

# 基于MAIAC的汾渭平原典型区域气溶胶光学厚度时空变化研究

王静怡, 许可

西安石油大学 计算机学院, 西安 710065

**摘要:** 汾渭平原作为大气污染防治的重点区域, 其空气质量变化一直被重点关注。文章选取汾渭平原的典型区域陕西省铜川市为例, 以气溶胶光学厚度 (AOD) 作为表征空气质量的重要指标, 分析区域内AOD的时空变化, 为有效防控大气污染提供决策支持。研究选用基于多角度大气校正 (MAIAC) 算法的MCD 19A2遥感影像数据, 分析获取2011年1月到2020年12月逐月的AOD空间分布, 同时基于ARIMA模型进行预测分析, 并通过灰色关联分析 (GRA) 方法研究AOD的影响因素, 为进一步提高其预测精度提供辅助支持。研究结果显示, 区域内AOD均值从月度变化特征上看, 6—8月相对较高, 而在10—12月相对较低; 从年度变化特征上看呈波动状, 在2013年AOD均值达到最高, 之后呈现整体下降趋势, 2020年达到最低。基于2011—2019年逐月AOD均值采用ARIMA (1, 2, 5) 模型预测2020年1—12月的AOD均值, 其预测均方根误差 (RMSE) 为0.117, 预测精度良好, 但仍有待进一步提高。通过AOD与区域内自然和社会因子指标的灰色关联分析可以看出, 工业废气排放总量、人口总数和工业二氧化硫排放总量是影响研究区域AOD的重要社会因子指标, 而自然因子由于气溶胶本身生成机制的复杂性, 均对AOD有不同程度的影响, 并且根据年月研究单元尺度的差异, 相同因子的影响关联度也有所不同。由此得出, 基于多时相的MCD 19A2产品研究AOD的时空变化是可行的, 通过引入有效的影响因子作为辅助变量可进一步提高AOD的预测精度。为推动区域生态绿色可持续发展, 不仅要减少废气排放、加强政策调控、优化产业结构、发展绿色低碳经济、减少对能源和矿产的依赖, 还要加快现有污染源的治理效力, 并且要加强遥感等新技术的应用, 提高环境质量的监测时效。

**关键词:** MAIAC; 汾渭平原; 气溶胶光学厚度; 时空变化

## Research on spatial and temporal distribution of AOD in a typical region of the Fenwei Plain based on MAIAC

WANG Jingyi, XU Ke

School of Computer Science, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China

**Abstract: Background, aim, and scope** The Fenwei Plain is a critical area for air pollution prevention and control, its air quality dynamics have always been the focus of attention. AOD (Aerosol Optical Depth) is an important indicator of air quality, so studying the spatial and temporal distribution of AOD is an effective method to access the change of air quality. In this paper, Tongchuan City located in Shaanxi Province within the Fenwei

收稿日期: 2023-07-03; 录用日期: 2024-03-21; 网络出版: 2026-01-20

基金项目: 国家自然科学基金青年项目 (62002286)

第一作者简介: 王静怡, 41岁, 博士/讲师, 从事遥感信息和大数据研究, E-mail: jywang@xsyu.edu.cn

引用格式: 王静怡, 许可. 2026. 基于MAIAC的汾渭平原典型区域气溶胶光学厚度时空变化研究 [J]. 地球环境学报, 17(1): 90–99. <https://cstr.cn/32259.14.JEE2023131>.

Citation: Wang J Y, Xu K. 2026. Research on spatial and temporal distribution of AOD in a typical region of the Fenwei Plain based on MAIAC [J]. Journal of Earth Environment, 17(1): 90–99. <https://cstr.cn/32259.14.JEE2023131>.

Plain was selected as a typical area to study the spatial and temporal variations of AOD, which could provide decision support for effective prevention and control of air pollution. **Materials and methods** The MCD (MODIS Combined Dataset) 19A2 images based on MAIAC (Multi-Angle Implementation of Atmospheric Correction) algorithm were selected to study the spatial and temporal distribution of AOD in each month from January 2011 to December 2020. An ARIMA (Autoregressive Integrated Moving Average) model was applied for prediction analysis of AOD. By collecting the natural and social factors of the study region, the influencing factors of AOD were studied by GRA (Grey Relation Analysis), which could provide auxiliary roles for improving the prediction accuracy of AOD. **Results** The results indicated, the AOD monthly mean in the study area was relatively high from June to August, and relatively low from October to December. The AOD annual mean exhibited fluctuations, it reached a maximum in 2013, and then it showed an overall downward trend, the minimum appeared in 2020. The AOD monthly mean of the twelve months in 2020 were predicted with ARIMA(1, 2, 5) model based on the monthly mean from January 2011 to December 2019, the RMSE of prediction was 0.117, which indicated satisfactory prediction accuracy. **Discussion** Based on the long time series variation characteristics of AOD, it could be seen that the air quality in the study area has been improved since 2013, but the prediction accuracy still needs to be further improved. The GRA results between AOD and factors indicated that industrial emission, gross population and SO<sub>2</sub> emissions were important social factors influencing AOD, however, all natural factors could affect AOD more or less because of the complexity of AOD generation mechanism, and according to the difference of research scale, the contribution of the same factors are different. **Conclusions** It was feasible to study the spatial and temporal variation of AOD based on multi-temporal MCD 19A2 images. The influencing factors should be introduced as auxiliary variables in order to improve the prediction accuracy of AOD. **Recommendations and perspectives** In order to promote ecological sustainable development, some efforts should be made. On the one hand, it is necessary to reduce emissions by strengthening policy management and optimizing industrial structure and trying to reduce dependence on energy and minerals; on the other hand, we should pay attention to the treatment of existing pollution sources; at the same time, the application of new technologies such as remote sensing should be further applied to improve the monitoring efficiency of environmental quality.

**Key words:** MAIAC; the Fenwei Plain; aerosol optical depth (AOD); spatial and temporal distribution

大气环境是人类赖以生存的基础, 随着工业化和机械化, 尤其能源化工领域的飞速发展, 对大气环境的影响日益加剧。2013年9月国务院印发了《大气污染防治行动计划》, 为改善空气质量提供了行动指南。汾渭平原区域一度因煤炭能源的生产和消耗比例高、交通运输量大以及特殊的地形地貌等原因造成严重大气污染, 被国务院列为重点防治区域。气溶胶是悬浮于大气中各种固态和液态细颗粒物混合组成的体系, 与热辐射平衡、水循环以及大气的理化反应都密切相关 (欧金萍等, 2021; 赵秀逸和田荣湘, 2021), 是影响空气质量、气候变化和人类健康的重要因素 (谢静怡和肖钟湧, 2024)。气溶胶光学厚度 (Aerosol Optical Depth, AOD) 作为表征空气质量的重要指标, 其观测精度直接影响天气预测、气候建模以

及对人类健康影响的评估, 研究其时空分布特征也成为研究空气质量变化的重要方法。

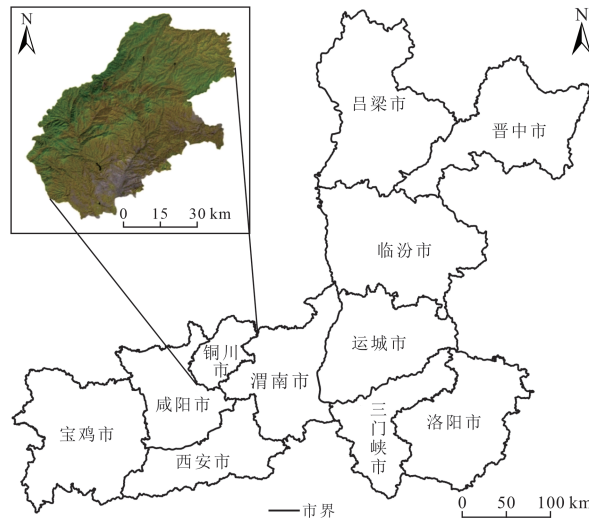
国内外学者对于气溶胶时空分布进行了大量的研究工作 (谢静怡和肖钟湧, 2024), 其中空间分布是时间趋势研究的基础。当前关于气溶胶空间分布的研究可以分为垂直空间分布和水平空间分布两类。垂直空间分布的研究从方法上可以分为两类: 一类是直接垂直采样或监测的方法, 如利用探空气球、无人机或者飞机等搭载仪器进行气溶胶监测 (石广玉等, 1996; Liu等, 2009; 黄嘉仪等, 2021); 另一类是利用激光雷达等遥感监测的方法, 如基于CALIOP星载偏振激光雷达数据研究气溶胶的垂直分布 (高星星等, 2016; 吴仪等, 2020; Zhang等, 2020)。水平空间分布的研究从方法上也可以分类两类: 一类是基于空间自

相关性, 利用监测点位气溶胶数据进行空间分析, 这对于监测点位有数量上的要求; 另一类是基于遥感反演, 利用遥感数据的空间分布研究, 由于其覆盖面积大, 易于获取多时相数据, 成为当前研究的重点, 其中 MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer) 影像以其丰富的信息量在气溶胶遥感反演中应用最多 (Namdari 等, 2016; Chen 等, 2020), 但多集中于大尺度上的研究。有的以城市群为研究区域尺度 (张西雅和扈海波, 2017; 丁莹等, 2020); 有的以省为研究区域尺度 (董自鹏等, 2014; 陆忠奇等, 2022); 有的从国家、洲际乃至全球尺度开展研究 (Zhou 等, 2022), 还有的学者针对沙漠等特殊的地貌区域或流域开展气溶胶空间分布的研究 (Li 等, 2021)。当前对于小尺度的 AOD 时空分布的研究相对较少, 尤其针对有代表性的典型城市尺度的研究更少。本文选取大气污染防治重点区域汾渭平原中典型城市陕西省铜川市为研究对象, 基于比 MODIS 3k 分辨率更高的 MCD 19A2 (MODIS Combined Dataset) 数据产品在小尺度上研究 AOD 的时空分布特征, 不仅研究其 AOD 的年度时空变化特征, 还分析其月份时空变化特征 (Wang 和 Li, 2024); 另外, 当前关于 AOD 时间趋势的研究多集中于长时间序列的变化规律或变化趋势的研究 (王银牌等, 2018; 王利等, 2021; Khan 等, 2021), 而对于预测研究的较少。本文基于 2011 年 1 月至 2019 年 12 月的 AOD 逐月数据对 2020 年每月数值进行预测, 并进行精度检验和分析, 这对于有效防治大气污染、改善生态环境具有重要的实践指导意义。

## 1 研究区域

汾渭平原是黄河中游地区最大的冲积平原, 包括陕西省的西安市、宝鸡市、咸阳市 (包括杨凌和西咸新区)、渭南市、铜川市, 山西省的晋中市、吕梁市、临汾市、运城市, 以及河南省的洛阳市、三门峡市 (图 1), 区域内资源禀赋优越, 对煤炭等能源消耗占比较高。选取的典型区域铜川市位于陕西省中部, 处于关中平原和黄土高原的过渡地带, 经纬度范围为  $34^{\circ} 50' - 35^{\circ} 34' N$ ,  $108^{\circ} 34' - 109^{\circ} 29' E$ , 总面积约  $3882 \text{ km}^2$ , 年平均气温为  $9.7 - 12.7^{\circ} C$ , 年平均降水量为  $543.4 - 676.6 \text{ mm}$ , 属暖温带半干旱半湿润大陆性季风气候 (Wang 和 Li, 2024)。据铜川市年度环境质量公报

(<https://www.tongchuan.gov.cn/resources/site/90/html/hjgl/hjkqzlyb/index.html>) 统计, 2011—2020 年每年可吸入颗粒物平均浓度为  $71 - 117 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 均超过国家空气质量二级标准 ( $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )。



地图矢量文件来源于国家地理信息公共服务平台 (<https://cloudcenter.tianditu.gov.cn/administrativeDivision/>), 审图号: GS(2024)0650号。

The map vector file was from National Platform for Common GeoSpatial Information Services (<https://cloudcenter.tianditu.gov.cn/administrativeDivision/>), Map Approval Number: GS(2024)0650.

图 1 汾渭平原及研究区域示意图

Fig. 1 The Fenwei Plain and the study area

## 2 数据与方法

### 2.1 数据来源

本文研究气溶胶光学厚度选用的数据为 MCD 19A2 遥感影像数据, 该数据基于多角度大气校正 (Multi-Angle Implementation of Atmospheric Correction, MAIAC) 算法, 融合了 Terra 和 Aqua 两颗卫星 MODIS 影像数据, 同时兼顾暗目标法和深蓝算法, 改善了陆地暗表面和亮表面 AOD 反演精度 (Lyapustin 等, 2011), 是目前比较优秀的 AOD 数据产品, 其空间分辨率为  $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ , 远高于 MODIS 3k 影像数据产品的分辨率。本文研究共获取了 2011—2020 年共计 10 年的每月和每年的 AOD 数据, 其基础源数据可以从 NASA 数据网站 (<https://search.earthdata.nasa.gov/>) 免费下载计算获得 (Lyapustin 等, 2011; 陈香月等, 2023)。

同时, 文中在对预测精度进行分析讨论中, 为分析气溶胶形成机制的复杂性, 引入相关的自然和社会因子指标进行灰色关联分析, 也可以为

进一步提高预测精度提供有效的协变量,其中,自然因子指标数据主要包括蒸发量、气温、降水量、相对湿度、地表温度、风速等,均来自于站点观测数据;社会因子相关指标主要包括生产总值、耕地面积、人口总数、旅客周转量、货物周转量、原煤产量、水泥产量、水泥熟料、火力发电量、工业废气排放总量、工业二氧化硫排放量、工业烟(粉)尘排放量等,均从研究区域的年度统计年鉴中整理获取。

## 2.2 研究方法

文中研究AOD空间分布处理MCD 19A2影像均通过ENVI软件实现,以日数据为基础取算术平均依次获得月度数据和年度数据,并利用Arcgis软件进行空间分析,进而基于多时相数据研究其时空变化趋势。对于AOD的预测分析采用基于自回归积分滑动平均模型ARIMA(Autoregressive Integrated Moving Average Model)方法,该模型最初由Box等(2008)提出,是基于数据的自相关性和差分分析获取数据内含的时间序列模式,并依此来预测未知数据,它既可以分析出数据的变化趋势,还可以处理突发变化或较大噪声数据。所以,ARIMA模型在很多时间序列预测问题中都有很好的表现(Zhao等,2022)。在ARIMA( $p, d, q$ )模型中,参数 $p$ 代表自回归模型AR中使用的观测值的滞后值;参数 $q$ 代表移动平均模型MA中使用的错误项的滞后值;参数 $d$ 是差分的阶数,其目标在于将非平稳序列转变为平稳序列。在不考虑差分(即 $d=0$ )情况下,ARIMA模型(张勃和刘秀丽,2011)可以表示为公式(1):

$$Y_t = c + \varphi_1 Y_{t-1} + \varphi_2 Y_{t-2} + \dots + \varphi_p Y_{t-p} + \theta_1 \varepsilon_{t-1} + \theta_2 \varepsilon_{t-2} + \dots + \theta_q \varepsilon_{t-q} + \varepsilon_t \quad (1)$$

式(1)中, $Y_t$ 为所研究时间点 $t$ 的数据; $c$ 为常数项; $p$ 为自回归模型AR中观测值的滞后值; $q$ 为移动平均模型MA中错误项的滞后值; $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_p$ 为自回归模型AR的参数,描述当前数值与之前 $p$ 个时间点数据之间的关系; $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_q$ 为移动平均模型MR的参数,描述当前数值与之前 $q$ 个时间点数据之间的关系; $t-1, t-2, \dots, t-p, t-q$ 为所研究时间 $t$ 之前第1, 2,  $\dots, p, q$ 个时间点; $\varepsilon_t$ 为在 $t$ 时间的误差项。

本文为检验预测精度,除分析预测值和实测值之间相关性外,还研究预测值的均方根误差

RMSE(Yang等,2024),其计算公式如下:

$$A_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - M_i)^2}{n}} \quad (2)$$

式(2)中, $A_{\text{RMSE}}$ 代表RMSE, $P_i$ 为预测值, $M_i$ 为实测值, $n$ 为样本数量(文中, $n=12$ )。

为进一步对预测结果的精度进行探讨分析,引入灰色关联分析(Grey Relational Analysis, GRA)方法研究其有效影响因子,可在后期预测研究中作为协助变量。灰色关联分析是根据各因子变化趋势的相似程度来判断因子之间关联程度的方法,此方法通过对动态过程发展态势的量化分析,完成对系统内时间序列有关统计数据关系的比较,如公式(3)(郑明贵等,2023)。灰色关联度的应用涉及社会科学和自然科学的各个领域(刘凯等,2023;郑明贵等,2023),可用于样本数量较少的情况,所以在本文研究中比常用的相关性分析更加适用。

$$\zeta(k) = \frac{\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)| + \beta \cdot \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|}{|x_0(k) - x_i(k)| + \beta \cdot \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|} \quad (3)$$

式(3)中, $\zeta(k)$ 为灰色关联度; $\beta$ 为分辨系数,一般取0.5; $x_0$ 为样本数据母序列, $x_i$ 为第 $i$ 变量数据序列; $k$ 为样本数量。

## 3 结果与分析

### 3.1 月度变化特征

计算获取2011—2020年每个月份的AOD空间分布共计120份,如图2所示为以2011年2月、6月、10月为例的AOD空间分布图。统计每个月份的研究区域的AOD均值,其趋势分析如图3所示,可以看出每个年度的月份变化趋势有所相似,但并不完全一致。计算10年间同一月份气溶胶光学厚度的算术平均值作为该月份的AOD均值,分析其月度变化趋势如图4所示。可以看出,AOD均值在1—4月逐渐增大,在4月达到峰值,5月陡减,6月迅速增大,达到第二个峰值,7月有所减小后,在8月达到第三个峰值,然后逐渐减少至最低。整体上看,AOD均值在6—8月相对较高,而在10—12月相对较低,这与全球总气溶胶光学厚度的变化特征相似(张芝娟等,2019)。6—8月,研究区域正处于抓生产促发展的黄金时期,各类

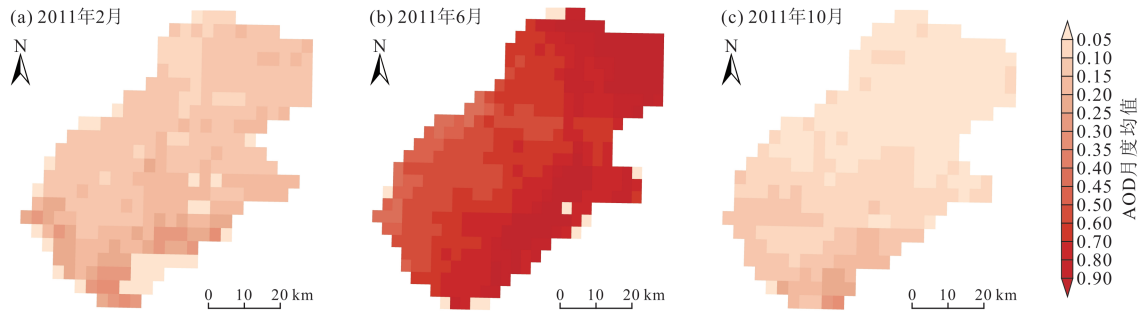


图2 研究区域AOD均值月度空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of AOD monthly mean in the study area

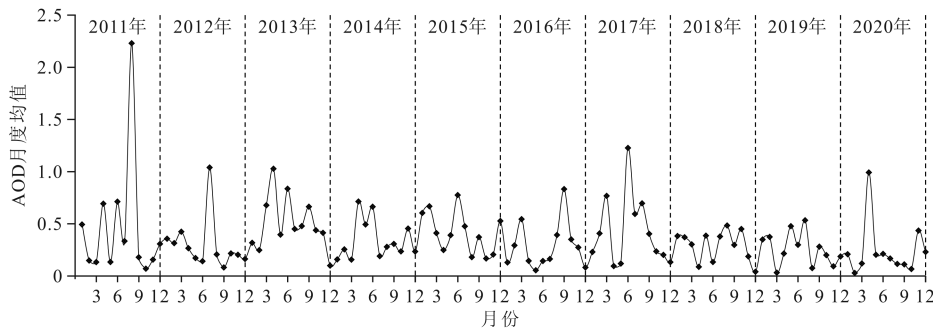


图3 研究区域2011—2020年AOD均值逐月变化

Fig. 3 Change of AOD monthly mean for every month from 2011 to 2020

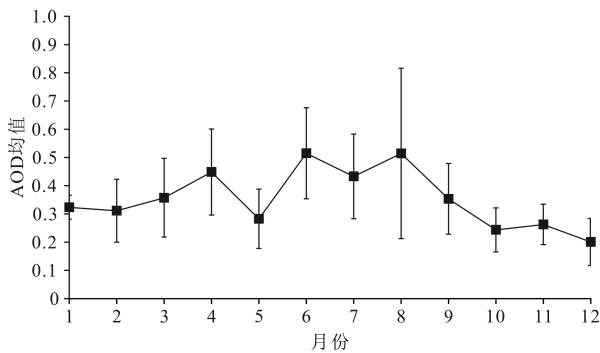


图4 研究区域AOD均值月度变化

Fig. 4 Monthly variation of AOD mean in study area

工矿企业高效运转，容易产生更多的废渣废液废气，而且该时期也正是当地旅游旺季，人类各种社会经济活动比较活跃，这都为气溶胶的生成提供更多的“基础原材料”；另一方面，6—8月气温和地表温度较高，空气垂直流动比其他月份更强，各种“原材料”易随之上浮，从而为形成气溶胶提供了重要的条件。

### 3.2 年度变化特征

通过算术平均获得2011—2020年每个年度的AOD均值数据，如图5所示为以2011年、2013年和2020年为例的AOD空间分布，可以看出，高低

值的空间分布特征基本一致，高值都分布于研究区域的东南区域。统计每个年度的AOD均值和趋势分析结果如图6所示，可以看出，2011—2020年10年间AOD均值的年度变化呈现波动状，在2013年AOD均值达到最高，以后整体逐渐降低，而2020年均值最低。

选取AOD年度均值最高的2013年和最低的2020年作为典型年度进行对比分析，基于AOD的两个年度的空间分布图，通过栅格运算，计算得出2020年比2013年AOD的降低值的空间分布，如图7所示。研究区域的绝大部分降低值均为正数，占比约89%，其降低幅度最高可达0.736，降低幅度较大的区域多分布在研究区域的北部和东南部，均为人类生产生活比较活跃的区域。

为进一步分析研究区域AOD的时间变化特征，分析其相同区间值范围所占面积比例的变化趋势。根据AOD值的实际情况，分为小于0.3、0.3—0.6、大于0.6的低、中、高这3个阈值区间，如图8所示，可以看出，2013年以后，小于0.3的低值所占的面积比例呈现整体增大的趋势，而大于0.6的高值所占的面积比例在逐渐降低；尤其在2016—

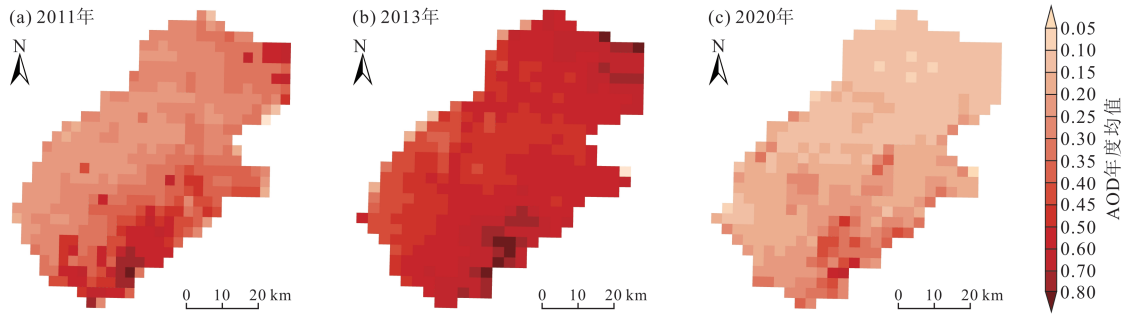


图 5 研究区域气溶胶光学厚度 AOD 年度均值空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of AOD annual mean in the study area

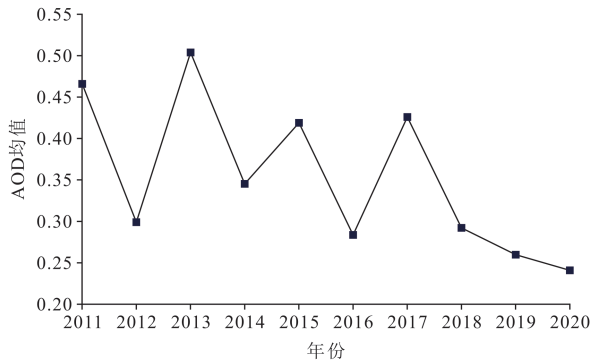


图 6 研究区域 AOD 均值年度变化

Fig. 6 Annual variation of AOD mean in the study area

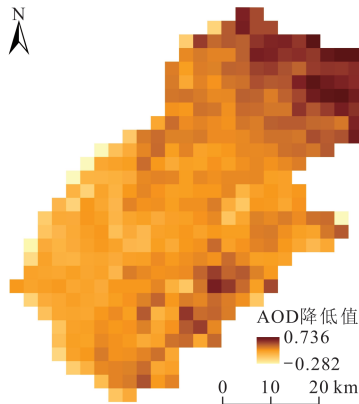


图 7 2020 年比 2013 年 AOD 的降低值空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of AOD decrease value from 2013 to 2020

2020 年, 低值所占的面积比例均在 80% 以上, 而高值所占的面积比例均在 5% 以下, 可以推断出空气质量在 2013 年以后在逐渐好转。

### 3.3 时间序列预测分析

基于前期历史数据对后期未知数据进行预测是时间趋势规律研究的重要目的。本文利用 2011 年 1 月到 2019 年 12 月的共计 108 组月度 AOD 均值, 预测 2020 年 1—12 月的每个月的 AOD 均值。通过

精度比选, 最终选用 ARIMA (1, 2, 5) 模型用于 AOD 月度均值预测, 预测值与实测值关系如图 9 所示, 预测值与实测值相关性决定系数  $r^2$  为 0.7883, 拟合直线的斜率为 0.7202, 预测的均方根误差 RMSE 为 0.117。可以看出, 预测的精度较高, 但仍有待进一步提高, 这说明仅靠数据的数学规律进行预测的精度有一定的局限性, 这主要是由

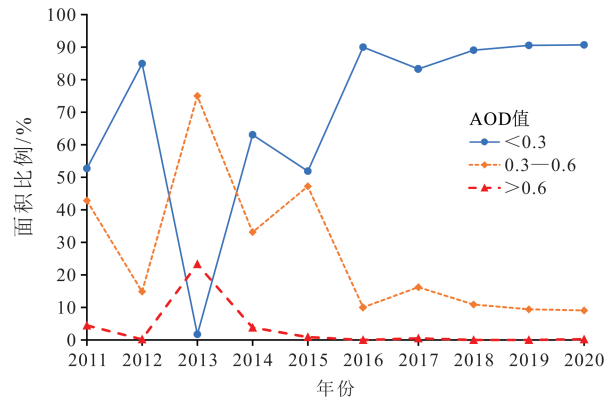


图 8 2011—2020 年 AOD 区间值的空间分布比例

Fig. 8 The proportion of AOD threshold interval of spatial distribution from 2011 to 2020

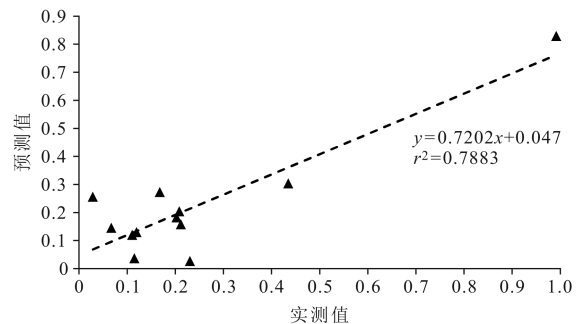


图 9 2020 年 1—12 月 AOD 预测值与实测值关系

Fig. 9 The correlation between predicted values and measured values of AOD for every month in 2020

于气溶胶的影响机制比较复杂, 不仅受自然因子影响, 还受社会因子影响, 而且不确定性因子比较多。

为进一步提高AOD的预测精度, 需要对影响AOD的因子进行研判分析, 学者们多采用相关分析的方法利用皮尔逊相关系数来判断影响程度(Wang和Li, 2024), 但这对样本数量有一定的要求。基于样本数量较少的限制, 本文研究采用更为合理的GRA灰色关联分析方法, 利用关联度大小来判断指标的影响程度。参照学者们前期研究结果, 社会因子方面选取表征社会经济条件的生产总值 $X_1$ 、耕地面积 $X_2$ 、人口总数 $X_3$ 、旅客周转量 $X_4$ 、货物周转量 $X_5$ 、原煤产量 $X_6$ 、水泥产量 $X_7$ 、水泥熟料 $X_8$ 、火力发电量 $X_9$ 、工业废气排放总量 $X_{10}$ 、工业二氧化硫排放量 $X_{11}$ 、工业烟(粉)尘排放量 $X_{12}$ 等12个指标; 自然因子方面选取蒸发量 $Y_1$ 、气温 $Y_2$ 、降水量 $Y_3$ 、相对湿度 $Y_4$ 、地表温度 $Y_5$ 、风速 $Y_6$ 等6个指标(李瑞等, 2023; Wang和Li, 2024)。

社会因子指标主要为年度统计数据, 以年为统计单元, 共10组( $n=10$ ), 与AOD的灰色关联分析结果可以看出(表1), 工业废气排放总量、人口总数和工业二氧化硫排放量为关联度最高3个

因子, 其关联度均在0.85以上; 自然因子指标虽然可以单月为统计单元( $n=120$ ), 但考虑到与社会因子方面尺度研究的相对应, 同样利用灰色关联分析方法, 研究10年间年尺度上各自然因子指标的年度均值与AOD的关联度( $n=10$ , 表2), 结果显示, 各指标的关联度均超过0.5, 说明各指标均与AOD存在较强的关联度, 其中关联性最强的因子为降水量, 风速次之; 同时, 基于自然气象因子本身存在年度的周期性, 利用灰色关联分析方法, 研究10年间同一月份各自然因子指标的月度均值与AOD的关联度( $n=12$ , 表2), 结果显示, 各指标的关联度也均超过0.5, 说明各指标均与AOD存在较强的关联度, 尤其风速、相对湿度以及蒸发量这3个因子的关联度均超过了0.9, 说明与AOD关联度极高。综上, 10组的年度均值灰色关联分析以及12组的月度均值灰色关联分析的两种分析结果显示选取的6个自然因子指标均在一定程度上对AOD有所影响, 但在不同分析单元尺度上结果存在差异, 这一方面是由于统计分析本身样本的差异会导致结果的差异, 另外, 主要是由于AOD的产生机制比较复杂, 与自然环境密切相关, 所以在不同尺度上会有所差异。

表1 AOD与社会因子指标的灰色关联度( $n=10$ )

Tab. 1 Grey relation coefficients between AOD and social factors ( $n=10$ )

| 因子  | $X_1$ | $X_2$ | $X_3$ | $X_4$ | $X_5$ | $X_6$ | $X_7$ | $X_8$ | $X_9$ | $X_{10}$ | $X_{11}$ | $X_{12}$ |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|----------|
| 关联度 | 0.728 | 0.836 | 0.864 | 0.821 | 0.57  | 0.836 | 0.731 | 0.683 | 0.824 | 0.889    | 0.859    | 0.799    |

表2 AOD与自然因子指标的灰色关联度

Tab. 2 Grey relation coefficients between AOD and natural factors

| 因子                  | $Y_1$ | $Y_2$ | $Y_3$ | $Y_4$ | $Y_5$ | $Y_6$ |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 以年为单元的关联度( $n=10$ ) | 0.567 | 0.595 | 0.732 | 0.601 | 0.589 | 0.624 |
| 以月为单元的关联度( $n=12$ ) | 0.951 | 0.561 | 0.742 | 0.981 | 0.627 | 0.982 |

## 4 讨论与结论

研究表明, 研究区域气溶胶光学厚度在6—8月相对较高, 而在10—12月相对较低。从年度变化来看, AOD在2013年达到峰值以后, 整体呈现下降的趋势。通过分析AOD的影响因子可以看出, 工业废气排放总量、人口总数和工业二氧化硫排放总量影响AOD的重要社会经济因子; 而自然环境因子均对AOD有不同程度的影响, 这也说明气溶胶的影响机制比较复杂。在后期的预测

研究中, 不能仅依靠AOD单一变量的数据规律, 通过引入有效的影响因子作为多元协助变量, 应该可以一定程度上提高预测的精度, 这将在后期的研究中进一步探讨。

本文采用MODIS MCD 19A2影像数据研究AOD的时空分布特征的结果良好, 该产品相较于前期研究采用的MYD04 3k和MOD04 3k数据虽同为日数据, 但空间分辨率提高至1 km, 它采用MAIAC多角度大气校正算法, 结合了Terra和Aqua两个卫星数据, 所以在AOD反演及其时空分布研究的精度上更高。另外, 学者们还探索应用其他卫星影像数据用于AOD的时空分布研究, 如我国的高分系列卫星影像(马小雨等, 2020; Yang等, 2021)和风云系列卫星数据(祝善友等, 2020; Zhou等, 2024), 还有美国的陆地系列卫星

影像 (Omari等, 2019; She等, 2022)、日本的葵花系列气象卫星影像 (Li等, 2020; 韦海宁等, 2020)等, 也有学者利用VIIRS灯光数据研究AOD的时空变化 (Shi等, 2018; Wang等, 2020)。不同遥感影像在时间和空间分辨率以及所包含的波段信息等方面各有优劣, 可以根据不同的研究和应用需要, 并结合实际情况进行对比选用。

本文基于ARIMA模型对AOD的预测结果精度较高, 仍有待进一步提高。一方面在于ARIMA主要基于指标的数学规律进行预测, 然而气溶胶的影响机制比较复杂, 容易受到多种因素的扰动, 所以引入协变量是提高预测精度的方法之一; 另一方面在于ARIMA模型本身精度因素, ARIMA作为一种比较成熟的时间序列预测模型, 已经得到了广泛的应用, 然而随着机器学习等先进技术的发展, 更加精准的模型或方法也逐渐被发掘出来, 如随机森林RF模型、卷积神经网络CNN模型、Transformer模型、长短记忆网络LSTM模型等, 都已经在预测分析中显示了良好的应用效果。在后期研究中, 为进一步提高预测的精度, 结合影响因子的协变量, 同时应用精度更高的机器学习预测模型将是有益的探索。

从典型区域的研究结果看, AOD变化趋势在2013年以后整体逐渐降低, 可以推断汾渭平原的空气质量有所改善, 大气污染防治行动取得了显著的成效。结合影响因子的灰色关联分析结果, 工业废气排放总量和工业二氧化硫排放量是关联度较高的社会因子, 在自然气象条件难以调控的情况下, 为有效地提高空气质量, 需要着力从调控人为的社会经济条件入手, 不仅要减少煤炭等能源的消耗量, 同时严格做好废气排放前的净化处理工作, 从源头上减少气溶胶生成的“原材料”, 还要大力发展绿色低碳经济, 优化产业结构, 同时加大区域内生态环境的修复治理工作, 更要时刻做好空气质量的实时监测以及预测预警工作。随着遥感技术的飞速发展, 遥感数据产品以其信息量丰富, 而且时间序列长、空间尺度广的优点在生态环境领域中正得到越来越广泛的应用, 遥感技术对于生态环境的研究以及推动生态文明建设在将来必将发挥越来越大的作用。

## 参考文献

- 陈香月, 丁建丽, 王敬哲, 等. 2023. MODIS MAIAC高分辨率气溶胶光学厚度产品在干旱区的适用性研究 [J]. 遥感学报, 27(2): 406–419. [Chen X Y, Ding J L, Wang J Z, et al. 2023. Validation of the fine resolution of the MODIS MAIAC aerosol optical depth product over arid areas [J]. National Remote Sensing Bulletin, 27(2): 406–419.]
- 丁莹, 冯微微, 邹滨, 等. 2020. 长株潭城市群气溶胶时空分布与传输规律 [J]. 中国环境科学, 40(5): 1906–1914. [Ding Y, Feng H H, Zou B, et al. 2020. Spatial-temporal distribution and transport characteristic of aerosol in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration [J]. China Environmental Science, 40(5): 1906–1914.]
- 董自鹏, 余兴, 李星敏, 等. 2014. 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, 59(3): 306–316. [Dong Z P, Yu X, Li X M, et al. 2014. Analysis of variation trends and causes of aerosol optical depth in Shaanxi Province using MODIS data [J]. Chinese Science Bulletin, 59(3): 306–316.]
- 高星星, 陈艳, 张武. 2016. 2006—2015年中国华北地区气溶胶的垂直分布特征 [J]. 中国环境科学, 36(8): 2241–2250. [Gao X X, Chen Y, Zhang W. 2016. Vertical distribution of atmospheric aerosol particles over North China from 2006 to 2015 [J]. China Environmental Science, 36(8): 2241–2250.]
- 黄嘉仪, 赵德龙, 陈宝君, 等. 2021. 基于飞机观测的北京地区气溶胶特征 [J]. 中国环境科学, 41(5): 2073–2080. [Huang J Y, Zhao D L, Chen B J, et al. 2021. Aircraft observations of aerosol properties in Beijing [J]. China Environmental Science, 41(5): 2073–2080.]
- 李瑞, 刘随心, 苏小莉, 等. 2023. 冬季采暖期气象条件对PM<sub>2.5</sub>等空气质量要素的影响: 以咸阳市为例 [J]. 地球环境学报, 14(5): 626–638. [Li R, Liu S X, Su X L, et al. 2023. The effect of meteorological conditions on PM<sub>2.5</sub> and other air quality factors in winter heating period: a case study of Xianyang City [J]. Journal of Earth Environment, 14(5): 626–638.]
- 刘凯, 杨琰瑛, 师荣光, 等. 2023. 1990—2020年于桥水库流域景观格局时空演变及驱动力 [J]. 农业资源与环境学报, 40(1): 154–164. [Liu K, Yang Y Y, Shi R G, et al. 2023. Spatiotemporal changes and driving forces of landscape patterns in the Yuqiao Reservoir watershed during 1990–2020 [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 40(1): 154–164.]

- 陆忠奇, 李京龙, 何清, 等. 2022. 南疆地区 AOD 时空分布特征及气象影响因素分析 [J]. 环境科学学报, 42(3): 309–321. [Lu Z Q, Li J L, He Q, et al. 2022. Spatiotemporal distribution of AOD in southern Xinjiang and meteorological influencing factors [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 42(3): 309–321.]
- 马小雨, 陈正华, 宿鑫, 等. 2020. GF-4 增强型地表反射率库支持法的气溶胶光学厚度反演 [J]. 遥感学报, 24(5): 578–595. [Ma X Y, Chen Z H, Su X, et al. 2020. GF-4 aerosol retrieval study of enhanced surface reflectance library support algorithm [J]. National Remote Sensing Bulletin, 24(5): 578–595.]
- 欧金萍, 刘浩然, 朱鹏程, 等. 2021. 合肥秋季气溶胶光学特性及来源分析 [J]. 光谱学与光谱分析, 41(10): 3014–3020. [Ou J P, Liu H R, Zhu P C, et al. 2021. Characteristics of aerosol optical properties and their potential source in Hefei in autumn [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 41(10): 3014–3020.]
- 石广玉, 许黎, 郭建东, 等. 1996. 大气臭氧与气溶胶垂直分布的高空气球探测 [J]. 大气科学, 20(4): 401–407. [Shi G Y, Xu L, Guo J D, et al. 1996. Balloon observation of atmospheric ozone and aerosols [J]. Scientia Atmospherica Sinica, 20(4): 401–407.]
- 王利, 徐翠玲, 徐甫, 等. 2021. 2011—2020 年华北平原气溶胶光学厚度时空分布特征及潜在源分析 [J]. 地球科学与环境学报, 43(6): 1018–1032. [Wang L, Xu C L, Xu F, et al. Temporal and spatial distribution characteristics and potential source analysis of aerosol optical depth in North China Plain from 2011 to 2020 [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 43(6): 1018–1032.]
- 王银牌, 喻鑫, 谢广奇. 2018. 中国近 15 年气溶胶光学厚度时空分布特征 [J]. 中国环境科学, 38(2): 426–434. [Wang Y P, Yu X, Xie G Q. 2018. Spatial distribution and temporal variation of aerosol optical depth over China in the past 15 years [J]. China Environmental Science, 38(2): 426–434.]
- 韦海宁, 王维真, 黄广辉, 等. 2020. 基于 Himawari-8 的气溶胶反演研究 [J]. 遥感技术与应用, 35(4): 797–807. [Wei H N, Wang W Z, Huang G H, et al. 2020. Retrieval of aerosol optical depth based on Himawari-8 [J]. Remote Sensing Technology and Application, 35(4): 797–807.]
- 吴仪, 邓孺孺, 秦雁, 等. 2020. 秋冬季节珠三角典型区域气溶胶浓度垂直分布的激光雷达反演 [J]. 遥感学报, 24(3): 302–318. [Wu Y, Deng R R, Qin Y, et al. 2020. Vertical distribution of aerosol mass concentration over Pearl River Delta observed by Lidar during autumn and winter [J]. National Remote Sensing Bulletin, 24(3): 302–318.]
- 谢静晗, 肖钟湧. 2024. 2003—2021 年粤港澳大湾区气溶胶时空变化特征研究 [J]. 地球环境学报, 15(5): 769–779. [Xie J H, Xiao Z Y. 2024. The temporal and spatial variabilities of aerosol optical thickness over the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area during 2003—2021 [J]. Journal of Earth Environment, 15(5): 769–779.]
- 张勃, 刘秀丽. 2011. 基于 ARIMA 模型的生态足迹动态模拟和预测: 以甘肃省为例 [J]. 生态学报, 31(20): 6251–6260. [Zhang B, Liu X L. 2011. Dynamic ecological footprint simulation and prediction based on ARIMA Model: a case study of Gansu Province, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 31(20): 6251–6260.]
- 张西雅, 扈海波. 2017. 京津冀地区气溶胶时空分布及与城市化关系的研究 [J]. 大气科学, 41(4): 797–810. [Zhang X Y, Hu H B. 2017. Spatio-temporal characteristics of aerosol optical depth and their relationship with urbanization over Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 41(4): 797–810.]
- 张芝娟, 陈斌, 贾瑞, 等. 2019. 全球不同类型气溶胶光学厚度的时空分布特征 [J]. 高原气象, 38(3): 660–672. [Zhang Z J, Chen B, Jia R, et al. 2019. Global spatial and temporal distribution of aerosol optical depth for different kinds of aerosols [J]. Plateau Meteorology, 38(3): 660–672.]
- 赵秀逸, 田荣湘. 2021. 大气气溶胶中铁的酸化与东海赤潮 [J]. 地球环境学报, 12(6): 573–584. [Zhao X Y, Tian R X. 2021. Acidification of iron in atmospheric aerosols and red tides in the East China Sea [J]. Journal of Earth Environment, 12(6): 573–584.]
- 郑明贵, 于明, 范秋蓉, 等. 2023. 中国 2025—2035 年碳酸锂需求预测: 基于灰色关联分析和 ARIMA-GM-BP 神经网络的组合模型 [J]. 地球科学进展, 38(4): 377–387. [Zheng M G, Yu M, Fan Q R, et al. 2023. China's lithium carbonate demand forecast 2025—2035: a combined model based on grey correlation analysis and the ARIMA-GM-BP neural network [J]. Advances in Earth Science, 38(4): 377–387.]
- 祝善友, 李佳敏, 向嘉敏, 等. 2020. 基于 FY4A AGRI 数据的气溶胶光学厚度反演研究 [J]. 地理与地理信息科学, 36(4): 26–32. [Zhu S Y, Li J M, Xiang J M, et al. 2020. Research on aerosol optical depth inversion based on FY4A AGRI Data [J]. Geography and Geo-Information

- Science, 36(4): 26–32.]
- Box G E P, Jenkins G M, Reinsel G C. 2008. Time series analysis: forecasting and control (fourth edition) [M]. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Chen X F, De Leeuw G, Arola A, et al. 2020. Joint retrieval of the aerosol fine mode fraction and optical depth using MODIS spectral reflectance over Northern and Eastern China: artificial neural network method [J]. *Remote Sensing of Environment*, 249: 112006. DOI: 10.1016/j.rse.2020.112006.
- Khan R, Kumar K R, Zhao T L, et al. 2021. Interdecadal changes in aerosol optical depth over Pakistan based on the MERRA-2 reanalysis data during 1980–2018 [J]. *Remote Sensing*, 13(4): 822. DOI: 10.3390/rs13040822.
- Li D, Qin K, Wu L X, et al. 2020. Himawari-8-derived aerosol optical depth using an improved time series algorithm over Eastern China [J]. *Remote Sensing*, 12(6): 978. DOI: 10.3390/rs12060978.
- Li J L, Ge X Y, He Q, et al. 2021. Aerosol optical depth (AOD): spatial and temporal variations and association with meteorological covariates in Taklimakan Desert, China [J]. *Peerj*, 9: e10542. DOI: 10.7717/peerj.10542.
- Liu P F, Zhao C S, Liu P F, et al. 2009. Aircraft study of aerosol vertical distributions over Beijing and their optical properties [J]. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 61(5): 756–767.
- Lyapustin A, Wang Y, Laszlo I, et al. 2011. Multiangle implementation of atmospheric correction (MAIAC): 2. Aerosol algorithm [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116: D03211. DOI: 10.1029/2010jd014986.
- Namdari S, Valizade K, Rasuly A A, et al. 2016. Spatio-temporal analysis of MODIS AOD over western part of Iran [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(3): 191. DOI: 10.1007/s12517-015-2029-7.
- Omari K, Abuelgasim A, Alhebsi K 2019. Aerosol optical depth retrieval over the city of Abu Dhabi, United Arab Emirates (UAE) using Landsat-8 OLI images [J]. *Atmospheric Pollution Research*, 10(4): 1075–1083.
- She L, Zhang H K, Bu Z Q, et al. 2022. A deep-neural-network-based aerosol optical depth (AOD) retrieval from Landsat-8 top of atmosphere data [J]. *Remote Sensing*, 14(6): 1411. DOI: 10.3390/rs14061411.
- Shi S Y, Cheng T H, Gu X F, et al. 2018. Multisensor data synergy of Terra-MODIS, Aqua-MODIS, and Suomi NPP-VIIRS for the retrieval of aerosol optical depth and land surface reflectance properties [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 56(11): 6306–6323.
- Wang J Y, Li X M. 2024. Influence of industrial sustainability transition on air quality in a typical resource-exhausted city [J]. *Heliyon*, 10(3): e25138. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e25138.
- Wang Y, Chen L F, Xin J Y, et al. 2020. Impact of the dust aerosol model on the VIIRS aerosol optical depth (AOD) product across China [J]. *Remote Sensing*, 12(6): 991. DOI: 10.3390/rs12060991.
- Yang F, Fan M, Tao J. 2021. An improved method for retrieving aerosol optical depth using Gaofen-1 WFV camera data [J]. *Remote Sensing*, 13(2): 280. DOI: 10.3390/rs13020280.
- Yang Y F, Wang Z G, Cao C X, et al. 2024. Estimation of PM<sub>2.5</sub> concentration across China based on multi-source remote sensing data and machine learning methods [J]. *Remote Sensing*, 16(3): 467. DOI: 10.3390/rs16030467.
- Zhang M, Su B, Bilal M, et al. 2020. An investigation of vertically distributed aerosol optical properties over Pakistan using CALIPSO satellite data [J]. *Remote Sensing*, 12(14): 2183. DOI: 10.3390/rs12142183.
- Zhao L X, Li Z Y, Qu L L. 2022. Forecasting of Beijing PM<sub>2.5</sub> with a hybrid ARIMA model based on integrated AIC and improved GS fixed-order methods and seasonal decomposition [J]. *Heliyon*, 8(12): e12239. DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e12239.
- Zhou D, Wang Q X, Li S W, et al. 2024. Preliminary retrieval and validation of aerosol optical depths from FY-4B advanced geostationary radiation imager images [J]. *Remote Sensing*, 16(2): 372. DOI: 10.3390/rs16020372.
- Zhou Y C, Gao X, Meng X Y, et al. 2022. Characteristics of the spatio-temporal dynamics of aerosols in Central Asia and their influencing factors [J]. *Remote Sensing*, 14(11): 2684. DOI: 10.3390/rs14112684.