doi：10. 12068/j. issn. 1005－3026. 2026. 20250007

宁东煤矿区AOD变化遥感监测与特征分析

马保东，于泽勇，陶青林，康 婷
（东北大学 资源与土木工程学院，辽宁 沈阳 110819）

摘 要：针对长时间序列宁东煤矿区的大气环境污染问题，使用MODIS MCD19A2数据和AERONET基站数据，运用趋势分析、显著性检验和相关性分析等方法开展变化监测研究. 结果表明：选取线性模型对MODIS MCD19A2数据精度进行改进，整体精度提高46. 27%. 对矿区年度AOD（aerosol optical depth）均值进行趋势分析，其下降比例占总体的83. 62%；宁东煤矿区21年季度AOD均值空间分布呈现差异，春冬季高，夏秋季低，四季AOD高值呈现从南向北移动的空间分布特征；宁东煤矿区年度AOD均值与原煤年产量和焦炭年产量等人为因子呈显著的正相关关系，表明人为因子是影响AOD的主要因素. 研究结果可为宁东煤矿区大气环境污染防治工作提供参考依据.

关 键 词：宁东煤矿区；AOD；时空变化特征；趋势分析；相关性
中图分类号：P 407.8 **文献标志码**：A **文章编号**：1005-3026（2026）04-0136-08

Remote Sensing Monitoring and Characteristic Analysis of AOD Change in Ningdong Coal Mining Area

MA Bao-dong, *YU Ze-yong*, *TAO Qing-lin*, *KANG Ting*
（School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: YU Ze-yong, E-mail: 3479242964@qq.com）

Abstract: To address the long-term atmospheric pollution issues in the Ningdong coal mining area, MODIS MCD19A2 data and AERONET station data were utilized, and trend analysis, significance tests, and correlation methods were employed to conduct change monitoring research. The results show that a linear model is selected to improve the accuracy of MODIS MCD19A2 data, with an overall accuracy improvement of 46. 27%. Trend analysis of the annual aerosol optical depth (AOD) mean in the mining area reveals that the proportion of decline accounts for 83. 62% of the total. The spatial distribution of the seasonal AOD mean in the Ningdong coal mining area over 21 years shows differences, with higher values in spring and winter and lower values in summer and autumn. The high values of seasonal AOD show a spatial distribution pattern of moving from south to north. The annual AOD mean in the Ningdong coal mining area is significantly positively correlated with human factors such as annual raw coal production and annual coke production, indicating that human factors are the main factors affecting AOD. The research results can provide a reference basis for the prevention and control of atmospheric pollution in the Ningdong coal mining area.

Key words: Ningdong coal mining area; AOD; temporal and spatial change characteristic; trend analysis; correlation

大气中的气溶胶是指均匀分散于空气介质里呈悬浮状态的各类固态、液态细微颗粒物质，像常见的尘埃、云雾所包含的微小液滴，以及以盐类为主的一些化学物质微粒等，均涵盖其中[1]. 尽管这些气溶胶颗粒物个体微小，却在区域气候调节、大气环境稳定维持以及生态系统平衡保障等方面具有重要作用. 气溶胶光学厚度（aerosol optical depth, AOD）是指垂直方向上

收稿日期：2025-01-09
基金项目：中央高校基本科研业务费专项资金资助项目（N2124005，N2001020）.
作者简介：马保东（1983—），男，河北宽城人，东北大学副教授，博士生导师.
通信作者：于泽勇，E-mail：3479242964@qq.com.

气溶胶消光系数的积分,是评价大气气溶胶的重要指标之一.在大气科学领域,当需要精准评估大气当中气溶胶的实际含量时,AOD 是核心且关键的指标之一.借助这一指标,科研人员能够直观且有效地判断大气污染的程度.AOD 数据涵盖陆地区域、海洋上空等不同环境,而且在精准度方面相较于其他气溶胶数据更高.当前,获取 AOD 数据资料主要依赖于地基观测和卫星遥感.

在全球范围内,多个国家建立起地基观测网络,为气溶胶光学厚度的研究提供了有力的数据支撑.通过先进设备持续收集数据的气溶胶自动监测网(AERONET)、运用激光雷达技术的欧洲激光雷达观测网(EARLINET),以及中国的太阳分光辐射测量网(CSHNET),均在各自区域内对气溶胶光学厚度展开精密监测.卫星遥感技术在气溶胶特征监测领域发挥着重要作用.MODIS,MISR 以及 AVHRR 等卫星遥感手段,能够对大范围区域的气溶胶特征进行有效监测[2].地基观测数据在测量精度上表现突出,但在时间和空间的连续性上存在不足.相对而言,卫星遥感凭借其大面积覆盖的优势,能够提供更为广泛、连续的观测数据,在弥补地基观测时空局限方面发挥着重要作用[3].

在大气污染环境研究方向,MODIS 传感器的 MCD19A2 数据以 1 km×1 km 的较高空间分辨率得到了更广的应用,也展示出其可靠性和精准性[4].基于 MODIS 气溶胶产品国内外进行了大量研究,包括气溶胶形成原因、反演精度的验证与误差分析、时空分布特征等[6-7].从研究范围来看,不仅涵盖了大尺度区域,例如中国大陆[8]、中亚干旱区[8]、东亚[9],又有中尺度如中国东北[10]、京津冀地区[11],还有小尺度如山东省[12]、厦门市[13]、乌海露天矿区[14].研究的重点主要集中在 AOD 的时间和空间分布特性以及影响要素等方向.目前,在运用 MCD19A2 数据针对小尺度煤矿区域展开长时间序列监测方面,研究相对较少.在已有的研究领域中,学者们大多将目光投向 AOD 宏观的时空规律探寻,以及挖掘影响 AOD 数值波动的各类内外在因素.然而,针对小尺度煤矿区这类具有特定地理和产业特征的区域,借助 MCD19A2 数据开展系统、长时间跨度的动态监测,尚未得到足够的关注与深入探究.

宁东煤矿区位于宁夏回族自治区中东部,煤炭年产量达到 6 000 万 t 左右,具有显著的矿区特征,为研究矿区大气污染提供了合适的目标场所.本研究以宁东煤矿区作为研究对象,使用 MODIS MCD19A2 数据和 AERONET 基站数据,深入分析 2003 至 2023 年间宁东煤矿区 AOD 时空分布特征及其影响因素,为矿区大气污染治理提供科学依据.

1　研究数据及方法

1.1　研究区概况

宁东煤矿区位于陕、甘、宁、蒙交界之处,如图 1 所示.该地区的气候属于典型的中温带干旱半荒漠类型,干旱少雨,降水主要集中在 7 月至 9 月,多年平均降水量介于 206.2~255.2 mm 之间,年平均气温在 6.8~8.8 ℃之间.地形以山地为主,整体地势由东南向西北的走向倾斜而下.

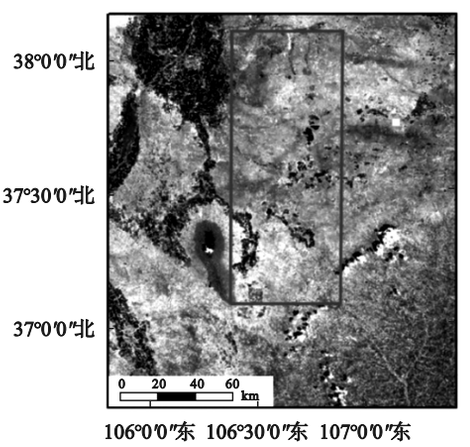


图 1　研究区概况

Fig. 1　Overview of study area

宁东煤矿区由多个子矿区构成,主要包括鸳鸯湖矿区、灵武矿区、红墩子矿区、横城矿区、韦州矿区、马家滩矿区、积家井矿区和萌城矿区.各矿区在煤炭资源储量、开采条件以及产业发展方面各有特点,协同支撑着宁东煤矿区的整体发展,子矿区分布如图 2 所示.

1.2　数据源及预处理

在本研究中,所选用的是 MODIS 传感器的 MCD19A2 V006 数据集.该数据集由 Terra 卫星与 Aqua 卫星所收集的数据整合而成,是一款专门面向陆地的 AOD 网格产品.该产品具备出色的分辨率指标,其空间分辨率可达 1 km,能够精准定位至较小区域;时间分辨率则为每日更新,可以获取高频次的动态数据,为研究 AOD 的动态变化情况提供了有力的数据支撑.MCD19A2

AOD数据提供了550 nm绿光波段的AOD.每日数据经过投影转换、裁剪等预处理步骤后,进一步合成为月度、季度和年度数据.

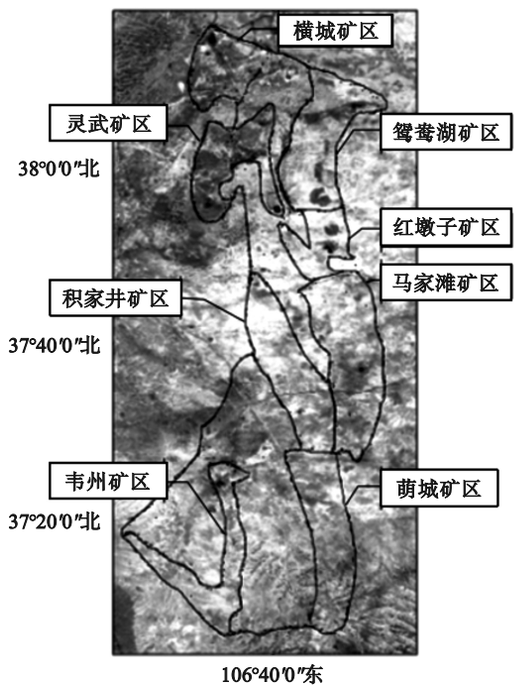


图2 子矿区分布

Fig. 2 Distribution of sub-mining areas

AERONET主要设备为太阳光度计,提供多纳米光谱通道的观测数据,覆盖全球主要区域,应用于AOD的地基观测.AERONET站点的AOD观测误差在0.01~0.02之间,因此其观测数据可作为参考标准用于校正卫星影像AOD值精度.本研究采用距离研究区最近的兰州大学半干旱气候与环境观测站(SACOL)的第2级AOD数据.

为了提高该产品的精确度,将AERONET AOD站点的观测值当作真值,逐季对Terra和Aqua卫星获取的MCD19A2 AOD影像数据进行精度改进.本研究依据气候学的通用季度划分方法,3~5月为春季,6~8月为夏季,9~11月为秋季,12~次年2月为冬季[15].首先,将卫星影像AOD值和AERONET基站AOD值在波长、空间和时间上进行匹配.为了将卫星AOD波长与AERONET基站AOD波长匹配,应用标准Ångström指数将AERONET的AOD从675和440 nm插值到550 nm[16].空间匹配采用两种方式:一是直接匹配基站与卫星影像单像元的AOD值;二是匹配基站与卫星影像3×3像元的空间窗口,分别进行窗口内的AOD均值计算和距离加权计算.时间匹配需要将卫星过境时间和AERONET的AOD测量时间偏移控制在20 min之内[17].通过构建卫星影像AOD值和AERONET基站AOD值之间的线性回归模型,提高卫星影像AOD值精度.

1.3 研究方法

将改进后的宁东煤矿区卫星影像AOD值合成为年度AOD均值和季度AOD均值,对研究区域的年度AOD均值进行整体空间变化特征分析,采用线性趋势法对其年均值的变化趋势进行定量研究,并选取北部的乌海矿区和东部的对照区进行对比分析.对研究区域的季度AOD均值进行空间分布特征的季相差异分析.选取原煤年产量、焦炭年产量和NO_2,SO_2,$PM_{2.5}$,PM_{10},CO,O_3的年均值等人为因子指标对宁东煤矿区的影响因素进行相关性分析.

1.3.1 Ångström指数算法

AERONET站点数据包括675和440 nm波长的AOD值,与卫星影像550 nm AOD之间存在波长差异,因此需要进行波段匹配.通过使用Ångström指数算法[18],可以将675和440 nm的AOD值合成550 nm的AOD值.

$$\alpha=\frac{\ln\tau(\lambda_1)-\ln\tau(\lambda_2)}{\ln\lambda_1-\ln\lambda_2}. \tag{1}$$

式中:α为气溶胶的Ångström波长指数;$\tau(\lambda_1)$,$\tau(\lambda_2)$分别为波长λ_1,λ_2的AOD.

$$\tau_{550}=\tau(\lambda_2)\times\left(\frac{550}{\lambda_2}\right)^{-\alpha}. \tag{2}$$

式中,τ_{550}为550 nm处的AOD.

1.3.2 Theil–Sen Median趋势分析

Theil–Sen Median趋势分析法的核心原理在于计算数据集中任意两点间的斜率,进而选取这些斜率值的中位数作为整个数据集趋势的代表性度量[19].利用趋势分析法可有效捕捉像元的空间变化趋势,对长时间序列区域进行准确评估,从而提供更为全面和深入的数据分析视角.

$$\text{Slope}=\frac{n\times\sum_{i=1}^{n}i\times\text{AOD}_i-\left(\sum_{i=1}^{n}i\right)\left(\sum_{i=1}^{n}\text{AOD}_i\right)}{n\times\sum_{i=1}^{n}i^2-\left(\sum_{i=1}^{n}i\right)^2}. \tag{3}$$

式中:Slope表示线性回归方程的斜率参数;n为累计观测年份的总数;i的取值范围1~n;AOD_i代表第i个观测年份的AOD年均值.

1.3.3 Pearson相关分析

Pearson相关分析用于评价2个变量之间线性关系的强弱,通过计算相关系数r来量化这种关系.

$$r=\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(X_i-\overline{X}\right)\left(Y_i-\overline{Y}\right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(X_i-\overline{X}\right)^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(Y_i-\overline{Y}\right)^2}}. \quad (4)$$

式中:r表示相关系数;X_i和Y_i分别代表X和Y变量的第i个观测值;n表示样本总数;$\overline{X}$和$\overline{Y}$别表示X和Y变量的平均值.

2　结果与分析

2.1　卫星影像AOD精度改进

选取2010年每个季度的中间月份进行不同方法拟合,如表1所示,综合来看“时段/单点”数据的相关性最高,拟合程度最好.因此,选取“时段/单点”拟合结果应用于卫星影像AOD的改进,斜率k与1较为接近,可知整体拟合效果较好,其中夏季最优,如图3所示.改进前2003—2023这21年宁东煤矿区AOD年均值在0.118~0.162之间,改进后AOD年均值在0.183~0.218之间,通过对比分析宁东煤矿区AOD年均值,改进后整体精度提高46.27%,如图4所示.该结果与陈香月等[15]研究结论相契合.

2.2　AOD空间分布特征

1)研究区AOD整体空间变化特征.2003—2023年宁东煤矿区年度AOD均值空间分布如图5所示,宁东煤矿区21年平均AOD值为0.196,AOD高值分布在西北和南部两个区域.西北区域高值AOD分布较为离散,南部区域高值AOD分布较为集中.AOD低值集中分布于东北区域与西南区域.这两个区域大多是荒漠或农田,植被覆盖程度较高,而且人为活动相对较少.

表1　2010年月份不同拟合方法对比

Table 1　Comparison of different fitting methods for months in 2010

时间跨度	实时/多点均值	实时/单点	实时/多点加权	时段/多点均值	时段/单点	时段/多点加权
1月	y=0.533x+0.175	y=0.539x+0.174	y=0.529x+0.176	y=0.565x+0.164	y=0.568x+0.164	y=0.560x+0.166
	R^2=0.787	R^2=0.801	R^2=0.792	R^2=0.824	R^2=0.828	R^2=0.824
4月	y=0.683x+0.193	y=0.687x+0.194	y=0.683x+0.193	y=0.674x+0.198	y=0.679x+0.199	y=0.674x+0.198
	R^2=0.975	R^2=0.977	R^2=0.975	R^2=0.973	R^2=0.975	R^2=0.973
7月	y=1.118x+0.036	y=0.998x+0.033	y=1.089x+0.046	y=1.123x+0.034	y=1.001x+0.032	y=1.094x+0.044
	R^2=0.921	R^2=0.944	R^2=0.924	R^2=0.933	R^2=0.955	R^2=0.936
10月	y=0.884x+0.041	y=0.873x+0.047	y=0.887x+0.040	y=0.870x+0.045	y=0.859x+0.051	y=0.873x+0.044
	R^2=0.900	R^2=0.899	R^2=0.901	R^2=0.891	R^2=0.889	R^2=0.891

注:实时,与卫星影像时间最接近的基站数据;时段,卫星影像时间前后20 min内的基站数据均值;多点均值,对应影像像元为中心计算3×3像元的均值;单点,地理位置匹配的对应影像值;多点加权,对应影像像元为中心计算3×3像元的加权均值.

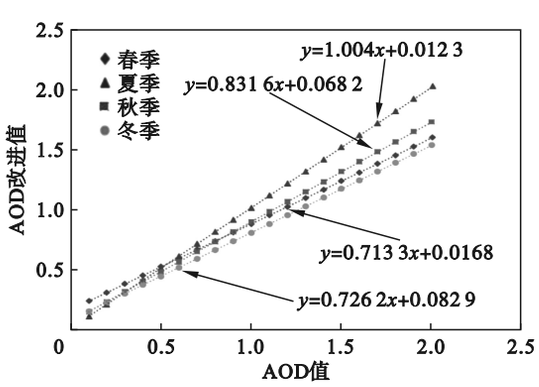


图3　2010年四季“时段/单点”拟合曲线

Fig. 3　Time period-based and point-based fitting curves for four seasons of 2010

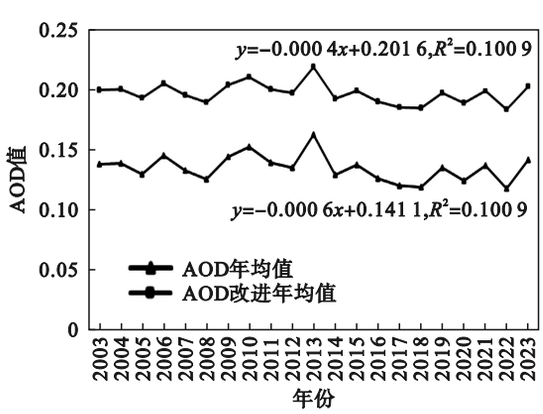


图4　2003—2023年宁东煤矿区AOD年均值

Fig. 4　Annual AOD mean in Ningdong coal mining area from 2003 to 2023

根据图4的数据,在21年中,2022年AOD改进年均值最低为0.183,2013年AOD年均值最高为0.218.以2013年为分界点,将宁东煤矿区AOD年均值分为两个阶段.在第一阶段,上升幅度达到了9.55%;而在2013—2023年的第二阶段,整体呈现下降趋势,降幅为7.34%.宁东煤矿区的AOD年均值经历了先上升再下降的过程,从整体变化情况来看,最终呈现出下降态势,这表明宁东煤矿区的空气质量有了显著提升.自2013年以来,政府持续强化对大气环境的多方面治理,来改善空气质量.与此同时,针对大气生态环境的防控与治理研究也在不断深入.国家出台的一系列大气污染防治政策措施和行动计划,是推动空气环境质量逐步改善的关键因素.

2)季度空间分布.2003—2023年宁东煤矿区AOD四季均值分布情况如图6所示,春季AOD均值为0.288,夏季AOD均值为0.120,秋季AOD均值为0.168,冬季AOD均值为0.187.四季之中,AOD均值的分布情况存在明显的差异.整体趋势表现为春季与冬季的AOD平均值相对较高,而夏季和秋季的AOD平均值则相对较低.从空间分布特征来看,AOD高值区域呈现出从南至北逐步移动的态势.在春季,宁东煤矿区的中南部地区AOD值相对偏高,北部地区的AOD值则较低.这是因为矿区北部区域受到人类活动的干扰较小;与之形成对比的是,中南部地区由于煤矿开采活动较为频繁,产生了大量粉尘以及其他污染物并排放到环境中,使得AOD值偏高.夏季AOD高值区域主要集中在中南部地带,矿区北部的AOD值整体处于较低水平,并且中南部的AOD高值区域呈现出向周边区域逐渐扩散的趋势.秋季,中南部AOD高值区域较夏季呈现缩小趋势,可能是受植被、农田作物等影响使中南部宁东煤矿区AOD高值区域明显减少.冬季,受西北边缘区域城市影响以及农作物秋收、植被凋落后地表裸露、沙尘等污染减少传播阻碍从而导致中北区域AOD高值区域明显增加,中南部较夏季高值区域呈现向周围大面积扩散的趋势.

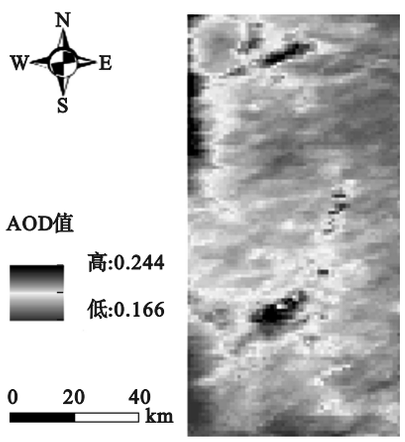


图5 2003—2023年宁东煤矿区平均AOD分布

Fig. 5 Distribution of AOD mean in Ningdong coal mining area from 2003 to 2023

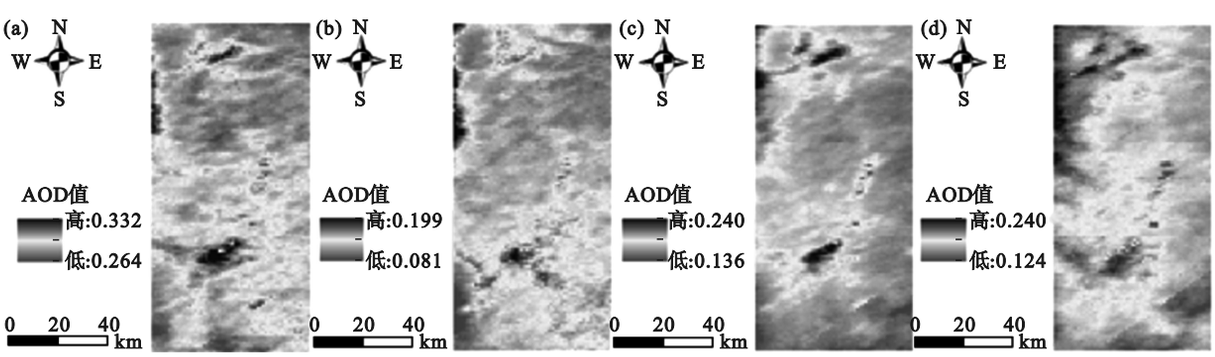


图6 2003—2023年宁东煤矿区AOD四季均值分布情况

Fig. 6 Distribution of seasonal AOD mean in Ningdong coal mining area from 2003 to 2023

(a)—春季AOD均值;(b)—夏季AOD均值;(c)—秋季AOD均值;(d)—冬季AOD均值.

2.3 AOD时间变化特征

图7是2003—2023年宁东煤矿区、乌海矿区与银川AOD年均值对比图,以AOD年均值为纵坐标的AOD时间变化特征对比.在21年中,宁东煤矿区、乌海矿区与银川的AOD年均值有着显著的差异,宁东煤矿区、乌海矿区与银川AOD年均值的大小顺序:银川>乌海矿区>宁东煤矿区.银川作为人口密集且经济活动频繁的城市,受人为因素影响,汽车尾气排放和冬季燃煤取暖等导致银川的AOD年均值最大.乌海矿区多为露天煤矿,在开采、运输、提炼焦炭等过程中会产生大量粉尘和有害气体,而宁东煤矿区主要以井下开采为主,在同等条件下,相较于露天开采,宁东煤矿区所产的粉尘和有害气体更少,因此宁东煤矿区

AOD年均值最小.

2.4　AOD逐像元时间变化特征

如图8所示,2003—2023年宁东煤矿区AOD年均值的变化趋势呈极显著或者显著增加的区域主要分布在中北部和中南部区域,占比11.73%,说明该区域空气污染相对较严重.呈极显著或者显著下降的区域占比83.62%,远大于呈现上升趋势的面积,说明该区域空气质量得到改善.

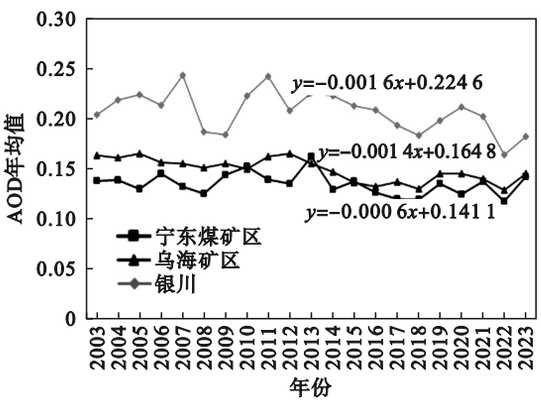


图7　2003—2023年宁东煤矿区、乌海矿区与银川AOD年均值

Fig. 7　Annual AOD mean in Ningdong coal mining area, Wuhai coal mining area, and Yinchuan from 2003 to 2023

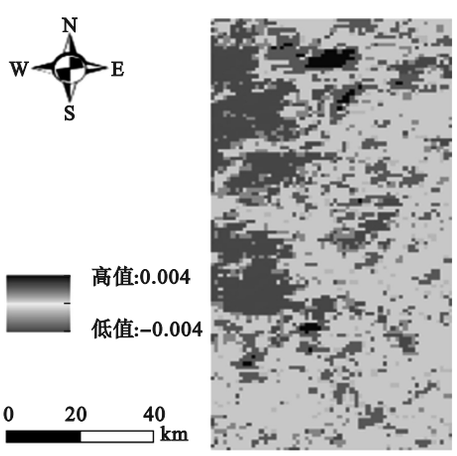


图8　宁东煤矿区AOD年均值逐像元时间变化

Fig. 8　Temporal variation of annual AOD mean per pixel in Ningdong coal mining area

如图9所示,选取宁东煤矿区、乌海矿区和对照区3块研究区域进行2003—2023年AOD年均值的变化趋势分析.对比宁东煤矿区与乌海矿区的结果发现,两个矿区中表现出下降趋势的区域面积显著大于上升趋势的区域面积.具体而言,宁东煤矿区中呈现下降趋势的区域面积比例高于乌海矿区,表明宁东煤矿区的AOD下降趋势更为明显,说明近21年宁东煤矿区空气环境质量改善的程度要优于乌海矿区,这可能与乌海矿区多为露天煤矿作业,所产的粉尘和有害气体更多有关.选取的对照区为矿区周边无工业活动的区域,主要为农田耕种区和荒漠等,域内呈现上升趋势面积远大于呈现下降趋势面积,这说明在无矿区干扰的情况下,对照区的空气环境质量呈现下降趋势.

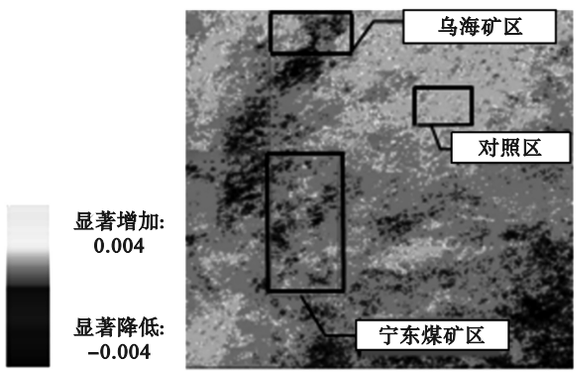


图9　宁东煤矿区、乌海矿区和对照区AOD年均值逐像元时间变化

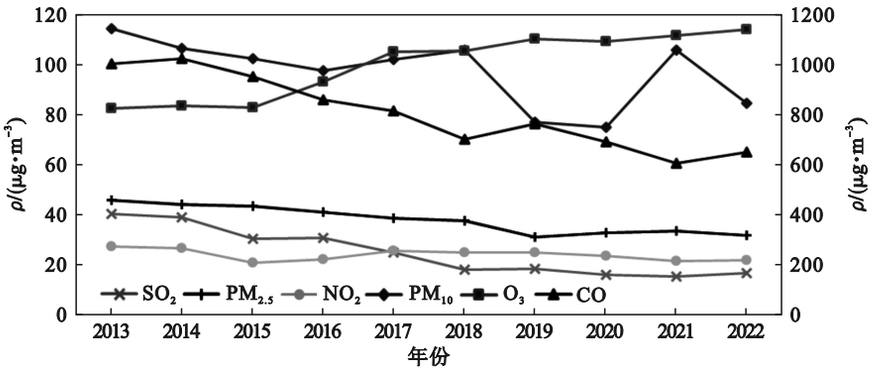
Fig. 9　Temporal variation of annual AOD mean per pixel in Ningdong coal mining area, Wuhai coal mining area, and control area

2.5　影响因子分析

如图10所示,本研究使用的气体数据来源于国家青藏高原科学数据中心的中国高分辨率高质量地面数据集,裁剪2013—2022年的宁东煤矿区的NO_2,SO_2,$PM_{2.5}$,PM_{10},CO和O_3等气体年均值数据影像.通过计算2013—2022年宁东煤矿区NO_2,SO_2,$PM_{2.5}$,PM_{10},CO,O_3的年平均质量浓度来反映10年间矿区的年际变化特征,宁东煤矿区CO年平均质量浓度显著高于其他气体的年平均质量浓度,整体变化趋势呈现出下降的态势.NO_2的年平均质量浓度在2013—2015年间持续降低,直至达到最低值,2015—2017年上升到最高值,2017—2022年呈逐渐下降的趋势.SO_2年平均质量浓度较$PM_{2.5}$年平均质量浓度下降的幅度更大.O_3年平均质量浓度变化均呈现逐年上升的趋势.PM_{10}年平均质量浓度在2013—2016年下降,2016—2018年缓慢上升,2018—2022年变化起伏较大,整体呈现出下降趋势.

选取2014—2023年期间的原煤年产量、焦炭年产量两项指标进行相关分析.

通过SPSS软件计算AOD与各相关影响因素之间的Pearson相关性,以确定影响宁东煤矿区AOD的主要因素.



注:NO_2,SO_2,$PM_{2.5}$,PM_{10},O_3为主纵轴对应,CO为次纵轴对应.

图10 宁东煤矿区气体年平均质量浓度

Fig. 10 Annual average gas concentration in Ningdong coal mining area

通过对图11的分析,发现AOD与原煤产量、焦炭产量之间存在着极为显著的关系.宁东煤矿区AOD与原煤年产量和焦炭年产量都呈正相关关系,AOD与原煤年产量的相关系数为0.782,与焦炭年产量的相关系数为0.776.这充分说明,随着原煤和焦炭产量的逐步提升,AOD的数值也会相应地升高.如表2所示,宁东煤矿区AOD与NO_2,SO_2,$PM_{2.5}$,PM_{10},CO呈正相关关系,与O_3呈负相关关系.宁东煤矿区主要开采方式为井下开采,在煤炭的开采与运输环节,会释放出一定量的粉尘及有害气体.排土场中的矸石自燃现象以及煤矿采空区煤层的自燃过程会产生有害气体,均促使AOD升高.焦炭生产过程中,同样会排放大量粉尘及大气污染物,从而推动AOD上升.相关性分析显示,在所有影响因素里,原煤年产量和焦炭年产量之间的关联程度是最为突出的.这一结果进一步证明了原煤年产量以及焦炭年产量是导致宁东煤矿区AOD升高的关键因素.

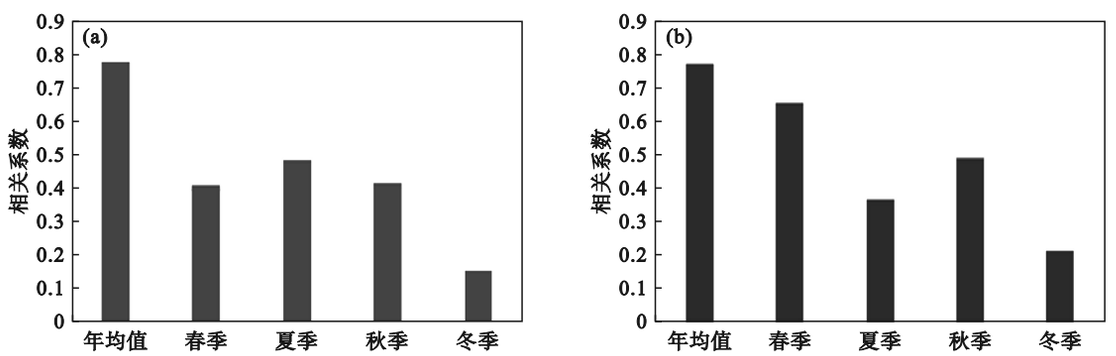


图11 2014—2023年宁东煤矿区AOD与原煤和焦炭相关性

Fig. 11 Correlation between AOD of Ningdong coal mining area and raw coal and coke from 2014 to 2023

(a)—宁东煤矿区与焦炭相关性;(b)—宁东煤矿区与原煤相关性.

表2 宁东煤矿区AOD年均值与污染物相关性

Table 2 Correlation between annual AOD mean and pollutants in Ningdong coal mining area

大气污染物	相关系数
PM_{10}	0.419
SO_2	0.545
$PM_{2.5}$	0.481
NO_2	0.285
CO	0.511
O_3	−0.555

3 结 论

1)基于MODIS MCD19A2改进的线性模型使整体精度提升46.27%.2003—2023年宁东煤矿区AOD均值总体呈先升后降趋势,拐点位于2013年.全区83.62%的面积AOD值显著下降,空气质量明显改善;AOD增加区主要集中在中北部和中南部.

2)空间分布上,宁东煤矿区AOD年均值呈“西北、南部高,其他地区低”的特征.季节差异上,春季最高,其AOD均值为0.288,夏季最低,其AOD均值为0.120;且高值区随季节更替呈现由南向北移动的趋势.

3)宁东煤矿区AOD与原煤年产量及焦炭年产量显著正相关,相关系数分别为0.782和0.776.此

外,AOD与NO_2,SO_2,$PM_{2.5}$,PM_{10},CO呈正相关,与O_3呈负相关.结果表明,煤炭开采与工业生产是导致该矿区空气污染的主要因素.

本研究聚焦于以井工开采为主的宁东煤矿区.鉴于开采方式显著影响气溶胶光学特征,后续研究可对比分析露天开采矿区,并结合地基观测数据改进模型精度,深入探究不同开采模式下气溶胶特征的演变规律及其驱动因素.

参考文献:

[1] Shi L M, Zhang J H, Yao F M, et al. Drivers to dust emissions over dust belt from 1980 to 2018 and their variation in two global warming phases [J]. *Science of The Total Environment*, 2021, 767: 144860.

[2] Xin J Y, Wang Y S, Pan Y P, et al. The campaign on atmospheric aerosol research network of China: CARE-China[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2015, 96(7):1137-1155.

[3] Levy R C, Mattoo S, Munchak L A, et al. The collection 6 MODIS aerosol products over land and ocean [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2013, 6(11): 2989-3034.

[4] Gorai P R K A. Effect of lockdown due to SARS COVID-19 on aerosol optical depth (AOD) over urban and mining regions in India [J]. *Science of The Total Environment*, 2020, 745: 141024.

[5] Mhawish A, Banerjee T, Sorek-Hamer M, et al. Comparison and evaluation of MODIS multi-angle implementation of atmospheric correction (MAIAC) aerosol product over South Asia [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 224: 12-28.

[6] Rogozovsky I, Ansmann A, Althausen D, et al. Impact of aerosol layering, complex aerosol mixing, and cloud coverage on high-resolution MAIAC aerosol optical depth measurements: fusion of Lidar, AERONET, satellite, and ground-based measurements [J]. *Atmospheric Environment*, 2021, 247: 118163.

[7] 陈翔,汪洋,周佩,等.中国地区 MODIS Terra/Aqua MAIAC 气溶胶光学厚度(AOD)产品反演误差对比分析[J].环境科学学报,2023,43(7):220-232.
(Chen Xiang, Wang Yang, Zhou Pei, et al. Comparative analysis of retrieval errors of MODIS Terra/Aqua MAIAC aerosol optical depth (AOD) products in China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2023, 43(7): 220-232.)

[8] Massimi L, Simonetti G, Buiarelli F, et al. et al. Spatial distribution of levoglucosan and alternative biomass burning tracers in atmospheric aerosols in an urban and industrial hot-spot of Central Italy [J]. *Atmospheric Research*, 2020, 239:104904.

[9] Kok J F, Storelvmo T, Karydis V A, et al. Mineral dust aerosol impacts on global climate and climate change [J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2023, 4: 71-86.

[10] 李婉,赵胡笳,王昌双,等.2003—2022年东北地区气溶胶光学厚度变化特征[J].应用气象学报,2024,35(2):211-224.
(Li Wan, Zhao Hu-jia, Wang Chang-shuang, et al. Variation characteristics of aerosol optical depth in Northeast China from 2003 to 2022 [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2024, 35(2): 211-224.)

[11] Ma X Y, Wang J Y, Yu F Q, et al. Can MODIS AOD be employed to derive $PM_{2.5}$ in Beijing-Tianjin-Hebei over China [J]. *Atmospheric Research*, 2016, 81: 250-256.

[12] Li J, Bo Y, Xie S D. Estimating emissions from crop residue open burning in China based on statistics and MODIS fire products [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2016, 44: 158-170.

[13] 施益强,陈坰烽,王坚,等.厦门市 MODIS 气溶胶光学厚度与 $PM_{2.5}$ 的时空特征及其相关性[J].大气与环境光学学报,2020,15(5):334-346.
(Shi Yi-qiang, Chen Jiong-feng, Wang Jian, et al. Spatial and temporal characteristics and correlation of MODIS aerosol optical depth and $PM_{2.5}$ concentration over Xiamen city [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2020, 15(5): 334-346.)

[14] 简小妹,周伟,袁涛.乌海矿区 AOD 时空变化特征及影响因素[J].遥感信息,2020,35(3):63-70.
(Jian Xiao-mei, Zhou Wei, Yuan Tao. Temporal and spatial variation characteristics and influencing factors of AOD in Wuhai mining area [J]. *Remote Sensing Information*, 2020, 35(3): 63-70.)

[15] 陈香月,丁建丽,王敬哲,等.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,2023,27(2):406-419.
(Chen Xiang-yue, Ding Jian-li, Wang Jing-zhe, et al. Validation of the fine resolution of the MODIS MAIAC aerosol optical depth product over arid areas[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2023, 27(2): 406-419.)

[16] Tao M H, Wang J, Li R, et al. Performance of MODIS high-resolution MAIAC aerosol algorithm in China: characterization and limitation [J]. *Atmospheric Environment*, 2019, 213: 159-169.

[17] Zhang Z Y, Wu W L, Fan M, et al. Evaluation of MAIAC aerosol retrievals over China [J]. *Atmospheric Environment*, 2019, 202: 8-16.

[18] Ångström A. On the atmospheric transmission of sun radiation and on dust in the air [J]. *Geografiska Annaler*, 1929, 11(2): 156-166.

[19] Tian H J, Cao C X, Chen W. Response of vegetation activity dynamic to climatic change and ecological restoration programs in Inner Mongolia from 2000 to 2012 [J]. *Ecological Engineering*, 2015, 82: 276-289.