

文章编号:1671-6833(2024)03-0029-09

黄河流域气溶胶时空异质性及影响因素分析

李健¹, 全智雯², 周书贵¹, 马玉荣^{2,3}

(1. 郑州大学 地球科学与技术学院, 河南 郑州 450001; 2. 郑州大学 水利与交通学院, 河南 郑州 450001; 3. 郑州大学 图书馆, 河南 郑州 450001)

摘要: 基于大尺度黄河流域的长时序气溶胶光学厚度(AOD)的分析较少,且因素分析也集中在气象条件方面,针对该问题,搜集了 MODIS 气溶胶产品数据,基于地理加权回归模型(GWR)分析了整个黄河流域的时空变化特征,定量探讨了地理环境、自然气象和社会经济对 AOD 的综合影响。结果表明:黄河流域 AOD 整体为下降趋势,由 2001 年的 0.38 下降至 2020 年的 0.22。AOD 的变化具有明显的季节性,春夏季高于秋冬季,这可能是气温、大气扩散条件和植被覆盖等因素共同作用的结果;从空间分布角度来看,研究区 AOD 为自西向东呈现梯度递增分布,与流域 DEM 分布趋势相反,说明地形与气溶胶之间有密切关联。基于 GWR 模型的研究结果表明:地形植被对整个黄河流域 AOD 影响程度最大,其次为社会经济、自然气象。针对黄河流域内重点城市的研究结果表明:不同城市气溶胶光学厚度的月际变化有较大差异,流域上游城市西宁、银川和包头的 AOD 水平较低,冬季 AOD 最高,夏季 AOD 最低,而中下游城市夏季 AOD 最高,冬季最低。

关键词: MODIS; 气溶胶光学厚度; 时空分布; 影响因素; 黄河流域

中图分类号:X513

文献标志码:A

doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2024.03.014

气溶胶是一种悬浮在大气中由固态或液态颗粒等众多物质共同构成的稳定体系^[1]。其来源分为人为排放和自然形成^[2],是大气污染物的重要组成部分。气溶胶粒子通过吸收、散射等作用影响地气系统的能量平衡^[3],进而对气候变化产生影响^[4],导致空气质量下降^[5],粒子中的化学物质还会通过呼吸道进入人体,对人体健康存在危害^[6]。气溶胶光学厚度 AOD(aerosol optical depth)被用于表征大气气溶胶基本光学特性^[7],描述大气浑浊度或气溶胶的总含量,广泛应用于空气质量评估^[8]。

目前 AOD 探测主要有两种手段:地基遥感与卫星遥感。地基遥感主要是利用太阳光度计对气溶胶进行观测,如 AERONET 自动检测网,可根据 CE318 多波段太阳光度计在不同波段下测量的直接辐射数据,结合相应波段的天空扫描辐射数据^[9],得到各波段的气溶胶光学特性。虽观测数据精度较高,误差在 0.01 以内^[10],但只能代表稀疏站点及其周围较小空间的 AOD 特征,无法满足区域性长时间研究的需要,而卫星遥感具备宏观、动态、实时、迅速等优势,

弥补了此项不足。其中搭载在 Terra 和 Aqua 两颗卫星上的中分辨率成像光谱仪(MODIS)具有 36 个光谱波段通道,被用于大范围全球数据动态测量。且 Li 等^[11]、Levy 等^[12]利用 AERONET 站点提供的数据对 MODIS 产品进行验证,证明了气溶胶产品精度可靠。鉴于此,国内很多学者基于 MODIS 卫星遥感开展了相关研究。例如,景悦等^[13]对京津冀 AOD 的时空分布和影响因素进行研究,发现空间上呈现南高北低的态势,且人为因子贡献最显著。张颖蕾等^[14]以长江三角洲为例,分析研究区 AOD 和 Angstrom 指数。

目前研究主要集中在经济发达且污染严重的区域。黄河流域作为中国地区 AOD 极大值中心之一^[15],大气污染问题日益突出,许多研究人员也从多种视角对流域范围内的大气时空变化展开研究,一些学者对陕西省、郑州市、新乡市等地区的大气污染情况和时空差异进行分析^[16-18],但以上研究大多局限于特定地点,驱动因子也主要集中在气象条件方面。针对此问题,本文以整个黄河流域为研究区,

收稿日期:2023-11-12;修订日期:2023-12-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(42201370)

作者简介:李健(1983—),男,河南孟州人,郑州大学副教授,博士,主要从事三维地质建模、点云数据智能处理、遥感影像处理与应用的相关研究,E-mail:jianli@zzu.edu.cn。

引用本文:李健,全智雯,周书贵,等.黄河流域气溶胶时空异质性及影响因素分析[J].郑州大学学报(工学版),2024,45(3):29-37.(LI J, QUAN Z W, ZHOU S G, et al. Spatio-temporal heterogeneity and driving factors of AOD in the Yellow River Basin[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2024, 45(3): 29-37.)

首先对 MODIS 气溶胶产品进行处理,揭示黄河流域 2001—2020 年长时间序列的 AOD 时空变化特征,分析地理环境、自然气象和社会经济与 AOD 间的相关关系,以为黄河流域高质量发展提供依据,更好地保障黄河长治久安、促进全流域高质量发展。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

黄河流域干流全长 5 464 km,自西向东流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、山西、陕西、河南和山东 9 个省份,最后注入渤海,流域总面积 $7.95 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。黄河流域温差悬殊、降水集中但分布不均、降水年际变化大、湿度小,且沙尘、扬沙天气多^[19]。在黄河流域,经济社会发展差距较大,第二产业占比较高,能源资源和矿产采掘业特色突出^[20],空气污染问题严重。黄河流域概况图如图 1 所示,流域矢量边界和数字高程数据 DEM (digital elevation model) 来源于中国科学院地理科学与资源研究所资源环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn>)。

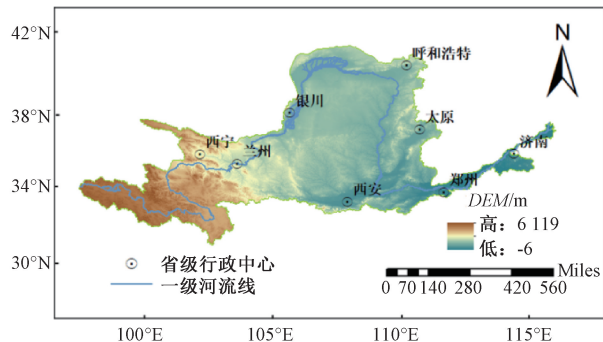


图 1 黄河流域高程空间分布图

Figure 1 Spatial distribution of elevation in the Yellow River Basin

1.2 MODIS 数据

本文搜集了研究区范围内 2001 年 1 月 1 日至 2020 年 12 月 31 日的 MODIS 气溶胶三级产品 $MOD08_M3$ 与二级产品 $MOD04_L2$,经大量学者验证该数据产品较之前版本准确度进一步提高^[21-22]。本研究采用 $MOD08_M3$ 数据,基于栅格计算和统计分析得到黄河流域历年平均 AOD 。针对黄河流域影响因素和重点城市研究,采用空间分辨率为 10 km 的 $MOD04_L2$ 数据,首先筛选出 AOD 最大的年份的数据集,通过 ArcGIS 剔除无效值并基于栅格计算得到各重点城市季节均值。

1.3 影响因子

AOD 时空分异的影响因素很多,大致可分为地

理环境、自然气象和社会经济影响。地理环境方面选取 DEM 、归一化植被指数 $NDVI$ (normalized difference vegetation index) 进行分析;自然气象方面选取气温、降水、风速和社会因素进行分析;经济方面选取 GDP 密度、人口密度、夜晚灯光和碳排放进行分析。月尺度的气温、降水和风速来自于国家地球系统科学数据中心 (<http://www.geodata.cn>),其空间分辨率为 1 km。夜晚灯光原始数据来源于 Harvard Dataverse,碳排放数据来源于国家统计局最新能源数据修订版。年尺度的 1 km 分辨率 $NDVI$ 、GDP、人口密度和 DEM 数据均来源于中国科学院资源环境科学数据中心,使用 ArcGIS 通过掩膜提取、重采样等方法将数据处理为与黄河流域 AOD 气溶胶产品同分辨率的年均栅格数据,并保持其投影方式与 AOD 数据一致。

1.4 研究方法

为探索不同驱动因子在不同地理位置对黄河流域 AOD 的影响程度,本文采用地理加权回归模型 (geographically weighted regression, GWR)^[23] 探索两者相关程度。该模型核心是将样本点的地理位置因素嵌入到回归参数之中,考虑了数据的空间位置关系^[24]。GWR 的表达式为

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_{k=1}^p \beta_k(u_i, v_i) x_{ik} + \varepsilon_i, i = 1, 2, \dots, n. \quad (1)$$

式中: (u_i, v_i) 为第 i 个样本点的坐标; x_i, y_i 分别为样本点的自变量和因变量; $\beta_0(u_i, v_i)$ 为截距; $\beta_k(u_i, v_i)$ 为样本点 i 第 k 个自变量的权重; ε_i 为随机误差; p 为自变量个数; n 为空间样点数。该模型的关键是通过空间矩阵的加入,实现空间结构要素的嵌入,本文使用高斯函数法构建权函数,该函数改正了其他权函数不连续的问题,其形式如下:

$$W_{ij} = \frac{1}{\exp\left(0.5 \times \left(\frac{d_{ij}}{b}\right)^2\right)}. \quad (2)$$

式中: W_{ij} 为关于 d_{ij} 的连续单调递减函数; d_{ij} 为每一个数据点 j 与回归点 i 之间的距离; b 为带宽,是描述权重与距离之间函数关系的非负衰减参数。本文使用 AIC 准则对 b 进行优化,该方法通过最小信息准则来决定最佳带宽^[25],其公式为

$$A_c = 2n \ln \hat{\sigma} + n \ln(2\pi) + n \frac{n + \text{tr } s}{n - 2 - \text{tr } s}. \quad (3)$$

式中: A_c 表示修正后的 AIC 估计值; n 为样点大小; $\hat{\sigma}$ 为误差项估计的标准差; $\text{tr } s$ 为 K-T 变换矩阵 s 的迹, s 为带宽的函数。与传统最小二乘模型相比,

AIC 更有利于 GWR 模型模拟数据。

2 结果和分析

2.1 黄河流域 AOD 时空分布

2.1.1 AOD 时间分布特征

黄河流域 2001—2020 年 MOD08_M3 月尺度 AOD 时间变化趋势如图 2 所示。对 20 a 间黄河流域 AOD 月均值进行一元线性拟合,结果表明,黄河流域 AOD 以每月 7×10^{-4} 的速率下降。图 3 为黄河流域平均 AOD 变化。由图 3 可知,逐年的月平均值呈梯形周期变化,即 AOD 在 1—4 月份逐渐上升,5—8 月份在一定范围内波动,7 月份 AOD 达到全年最大,为 0.43,9 月份 AOD 下降,12 月份 AOD 为全年最低,为 0.19。AOD 的季节性指数从高到低依次为夏季 0.42>春季 0.37>冬季 0.26>秋季 0.25,与长江流域^[26]的变化特征较为一致。这是由于夏季气温较高,大气中的水汽含量增加,有利于气溶胶的生成和维持,并且夏季是农业、建筑等户外活动的高峰期,这些活动可能导致扬尘、燃烧等污染物排放增加。而秋冬季农业生产相对较少,降低了气溶胶的排放,此外秋冬季风速较大,气流运动频繁,有利于将气溶胶向远离污染源的地方扩散,降低污染程度。

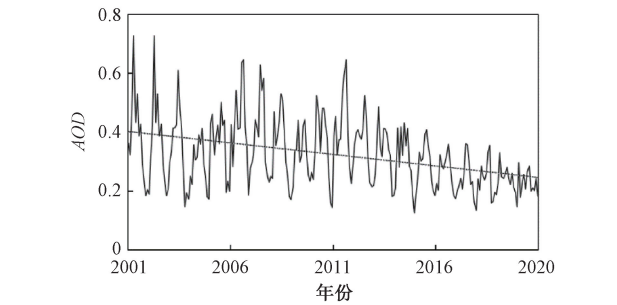


图 2 2001—2020 年 AOD 月均值变化趋势
Figure 2 Trend of monthly mean AOD from 2001 to 2020

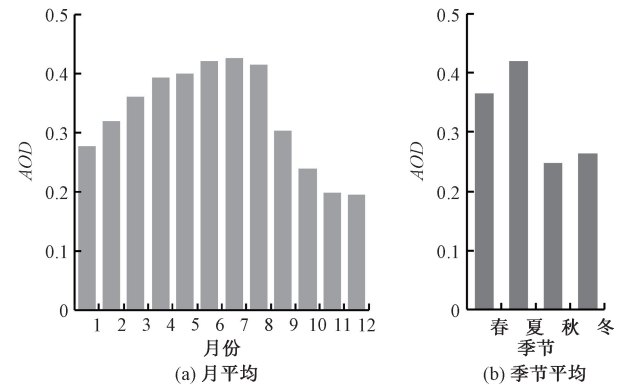


图 3 黄河流域平均 AOD 变化
Figure 3 Changes of mean AOD in the Yellow River Basin

图 4 为 2001—2020 年 AOD 年均值变化趋势。从图 4 可以看出,黄河流域在 2000—2007 年,AOD 波动较大,呈“V”字变化。2007—2010 年趋势平稳,基本相差不大,环境得到一定控制。2011 年为近 20 a AOD 最高年份,这与全国时间变化一致^[22]。2012—2017 年 AOD 持续保持较大幅度减小,然后趋于稳定。总体来看,黄河流域 20 a 间的 AOD 变化表现为从波动较大到逐步平稳下降,这与黄河流域的当地的政策、经济发展、人类活动等因素紧密相关。2011 年以前,中国工业生产增速较快,尤其是黄河流域的一些省份,工业增长迅速,工业废气排放量增加,加重了黄河流域的污染程度。而且此时黄河流域城市化进程加速,生活污染排放量增多。农业生产活动也较为频繁,农业面源污染较为严重,AOD 处在较高水平。而 2012 年开始加大了对工业污染的治理力度,实行了更严格的环保政策和标准,工业污染排放得到一定程度的控制。政府也加大对城市环保基础设施的投入,对农业面源污染也有所关注,因此,自 2012 年黄河流域大气污染情况明显得到改善。

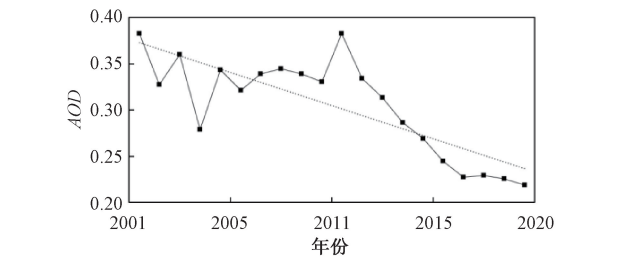


图 4 2001—2020 年 AOD 年均值变化趋势
Figure 4 Trend of annual mean AOD from 2001 to 2020

2.1.2 AOD 空间分布特征

图 5 反映了黄河流域平均 AOD 的空间分布特征。

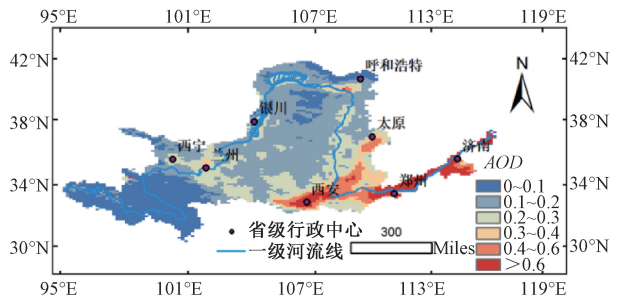


图 5 2001—2020 年平均 AOD 空间分布
Figure 5 Spatial distribution of annual average AOD from 2001 to 2020

从图 5 可以看出,黄河流域 AOD 由西向东梯度递增,上中下游差异显著,AOD 低值区域位于流域上游,均值在 0.2 以下,上游地势高,经济主要依赖

于传统产业,同时远离工业发达地区,污染较轻,空气质量状况较好。而红色高值区主要集中在中下游的西安、郑州和济南,AOD 在 0.4 以上,这些地区人口密集,产业发达,地表植被破坏也较为严重,污染物排放较多,对大气环境造成严重影响。山西省和甘肃省区域地处西部内陆,工业发展相对滞后,属于中等污染水平。

图 6 为 AOD 季节分布图,可以看出,四季的

AOD 空间分布特征与年平均分布基本相似,不同季节所对应的高值区和低值区分布相差较小。春季青海省和内蒙古段 AOD 较低,甘肃、宁夏春季 AOD 高于其他季节,下游城市基本都位于高值区;夏季是黄河流域 AOD 均值最高的季节,高值区河南和山东段 AOD 可达 0.8 以上,秋冬两季 AOD 明显下降,大部分区域 AOD 小于 0.4,红色高值区消失,但整体仍呈现东高西低的现象。

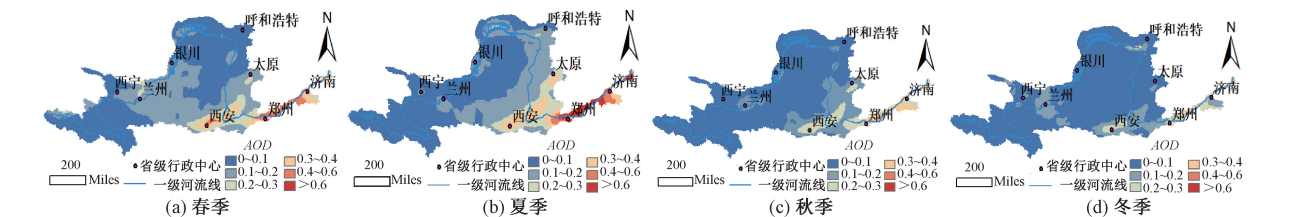


图 6 2001—2020 年季节平均 AOD 空间分布

Figure 6 Spatial distribution of seasonal average AOD from 2001 to 2020

2.2 影响因素分析

本文选取了 9 个指标探索黄河流域 AOD 的主要影响因素。为了准确量化分析各因子对气溶胶光学厚度的影响,首先对指标进行标准化处理,其次借助地理加权回归模型探讨各因子的回归系数,该值用于表征不同观测点处因子的重要程度^[27]。为避免指标间相互影响从而对估计结果造成偏差,对上述 9 个影响因子进行共线性检验,结果如表 1 所示。各影响因子的方差膨胀因子 VIF 均小于 7.5,表明所选取的各因子不存在共线性,GWR 模型的 $R^2 = 0.87$,拟合效果较好。

根据回归系数将因子划分为正向指标和负向指标。利用各层面指标相关系数的绝对值总和计算不同层面的贡献量,结果表明,地形植被对黄河流域 AOD 的影响程度最大,社会经济次之,自然气象最小。为了进一步明确黄河流域空气污染的空间异质性,利用 ArcGIS 对 AOD 与各影响因子的相关性进行分区统计,结果如图 7 所示。

地形植被层面选取的指标为 DEM 和 NDVI。黄河流域 AOD 和 DEM 为明显的负相关关系,且中上游相关程度小于中下游。DEM 与 AOD 相关性最高,因为地势较高地区不适合大规模重型工业的生产和密集的人口居住及活动,工业和人为排放较少,且地势较高,空气畅通有利于粒子的扩散和自我净化。NDVI 与 AOD 相关关系以正相关为主,但具有较强的空间异质性。在上游地区,NDVI 和 AOD 为负相关,即植被覆盖率越高,越有利于削减空气污染^[28]。而中下游植被覆盖较少,NDVI 为正相关,这是因为中下游工业化进程较快,城市和工业区对土地的需求不断增加,导致植被覆盖度降低,工业和人为排放多,空气污染严重。黄河流域的经济社会发展仍在持续高速增长^[29],在流域下游的工业发展过程中,需要权衡经济发展与生态环境保护的关系,确保在满足工业用地需求的同时,维护植被覆盖度,减轻工业活动对大气环境的影响。

气象因素中,气温与 AOD 正相关,中下游相关

表 1 影响因素描述性统计和回归系数

Table 1 Details about the statistics and regression coefficients of influencing factors

所属体系	影响因素	VIF	指标性质	回归系数	贡献量
地形植被	DEM/m	1.45	负	-0.777 4	0.895 6
	NDVI	2.20	正	0.118 2	
自然气象	气温/℃	2.80	正	0.244 0	0.284 3
	降水量/mm	2.60	负	-0.013 8	
	风速/(m·s ⁻¹)	2.37	负	-0.026 5	
社会经济	GDP 密度/(元·km ⁻²)	1.72	正	0.305 6	0.675 0
	人口密度/(人·km ⁻²)	1.31	正	0.080 0	
	夜晚灯光	1.51	正	0.036 5	
	碳排放量/(10 ⁶ t·km ⁻²)	1.75	正	0.252 9	

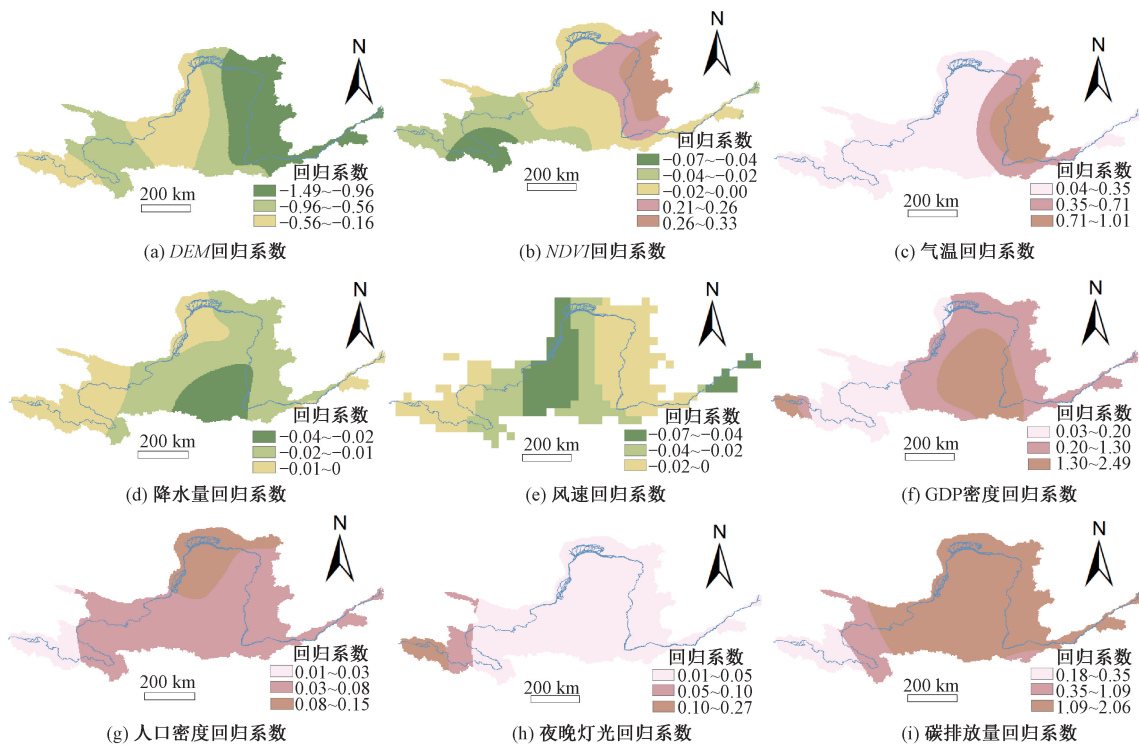


图 7 各影响因素和 AOD 相关性空间分布分级图

Figure 7 Spatial distribution reclassified diagram of correlation between multiple influencing factors and AOD

性大于中上游,高温天气有助于“气-粒”转化作用发生,利于气溶胶粒子生长^[30]。此外,温度升高会加快大气化学反应,利于二次悬浮颗粒物的生成^[31],使气溶胶浓度增加。黄河流域地区充沛的降水对 AOD 起削减作用,雨水的冲刷将空气中大颗粒灰尘附着于雨滴之上,降落地面凝为尘土,降低空气浑浊程度。平均风速与 AOD 负相关,大气水平运动加快,有利于气溶胶扩散^[32]。

社会经济指标中,GDP 密度、人口密度、夜晚灯光、碳排放量与 AOD 的关系均为正相关。黄河流域的经济产业构成以第二产业为主体,能矿资源采掘业特色突出,煤炭能源主要分布于山西、陕西、内蒙古、宁夏 4 省份的毗邻地区,太阳能和风能等清洁能源主要分布于西北部的内蒙古、甘肃、青海、宁夏,这种分布导致中下游地区碳排放量较大,与 AOD 的相关关系也更密切。夜晚灯光水平与城市发展程度和人口分布聚集度有关,从夜晚灯光和人口密度的正相关系数来看,城市化发展会加剧空气污染。经济因素与 AOD 的正相关性表明黄河流域地区经济发展以牺牲环境为代价,对于这种产业结构应当重新调整,将生态保护与经济发展有机结合。

2.3 重点城市分析

从图 4 可以看出,2011 年黄河流域的 AOD 出现抬升,因此本文选取该年份进行具体分析。从上中下游选取西宁、银川、包头、太原、西安、郑州、济南 7

个代表城市。各城市 AOD 的月均值和季节均值变化如图 8 所示。

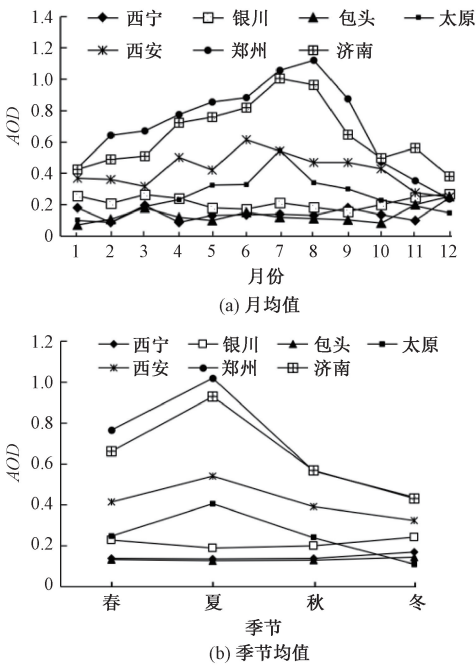


图 8 黄河流域内重点城市 AOD

Figure 8 AOD of prominent cities in the Yellow River Basin

由图 8 可以看出,上游城市西宁、银川和包头 AOD 呈现相似的较低水平,且城市间月际变化相差不大,污染程度从重到轻为冬、春、秋、夏。冬季最严重是因为上游城市集中供热,由此排放的污染物达

到最高峰,加之冬季空气流通能力变弱,污染物滞留在空气中,污染加重;上游降水较少,地表近似裸露,净化能力弱,当春季风速较高时,漂浮的尘埃微粒易被带到空气中,导致春季大气污染仅低于冬季;夏、秋季大气对流发展旺盛,有助于污染物流通扩散,且5月份植被覆盖度迅速增加,一定程度上净化了空气污染。5—9月份降水充沛,空气相对湿度较高,对气溶胶颗粒有很好的冲刷作用,污染物浓度明显降低。中下游4个城市AOD为先上升后下降的趋势,从1月份开始AOD逐渐增加,供暖停止、地表植被覆盖增加导致AOD在5月份稍有回落,6月份和7月份华北地区生物质燃烧和夏季高温加速气溶胶生成,导致AOD浓度逐渐增加,在7月份达到全年最大值后逐渐下降,12月份回落到一年中的最低值,所以夏季AOD最高,春季次之,冬季最低。此外,城市间AOD差异明显,中下游AOD明显高于上游,上游地区地势较高,有利于气溶胶的稀释和扩散,工业化程度和城市规模相对较低,排放源较少,但下游的郑州和济南是人口规模较大、工业化程度较高的城市,一般会有更多的气溶胶排放源。而西安和太原工业化程度较低,污染程度小于郑州和济南,并且太原位于山西省中部,地处黄土高原东部,地势较高,而西安地处关中平原^[33],气溶胶不宜传输和扩散,AOD高于太原。

使用GWR模型计算了9种影响因素与AOD的相关性,如图10所示。总体上看,影响重点城市AOD空间变化的因素较为一致,DEM是相关性最大的因素,GDP密度和碳排放量次之,降水量、风速、夜晚灯光对AOD的贡献较小。其中气温、GDP密度、人口密度、夜晚灯光、碳排放量与AOD为正相关,DEM、降水量、风速与AOD为负相关,这与黄河流域整体影响因素一致,但NDVI在不同地区出现了正负差异。

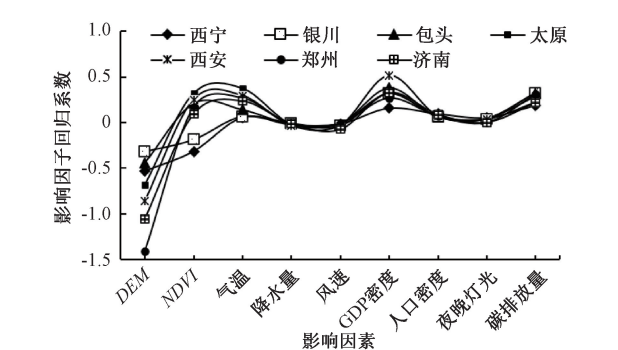


图10 黄河流域内重点城市的AOD的影响因素

Figure 10 Influencing factors of AOD of cities in the Yellow River Basin

DEM与AOD的回归系数最大。西安、郑州、济南位于华北沉降带南部,该区地势总体上西北略高,东南略低,为大型缓倾斜平原,造成大量的霾颗粒沉降,因此这三个城市DEM的相关性尤为突出。上游的西宁、银川NDVI为负相关,表明绿色植被对污染物有削减作用,中下游的其他城市森林覆盖率和受保护面积比重低,绿地规模不足限制了对可吸入颗粒物污染的吸收,因此与AOD为正相关。温差悬殊是黄河流域气候的一大特征,随地形三级阶梯自西向东由冷变暖,这种气候特点也导致上游气温对AOD的影响程度小于中下游城市。

3 结论

(1)黄河流域2001—2020年AOD数值整体呈下降趋势,这与生态文明建设和环境保护等政策的实施有关,AOD最高年份为2011年,此后明显降低然后趋于稳定。流域逐年月均值呈梯形变化趋势,7月份数值最高,12月份数值最低。季节变化中,秋冬季环境质量优于春夏季。

(2)黄河流域历年空间分布较为一致,AOD为自西向东递增分布,空间上与各地的经济发展和产业结构具有高度一致性。上游清洁能源丰富、地势高,本身空气污染程度较轻且空气畅通,利于气溶胶扩散,因此上游地区AOD低。中下游重点发展第二产业,石油、化工、煤炭等工业基地较多,植被覆盖度还未达到绿地净化污染效应的水平,平原和盆地也不利于粒子的扩散,污染相对严重。

(3)黄河流域AOD是由地理、气象、经济因素共同驱动影响的。其中地形植被对AOD异质性影响最大,社会经济次之,NDVI、气温、GDP密度、人口密度、夜晚灯光、碳排放量与AOD为正相关,DEM、降水量、风速与AOD为负相关。各影响因素对AOD的作用在空间上的分布具有异质性。

(4)黄河流域上游城市AOD呈现较低水平。最高值出现在冬季,最低值出现在夏季,中下游城市夏季AOD值最高,冬季最低。影响因素在不同城市间存在一定的地理差异。

(5)黄河流域生态保护和高质量发展是国家重大战略,治理黄河流域的空气问题刻不容缓。上游地区地势较高,大气污染程度相对较轻,应积极推进清洁能源的开发和利用,加大生态保护力度,实施退耕还林等政策;中下游大气污染较为严重,主要受工业和燃煤影响,应当严格控制工业污染排放,加快产业结构革新,技术创新,资源的可开发与利用更新换代,不断提升能源效率。应以西安、郑州、济南高污

染区域为重点治理对象,根据不同地区所受不同因子的影响程度,制定相应的治理措施,实施大气污染联防联控,最大程度上做到改善黄河流域的空气污染状况,降低区域 AOD。

参考文献:

- [1] 毛节泰,张军华,王美华. 中国大气气溶胶研究综述[J]. 气象学报, 2002, 60(5): 625-634.
MAO J T, ZHANG J H, WANG M H. Summary comment on research of atmospheric aerosol in China[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2002, 60(5): 625-634.
- [2] ZHAO X W, GAO Q, SUN M, et al. Statistical analysis of spatiotemporal heterogeneity of the distribution of air quality and dominant air pollutants and the effect factors in Qingdao urban zones [J]. Atmosphere, 2018, 9(4): 135.
- [3] 孙忠保,程先富,夏晓圣. 中国气溶胶光学厚度的时空分布及影响因素分析[J]. 中国环境科学, 2021, 41(10): 4466-4475.
SUN Z B, CHENG X F, XIA X S. Spatial-temporal distribution and impact factors of aerosol optical depth over China [J]. China Environmental Science, 2021, 41(10): 4466-4475.
- [4] 郭霖,孟飞,马明亮. 华北平原 AOD 时空演化与影响因素[J]. 环境科学, 2022, 43(7): 3483-3493.
GUO L, MENG F, MA M L. Spatiotemporal variation and influencing factors of AOD in the North China plain [J]. Environmental Science, 2022, 43(7): 3483-3493.
- [5] 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.
- [6] HAN X, LIU Y Q, GAO H, et al. Forecasting PM_{2.5} induced male lung cancer morbidity in China using satellite retrieved PM_{2.5} and spatial analysis [J]. Science of the Total Environment, 2017, 607-608: 1009-1017.
- [7] PACIOREK C J, LIU Y, MORENO-MACIAS H, et al. Spatiotemporal associations between GOES aerosol optical depth retrievals and ground-level PM_{2.5} [J]. Environmental Science & Technology, 2008, 42(15): 5800-5806.
- [8] BELLOUIN N, BOUCHER O, HAYWOOD J, et al. Global estimate of aerosol direct radiative forcing from satellite measurements [J]. Nature, 2005, 438(7071): 1138-1141.
- [9] 张志薇,王宏斌,张镭,等. 中国 3 个 AERONET 站点气溶胶微物理特性分析及比较[J]. 中国环境科学, 2014, 34(8): 1927-1937.
- ZHANG Z W, WANG H B, ZHANG L, et al. Analysis and comparison of the aerosol microphysical properties at three AERONET sites in China [J]. China Environmental Science, 2014, 34(8): 1927-1937.
- [10] HOLBEN B N, TANRÉ D, SMIRNOV A, et al. An emerging ground-based aerosol climatology: aerosol optical depth from AERONET [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2001, 106(D11): 12067-12097.
- [11] LI Z Q, NIU F, LEE K H, et al. Validation and understanding of moderate resolution imaging spectroradiometer aerosol products (C5) using ground-based measurements from the handheld Sun photometer network in China [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2007, 112(D22): 1-16.
- [12] LEVY R C, LEPTOUKH G G, KAHN R, et al. A critical look at deriving monthly aerosol optical depth from satellite data [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47(8): 2942-2956.
- [13] 景悦,孙艳玲,付宏臣,等. 2010—2016 年京津冀 AOD 时空变化及其影响因子分析[J]. 环境科学与技术, 2018, 41(8): 104-113.
JING Y, SUN Y L, FU H C, et al. Temporal and spatial variation of aerosol optical depth and analysis of influencing factors in Beijing-Tianjin-Hebei region from 2010 to 2016 [J]. Environmental Science & Technology, 2018, 41(8): 104-113.
- [14] 张颖蕾,崔希民. 基于 MODIS061 的长三角地区 AOD 与 Angstrom 指数时空变化分析[J]. 环境科学, 2020, 41(6): 2617-2624.
ZHANG Y L, CUI X M. Spatial and temporal characteristics of AOD and Angstrom exponent in the Yangtze River Delta based on MODIS061 [J]. Environmental Science, 2020, 41(6): 2617-2624.
- [15] ZHANG J H, MAO J T, WANG M H. Analysis of the aerosol extinction characteristics in different areas of China [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2002, 19(1): 136-152.
- [16] 杨飞,易文利,朱婵园,等. 陕西省空气质量时空差异研究[J]. 四川环境, 2018, 37(2): 78-85.
YANG F, YI W L, ZHU C Y, et al. The temporal and spatial distribution characteristics of air quality in Shaanxi Province [J]. Sichuan Environment, 2018, 37(2): 78-85.
- [17] 李治军,卢松,陈末,等. 郑州市大气污染时空分布特征分析及预测模型建立[J]. 黑龙江大学自然科学学报, 2019, 36(4): 450-458.
LI Z J, LU S, CHEN M, et al. Spatiotemporal distribution characteristics analysis and prediction model establishment of air pollution in Zhengzhou city [J]. Journal of

- Natural Science of Heilongjiang University, 2019, 36 (4): 450-458.
- [18] 沙涛, 张慧. 新乡市环境质量灰色关联分析[J]. 环境科学导刊, 2019, 38(5): 85-88.
- SHA T, ZHANG H. Gray correlation analysis of environmental quality in Xinxiang city[J]. Environmental Science Survey, 2019, 38(5): 85-88.
- [19] 黄建平, 张国龙, 于海鹏, 等. 黄河流域近 40 年气候变化的时空特征[J]. 水利学报, 2020, 51(9): 1048-1058.
- HUANG J P, ZHANG G L, YU H P, et al. Characteristics of climate change in the Yellow River Basin during recent 40 years[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(9): 1048-1058.
- [20] 郭付友, 佟连军, 仇方道, 等. 黄河流域生态经济走廊绿色发展时空分异特征与影响因素识别[J]. 地理学报, 2021, 76(3): 726-739.
- GUO F Y, TONG L J, QIU F D, et al. Spatio-temporal differentiation characteristics and influencing factors of green development in the eco-economic corridor of the Yellow River Basin[J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(3): 726-739.
- [21] CHE H Z, YANG L K, LIU C, et al. Long-term validation of MODIS C6 and C6.1 dark target aerosol products over China using CARSNET and AERONET[J]. Chemosphere, 2019, 236: 124268.
- [22] 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.
- XUE R. The temporal and spatial distribution characteristics of aerosols and the influencing factors of typical regions in China based on MODIS data[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2020.
- [23] BRUNSDON C, FOTHERINGHAM A S, CHARLTON M E. Geographically weighted regression: a method for exploring spatial nonstationarity[J]. Geographical Analysis, 1996, 28(4): 281-298.
- [24] 张静, 张丽芳, 濮励杰, 等. 基于 GWR 模型的城市住宅地价的时空演变研究: 以江苏省为例[J]. 地理科学, 2012, 32(7): 828-834.
- ZHANG J, ZHANG L F, PU L J, et al. Research on spatio-temporal variation of urban residential land price based on GWR model: a case study of Jiangsu Province[J]. Scientia Geographica Sinica, 2012, 32(7): 828-834.
- [25] BRUNSDON C, FOTHERINGHAM A S, CHARLTON M. Geographically weighted summary statistics—a framework for localised exploratory data analysis[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2002, 26(6): 501-524.
- [26] HE L J, WANG L C, HUANG B, et al. Anthropogenic and meteorological drivers of 1980-2016 trend in aerosol optical and radiative properties over the Yangtze River Basin[J]. Atmospheric Environment, 2020, 223: 117188.
- [27] 覃文忠. 地理加权回归基本理论与应用研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.
- QIN W Z. The basic theoretics and application research on geographically weighted regression[D]. Shanghai: Tongji University, 2007.
- [28] 丁宇, 李贵才, 路旭, 等. 空间异质性及绿色空间对大气污染的削减效应: 以大珠江三角洲为例[J]. 地理科学进展, 2011, 30(11): 1415-1421.
- DING Y, LI G C, LU X, et al. Spatial heterogeneity and air pollution removal by green space in greater Pearl River Delta[J]. Progress in Geography, 2011, 30(11): 1415-1421.
- [29] 左其亭, 王鹏抗, 张志卓, 等. 黄河流域水资源利用水平及提升途径[J]. 郑州大学学报(工学版), 2023, 44(3): 12-19.
- ZUO Q T, WANG P K, ZHANG Z Z, et al. Utilization level and improvement approach of water resources in the Yellow River Basin[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2023, 44(3): 12-19.
- [30] 甘泉. 低中层逆温层和大气潮汐的 TIMED/SABER 观测研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2012.
- GAN Q. TIMED/SABER observations of lower mesospheric inversion layers and atmospheric tides[D]. Wuhan: Wuhan University, 2012.
- [31] WHITEAKER J R, SUESS D T, PRATHER K A. Effects of meteorological conditions on aerosol composition and mixing state in Bakersfield, CA[J]. Environmental Science & Technology, 2002, 36(11): 2345-2353.
- [32] CUHADAROGLU B, DEMIRCI E. Influence of some meteorological factors on air pollution in Trabzon city[J]. Energy and Buildings, 1997, 25(3): 179-184.
- [33] 郭伟, 程燕, 樊巍, 等. 西安市大气污染物浓度特征及影响因素分析[J]. 地球环境学报, 2014, 5(4): 235-242.
- GUO W, CHENG Y, FAN W, et al. Characteristics and affecting factors of atmospheric pollutants in Xi'an[J]. Journal of Earth Environment, 2014, 5(4): 235-242.

Spatio-temporal Heterogeneity and Driving Factors of AOD in the Yellow River Basin

LI Jian¹, QUAN Zhiwen², ZHOU Shugui¹, MA Yurong^{2,3}

(1. School of Geo-Science & Technology, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. School of Water Conservancy and Transportation, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 3. Library, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Studies on the long-term aerosol optical depth (*AOD*) based on the large-scale Yellow River basin was limited, and most of them only focused on meteorological conditions. In this study, the MODIS aerosol optical depth (*AOD*) products was collected, and then the temporal and spatial pattern of *AOD* and comprehensively quantified the impact of geographical environment, natural weather and social economy on *AOD* in the Yellow River Basin were analyzed based on the geographically weighted regression (GWR). The results showed that the *AOD* exhibited a downward trend in the Yellow River Basin. The *AOD* value decreased from 0.38 in 2001 to 0.22 in 2022. Moreover, the distribution of *AOD* also showed obvious seasonal differences that *AOD* values in spring and summer were higher than in autumn and winter. This might be the result of a combination of factors such as temperature, atmospheric diffusion conditions, and vegetation cover. From the perspective of spatial distribution, the *AOD* in the study area gradually increased from west to east. This trend was opposite to the distribution of *DEM* in the Yellow River Basin, indicating a close correlation between terrain and aerosols. The analysis of influencing factors based on GWR model showed that, for the entire Yellow River Basin, terrain and vegetation had the greatest impact on *AOD* in the Yellow River Basin, followed by socio-economic factors and natural meteorology. Prominent cities in the Yellow River Basin were also analyzed in the study, and the results showed that the inter-annual variation of *AOD* in different cities in the study area was quite different. The *AOD* values of Xining, Yinchuan and Baotou in the upper reaches of the Yellow River Basin showed a low level, with the highest value appearing in winter and the lowest value appearing in summer, while the *AOD* values of cities in the middle and lower reaches were the highest in summer and the lowest in winter.

Keywords: MODIS; *AOD*; spatio-temporal pattern; influencing factors; the Yellow River Basin

(上接第 21 页)

Identification and Assessment of Damage to Arch Bridge Booms Based on Quasi-static Strain Impact Lines

ZHENG Yuanxun^{1,2}, FAN Congcong^{1,2}, WANG Boli^{1,2}, WANG Changzhu³, GUO Pan^{1,2}

(1. Yellow River Laboratory, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. School of Water Conservancy and Transportation, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 3. CCCC Third Highway Engineering Co., Ltd., Beijing 100304, China)

Abstract: In order to solve the problem of accurate identification of arch bridge boom damage, in this study a simplified mechanical model of an under-bearing tied arch bridge was established and the analytic formula of boom strain influence line of under-bearing tied arch bridge was obtained by force method derivation. Based on that, the damage identification method boom was proposed based on quasi-static strain influence line index of under-bearing tied arch bridge. Then the applicability of the method for conventional boom number arch bridge was verified with the help of finite element method. And the influence of test noise, damage location, damage degree, and damage category on the damage assessment results was studied by using finite element model calculations. A scientific implementation plan for vehicle loading was proposed. The results showed that within 10% test noise, the quasi-static strain-influence line difference curvature method could accurately locate the local damage location of arch bridge booms and quantitatively assess their damage degree. The method still had a good recognition effect when other structures, such as tie beams, wind braces, and arch ribs, were damaged.

Keywords: bridge engineering; down-bearing tied arch bridge; strain-influenced line difference curvature; booms; damage assessment