

榆神府典型煤矿区土壤粒径和可蚀性的分布特征及其影响因素

李晗¹, 毕银丽^{1,2}

[1. 西安科技大学 西部矿山生态环境修复研究院, 陕西 西安 710054;

2. 中国矿业大学(北京) 煤炭精细勘探与智能开发全国重点实验室, 北京 100083]

摘要: [目的] 分析榆神府煤矿区土壤粒径与可蚀性(K)的空间分异规律及其驱动机制, 为矿区差异化生态修复提供理论依据。[方法] 以榆神府南北梯度上的7个典型煤矿区及红碱淖自然保护对照区为对象, 整合0—200 cm土壤剖面实测数据与遥感数据, 系统解析分形维数和 K 值的空间分布规律及其影响因素。[结果] ①土壤粒径及 K 值呈“南部小于北部”“风沙草滩小于黄土丘陵”的分布特征, 南部风积沙地貌砂粒所占比例超85%, 分形维数低至2.18~2.22, K 值最低为0.25~0.28; 中北部黄土丘陵区黏粒与粉粒比例增加, 分形维数升至2.32~2.35, K 值增高至0.26~0.32; ②侵蚀动力呈现差异化驱动, 风蚀模数与土壤分形维数呈显著负相关关系($p < 0.05$), 风蚀通过优先迁移细颗粒导致土壤粗化, 降低可蚀性; 水蚀模数与粉粒、砂粒、总磷和总钾含量呈显著正相关关系($p < 0.05$), 其高值区多分布于黄绵土带, 体现了水蚀对细颗粒与养分的协同迁移作用; ③环境因子调控遵循母质主导序列, 成土母质解释量比例45.9%, 其次为含水率(12%)、植被盖度(2.1%)与坡度因子(1.8%), 煤矿开采扰动在矿区尺度上对粒径和 K 值的影响未达到显著水平, 其效应被地表风沙土的自修复能力与“边采边复”策略有效缓冲。[结论] 榆神府矿区土壤粒径与可蚀性空间分异主要受成土母质与侵蚀动力耦合控制, 采矿扰动的影响在宏观尺度上被自然与人工修复机制削弱。基于此, 建议南部风蚀主导区以固沙为重点的治理策略, 中北部水蚀风蚀交错区则重点强化植被恢复与地表覆盖。

关键词: 榆神府煤矿区; 土壤粒径分布; 分形维数; 可蚀性

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2026)01-0250-10

中图分类号: S157.1

文献参数: 李晗, 毕银丽. 榆神府典型煤矿区土壤粒径和可蚀性的分布特征及其影响因素[J]. 水土保持通报, 2026, 46(1): 250-259. Li Han, Bi Yinli. Distribution characteristics and influencing factors of soil particle size and erodibility in typical coal mining areas of Yuli-Shenmu-Fugu region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026, 46(1): 250-259.

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2026.01.023

CSTR: 32312.14.stbctb.2026.01.023

Distribution characteristics and influencing factors of soil particle size and erodibility in typical coal mining areas of Yuli-Shenmu-Fugu region

Li Han¹, Bi Yinli^{1,2}

[1. Institute of Ecological Environment Restoration in Mine Areas of West China,

Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 2. State Key Laboratory for Fine Exploration and Intelligent Development of Coal Resources, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China]

Abstract: [Objective] The spatial heterogeneity patterns of soil particle size and erodibility (K) in the Yuli-Shenmu-Fugu region (Yushenfu) coal mining areas and their driving mechanisms were analyzed, in order to provide a theoretical basis for differentiated ecological restoration in mining areas. [Methods] Seven typical coal mining areas along a north-south gradient in the Yushenfu coal mining area, along with the Hongjiannao Nature Reserve as a control area, were selected. By integrating measured data from 0—200 cm soil profiles and remote sensing data, this study systematically analyzed the spatial distribution patterns of fractal dimension and K value,

收稿日期: 2025-05-08

修回日期: 2025-10-14

采用日期: 2025-10-20

资助项目: 国家自然科学基金重大项目“煤炭井工开采生态环境修复机理与方法”(52394194); 国家重点研发计划项目“西部干旱区煤能源基地区域生态保护与资源综合利用技术”(2022YFF1303303)

第一作者: 李晗(1999—), 男(汉族), 陕西省商洛市人, 博士研究生, 研究方向为矿区生态环境修复。Email: 89017015@qq.com。

通信作者: 毕银丽(1971—), 女(汉族), 陕西省米脂县人, 博士, 教授, 主要从事矿区微生物复垦的研究工作。Email: ylibi88@126.com。

as well as their influencing factors. [Results] ① Soil particle size and K value showed a distribution pattern of 'southern part < northern part' and 'sandy grassland < loess hilly region'. In the southern aeolian sand region, the proportion of sand particles exceeded 85%, the fractal dimension was as low as 2.18—2.22, and the K value was lowest at 0.25—0.28. In the central and northern loess hilly regions, the proportions of clay and silt particles increased, the fractal dimension rose to 2.32—2.35, and the K value increased to 0.26—0.32. ② Erosion dynamics showed differentiated driving effects: the wind erosion modulus was significantly negatively correlated with the soil fractal dimension ($p < 0.05$), as wind erosion preferentially transported fine particles, leading to soil coarsening and reduced erodibility. The water erosion modulus showed a significant positive correlation with the contents of silt, sand, total phosphorus, and total potassium ($p < 0.05$), with its high-value areas mostly distributed in the loessal soil zone, indicating the synergistic transport of fine particles and nutrients by water erosion. ③ The regulation of environmental factors followed a parent material-dominated sequence, with parent material accounting for 45.9% of the explanatory contribution, followed by moisture content (12%), vegetation cover (2.1%), and slope factor (1.8%). The impact of coal mining disturbance on particle size and K value at the regional scale did not reach significant levels, as its effects were effectively buffered by the self-repair capacity of surface sandy soil and the 'simultaneous mining and restoration' strategy. [Conclusion] The spatial heterogeneity of soil particle size and erodibility in the Yushenfu coal mining areas is primarily controlled by the coupling effect of parent material and erosion dynamics. The impact of mining disturbance is mitigated at the macro-scale by natural and artificial restoration mechanisms. Based on this, it is recommended that the wind erosion-dominated southern area should adopt sand fixation-focused management strategies, while the central and northern area with mixed water and wind erosion should prioritize vegetation restoration and surface cover.

Keywords: Yushenfu coal mining area; soil particle size distribution; fractal dimension; erodibility

榆神府煤矿区是中国重要的煤炭生产基地,也是风蚀水蚀交错的生态脆弱区。高强度井工开采引发的地表塌陷与地裂缝,不仅直接加剧土壤侵蚀程度,还通过重塑地表微地形和破坏土壤结构,显著改变了风蚀与水蚀的交互作用^[1]。研究表明,风蚀主导区通过分选效应优先剥离粉砂、黏粒等细颗粒,导致土壤粗化与养分流失^[2];而水蚀主导区则因径流冲刷的动能差异,选择性迁移中细砂粒,同时引发黏粒垂向淋失^[3]。这种风蚀和水蚀并存的复合侵蚀作用,导致土壤颗粒组成失衡和养分流失,严重制约矿区生态恢复成效。

土壤粒径分布(PSD)是控制可蚀性 K 值的核心物理属性,通过调控孔隙结构、渗透率与胶体活性,直接决定土壤的水力特性与抗侵蚀潜力^[4]。分形理论是定量描述PSD分布的有效途径,可以反映局部的异质性和不均匀性^[5]。杨培玲等^[6-7]优化的单重分形模型在黄土及沙地研究中广泛应用。土壤可蚀性 K 值的计算方法多样,如Shirazi公式、诺谟图法及其修正方程等^[8]。鉴于EPIC模型在风沙土、黄土等区域研究中应用广泛且结果可比性良好^[9],本研究选用基于土壤有机碳和颗粒组成参数的EPIC模型进行 K 值计算。PSD和 K 值的空间分布特征是土壤在自然界中长期演变的结果,受多种环境因子的影响,如成土母质、气候、生物活动、地形和人类活动等^[10],但在

风蚀水蚀交错作用下,两者的空间分布规律及驱动机制仍需深入解析。

尽管学者们已在榆神府矿区开展了土壤侵蚀监测与水土流失评估^[11-12],但现有研究存在一些不足。① K 值的量化多依赖遥感数据,缺乏基于矿区土壤实测属性的验证^[13];②当前研究多为单一环境因子(如植被种类^[14]、地形等^[15])对PSD和 K 值的影响,多因子共同作用下矿区尺度上的空间分布规律尚未明确。③大规模煤炭开采通过改变地表形态、破坏植被、松动土体等方式,可能深刻改变原有的侵蚀格局与土壤特性^[16]。鉴于此,本研究以榆神府7个典型煤矿区及红碱淖保护区为对象,系统分析0—200 cm土层粒径与 K 值的空间分布规律,结合风蚀水蚀强度数据,通过曼特尔分析、约束排序等方法揭示地貌类型、植被覆盖和开采扰动等自然与人为环境因子对土壤PSD和 K 值的调控机制,以期为矿区土壤改良与生态韧性提升提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况及样品采集

榆神府煤矿区地处陕北黄土高原丘陵沟壑区与毛乌素沙地的过渡地带,为温带干旱—半干旱大陆型季风气候;地貌类型主要为风沙地貌,兼有覆沙梁地及黄土丘陵地貌,地势西北高东南低,高程

在 1 200 m(图 1);多年平均降水量 381.2 mm,降雨主要集中在 7—9 月,多雷阵雨,伴有大风和冰雹,多年平均蒸发量 1 712 mm。

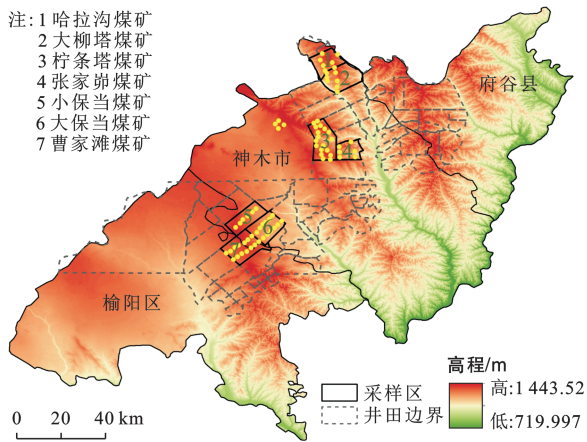


图 1 榆神府矿区地形及煤矿分布

Fig.1 Topography and coal mine distribution of Shenmu-Yulin-Fugu mining area

土壤样品采集于 2022 年 5—6 月,本研究从榆神府煤矿区选取了 8 个典型采样区,南起曹家滩煤矿区,北至哈拉沟煤矿区,南北跨度约 90 km,呈条带状纵向分布。每个采样区依据面积设置采样点个数,累计 74 个采样点,样点间距约 2 km。采样点布设充分考虑土壤类型、植被与地貌的空间分异,以增强区域代表性:南部采样区(曹家滩、大保当和小保当煤矿区,共 32 个样点)以风沙土为主,地表景观多为固定一半固定沙丘,植被以沙柳(*Salix psammophila*)、沙蒿(*Artemisia sphaerocephala*)等沙生植物占优势,土壤贫瘠,含水量低,受风蚀活动影响显著;中部采样区(柠条塔和张家崕煤矿区,共 24 个样点)处于风沙土—黄绵土过渡带,地貌多为黄土丘陵与沙丘交错,植被类型兼具沙生与黄土丘陵常见物种,土壤性质空间变异性大;北部采样区(大柳塔和哈拉沟煤矿区,共 14 个样点)主要为黄土或覆沙黄土,属典型黄土丘陵地貌,植被中常见柠条(*Caragana korshinskii*)、沙地柏(*Sabina vulgaris*)等,水土流失敏感性较高。同时,选取红碱淖自然保护区(4 个样点)作为未受采矿扰动的对照区。采样时详细记录各采样点的坐标、高程、植被类型、地形地貌特征及水文信息。鉴于研究区具有深厚的黄土沉积及下伏风成沙沉积背景,需获取深层土壤母质信息以区分表层侵蚀过程与深层母质继承性的影响,本研究采用手动原状取土钻采集 200 cm 深度的土壤剖面样品。采样按 20 cm 间隔分层进行,共采集 10 层。每层采集的土样经充分混合均匀后,采用四分法分装于样品袋中并编号保存。

1.2 测定项目与方法

土样粒径采用 MasterSizer 3000 型土壤粒度分析仪(Malvern, Inc., Malvern, UK)测定。测试前将土壤样品自然风干后挑出动植物残体和砾石等杂质,过 2 mm 筛,使用 10% H_2O_2 溶液除去有机质,10% HCl 除去碳酸盐,然后用去离子水浸泡,静置 24 h,抽去上层清液后加入 10 ml 浓度为 0.05 mol/L 的六偏磷酸钠分散剂。粒度分析的粒径范围为 0.01~2 000 μm ,每个样品重复测定 3 次,取平均值,单位以体积百分比表示,重复性误差 $\leq \pm 0.5\%$,准确性误差 $\leq \pm 1\%$ 。按照美国农业部(USDA)制土壤质地分级标准将土壤质地划分为砂粒(50~2 000 μm)、粉粒(2~50 μm)和黏粒($< 2 \mu m$)3 级。土壤有机碳 SOM 采用重铬酸钾外加热法测定后换算得到;全 N 含量采用凯式定氮仪(Foss Kjeltec 2200, ThermoFisher Scientific, US)测定;土壤全 P、全 K 分别使用 $HClO_4-H_2SO_4$ 、 $HF-H_2SO_4$ 消煮,电感耦合等离子体原子发射光谱仪(OPTIMA8 000, Perkin Elmer, US)测定,土壤含水率采用烘干法测定。

1.3 粒度参数与可蚀性计算

首先将粒径测量结果根据克鲁宾的算法进行对数转化:

$$\Phi = -\log_2 D \quad (1)$$

式中: D 为各土壤粒度累积体积分数对应的颗粒直径。

土壤粒度参数(平均粒径、分选系数、偏度和峰态)通过福克—沃德公式计算,计算公式为

平均粒径:

$$M_z = \frac{\Phi_{16} + \Phi_{50} + \Phi_{84}}{3} \quad (2)$$

分选系数:

$$\delta = \frac{\Phi_{84} - \Phi_{16}}{4} + \frac{\Phi_{95} - \Phi_5}{6.6} \quad (3)$$

式中: M_z 代表粒度分布的集中趋势, M_z 越大则细颗粒组分越多; δ 为分选系数,表示土壤颗粒分布的离散程度, $\delta < 0.35$,分选性极好; $0.35 < \delta \leq 0.50$,分选性好; $0.50 < \delta \leq 0.71$,分选性较好; $0.71 < \delta \leq 1.00$,分选性中等; $1.00 < \delta \leq 2.00$,分选性较差; $2.00 < \delta \leq 4.00$,分选性差; $\delta > 4.00$,分选性极差。

偏度计算公式如下:

$$SK = \frac{\Phi_{16} + \Phi_{84} - 2\Phi_{50}}{2(\Phi_{84} - \Phi_{16})} + \frac{\Phi_5 + \Phi_{95} - 2\Phi_{50}}{2(\Phi_{95} - \Phi_5)} \quad (4)$$

峰态计算公式如下:

$$K_G = \frac{\Phi_{95} - \Phi_5}{2.44(\Phi_{75} - \Phi_{25})} \quad (5)$$

式中:SK为偏度,反映土壤粒度分布的对称性, $-1.0 \leq SK < -0.3$, 极负偏; $-0.3 \leq SK < -0.1$, 负偏; $-0.1 \leq SK < 0.1$, 近于对称; $0.1 \leq SK < 0.3$, 正偏; $0.3 \leq SK < 1.0$; 极正偏。 K_G 为峰态是土壤粒度分布在平均粒度两侧集中程度的参数,代表不同来源物质的混合程度, $K_G \leq 0.67$, 很宽平; $0.67 < K_G \leq 0.9$, 宽平; $0.9 < K_G \leq 1.11$, 中等; $1.11 < K_G \leq 1.56$, 尖窄; $1.56 < K_G \leq 3.00$, 很尖窄; $K_G > 3.00$, 极尖窄。

土壤体积分形维数计算公式为^[17]

$$K_{\text{EPIC}} = \left\{ 0.2 + 0.3e^{\left[-0.0256S_n \left(1 - \frac{S_i}{100} \right) \right]} \right\} \left(\frac{S_i}{C_1 + S_i} \right)^{0.3} \times \left[1 - \frac{0.25C}{C + e^{3.72 - 2.95C}} \right] \times \left[1 - \frac{0.71S_n}{S_n + e^{-5.51 + 22.9S_n}} \right] \quad (7)$$

式中: $S_n = 1 - S_a/100$; S_a , S_i , C_1 , C 分别为土壤砂粒、粉粒、黏粒和有机碳含量(%)。

1.4 遥感数据来源与统计分析

研究区内高程、水系分布及风蚀/水蚀图件绘制数据源于国家冰川冻土沙漠科学数据中心和中国科学院地理科学与资源研究所资源环境科学数据平台。其中,风蚀与水蚀模数引自数据集《中国土壤水蚀和风蚀模数数据》。该数据集提供2015年度风蚀和水蚀模数 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 栅格数据。风蚀模数通过修正风蚀方程(RWEQ)计算,综合考虑气候、植被覆盖、地表粗糙度、土壤可蚀性及结皮因素;水蚀模数则基于修正的通用水土流失方程(RUSLE)计算单位面积土壤流失量。

试验数据使用Microsoft Excel 2021进行整理和统计,运用Origin 2021进行图表制作,采用IBM SPSS Statistics 22.0软件进行差异显著性检验;使用R(4.4.3)软件中的vegan包进行曼特尔检验,分析侵蚀模数与土壤理化性质间的相关性,显著性阈值设定为 $p=0.05$;应用Canoco 5.0软件对土壤粒度参数因子进行去趋势对应分析(DCA)和冗余分析(RDA),将环境因子中的定性指标通过编码形式转换为定量指标后进行冗余分析,成土母质母质按照风沙土、黄绵土分别编码为0和1,植被类型按照草本、灌木和乔木分别编码为1,2和3,矿区和非矿区分别编码为0和1,土地利用类型按照耕地、林地、草地和未利用土地分别编码为1,2,3和4,将所有环境因子标准化处理后进行分析,显著性水平 $p=0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 土壤机械组成及粒度参数特征

如表1所示,各煤矿区0—200 cm的土壤机械组成均以砂粒为主,总体上黏粒、粉粒和砂粒体积百分含量的变异系数分别为103.61%, 80.06%和

$$\frac{V(r < R_i)}{V_T} = \left(\frac{R_i}{R_{\max}} \right)^{3-D} \quad (6)$$

式中: D 为土壤粒径分形维数; r 为土壤粒径(mm); R_i 为粒径等级*i*的土壤粒径(mm); R_{\max} 为土壤粒径的极大值(mm); $V(r < R_i)$ 是粒径小于 R_i 的累积体积(%); V_T 是各粒径等级体积之和(%)。对公式(6)两边取对数,由对数曲线的拟合斜率可计算出分形维数。

土壤可蚀性*K*值采用由Sharply提出基于土壤粒径组成和土壤有机碳的EPIC模型。计算公式为:

17.07%,前者为强变异,后二者为中等程度变异,表明榆神府典型煤矿区的土壤机械组成有较大差异。曹家滩矿区砂粒含量最高,达91.79%,显著高于其他矿区,反映其受强烈风蚀作用导致的细颗粒优先流失。中部张家崙和柠条塔矿区砂粒含量降至77.17%至83.17%,黏粒与粉粒相对比例分别升高,表明该区域受风蚀与水蚀共同影响,沉积环境更为复杂。北部大柳塔和哈拉沟矿区砂粒比例为82.83%~86.25%,分选系数高达1.46~1.53,指示风蚀和水蚀复合作用下的沉积物混合特征。

粒度参数显示,张家崙、柠条塔与大柳塔矿区平均粒径最大,为3.08~3.14 Φ ,对应较低的砂粒含量,可能受黄土母质影响;曹家滩和小保当平均粒径较小,仅2.25~2.48 Φ ,符合风积沙地貌特征。偏度普遍呈正偏态,哈拉沟矿区偏度最高,达0.38,表明细颗粒局部富集,可能与植被拦截细粒有关。分形维数介于2.18~2.35,黏粒含量较高的张家崙、柠条塔等矿区分形维数较高,达2.32~2.35,而砂粒主导的曹家滩和小保当最低,仅为2.18~2.22,验证分形维数对土壤结构复杂性的表征能力。

2.2 土壤养分含量与可蚀性特征

表2显示榆神府各典型煤矿区土壤0—20 cm的养分含量及*K*值存在显著差异。北部哈拉沟和红碱淖矿区有机碳含量较高,其中哈拉沟达5.85%,显著高于南部矿区,可能受益于植被恢复措施;南部曹家滩和大保当矿区有机碳含量较低,仅为1.67%~1.99%,反映风蚀驱动的有机碳流失。总氮含量在哈拉沟最高,为0.44 g/kg,而南部矿区普遍低于0.26 g/kg。总磷和总钾在中部张家崙和柠条塔矿区较高,分别达0.28和4.92 g/kg,可能与黄土母质矿化作用相关。

土壤*K*值范围为0.25~0.34,柠条塔矿区最高,为0.34,显著高于曹家滩煤矿区。砂粒主导的南部矿

区 K 值较低,为 0.25~0.28,可能因砂土渗透性强降低径流冲刷风险;中部矿区 K 值升至 0.32~0.34,可能与黏粒淋失和采矿扰动有关。值得注意的是,有

机碳含量较高的哈拉沟和红碱淖保护区 K 值相对较低,分别为 0.32,0.28,表明有机碳可能通过促进团聚体稳定性增强抗蚀性。

表 1 研究区土壤机械组成及粒度参数

Table 1 Soil mechanical composition and particle size parameters at study area

煤矿区	黏粒/%	粉粒/%	砂粒/%	平均粒径/ Φ	分选系数	偏度	峰态	分形维数
曹家滩	0.65 ^b	7.86 ^b	91.79 ^a	2.48 ^{cd}	0.93 ^e	0.23 ^{cd}	1.30 ^{abc}	2.18 ^b
大保当	1.16 ^a	11.60 ^{ab}	87.60 ^a	2.60 ^{bc}	1.36 ^{bc}	0.32 ^b	1.29 ^{bc}	2.33 ^a
小保当	0.58 ^b	13.67 ^{ab}	85.33 ^a	2.25 ^d	1.10 ^d	0.32 ^b	1.40 ^a	2.22 ^b
张家崓	1.32 ^a	16.00 ^{ab}	83.17 ^a	3.14 ^a	1.37 ^{bc}	0.30 ^{bc}	1.39 ^{ab}	2.35 ^a
柠条塔	1.11 ^a	21.33 ^a	77.17 ^a	3.14 ^a	1.23 ^{cd}	0.26 ^{bcd}	1.33 ^{ab}	2.32 ^a
红碱淖	1.01 ^a	11.50 ^{ab}	87.75 ^a	2.79 ^b	1.32 ^{bc}	0.31 ^b	1.22 ^c	2.30 ^a
大柳塔	1.05 ^a	16.17 ^{ab}	82.83 ^a	3.08 ^a	1.53 ^a	0.30 ^{bc}	1.32 ^{abc}	2.35 ^a
哈拉沟	1.27 ^a	12.75 ^{ab}	86.25 ^a	2.65 ^{bc}	1.46 ^{ab}	0.38 ^a	1.39 ^{ab}	2.33 ^a

注:表中数值为平均值。同一列内数值后不同小写字母表示经单因素方差分析及 Duncan 多重比较检验,不同采样区间在 $p < 0.05$ 水平差异显著。下同。

表 2 研究区土壤养分含量及 K 值

Table 2 Soil nutrient contents and K values at study area

煤矿区	有机碳/ %	总氮/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	总磷/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	总钾/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	K 值
曹家滩	1.99 ^b	0.26 ^{ab}	0.18 ^{ab}	2.32 ^b	0.25 ^b
大保当	1.67 ^b	0.20 ^b	0.19 ^{ab}	2.63 ^{ab}	0.28 ^{ab}
小保当	3.03 ^{ab}	0.28 ^{ab}	0.14 ^b	2.85 ^{ab}	0.28 ^{ab}
张家崓	2.46 ^{ab}	0.30 ^{ab}	0.28 ^a	4.31 ^{ab}	0.32 ^{ab}
柠条塔	2.54 ^{ab}	0.27 ^{ab}	0.21 ^{ab}	4.92 ^a	0.34 ^a
大柳塔	2.83 ^{ab}	0.19 ^b	0.21 ^{ab}	3.16 ^{ab}	0.26 ^{ab}
哈拉沟	5.85 ^a	0.44 ^a	0.26 ^a	4.49 ^{ab}	0.32 ^{ab}
红碱淖	4.60 ^{ab}	0.36 ^{ab}	0.21 ^{ab}	3.24 ^{ab}	0.28 ^{ab}

2.3 土壤粒径与 K 值的空间分布特征

研究结果表明,土壤分形维数值可有效表征土壤机械组成,其空间分布规律可有效表征矿区土壤粒径分布的异质性。研究区内各煤矿表层 0—20 cm 土壤的分形维数值和 K 值分布状况分别如图 2a 和图 2b 所示。为区分风蚀与水蚀的不同影响,图 2a 以风蚀模数为底图,并用红色圆点大小表示分形维数(范围 1.93~2.53),直观展示风蚀作用强区与土壤分形维数的对应关系;图 2b 则以水蚀模数为底图,用橙色圆点大小表示水蚀可蚀性 K 值(范围 0.208~0.484),反映水蚀动力与土壤抗冲性的空间关联。研究区南部的曹家滩、大保当和小保当煤矿区以风积沙地貌为主,风蚀模数明显高于其他地区,地表水系分布稀少,水蚀作用较弱,强烈的风蚀作用导致细颗粒流失和土壤粗化,因此分形维数均值 2.21 与水蚀可蚀性 K 值均值 0.260 均为全区最低。柠条塔和张家崓煤矿区位于研究区中部风积沙地貌与黄土丘

陵地貌过渡带。柠条塔南北翼以窟野河支流考考乌素沟为界呈现截然不同的粒径和 K 值分布特征,南翼 8 个样点受风蚀主导,分形维数均值 2.19 与 K 值均值 0.254 接近南部风沙土;北翼多数采样点位于黄土丘陵区,受季节性河流强烈冲刷影响,尽管黏粒与粉粒比例高、分形维数均值达 2.34,土壤结构较为复杂,但水蚀可蚀性 K 值仍显著升高至 0.380,反映出水蚀扰动对土壤抗冲性的削弱作用。大柳塔和哈拉沟煤矿区位于研究区北部,多为风积沙地貌和覆沙梁地,受中等强度风蚀水蚀叠加影响,分形维数均值 2.29 与 K 值均值 0.286 介于风沙地与黄土丘陵地貌之间,反映覆沙层对侵蚀动力的缓冲作用。从整体上看,研究区内土壤分形维数与 K 值呈现出南部小于北部、风积沙地貌小于黄土丘陵地貌的分布特征,深刻体现出成土母质和主导侵蚀类型对土壤粒径和 K 值的控制。

2.4 土壤侵蚀模数与理化性质的曼特尔分析

曼特尔分析主要用于分析矩阵数据相关性,通过计算距离矩阵间的相关系数并置换检验,判断变量间是否存在定量关联。为揭示风蚀与水蚀过程对土壤颗粒及养分变化的驱动作用,本研究将采样点的风蚀与水蚀模数矩阵分别与土壤理化性质矩阵进行曼特尔分析(图 3),曼特尔分析结果的 R 反映变量关联强度(线条粗细: < 0.1 为细线, $0.1 \sim 0.2$ 为粗线),曼特尔分析的 P 体现关联的统计学显著性。风蚀模数与分形维数呈极显著负相关(粗线, $p < 0.01$),说明风蚀过程对土壤结构具有重要调控作用,其选择性搬运细颗粒的机制直接导致土壤粗化和结构简化。水蚀模数则与粉粒、砂粒含量及总磷流失呈显

著正相关(细线, $p < 0.05$), 表明水蚀作用主导土壤颗粒与养分的协同迁移过程; 其中, 总钾流失与水蚀模

数的关联达到极显著水平($p < 0.01$), 进一步指示水蚀对钾元素淋失的强烈影响。

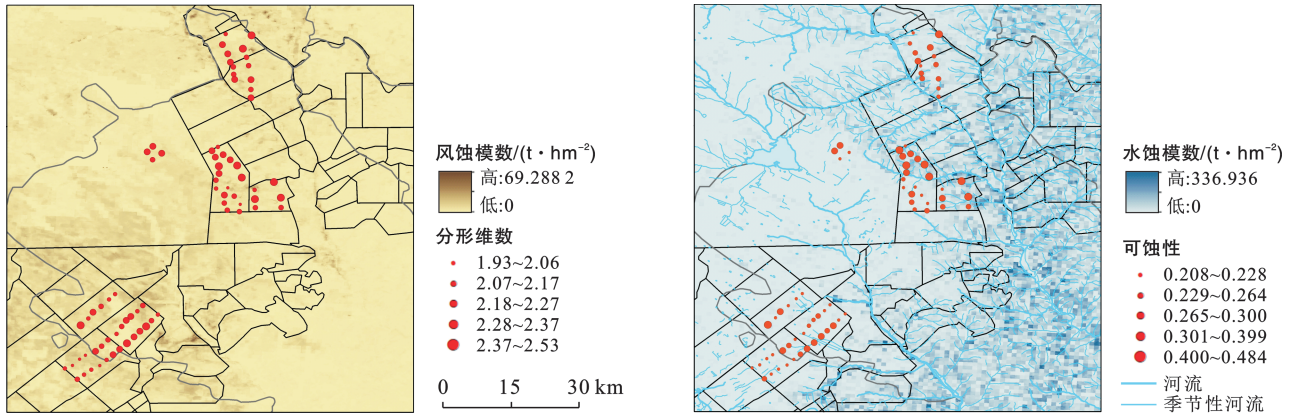
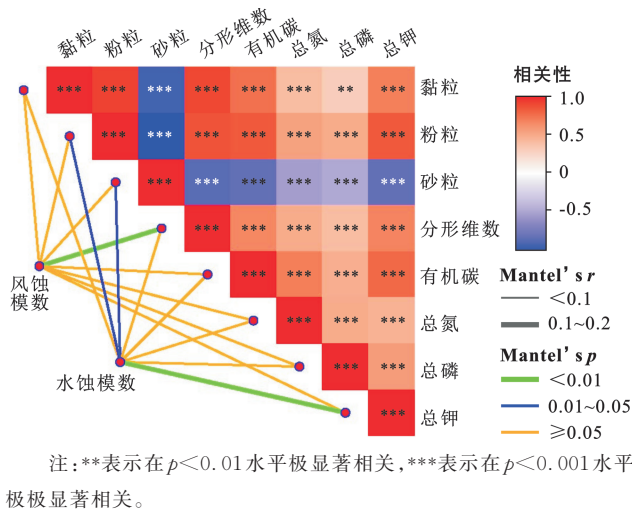


图 2 研究区土壤分形维数和 K 值的分布特征

Fig.2 Distribution characteristics of soil fractal dimension and K value at study area



注: **表示在 $p < 0.01$ 水平极显著相关, ***表示在 $p < 0.001$ 水平极显著相关。

图 3 采样点侵蚀模数和土壤理化性质的曼特分析
Fig.3 Mantel analysis of erosion modulus and soil physicochemical properties at sampling points

2.5 土壤粒径和可蚀性的影响因素分析

本研究区范围气候的变化幅度较小, 主要研究土壤成土母质、植被类型(草、灌、乔)、盖度、高程、坡度、采矿扰动、含水率、土地利用类型(农田、林地、草地、未利用土地)、风蚀和水蚀模数对土壤分形维数和 K 值的影响。SPSS 共线性诊断结果表明以上环境因子无明显共线性, 去趋势对应分析的结果表明典范轴梯度长度的最大值为 $0.7 < 3$, 不适用单峰模型, 所以选用线性模型对土壤各粒级含量、分形维数和 K 值与环境因子数据进行冗余分析, 所有环境因子共同解释土壤粒径分布及 K 值总变异的 69.7%, 前 2 轴对响应变量的累计解释量为 99.75%, 表明前 2 个排序轴所形成的二维线性关系可以充分反映土壤粒径分布与环境因子之间的响应关系。

从土壤各粒级含量、分形维数和 K 值在图 4 中

的分布可以看出, 黏粒、粉粒、分形维数和 K 值分布较为集中, 而砂粒属于不同的象限, 表现出相对的独立性。图 4 中矢量箭头的长度与方向代表该属性与环境因子的典范相关关系。土壤母质对分形维数和 K 值的影响最为显著, 其矢量箭头较长且与分形维数和 K 值的夹角较小, 说明母质类型是控制土壤结构发育与抗蚀能力的决定性因素。含水率与水蚀模数均指向细颗粒组分聚集区域, 且二者矢量方向接近, 反映出水力侵蚀作用与土壤水分状况共同促进了细粒物质的迁移与再分布, 是影响土壤质地和可蚀性的重要外营力。与之相比, 盖度与坡度矢量较短, 指示植被覆盖和地形起伏在大尺度上对土壤颗粒组成及可蚀性变异的影响相对有限, 可能与其局部性作用和间接性调控有关。风蚀模数与土地利用类型矢量靠近砂粒分布区域, 说明风蚀作用及人类土地利用方式影响表土粗化进程。植被类型、煤矿开采与高程因子矢量极短且方向离散, 表明这些因子对研究区土壤粒径分异和可蚀性空间格局的影响较弱。

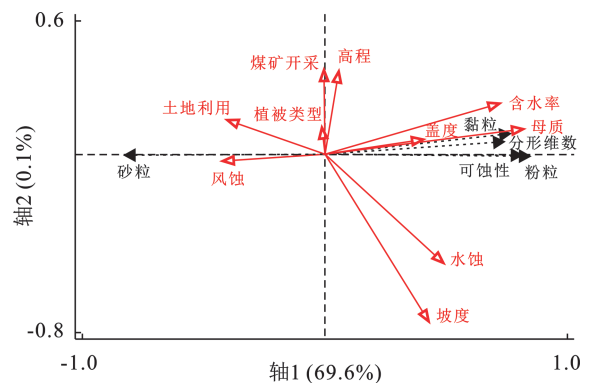


图 4 研究区土壤粒径和 K 值与环境因子关系

Fig.4 Relationship between soil particle size, K value and environmental factors at study area

蒙特卡罗置换检验结果由表 3 可知,母质、含水率和水蚀因子的影响均达到显著水平($p < 0.05$),说明冗余分析的结果可信,单个环境因子对榆神府典型煤矿区土壤粒径分布特征的重要性排序依次为:土壤母质(46.8%)>含水率(12.7%)>水蚀(7.2%),植被类型、风蚀、盖度、土地利用、煤矿开采、坡度和高程因子对土壤粒径分布的影响未到达显著水平。

表 3 研究区环境因子的重要性排序和显著性检验
Table 3 Importance ranking and significance test of environmental factors at study area

环境因子	重要性排序	解释量比例%	F 值	p 值
母质	1	46.8	63.2	0.002
含水率	2	12.7	22.3	0.002
水蚀	3	7.2	15.2	0.004
植被类型	4	1.1	2.3	0.14
风蚀	5	0.9	2	0.208
盖度	6	0.2	0.5	0.462
土地利用	7	0.3	0.6	0.446
煤矿开采	8	0.2	0.4	0.568
坡度	9	0.2	0.5	0.48
高程	10	<0.1	<0.1	0.936

3 讨论

3.1 土壤粒径和可蚀性的空间分异规律

榆神府煤矿区土壤粒径与 K 值呈现显著的南北空间分异格局,曼特尔分析结果表明,风蚀主要影响土壤结构,水蚀对粒径组成和养分均有显著影响,主导侵蚀类型(风蚀或水蚀)及地貌基底的差异是塑造空间分异格局的关键因素。南部曹家滩、大保当和小保当煤矿区以风积沙地貌为主,土壤侵蚀过程受强烈风蚀作用主导,砂粒比例高达 85% 以上,分形维数为 2.18~2.22, K 值为 0.25~0.28,均处于研究区较低水平。风蚀通过选择性搬运细颗粒组分导致土壤粗化^[18],而砂粒的高渗透性进一步降低了径流冲刷风险。此现象与毛乌素沙地风蚀区的土壤沙漠化进程特征一致^[19],表明风蚀驱动的土壤粗化是南部煤矿区可蚀性较低的主因。对照区红碱淖 K 值与南部矿区相当,反映自然风沙地貌仍受强风蚀作用,当前采矿扰动尚未改变风沙土侵蚀敏感性的自然本底。中部和北部煤矿区的土壤粒径和 K 值分布则体现了风蚀水蚀复合作用的影响。分形维数 2.32~2.35 与 K 值 0.32~0.38 的升高表明,黄土母质提供的黏粒和粉粒增加了土壤结构的复杂性,但采矿扰动可能破坏团聚体稳定性,加剧水蚀对细颗粒的淋失^[20]。尤其是柠条塔北翼的黄土丘陵区,尽管分形维数较高,

但其 K 值显著升高至 0.380,可能与季节性河流冲刷导致的黏粒迁移及表层土壤结构破坏有关^[21]。此外,哈拉沟矿区较高的有机碳含量 5.85% 与中等 K 值 0.32 的共存,表明有机碳通过促进团聚体形成可部分抵消细粒流失的风险^[22],但高强度水蚀仍可能削弱其抗蚀效应。EPIC 模型计算的 K 值通常用于 RUSLE 水土流失方程^[23],其表征土壤对降雨和径流分离、搬运作用的敏感性,主要受有机质、粉粒含量和土壤结构调控;而风蚀可蚀性则主要取决于土壤中可蚀性颗粒的含量及地表结皮发育状况。南部风沙区低分形维数(2.18~2.22)与高风蚀模数的对应关系,正是风蚀可蚀性的间接体现;而中北部地区较高的水蚀可蚀性 K 值(0.32~0.38)则明确反映了水蚀动力的主导作用。风蚀与水蚀虽机制不同,但皆通过改变土壤颗粒组成与结构影响可蚀性,二者共同塑造了矿区土壤侵蚀敏感性的空间格局。综上所述,研究区土壤分形维数与 K 值呈现“南低北高,风沙区低于黄土区”的清晰空间格局,深刻印证了地貌类型对侵蚀敏感性的基础控制作用。这为制定分区修复策略提供了核心依据:南部风蚀区应优先固沙,中北部复合侵蚀区则需强化植被恢复与地表覆盖,以削弱水蚀动力。

3.2 环境因子对粒径和可蚀性的影响机制

除了土壤侵蚀作用影响外,许多环境因子也参与了粒径和 K 值的调控过程,榆神府煤矿区土壤粒径与 K 值的空间分布受多因子调控,其相对重要性高度依赖空间尺度与区域背景。成土母质作为解释量最高的环境因子,深刻塑造了空间分异的基底:南部风沙土源于古风积,粒度单峰,分选好,决定了其易受风蚀粗化^[24];中北部黄绵土受水蚀—沉积历史影响,呈黏/粉粒双峰分布,质地细且分选差,使其对水蚀导致的颗粒养分协同迁移高度敏感^[25]。含水率作为第二大影响因子,其作用机制具有双重性。一方面,高含水率区域如柠条塔北翼近河地带因水分渗透增强,黏粒与粉粒易随重力水向下淋失,导致表层土壤粗化^[26], K 值升高。另一方面,含水率升高可促进黏土矿物如蒙脱石的膨胀分散,加剧径流对团聚体的剥离^[27]。植被盖度可以在空间上差异性缓冲侵蚀。地上部削弱风速,拦截细颗粒,盖度越高效果越强^[28];地下根系分泌物可胶结风化矿物,长期驱动细粒化与结构复杂化^[29-30]。地形因子并不会直接参与土壤中物质与能量的交换,但是能够引起地表物质和能量的再分配,导致土壤粒径和可蚀性的改变^[31]。值得注意的是,采矿扰动等环境因子在本研究区内对土壤粒径和可蚀性的影响并不显著($p > 0.05$),可

能源于尺度效应和人工修复措施。研究区内煤矿开采方式以井工开采为主,其主要的危害是引发地表塌陷与裂缝,但其实际扰动程度依赖于土壤特性和人工修复策略,在南部风沙土区,沙物质具有良好的流动性与自修复能力,能够在一定程度上自然充填塌陷裂缝,从而快速弥合地表创伤,削弱了采矿扰动在区域尺度上的直接信号。在中北部黄绵土区,尽管塌陷易形成地表裂缝,但矿区普遍实施“边采边复”策略,地表裂缝出现后短期内即进行覆土掩埋处理,从而削弱了采矿对原生土壤结构的破坏^[32]。榆神府矿区尺度上,井工开采的直接破坏被有效缓冲,这解释了为何其在统计模型中未成为主导因子。本研究观察到的粒径和可蚀性分布规律是被缓冲后的宏观稳态,如要观测土壤性质受采煤沉陷或其他环境因子的影响机理,则需将研究聚焦于更微观的局部裂缝带,其间的土壤性质与侵蚀模式差异预计将更为显著^[33-34]。

4 结论

(1) 榆神府煤矿区土壤粒径及 K 值呈显著南北分异,南部风积沙地貌区砂粒比例超过85%,分形维数为2.18~2.22且 K 值为0.25~0.28,中北部黄土丘陵区受黄土母质和风水复合侵蚀作用影响,黏粒与粉粒比例增加,分形维数升至2.32~2.35, K 值升高至0.26~0.32。

(2) 风蚀通过选择性搬运细颗粒导致土壤粗化且砂粒比例高达91.79%,曹家滩煤矿区 K 值显著降低至0.25;水蚀则通过黏粒淋失破坏团聚体结构,使柠条塔北翼等局部强侵蚀区 K 值升至0.38,但高有机碳含量如哈拉沟的5.85%可通过促进团聚体稳定性部分缓冲侵蚀效应。

(3) 土壤粒径及 K 值主要受成土母质主导,解释量比例45.9%,其次为含水率12%,植被盖度2.1%和坡度1.8%。母质决定初始机械组成差异,含水率调控细粒迁移,坡度强化侵蚀动力。

参考文献(References)

[1] 宋世杰,孙涛,杜麟,等.陕北煤矿区不同形态的采动地裂缝对土壤可蚀性的影响[J].煤炭学报,2023,48(增刊2):691-703.
Song Shijie, Sun Tao, Du Lin, et al. Influence of different forms of mining ground fissures on soil erodibility in northern Shaanxi coal mining area [J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(Suppl.2):691-703.

[2] 张颖真,袁立敏,蒙仲举,等.呼伦贝尔草原风蚀坑土壤质地与持水能力特征[J].水土保持学报,2025,39(4):225-234.

Zhang Ezhen, Yuan Limin, Meng Zhongju, et al. Characteristics of soil texture and water-holding capacity of blowout pits in the Hulunbuir grassland [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(4):225-234.

[3] Tian Shimin, Li Zhiwei, Wang Zhaoyin, et al. Mineral composition and particle size distribution of river sediment and loess in the middle and lower Yellow River [J]. International Journal of Sediment Research, 2021, 36(3):392-400.

[4] Liu Jilong, Zhang Lingling, Fu Qiang, et al. Spatial variability of soil particle-size distribution heterogeneity in farmland [J]. Transactions of the ASABE, 2018, 61(2):591-601.

[5] Montero E. Rényi dimensions analysis of soil particle-size distributions [J]. Ecological Modelling, 2005, 182(3/4):305-315.

[6] 杨培岭,罗远培,石元春.用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J].科学通报,1993,38(20):1896-1899.
Yang Peiling, Luo Yuanpei, Shi Yuanchun. Fractal characteristics of soil characterized by weight distribution of particle size [J]. Chinese Science Bulletin, 1993, 38(20):1896-1899.

[7] 贺俊.毛乌素沙地樟子松人工林恢复过程中土壤粒径演变特征[J].水土保持研究,2023,30(4):110-114.
He Jun. Characteristics of soil particle size evolution during restoration of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation in Mu Us sandy land [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(4):110-114.

[8] 饶良懿,徐也钦,胡剑汝,等.砒砂岩覆土区小流域土壤可蚀性 K 值研究[J].应用基础与工程科学学报,2020,28(4):763-773.
Rao Liangyi, Xu Yeqin, Hu Jianru, et al. Study on soil erodibility factor K on soil cover area of Pisha sandstone region [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2020, 28(4):763-773.

[9] Williams J R. EPIC-erosion/productivity impact calculator: 1. Model documentation [J]. Technical Bulletin United States Department of Agriculture, 1990, 4(4):206-207.

[10] Yan Binghe, Zhang Yulan, Zang Shuying, et al. Distributions of particle sizes in black soil and their environmental significance in Northeast China [J]. Sustainability, 2021, 13(7):3706.

[11] 朱冰冰,霍云霏,周正朝.黄土高原坡沟系统植被格局对土壤侵蚀影响研究进展[J].中国水土保持科学(中英文),2021,19(4):149-156.
Zhu Bingbing, Huo Yunpei, Zhou Zhengchao. Research progress in impact of vegetation pattern on soil erosion in the slope-gully system of the Loess Plateau [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2021, 19(4):

- 149-156.
- [12] 宋世杰,孙涛,郑贝贝,等.陕北黄土沟壑区采煤沉陷对黄土坡面形态的影响及土壤侵蚀效应[J].煤炭科学技术,2023,51(2):422-435.
Song Shijie, Sun Tao, Zheng Beibei, et al. Effect of coal mining subsidence on loess slope morphology and soil erosion in loess gully region of northern Shaanxi [J]. Coal Science and Technology, 2023, 51 (2) : 422-435.
- [13] 朱启明,刘俊娥,周正朝.黄土高原土壤可蚀性因子空间分布特征及影响因素[J].水土保持学报,2023,37(6):50-56.
Zhu Qiming, Liu June, Zhou Zhengchao. Research on the spatial distribution characteristics and influencing factors of soil erodibility factors of the Loess Plateau [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(6) : 50-56.
- [14] 沙国良,魏天兴,陈宇轩,等.黄土高原丘陵区典型植物群落土壤粒径分布特征[J].干旱区地理,2022,45(4):1224-1234.
Sha Guoliang, Wei Tianxing, Chen Yuxuan, et al. Characteristics of soil particle size distribution of typical plant communities on the hilly areas of Loess Plateau [J]. Arid Land Geography, 2022, 45(4) :1224-1234.
- [15] 杨璐,刘小芳,巨佳敏,等.黄土坡面种植柠条对土壤团聚体稳定性和可蚀性的影响[J].水土保持通报,2024,44(3):46-55.
Yang Lu, Liu Xiaofang, Ju Jiamin, et al. Effects of *Caragana korshinskii* plantation on soil aggregate stability and erodibility on loess slopes [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(3) :46-55.
- [16] 刘环宇,史培军,王永芳.鄂尔多斯高原矿区露天开采对土壤侵蚀的影响[J].水土保持学报,2025,39(4):81-90.
Liu Huanyu, Shi Peijun, Wang Yongfang. The impact of open-pit mining on soil erosion in the mining area of Ordos Plateau in China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(4) :81-90.
- [17] 赵龙飞,秦富仓,董晓宇,等.腾格里沙漠两种白刺生境土壤粒度和养分的评价[J].水土保持通报,2025,45(3):213-223.
Zhao Longfei, Qin Fucang, Dong Xiaoyu, et al. Assessing soil particle size and nutrients of two *Nitraria tangutorum* nebkha habitats in Tengger Desert [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45 (3) : 213-223.
- [18] 周炎广,武子丰,胡日娜,等.毛乌素沙地新垦地土壤风蚀特征[J].农业工程学报,2020,36(1):138-147.
Zhou Yanguang, Wu Zifeng, Hu Rina, et al. Characteristics of soil wind erosion in new reclamation land of Mu Us sandy land, China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(1) : 138-147.
- [19] 冯佳新,王海兵,刘茜雅,等.沙漠化逆转过程中毛乌素沙地土壤风蚀可蚀性影响因子的变化特征[J].水土保持通报,2023,43(6):1-9.
Feng Jiaxin, Wang Haibing, Liu Xiya, et al. Characteristics of changes in factors influencing wind erosion and erodibility of soils in Mu Us sandland during desertification reversal [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(6) :1-9.
- [20] 赵蒙恩,闫庆武,刘政婷,等.鄂尔多斯市土壤侵蚀时空演变及影响因素分析[J].干旱区研究,2022,39(6):1819-1831.
Zhao Meng'en, Yan Qingwu, Liu Zhengting, et al. Analysis of temporal and spatial evolution and influencing factors of soil erosion in Ordos City [J]. Arid Zone Research, 2022, 39(6) :1819-1831.
- [21] 李朋飞,曹凯,胡晋飞,等.黄土丘陵沟壑区不同雨强下坡面侵蚀空间异质性及其机理[J].水土保持研究,2025,32(1):1-12.
Li Pengfei, Cao Kai, Hu Jinfei, et al. The spatial heterogeneity and mechanisms of hillslope erosion under different rainfall intensities in hilly and gully Loess Plateau [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(1) :1-12.
- [22] Zhang Peng, Li Long, Wang Jing, et al. Effects of hydraulic erosion on the spatial redistribution characteristics of soil aggregates and SOC on Pisha sandstone slope [J]. Sustainability, 2023, 15(17) :13276.
- [23] Dan Yang, Li Pengfei, Holden J, et al. PESERA-LP: A coarse-scale process-based fluvial erosion model for topographically complex regions [J]. Journal of Hydrology, 2025, 655: 132923.
- [24] 王陇,高广磊,张英,等.毛乌素沙地风沙土粒径分布特征及其影响因素[J].干旱区地理,2019,42(5):1003-1010.
Wang Long, Gao Guanglei, Zhang Ying, et al. Particle size distribution of aeolian soils in the Mu Us sandy land and the influence factors [J]. Arid Land Geography, 2019, 42(5) :1003-1010.
- [25] 孙东怀,鹿化煜,David Rea,等.中国黄土粒度的双峰分布及其古气候意义[J].沉积学报,2000,18(3):327-335.
Sun Donghuai, Lu Huayu, Rea D, et al. Bimode grain-size distribution of Chinese loess and its paleoclimate implication [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2000, 18 (3) :327-335.
- [26] 白茹茹,张加琼,邓鑫欣,等.黄土高原水蚀风蚀交错带风蚀对砂质壤土迎风坡水蚀特征的影响[J].水土保持

- 学报,2022,36(3):30-36.
- Bai Ruru, Zhang Jiaqiong, Deng Xinxin, et al. Influence of wind erosion on water erosion characteristics of sandy loam on windward loess slopes in the wind-water erosion crisscross region of Loess Plateau [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022,36(3):30-36.
- [27] 王媛媛,李彦荣.基于骨架颗粒和基质分类的乌兰黄土微观结构研究[J].*太原理工大学学报*,2025,56(5):944-952.
- Wang Yuanyuan, Li Yanrong. Investigation of micro-structure of Malan loess based on the classification in terms of skeletal particles and matrices [J]. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 2025, 56 (5) : 944-952.
- [28] Liu Zhen, Sun Hao, Lin Ke, et al. Occurrence regularity of silt-clay minerals in wind eroded deserts of north-west China [J]. *Sustainability*, 2021,13(5):2998.
- [29] 黄琬云,赵允格,刘宝元,等.黄土高原土壤可蚀性对退耕还林(草)的响应[J].*水土保持学报*,2023,37(4):94-100.
- Huang Wanyun, Zhao Yunge, Liu Baoyuan, et al. Response of soil erodibility on the Loess Plateau to the grain to green program [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023,37(4):94-100.
- [30] Chibesa M C, Monoshyn D, Puschenreiter M, et al. Silicon solubilisation from soil minerals and soil by root exudate compounds [J]. *Geoderma*, 2025,459:117375.
- [31] Zou Xinyu, Zhang Zhuodong, Wu Mengyao, et al. Slope-scale spatial variability of fractal dimension of soil particle size distribution at multiple depths [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2021,85(1):117-131.
- [32] 胡振琪,肖武,赵艳玲.再论煤矿区生态环境“边采边复”[J].*煤炭学报*,2020,45(1):351-359.
- Hu Zhenqi, Xiao Wu, Zhao Yanling. Re-discussion on coal mine eco-environment concurrent mining and reclamation [J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45 (1):351-359.
- [33] 王丽鑫,陈卓鑫,郭明明,等.典型黑土区不同土地利用类型侵蚀沟岸土壤可蚀性及其影响因素[J].*水土保持研究*,2025,32(3):18-27.
- Wang Lixin, Chen Zhuoxin, Guo Mingming, et al. Soil erodibility and its influencing factors of erosion gully banks under different land use types in the typical black soil region of northeast China [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2025,32(3):18-27.
- [34] 王双明,杜麟,宋世杰.黄河流域陕北煤矿区采动地裂缝对土壤可蚀性的影响[J].*煤炭学报*,2021,46(9):3027-3038.
- Wang Shuangming, Du Lin, Song Shijie. Influence of mining ground fissures on soil erodibility in northern Shaanxi coal mining area of Yellow River Basin [J]. *Journal of China Coal Society*, 2021,46(9):3027-3038.
-
- (上接第235页)
- [19] 吴辉隆.重庆市滑坡灾害监测预警优化研究[D].四川成都:成都理工大学,2022.
- Wu Huilong. Research on optimization of landslide disaster monitoring and early warning in Chongqing [D]. Chengdu, Sichuan: Chengdu University of Technology, 2022.
- [20] 陈春利,方志伟.福建省地质灾害气象预警有效降雨模型研究[J].*地质力学学报*,2023,29(1):99-110.
- Chen Chunli, Fang Zhiwei. Research on an effective rainfall model for geological disaster early warning in Fujian Province, China [J]. *Journal of Geomechanics*, 2023,29(1):99-110.
- [21] Zeng Ailing, Chen Muxi, Zhang Lei, et al. Are transformers effective for time series forecasting? [J]. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 2023,37(9):11121-11128.
- [22] Klötergens C, Yalavarthi V K, Dervede T, et al. Mixing it up: Exploring mixer networks for irregular multivariate time series forecasting [J]. *Journal of Time Series Analysis*, 2024, 45(3): 100-120.
- [23] Hinton G, Vinyals O, Dean J. Distilling the knowledge in a neural network [J]. *CoRR*, 2015, abs: 15030531.
- [24] Jhin S Y, Lee J, Park N. Precursor-of-anomaly detection for irregular time series [C]// Long Beach, CA, USA. ACM: Proceedings of the 29th ACM SIGKDD Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, 2023.
- [25] Liu F T, Ting Kai ming, Zhou Zhihua. Isolation forest [C]// Pisa, Italy: 2008 Eighth IEEE International Conference on Data Mining, 2009.
- [26] Wang Yuxuan, Wu Haixu, Dong Jiaxiang, et al. Deep time series models: A comprehensive survey [J]. *Mathematics*, 2024,12(10):12101504.
- [27] Liu Chen, He Shibo, Li Shizhong, et al. Detecting both seen and unseen anomalies in time series [J]. *ACM Transactions on Knowledge Discovery from Data*, 2025,19(4):1-29.