



· 青年编委专刊(地球科学) ·

黄河中游陕北煤矿区黄土沉陷坡面土壤入渗特性 变化规律及其侵蚀效应

宋世杰^{1,2,3,4}, 成星^{1,2,3}, 白莉¹, 刘露^{1,2,3}, 李源红^{1,2,3}, 张家杰^{1,2,3}, 陈宝灯^{1,2,3}

(1. 西安科技大学 地质与环境学院, 陕西 西安 710054; 2. 西安科技大学 煤炭绿色开采地质研究院, 陕西 西安 710054;
3. 陕西省煤炭绿色开发地质保障重点实验室, 陕西 西安 710054;
4. 淮南矿业[集团]有限责任公司 深部煤炭安全开采与环境保护全国重点实验室, 安徽 淮南 232000)

摘要 破解黄河中游煤矿区沉陷坡面引发的水土流失问题,是支撑黄河流域生态安全与高质量发展战略的关键突破点。以陕北柠条塔井田北翼典型沉陷坡面(坡顶、坡中、坡脚)周围不同深度土层(0~10、10~20、20~30、30~40 cm)的土壤为研究对象,采用仪器分析法和定水头法分别测定土壤的入渗速率、累积渗透量、饱和导水率(K_s)、孔隙度、含水率、有机质、机械组成、 >0.25 mm 水稳性团聚体含量,揭示了沉陷坡面不同部位对土壤入渗特性的影响规律,并基于 RUSLE2 模型计算,阐明了在小空间尺度上,考虑入渗特性的沉陷坡面土壤侵蚀效应。结果表明:① 不同沉陷坡面部位土壤入渗速率均随时间的变化呈现出瞬变阶段(0~3 min)、渐变阶段(3~60 min)及稳定阶段(60~110 min)3个阶段的动态变化过程;② 沉陷坡面会产生显著提高坡顶、坡中、坡脚部位土壤入渗速率、累积渗透量、饱和导水率(K_s)、可蚀性 K 值的效应,平均增幅分别介于 13.41%~52.51%、22.25%~26.84%、21.86%~26.67%、15.78%~21.63%,该效应随着土层深度的减小而增强,沉陷坡面该效应的大小为坡顶>坡中>坡脚;③ 沉陷坡面周围土壤考虑入渗特性计算的可蚀性 K 值变化幅度比不考虑时放大了 33.42%~44.99%;④ 沉陷坡面土壤可蚀性 K 值均与粉粒、孔隙度、饱和导水率(K_s)显著相关,该结果可作为黄河流域生态保护与矿区绿色转型协同发展提供理论技术支持。

关键词 沉陷坡面;土壤入渗特性;土壤侵蚀效应;RUSLE2 模型;陕北煤矿区

中图分类号: TD88 **DOI**: 10.16152/j.cnki.xdxbzr.2025-03-011

The variation law of soil infiltration characteristics and its erosion effect on loess subsidence slope in northern Shaanxi coal mining area in the middle reaches of the Yellow River

SONG Shijie^{1,2,3,4}, CHENG Xing^{1,2,3}, BAI Li¹, LIU Lu^{1,2,3}, LI Yuanhong^{1,2,3},
ZHANG Jiajie^{1,2,3}, CHEN Baodeng^{1,2,3}

(1. College of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;
2. Research Institute of Coal Green Mining Geology, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

收稿日期: 2025-03-10

基金项目: 国家自然科学基金(41402308); 深部煤炭安全开采与环境保护全国重点实验室开放课题(HNKY2024YB402);
咸阳市重点研发计划项目(L2024-ZDYF-ZDYF-SF-0069)。

第一作者: 宋世杰, 男, 博士, 副教授, 从事矿山生态环境保护与修复研究, kkkbfff@163.com。

3. Key Laboratory of Geological Guarantee for Coal Green Development of Shaanxi Province, Xi'an 710054, China;

4. State Key Laboratory for Safe Mining of Deep Coal Resources and Environment Protection,
Huainan Mining (Group) Co., Ltd., Huainan 232000, China)

Abstract Addressing the soil erosion issues triggered by subsidence slopes in the middle reaches of the Yellow River coal mining areas is a crucial breakthrough for supporting the ecological security and high-quality development strategy in the Yellow River Basin. This study takes the soil from different depth layers (0 ~ 10, 10 ~ 20, 20 ~ 30, and 30 ~ 40 cm) surrounding the typical subsidence slope positions (slope top, middle, and foot) of the northern wing of the Ningtao Tower Coalfield in Northern Shaanxi as the research object. Soil infiltration rate, cumulative infiltration, saturated hydraulic conductivity (K_s), porosity, moisture content, organic matter, mechanical composition, and the content of water-stable aggregates larger than 0.25 mm were measured using instrumental analysis and the constant-head method. The study reveals the impact of different subsidence slope positions on soil infiltration characteristics and elucidates the soil erosion effects of subsidence slopes on a small spatial scale considering infiltration properties based on the RUSLE2 model. The results show that: ① The soil infiltration rate at different subsidence slope positions exhibits a dynamic change process with three stages: Transient (0 ~ 3 min], transitional (3 ~ 60 min], and stable (60 ~ 110 min]. ② The subsidence slope significantly enhances the soil infiltration rate, cumulative infiltration, saturated hydraulic conductivity (K_s), and erodibility K -value at the slope top, middle, and foot, with average increases ranging from 13.41% to 52.51%, 22.25% to 26.84%, 21.86% to 26.67%, and 15.78% to 21.63%, respectively. This effect intensifies with decreasing soil depth, and the order of this effect on the subsidence slope is: Slope top > slope middle > slope foot. ③ The change amplitude of the soil erodibility K -value considering infiltration characteristics around the subsidence slope is 33.42% ~ 44.99% higher than that without consideration. ④ The soil erodibility K -values of subsidence slope surfaces are significantly correlated with silt content, porosity, and saturated hydraulic conductivity (K_s). These findings can provide theoretical and technical support for the coordinated development of ecological protection in the Yellow River basin and the green transformation of mining areas.

Keywords subsidence slope; soil infiltration characteristics; soil erosion effect; RUSLE2 model; Northern Shaanxi coal mine area

在中国迈向“双碳”目标的进程中,煤炭的角色将从主导能源转变为关键能源,持续为国家能源安全提供基础性保障^[1]。2024 年,我国原煤总产量达到 47.6 亿吨,同比增长 1.3%^[2]。随着东部浅层煤炭资源的逐渐枯竭,西部地区尤其是黄河中游,正逐步成为我国煤炭生产的核心接续区域。然而,陕北矿区作为黄河中游的典型煤炭产区,其地理空间与黄河多沙粗砂国家级水土流失重点治理区高度重合^[3],高强度的地下开采不仅引发了一系列采动损害问题,还加剧了水土流失,进一步激化了煤炭开采与水土保持之间的矛盾,其中采煤沉陷区尤甚^[3]。因此,2024 年 9 月 12 日,习近平总书记在推动黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上强调,采煤沉陷区的综合治理是实现黄河流域生态保护和高质量发展亟待突破的重点方向^[4]。

采煤沉陷对区域水土流失产生了重要的影响^[5],这一现象已成为国内外相关学者的研究热点,并通过多维度研究方法取得了一批有价值的成果。文献计量研究表明^[6]:地下资源开采活动通过改变土壤剖面构型、干扰物理性状、扰乱水分运移路径及破坏养分循环系统,形成土壤质量退化与水土流失的恶性耦合效应;采煤沉陷增加了土壤入渗速率(42.86%)、土壤可蚀性 K 值(258.67%)和土壤侵蚀面积(102.06%)^[7];基于 RUSLE 的土壤侵蚀量研究^[8]显示,地形起伏度与植被覆盖度的协同作用主导侵蚀空间异质性;孟加拉 Barapukuria 矿区的环境要素综合调查^[9]显示,开采扰动显著削弱了土壤渗透性能,形成水土流失加剧的重要诱因;大柳塔煤矿采煤对风积沙区土壤结构研究^[10]揭示采矿活动通过破坏土壤团粒稳定性与地表结皮层,显著降低区域抗蚀能

力;平朔矿区水分参数研究^[11]证实塌陷扰动显著改变土壤水分特征曲线形态,导致饱和导水率异常变化;基于中国水土流失方程(CSLE模型)的定量分析^[12]显示,柠条塔井田北翼沉陷坡面显著提高了土壤潜在侵蚀能力,这些成果为构建矿区生态修复理论体系提供了重要科学依据。目前,关于沉陷坡面如何影响土壤入渗特性的研究仍显不足。虽然土壤的入渗性能和可蚀性受到多种因素的共同作用,但在不同的环境条件和土壤类型下,这些因素的具体影响程度表现出显著的差异性。

土壤抗蚀性作为土壤侵蚀敏感度的核心表征参数,通常采用 K 因子进行定量评估^[13]。研究表明,该指标与土壤颗粒级配特征^[14]及有机质含量^[15]存在显著相关性。计算该值的常用模型有EPIC、Shirazi和Torri模型,虽在算法原理上各有侧重,但其共性局限在于未纳入土壤水文过程关键参数。值得注意的是,土壤渗透性能作为反映水土保持效能的核心水力学指标,通过调控根系发育模式、黏粒迁移规律、微生物群落动态及化学元素循环等关键过程,深度影响土壤结构稳定性与有机质赋存状态,进而形成对侵蚀抵抗力的多维度调控机制^[16]。针对陕北矿区特殊地质背景,实证研究表明该区域水土流失主要由高强度短历时降水事件驱动^[17]。这种气候-地质耦合效应凸显了将土壤入渗动态纳入侵蚀模型构建的必要性。基于此,本研究采用RUSLE2模型,以沉陷坡面(坡顶、坡中、坡脚)周围不同深度土层(0~10、10~20、20~30、30~40 cm)的土壤为研究对象,揭示考虑土壤入渗特性影响的陕北采煤沉陷区土壤潜在侵蚀能力的变化规律。研究成果预期可为陕北黄河流域采煤塌陷区的土壤侵蚀控制与生态修复提供理论支撑。

1 研究区概况

研究区位于黄河中游陕北矿区柠条塔井田北翼,地理坐标为 $E109^{\circ}40' \sim 110^{\circ}54'$, $N38^{\circ}13' \sim 39^{\circ}27'$,该区域地处陕北黄土高原北部,属典型的黄土沟壑地貌,地形起伏多变。研究区为中温带半干旱大陆性气候,干旱少雨,蒸发量大,年降雨量 $194.7 \sim 531.6$ mm,并多以集中暴雨形式出现。区内土壤类型以黄绵土为主,植被类型以草地植被为主。区内主采煤层为 2^{-2} ,开采方式为

长壁综采和全部垮落法^[18],煤炭开采引发地面沉降,使得地表土层内各点受力状态相应改变,地表的不均匀沉降改变了地表微地形,引起地面标高变化和附加坡度,促使了黄土沉陷坡面的出现^[19]。实地调查结果显示,研究区煤炭开采后,采动损害部位出现明显的分区性,根据此特性将沉陷上部10 m划分为坡顶,中间部分30 m划分为坡中,下部10 m划分为坡脚。

2 材料与方法

2.1 样品采集

将柠条塔井田北翼典型采煤塌陷区域确定为研究样区(中心坐标 $E110^{\circ}18'71''$, $N39^{\circ}08'79''$)。该区域黄土沉陷坡面的空间特征表现为:坡面走向基本与工作面推进方位一致,平均坡度约 19° ,平均坡长约55 m,坡形为均匀坡;地表植被覆盖度约43%,植被群落以长芒草(*Stipa bungeana*)、狗牙根(*Cynodon dactylon*)等抗旱性草本植物为优势种。根据前人研究成果^[20],首先,选择坡向一致、形态相似且位置相近的黄土沉陷坡面作为样地目标,使用土钻,在每个坡面部位随机布设3个 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 的采样方,采用五点采样法,将每个样方的5个采样点对应垂直深度的土壤混合装袋;其次,使用环刀(直径5 cm,高5.1 cm)和铝盒(直径4 cm,高2.5 cm)分层采集垂直深度为0~10、10~20、20~30、30~40 cm的原状土壤,标记样品编号,密封保存;最后,在邻近且未经历开采活动影响的区域内,挑选了具有相似特征的黄土斜坡表面,并随机布设3个采样位置,按同一方法采集土样作为未受干扰的对照组(见图1)。共采集160个土壤样品。环刀和铝盒采集的原状土壤样品分别用于室内入渗试验和测定含水率、孔隙

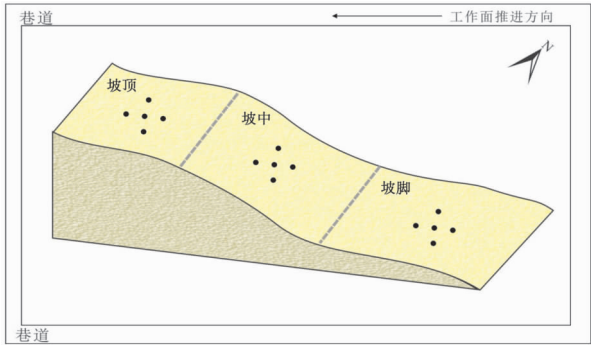


图1 采样布局示意图
Fig.1 Sampling layout sketch

度、大团聚体(>0.25 mm 水稳性团聚体)含量,土钻样品用于测定黏粒(<0.002 mm)、粉粒(0.002~0.05 mm)、极细砂粒(0.05~0.1 mm)和有机质质量分数。

2.2 实验方法

土壤机械组成分数使用 Mater Sizer 2000 激光粒度仪测定,孔隙度及含水率使用环刀法测定,土壤大团聚体(>0.25 mm 水稳性团聚体)含量使用土壤团粒分析仪测定,土壤有机质质量分数使用普兰德 Titrette 手动滴定仪测定,土壤饱和导水率(K_s)使用定水头法测定^[21],设置水头压力为 5 cm^[22],测定并记录不同时间段内渗出的水量,每隔 1,2,3,4,5,10,10,⋯,10 min 记录 1 次^[22],直到单位时间内渗出水量相同为止,所有样品均平行测定 3 次。土壤渗透速率、累积渗透量、 K_s 根据下式计算

$$V = \frac{10 \times Q_n}{t_n \times S}$$

(1)

式中: V 为土壤渗透速率,mm/min; Q_n 为 n 次渗出水量,cm³; S 为渗透筒的横截面积,cm²; t_n 为每次渗透所间隔时间,min。

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + \cdots + Q_n$$

(2)

式中: Q 为累积渗透量,mL; $Q_1, Q_2, Q_3, \cdots, Q_n$ 为每次渗出水量,mL。

$$K_s = \frac{10 \times Q_n \times L}{t_n \times S \times (h + L)} = V \times \frac{L}{h + L}$$

(3)

式中: K_s 为土壤饱和导水率,mm/min; h 为水层厚度; L 为土层厚度。

2.3 数据处理方法

使用 SPSS 24.0、Origin 2024 软件对试验所得数据进行统计学处理和图表绘制,使用 Origin 2024 版本软件进行图表绘制,使用 RUSLE2 模型^[23]计算土壤可蚀性 K 值,模型均使用国际制单位,t·hm²·h/(hm²·MJ·mm),公式如下:

$$K = \{0.137 \times [k_t(12 - OM) + 3.25(2 - S_i) + 2.5(P' - 3)]\} / 100$$

(4)

$$k_t = \begin{cases} k_{tb} (SIL + VFS < 68\%), \\ k_{tb} - [0.67(k_{tb} - k_{t68})^{0.82}] \\ (SIL + VFS \geq 68\%) \end{cases}$$

(5)

$$k_{tb} = \frac{\{2.1[(SIL + VFS)(100 - CLA)]^{1.14}\}}{10\,000}$$

(6)

$$k_{t68} = \frac{\{2.1[68(100 - CLA)]^{1.14}\}}{10\,000}$$

(7)

式中: k_t 为土壤质地因子; k_{tb} 为当 $SIL + VFS < 68\%$ 时,土壤质地因子; k_{t68} 为当 $SIL + VFS \geq 68\%$ 时,土壤可蚀性图表中的基础土壤质地因子;OM 为土壤有机质百分含量(%);CLA 为黏粒质量分数(<0.002 mm)(%);SIL 为粉粒质量分数(0.002~0.05 mm)(%);VFS 为极细砂粒质量分数(0.05~0.1 mm)(%); S_i 为土壤结构等级,参考美国农业部土壤调查手册,取值为 3^[24]; P' 为土壤渗透性等级^[24]:是指土壤剖面最低的饱和导水率,由土壤饱和导水率可得。分为 6 个等级,其中 1 为快速(>2.5 mm/min),2 为中等至快(0.83~2.50 mm/min),3 为中等(0.25~0.83 mm/min),4 为慢至中等(0.083~0.25 mm/min),5 为慢(0.0167~0.0833 mm/min),6 为极慢(<0.0167 mm/min)。

3 结果与分析

土壤渗透性能的核心参数主要包括入渗速率、累积渗透量及饱和导水率(K_s)^[25]。其中:土壤入渗速率作为关键水力学指标,不仅控制地表径流产生、溶质运移及侵蚀过程,更直观表征土壤的水分输导性能^[26];累积渗透量数值的大小直接表征土壤渗透过程的持水容量^[27];饱和导水率(K_s)直接反映了土壤水分保持能力^[28]。机械组成决定土壤孔隙构型^[29],有机质含量影响团聚体稳定性^[30],>0.25 mm 水稳性团聚体的丰度直接关系到土壤的抗分散能力^[31],均是评价土壤抗侵蚀能力的关键指标。针对研究区内坡顶、坡中、坡脚不同坡面部位,周围土层深度 0~10、10~20、20~30、30~40 cm 土壤样品的入渗速率、累积渗透量、饱和导水率(K_s)、机械组成、孔隙度、含水率、有机质、>0.25 mm 水稳性团聚体指标测定结果见表 1。

表 1 土壤入渗特性与可蚀性关键指标检测结果

Tab. 1 Test results of key indicators for soil infiltration characteristics and erodibility

坡面部位	土层深度/cm	黏粒质量分数/%	粉粒质量分数/%	极细砂粒质量分数/%	砂粒质量分数/%	孔隙度/%	含水率/%	有机质质量分数/(g·kg ⁻¹)	>0.25 mm 水稳性团聚体含量/%	累积渗透量/mL	饱和导水率/(mm·min ⁻¹)
坡顶	~10	10.14±0.43h	60.64±2.43bc	13.46±0.39a	15.76±0.54d	50.75±2.47a	4.47±0.28d	7.16±0.15cd	24.87±0.89e	853.93±12.69a	3.29±0.27a
	10~20	11.8±0.26g	64.53±2.53a	10.88±0.49b	12.79±0.57e	50.44±1.43ab	5.1±0.23cd	7.73±0.26c	26.31±0.74cd	687.87±9.79b	2.81±0.05ab
	20~30	14.95±0.51de	61.32±2.45b	9.44±0.58bc	14.29±0.53de	50.19±2.22ab	5.67±0.18bc	8.34±0.28cb	27.29±0.77cd	581.28±8.65bc	2.1±0.18bc
	30~40	15.81±0.35cd	60.03±2.44bc	10.2±0.58bc	13.95±0.47de	49.97±1.89ab	6.1±0.26bc	8.75±0.31cb	28.14±0.75bc	508.70±7.64bc	2.1±0.16bc
破中	~10	12.01±0.36fg	61.89±2.20ab	12.19±0.49ab	13.91±0.58de	49.28±1.32ab	4.88±0.14cd	6.17±0.21d	26.57±0.65cd	757.9±11.60ab	3.05±0.20ab
	10~20	14.0±0.49e	57.32±2.19cd	10.07±0.55bc	18.6±0.56c	48.94±2.09ab	5.58±0.21c	6.57±0.23cd	28.76±0.79bc	607.93±9.19bc	2.36±0.20bc
	20~30	15.43±0.31cd	58.0±2.21c	10.01±0.48bc	16.57±0.46cd	48.69±1.75b	6.02±0.23cb	6.89±0.25cd	27.56±0.54cd	522.37±8.65bc	2.0±0.20bc
	30~40	15.92±0.34cd	60.01±1.92ab	10.46±0.42bc	13.62±0.37de	48.49±2.79bc	6.53±0.32ab	7.23±0.32cd	28.46±0.73bc	474.68±6.58c	1.99±0.11c
坡脚	~10	13.32±0.34f	62.47±2.32ab	10.54±0.62bc	13.66±0.59de	47.16±1.45bc	5.17±0.22cd	6.72±0.16cd	25.14±0.57de	703.5±11.69ab	2.70±0.63b
	10~20	14.0±0.53e	63.33±5.09ab	9.99±0.39bc	12.68±0.70c	46.85±1.82bc	5.85±0.27bc	7.15±0.54cd	26.03±1.06d	561.70±9.79bc	2.15±0.13bc
	20~30	15.62±0.63cd	55.96±1.60d	10.23±0.40bc	18.19±0.56cd	46.65±1.08c	6.35±0.23bc	7.57±0.75cd	27.98±0.89c	481.05±9.65c	1.86±0.16cd
	30~40	16.16±0.32cd	56.63±2.57cd	9.13±0.29c	18.07±0.64cd	46.47±1.13cd	6.67±0.22ab	7.95±0.72bc	28.68±0.73bc	442.33±8.15cd	1.77±0.17cd
CK	0~10	15.32±0.57d	52.81±2.05e	10.57±0.63bc	21.29±0.49ab	47.58±2.79bc	5.41±0.26cd	8.89±0.28b	26.35±0.55cd	675.21±8.69b	2.68±0.23bc
	10~20	16.62±0.27cd	51.7±2.14ef	9.46±0.58bc	22.22±0.54ab	47.27±1.47bc	6.01±0.24bc	9.31±0.41ab	27.9±0.66c	545.80±7.79bc	2.11±0.09bc
	20~30	16.74±0.28c	51.67±2.36ef	9.37±0.58bc	22.22±0.40ab	47.02±1.42bc	6.41±0.21bc	9.72±0.30ab	28.77±0.59bc	436.24±7.65cd	1.72±0.16cd
	30~40	17.41±0.42bc	51.4±51.38ef	10.01±0.44bc	21.18±0.41ab	46.82±1.37bc	6.84±0.22ab	10.02±0.26a	29.85±0.62ab	395.86±7.26cd	1.63±0.15cd
坡中	0~10	16.21±0.32bc	50.76±1.76f	9.79±0.44bc	23.24±0.50a	46.67±2.69bc	5.81±0.22bc	7.74±0.30c	28.56±0.69bc	612.42±8.69bc	2.49±0.17ab
	10~20	16.9±0.49bc	51.06±4.40ef	9.93±0.50bc	22.12±0.49ab	46.33±1.65cd	6.45±0.26b	8.63±0.33bc	29.33±0.77ab	480.50±7.79c	2.0±0.22c
	20~30	17.57±0.4bc	51.5±2.20ef	9.75±0.47bc	21.18±0.48ab	46.12±2.21cd	6.89±0.27ab	8.76±0.35bc	30.43±0.55ab	405.40±7.65cd	1.77±0.12cd
	30~40	17.94±0.30b	50.94±1.58ef	10.45±0.69bc	20.68±0.49b	45.94±2.13cd	7.29±0.27ab	9.15±0.42ab	31.53±1.06a	383.78±6.58c	1.49±0.17cd
CK	0~10	17.94±0.42b	52.71±3.05de	9.36±0.52bc	19.99±0.48bc	44.58±2.07cd	6.13±0.19bc	7.96±0.34bc	27.62±0.95cd	578.02±8.69bc	2.15±0.22bc
	10~20	18.32±0.52ab	52.01±2.62ef	10.39±0.68bc	19.28±0.48bc	44.26±1.67cd	6.78±0.24ab	8.27±0.17bc	29.56±0.60b	447.87±7.79cd	1.83±0.12cd
	20~30	18.36±0.46ab	52.07±2.29c	9.89±0.67bc	19.68±0.48bc	44.05±1.60cd	7.15±0.31ab	8.59±0.28bc	30.44±0.68ab	381.07±5.65c	1.52±0.14cd
	30~40	18.99±0.41a	51.43±2.34ef	10.79±0.52bc	18.79±0.48cd	43.84±1.86d	7.54±0.25a	8.84±0.32bc	31.23±0.79ab	371.39±6.02d	1.46±0.16d

注:黏粒粒径为<0.002 mm;粉粒粒径为0.002~0.05 mm;极细砂粒粒径为0.05~0.1 mm;砂粒粒径为0.1~2.0 mm;累积渗透量为前115 min 累积渗透量;同列不同字母表示在 $p<0.05$ 水平下差异显著。

3.1 沉陷坡面对周围土壤入渗特性的影响

3.1.1 对土壤入渗速率的影响

根据表 1,绘制了不同坡面部位、不同垂直深度土壤入渗速率的散点图,如图 2 所示。

由表 1、图 2 知,相较于对照组:坡顶、破中、坡脚部位,0~40 cm 土层土壤入渗速率均随时间变化而呈现出瞬变阶段(0~3 min]、渐变阶段(3~60 min]及稳定阶段(60~110 min]3 个阶段的动态变化过程。具体而言,当土层深度介于 0~10 cm 时,坡顶、破中、坡脚部位土壤瞬变阶段(0~3 min]、渐变阶段(3~60 min]、稳定阶段(60~110 min]入渗速率的增幅分别依次为 47.04% ($p<0.05$)、16.49% ($p<0.05$)、22.66% ($p<0.05$);16.60% ($p<0.05$)、29.31% ($p<0.05$)、22.52% ($p<0.05$);1.60%、27.15% ($p<0.05$)、35.76% ($p<0.05$)。当土层深度介于 10~20 cm 时,坡顶、破中、坡脚部位土壤瞬变阶段(0~3 min]、渐变阶段(3~60 min]、稳定阶段(60~110 min]入渗速率的增幅分别依次为 72.01% ($p<0.05$)、28.22% ($p<0.05$)、33.00% ($p<0.05$);74.70% ($p<0.05$)、31.40% ($p<0.05$)、17.97%

($p<0.05$);18.00% ($p<0.05$)、8.16%、17.22% ($p<0.05$)。当土层深度介于 20~30 cm 时,坡顶、破中、坡脚部位土壤瞬变阶段(0~3 min]、渐变阶段(3~60 min]、稳定阶段(60~110 min]入渗速率的增幅分别依次为 55.11% ($p<0.05$)、33.00% ($p<0.05$)、22.02% ($p<0.05$);55.17% ($p<0.05$)、23.47% ($p<0.05$)、13.03% ($p<0.05$);3.57%、28.81% ($p<0.05$)、22.46% ($p<0.05$)。当土层深度介于 30~40 cm 时,坡顶、破中、坡脚部位土壤瞬变阶段(0~3 min]、渐变阶段(3~60 min]、稳定阶段(60~110 min]入渗速率的增幅分别依次为 36.00%、33.01%、29.00%;13.40%、29.36%、33.90%;30.46%、21.05%、21.68%,均达到显著差异($p<0.05$)。由此可得:① 开采沉陷会产生增加坡顶、坡中、坡脚部位土壤 3 个阶段入渗速率的效应,且随着土层深度的减小,坡顶、坡中、坡脚部位 3 个阶段入渗速率逐渐增大,沉陷区坡面入渗速率的大小:坡顶>坡中>坡脚;② 与对照组相比,沉陷区不同坡面部位平均增幅介于 13.41%~52.51%,且在坡顶部位 0~10 cm 土层土壤入渗速率增幅最显著。

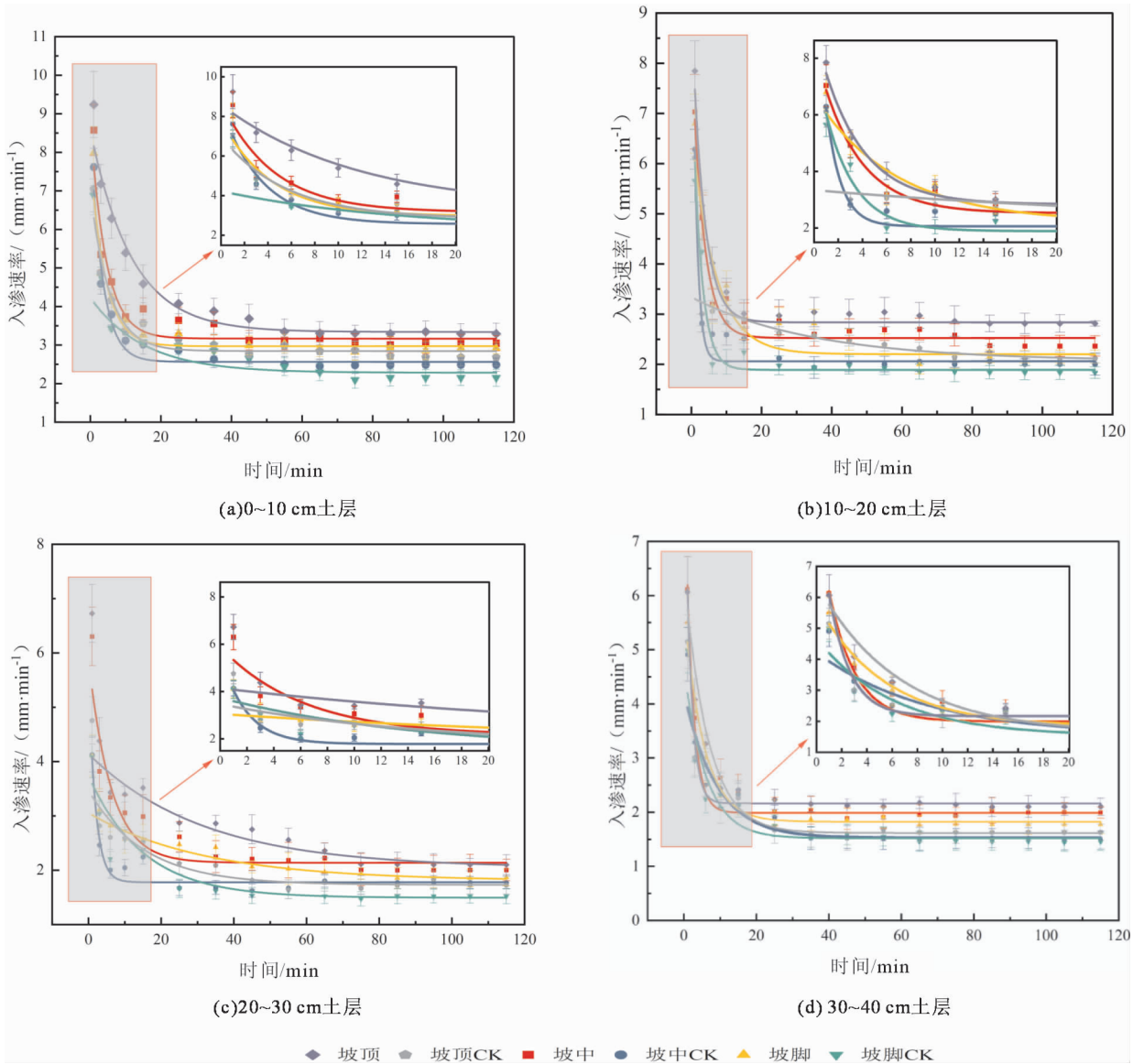


图 2 不同坡面部位土壤入渗速率过程拟合图

Fig. 2 Fitted curves of soil infiltration rate processes at different slope positions

3. 1. 2 对土壤累积渗透量的影响

根据表 1,绘制了不同坡面部位、不同垂直深度土壤累积渗透量变化图,如图 3 所示。

由表 1、图 3 知,相较于对照组:无论在何坡面部位,土壤累积渗透量均呈明显上升趋势。具体而言:当土层分别介于 0 ~ 10、10 ~ 20、20 ~ 30、30 ~ 40 cm 时,沉陷区坡顶部位土壤累积渗透量的增幅依次为 26. 47%、25. 44%、23. 25%、22. 20% ;沉陷区坡中部位土壤累积渗透量的增幅

依次为 23. 75%、26. 52%、24. 85%、22. 15% ;沉陷区坡脚部位土壤累积渗透量的增幅依次为 21. 72%、25. 42%、22. 76%、19. 10%。以上数据均达到显著差异($p < 0. 05$)。由此可见:开采沉陷会产生增加坡顶、坡中、坡脚部位土壤累积渗透量的效应,且随着土层深度的减小,坡顶、坡中、坡脚部位土壤累积渗透量逐渐增大,沉陷区坡面土壤累积渗透量的大小:坡顶 > 坡中 > 坡脚。

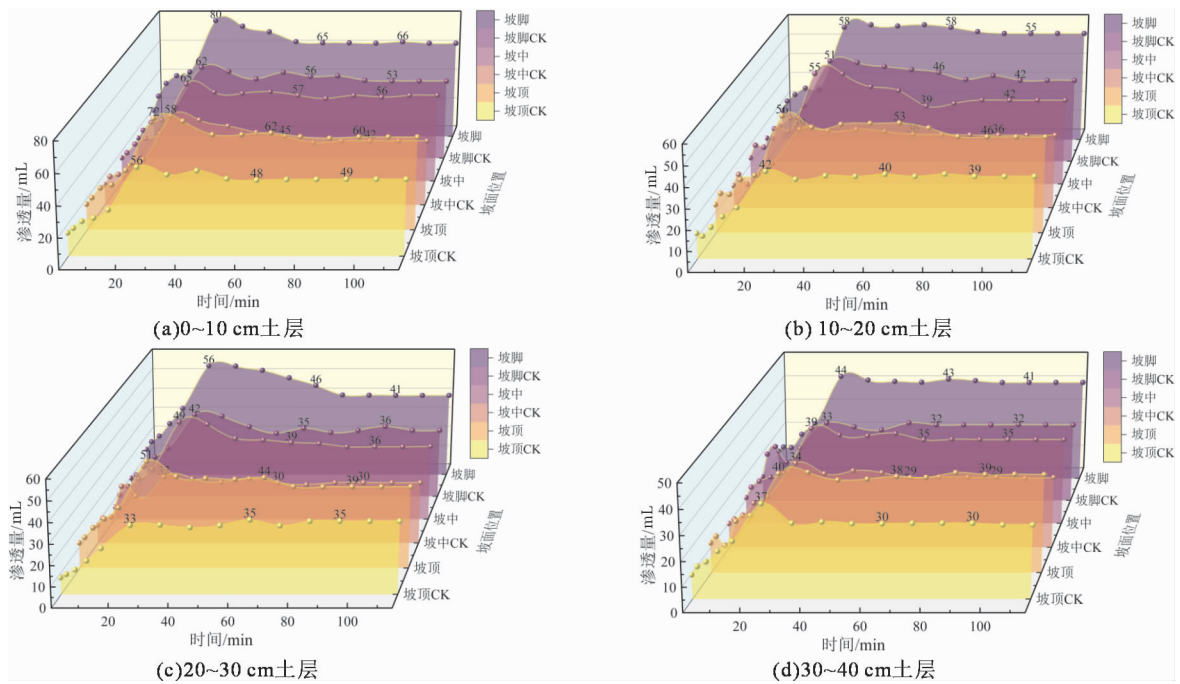


图3 不同坡面部位土壤渗透量变化图
Fig.3 Variation in soil infiltration amount at different slope positions

3.1.3 对土壤饱和和导水率(K_s)的影响

根据表1,绘制了不同坡面部位、不同垂直深度土壤饱和和导水率(K_s)变化图,如图4所示。

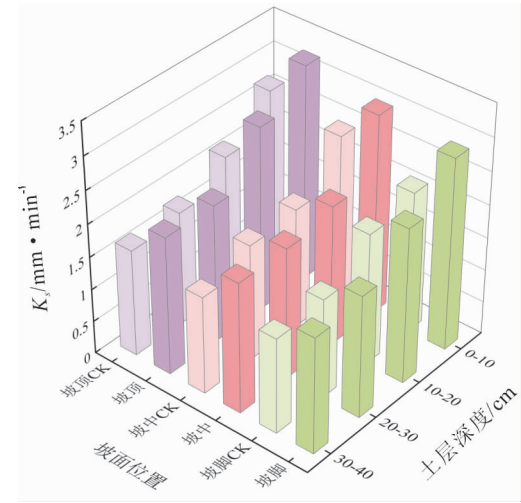


图4 不同坡面部位土壤饱和和导水率(K_s)变化图
Fig.4 Variation in saturated hydraulic conductivity (K_s) of soil at different slope positions

由表1、图4知,相较于对照组:无论在何坡面部位,土壤饱和和导水率(K_s)均呈明显上升趋势。具体而言,当土层分别介于0~10、10~20、20~30、30~40 cm时,沉陷区坡顶部位土壤饱和和导水率(K_s)的增幅依次为22.76%、33.06%、21.87%、29.09%;沉陷区坡中部位土壤饱和和导水

率(K_s)的增幅依次为22.52%、17.97%、13.03%、33.90%;沉陷区坡脚部位土壤饱和和导水率(K_s)的增幅依次为25.58%、17.22%、22.46%、21.68%。以上数据均达到显著差异($p < 0.05$)。由此可见:开采沉陷会产生增加坡顶、坡中、坡脚部位土壤饱和和导水率(K_s)的效应,且随着土层深度的减小,坡顶、坡中、坡脚部位土壤饱和和导水率(K_s)逐渐增大,沉陷区坡面土壤饱和和导水率(K_s)的大小:坡顶>坡中>坡脚。

3.2 沉陷坡面对考虑入渗特性土壤可蚀性K值的影响

根据表1数据和RULSE2模型计算了考虑入渗特性的可蚀性K值,结果如表2所示,以此为基础,绘制了可蚀性K值对比图,如图5所示。

表2 不同坡面部位土壤可蚀性K值的计算结果
Tab.2 Calculation results of soil erodibility K values at different slope positions

坡面部位	土层深度	土壤可蚀性K值
	/cm	$/t \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm})^{-1}$
坡顶	0~10	0.055 0
	10~20	0.054 7
	20~30	0.053 5
	30~40	0.052 5
坡中	0~10	0.053 9
	10~20	0.053 7
	20~30	0.052 5
	30~40	0.052 1

续表 2

坡面部位	土层深度 /cm	土壤可蚀性 K 值 $/t \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm})^{-1}$
坡脚	0 ~ 10	0.052 2
	10 ~ 20	0.051 4
	20 ~ 30	0.050 5
	30 ~ 40	0.049 5
坡顶 CK	0 ~ 10	0.044 9
	10 ~ 20	0.044 7
	20 ~ 30	0.044 4
	30 ~ 40	0.044 1
坡中 CK	0 ~ 10	0.044 7
	10 ~ 20	0.044 5
	20 ~ 30	0.044 1
	30 ~ 40	0.043 8
坡脚 CK	0 ~ 10	0.044 5
	10 ~ 20	0.044 3
	20 ~ 30	0.043 7
	30 ~ 40	0.043 3

面部位,土壤可蚀性 K 值均呈明显上升趋势。具体而言:当土层分别介于 0 ~ 10、10 ~ 20、20 ~ 30、30 ~ 40 cm 时,沉陷区坡顶部位土壤可蚀性 K 值的增幅依次为 22.49%、22.37%、20.50%、19.05%。当土层分别介于 0 ~ 10、10 ~ 20、20 ~ 30、30 ~ 40 cm 时,沉陷区坡中部位土壤可蚀性 K 值的增幅依次为 20.58%、20.67%、19.05%、18.95%。当土层分别介于 0 ~ 10、10 ~ 20、20 ~ 30、30 ~ 40 cm 时,沉陷区坡脚部位土壤可蚀性 K 值的增幅依次为 17.30%、16.03%、15.56%、14.32%。以上数据均达到显著差异($p < 0.05$)。由此可见:① 开采沉陷会产生增加坡顶、坡中、坡脚部位土壤可蚀性 K 值的效应,且随着土层深度的减小,坡顶、坡中、坡脚部位土壤可蚀性 K 值逐渐增大,沉陷区坡面土壤可蚀性 K 值的大小:坡顶 > 坡中 > 坡脚;② 考虑入渗特性计算的沉陷坡面周围土壤可蚀性 K 值变化幅度比不考虑时^[32] 放大了 33.42% ~ 44.99%。

由表 2、图 5 知,相较于对照组:无论在何坡

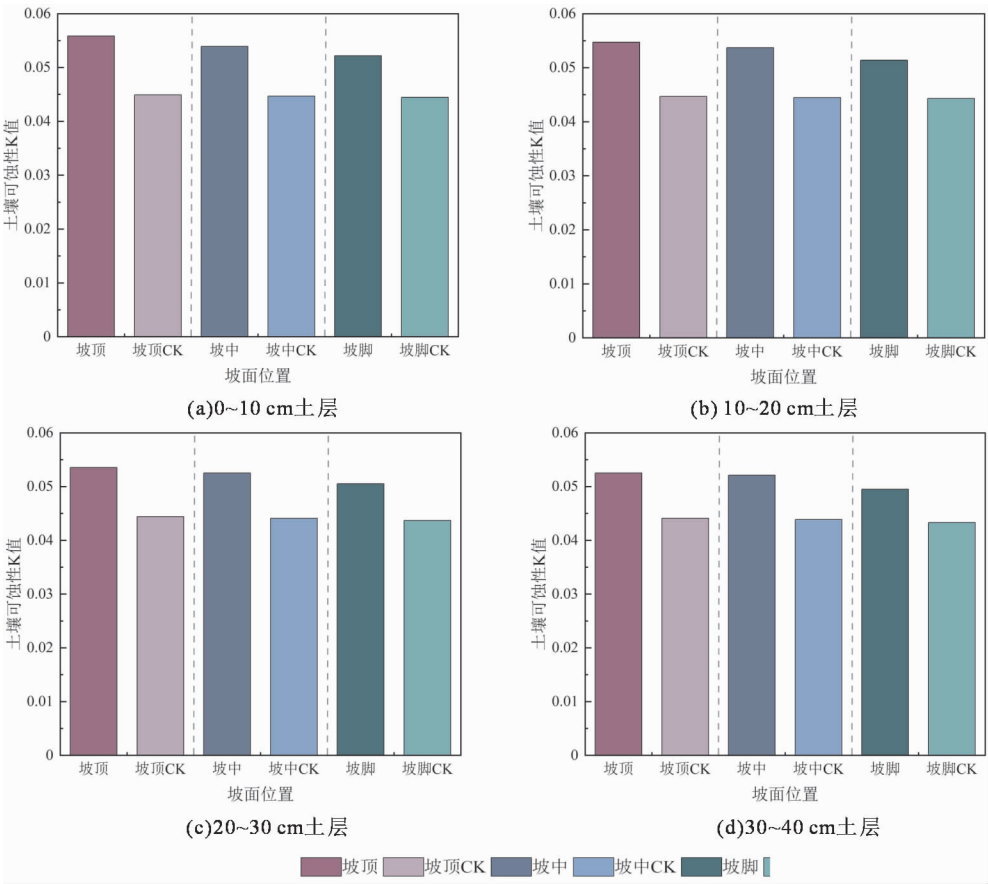


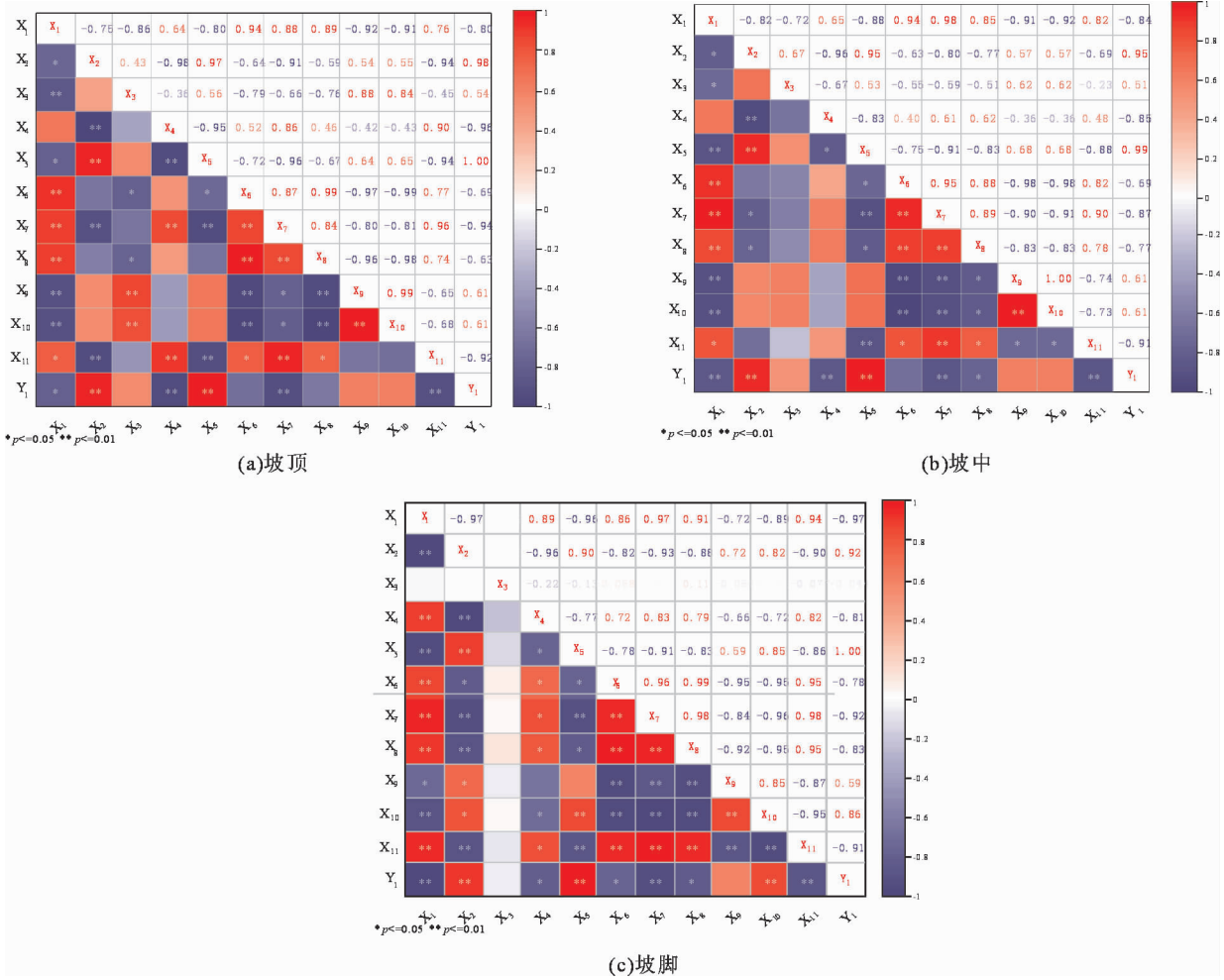
图 5 不同坡面部位土壤可蚀性 K 值变化图

Fig. 5 Variation in soil erodibility K values at different slope positions

3.3 沉陷坡面土壤理化性质与可蚀性 K 值相关性分析

根据表 1 数据绘制了坡顶、坡中、坡脚部位周

围区域土壤理化性质与可蚀性 K 值相关性分析,如图 6 所示。



注:图中 X_1 为土壤 <0.002 mm 黏粒含量,%; X_2 为 $0.002 \sim 0.05$ mm 粉粒含量,%; X_3 为 $0.05 \sim 0.1$ mm 极细砂粒含量,%; X_4 为 $0.1 \sim 2.0$ mm 砂粒含量,%; X_5 为孔隙度,%; X_6 为含水率,%; X_7 为有机质质量分数, g kg^{-1} ; X_8 为 >0.25 mm 水稳性团聚体含量,%; X_9 为入渗速率, $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$; X_{10} 为累积渗透量, mL; X_{11} 为饱和导水率 (K_s), $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$; Y_1 为可蚀性 K 值, $\text{t} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h} / (\text{hm}^2 \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm})$ 。

图 6 不同坡面部位土壤理化性质与可蚀性 K 值相关性分析

Fig. 6 Correlation analysis between soil physicochemical properties and erodibility K values at different slope positions

由图 6 可知,坡顶部位周围土壤(土层深 $0 \sim 40$ cm)可蚀性 K 值与粉粒、极细砂粒、孔隙度、入渗速率、累积渗透量 5 个变量均呈正相关,相关系数依次为 $0.98(p < 0.01)$ 、 0.54 、 $1.00(p < 0.01)$ 、 0.61 、 0.61 ;与黏粒、砂粒、含水率、有机质、 >0.25 mm 水稳性团聚体、饱和导水率(K_s) 6 个变量均呈负相关,相关系数依次为 $-0.80(p < 0.05)$ 、 $-0.96(p < 0.01)$ 、 -0.69 、 $-0.94(p < 0.01)$ 、 0.63 、 $-0.92(p < 0.01)$;呈相关的变量相关系数绝对值大小排序依次为孔隙度 $>$ 粉粒 $>$ 砂粒 $>$ 有机质 $>$ 饱和导水率(K_s) $>$ 黏粒 $>$ 含水率 $>$ 水稳性团聚体(>0.25 mm) $>$ 入渗速率 $>$ 累积渗透量 $>$ 极细砂粒。

坡中部位周围土壤(土层深 $0 \sim 40$ cm)可蚀性 K 值与粉粒、极细砂粒、孔隙度、入渗速率、累积渗透量 5 个变量均呈正相关,相关系数依次为 $0.95(p < 0.01)$ 、 0.51 、 $0.99(p < 0.01)$ 、 0.61 、 0.61 ;与黏粒、砂粒、含水率、有机质、 >0.25 mm 水稳性团聚体、饱和导水率(K_s) 6 个变量均呈极显著负相关,相关系数依次为 $-0.84(p < 0.01)$ 、 $-0.85(p < 0.01)$ 、 -0.69 、 $-0.87(p < 0.01)$ 、 $-0.77(p < 0.05)$ 、 $-0.91(p < 0.01)$;呈相关的变

量相关系数绝对值大小排序依次为孔隙度 > 粉粒 > 饱和导水率(K_s) > 有机质 > 砂粒 > 黏粒 > 水稳性团聚体(>0.25 mm) > 含水率 > 入渗速率 > 累积渗透量 > 极细砂粒。

坡脚部位周围土壤(土层深 0 ~ 40 cm)可蚀性 K 值与粉粒、孔隙度、入渗速率、累积渗透量 4 个变量均呈极显著正相关,相关系数依次为 0.92 ($p < 0.01$)、1.00 ($p < 0.01$)、0.59、0.86 ($p < 0.01$);与黏粒、砂粒、含水率、有机质、>0.25 mm 水稳性团聚体、饱和导水率(K_s) 6 个变量均呈显著负相关,相关系数依次为 -0.97 ($p < 0.01$)、-0.81 ($p < 0.05$)、-0.78 ($p < 0.05$)、-0.92 ($p < 0.01$)、0.83 ($p < 0.05$)、-0.91 ($p < 0.01$);呈显著相关的变量相关系数绝对值大小排序依次为:孔隙度 > 黏粒 > 粉粒 > 饱和导水率(K_s) > 有机质 > 累积渗透量 > 水稳性团聚体(>0.25 mm) > 砂粒 > 含水率 > 入渗速率。

由上述相关性评价结果分析可知:按照相关系数超过 0.9 为筛选依据^[33],坡顶部位周围土壤(土层深 0 ~ 40 cm)可蚀性 K 值与粉粒、砂粒、孔隙度、有机质、饱和导水率(K_s) 5 个指标显著相关;坡中部位周围土壤(土层深 0 ~ 40 cm)可蚀性 K 值与粉粒、孔隙度、饱和导水率(K_s) 3 个指标显著相关;坡脚部位周围土壤(土层深 0 ~ 40 cm)可蚀性 K 值与黏粒、粉粒、孔隙度、有机质、饱和导水率(K_s) 5 个指标显著相关。

4 讨论

煤炭开采活动通过多维度机制重塑表生带土壤系统功能:沉陷坡面驱动土壤骨架重构,诱发孔隙网络扩展与胶结弱化^[34],形成三相介质的异常运移通道,具体表现为包气带结构异化引发的水分入渗通道和土壤水分蒸发面积增加,导致沉陷区包气带土壤水分剧烈蒸发^[35];水合作用衰减与胶体稳定性阈值下降促使微颗粒在“聚沉效应”作用下聚集成较大颗粒^[36],加速土壤中细黏粒的流失,而团聚体离散化引发的土壤颗粒间连接衰减,进一步导致孔隙度提升和渗透性指标(入渗速率、累积渗透量、饱和导水率(K_s))跃升;沉陷坡面显著改变了土壤的孔隙度,此过程不仅损伤了植物根系的生长环境,影响其根系形态和功能,还破坏了微生物适宜的生活环境,打破原有群落结构关系^[37-38],更关键地是抑制了微生物的生长

繁殖,减少了由于微生物作用而产生的腐殖质^[39],导致土壤黏粒质量分数和有机质含量减少^[40],土壤粉粒、极细砂粒质量分数和饱和导水率(K_s)增加;采煤沉陷区内部地表变形连续性差,具有“跑水”“失土”的侵蚀特征^[30],沉陷区黄土坡面土壤微小粒径颗粒和胶体结合态养分等在水蚀作用下,沿着黄土坡面向沟道沟谷迁移,直至进入周边地表径流而流失,这可能是造成不同沉陷坡面土壤入渗速率、累计渗透量、饱和导水率(K_s)、可蚀性 K 值相较于对照组增高的重要原因之一。

沉陷坡面坡顶、坡中、坡脚部位呈现差异化的形变响应机制,其坡顶的“拉张效应”^[41]、坡中的“变陡效应”^[42]与坡脚的“挤压效应”^[43]通过改变土壤结构与侵蚀动力学条件,形成梯度式土壤可蚀性 K 值空间分异特征。在气候、植被及水土保持措施等背景因子稳定的前提下,采动地形重塑及其伴生的土壤质量演变是主导 K 值变异的关键驱动因子^[44]:坡顶部位因“拉张效应”诱发有机质流失与根土复合体解构,导致土壤团聚体的稳定性减弱^[45],以致坡顶部位土壤可蚀性 K 值明显增加;坡中部位虽因坡度陡化削弱植被覆盖度,但土壤黏粒含量下降^[46],形成的粗骨性基质显著强化了抗迁移能力,使 K 值增幅控制在 22.49% 以内;坡脚部位受双向挤压作用维持了与参照区相近的机械组成与有机质水平,这可能是造成沉陷坡面土壤可蚀性 K 值的大小:坡顶 > 坡中 > 坡脚的重要原因之一。

5 结论

1) 不同沉陷坡面部位土壤入渗速率均随时间的变化呈现出瞬变阶段(0 ~ 3 min)、渐变阶段(3 ~ 60 min)及稳定阶段(60 ~ 110 min)3 个阶段的动态变化过程;在相同土层深度下,开采沉陷会产生显著提高坡顶、坡中、坡脚部位土壤入渗速率、累积渗透量、饱和导水率(K_s)的效应,平均增幅分别介于 13.41% ~ 52.51%、22.25% ~ 26.84%、21.86% ~ 26.67%,该效应随着土层深度的减小而增强;沉陷区坡面入渗速率、累积渗透量、饱和导水率(K_s):坡顶 > 坡中 > 坡脚。

2) 不同沉陷坡面部位土壤会产生显著提高周围土壤可蚀性 K 值的效应,该效应随着土层深度的减小而增强,平均增幅介于 15.78% ~

21.63%;在相同土层深度下,沉陷坡面土壤可蚀性 K 值的大小:坡顶>坡中>坡脚;沉陷坡面周围土壤考虑入渗特性计算的可蚀性 K 值变化幅度比不考虑时放大了33.42%~44.99%。

3)基于多个维度土壤理化及入渗特性与可蚀性 K 值的相关性分析,坡顶部位土壤可蚀性 K 值与粉粒、砂粒、孔隙度、有机质、饱和导水率(K_s);坡中部位土壤可蚀性 K 值与粉粒、孔隙度、饱和导水率(K_s);坡脚部位土壤可蚀性 K 值与黏粒、粉粒、孔隙度、有机质、饱和导水率(K_s)显著相关。

参考文献

[1] 王双明,申艳军,宋世杰,等.“双碳”目标下煤炭能源地位变化与绿色低碳开发[J].煤炭学报,2023,48(7):2599-2612.
WANG S M, SHEN Y J, SONG S J, et al. Change of coal energy status and green and low-carbon development under the "dual carbon" goal[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(7): 2599-2612.

[2] 国家统计局. 中华人民共和国2024年国民经济和社会发展统计公报[EB/OL]. (2025-01-17)[2025-03-10]. https://www.stats.gov.cn/xxgk/jd/sjjd2020/202501/t20250117_1958342.html.

[3] 宋世杰,张家杰,杨帅,等.黄河上中游采煤沉陷区水土流失效应的探索与思考[J].绿色矿山,2024,2(2):169-182.
SONG S J, ZHANG J J, YANG S, et al. Exploration and thinking on soil erosion effect of coal mining subsidence area in the upper and middle reaches of the Yellow River[J]. Journal of Green Mine, 2024, 2(2): 169-182.

[4] 中国政府网. 习近平主持召开全面推动黄河流域生态保护和高质量发展座谈会强调:以进一步全面深化改革为动力 开创黄河流域生态保护和高质量发展新局面[EB/OL]. (2024-09-12)[2025-03-10]. https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202409/content_6974190.htm.

[5] 刘宇,宋进喜,邢璐通,等.黄土高原植被变化对土壤侵蚀的影响[J].西北大学学报(自然科学版),2024,54(3):398-412.
LIU Y, SONG J X, XING L T, et al. The impact of vegetation changes on soil erosion in the Loess Plateau[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2024, 54(3): 398-412.

[6] 张发旺,侯新伟,韩占涛,等.采煤塌陷对土壤质量的影响效应及保护技术[J].地理与地理信息科学,

2003,19(3):67-70.
ZHANG F W, HOU X W, HAN Z T, et al. Impact of coal mining subsidence on soil quality and some protecting technique for the soil quality[J]. Geography and Geo-Information Science, 2003, 19(3): 67-70.

[7] JI H Y, HUAI X W, ZE L Q, et al. A global meta-analysis of coal mining studies provides insights into the hydrologic cycle at watershed scale[J]. Journal of Hydrology, 2023, 617: 129023

[8] 王晓峰,常俊杰,余正军,等.基于RUSLE的土壤侵蚀量研究:以南水北调中线陕西水源区为例[J].西北大学学报(自然科学版),2010,40(3):545-549.
WANG X F, CHANG J J, YU Z J, et al. Research on water district of soil erosion based on RUSLE: Take the South. North Diversion Middle Route Project in Shaanxi for example[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2010, 40(3): 545-549.

[9] FARHAD H M F. Impact of coal mining on soil, water and agricultural crop production: A case study of Barapukuria coal mine area, Bangladesh[J]. Environmental Challenges, 2022, 7: 100484.

[10] 魏婷婷,胡振琪,曹远博,等.风沙区煤炭开采对土壤物理性质和结皮的影响[J].水土保持通报,2015,35(2):106-110.
WEI T T, HU Z Q, CAO Y B, et al. Effect of coal mining on soil physical properties and soil crust in windy desert area[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015, 35(2): 106-110.

[11] 王平,王金满,秦倩,等.黄土区采煤塌陷对土壤水力特性的影响[J].水土保持学报,2016,30(3):297-304.
WANG P, WANG J M, QIN Q, et al. Effects of land subsidence on soil hydraulic properties in mining area of the loess plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(3): 297-304.

[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 S J, SUN T, ZHENG B B, 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] 林芳,朱兆龙,曾全超,等.延河流域三种土壤可蚀性 K 值估算方法比较[J].土壤学报,2017,54(5):1136-1146.
LIN F, ZHU Z L, ZENG Q C, et al. Comparative

- study of three different methods for estimation of soil erodibility K in Yanhe Watershed of China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(5): 1136-1146.
- [14] 蒙雯洋,饶良懿. 砒砂岩覆土区典型小流域土壤可蚀性 K 值空间变异特征[J]. *水土保持研究*, 2024, 31(3): 10-19.
- MENG W Y, RAO L Y. Spatial Variability of soil erodibility factor K of the typical small watershed in the soil covered area of pisha sandstone region[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024, 31(3): 10-19.
- [15] 李宁宁,张光辉,王浩,等. 黄土丘陵沟壑区生物结皮对土壤抗蚀性能的影响[J]. *中国水土保持科学*, 2020, 18(1): 42-48.
- LI N N, ZHANG G H, WANG H, et al. Soil anti-erodibility influenced by biological crusts in Loess Hilly and Gully Region[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2020, 18(1): 42-48.
- [16] 张发旺,赵红梅,宋亚新,等. 神府东胜矿区采煤塌陷对水环境影响效应研究[J]. *地球学报*, 2007(6): 521-527.
- ZHANG F W, ZHAO H M, SONG Y X, et al. The effect of coal-mining subsidence on water environment in the Shenfu Dongsheng mining area[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2007(6): 521-527.
- [17] 石学瑾,张彪,郭家龙,等. 黄土高原典型小流域土壤侵蚀时空演变[J]. *地理学报*, 2024, 79(7): 1787-1803.
- SHI X J, ZHANG B, GUO J L, et al. Spatial-temporal evolution of soil erosion in a typical watershed of the Loess Plateau[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2024, 79(7): 1787-1803.
- [18] 吴群英,胡俭,刘凯,等. 浅埋多煤层群协调绿色开采关键技术研发与实践[J]. *煤炭科学技术*, 2024, 52(9): 19-30.
- WU Q Y, HU J, LIU K, et al. Research and practice on key technologies for coordinated green mining of shallowly buried multi-coal seam groups[J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(9): 19-30.
- [19] 王帅红,孙泰森,周伟,等. 黄土丘陵沟壑区煤矿沉陷耕地复垦[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(9): 299-304.
- WANG S H, SUN T S, ZHOU W, et al. Reclamation of coal mine subsidence area in loess hilly and gully regions[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(9): 299-304.
- [20] 宋世杰,杜麟,王双明,等. 陕北采煤沉陷区不同沉陷年限黄土坡面土壤可蚀性的变化规律[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(2): 289-299.
- SONG S J, DU L, WANG S M, et al. Variation of soil erodibility on loess slope under various subsidence years in coal mining subsidence area located Northern Shaanxi[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(2): 289-299.
- [21] KLUTE A, DIRKSEN C. Hydraulic conductivity of saturated soils: Field methods[M] // AMOOZEGAR A, WARRICK A W. *Methods of Soil Analysis: Part 1-Physical and Mineralogical Methods*. Book Series: SSSA Book Series, 1986.
- [22] 陈立新. 土壤实验实习教程[M]. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 2005: 59-62.
- [23] USDA-Agricultural Research Service. Revised universal soil loss equation Version 2 [M/OL]. (2008-12-28) [2025-03-10]. <http://www.ars.usda.gov/Research/docs.htm?docid=6010>.
- [24] Science and Education Administration United States Department of Agriculture in cooperation with Purdue Agricultural Experiment Station. Predicting rainfall erosion losses [M/OL]. <https://www.ars.usda.gov/southeast-area/oxford-ms/national-sedimentation-laboratory/watershed-physical-processes-research/research/rusle2/>.
- [25] 毕银丽,刘京,尚建选,等. 陕北采煤沉陷区土壤水分入渗和蒸发特征研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2022, 51(5): 839-849, 862.
- BI Y L, LIU J, SHANG J X, et al. Study on the characteristics of soil moisture infiltration and evaporation in the coal mining subsidence area of coal mines in northern Shaanxi[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2022, 51(5): 839-849, 862.
- [26] 王道祥,李建兴,王建文,等. 耕作模式对红壤坡耕地典型作物不同生育期土壤入渗特性的影响[J]. *贵州师范大学学报(自然科学版)*, 2024, 42(4): 44-52.
- WANG D X, LI J X, WANG J W, et al. The influence of tillage measures on soil infiltration characteristics at different growth stages of typical crops in red soil slopes farmland[J]. *Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences)*, 2024, 42(4): 44-52.
- [27] 刘爽,朱沁,王晓婷,等. 冬季覆盖作物对表层黑土渗透性能的影响[J]. *土壤通报*, 2024, 55(5): 1248-1257.
- LIU S, ZHU Q, WANG X T, et al. Effect of winter mulching crops on permeability of surface black soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2024, 55(5): 1248-1257.

- [28] 潘振辉,李萍,肖涛. 黄土水分入渗规律的数值模拟研究[J]. 西北大学学报(自然科学版),2021,51(3):470-484.
- PAN Z H, LI P, XIAO T. The law of water infiltration in loess based on numerical simulation[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2021, 51(3): 470-484.
- [29] 李团胜,史小惠,康欢欢,等. 榆林地区水土流失敏感性时空特征[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2016,46(2):271-276.
- LI T S, SHI X H, KANG H H, et al. Spatial-temporal characteristics of sensitivity to soil and water loss in Yulin, China [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2016, 46(2): 271-276.
- [30] LI X, XIAOYU L, GIOVANNI V, et al. Aggregate fractions shaped molecular composition change of soil organic matter in a rice paddy under elevated CO₂ and air warming[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2021, 159: 108289.
- [31] 于寒青,李勇,金发会,等. 黄土高原植被恢复提高大于0.25 mm 粒级水稳性团聚体在土壤增碳中的作用[J]. 植物营养与肥料学报,2012,18(4):876-883.
- YU H Q, LI Y, JIN F H, et al. The role of increasing soil water-stable aggregates with diameter > 0.25 mm by vegetation restoration in enhancement of soil organic carbon in the Loess Plateau[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2012,18(4): 876-883.
- [32] WILLIAMS J R, RENARD K G, DYKE P T. EPIC: A new method for assessing erosion's effect on soil productivity [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1983, 38(5): 381-383.
- [33] KAISER H F, RICE J. Little jiffy, mark IV[J]. Educational and Psychological Measurement, 1974, 34(1): 111-117.
- [34] 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(S2):691-703.
- SONG S J, SUN T, DU L, et al. Effects of mining ground fissures of different shapes on soil erodibility in Northern Shaanxi coal mining area[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(S2): 691-703.
- [35] 高丽倩,赵允格,秦宁强,等. 黄土丘陵区生物结皮对土壤可蚀性的影响[J]. 应用生态学报,2013,24(1):105-112.
- GAO L Q, ZHAO Y G, QIN N Q, et al. Effects of biological soil crust on soil erodibility in Hilly Loess Plateau Region of Northwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(1): 105-112.
- [36] 蒋太明. 降水入渗与土壤水分动态模型研究进展[J]. 贵州农业科学,2005(S1):83-88.
- JIANG T M. Research Progress of the model of rainfall infiltration and soil water regime[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2005(S1): 83-88.
- [37] 李叶鑫,王道涵,吕刚,等. 煤矿区土体裂缝特征及其生态环境效应研究进展[J]. 生态学杂志,2018, 37(12):3769-3779.
- LI Y X, WANG D H, LYU G, et al. A review of soil mass cracks characteristics and their eco-environmental effects in coal mining area[J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(12): 3769-3779.
- [38] 杜涛,毕银丽,邹慧,等. 地表裂缝对沙柳根际微生物和酶活性的影响[J]. 煤炭学报,2013,38(12): 2221-2226.
- DU T, BI Y L, ZOU H, et al. Effects of surface cracks caused by coal mining on microorganisms and enzyme activities in rhizosphere of *Salix psammophila* [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(12): 2221-2226.
- [39] SCHMIDT M W I, TORN M S, ABIVEN S, et al. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property[J]. Nature, 2011, 478(7367): 49-56.
- [40] ZHENG W, MORRIS E K, RILLING M C. Ectomycorrhizal fungi in association with *Pinus sylvestris* seedlings promote soil aggregation and soil water repellency [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2014, 78: 326-331.
- [41] 毕银丽,邹慧,彭超,等. 采煤沉陷对沙地土壤水分运移的影响[J]. 煤炭学报,2014,39(S2):490-496.
- BI Y L, ZOU H, PENG C, et al. Effects of mining subsidence on soil water movement in sandy area[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(S2): 490-496.
- [42] 宋世杰,赵晓光,张勇,等. 采深对煤矿沉陷区坡面形态及侵蚀的影响分析[J]. 环境科学与技术, 2016,39(8):178-184.
- SONG S J, ZHAO X G, ZHANG Y, et al. Analyzing the effect of the mining depth on the shape and erosion of surface slope in coal mining area[J]. Environmental Science & Technology, 2016, 39(8): 178-184.
- [43] 贾伦. 红柳林煤矿地表变形规律研究[D]. 西安:西安科技大学,2019.
- [44] 靳灵娜,党晓宏,高永,等. 库布齐沙漠北缘机械沙障对地表土壤可蚀性的影响[J]. 水土保持通报, 2021,41(3):50-55.
- JIN L N, DANG X H, GAO Y, et al. Effects of me-

- chanical sand barriers on soil erodibility on Northern Edge of Kubuqi Desert[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(3): 50-55.
- [45] 刘钊,韩磊,王丹月,等. 陕北黄土高原煤矿区土壤理化性质及质量评价[J]. 煤炭学报, 2021,46(5): 1555-1564.
- LIU Z, HAN L, WANG D Y, et al. Soil physico-chemical properties and quality assessment in the coal mininoarea of Loess Plateau in Northern Shaanxi Province [J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(5): 1555-1564.
- [46] GLASER B, LEHMANN J, ZECH W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal-a review[J]. Biology and fertility of soils, 2002, 35(4): 219-230.
- (编 辑 亢小玉)

作者简介



宋世杰,男,博士(师从中国工程院王双明院士),西安科技大学副教授,硕士研究生导师。秦岭生态保护青年学者,“三秦学者创新团队”骨干成员,中国煤炭工业“西部煤炭绿色智能开采地质保障创新团队”骨干成员,2024 年 CNKI 高被引学者(TOP 1%),国家绿色矿山青年科技奖、陕西省优秀博士学位论文奖、陕西省煤炭工业优秀科技工作者、西安科技大学徐精彩青年教师奖等荣誉称号获得者,陕西省发改委、科技厅、生态环境厅入库专家。兼任《绿色矿山》编委,《西北大学学报(自然科学版)》《煤炭科学技术》《煤田地质与勘探》《中国矿业大学学报》《矿业科学学报》《地球科学与环境学报》《矿业安全与环保》等期刊青年编委。主要从事矿山地质环境保护与生态修复方面的教学科研工作。主持国家自然科学基金、宁夏重点研发计划重点项目、陕西省重点研发计划项目、深部煤炭安全开采与环境保护全国重点实验室开放基金、陕西省煤炭绿色开发地质保障重点实验室重点基金、咸阳市重点研发计划项目等纵横向项目 30 余项。获省部级科技成果二等奖 2 项、厅局级科技成果一等奖 2 项。出版学术专著 3 部,发表 ESI、SCI、EI 高水平学术论文 30 篇。获发明专利 4 项、实用新型专利 15 项、软件著作权 5 项。制定国家标准 1 项。