; 修订日期: 2021-12-08

基金项目: 山东省自然科学基金项目(ZR2018MD008); 山东省自然科学基金青年项目(ZR2021QD034); 华东师范大学地理信息科学教育部重点实验室开放基金项目(KLGIS2021A02); 山东建筑大学博士基金项目(X19082Z)

作者简介: 郭霖(1997~),女,硕士研究生,主要研究方向为大气污染与 AOD 遥感监测, E-mail: guolin503178999@163.com

\* 通信作者, E-mail: mamingliang19@sdjzu.edu.cn

优势<sup>[12]</sup>,为气溶胶的反演和应用提供了有效的数据来源,成为近年来的研究热点。

迄今为止,很多学者基于卫星遥感开展了大量大气污染特征方面的研究工作<sup>[13]</sup>,其中,中国区域的 AOD 污染也有众多学者进行了关注,这些关于 AOD 时空特征的研究区域大部分集中于国内的一些特定区域,如塔克拉玛干沙漠和泛长江三角洲地区等<sup>[14]</sup>. Si 等<sup>[15]</sup>利用 2006~2015 年 MODIS AOD 数据研究了华北区域的 AOD 时空特征和影响因素,但只考虑了 NO<sub>2</sub> 和 SO<sub>2</sub> 等大气污染物与 AOD 的关系,未考虑气象条件及人为活动的影响,并且只建立了 AOD 与 NO<sub>2</sub> 和 SO<sub>2</sub> 之间的散点图来检验它们的关系. Qin 等<sup>[16]</sup>的研究分析了国内人为气溶胶排放、社会经济因素、土地利用和土地覆盖变化对 AOD 的影响,也未考虑气象因素对 AOD 的影响. Li 等<sup>[17]</sup>的研究探讨了自然因素和人为因素对我国新疆地区 AOD 的影响,但选取的自然因素较少,仅包括温度、降水量和日照时数,也未将污染物排放作为 AOD 的影响因素. 基于此,本文综合气象、污染物排放、植被、地形和社会经济等多种因素,定性分析各影响因素对 AOD 的贡献,以期更好地了解 AOD 的时空变化特征及影响机制。

为切实改善空气质量,我国于 2013 年发布《大气污染防治行动计划》,将其京津冀地区作为空气质量治理改善的重点区域. 为评价该计划实施效果,本文选取 2013~2019 年 VIIRS (visible infrared imaging radiometer suite) IP (intermediate product) AOD 数据,分析该政策实行后华北平原 AOD 的时空变化规律,并揭示 AOD 时空变化规律背后的 AOD 影响机制. 本研究目的是:①探究华北平原 2013~2019 年 AOD 的时间变化趋势及空间分布特征;②分析气象、污染物排放、植被、地形及社会经济因素对各个代表城市 AOD 的影响和贡献;③对比分析并揭示不同城市不同 AOD 时空变化特征背后 AOD 影响因素的异同。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域

中国华北平原位于 33°~42°N, 112°~120°E (图 1),覆盖北京、天津、河北、山西、山东和河南这 6 个人口密集和工业发达的省市. 华北平原地形平坦,分布河流众多,属于温带季风气候,四季变化明显. 根据文献<sup>[18]</sup>的统计数据,华北平原的面积仅占全国 5.63%,却贡献了全国 GDP (gross domestic product) 的 23%,承载着全国 24.75% 的人口数量和 28.39% 的机动车,能源消耗占全国

27.7%. 随着经济发展和人口的快速增长,华北平原大气污染现象愈发突出,是我国 PM<sub>2.5</sub> 高值区之一<sup>[19]</sup>,也是我国地表臭氧污染的主要集聚区域<sup>[20]</sup>. 大量工业化石燃料的燃烧和机动车尾气的排放也导致了华北平原上空大气气溶胶浓度的升高<sup>[21]</sup>. 据文献<sup>[22]</sup>统计的 2019 年全国 168 个城市中空气质量相对较差的 20 个城市,其中,位于华北平原的有三座城市(石家庄排名倒 2、济南排名倒 11 和郑州排名倒 19)。

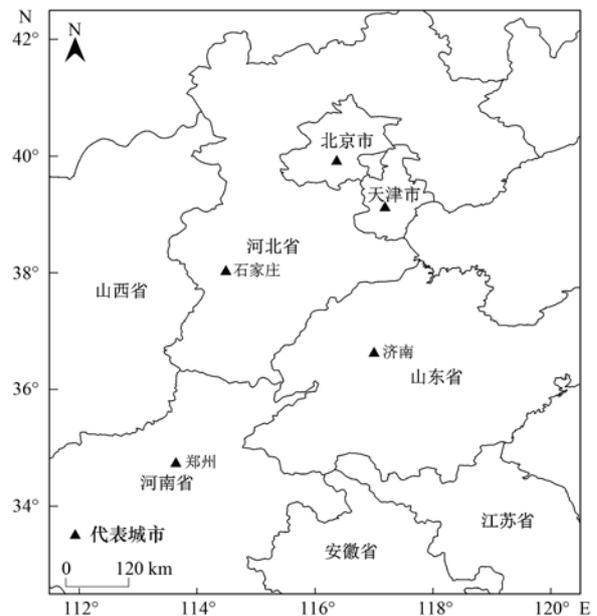


图 1 研究区地理位置示意

Fig. 1 Geographical location of the study area

### 1.2 研究数据

#### 1.2.1 VIIRS IP AOD 数据

搭载于 S-NPP (suomi national polar-orbiting partnership) 卫星上的可见光红外成像辐射仪 (VIIRS),是监测气溶胶光学厚度的重要仪器. 有研究表明, S-NPP VIIRS IP AOD 数据与 AERONET 站点 AOD 数据有显著的相关性<sup>[23]</sup>. 将 VIIRS IP AOD 数据与相应的 MODIS AOD 数据对比发现,二者高度相关. 但 VIIRS IP AOD 数据相较 MODIS AOD 数据,有更高的空间分辨率(750 m)<sup>[24]</sup>,VIIRS 的双增益设计还降低了 MODIS 中存在的冗余度(如 0.55 μm 波段),能在低辐射值下保持较高的信噪比<sup>[25]</sup>,使 VIIRS IP AOD 数据更适合区域大气气溶胶光学厚度的研究<sup>[26]</sup>. 并且不同尺度的研究也评估了 VIIRS IP AOD 数据的准确性<sup>[27~29]</sup>. 因此利用 VIIRS IP AOD 数据研究华北平原气溶胶的时空变化特征是可行的. 在本文中选用的 VIIRS IP AOD 数据,时间序列自 2013 年 1 月 24 日至 2019 年 12 月 31 日,空间分辨率为 750 m,数据下载自 <https://www.bou.class.noaa.gov/>.

### 1.2.2 其他数据

气象数据包括:地面 2 m 处的温度 ( $T$ )、地表压强 (surface pressure, SP)、边界层高度 (boundary layer height, BLH)、总降水量 (total precipitation, TP)、地面太阳辐射 (surface solar radiation downwards, SSRD)、近地面 1 000 hPa 高度的相对湿度 (relative humidity, RH)、地面 10m 处的风速 (wind speed, WS, 由经向风速、纬向风速合成得到)、地面 10m 处的风向 (wind direction, WD, 由经向风速、纬向风速合成得到) 和总云量 (total cloud cover, TCC) 等。该 9 种气象数据来源于欧洲中期天气预报中心 (European centre for medium-range weather forecasts, ECMWF, 数据下载自 <https://cds.climate.copernicus.eu/>) 的 ERA5 逐小时再分析资料, 空间分辨率为  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 。前人研究表明, ERA5 再分析数据拥有精细的空间分辨率和丰富的参数, 并且数据质量更加可靠<sup>[30]</sup>。

$\text{NO}_2$  与  $\text{SO}_2$  数据下载自 NASA 的 GES DISC 数据库 (<https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets>), 传感器臭氧监测仪 (ozone monitoring instrument, OMI,) 主要用于研究大气痕量成分及其对气候变化的影响, 具有较高的空间分辨率, OMI 所监测的  $\text{NO}_2$  与  $\text{SO}_2$  数据时间序列较长, 前人研究验证发现  $\text{NO}_2$  与  $\text{SO}_2$

数据与地面监测结果有良好的一致性, 且在相关领域有较广泛的应用<sup>[31-33]</sup>。

$\text{PM}_{2.5}$  数据来自 CAMS 全球再分析数据集 (EAC4), 空间分辨率为  $0.75^\circ \times 0.75^\circ$ , 时间分辨率为 3 h (数据下载自 <https://ads.atmosphere.copernicus.eu/>)。EAC4 由 IFS (ECMWF's integrated forecast system) 模型和数据同化系统产生, 该数据集是由大气化学传输模型和同化系统将模型模拟数据与来自世界各地观测结果相结合生成的完整数据集。该数据能够估计观测数据之间的偏差, 并从质量差的数据中筛选出高质量的数据, 同时能够摄取原始观测值的改进版本, 提高再分析数据的质量。

NDVI 数据是由 NASA 提供的 MOD13C1 产品数据, 时间分辨率为 16 d, 空间分辨率为  $0.05^\circ$  (数据下载自 <https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>)。DEM、GDP 密度和 POPU 数据均来自于中国科学院资源环境科学数据中心 (RESDC, 数据下载自 <https://www.resdc.cn/>), 空间分辨率为  $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 。在本论文中使用的 GDP 密度和人口密度数据是 2015 年的数据, 因为 2015 年的 GDP 和 POPU 数据是可以获得且最接近研究时间段的数据。表 1 为本研究所用数据的详细说明。

表 1 研究数据说明

Table 1 Description of study data

数据集	类型	单位	空间分辨率	时间分辨率	来源
AOD	/	/	750 m	1 d	VIIRS
NDVI	地表	/	$0.05^\circ \times 0.05^\circ$	16 d	MODIS
GDP	地表	万元	$1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$	1 a	RESDC
DEM	地表	m	$1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$	1 a	RESDC
POPU	/	$\text{人} \cdot \text{km}^{-2}$	$1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$	1 a	RESDC
地表温度	地表 2 m	K	$0.1^\circ \times 0.1^\circ$	1 h	ERA-5
相对湿度	1 000 hPa	%	$0.1^\circ \times 0.1^\circ$	1 h	ERA-5
地面太阳辐射	累积量	$\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$	$0.1^\circ \times 0.1^\circ$	1 h	ERA-5
地表压强	地表	Pa	$0.1^\circ \times 0.1^\circ$	1 h	ERA-5
边界层高度	累积量	m	$0.1^\circ \times 0.1^\circ$	1 h	ERA-5
风速	地表 10 m	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$0.1^\circ \times 0.1^\circ$	1 h	ERA-5
风向	地表 10 m	( $^\circ$ )	$0.1^\circ \times 0.1^\circ$	1 h	ERA-5
总云量	累积量	%	$0.1^\circ \times 0.1^\circ$	1 h	ERA-5
总降水量	累积量	m	$0.1^\circ \times 0.1^\circ$	1 h	ERA-5
$\text{SO}_2$	对流层柱浓度	$\text{molecules} \cdot \text{cm}^{-2}$	$0.25^\circ \times 0.25^\circ$	1 d	OMI
$\text{NO}_2$	对流层柱浓度	$\text{molecules} \cdot \text{cm}^{-2}$	$0.25^\circ \times 0.25^\circ$	1 d	OMI
$\text{PM}_{2.5}$	地表	$\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	$0.75^\circ \times 0.75^\circ$	3 h	CAMS

## 1.3 研究方法

### 1.3.1 AOD 时空变化分析

VIIRS IP AOD 日均数据经过质量控制后, 处理为月均、季节和年均尺度数据, 从而分析华北平原 2013 ~ 2019 年 AOD 年均空间分布特征、逐年分布变化及季节分布差异; 探究 2013 ~ 2019 年 5 个代

表城市 AOD 的年均变化情况和月均变化规律。

### 1.3.2 建模数据预处理

利用空间分辨率为 30 m 的不透水面数据<sup>[34]</sup> 确定 5 个城市的建成区范围, 再提取城市建成区范围内的 17 种 AOD 影响因素, 包括月份、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、GDP、POPU、温度 ( $T$ )、相对湿度 (RH)、风

向(WD)、风速(WS)、地表压强(SP)、边界层高度(BLH)、总云量(TCC)、总降水量(TP)、地面太阳辐射(SSRD)、NDVI和DEM,对各个城市建成区范围内的各个影响因素数据每天的数据矩阵求取平均值,得到各城市建成区范围内2013~2019年每个影响因素的每日时间序列,最后对所有的数据进行归一化处理。

### 1.3.3 XGBoost 模型

XGBoost是由Chen和Guestrin提出的一种集成机器学习算法,可以克服计算速度和精度的限制,减少训练和预测时间,运行效率高于其他Boosting机器学习模型<sup>[35]</sup>,并且支持对每个变量进行相对重要性排序<sup>[36]</sup>。本文基于XGBoost模型建立了华北平原5个代表城市AOD日均值数据与17种影响因素之间的统计关系,统计模型如下:

$AOD \sim XGBoost(\text{月份}, SO_2, NO_2, PM_{2.5}, GDP, \text{POPU}, DEM, T, RH, WD, WS, SP, BLH, TCC, TP, SSRD, NDVI)$

式中,AOD为因变量, $SO_2$ 、 $NO_2$ 、 $PM_{2.5}$ 、GDP、POPU、 $T$ 、RH、WD、WS、SP、BLH、TCC、TP、SSRD、月份、NDVI和DEM为自变量,分别构建了

各个城市基于XGBoost算法的AOD和AOD影响因素之间的连接模型。从所有数据中,随机选择80%的数据作为建模样本,剩余20%数据作为验证样本,通过对验证样本进行交叉验证,来评价5个城市的AOD估算统计模型的精度。最后,结合华北地区的AOD时空分布特征,定量计算各影响因素对城市AOD估算模型的贡献,并对每种影响因素的相对重要性排序,来确定各城市AOD时空分布规律不同的原因及其主要影响因素。综上,图2为本研究的技术路线。

## 2 结果与讨论

### 2.1 AOD时空分布特征

图3为2013~2019年华北平原AOD均值空间分布,整体来看,华北平原AOD值呈现东南高西北低的格局:高值区主要集中在京津冀经济带、河南省郑州-开封-焦作地区和山东省除中部丘陵地区以外的区域。这些地区人口密集、工业产业较发达,工业污染物排放是造成该地区AOD值较高的原因。相较而言,研究区西北部地处燕山与太行山脉,森林覆盖率较高,人口活动较低,AOD浓度普遍偏低。而

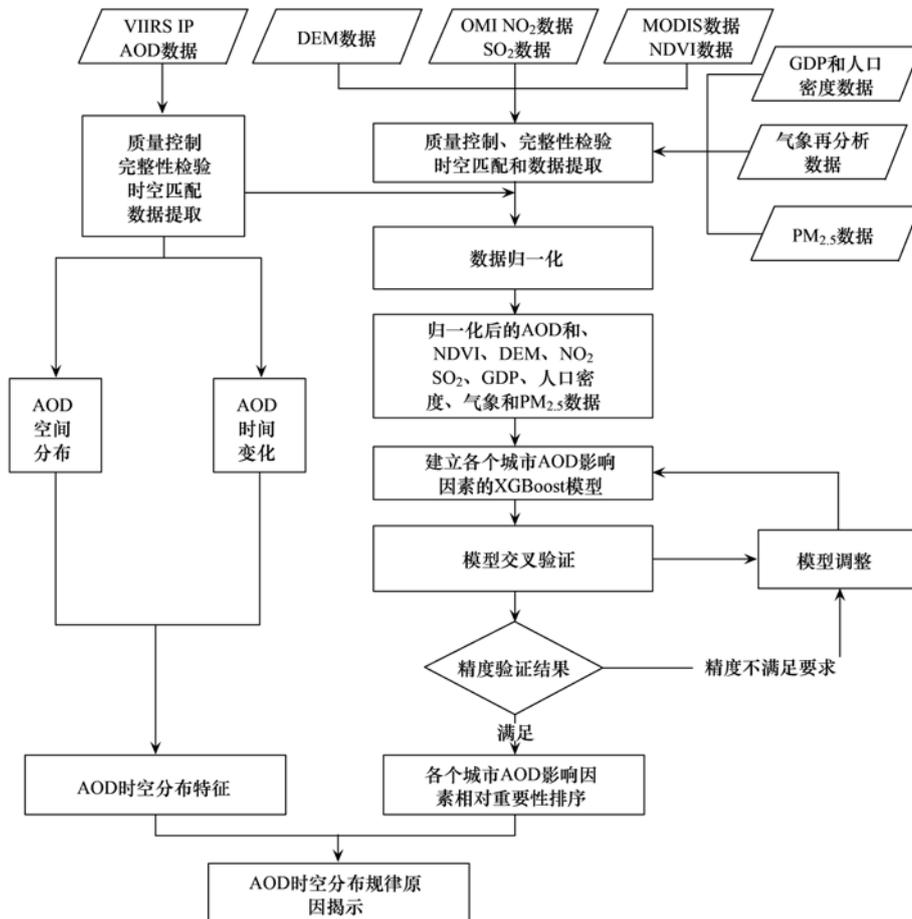


图2 技术路线

Fig. 2 Technology roadmap

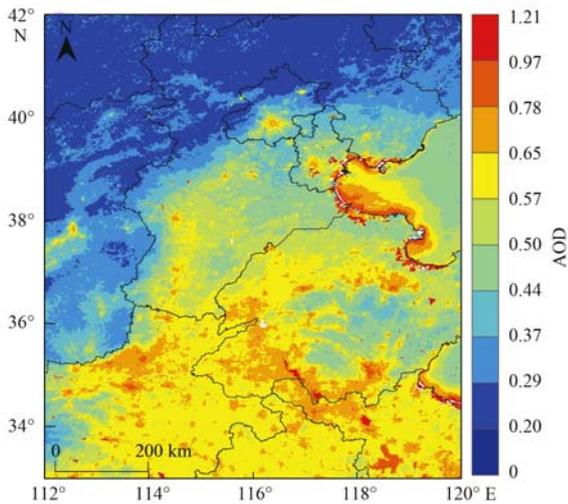
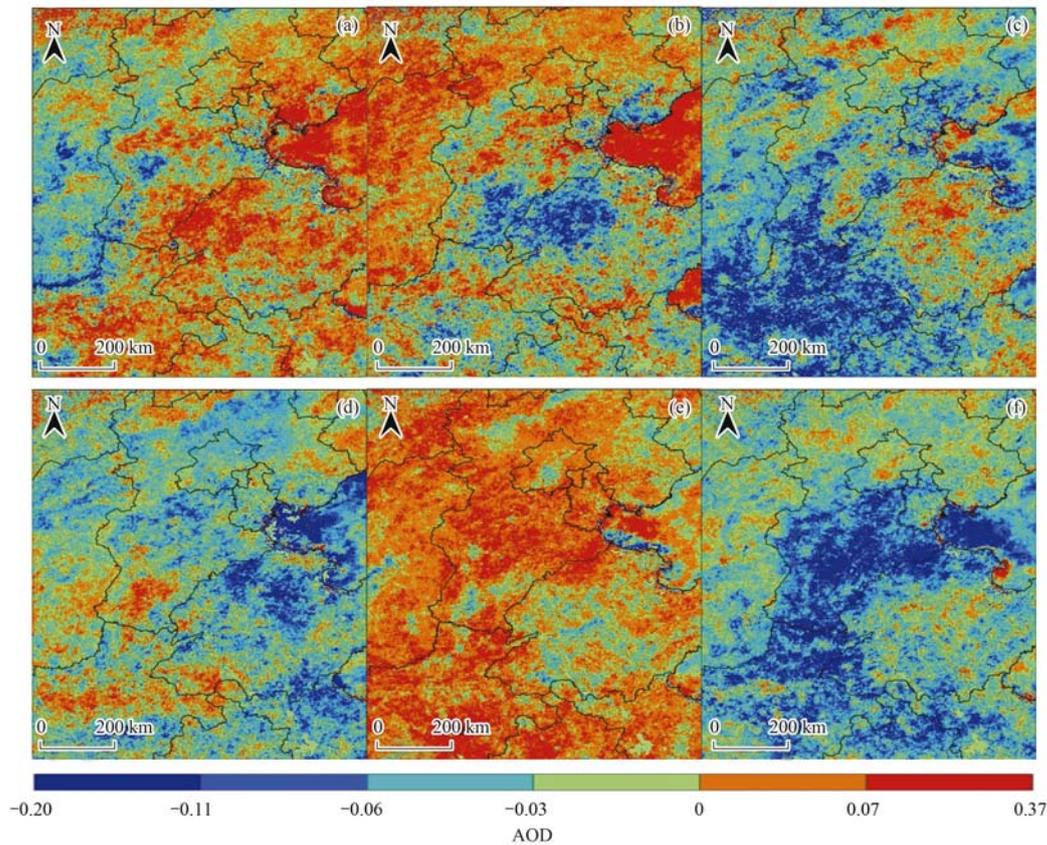


图3 2013~2019年平均AOD空间分布

Fig. 3 Average AOD spatial distribution from 2013 to 2019

渤海沿岸出现高值 AOD 是由于渤海沿海涌浪和光滩的反射率很高,造成了 AOD 不真实的大值<sup>[37]</sup>.

为了揭示 AOD 的年际变化,图 4 展示了 2013~2019 年华北逐年 AOD 差值的空间分布. 从中可知, 2015 年之前, 华北大部分地区 AOD 值显著增加, 增幅在 0.07 以上, 这是由于华北工业污染源点位多, 污染物排放和扩散使该地区污染物增多. 2016 年为“十三五”规划起始年份, 国家加大了环境综合治理力度, 因此 2016~2019 年大部分地区 AOD 值明显降低. 但山东省西北部 2016 年 AOD 值有明显的上升, 是因为 2016 年山东省多次出现长时间大范围的重度雾、霾天气, 加之春季降水量低于往年, 冬季多地气温也突破历史最低值, 造成了污染物的积聚. 华北整体 2018 年 AOD 上升明显, 是由于该年厄



(a)~(f) 分别表示华北平原 2014~2019 年与前一年的 AOD 差值空间分布, 例如, (a) 表示 2013 年与 2014 年的 AOD 差值, 以此类推

图4 2013~2019年华北平原AOD差值分布

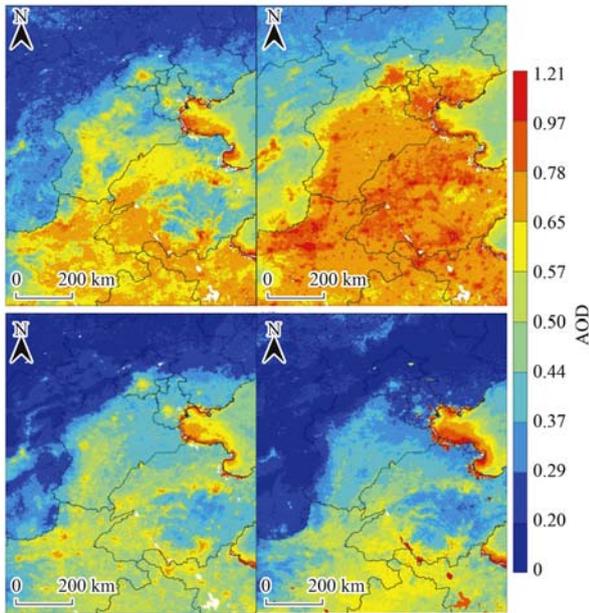
Fig. 4 AOD differential distribution in North China Plain from 2013 to 2019

尔尼诺现象严重<sup>[38]</sup>, 冷空气弱于常年, 冷空气难以扩散南下, 导致北方地区聚集的空气污染物难以扩散.

图 5 为 2013~2019 年华北平原 AOD 四季均值空间分布. 从季节变化来看, 研究区内 AOD 的四季分布特征与年平均分布特征基本相似. 以太行山脉为界, 东南部 AOD 明显高于西北部, 但华北 AOD 呈现明显的季节差异, AOD 季平均值夏季高于春秋两

季, 冬季最低. 夏季华北大部分地区 AOD 处于高浓度水平, AOD 值大多在 0.57 以上, 主要集中在京津冀、河北省西南河南省西北部及山东省西部. 夏季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, 导致夏季 AOD 浓度较高<sup>[39]</sup>; 此外, 夏季大量秸秆焚烧也加剧了气溶胶的载荷<sup>[40]</sup>. 春季华北 AOD 值较高的原因是春季的地表植被覆盖低, 内蒙古和新疆戈壁的沙尘随着

大风由北向南输送<sup>[41]</sup>,促进了新粒子的生成<sup>[42]</sup>,从而导致春季华北平原 AOD 值增加. 冬季全区内 AOD 基本处于较低水平,其原因如下:冬季边界层高度相对较低,污染物更集中于地面<sup>[43]</sup>;冬季雨雪量增加、部分重污染天气发生是天空云量相对较多,卫星观测无法得到准确的 AOD 值.



(a)、(b)、(c)和(d)分别为春季、夏季、秋季和冬季

图5 2013~2019年华北平原 AOD 季均值分布

Fig. 5 Seasonal average distribution of AOD in the North China Plain from 2013 to 2019

为进一步探究华北各城市 AOD 变化趋势,分析了 2013~2019 年华北 5 个代表城市 AOD 的月变化(图 6). 可以看出,5 个城市的 AOD 整体呈先上升后下降的趋势. 从 1 月开始各城市 AOD 值逐渐增加,5 月稍有回落可能是由于供暖停止、地表植被覆盖增加,6 月和 7 月因华北平原生物质燃烧和夏季高温导致 AOD 逐渐增加,在 7 月达到全年最大值后, AOD 值逐渐下降,12 月回落到一年中的最低值. 此外,城市间 AOD 值月份间差异明显. 5 个城市中,郑州市的月均值最高,而北京市月均值最低. 这是由于郑州市周围工业产业排放污染物较多,而北京市近几年大气环境治理、机动车限行和排放规模管控等政策有较好的成效.

利用箱线图对每个城市 2013~2019 年 AOD 均值进行统计分析(图 7). 从中可知,华北平原 5 个城市的 AOD 值集中在 0.25~1.50 之间. 各城市对比而言,郑州市 AOD 年均值高于其他城市,而北京市 AOD 年均值是 5 个城市中最低的. 这与图 6 中各城市 AOD 月均值变化相似. 在 AOD 年际变化方面,7 年间北京、济南和天津中度或重度污染的程度先上升后下降<sup>[19]</sup>,天津 2019 年污染程度有所回升;而

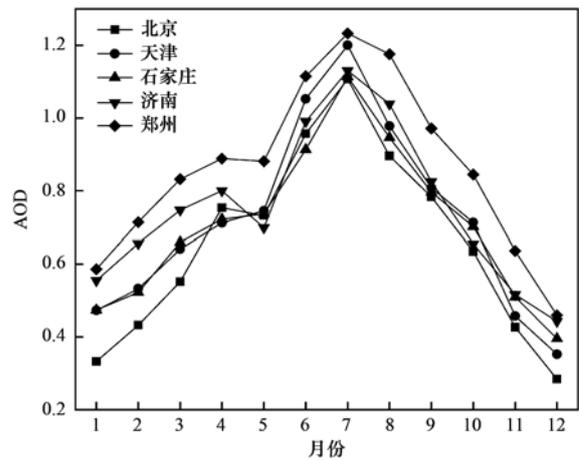


图6 2013~2019年北京、天津、石家庄、济南、郑州 AOD 月均值

Fig. 6 Monthly average AOD in Beijing, Tianjin, Shijiazhuang, J'nan, and Zhengzhou from 2013 to 2019

石家庄和郑州中度或重度污染状况得到了缓解,但 2018 年石家庄重度污染情况出现反弹. 总的来看,虽然 5 个城市 AOD 年际变化各有不同,但都呈现了下降趋势,可见《大气污染防治行动计划》和《打赢蓝天保卫战三年行动计划》等一系列改善大气环境政策取得了一定成效. 此外,根据图 7 中各城市每年 AOD 中值分布来看,各城市每年 AOD 低值集中,高值离散,即各城市 AOD 中低度污染天数较多,而 AOD 大于 1 的重污染天气较少. 以上结果可以看出,各城市 AOD 在时空变化上存在差异. 为了探索 5 个城市 AOD 时空差异的原因,本文引入 17 种影响因素,使用 XGBoost 模型预测 AOD 和各影响因素的贡献程度.

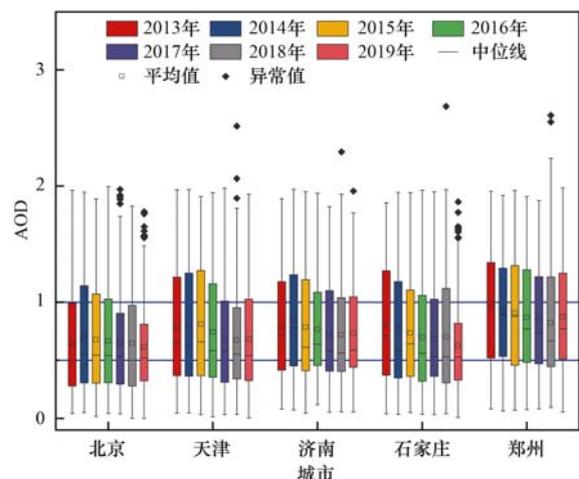


图7 2013~2019年北京、天津、石家庄、济南和郑州 AOD 均值

Fig. 7 Average AOD values in Beijing, Tianjin, Shijiazhuang, J'nan, and Zhengzhou from 2013 to 2019

## 2.2 AOD 时空分布特征规律的影响因素揭示

将 2013~2019 年各城市的 AOD 日均值作为因变量,同时考虑  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{PM}_{2.5}$  和气象数据等 17

种相关影响因素的日数据作为自变量, 基于 XGBoost 模型分别建立了华北平原 5 个代表城市的 AOD 估算模型, 并随机选取 20% 的验证样本数据对这 5 个模型进行精度验证, 结果如图 8 所示. 验证结果表明, 5 个城市的 AOD 估算模型精度较高, 模型估算值和实测值的  $R^2$  值均在 0.6 以上, 均方根误差 (RMSE) 均在 0.3 以下. AOD 高值主要集中在夏季, 低值主要集中在冬季. 北京市观测 AOD 低值时, 估算值高估, 观测 AOD 高值时, 估算值低估. 未来希望通过增加研究样本, 进行不同区域分季节建模, 以揭示不同区域不同季节的 AOD 影响因素规律. 在 5 个 AOD 估算模型中, 天津市和石家庄市的 AOD 估算模型的精度最高,  $R^2$  值为 0.67, 济南 AOD 估算模型精度最低,  $R^2$  值为 0.60. 这说明本文所建立的连接模型精度较高, 满足接下来的研究要求.

由于 XGBoost 模型具有定量估算模型各输入影响因素的能力, 同时为了进一步定量估算 14 种 AOD 影响因素对各个城市 AOD 时空变化的影响和贡献, 基于上述建立的 AOD 与影响因素之间的 XGBoost 统计模型, 定量估算了 5 个城市的 AOD 估算模型各个输入变量的贡献, 结果如图 9 所示. 从中可知, 14 种影响因素对北京、天津、石家庄、济南和郑州 AOD 的影响程度既存在共性也存在差异. 总体来看, 影响华北平原 AOD 时空变化的因素较为一致,  $\text{NO}_2$  是对 5 个城市 AOD 贡献最大的因素, 相对重要性均在 11.9% 以上; TP 对 AOD 的贡献最小, 相对重要性在 2.9% 以下; 此外  $\text{SO}_2$ 、 $T$ 、RH 对各城市 AOD 的影响程度也比较大, 这 3 种因素的相对重要性之和在 24.4% 以上; SP、BLH、SSRD 和 TCC (除郑州外) 对 5 个城市 AOD 贡献较小, 这 4 种因素的相对重要性均在 6.5% 以下.

$\text{NO}_2$ 、 $\text{SO}_2$  和  $\text{PM}_{2.5}$  是对 5 个城市 AOD 贡献程度最大污染物排放因素,  $T$ 、RH、WS 和 WD 则是对 AOD 贡献最大的气象因素. 各城市  $\text{NO}_2$  和  $\text{SO}_2$  的相对重要性之和均在 20% 以上, 北京、天津和石家庄已经达到了 22% 以上. 这 3 个城市人口众多, 工业发达, 化石燃料燃烧及机动车排放产生的  $\text{NO}_2$  和  $\text{SO}_2$  等在城市上空聚集, 生成二次气溶胶粒子<sup>[44]</sup>, 加重大气污染, 导致 AOD 值的增加, 也从侧面说明了人为活动排放污染物对 AOD 升高的影响. RH 在 5 个模型中的相对重要性均在 7.9% 以上, 此前的研究也表明气溶胶光学性质与 RH 有着明显关系, 随着湿度的增加, 气溶胶粒子中的吸湿性成分增大尺寸, 散射效率提高<sup>[45]</sup> 从而导致了 AOD 值的升高.  $T$  也对各城市的 AOD 有着较大的影响, 相对重要性占比在 7.9% 以上, 当气温较高时, 大气处于不稳定状态, 气溶胶粒子

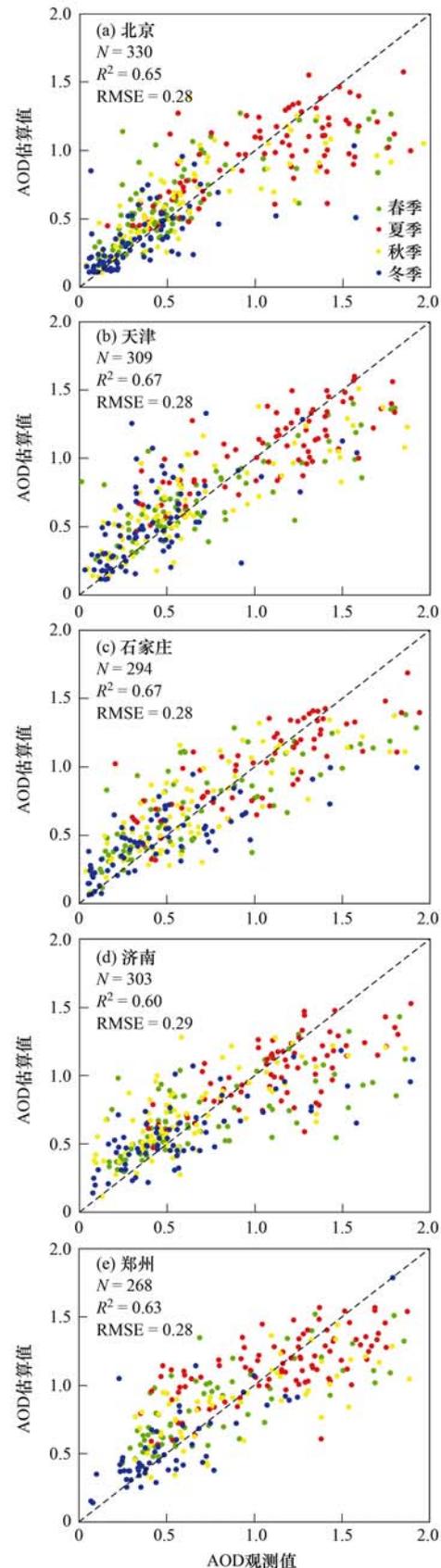


图 8 华北平原代表城市 AOD 及其影响因素统计模型交叉验证精度

Fig. 8 Cross-validation accuracy of statistical models of AOD and its influencing factors in representative cities of North China Plain

向上扩散, AOD 值降低; 反之, 大气稳定, 气溶胶粒

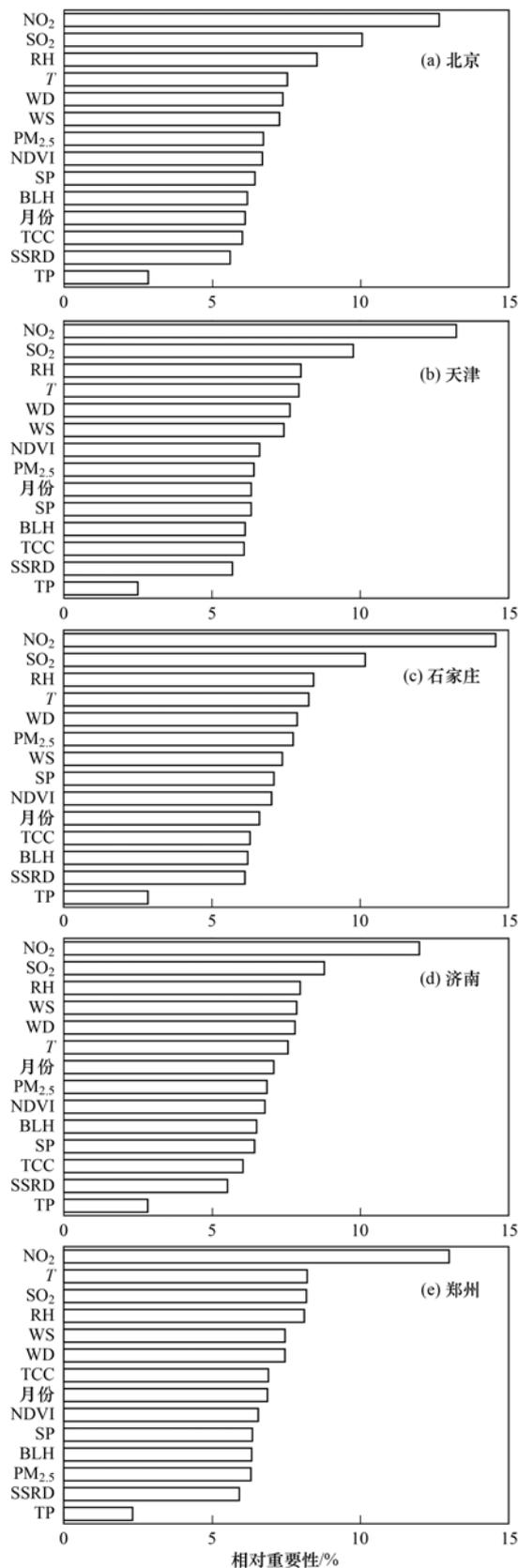


图9 华北平原代表城市 AOD 影响因素排序

Fig. 9 Ranking of AOD influencing factors in representative cities of North China Plain

子的扩散受到抑制, AOD 值就会升高<sup>[46]</sup>.

WS 和 WD 对 5 个城市的 AOD 贡献的相对重要性之和在 14% 以上,但这两种影响因素的相对重要

性排序却各有不同. 风是影响污染物扩散稀释的重要因素<sup>[47]</sup>. 济南市三面环山, WD 和 WS 的不同会对空气污染物的聚集或扩散产生不同的影响, 因此济南市 WD 和 WS 对 AOD 的贡献值要明显高于其他城市. 北京北部和石家庄西部临近燕山山脉和太行山脉, 当主导风向为东南风和南风时, 大气污染物在风的输送作用下聚集在山前的平原地区, 从而导致污染物浓度的提高. 因此对于北京和石家庄而言, WD 对 AOD 的贡献值要高于 WS. 而天津是 5 个城市中唯一的海滨城市, 地形开阔, WS 对大气污染物的双重影响更易导致污染物的扩散或者聚集, 因此 WS 对天津市 AOD 的贡献量要高于 WD. NDVI 对天津市 AOD 的贡献也高于其他城市, 相对重要性为 7.4%. 天津市与其他城市相比与海洋距离较近, 降水量多, 植被茂密程度高于其他城市, 对 AOD 的影响更为显著.  $PM_{2.5}$  对各城市 AOD 有较大的贡献, 相对重要性在 6.7% 以上. 与其他城市相比,  $PM_{2.5}$  对石家庄市的 AOD 贡献最大, 相对重要性达到 7.7%, 这与石家庄市工业产业发达, 大气污染物排放量大有关. SP 在一定程度上会影响污染物的稀释和扩散, 处于高压控制的地区空气下沉, 形成下沉逆温, 阻止了污染物向上扩散; 低压时大气的低层空气上升, 污染物随之上升到高空, 有利于污染物的扩散与稀释. 由于华北地区在地理位置上靠近植被覆盖力弱的内蒙古地区, 3~4 月为沙尘暴的多发时间, 大量沙尘粒子导致 AOD 值的升高. 山东省和河南省都是粮食生产大省, 3~4 月沙尘暴和 6~7 月秸秆焚烧造成了月份对济南市和郑州市 AOD 贡献高于月份对其他城市 AOD 的贡献.

### 3 结论

(1) 在空间上, 华北平原 AOD 分布以太行山脉为界, 东南部 AOD 值高于西北部. 高值区主要集中在山东、河南、安徽和江苏四省的交界地区. 时间上, 华北地区 AOD 季节差异明显, 夏季最高, 冬季最低. 北京市 AOD 月均值在 5 个城市中处于较低水平, 郑州市的 AOD 月均值高于其他城市. 7 年间, 5 个城市 AOD 整体呈下降趋势.

(2) 华北平原 5 个城市 AOD 时空分布规律的影响因素具有很大的共性特征,  $NO_2$  和  $SO_2$  对华北平原代表城市 AOD 贡献程度最大,  $PM_{2.5}$  是另外一种重要的污染排放影响因素; 气象因素方面, 温度、相对湿度、风速和风向是其他 4 个重要的影响因素. 地表辐射和总降水量对 5 个城市 AOD 贡献最小, 相对重要性均在 6.2% 以下.

(3) 华北平原 5 个城市 AOD 时空分布规律的

影响因素具有一定的差异性. 同一因素对不同城市 AOD 贡献不同, 各城市 AOD 影响因素重要性排序也存在差异. 具体而言, 风向对北京和石家庄 AOD 的贡献高于风速, 而风速对天津市 AOD 的贡献高于风向. 相较于其他城市, NDVI 对天津 AOD 的贡献最大, PM<sub>2.5</sub> 对石家庄 AOD 的贡献最大, 月份对济南市和郑州市 AOD 贡献高于其他城市.

(4) 本文通过选取华北 5 个代表城市的 AOD 数据及其多个影响因素, 建立起各个城市的 AOD 估算模型, 揭示了华北各城市 AOD 的主要影响因素的规律, 但是由于秋冬季节 VIIRS AOD 数据存在数值较低, 数据量较少的问题, 分析结果存在一定不确定性, 未来有望通过其他精度更高, 时间覆盖度更为完整的卫星 AOD 数据来改进 AOD 影响因素研究的可靠性. 同时, 各个城市的模型在观测 AOD 低值时, 估算值高估, 观测 AOD 高值时, 估算值低估, 对于这个问题, 在未来研究中通过增加各个季节的样本量, 对区域 AOD 进行分季节建模, 探究各个季节的 AOD 影响因素的异同, 并探究分季节建模对各个城市 AOD 模型精度的影响.

#### 参考文献:

- [ 1 ] 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.
- [ 2 ] 段家乐, 巨天珍, 黄蕊蕊, 等. 粤港澳大湾区吸收性气溶胶的解析 [J]. 环境科学, 2021, **42**(8): 3652-3662.  
Duan J L, Ju T Z, Huang R R, et al. Analysis of ultraviolet aerosol index in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area [J]. Environmental Science, 2021, **42**(8): 3652-3662.
- [ 3 ] Yang X C, Zhao C F, Yang Y K, et al. Long-term multi-source data analysis about the characteristics of aerosol optical properties and types over Australia [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2021, **21**(5): 3803-3825.
- [ 4 ] 夏晓圣, 汪军红, 宋伟东, 等. 2000~2019 年中国 PM<sub>2.5</sub> 时空演化特征 [J]. 环境科学, 2020, **41**(11): 4832-4843.  
Xia X S, Wang J H, Song W D, et al. Spatio-temporal evolution of PM<sub>2.5</sub> concentration during 2000-2019 in China [J]. Environmental Science, 2020, **41**(11): 4832-4843.
- [ 5 ] 黄晓军, 祁明月, 李艳雨, 等. 关中地区 PM<sub>2.5</sub> 时空演化及人口暴露风险 [J]. 环境科学, 2020, **41**(12): 5245-5255.  
Huang X J, Qi M Y, Li Y Y, et al. Spatio-temporal evolution and population exposure Risk to PM<sub>2.5</sub> in the Guanzhong Area [J]. Environmental Science, 2020, **41**(12): 5245-5255.
- [ 6 ] 刘林钰, 张永军, 李彦胜, 等. 基于深度学习的华东地区 PM<sub>2.5</sub> 浓度遥感反演 [J]. 环境科学, 2020, **41**(4): 1513-1519.  
Liu L Y, Zhang Y J, Li Y S, et al. PM<sub>2.5</sub> Inversion using remote sensing data in eastern China based on deep learning [J]. Environmental Science, 2020, **41**(4): 1513-1519.
- [ 7 ] 李梦真, 张廷斌, 易桂花, 等. 四川盆地 PM<sub>2.5</sub> 浓度时空变化特征遥感监测与影响因素分析 [J]. 环境科学, 2021, **42**(7): 3136-3146.
- [ 8 ] Li M Z, Zhang T B, Yi G H, et al. Spatio-temporal variation characteristics monitored by remotely sensed technique of PM<sub>2.5</sub> concentration and its influencing factor analysis in Sichuan basin, China [J]. Environmental Science, 2021, **42**(7): 3136-3146.
- [ 9 ] Zaman S U, Pavel R S, Joy K S, et al. Spatial and temporal variation of aerosol optical depths over six major cities in Bangladesh [J]. Atmospheric Research, 2021, **262**, doi: 10.1016/j.atmosres.2021.105803.
- [ 10 ] Wang X, Wen H, Shi J S, et al. Optical and microphysical properties of natural mineral dust and anthropogenic soil dust near dust source regions over northwestern China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2018, **18**(3): 2119-2138.
- [ 11 ] 陆忠奇, 李京龙, 何清, 等. 新疆地区 AOD 时空分布特征及气象影响因素分析 [J]. 环境科学学报, 2022, **42**(3): 309-321.  
Lu Z Q, Li J L, He Q, et al. Spatiotemporal distribution of AOD in southern Xinjiang and meteorological influencing factors [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022, **42**(3): 309-321.
- [ 12 ] Meng F, Cao C Y, Shao X. Spatio-temporal variability of Suomi-NPP VIIRS-derived aerosol optical thickness over China in 2013 [J]. Remote Sensing of Environment, 2015, **163**: 61-69.
- [ 13 ] 唐燕, 许睿, 孟繁玥. 中国东部典型城市群 AOD 时空演变及预测 [J]. 大气与环境光学学报, 2021, **16**(4): 320-330.  
Tang Y, Xu R, Meng F Y. Spatiotemporal evolution and prediction of AOD in typical urban agglomerations in eastern China [J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2021, **16**(4): 320-330.
- [ 14 ] Zhang M, Zhang L, He Q Q, et al. Characterizing the long-term dynamics of aerosol optical depth in the Yangtze River Middle-Reach urban agglomeration, China [J]. International Journal of Climatology, 2021, **41**(3): 2029-2044.
- [ 15 ] Cheng L, Li L, Chen L Q, et al. Spatiotemporal variability and influencing factors of aerosol optical depth over the Pan Yangtze River Delta during the 2014-2017 period [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, **16**(19), doi: 10.3390/ijerph16193522.
- [ 16 ] Si Y D, Wang H M, Cai K, et al. Long-term (2006-2015) variations and relations of multiple atmospheric pollutants based on multi-remote sensing data over the North China Plain [J]. Environmental Pollution, 2019, **255**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113323.
- [ 17 ] Qin W M, Liu Y, Wang L C, et al. Characteristic and driving factors of aerosol optical depth over Mainland China during 1980-2017 [J]. Remote Sensing, 2018, **10**(7), doi: 10.3390/rs10071064.
- [ 18 ] Li J L, He Q, Ge X Y, et al. Spatio-temporal changes of AOD in Xinjiang of China from 2000 to 2019: which factor is more influential, natural factor or human factor? [J]. PLoS One, 2021, **16**(8), doi: 10.1371/journal.pone.0253942.
- [ 19 ] 国家统计局. 中国统计年鉴 2020 [EB/OL]. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2020/indexch.htm>, 2020-09-23.
- [ 20 ] Meng F, Cao C Y, Shao X, et al. Spatial and temporal variation of Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS)-derived aerosol optical thickness over Shandong, China [J]. International Journal of Remote Sensing, 2014, **35**(16): 6023-6034.
- [ 21 ] Bai K X, Ma M L, Chang N B, et al. Spatiotemporal trend analysis for fine particulate matter concentrations in China using high-resolution satellite-derived and ground-measured PM<sub>2.5</sub> data [J]. Journal of Environmental Management, 2019, **233**: 530-542.

- [21] Ma M L, Yao G B, Guo J P, *et al.* Distinct spatiotemporal variation patterns of surface ozone in China due to diverse influential factors [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, **288**, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.112368.
- [22] 中华人民共和国生态环境部. 2020 中国生态环境状况公报 [EB/OL]. <http://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/zghjzkgb>, 2021-05-26.
- [23] 郝团, 蔡子颖, 韩素芹, 等. 基于模式过程分析技术天津地区 PM<sub>2.5</sub> 污染气象成因分析 [J]. *环境科学*, 2022, **43**(5): 2373-2382.  
Hao J, Cai Z Y, Han S Q, *et al.* Research on causes of severely polluted weather in Tianjin Based on process analytical technology [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(5): 2373-2382.
- [24] 范丽行, 杨晓辉, 宋春杰, 等. 基于时空混合效应模型的京津冀 PM<sub>2.5</sub> 浓度变化模拟 [J]. *环境科学*, 2022, **43**(5): 2262-2273.  
Fan L H, Yang X H, Song C J, *et al.* Modeling of PM<sub>2.5</sub> concentrations in the Beijing-Tianjin-Hebei Region using a space-time linear mixed effects model [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(5): 2262-2273.
- [25] Yao F, Wu J S, Li W F, *et al.* Estimating daily PM<sub>2.5</sub> concentrations in Beijing using 750-M VIIRS IP AOD retrievals and a nested spatiotemporal statistical model [J]. *Remote Sensing*, 2019, **11**(7), doi: 10.3390/rs11070841.
- [26] Yao F, Si M L, Li W F, *et al.* A multidimensional comparison between MODIS and VIIRS AOD in estimating ground-level PM<sub>2.5</sub> concentrations over a heavily polluted region in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **618**: 819-828.
- [27] Ma Y Y, Liu B M, Gong W, *et al.* Impact of environmental pollution on the retrieval of AOD products from Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) over Wuhan [J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2019, **10**(6): 2063-2071.
- [28] Osgouei P E, Roberts G, Kaya S, *et al.* Evaluation and comparison of MODIS and VIIRS aerosol optical depth (AOD) products over regions in the Eastern Mediterranean and the Black Sea [J]. *Atmospheric Environment*, 2022, **268**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2021.118784.
- [29] Chen Y J, Wu S S, Wang Y Y, *et al.* Satellite-based mapping of high-resolution ground-level PM<sub>2.5</sub> with VIIRS IP AOD in China through spatially neural network weighted regression [J]. *Remote Sensing*, 2021, **13**(10), doi: 10.3390/rs13101979.
- [30] 刘鸿波, 董理, 严若婧, 等. ERA5 再分析资料对中国大陆区域近地层风速气候特征及变化趋势再现能力的评估 [J]. *气候与环境研究*, 2021, **26**(3): 299-311.  
Liu H B, Dong L, Yan R J, *et al.* Evaluation of near-surface wind speed climatology and long-term trend over China's Mainland Region based on ERA5 reanalysis [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2021, **26**(3): 299-311.
- [31] Xue R B, Wang S S, Li D R, *et al.* Spatio-temporal variations in NO<sub>2</sub> and SO<sub>2</sub> over Shanghai and Chongming Eco-Island measured by Ozone Monitoring Instrument (OMI) during 2008-2017 [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, **258**, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120563.
- [32] Levelt P F, Joiner J, Tamminen J, *et al.* The Ozone Monitoring Instrument: overview of 14 years in space [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, **18**(8): 5699-5745.
- [33] 武卫玲, 薛文博, 王燕丽, 等. 卫星遥感在 NO<sub>x</sub> 总量控制中的应用 [J]. *环境科学*, 2017, **38**(10): 3998-4004.  
Wu W L, Xue W B, Wang Y L, *et al.* Application of satellite remote sensing in NO<sub>x</sub> emission control [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(10): 3998-4004.
- [34] Gong P, Li X C, Zhang W. 40-Year (1978-2017) human settlement changes in China reflected by impervious surfaces from satellite remote sensing [J]. *Science Bulletin*, 2019, **64**(11): 756-763.
- [35] Chen T Q, Guestrin C. XGBoost: a scalable tree boosting system [A]. In: *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining* [C]. San Francisco, California, USA: ACM, 2016. 785-794.
- [36] Gui K, Che H Z, Zeng Z L, *et al.* Construction of a virtual PM<sub>2.5</sub> observation network in China based on high-density surface meteorological observations using the Extreme Gradient Boosting model [J]. *Environment International*, 2020, **141**, doi: 10.1016/j.envint.2020.105801.
- [37] 李恺霖, 张春桂, 王宏, 等. 基于葵花-8 卫星的东南沿海气溶胶时空分布及其变化 [J]. *应用海洋学学报*, 2019, **38**(3): 318-328.  
Li K L, Zhang C G, Wang H, *et al.* Spatial and temporal distribution and variation of aerosol optical depth in coastal southeast China based on Himawari-8 satellite [J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2019, **38**(3): 318-328.
- [38] Liu Y Y, Hu Z Z, Wu R G. Was the extremely wet winter of 2018/2019 in the lower reach of the Yangtze River driven by El Niño-Southern Oscillation? [J]. *International Journal of Climatology*, 2020, **40**(15): 6441-6457.
- [39] 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.
- [40] Ma M L, Bai K X, Qiao F X, *et al.* Quantifying impacts of crop residue burning in the North China Plain on summertime tropospheric ozone over East Asia [J]. *Atmospheric Environment*, 2018, **194**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2018.09.018.
- [41] 薛瑞. 基于 MODIS 数据研究中国气溶胶时空分布变化及典型地区的影响因素 [D]. 青岛: 山东科技大学, 2020. 23-24.
- [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] 郑玉蓉, 王旭红, 张秀, 等. 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 [J]. *环境科学*, 2021, **42**(6): 2699-2712.  
Zheng Y R, Wang X H, Zhang X, *et al.* Spatiotemporal distribution of aerosol optical depth based on Landsat data in the Hinterland of the Guanzhong Basin and its relationship with urbanization [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(6): 2699-2712.
- [44] Li X L, Miao Y C, Ma Y J, *et al.* Impacts of synoptic forcing and topography on aerosol pollution during winter in Shenyang, Northeast China [J]. *Atmospheric Research*, 2021, **262**, doi: 10.1016/j.atmosres.2021.105764.
- [45] 赵雪艳, 杨文, 王静, 等. 典型物流城市 2016 年冬季 2 次污染过程 PM<sub>2.5</sub> 污染特征及来源解析 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(3): 1052-1061.  
Zhao X Y, Yang W, Wang J, *et al.* Source apportionment and pollution characteristics of PM<sub>2.5</sub> during the two heavy pollution episodes in the winter of 2016 in a typical Logistics City [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(3): 1052-1061.

[46] 陈裕迪, 王洁, 陈唯天, 等. 基于 MODIS 的长三角地区气溶胶时空变化规律及其气象解释[J]. 环境工程, 2021, 39(12): 120-127.

Chen Y D, Wang J, Chen W T, *et al.* Spatial and temporal changes of aerosol in Yangtze River Delta and its meteorological interpretation[J]. Environmental Engineering, 2021, 39(12):

120-127.

[47] 武文琪, 张凯山. 区域气象条件和减排对空气质量改善的贡献评估[J]. 环境科学, 2021, 42(2): 523-533.

Wu W Q, Zhang K S. Contributions of emissions reduction and regional meteorological conditions to air quality improvement[J]. Environmental Science, 2021, 42(2): 523-533.

---

## 《环境科学》再获“百种中国杰出学术期刊”称号

2021年12月27日,中国科技论文统计结果发布会在北京举行,会议发布了“百种中国杰出学术期刊”获奖名单.《环境科学》连续20次荣获“百种中国杰出学术期刊”称号.“百种中国杰出学术期刊”是根据中国科技学术期刊综合评价指标体系进行评定.该体系利用总被引频次、影响因子、基金论文比、他引总引比等多个文献计量学指标进行统计分析,对期刊分学科进行评比,其评价结果客观公正,为我国科技界公认,并具有广泛影响.

The image shows the title '环境科学' (Environmental Science) written in a large, stylized, calligraphic font. The characters are white with a slight shadow, set against a light gray background. The style is traditional Chinese calligraphy, with thick, expressive strokes.

## CONTENTS

Development Scenarios and Environmental Benefits Analysis of Future Power Generation Industry Under Two Modes in China .....	LIU Chun-jing, LÜ Jian-yi, ZHAO Wen-chang, <i>et al.</i>	(3375)
Forecasting of Emission Co-reduction of Greenhouse Gases and Pollutants for the Road Transport Sector in Lanzhou Based on the LEAP Model .....	..... PANG Ke, ZHANG Qian, MA Cai-yun, <i>et al.</i>	(3386)
Discussion of Air Quality Forecasting Evaluation for Cities Based on Half-level Method .....	WANG Xiao-yan, ZHU Li-li, XU Rong, <i>et al.</i>	(3396)
Characterization and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM <sub>2.5</sub> in Xiamen Port .....	XIAO Si-han, CAI Mei-jun, LI Xiang, <i>et al.</i>	(3404)
Deposition Characteristics of Water-soluble Inorganic Nitrogen and Organic Nitrogen in Atmospheric Precipitation in the Northern Suburbs of Nanjing .....	..... ZHANG Jia-ying, YU Xing-na, ZHANG Yu-xiu, <i>et al.</i>	(3416)
Analysis of PM <sub>2.5</sub> Transmission Characteristics in Main Cities of Jinzhong Basin in Winter .....	WANG Xiao-lan, WANG Yan, YAN Shi-ming, <i>et al.</i>	(3423)
Temporal Evolution and Source Apportionment of Black Carbon Aerosol in Ordos During Summer and Autumn 2019 .....	KONG Xiang-chen, ZHANG Lian-xia, ZHANG Cai-yun, <i>et al.</i>	(3439)
Characteristics, Sources, and SOAP of VOCs During Winter in Jiyuan .....	WANG Fang, LI Li-xia, WANG Hong-guo, <i>et al.</i>	(3451)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in August in the Chang-Zhu-Tan Urban Area .....	LUO Da-tong, ZHANG Qing-mei, LIU Zhan, <i>et al.</i>	(3463)
Ozone Sensitivity Analysis and Control Strategy in Shijiazhuang City in July 2019 .....	ZHU Jia-xian, WANG Xiao-qi, OU Sheng-ju, <i>et al.</i>	(3473)
Spatiotemporal Variation and Influencing Factors of AOD in the North China Plain .....	GUO Lin, MENG Fei, MA Ming-liang	(3483)
Aerosol Optical Characteristics with Ground-based Measurements via Sun Photometer and Its Relationship with PM Particle Concentration in Chang'an .....	..... ZHENG Yu-rong, WANG Xu-hong, CUI Si-ying, <i>et al.</i>	(3494)
Spatio-temporal Distribution and Evolution Characteristics of Air Pollution in Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on Long-term "Ground-Satellite" Data .....	..... WANG Yao-ting, YIN Zhen-ping, ZHENG Zuo-fang, <i>et al.</i>	(3508)
Ten-year Trend Analysis of Eutrophication Status and the Related Causes in Lake Hongze .....	CHEN Tian-yu, LIU Chang-qing, SHI Xiao-li, <i>et al.</i>	(3523)
Shallow Groundwater Around Plateau Lakes: Spatiotemporal Distribution of Phosphorus and Its Driving Factors .....	YANG Heng, LI Gui-fang, YE Yuan-hang, <i>et al.</i>	(3532)
Characteristics and Differences of Dissolved Oxygen Stratification in Different Tributaries of Three Gorges Reservoir During Impoundment Period .....	..... JI Dao-bin, FANG Jiao, LONG Liang-hong, <i>et al.</i>	(3543)
Dissolved Organic Matter Component and Source Characteristics of the Metropolitan Lakes and Reservoirs in a Typical Karst Region .....	NI Mao-fei, ZHOU Hui, MA Yong-mei, <i>et al.</i>	(3552)
Characteristics, Sources, and Risk Assessment of Perfluoroalkyl Substances in Surface Water and Sediment of Luoma Lake .....	HUANG Jia-hao, WU Wei, HUANG Tian-yin, <i>et al.</i>	(3562)
Vertical Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phytoplankton Community Structure in Qiandao Lake .....	WANG Ji-yi, HUO Di, GUO Chao-xuan, <i>et al.</i>	(3575)
Chemical Forms and Spatial Distribution of Phosphorus in the Sediment of Sihe River .....	ZHANG Zi-han, ZHANG Xin-ru, JIA Chuan-xing, <i>et al.</i>	(3587)
Influence of Optimal Land Use Allocation on Phosphorus Loss in the Process of Rainfall and Runoff .....	ZHOU Hao, CHEN Fang-xin, LUO Yi-feng, <i>et al.</i>	(3597)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Accumulated Heavy Metals in Bioretention Systems .....	CHU Yang-yang, YANG Long, ZHOU Yuan, <i>et al.</i>	(3608)
Effects of Damming and Impoundment on Planktonic Microbial Community Structure and Interspecific Interaction Patterns in Different Water Depths .....	..... WANG Xun, ZHANG Jia-jia, YUAN Qiu-sheng, <i>et al.</i>	(3623)
Identification of Bacterial Flora and Metabolic Function of Sediments in Different Channels of Duliujian River Basin, Tianjin .....	LIU Jia-yuan, FENG Yue, YANG Xue-chun, <i>et al.</i>	(3635)
Spatiotemporal Distribution and Source Apportionment of Suspended Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Water .....	PENG Ke-xing, LI Rui-fei, ZHOU Yi-chen, <i>et al.</i>	(3645)
Spatial Variation and Potential Sources of Microplastics in Rivers in Tongzhou District, Beijing .....	MEN Cong, LI Di, ZUO Jian-e, <i>et al.</i>	(3656)
Effects of Microplastic Exposure on Crucian Growth, Liver Damage, and Gut Microbiome Composition .....	HU Jia-min, ZUO Jian-e, LI Jin-bo, <i>et al.</i>	(3664)
Influence of Different Types of Dewatering Agents on the Solidification Effect and Physical and Chemical Properties of Sediment .....	REN Jun, YIN Peng, WANG Wei-zhen, <i>et al.</i>	(3672)
Structural Characteristics of Micro-nano Particle Size Biochar and Its Adsorption Mechanism for Cd <sup>2+</sup> .....	MA Wen-yan, PEI Peng-gang, GAO Ge, <i>et al.</i>	(3682)
Phosphorus Adsorption Characteristics of Different Biochar Types and Its Influencing Factors .....	LIAN Shen-hai, ZHANG Shu-nan, LIU Feng, <i>et al.</i>	(3692)
Development of Zeolite Loaded Mg-La-Fe Ternary (hydr)oxides for Treatment of Low Concentration Phosphate Wastewater .....	YIN Xue-jie, SONG Xiao-bao, DING Chen-man, <i>et al.</i>	(3699)
Succession and PICRUSt2-based Predicted Functional Analysis of Microbial Communities During the Sludge Bulking Occurrence and Restoration in One-stage Combined Partial Nitrification and ANAMMOX Process .....	LI Ya-nan, YAN Bing, ZHENG Rui, <i>et al.</i>	(3708)
Aerobic Granulation Stability and Microbial Diversity of Filamentous Bulking Sludge .....	GAO Chun-di, YANG Xiao-yang, OU Jia-li, <i>et al.</i>	(3718)
Dynamic Variation in Vegetation Cover and Its Influencing Factor Detection in the Yangtze River Basin from 2000 to 2020 .....	XU Yong, ZHENG Zhi-wei, GUO Zhen-dong, <i>et al.</i>	(3730)
Enrichment and Ecological Risk Assessment of Available Phosphorus in Paddy Soil of Fujian Province Over Past 40 years .....	CHEN Zhong-xing, QIU Long-xia, CHEN Han-yue, <i>et al.</i>	(3741)
Effects of Land Use Change on Constitution, Stability, and C, N, P Stoichiometric Characteristics of Soil Aggregates in Southwest China Karst .....	..... HE Yu, SHENG Mao-yin, WANG Ke, <i>et al.</i>	(3752)
Heavy Metal Pollution and Health Risk Assessment of Mine Soil in Yangtze River Economic Belt .....	ZHANG Zhe, LU Ran, WU Si-yang, <i>et al.</i>	(3763)
Pollution Characteristics and Phytotoxicity of Heavy Metals in the Soil Around Coal Gangue Accumulation Area .....	SHANG Yu, SANG Nan	(3773)
Evaluation of Mercury Pollution in Soil of Different Land Use Types in Coal-fired Industrial Area .....	LI Qiang, YAO Wan-cheng, ZHAO Long, <i>et al.</i>	(3781)
Cadmium Enrichment and Bioavailability of Quaternary Profiles in Nansha District, Guangzhou, China .....	WANG Fang-ting, BAO Ke, HUANG Chang-sheng, <i>et al.</i>	(3789)
Health Risk Assessment and Environmental Benchmark of Heavy Metals in Cultivated Land in Mountainous Area of Northwest Guizhou Province .....	..... XU Meng-qi, YANG Wen-tao, YANG Li-yu, <i>et al.</i>	(3799)
Effect Factors and Model Prediction of Soil Heavy Metal Bioaccessibility .....	ZHANG Jia-wen, TIAN Biao, LUO Jing-jing, <i>et al.</i>	(3811)
Effect of Organic Material Amendments on Soil Respiration in Tobacco Fields of Central Henan .....	LU Qi-fei, YE Xie-feng, HAN Jin, <i>et al.</i>	(3825)
Methane Production Potential and Methanogenic Pathways in Paddy Soils Under Different Rice-based Cropping Systems .....	SHEN Wan-yu, HUANG Qiong, MA Jing, <i>et al.</i>	(3835)
Characteristics and Assembly Process of Reclaimed Soil Microbial Communities in Eastern Plain Mining Areas .....	MA Jing, DONG Wen-xue, ZHU Yan-feng, <i>et al.</i>	(3844)
Differences in Bacterial Community Structure in Rhizosphere Soil of Three <i>Caragana</i> Species and Its Driving Factors in a Common Garden Experiment .....	..... LI Yuan-yuan, XU Ting-ting, AI Zhe, <i>et al.</i>	(3854)
Comparison of Bacterial Community Structure and Functional Groups of Paddy Soil Aggregates Between Karst and Non-karst Areas .....	XIAO Xiao-yi, JIN Zhen-jiang, LENG Meng, <i>et al.</i>	(3865)
Contrasting Responses of the Microbial Community Structure and Functional Traits to Soil pH in Purple Soils .....	WANG Zhi-hui, JIANG Xian-jun	(3876)
Effects of Agricultural Organic Waste Incorporation on the Metabolic Capacity of Microbial Carbon Sources of Dissolved Organic Matter in Paddy Soil .....	..... XIAO Yi, LI Zheng, HUANG Rong, <i>et al.</i>	(3884)