山西省工矿区表层土壤湿度的时空分异及驱动机制

李 元[1], 杨艳青[2], 杨永刚[2], 王让虎[1]
(1.山西大学 黄土高原研究所, 山西 太原 030006; 2.山西大学 环境与资源学院, 山西 太原 030006)

摘 要: [目的] 阐明山西省工矿区表层土壤湿度(surface soil moisture, SSM)的时空演变规律与驱动机制,为矿区生态修复与水资源管理提供科学依据。[方法] 基于2003—2024年中国1 km土壤湿度日尺度数据集,结合土地利用转移矩阵、Sen趋势分析及地理探测器等方法,系统解析SSM时空分异特征,并定量辨识自然与人为因子的贡献。[结果] SSM空间分布呈南高北低格局,变化趋势表现为晋北矿区显著下降,而晋中矿区和晋东南矿区则显著上升与显著下降并存。SSM空间异质性的驱动机制具有区域差异性,由自然本底与人为干扰强度共同决定,因子间交互作用均表现为非线性增强。工矿开采变化主导SSM时间动态,气候与植被变化则发挥区域调节作用,各驱动因子间普遍存在非线性增强的交互效应。[结论] 山西省工矿区SSM时空格局受自然与人为因子协同影响,且驱动机制呈现显著区域分异,建议生态修复与水资源管理应因地制宜,并重视气候变化与人类活动的交互效应。

关键词: 表层土壤湿度; 时空变化; 地理探测器; 工矿区; 山西省
文献标识码: A **文章编号:** 1000-288X(2026)05-0146-11 **中图分类号:** S152.7

文献参数: 李元, 杨艳青, 杨永刚, 等.山西省工矿区表层土壤湿度的时空分异及驱动机制[J].水土保持通报,2026,46(5):146-156. Li Yuan, Yang Yanqing, Yang Yonggang, et al. Spatiotemporal differentiation and driving mechanisms of surface soil moisture in mining areas of Shanxi Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2026,46(5):146-156.

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2026.05.024 **CSTR:32312.14.stbctb.2026.05.024**

Spatiotemporal differentiation and driving mechanisms of surface soil moisture in mining areas of Shanxi Province

Li Yuan[1], Yang Yanqing[2], Yang Yonggang[2], Wang Ranghu[1]
(1.*Institute of Loess Plateau, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi* 030006, *China*;
2.*School of Environmental and Resource Sciences, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi* 030006, *China*)

Abstract: [Objective] The spatiotemporal evolution patterns and driving mechanisms of surface soil moisture (SSM) in mining areas of Shanxi Province were clarified in order to provide a scientific basis for ecological restoration and water resource management in mining areas. [Methods] Based on the 1 km daily-scale soil moisture dataset of China from 2003 to 2024, and by integrating methods including the land use transition matrix, Sen's slope analysis and the GeoDetector, the spatiotemporal differentiation characteristics of SSM were systematically analyzed. The contributions of both natural and anthropogenic factors were quantitatively identified. [Results] The spatial distribution of SSM was characterized by higher values in the south and lower values in the north. Regarding the change trends, a significant decrease was observed in the northern mining area, whereas significant increases and decreases coexisted in the central and southeastern mining areas. The driving mechanisms of SSM spatial heterogeneity showed regional differences, jointly determined by natural background and human disturbance intensity, with nonlinear enhancement interactions among factors. Changes in mining activities

收稿日期:2026-02-04 **修回日期:**2026-03-19 **采用日期:**2026-03-21
资助项目:山西省重点研发计划项目"黄河流域工矿区生态水文演变及修复关键技术研究"(202302090301016); 山西省基础研究计划项目"晋西黄土沟壑区切沟侵蚀对极端降雨的响应机制"(202303021221084); 忻州市科技计划项目"忻州市黄河流域国土空间生态修复关键区域识别技术研究"(20240302)
第一作者:李元(2000—),男(汉族),山西省临汾市人,硕士研究生,研究方向为生态水文过程。Email:liyuan11@sxu.edu.cn。
通信作者:王让虎(1990—),男(汉族),山西省临汾市人,博士,副教授,主要从事土壤侵蚀及恢复生态学研究。Email:wangranghu@sxu.edu.cn。

dominated the temporal dynamics of SSM, while climate and vegetation changes played important regional regulatory roles. Nonlinear enhancement interactions were widespread among driving factors. [Conclusion] The spatiotemporal pattern of SSM in the mining areas of Shanxi Province is jointly influenced by natural and anthropogenic factors, with significant regional differences in driving mechanisms. Ecological restoration and water resource management should be adapted to local conditions, with particular attention to the interactive effects of climate change and human activities.

Keywords: surface soil moisture; spatiotemporal variation; GeoDetector; mining area; Shanxi Province

土壤湿度作为表征土壤水分的关键指标,连接着地表水、地下水和生态过程,其时空动态对于理解区域的水文循环与生态系统恢复至关重要[1]。山西省作为中国重要的能源基地与工业集聚区,长期高强度的矿产开发与工业化进程,不仅破坏了地表植被,更深刻地改变了区域的地形、水文和地球化学过程,导致表层土壤湿度(surface soil moisture, SSM)时空格局发生显著变异,进而影响区域生态安全与水资源可持续利用[2-3]。因此,准确揭示SSM的时空变异规律,是进行科学管理的前提。

遥感技术已成为实现这一目标的关键手段。其中,微波遥感、热红外遥感及多光谱遥感等手段,凭借其大范围、快速且连续观测的优势,有效克服了传统地面点状监测的局限,能够系统捕捉工矿区SSM在复杂开采扰动下的时空分异特征[4]。基于这些观测,大量研究已达成一项普遍共识:工矿区SSM的时空变异,同时受到区域气候、地形、植被及土壤属性等自然因子[5],与开采扰动,人工修复等人为活动的双重驱动与复合调控[6-9]。然而,既有研究在深入揭示其驱动机制方面仍存在局限。其一,在量化人为干扰的影响时,多依赖工矿用地面积等静态指标,难以揭示地下开采强度、地表覆被动态与人为修复之间的耦合过程;其二,在时间维度上,多数研究侧重于SSM及相关因子状态值的空间解释,未能将时序变化趋势纳入驱动分析框架,从而限制了对SSM动态演变机制的理解。为此,本研究以山西省工矿区为例,基于中国1 km分辨率逐日全天候地表土壤水分数据集(2003—2024年),综合运用趋势分析、地理探测器等方法,利用煤炭企业产能数据构建开采强度指数,并将驱动因子的时序变化趋势作为驱动变量,以揭示SSM演变与自然-人为过程变化之间的内在联系。在此基础上,拟实现以下研究目标:①揭示山西省工矿区SSM的时空演变规律;②定量辨析自然与人为因子对SSM空间异质性和时间变化的独立与交互影响;③识别不同工矿区域SSM时空变化的主导驱动因素,为矿区生态修复与水资源管理提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

本研究以山西省为研究区,参考自然资源部的矿产资源规划和已有文献[10],将矿区划分为晋北、晋中、晋东南3大工矿基地(图1)。山西省地处黄土高原东部,整体地势东北高,西南低,属于温带大陆性季风气候,四季分明。降水自东南向西北递减,无霜期相应缩短。

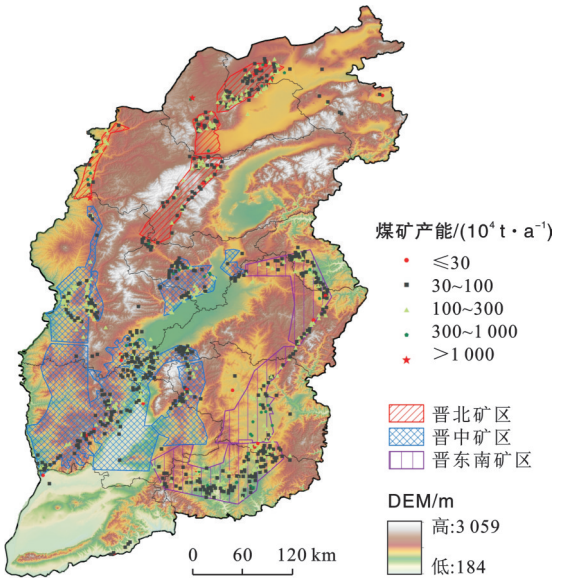


图1　山西省地形及煤矿产能分布

Fig.1　Topography and distribution of coal mine production capacity of Shanxi Province

山西省气候、植被与土壤类型随地形与水热条件呈明显梯度变化。3大工矿区域自然地理特征分异显著:①晋北矿区位于省境北部,地处黄土高原向内蒙古高原过渡带,以风积黄土丘陵与风沙地貌为主,水土流失严重。属中温带半干旱气候,年均温3~7 ℃,降水量350~450 mm[11-12],是3个矿区中最为干寒的区域;②晋中矿区位于山西省中部,地貌类型多样,包括吕梁山地、太行西麓山麓及中部断陷盆地,呈现山地与盆地相间分布的特点,属于暖温带半干旱-半湿润过渡气候,年均温8~10 ℃,降水量450~550 mm;③晋东南矿区位于省境东部太行山西

麓，以石质山地和黄土丘陵为主，地势起伏较大，是山西高原向华北平原的过渡地带，属暖温带半湿润气候，水热条件最优，年均温10～12 ℃，降水量550～650 mm。这种自然地理分异塑造了山西省工矿企业集聚与扩散并存的空间格局，为探究不同环境背景下工矿活动对表层土壤湿度的影响提供了良好的对比样本。

1.2 数据来源与预处理

1.2.1 SSM数据

本研究的SSM数据来源于国家青藏高原科学数据中心提供的中国1 km分辨率逐日全天候地表土壤水分数据集（2003—2024年）。该产品是通过在36 km处对基于AMSR-E和AMSR-2的SSM进行降尺度生成的，涵盖2003—2024年两台辐射计的所有在轨时间。根据2000多个专业气象和土壤水分观测站的现场土壤水分测量结果对该产品进行了评估，发现该产品的精度在晴空到多云的所有天气条件下都是稳定的[13-15]。本研究采用算术平均法将原始日数据聚合为月平均数据，以平滑短期波动；进而将年内所有月平均值再次平均，通过裁剪和提取得到研究区年平均SSM数据序列，用于后续的时空变化规律与驱动机制分析。

1.2.2 驱动因子数据

本研究将表层土壤湿度的驱动因素定义为动态和静态两种类型。动态因素是指表现出明显和容易量化的时间变化的变量。相比之下，静态因素的特点是跨越几年到几十年时间尺度的微妙变化。此外，由于数据的可获得性，其时间变化难以量化的内在动态因素在本研究中被定义为静态因素。总体而言，考虑3类动态变量，即气候、植被和工矿开采，以及两类静态变量，包括土壤属性和地形，以解释表层土壤湿度的时空变化（表1）。

在动态变量方面，气候因素涉及气温（T）、降水（P）、地表短波辐射（surface shortwave radiation，SSR）和风速（wind speed，WS）4个因子，数据分别来源于国家青藏高原科学数据中心的中国1 km分辨率逐月平均气温数据集（1901—2024年）、中国1 km分辨率逐月降水量数据集（1901—2024年）、均一化中国陆表气候观测格点数据集、中国区域地面气象要素驱动数据集v2.0（1951—2024年）。植被因素涉及NDVI因子，数据来源于国家青藏高原科学数据中心中国区域250 m植被覆盖度数据集（2000—2024年）。矿区开采因素包含土地利用/覆被变化（land use and cover change，LUCC）和开采程度指数（mining intensity index，MI）两个因子。LUCC数据来源于地球资源数据云平台（www.gis5g.com）制作的全国1 000 m分辨率土地利用遥感监测空间分布数据，将2003和2024年的LUCC数据进行重分类，将其划分成耕地、生态用地（林地、草地）、工矿用地、其他用地4类，通过土地利用转移矩阵量化研究期内“耕地→生态用地”“工矿用地→生态用地”等关键转型过程的面积与比例。开采程度指数数据来源于1990，2010和2017年山西省煤矿企业产能数据[16]，通过ArcGIS 10.8的核密度分析生成空间分布图。考虑到产能数据在年份间的连续性，采用线性插值方法构建了2003—2024年开采程度指数序列，并结合同期工矿用地扩张趋势进行验证。该方法假设产能变化在区间内线性过渡，虽无法完全反映突发性关停或复产事件，但能较好地反映长期开采强度的空间格局演变。

在静态变量方面，土壤因素涉及土壤类型（soil type，ST）、容重（BD）和土壤有机质（SOM）含量3个因子，数据来源于国家青藏高原科学数据中心基于世界土壤数据库（HWSD）的中国土壤数据集（v1.1）（2009）以及中国土壤有机质数据集。地形方面，高程数据来自国家青藏高原科学数据中心中国数字高程图（1 km）产品，随后利用ArcGIS 10.8提取坡度（slope）和坡向（aspect）。

1.3 研究方法

1.3.1 空间自相关分析

采用全局莫兰指数（Global Moran's I）评估山西省工矿区SSM空间分布的自相关程度，以判断其空间分布是否具有显著的聚集或离散模式[17]。Moran's I的取值范围为[－1，1]，大于0表示空间正相关，小于0表示空间负相关，接近0则表示空间随机分布。其计算公式为

$$I=\frac{n\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}w_{ij}\left(z_i-\bar{z}\right)\left(z_j-\bar{z}\right)}{\left(\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}w_{ij}\right)\sum_{i=1}^{n}\left(z_i-\bar{z}\right)^2} \tag{1}$$

式中：I为莫兰指数；n为样本数；W_{ij}为空间权重矩阵中位置i与位置j之间的权重值；z_i，z_j分别为位置i和j的表层土壤湿度值（m^3/m^3）；$\bar{z}$为表层土壤湿度的平均值（m^3/m^3）。通过Z得分和p值检验统计显著性。

1.3.2 时空趋势分析

采用Theil-Sen Median斜率估计与Mann-Kendall趋势检验结合，在像元尺度上系统分析矿区SSM的时空变化趋势。Theil-Sen Median是一种非参数的趋势斜率估计算法，通过计算所有数据点两两之间斜率的中位数来代表整体趋势，具有对异常值不敏感、抗噪性强的特点，能更准确地捕捉SSM的年际变化速率[18]。其计算公式为

$$S=\mathrm{median}\frac{W_j-\mathrm{W}_i}{j-i}\quad(0<i<j<n)\quad(2)$$

式中:S为Sen趋势斜率,当斜率S大于0时,表示呈现增长趋势,小于0则呈现下降趋势;W_j,W_i分别为第i年和第j年的表层土壤湿度值(m^3/m^3);i,j为年份序号,且满足$0<i<j<n$,其中n为时间序列的总年数。

表 1　地理探测驱动因子相关参数

Table 1　Parameters of driving factors for GeoDetector

驱动因素	驱动因子	数据来源
气 候	气温(T,℃)	中国1 km逐月平均气温数据集(1901—2024年)
	降水量(P,mm)	中国1 km逐月降水量数据集(1901—2024年)
	地表短波辐射(SSR,W/m²)	均一化中国陆表气候观测格点数据集
	风速(WS,m/s)	中国区域地面气象要素驱动数据集v2.0(1951—2024年)
植 被	归一化植被指数(NDVI)	中国区域250 m植被覆盖度数据集(2000—2024年)
工矿开采	土地利用/覆被变化(LUCC)	地理资源数据云:全国1 000 m分辨率土地利用遥感监测空间分布数据
	开采程度指数(MI)	1990年、2010年、2017年山西省煤矿企业产能数据
土 壤	土壤类型(ST)	基于HWSD的中国土壤数据集(v1.1)(2009年)
	土壤容重(BD,g/cm³)	基于HWSD的中国土壤数据集(v1.1)(2009年)
	土壤有机质(SOM,%)	中国土壤有机质数据集
地 形	数字高程模型(DEM,m)	中国数字高程图(1 km)
	坡度(S,°)	基于DEM在ArcGIS 10.8中提取
	坡向(A)	基于DEM在ArcGIS 10.8中提取

注:如无特殊说明,表中数据来源于国家青藏高原科学数据中心。

Mann-Kendall趋势检验是一种非参数的时间序列趋势显著性检验方法,不要求数据服从特定分布,适用于水文、气象等领域。该方法通过计算统计量Z值来判断趋势的显著性水平。

在本研究中,对2003—2024年每个像元的逐年平均SSM序列及各类动态因子分别进行上述趋势分析,得到各自的年际变化趋势斜率及其显著性水平。这些结果一方面用于在空间上识别SSM与各动态因子显著上升、下降或稳定的区域,揭示其空间分异特征;另一方面,将各动态因子的Sen趋势斜率作为表征其时间变化的新变量,命名规则为在原变量名后添加“sen”,例如气温的趋势变量命名为T_sen,这些新生成的变量纳入后续驱动机制分析,从而在时序维度上识别影响SSM动态演变的关键因素。上述分析基于Python语言在ArcGIS Pro环境中编写脚本实现,通过调用pymannkendall,numpy等科学计算库完成趋势计算与显著性检验,并利用ArcPy库进行栅格数据的读写与管理。

1.3.3　地理探测器

地理探测器是一组用于探测和量化空间分异性及其驱动因素的统计学方法[19]。其核心思想是如果某个自变量对因变量的空间分布具有重要影响,那么自变量的空间分布应与因变量的空间分布具有相似性。本研究主要运用地理探测器中的因子探测器和交互作用探测器两大模块,以定量评估各驱动因子对山西省工矿区表层土壤湿度空间异质性的解释力,并揭示因子间的交互效应。在进行地理探测器分析前,需将连续型驱动因子(如气温、NDVI,DEM等)采用自然断点法离散化为类型变量。

(1) 因子探测器。用于度量各驱动因子(如植被类型、气候因子、地形因子、土壤属性等)对表层土壤湿度空间分异的解释程度,其统计量q的计算公式为

$$q=1-\frac{\sum_{h=1}^{L}N_h\sigma_h^2}{N\sigma^2}\quad(3)$$

式中:L为因子分层数;N_h,σ_h^2分别为第h层的样本数与方差;N为总样本数;σ^2为全区表层土壤湿度的总方差。q值范围为0~1,值越大表明该因子对表层土壤湿度空间分异的解释力越强。

(2) 交互作用探测器。用于识别不同驱动因子之间的交互作用,即评估两个因子共同作用时是否会增强或减弱对表层土壤湿度的影响。交互作用的类型包括:非线性减弱、单因子非线性增强、双因子增强、独立、非线性增强等。通过比较单因子的值与两因子交互后的值,判断其交互效应。本研究使用R语言的GD包进行因子探测与交互作用探测。

2 结果与分析

2.1 山西省工矿区 SSM 时空变化

2.1.1 SSM 年际变化特征

2003—2024 年山西省 SSM 呈现微弱的波动上升趋势(图 2),年变化率为 0.000 243 $m^3/(m^3 \cdot a)$,但该趋势未通过显著性检验(p 值为 0.357,R^2=0.042)(图 2)。序列多年平均值为 0.168 m^3/m^3,其年际波动远高于长期趋势,成为序列的主要特征。3 大矿区年际变化趋势均未通过显著性检验,但方向与幅度存在差异(图 2)。晋北矿区 SSM 低于全省平均水平呈微弱下降趋势〔年变化率为 −0.000 461 $m^3/(m^3 \cdot a)$〕,晋中与晋东南矿区 SSM 均高于全省平均水平且呈微弱上升趋势〔年变化率分别为 0.000 368 和 0.000 455 $m^3/(m^3 \cdot a)$〕。

2.1.2 SSM 年内变化特征

山西省 SSM 存在显著的季节性周期(图 3)。夏、秋两季湿度最高(平均值分别为 0.187 和 0.172 m^3/m^3)。春、冬两季依次降低,冬季达到全年最低值。冬季 SSM 显著下降(p 值为 0.001 65,R^2=0.41),而其余季节均不显著。晋北矿区 SSM 整体最低,且冬季呈现显著下降趋势(p 值为 0.002 51,R^2=0.35);晋中矿区 SSM 变化较为稳定,无明显变化趋势;晋东南矿区各季节 SSM 均为 3 个矿区中最高,且四季均呈微弱上升趋势但不显著。

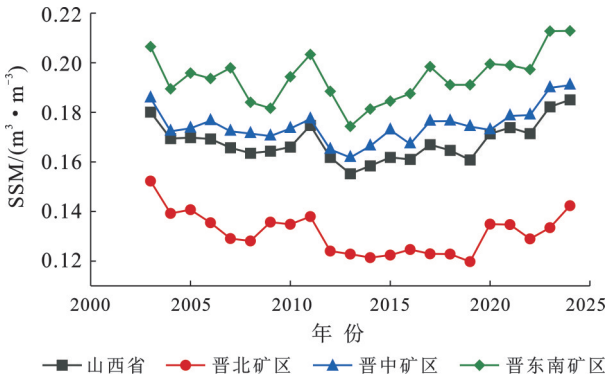


图 2 山西省与 3 大矿区 SSM 时间变化趋势

Fig.2 Temporal variation trends of SSM in Shanxi Province and three mining areas

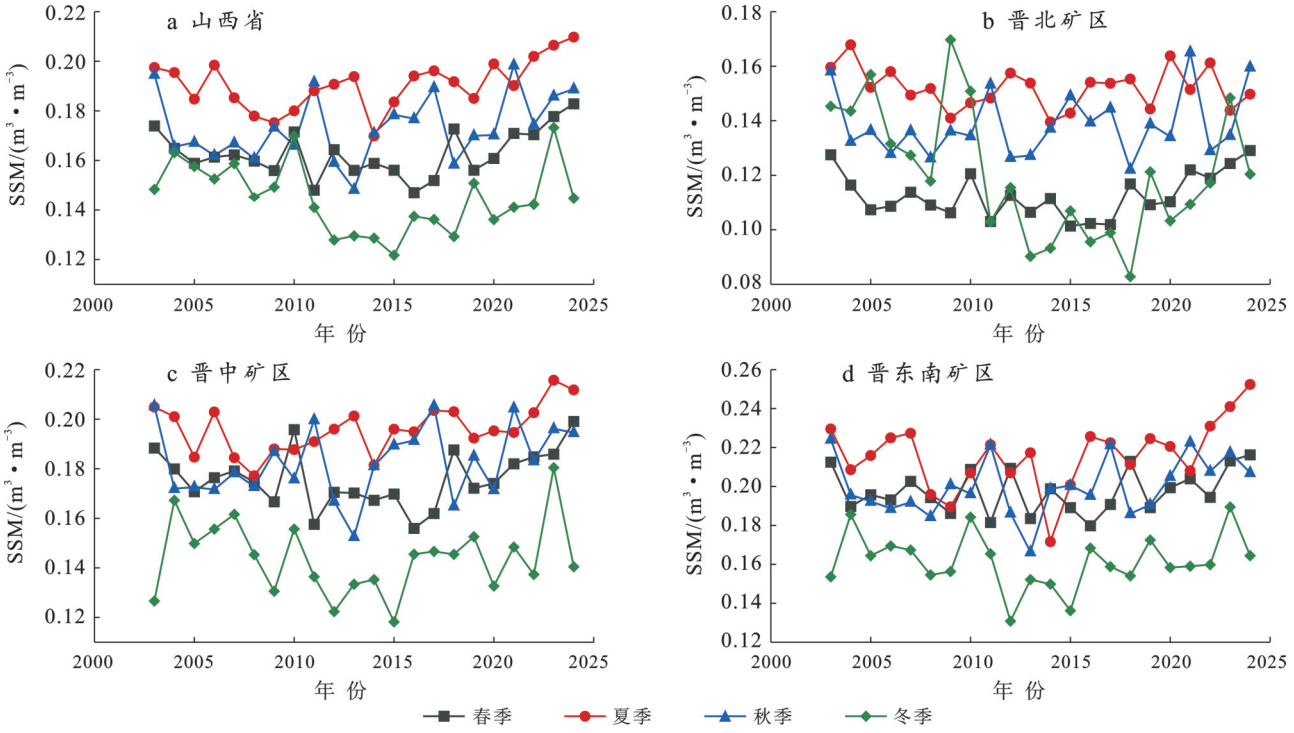


图 3 山西省与 3 大矿区 SSM 季节变化趋势分析

Fig.3 Seasonal variation trend analysis of SSM in Shanxi Province and three mining areas

2.1.3 SSM 空间分布与变化趋势特征

山西省工矿区 SSM 空间分布总体呈现南高北低的格局(图 4a),矿区层面为晋北矿区整体 SSM 最低,晋中矿区次之,晋东南矿区最高。2003—2024 年山西省工矿区 SSM 变化趋势的空间异质性显著(图 4b,4c)。

晋北矿区 SSM 表现为连片式显著下降(p<0.05),下降区域集中于矿区及周边断陷盆地;晋中矿区 SSM 变化呈现明显的空间分异,其北部显著上升(p<0.05),南部则显著下降(p<0.05);晋东南矿区以 SSM 总体显著上升(p<0.05)为主要特征,下降区域破碎化分布于矿区边缘。

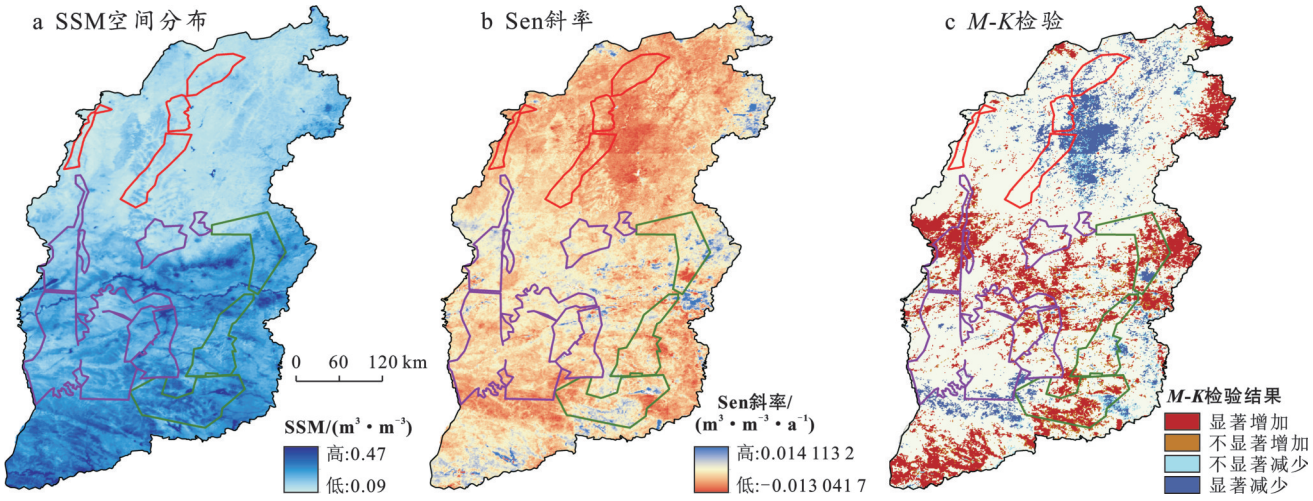


图 4　山西省 2003—2024 年 SSM 空间分布及 Sen 斜率与 *M-K* 检验

Fig.4　Spatial distribution of SSM and its Sen slope and *M-K* test in Shanxi Province from 2003 to 2024

2.2　SSM 空间变化驱动因子分析

基于乡镇尺度的全局空间自相关分析(Moran's *I*)表明,山西省及晋北、晋中、晋东南 3 大工矿区的 SSM 均呈现极显著的空间正相关关系($p<0.001$),Moran's *I* 指数介于 0.670～0.922。这一结果证实了研究区内 SSM 具有高度集聚的非随机空间分布格局。

2.2.1　单因子解释力分析

地理探测器因子探测结果显示,各驱动因子对 SSM 空间分异的解释力(q 值)存在显著的尺度与区域差异(图 5a)。在全省尺度,降水量(P)是解释力最强的因子($q=0.481$),其次是气温(T)和风速(WS),而开采程度指数(MI)的解释力显著低于其在各矿区内部的影响。在晋北矿区,解释力最强的因子为 MI($q=0.109$),其次为 DEM 和 BD。而晋中矿区 P($q=0.171$)和 WS($q=0.096$)是解释力最强的两个因子,SOM 与 T 次之。晋东南矿区中,P($q=0.212$)和 T($q=0.204$)的解释力最为突出,其次是 MI 和 SSR。除 LUCC,S,Aspect 和 ST 外,其余所有因子在相应区域的解释力均通过 0.01 水平的显著性检验。

2.2.2　因子交互作用分析

交互作用探测结果表明,全省尺度上(图 5b),解释力最强的交互组合为 T 与 P($q=0.605$),其次为 P 与 WS 以及 P 与 DEM 的交互。晋北矿区解释力最强的交互组合是 MI 与 DEM($q=0.166$),较单因子(开采强度 $q=0.109$,高程 $q=0.07$)解释力提升显著。NDVI 与 MI 同样是该区域核心的交互路径。晋中矿区解释力最强的交互组合为 T 与 P($q=0.351$),其次为 P 与 WS。晋东南矿区以 T 与 P 的交互为主导($q=0.361$),P 与气候因子的交互作用普遍较强。任意两因子交互后的值均大于任一单因子的值,即所有交互作用均表现为非线性增强。

2.2.3　气候、植被、土壤特性、地形和工矿开采因素的相对贡献

基于地理探测器结果,对气候、植被、土壤特性、地形及工矿开采等五大类驱动因素对 SSM 空间分异的相对贡献进行定量评估(图 5c)。从全省整体来看,气候因素是首要贡献者(相对贡献率为 55.73%),其次为植被因子(19.56%)和地形因子(18.16%),土壤特性和工矿开采活动的贡献率相对较低。晋北矿区中,工矿开采的贡献率超过 34%,是最主要的驱动因素。表明在生态相对脆弱,采矿活动集中的区域,工矿开采对 SSM 的空间格局发挥了重要作用。对于晋中矿区,气候(45.6%)、土壤(22.56%)以及地形因素(11.02%)的贡献率之和接近 80%,这反映了该区域 SSM 分布更多地受到自然地理条件和大气水热条件的控制。晋东南矿区气候因素的主导地位更为突出,贡献率达到 37.83%。地形、气候在该区域也表现出不可忽视的影响力。

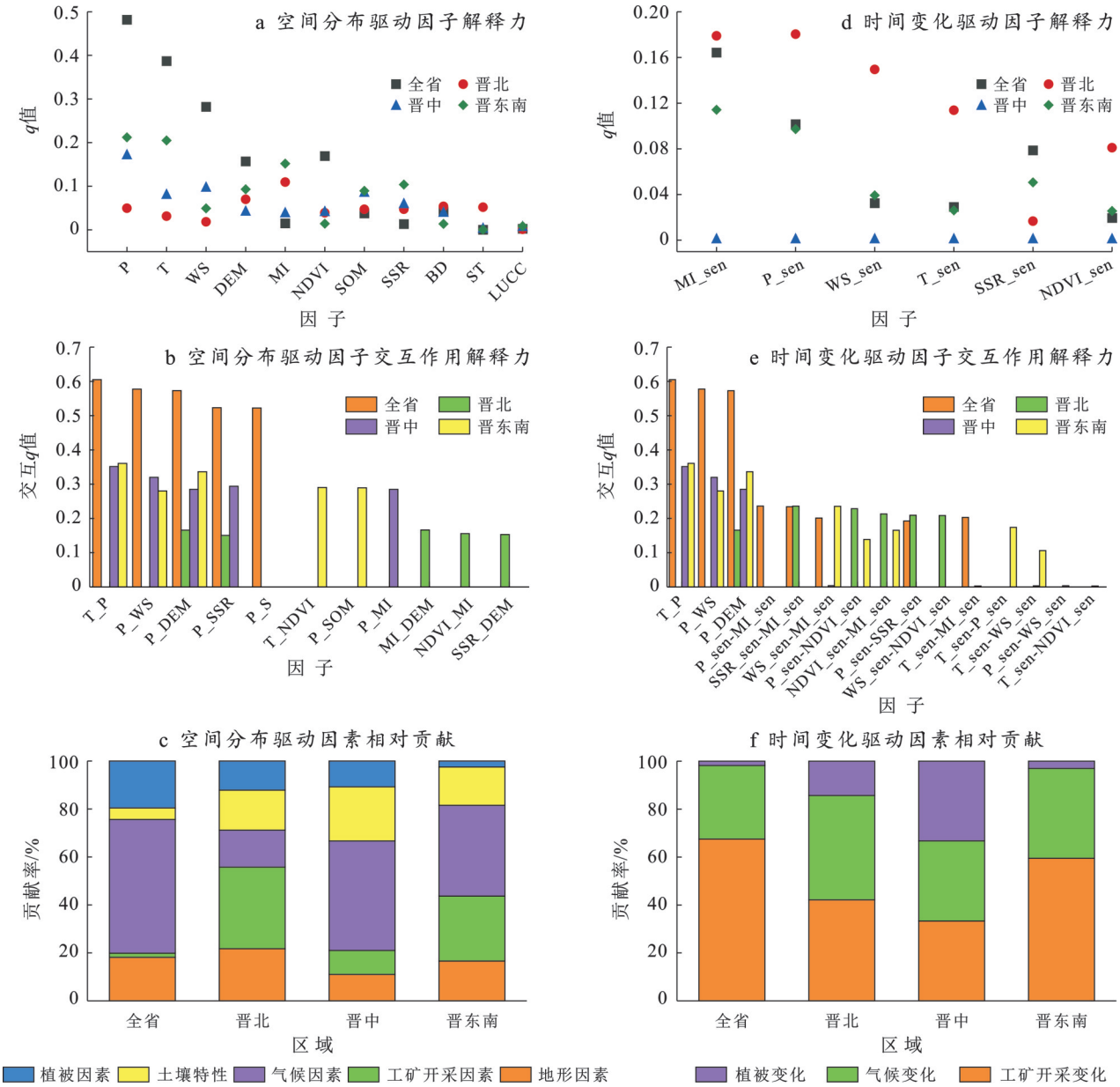
2.3　SSM 时间变化驱动因子分析

此外,在时间演变层面,山西省及 3 大工矿区 SSM 的变化趋势同样存在极显著的空间正自相关($p<0.001$)。Moran's *I* 指数介于 0.193～0.434,表明 SSM 的变化过程在空间上依然呈现出一定的空间连续性。

2.3.1　单因子解释力分析

各驱动因子变化趋势对 SSM 变化趋势空间分异的解释力如图 5d 所示,区域差异显著。在全省尺度,MI_sen($q=0.164$)与 P_sen($q=0.093$)的解释力最强,其次是 SSR_sen。晋北矿区中,解释力最强的因子为 P_sen($q=0.18$),MI_sen,WS_sen 次之。在晋中矿区各因子解释力整体偏低,依次为 SSR_sen,

WS_sen，P_sen。在晋东南矿区，MI_sen的解释力占据绝对主导地位（q=0.164），P_sen和SSR_sen分列第2和第3位。所有因子变化趋势均通过0.01水平的显著性检验。



注：各因子符号含义详见表1。

图5 SSM地理探测器结果

Fig.5 Results of GeoDetector analysis for SSM

2.3.2 因子交互作用分析

交互作用探测结果表明（图5e），全省尺度上，解释力最强的交互组合为P_sen与MI_sen（q=0.236），SSR_sen与MI_sen的交互同样是关键的驱动路径。晋北矿区的交互作用中，SSR_sen与MI_sen的解释力最强（q=0.234），较单因子解释力（太阳辐射趋势q=0.016，开采强度趋势q=0.179）显著提高，P_sen与NDVI_sen的交互也是主要的协同变化模式。晋中矿区交互作用最弱，解释力最强的组合为WS_sen与MI_sen以及P_sen与WS_sen。晋东南矿区的交互作用以WS_sen与MI_sen为主导（q=0.234），T_sen与P_sen同样表现出强烈的协同解释作用。任意两个驱动因子趋势之间的交互作用仍能显著增强对表层土壤湿度趋势时间演变的解释力，交互作用类型仍表现为非线性增强或双因子增强。

2.3.3 气候变化、植被变化和工矿开采因素变化的相对贡献

气候变化、植被变化及工矿开采变化3类动态因素对SSM时间变化的相对贡献如图5f所示。工矿开采变化是SSM时间演变的首要驱动因素。它相对贡

献率在全省尺度最高(67.53%),在晋北、晋中、晋东南矿区分别为42.14%,33.31%和59.51%,表明工矿开采变化是驱动山西省工矿区SSM年际波动和长期趋势的最主要力量。在晋北和晋中矿区,气候变化的贡献率最高,分别为43.57%和33.44%;而在晋东南矿区,工矿开采变化超过气候变化。

3　讨　论

3.1　SSM空间异质性的驱动机制及其区域差异

本研究揭示,山西省工矿区SSM的空间异质性由自然本底与人为干扰共同塑造,但主导机制呈现显著的区域分异。这种分异的核心在于,不同矿区自然本底的优劣程度与人为干扰的强度导致驱动力主次关系发生转换。具体而言,生态本底越脆弱、水热条件越匮乏的区域,其SSM格局对采矿等人类活动的敏感性越高[20-21];而在自然条件较好的区域,SSM则更多地受水热条件以及植被等生态系统自身调节能力支配[22]。

从区域对比来看,在生态脆弱、采矿强烈的晋北矿区,工矿开采活动是q值最高的因子,采矿活动通过破坏地表结构和土壤剖面,直接影响水分入渗与保持,其效应与脆弱的自然本底深度耦合,放大了土壤水分的空间变异性[23]。而在自然条件相对均衡的晋中矿区,SSM格局更多地体现了地形与气候等自然地理条件的决定性控制作用,人为干扰的直接解释力相对较弱。对于水热条件最优的晋东南矿区,则呈现出以气候因子为主导的驱动特征,这得益于其相对优越的生态本底[10]。然而,即使在该区域,工矿开采本身及其与因子的交互作用仍可以影响SSM,表明人类活动可通过改变植被覆盖与土壤理化性质,干扰生态系统原有的水文调节功能[24]。

本研究进一步证实,任意驱动因子间的交互作用均表现为非线性增强[25],这凸显了SSM空间格局是多过程耦合的复杂产物。关键的是,这种交互具有区域特异性:在晋北表现为地形与开采强度的深度耦合,在晋中、晋东南是气温与降水的协同控制。这与山西省煤田生态系统服务受自然和人为因子共同驱动的研究发现一致[26]。这表明人为干扰可能并非独立作用于SSM,而是嵌入并改变着原有的自然水文关系网络,其最终效应取决于当地特定的自然与人为条件组合。

3.2　表层土壤湿度时间动态过程识别与区域响应

从时间维度分析,山西省工矿区SSM的年际变化,呈现出一个气候变化为主导、人类活动为区域调节因子的动态框架。尽管时间驱动因素的相对贡献指出工矿开采变化在整体贡献率上最为突出,但结合因子解释力与交互作用的结果可知,其影响具有鲜明的区域异质性与作用路径差异,并非单一线性主导。这一发现既突出气候强迫的主导性[27],又阐明了在不同自然本底条件下,人类活动如何差异化地影响着SSM对气候波动的响应,导致了各矿区独特的演变路径。

空间异质性以气候为首要驱动,但在时间变化维度上工矿开采变化的贡献最为显著,尤其在晋北与晋东南矿区。这是由于空间格局更多反映长期自然本底与人类干扰累积形成的稳态特征,而年际变化则对短期内人类活动的动态改变更为敏感[19]。晋北矿区开采强度大,生态脆弱,MI_sen的高解释力说明其年际SSM波动强烈可能受到采矿活动节奏与强度的直接调控;晋东南矿区尽管气候贡献依然重要,但MI_sen通过交互作用强化了对SSM趋势的影响,揭示出在较好自然条件下,人类活动仍可能通过改变植被与地表属性间接调节水分动态。

从区域对比来看,在生态脆弱的晋北矿区,高强度的工矿开采活动是SSM年际波动的核心驱动因素。开采活动通过直接破坏地表,剧烈改变下垫面水文属性,其影响强度足以在年际尺度上显著放大或抵消气候信号的效应,尤其是在与太阳辐射变化耦合时,可能加剧地表干燥化进程[23,28]。在晋中矿区,植被覆盖以及气候的自然年际波动则更为重要,表明该区域SSM动态可能更多地遵循着气候影响植被生长,植被生长又反过来调节土壤水分的自然反馈过程。在晋东南矿区,工矿开采因素绝对主导,这表明了在生态条件较好的区域,人类活动可以直接控制水流路径与能量分配以及间接改变生态系统结构与功能[29-30],这可能影响到原有的水文特性。

3.3　研究启示与展望

为评估遥感SSM产品在矿区的适用性,本研究采用2024年8—9月3个典型矿区的实测数据进行了地面验证(表2)。总体而言,遥感产品与实测值具有较好的一致性(R^2=0.28,RMSE=0.052),与该产品官方全国验证结果(RMSD≈0.054)相当,表明产品在矿区总体可靠,3个典型矿区实测值排序与本研究采用遥感SSM产品得到的长期南高北低格局结果基本吻合。

基于上述分析,本研究对矿区生态修复与水资源管理得出以下几点启示。首先,SSM空间异质性的驱动机制存在显著区域分异,这意味着生态修复策略也应该因地制宜。在人为干扰强烈,生态脆弱的晋北地区,SSM的改善不仅依赖于植被重建,更需

与矿区的微地形重塑、土壤结构改良等工程措施协同,以克服脆弱本底的限制。其次,工矿开采和气候变化都是SSM时间动态的重要驱动力,这要求长期的矿区生态规划必须纳入这两者的适应性考量。最后,人类活动在空间和时间维度上均呈显著影响,且多与其他因子的交互作用产生非线性效应。这也提醒矿区在生态监测与管控时要考虑人为活动带来的负面水文效应。

表2 典型矿区SSM验证指标

Table 2 Validation indicators of SSM in typical mining areas

典型矿区	样本数	实测均值	遥感均值	R^2	RMSE	Bias
晋北-朔州平朔	51	0.133	0.144	0.26	0.036	+0.011
晋中-太原西山	90	0.102	0.155	0.25	0.063	+0.053
晋东南-长治沁源	54	0.194	0.214	0.30	0.041	+0.020
总 体	195	0.136	0.168	0.28	0.052	+0.032

尽管如此,本研究仍存在若干局限性。一方面,受数据可获性限制,部分关键过程参数(如采矿引发的地下水文变化,复垦中的精准灌溉等)未能充分表征,可能影响对局部极端水分状况机理的完整解释;另一方面,所采用的遥感数据本身存在一定局限性与不对称性,导致基于1 km网格的分析虽能揭示区域格局,但难以捕捉工矿区内部开采、排土与复垦等地块尺度的高空间异质性,可能导致对人为活动影响的评估存在平滑或偏差;此外,本研究结论植根于山西省特定气候与黄土基质背景,其在其他矿种类型或不同气候带工矿区的普适性有待通过多案例对比研究进一步验证。

针对上述局限,未来研究应首先结合当地实际情况,依据晋北、晋中、晋东南不同分区的气候条件和主导采矿方式,布设地面监测点,通过长期定点观测数据对遥感反演结果进行校正与验证,从而更精准地揭示不同开采扰动下土壤水分的演变机理,提升研究成果在当地的实用价值。在此基础上,进一步融合无人机遥感、近地传感网络与过程模型,发展多尺度一体化监测与模拟体系,并加强多区域、多矿种的对比与模型耦合研究,以深化理论认识,支撑更广泛的矿区生态治理实践。

4 结 论

(1)山西省工矿区SSM时空格局呈现显著的区域分异。时间上,存在夏秋高、冬春低的季节性周期,但长期趋势不显著;空间上,SSM南高北低,从变化趋势来看,3大矿区差异显著:晋北矿区为连片显著下降,晋中矿区北部显著上升而南部显著下降,晋东南矿区总体呈上升趋势,仅零星区域出现下降。

(2)SSM空间异质性的驱动机制存在明显区域差异,由自然本底与人为干扰强度共同决定。在生态脆弱、采矿强烈的晋北矿区,工矿开采与地形共同主导格局;在晋中矿区,降水与风速等气候因子起控制作用;在晋东南矿区,则以气温和降水因子驱动。各驱动因子间普遍存在非线性增强的交互作用。

(3)工矿开采变化是SSM时间动态的首要驱动力,气候与植被变化则发挥协同调节作用。晋北和晋东南矿区受工矿开采活动变化的显著调节;晋中矿区则更多受植被覆盖变化的影响。多因子趋势间的交互作用进一步强化了这一驱动过程。

参考文献(References)

[1] Zhu Ziyang, Feng Meiqing, Cornelis W, et al. Global soil moisture dynamics since 1980: Datasets biases, trends, and science-informed selection [J]. Science Bulletin, 2025,70(24):4253-4262.

[2] 董颖.覆盖煤矸石对矿区土壤水分-养分-盐分特征的影响[D].北京:北京林业大学,2020.
Dong Ying. Effects of coal gangue mulching on soil moisture-nutrient-salinity characteristics in mining areas [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020.

[3] Ross M R V, Nippgen F, McGlynn B L, et al. Mountaintop mining legacies constrain ecological, hydrological and biogeochemical recovery trajectories [J]. Environmental Research Letters, 2021,16(7):075004.

[4] 侯莉琴,张锦.基于TVDI的沁水煤田地表土壤水分时空演变分析[J].水土保持研究,2017,24(3):177-182.
Hou Liqin, Zhang Jin. Spatiotemporal variation of surface soil moisture based on temperature vegetation dryness index(TVDI) in Qinshui coalfield [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017,24(3):177-182.

[5] 刘立文,段永红,赵涛.山西省土壤湿度时空分布及与气候因素的耦合[J].科学技术与工程,2020,20(11):4250-4255.
Liu Liwen, Duan Yonghong, Zhao Tao. Spatio-temporal distribution of soil humidity and the coupling to climate factors in Shanxi, China [J]. Science Technology and Engineering, 2020,20(11):4250-4255.

[6] 温欣,尚海丽,黄显武,等.不同沉陷应力区土壤水分和溶质运移的模拟试验[J].干旱区地理,2023,46(9):1481-1492.
Wen Xin, Shang Haili, Huang Xianwu, et al. Simulation experiment on soil moisture and solute transport in different subsidence stress regions [J]. Arid Land Geography, 2023,46(9):1481-1492.

[7] Yang Yina, Mei Aoshuang, Gao Shuai, et al. Both natural and anthropogenic factors control surface water and groundwater chemistry and quality in the Ningtiaota coalfield of Ordos basin, northwestern China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30(25): 67227-67249.

[8] 张凯,李晓楠,暴凯凯,等.西北干旱露天煤矿排土场土壤重构与水盐运移机制[J].煤炭学报,2024,49(3):1556-1569.
Zhang Kai, Li Xiaonan, Bao Kaikai, et al. Soil reconstruction and water-salt transport mechanism of waste dump in arid open-pit coal mine in northwest China [J]. Journal of China Coal Society, 2024,49(3):1556-1569.

[9] 王美君.基于多源数据的中国西北干旱区土壤湿度时空变化特征[D].新疆 乌鲁木齐:新疆大学,2023.
Wang Meijun. Temporal and spatial variation characteristics of soil moisture in the arid area of northwest China based on multisource datasets [D]. Urumqi, Xinjiang: Xinjiang University, 2023.

[10] 邵嘉豪,李晶,闫星光,等.基于地理探测器的山西省2000—2020年NPP时空变化特征及驱动力分析[J].环境科学,2023,44(1):312-322.
Shao Jiahao, Li Jing, Yan Xingguang, et al. Analysis of spatiotemporal variation characteristics and driving forces of NPP in Shanxi Province from 2000 to 2020 based on geodetector [J]. Environmental Science, 2023,44(1):312-322.

[11] 杨霞.山西省年降水量规律初探[J].水资源与水工程学报,2007,18(6):84-87.
Yang Xia. Preliminary analysis for the regularity of annual precipitation in Shanxi Province [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2007,18(6): 84-87.

[12] 李强.山西省不同区域气候调研与分析[J].科技与创新,2017(16):136-137.
Li Qiang. Climate investigation and analysis in different regions of Shanxi Province [J]. Science and Technology & Innovation, 2017(16):136-137.

[13] Kasim A A, Leng Pei, Li Yuxuan, et al. Remote sensing of root zone soil moisture: A review of methods and products [J]. Journal of Hydrology, 2025,656:133002.

[14] Zhao Dayang, Zhang Zhaoying, Zhang Yongguang. Soil moisture dominates the forest productivity decline during the 2022 China compound drought-heatwave event [J]. Geophysical Research Letters, 2023, 50(17):e2023GL104539.

[15] Zheng Chaolei, Jia Li, Zhao Tianjie. A 21-year dataset (2000—2020) of gap-free global daily surface soil moisture at 1 km grid resolution [J]. Scientific Data, 2023, 10:139.

[16] 秦志琴,倪云松,姜晓丽,等.资源型地区工矿企业空间集聚与区域转型:以山西省为例[J].自然资源学报,2021,36(4):948-964.
Qin Zhiqin, Ni Yunsong, Jiang Xiaoli, et al. Agglomeration and regional transformation of coal mining enterprises: A case study of Shanxi Province [J]. Journal of Natural Resources, 2021,36(4):948-964.

[17] 张松林,张昆.全局空间自相关Moran指数和G系数对比研究[J].中山大学学报(自然科学版),2007,46(4):93-97.
Zhang Songlin, Zhang Kun. Comparison between general moran's index and getis-ord general G of spatial autocorrelation [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2007,46(4):93-97.

[18] 章维鑫,曹建华,吴秀芹.基于Landsat影像的石漠化区植被动态监测及治理效益研究[J].农业工程学报,2019,35(8):221-229.
Zhang Weixin, Cao Jianhua, Wu Xiuqin. Dynamic monitoring and control benefits of vegetation in rocky desertification areas based on Landsat images [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019,35(8):221-229.

[19] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017,72(1):116-134.
Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: Principle and prospective [J]. Acta Geographica Sinica, 2017,72(1):116-134.

[20] Zhang Kai, Chen Mengyuan, Feng Shaokai, et al. Effects of coal mining disturbance on spatial and temporal distribution of soil water content in northwest China-based on 3D EBK model [J]. Hydrological Processes, 2024,38(9):e15277.

[21] 程林森,雷少刚,卞正富.半干旱区煤炭开采对土壤含水量的影响[J].生态与农村环境学报,2016,32(2):219-223.
Cheng Linsen, Lei Shaogang, Bian Zhengfu. Effect of coal mining on soil moisture content in semi-arid areas [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2016, 32(2):219-223.

[22] 王甜,康峰峰,韩海荣,等.山西太岳山小流域土壤水分空间异质性及其影响因子[J].生态学报,2017,37(11):3902-3911.
Wang Tian, Kang Fengfeng, Han Hairong, et al. Factors influencing spatial heterogeneity of soil moisture

content in a small catchment of Mount Taiyue, Shanxi Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(11): 3902-3911.

[23] Wang Pingshun, Dong Shaogang, Zang Xuchao, et al. Effects of groundwater level changes on soil characteristics and vegetation response in arid and semiarid coal mining areas [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2024,46(11):441.

[24] Wang Yunqiang, Hu Wei, Sun Hui, et al. Soil moisture decline in China's monsoon loess critical zone: More a result of land-use conversion than climate change [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2024, 121(15):e2322127121.

[25] 谢苗苗,刘金莹,陈彬,等.生态脆弱区复垦排土场干扰类型划分及影响因素分析[J].煤炭科学技术,2022,50(2):280-288.
Xie Miaomiao, Liu Jinying, Chen Bin, et al. Classification of disturbance types and influencing factors of reclamation dump in ecological fragile area [J]. Coal Science and Technology, 2022,50(2):280-288.

[26] 潘换换,吴树荣,姬倩倩,等.山西煤田生态系统服务时空格局及驱动力[J].应用生态学报,2021,32(11):3923-3932.
Pan Huanhuan, Wu Shurong, Ji Qianqian, et al. Spatio-temporal pattern and driving forces of ecosystem services in coalfields of Shanxi Province, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(11): 3923-3932.

[27] Wang Zongxia, Liu Suxia. Spatiotemporal variability of climate: A key driver shaping spatial pattern and dominating temporal evolution of root zone soil moisture in China [J]. Journal of Hydrology, 2025,663:134147.

[28] 于昊辰,陈浮,尹登玉,等.采矿与气候变化对戈壁矿区土地生态系统的影响:以准东煤炭基地为例[J].煤炭学报,2021,46(8):2650-2663.
Yu Haochen, Chen Fu, Yin Dengyu, et al. Effects of mining activities and climate change on land ecosystem in Gobi mining area: A case study of Zhundong coal base [J]. Journal of China Coal Society, 2021,46(8): 2650-2663.

[29] Wang Shuai, Song Shuang, Zhang Haoyu, et al. Anthropogenic impacts on the Yellow River basin [J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2025, 6(10): 656-671.

[30] Yang Fan, Deng Wei, Zhang Hao, et al. Natural-human interactions impact wetland pattern evolution in different environment conditions in arid regions [J]. Journal of Environmental Management, 2025, 392: 126901.

(上接第65页)

[25] 李增沛,张伟.戈壁荒漠砾幕层破坏的生态恢复措施[J].绿色科技,2016,18(2): 11-12.
Li Zengpei, Zhang Wei. Ecological restoration measures for the destruction of the gravel layer in the Gobi desert [J]. Journal of Green Science and Technology, 2016,18(2):11-12.

[26] 李敬文,管伟明,胡振琪,等.新疆准东荒漠矿区砾幕层抗风蚀能力研究[J].煤炭学报,2025,50(6):3058-3071.
Li Jingwen, Guan Weiming, Hu Zhenqi, et al. Study on wind erosion resistance of gravel curtain layer in desert mining areas of the eastern Junggar basin, Xinjiang [J]. Journal of China Coal Society, 2025,50(6): 3058-3071.

[27] 薛娴,张伟民,王涛.戈壁砾石防护效应的风洞实验与野外观测结果:以敦煌莫高窟顶戈壁的风蚀防护为例[J].地理学报,2000,55(3):375-383.
Xue Xian, Zhang Weimin, Wang Tao. Wind tunnel experiments on the effects of gravel protection and problems of field surveys [J]. Acta Geographica Sinica, 2000,55(3):375-383.

[28] 樊瑞静,李生宇,周杰,等.不同外形粗糙元覆盖沙床面抗风蚀效益的风洞模拟实验[J].地球科学进展,2017,32(1):83-89.
Fan Ruijing, Li Shengyu, Zhou Jie, et al. Wind tunnel experiment of anti-erosion efficiency on the sand beds coverd by different shapes of roughness-elementes [J]. Advances in Earth Science,2017,32(1):83-89.