

黄河中游陕北煤矿区采动地裂缝对土壤入渗特性的影响及其侵蚀效应

宋世杰^{1,2,3,4}, 成 星^{1,2,3}, 王双明^{1,2,3}, 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采动地裂缝的水土流失效应, 对于陕北煤矿区生态环境保护与高质量发展具有重要意义。以陕北柠条塔井田北翼典型采动地裂缝发育区内宽度 0~10、10~20、20~30 cm 的采动地裂缝周围土壤(水平距离 80 cm 以内、垂直深度 20 cm 以浅)为研究对象, 利用定水头法和仪器分析法分别测定土壤入渗速率、累积渗透量、饱和导水率(K_s)、有机质、机械组成、 >0.25 mm 水稳性团聚体含量, 揭示了采动地裂缝对土壤入渗特性的影响规律, 基于 RUSLE2 模型计算阐明了考虑入渗特性的采动地裂缝小空间尺度上的土壤侵蚀效应。结果表明: ① 采动地裂缝周围土壤的入渗速率随时间变化而呈现出瞬变(0~3 min)、渐变(3~60 min)及稳定(60~110 min)3 个阶段的动态变化过程; ② 采动地裂缝发育提高土壤 K_s 的效应最显著, 平均增幅为 60.63%, 该效应随采动地裂缝宽度的增大和距裂缝水平距离的减小而增强; ③ 土壤累积入渗量和 K_s 与极细砂粒呈极显著正相关($p < 0.01$), 而与黏粒、有机质则呈极显著负相关($p < 0.01$), 与 >0.25 mm 水稳性团聚体也呈显著负相关($p < 0.05$); ④ 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 1.12~2.13 倍; 基于指数函数构建了不同宽度采动地裂缝影响周围土壤入渗速率和可蚀性 K 值作用范围的预测模型, 发现当距采动地裂缝水平距离分别超过 226、157 cm 时, 采动地裂缝增大周围土壤入渗速率及可蚀性的效应基本消失, 其可作为黄河中游陕北黄土采动地裂缝发育区水土流失效应的精准防控靶区。

关键词: 采动地裂缝; 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 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2025)02-1231-15

Influence of mining-induced ground fissures on soil infiltration characteristics and its erosion effect in coal mining area of northern Shaanxi in the middle reaches of the Yellow River

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

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

收稿日期: 2024-11-29 策划编辑: 韩晋平 责任编辑: 宫在芹 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.XH24.1484

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(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资助项目(HNKY2024YB402); 咸阳市重点研发计划资助项目(L2024-ZDYF-ZDYF-SF-0069)

作者简介: 宋世杰(1983—), 男, 山东济南人, 副教授, 博士。E-mail: kkkbfff@163.com

引用格式: 宋世杰, 成星, 王双明, 等. 黄河中游陕北煤矿区采动地裂缝对土壤入渗特性的影响及其侵蚀效应[J]. 煤炭学报, 2025, 50(2): 1231-1245.

SONG Shijie, CHENG Xing, WANG Shuangming, et al. Influence of mining-induced ground fissures on soil infiltration characteristics and its erosion effect in coal mining area of northern Shaanxi in the middle reaches of the Yellow River[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(2): 1231-1245.



移动阅读

Abstract: Cracking the soil and water loss effects of mining-induced surface fissures in the coal mining area of the middle reaches of the Yellow River is of great significance for ecological environment protection and high-quality development in the coal mining region of northern Shaanxi. Taking the soil around the mining-induced ground fissures with widths of 0–10, 10–20, 20–30 cm (within 80 cm in horizontal distance and shallower than 20 cm in vertical depth) in the typical mining-induced ground fissure development area in the north wing of Ningtiaota mine field in northern Shaanxi as the research object, the soil infiltration rate, cumulative infiltration, saturated hydraulic conductivity (K_s), organic matter, mechanical composition and > 0.25 mm water-stable aggregates were measured by constant head method and instrument analysis method, respectively. The influence of mining-induced ground fissures on soil infiltration characteristics was revealed. Based on the RUSLE2 model calculation, the soil erosion effect on the small spatial scale of mining-induced ground fissures considering infiltration characteristics is clarified. The results showed that: ① The infiltration rate of soil around the mining-induced fissures exhibits a dynamic variation process over time, characterized by three stages: transient (0–3 min), gradual (3–60 min), and stable (60–110 min). ② The effect of mining-induced ground fissure development on soil K_s is the most significant, with an average increase of 60.63%. This effect increases with the increase of mining-induced ground fissure width and the decrease of horizontal distance from ground fissure. ③ Soil cumulative infiltration and K_s were significantly positively correlated with very fine sand ($p < 0.01$), but significantly negatively correlated with clay and organic matter ($p < 0.01$), and significantly negatively correlated with > 0.25 mm water-stable aggregates ($p < 0.05$). ④ The variation range of erodibility K -value calculated by considering infiltration characteristics is 1.12–2.13 times larger than that without considering infiltration characteristics. Based on the exponential function, the prediction model of the influence range of mining-induced ground fissures with different widths on the infiltration rate and erodibility K -value of the surrounding soil was constructed. It was found that when the horizontal distance from the mining-induced ground fissures exceeded 226 cm and 157 cm, respectively, the effect of mining-induced ground fissures on increasing the infiltration rate and erodibility of the surrounding soil basically disappeared. It can be used as a precise prevention and control target area for soil erosion in the loess mining-induced ground fissure development area in the middle reaches of the Yellow River.

Key words: mining ground cracks; soil infiltration characteristics; soil erosion effect; RUSLE2 model; Northern Shaanxi coal mine area

0 引 言

在“双碳”目标的驱动下,煤炭在我国能源经济安全中“压舱石”和“稳定器”的重要地位逐渐加强^[1]。2023 年我国原煤总产量达 47.1 亿 t,同比增长 3.4%^[2]。随着东部浅部煤炭资源趋于枯竭,西部尤其是黄河中游逐渐成为我国煤炭生产的关键接续地,现辖 6 个国家级大型煤炭基地^[3]。然而,黄河中游作为我国重要的生态安全屏障,生态本底脆弱、自然水土流失严重,必然受到规模化煤炭开采活动的严重冲击。陕北矿区作为黄河中游典型且特色鲜明的煤炭主产区,在地理空间上与黄河多沙粗砂国家级水土流失重点治理区几乎完全重叠,大规模高强度的地下开采会导致一系列采动损害问题,并最终加剧了水土流失,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^[4]。这既不符合习近平总书记关于黄河流域生态文明建设的重要指示精神,也不符合《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》对“黄河中游突出抓好水

土保持工作”的要求^[5]。因此,2024 年 9 月 12 日,习近平总书记在全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^[6]。

采煤沉陷区因显著的地表变形和多样的采动损害形式,对区域水土流失产生了严重影响。以致得到国内外相关学者的高度关注,并取得了一批有价值的研究成果。张发旺等^[7]通过文献分析,探讨了采煤塌陷区对周围土壤构型、土壤物理性质、土壤水分、土壤养分的影响效应,发现采煤塌陷在降低土壤质量的同时也加剧了水土流失;SONI 等^[8]通过实地调查,研究了印度 Kamptee 煤矿开采对土壤质量的影响,发现采煤沉陷会严重恶化土壤质量,引起土壤侵蚀;HOW-LADAR 等^[9]通过野外调查,研究了孟加拉 Barapukuria 煤矿区各种环境因素的现状,发现煤矿开采区土壤的入渗性能较弱,从而导致了水土流失的加剧;胡振琪等^[10]通过样地调查和室内分析,研究发现了大柳塔煤矿采煤对风沙区土壤物理性质和结皮的破坏效应,

增强了水土流失;陈超等^[11]通过文献分析,阐释了陕北矿区采动地裂缝具有显著提升水土流失的效应;王平等^[12]通过野外调查采样和实验室分析,以山西省平朔矿区为研究对象,发现采煤塌陷严重影响了土壤水分特征曲线和饱和导水率,增加了土壤侵蚀的可能性;毕银丽等^[13]通过对补连塔矿区采动地裂缝的定点定位跟踪监测,研究了不同裂缝宽度和土层深度对土壤水分的影响,发现采动地裂缝发育加剧了水土流失效应;王双明等^[14]通过野外采样和室内试验,以柠条塔井田北翼采动地裂缝发育区为研究对象,基于 EPIC 模型计算发现采动地裂缝发育显著提高了土壤潜在侵蚀能力。以上成果虽然对于丰富采煤沉陷区的水土流失效应研究具有重要价值,但在土壤入渗与土壤侵蚀能力联动方面尚需进一步深化。

土壤可蚀性是土壤潜在侵蚀能力的集中体现,可用 K 值量化表征。计算该值的常用模型有 EPIC 模型、Shirazi 模型、Torri 模型,虽各有优势和特点,但均未考虑土壤入渗特性因素和作用。然而,土壤入渗特性是衡量土壤水源涵养和潜在侵蚀能力的关键指标,土壤持水保水能力的强弱,影响土壤中植物根系性状、细黏粒含量、微生物活性和化学物质运移等过程,其直接关系土壤机械组成和有机质含量,并最终影响土壤抗侵蚀能力^[15]。陕北煤矿区所在区域的自然水土流失主要是由少数暴雨所致,已被前人反复证实^[16]。而研究考虑土壤入渗特性的土壤侵蚀效应更加符合陕北矿区的实际特征。鉴于此,以黄河中游陕北煤矿区采动地裂缝周围土壤(裂缝宽度 0~30 cm + 土层

深 0~20 cm + 水平距离 0~80 cm) 为研究对象,采用考虑土壤入渗特性的 RUSLE2 模型计算土壤可蚀性 K 值,探讨并阐明采动地裂缝发育对周围土壤入渗特性及可蚀性的影响,以期为黄河流域陕北采煤沉陷区土壤侵蚀效应的防控提供科学依据。

1 研究区概况

研究区位于黄河中游陕北矿区柠条塔井田,地理坐标为 E109°40'~110°54', N38°13'~39°27', 该区域地处陕北黄土高原北部,毛乌素沙地东南边缘地带,井田分南、北两翼。北翼属典型的黄土沟壑地貌,地形起伏多变(图 1)。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 194.7~531.6 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法^[17],采动地裂缝通常沿着工作面的方向显著发育,并多以直线或弧形分布。其中,宽度介于 0~30 cm、长度约为 50 m 的采动地裂缝数量最多,占总数的 60% 以上^[18]。

2 材料与方法

2.1 样品采集

选取柠条塔井田北翼具有代表性的采煤沉陷区作为样品采集地点,其中心坐标为 E110°18'71", N39°08'79"。区内黄土沉陷坡面倾向为西南方向(与地下工作面推进方向基本保持一致),坡度平均达到 19°,坡面长度平均为 55 m,坡形为均匀坡,坡面上植

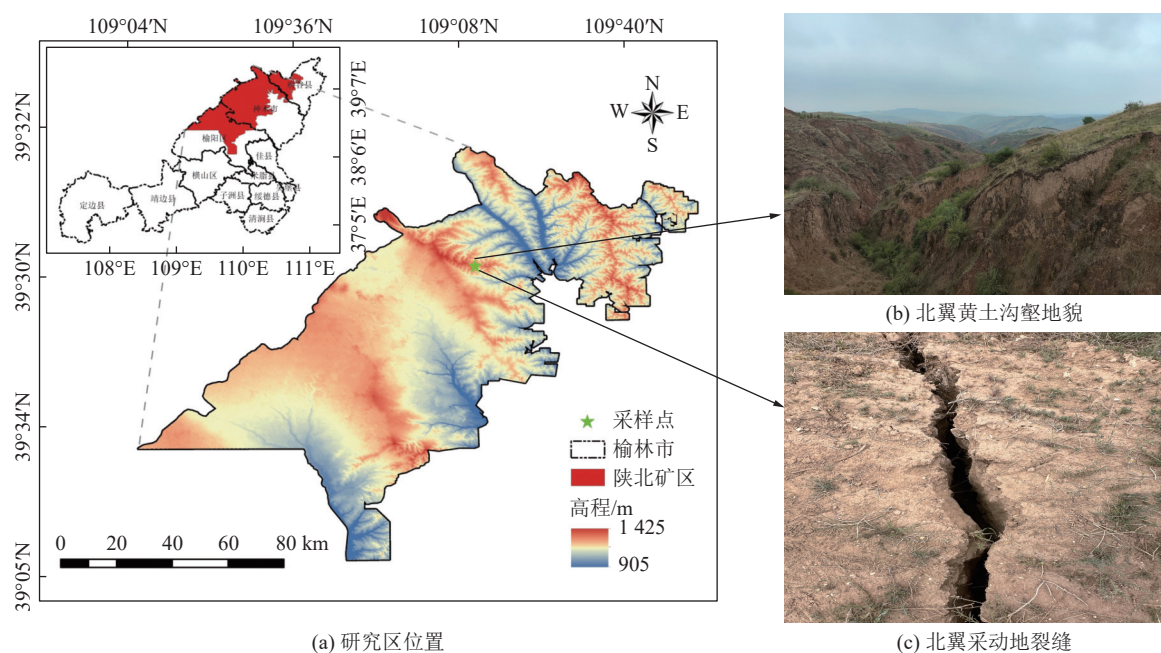


图1 研究区概况

Fig.1 Generalization of research region

被覆盖率为 43%, 以长芒草和狗牙根等草地植被为主。参考胡振琪^[19-20]、毕银丽^[21]及笔者团队^[14]等关于陕北煤矿区采动地裂缝影响土壤质量及侵蚀的核心范围主要集中在水平距离 80 cm 以内的研究成果, 制定采样方案如下: 首先, 为了实现研究目的, 尽量消除植被及微地形变化的干扰, 首先选择坡向、坡形、坡长、坡度、植被盖度相同或相似的黄土沉陷坡面作为采样对象; 其次, 在黄土沉陷坡面上挑选宽度分别介于 0~10、10~20、20~30 cm, 且形成期不超过 2 个月的采动地裂缝各 3 条; 对于每条裂缝, 沿其发育方向 50 m 长度内每隔 15 m 设置 1 条法向采样断面, 共设置 27 条断面; 在每条采样断面上距水平距离

80 cm 内, 按 20 cm 间距依次设置 4 个采样点; 再次, 在每个采样点分别用环刀 (直径 5 cm, 高 5.1 cm)、铝盒 (直径 4 cm, 高 2.5 cm) 和土钻分别采集 0~10 cm、10~20 cm 深土壤; 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 (图 2); 共采集 540 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。

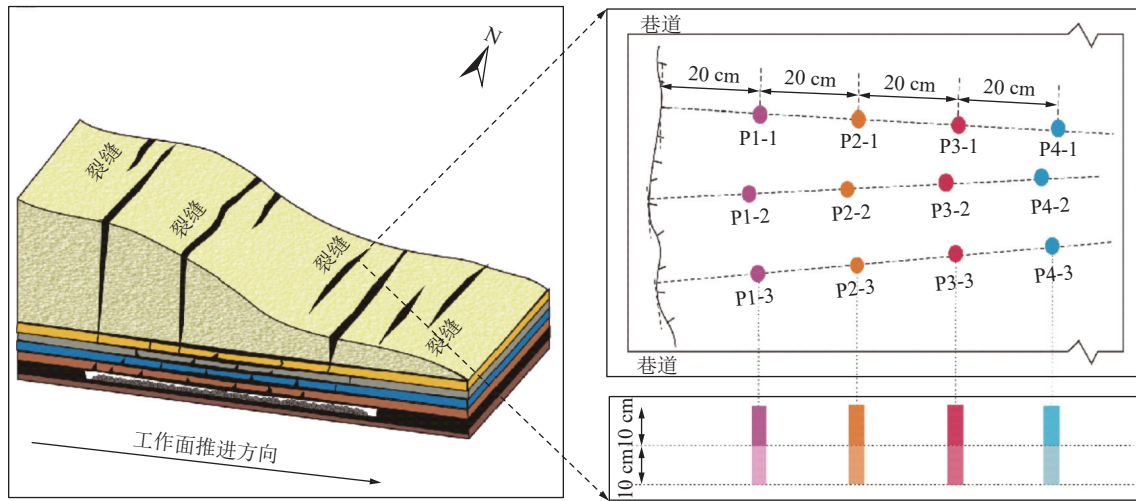


图 2 采样布局示意

Fig.2 Sampling layout sketch

2.2 试验方法

土壤黏粒 (< 0.002 mm)、粉粒 (0.002~0.05 mm)、极细砂粒 (0.05~0.1 mm) 质量分数使用 Mater Sizer 2000 激光粒度仪测定, 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^[22], 设置水头压力为 5 cm^[23], 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^[23], 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:

$$V = \frac{10Q_n}{t_n S} \quad (1)$$

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。

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots + Q_n \quad (2)$$

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

$$K_s = \frac{10Q_n L}{t_n S (h + L)} = V \frac{L}{h + L} \quad (3)$$

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 版本软件, 对试验所得数据进行详尽的统计学处理, 使用 Origin 2024 版本软件进行图表绘制, 使用 RUSLE2 模型^[24]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:

$$K = \{0.137 [k_t (12 - \omega_{om}) + 3.25 (2 - S_i) + 2.5 (P' - 3)]\} / 100 \quad (4)$$

$$k_t = \begin{cases} k_{tb} & (\omega_{SIL} + \omega_{VFS} < 68\%) \\ k_{tb} - [0.67 (k_{tb} - k_{t68})^{0.82}] & (\omega_{SIL} + \omega_{VFS} \geq 68\%) \end{cases} \quad (5)$$

$$k_{tb} = \frac{2.1[(\omega_{SIL} + \omega_{VFS})(100 - \omega_{CLA})]^{1.14}}{10\,000} \quad (6)$$

$$k_{t68} = \frac{2.1[68(100 - \omega_{CLA})]^{1.14}}{10\,000} \quad (7)$$

式中: ω_{om} 为土壤有机质质量分数, %; ω_{cla} 为黏粒质量分数 ($<0.002\text{ mm}$), %; ω_{sil} 为粉粒质量分数 ($0.002\sim 0.05\text{ mm}$), %; ω_{vfs} 为极细砂粒质量分数 ($0.05\sim 0.1\text{ mm}$), %; S_t 为土壤结构等级, 参考美国农业部土壤调查手册, 取值为 3^[25]; P 为土壤渗透性等级^[25]: 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 ($> 2.5\text{ mm/min}$), 2 为中等至快 ($0.83\sim 2.50\text{ mm/min}$), 3 为中等 ($0.25\sim 0.83\text{ mm/min}$), 4 为慢至中等 ($0.083\sim 0.25\text{ mm/min}$), 5 为慢 ($0.016\sim 0.083\text{ mm/min}$), 6 为极慢 ($<0.016\text{ mm/min}$)。

相较于 EPIC 等模型, RUSLE2 模型不仅考虑了土壤机械组成、有机质含量等影响土壤可蚀性 K 值的常规指标, 而且将土壤入渗等级指标融入其中, 使得该模型可以从土壤入参与土壤侵蚀联动的角度客观、真实的反映土壤潜在的侵蚀能力。因此, RUSLE2 模型符合我国各区域 (包括黄土高原地区) 土壤可蚀性研究的实际需要, 不仅收录于《资源环境数学模型手册》中, 而且被众多学者广泛采用。魏慧^[26]、王全九^[27]、赵文武^[28]等人均采用该模型研究了黄土高原地区的土壤可蚀性, 取得了令人信服的成果。黄翌^[29]、李朋飞^[30]、孟庆俊^[31]、刘英^[32]等都采用该模型研究了煤矿区、采煤塌陷区的土壤侵蚀变化规律, 并取得了良好的成果, 验证了该模型在采煤沉陷区的适用性。

3 结果与分析

土壤入渗速率、累积渗透量、饱和导水率 (K_s) 是公认的表征土壤入渗特性的关键指标^[21, 33]。其中, 入渗速率是影响地表径流形成、化学物质迁移及土壤侵蚀效应的关键土壤水力特性, 直接反映了土壤的导水能力; 累积渗透量是指在气压和供水充足条件下, 单位面积的渗透水量, 直接反映了土壤入渗过程中入渗量的大小^[33]; 饱和导水率 (K_s) 是指土壤在完全饱和状态下, 单位时间内通过单位面积的土壤横截面流动的水量, 直接反映了土壤水分保持能力。上述三项指标均是描述土壤入渗特性的重要土壤物理特征参数^[34]。土壤的机械组成 (土壤质地)、有机质和 $> 0.25\text{ mm}$ 水稳性团聚体, 直接或间接影响土壤的结构、养分状态、水力特性等关键理化性质, 均是评价土壤潜在侵蚀能力的关键指标^[35-36]。针对研究区内 $0\sim 10$ 、 $10\sim 20$ 、 $20\sim 30\text{ cm}$ 宽度采动地裂缝周围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、有机质、 $> 0.25\text{ mm}$ 水稳性团聚体指标测定结果见表 1。

3.1 采动地裂缝对周围土壤入渗特性的影响

3.1.1 采动地裂缝对周围土壤入渗速率的影响

根据表 1, 绘制了不同宽度采动地裂缝周围土壤入渗速率过程拟合图, 如图 3 所示。

由表 1、图 3 知, 相较于对照组: 无论发育何种宽度的采动地裂缝, 土壤入渗速率均随时间变化而呈现出瞬变 ($0\sim 3\text{ min}$)、渐变 ($3\sim 60\text{ min}$) 及稳定 ($60\sim 110\text{ min}$) 3 个阶段的动态变化过程。具体而言: 当裂缝宽度介于 $0\sim 10\text{ cm}$ 时, 随距裂缝水平距离的逐渐增大, $0\sim 20\text{ cm}$ 土壤瞬变阶段 ($0\sim 3\text{ min}$) 入渗速率的增幅依次为 $16.46\%(p < 0.05)$ 、 4.03% 、 -7.59% 、 $-20.25\%(p < 0.05)$; 渐变阶段 ($3\sim 60\text{ min}$) 入渗速率的增幅依次为 $31.80\%(p < 0.05)$ 、 $15.52\%(p < 0.05)$ 、 8.43% 、 0.57% ; 稳定阶段 ($60\sim 110\text{ min}$) 入渗速率的增幅依次为 44.20% 、 26.91% 、 16.63% 、 8.97% , 均达到显著差异 ($p < 0.05$)。当裂缝宽度介于 $10\sim 20\text{ cm}$ 时, 随距裂缝水平距离的逐渐增大, $0\sim 20\text{ cm}$ 土壤瞬变阶段 ($0\sim 3\text{ min}$) 入渗速率的增幅依次为 $23.94\%(p < 0.05)$ 、 $20.25\%(p < 0.05)$ 、 8.63% 、 2.19% ; 渐变阶段 ($3\sim 60\text{ min}$) 入渗速率的增幅依次为 60.15% 、 55.36% 、 34.48% 、 29.31% , 均达到显著差异 ($p < 0.05$); 稳定阶段 ($60\sim 110\text{ min}$) 入渗速率的增幅依次为 72.87% 、 57.99% 、 42.01% 、 34.79% , 均达到显著差异 ($p < 0.05$)。当裂缝宽度介于 $20\sim 30\text{ cm}$ 时, 随距裂缝水平距离的逐渐增大, $0\sim 20\text{ cm}$ 土壤瞬变阶段 ($0\sim 3\text{ min}$) 入渗速率的增幅依次为 59.49% 、 39.93% 、 26.24% 、 16.34% ; 渐变阶段 ($3\sim 60\text{ min}$) 入渗速率的增幅依次为 86.97% 、 66.48% 、 58.62% 、 48.08% ; 稳定阶段 ($60\sim 110\text{ min}$) 入渗速率的增幅依次为 98.25% 、 73.52% 、 61.05% 、 51.42% , 以上数据均达到显著差异 ($p < 0.05$)。由此可见: ① 在相同垂直深度下, 开采活动引发的地表裂缝会产生增加周围土壤 3 个阶段入渗速率的效应, 且随裂缝宽度的扩大和距裂缝的水平距离的缩短而增强; ② 在相同裂缝宽度下, 不同土层深度土壤入渗速率曲线的变化趋势较为一致, 但入渗速率存在显著差异; ③ 基于指数函数模型, 构建了陕北采动地裂缝发育区土壤入渗速率与时间、裂缝宽度、距裂缝水平距离的量化关系式 (表 2) 并得出, 当裂缝宽度介于 $0\sim 10\text{ cm}$, 且距裂缝水平距离分别超出 122.07 、 126.54 cm ; 裂缝宽度介于 $10\sim 20\text{ cm}$, 且距裂缝水平距离分别超出 129.21 、 111.49 cm ; 裂缝宽度介于 $20\sim 30\text{ cm}$, 且距裂缝水平距离分别超出 225.68 、 154.03 cm 时, 它们对周围 $0\sim 10$ 、 $10\sim 20\text{ cm}$ 土层土壤入渗速率的增强效应基本消失。

表 1 土壤入渗特性与可蚀性关键指标检测结果

Table 1 Detection results of key indicators of soil infiltration characteristics and erodibility

土层 深度/cm	裂缝 宽度/cm	水平 距离/cm	饱和导水率/ (mm · min ⁻¹)	累积渗 透量/mm	黏粒 质量分数/%	粉粒 质量分数/%	极细砂粒 质量分数/%	有机质 质量分数/ (g · kg ⁻¹)	> 0.25 mm水稳性 团聚体含量/%
0~10	0-10	20	6.20±0.63cd	1 487.63±24.69f	9.93±0.40e	58.84±2.85c	12.82±0.65bc	6.03±0.24bc	31.29±0.7cd
		40	5.57±0.39c	1 309.39±21.08i	11.03±0.43cd	59.63±3.56bc	12.72±0.57bc	6.39±0.30bc	34.52±0.87c
		60	4.93±0.18de	1 202.96±30.53j	12.78±0.40c	60.80±1.90ab	11.84±0.56cd	6.89±0.31b	36.30±0.63bc
		80	4.63±0.66de	1 123.82±32.10k	13.57±0.34b	60.93±2.01ab	13.56±0.55b	7.46±0.36ab	38.47±0.65b
	10-20	20	7.49±0.59ab	1 783.99±20.79b	7.60±0.29fg	59.39±2.09bc	13.02±0.45bc	5.12±0.25c	26.26±0.81e
		40	6.07±0.48c	1 630.40±21.68d	10.88±0.43d	60.35±4.56b	12.09±0.51c	5.48±0.28c	27.90±0.63de
		60	5.75±0.41c	1 463.69±31.02f	11.62±0.37cd	61.57±1.45ab	11.50±0.44cd	5.98±0.25bc	31.78±1.18cd
		80	5.31±0.47cd	1 389.57±19.80h	12.35±0.50c	62.28±2.31ab	9.76±0.38de	6.44±0.36bc	33.39±0.99cd
	20-30	20	8.14±0.59a	2 045.00±24.65a	5.83±0.39h	56.74±2.13d	13.34±0.69bc	4.04±0.13d	20.20±0.62fg
		40	6.92±0.58b	1 790.08±23.51b	7.40±0.43gh	58.08±1.77cd	12.89±0.42bc	4.38±0.22cd	22.70±1.18f
		60	6.16±0.58bc	1 661.00±21.83c	7.97±0.54fg	59.26±1.73bc	12.84±0.42bc	4.97±0.25cd	24.26±1.05ef
		80	5.85±0.46c	1 560.80±29.45e	8.76±0.48ef	61.04±2.26ab	12.40±0.43bc	5.42±0.27c	24.60±0.67ef
10~20	0-10	20	4.49±0.29de	1 165.84±28.47jk	10.87±0.37d	59.42±1.43bc	10.26±0.69d	6.40±0.32bc	23.66±0.83ef
		40	4.22±0.46e	1 008.10±23.54l	11.81±0.39cd	63.41±2.74ab	9.75±0.62de	6.71±0.37bc	25.28±0.66ef
		60	3.85±0.17ef	915.89±20.55m	13.34±0.28bc	64.34±2.36a	10.28±0.6d	7.22±0.31ab	27.73±0.88de
		80	3.46±0.6ef	853.20±27.49n	14.03±0.37b	64.78±2.06a	9.62±0.48de	7.67±0.30a	29.33±0.67d
	10-20	20	5.58±0.45cd	1 442.33±20.11fg	8.08±0.27fg	59.86±2.19bc	8.50±0.57e	5.40±0.26c	19.10±0.81g
		40	4.85±0.32de	1 260.89±19.66i	8.78±0.25ef	59.06±2.28bc	10.69±0.36cd	5.71±0.22bc	21.52±0.99fg
		60	4.31±0.25de	1 122.03±19.56k	10.15±0.39de	61.41±2.21ab	10.49±0.37d	6.15±0.26bc	24.88±1.12ef
		80	4.05±0.41ef	1 042.74±21.65l	10.56±0.46de	61.64±2.20ab	10.09±0.27de	6.65±0.28bc	26.32±1.02e
	20-30	20	6.50±0.13b	1 590.56±20.34e	7.10±0.42g	56.78±1.70d	15.18±0.69a	4.40±0.18cd	15.45±0.76h
		40	5.59±0.22c	1 398.88±20.93h	8.24±0.32f	58.32±1.44c	13.62±0.62b	4.74±0.20cd	17.95±0.88gh
		60	5.10±0.19d	1 276.80±18.03i	8.91±0.26ef	59.33±1.90bc	13.34±0.51bc	5.34±0.22c	18.03±0.61gh
		80	4.69±0.32de	1 207.92±14.38j	9.73±0.44e	60.23±2.15b	13.30±0.41bc	5.76±0.28bc	20.74±0.74fg
CK _{0~10}			3.67±0.36e	1 031.30±16.68l	14.07±0.36b	53.70±2.52e	10.91±0.58cd	7.86±0.36a	45.36±1.54a
CK _{10~20}			3.04±0.27f	803.20±13.89o	15.25±0.61a	52.93±2.15ef	10.46±0.52d	8.16±0.34a	35.94±1.28bc

注：累积渗透量为前115 min累积渗透量；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；同列不同字母表示在 $p < 0.05$ 水平下差异显著。

3.1.2 采动地裂缝对周围土壤累积渗透量的影响

根据表 1，绘制了不同宽度采动地裂缝周围土壤渗透量变化图，如图 4 所示。

由表 1、图 4 可知，相较于对照组：无论发育何种宽度的采动地裂缝，土壤累积渗透量均呈明显上升趋势。具体而言：当土层介于 0~10 cm 时，随着 0~10 cm 宽裂缝水平距离的逐渐增大，土壤累积渗透量的增幅依次为 44.25%、26.97%、16.65%、8.97%；随着 10~20 cm 宽裂缝水平距离的逐渐增大，土壤累积渗透量的增幅依次为 72.98%、58.09%、41.93%、34.74%；随着 20~30 cm 宽裂缝水平距离的逐渐增大，土壤累积渗透量的增幅依次为 98.29%、73.57%、61.06%、

51.34%。当土层介于 10~20 cm 时，随着 0~10 cm 宽裂缝水平距离的逐渐增大，土壤累积渗透量的增幅依次为 45.15%、25.51%、14.03%、6.23%；随着 10~20 cm 宽裂缝水平距离的逐渐增大，土壤累积渗透量的增幅依次为 79.57%、56.98%、39.69%、29.82%；随着 20~30 cm 宽裂缝水平距离的逐渐增大，土壤累积渗透量的增幅依次为 98.03%、74.16%、58.96%、50.39%。以上数据均达到显著差异 ($p < 0.05$)。由此可见：① 在相同垂直深度下，开采活动引发的地表裂缝会产生增加周围土壤累积渗透量的效应，且随裂缝宽度的扩大和距裂缝的水平距离的缩短而增强；② 在相同裂缝宽度及水平距离下，土壤累积渗透量随垂直深度的增加而减小。

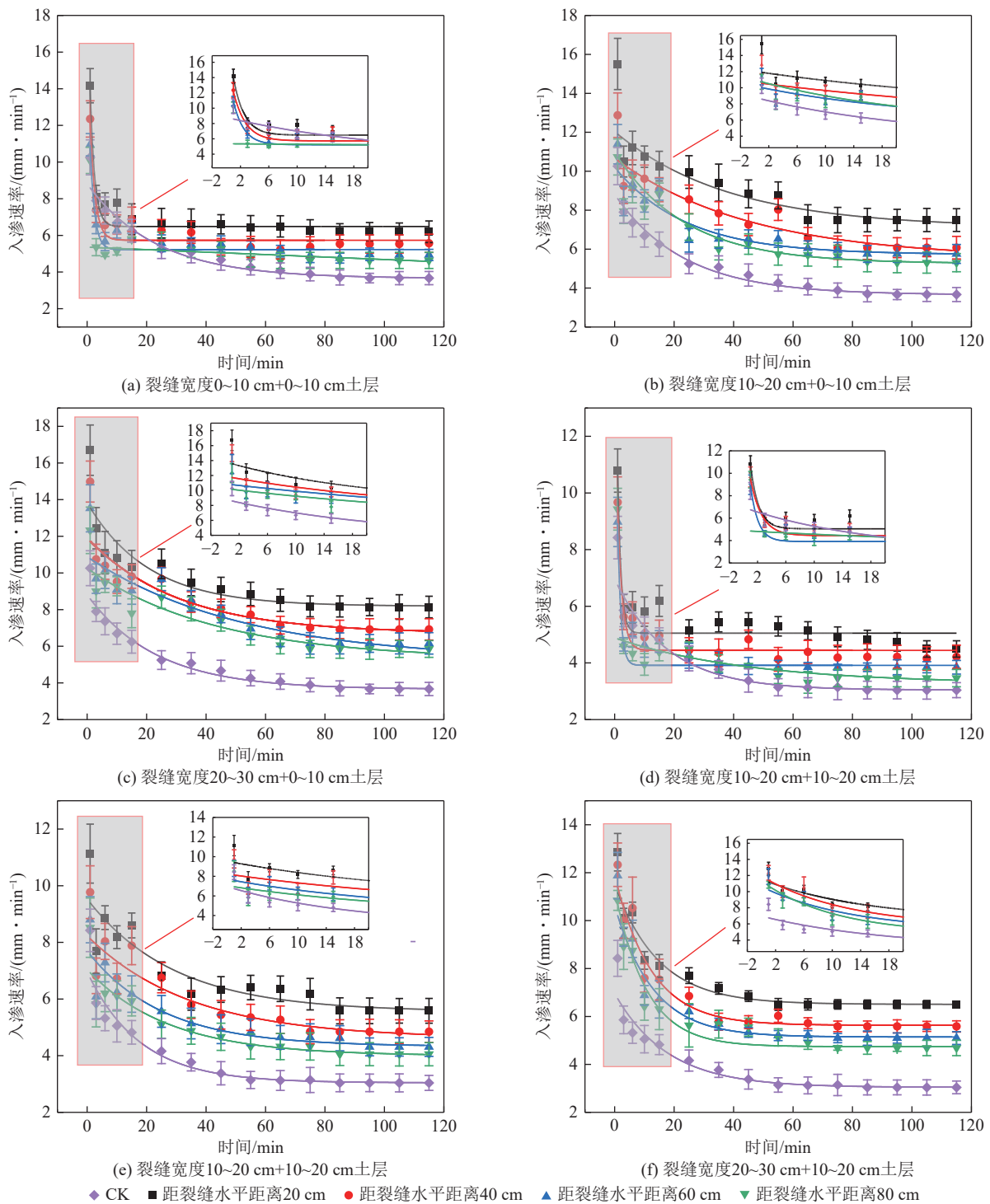


图3 土壤入渗速率过程拟合图

Fig.3 Soil infiltration rate process fitting diagram

3.1.3 采动地裂缝对周围土壤饱和和导水率(K_s)的影响

根据表1, 绘制了土壤饱和和导水率(K_s)变化图, 如图5所示。由表1、图5可知, 相较于对照组: 无论发育何种宽度的采动地裂缝, 土壤饱和和导水率(K_s)均呈明显上升趋势。具体而言: 当土层介于0~10 cm时, 随着0~10 cm宽裂缝水平距离的逐渐增大, 土壤饱和和导水率(K_s)的增幅依次为68.98%、51.76%、34.45%、

26.30%; 随着10~20 cm宽裂缝水平距离的逐渐增大, 土壤饱和和导水率(K_s)的增幅依次为104.23%、65.58%、56.81%、44.63%; 随着20~30 cm宽裂缝水平距离的逐渐增大, 土壤饱和和导水率(K_s)的增幅依次为121.89%、88.65%、67.82%、59.53%。

当土层介于10~20 cm时, 随着0~10 cm宽裂缝水平距离的逐渐增大, 土壤饱和和导水率(K_s)的增幅

表 2 土壤入渗速率与水平距离、入渗时间的量化关系

裂缝宽度/cm	土层深度/cm	量化关系	相关系数
0~10	0~10	$V_p = 6.313t^{-1.125} - 0.509e^{d^{0.175}} + 8.810$	0.936
	10~20	$V_p = 5.413t^{-1.136} - 1.293e^{d^{0.101}} + 9.618$	0.948
10~20	0~10	$V_p = 102.793t^{-0.013} - 123.478e^{d^{0.004}} + 249.330$	0.911
	10~20	$V_p = 19.635t^{-0.054} - 0.791e^{d^{0.48}} - 6.259$	0.901
20~30	0~10	$V_p = 13.310t^{-0.159} - 1.751e^{d^{0.110}} + 8.164$	0.928
	10~20	$V_p = 10.382t^{-0.229} - 0.430e^{d^{0.179}} + 4.589$	0.962

注：式中 V_p 为土壤入渗速率预测值， $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ； t 为入渗时间，min； d 为距裂缝的水平距离，cm。

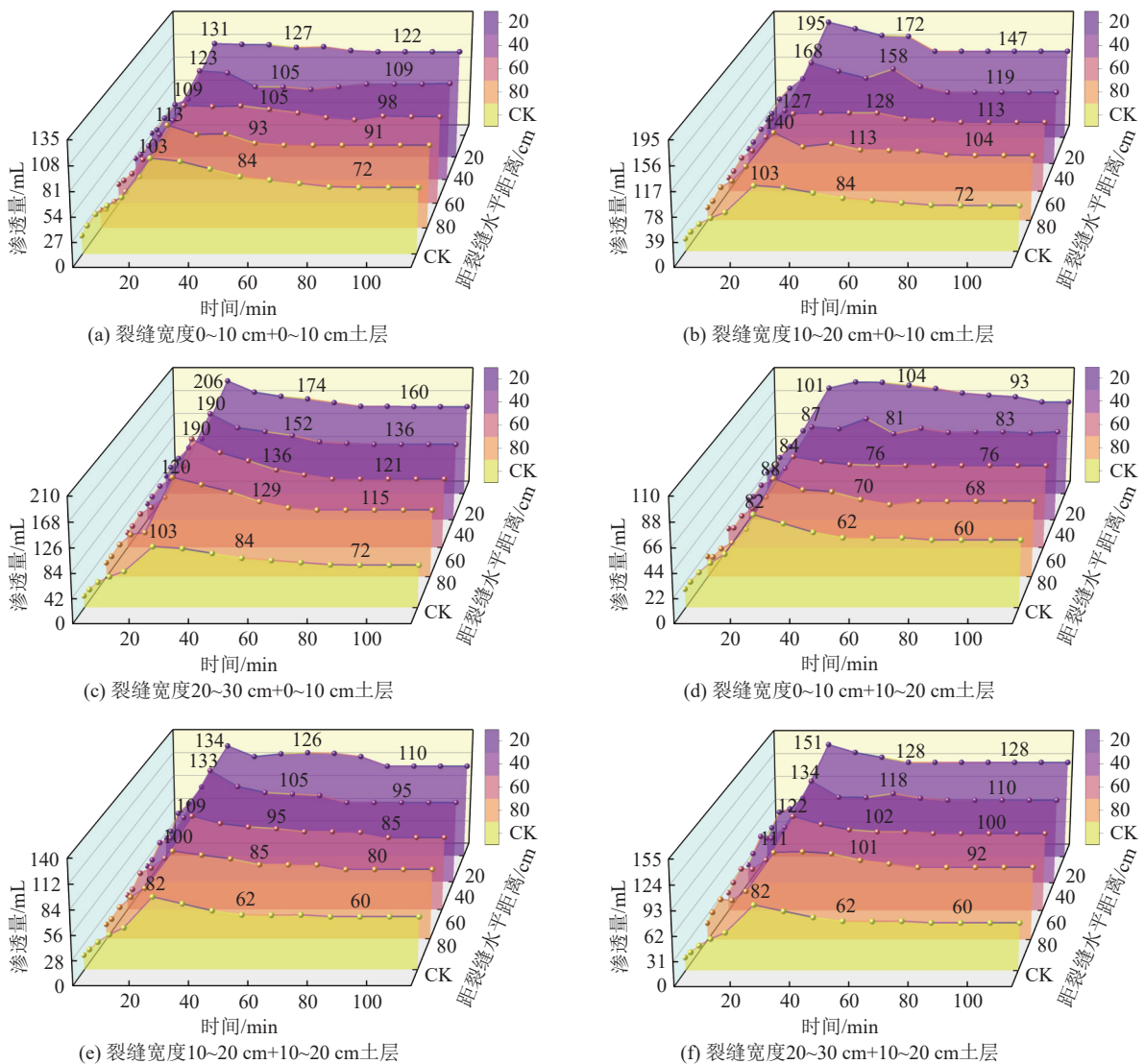
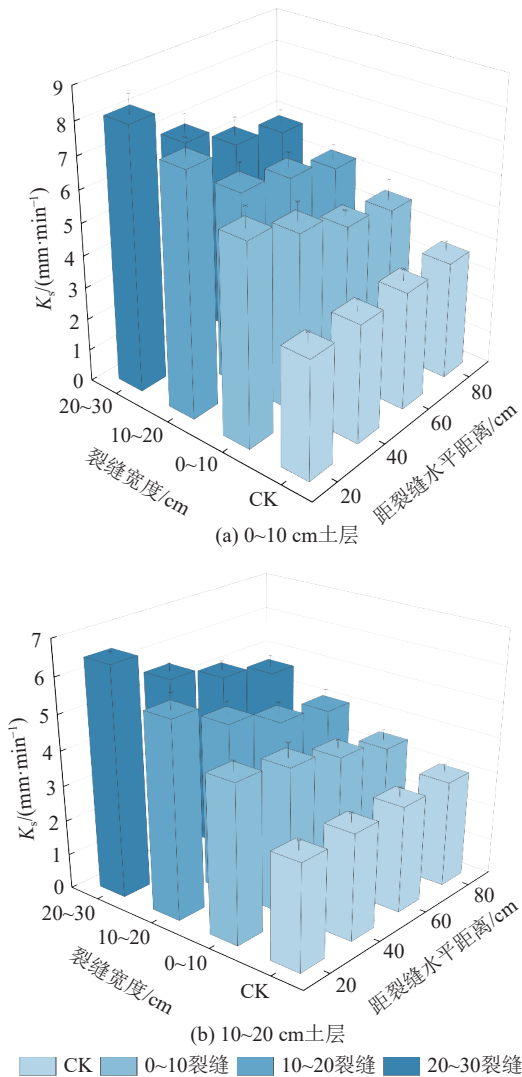


图 4 土壤渗透量变化图

Fig.4 Change of soil permeability

依次为 47.82%、38.66%、26.59%、13.97%；随着 10~20 cm 宽裂缝水平距离的逐渐增大，土壤饱和和导水率 (K_s) 的增幅依次为 83.67%、59.49%、41.79%、33.31%；随着 20~30 cm 宽裂缝水平距离的逐渐增大，土壤饱和和导水率 (K_s) 的增幅依次为 113.93%、83.74%、67.68%、

54.19%。以上数据均达到显著差异 ($p < 0.05$)。由此可见：① 在相同垂直深度下，开采活动引发的地表裂缝会产生增加周围土壤饱和和导水率 (K_s) 的效应，且随裂缝宽度的扩大和距裂缝的水平距离的缩短而增强；② 在相同裂缝宽度及水平距离下，土壤饱和和导水率

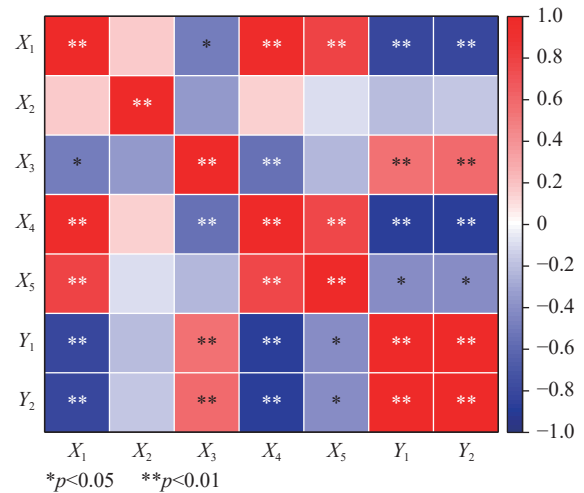
图5 土壤饱和导水率(K_s)变化Fig.5 The variation of soil saturated hydraulic conductivity (K_s)

(K_s) 随垂直深度的增加而减小。

3.2 土壤入渗特性与理化性质相关分析

土壤作为一种多孔介质,其累积渗透量、饱和导水率(K_s)受土壤机械组成、有机质和水稳性团聚体等综合因素的影响^[22, 34]。本文选取与土壤入渗特性相关的5个变量做相关分析,结果如图6所示。

由图6可知,不同宽度采动地裂缝周围土壤累积入渗量及饱和导水率(K_s)与黏粒(<0.002 mm)、极细砂粒(0.05~0.1 mm)、有机质、>0.25 mm水稳性团聚体4个变量的相关系数依次为-0.82、0.55、-0.88、-0.41; -0.81、0.60、-0.86、-0.41,均达到显著相关性($p < 0.05$)。其中,只有极细砂粒(0.05~0.1 mm)与土壤累积入渗量及饱和导水率(K_s)呈极显著正相关($p < 0.01$),而黏粒(<0.002 mm)和有机质均与土壤累积入渗量及饱和导水率(K_s)呈极显著负相关($p < 0.01$),>0.25 mm水稳性团聚体也呈显著负相关($p <$



注:式中 X_1 为土壤黏粒(<0.002 mm)、 X_2 为粉粒(0.002~0.05 mm)、 X_3 为极细砂粒(0.05~0.1 mm)、 X_4 为有机质; X_5 为>0.25 mm水稳性团聚体含量,%; Y_1 为累积入渗量,mm; Y_2 为饱和导水率,mm/min,下同。

图6 土壤入渗特性与理化性质相关分析

Fig.6 Relationship analysis of soil infiltration characteristics and physicochemical characterization

0.05);呈显著相关的变量相关系数绝对值大小排序依次为:有机质>黏粒(<0.002 mm)>极细砂粒(0.05~0.1 mm)>水稳性团聚体(>0.25 mm)。土壤饱和导水率(K_s)是评价土壤入渗特性中最常用的指标,因此,按照相关系数超过0.4为筛选依据,再选取黏粒(<0.002 mm)、极细砂粒(0.05~0.1 mm)、有机质和>0.25 mm水稳性团聚体4个因子作为自变量,土壤饱和导水率(K_s)作为因变量,建立了不同宽度采动地裂缝周围土壤饱和导水率(K_s)与土壤理化性质的量化关系式如下:

$$K_{sp} = \frac{8.675(X_3 - X_1)}{X_1 X_3} - 1.482 X_4^{0.942} + 48.989 X_5^{0.050} - 44.518 \quad R^2 = 0.921 \quad (8)$$

式中: K_{sp} 为土壤饱和导水率预测值,mm/min。

3.3 采动地裂缝对周围土壤可蚀性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3所示;以此为基础,绘制了可蚀性K值对比图,如图7所示。

由表3、图7可知,相较于对照组:无论发育何种宽度的采动地裂缝,土壤可蚀性K值均呈明显上升趋势。具体而言:当土层介于0~10 cm时,随着0~10 cm宽裂缝水平距离的逐渐增大,土壤可蚀性K值的增幅依次为30.58%、28.44%、24.54%、23.80%;随着10~20 cm宽裂缝水平距离的逐渐增大,土壤可蚀性K值的增幅依次为37.17%、30.07%、28.43%、25.50%;随着20~30 cm宽裂缝水平距离的逐渐增大,土壤可

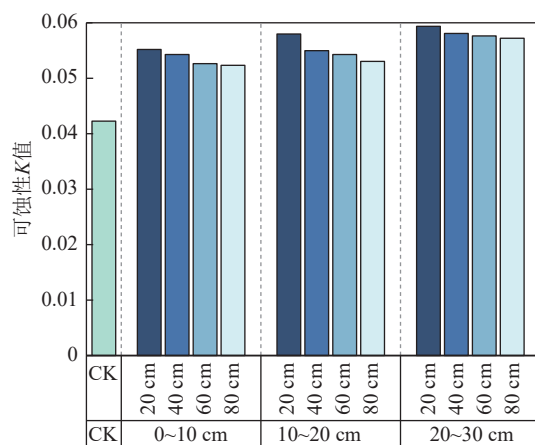
表 3 土壤可蚀性 K 值计算结果Table 3 Soil erodibility K -value calculation results

土层深度/cm	裂缝宽度/cm	水平距离/cm	土壤可蚀性 K 值
0~10	0~10	20	0.055 191
		40	0.054 286
		60	0.052 636
		80	0.052 326
	10~20	20	0.057 977
		40	0.054 974
		60	0.054 284
		80	0.053 044
	20~30	20	0.059 358
		40	0.058 079
		60	0.057 638
		80	0.057 206
10~20	0~10	20	0.054 533
		40	0.053 739
		60	0.052 325
		80	0.051 787
	10~20	20	0.056 372
		40	0.055 783
		60	0.055 014
		80	0.054 319
	20~30	20	0.058 676
		40	0.057 476
		60	0.056 821
		80	0.056 201
CK _{0~10}			0.042 266
CK _{10~20}			0.042 052

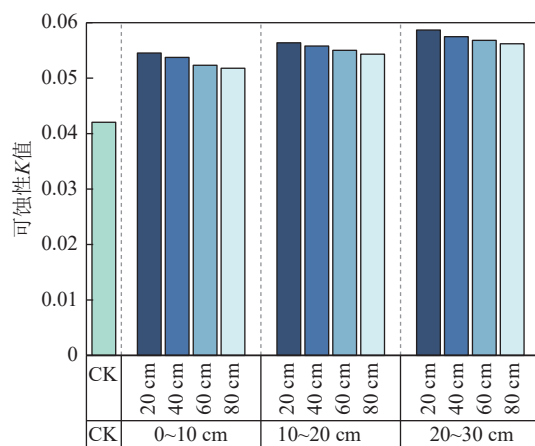
蚀性 K 值的增幅依次为 40.44%、35.11%、34.08%、33.08%。当土层介于 10~20 cm 时,随着 0~10 cm 宽裂缝水平距离的逐渐增大,土壤可蚀性 K 值的增幅依次为 29.68%、27.79%、24.43%、23.15%;随着 10~20 cm 宽裂缝水平距离的逐渐增大,土壤可蚀性 K 值的增幅依次为 34.05%、32.65%、30.82%、29.17%;随着 20~30 cm 宽裂缝水平距离的逐渐增大,土壤可蚀性 K 值的增幅依次为 39.53%、36.68%、35.12%、33.65%,以上数据均达到显著差异 ($p < 0.05$)。由此可见:① 在相同垂直深度下,开采活动引发的地表裂缝会产生增加周围土壤可蚀性 K 值的效应,且随裂缝宽度的扩大

$$K_p = \begin{cases} 0.022w^{0.091} + 0.071d^{-0.168} - 0.017 & (0 \sim 10 \text{ cm 土层}) \quad R^2 = 0.990 \\ 0.022w^{0.312} + 0.077d^{-0.239} - 0.030 & (10 \sim 20 \text{ cm 土层}) \quad R^2 = 0.980 \end{cases} \quad (9)$$

式中: K_p 为土壤可蚀性 K 值预测值, $t \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h} /$



(a) 0~10 cm 土层



(b) 10~20 cm 土层

CK 距离裂缝距离20 cm 距离裂缝距离40 cm
距离裂缝距离60 cm 距离裂缝距离80 cm

图 7 土壤可蚀性 K 值变化Fig.7 Variation of soil erodibility K -value

和距裂缝的水平距离的缩短而增强;② 基于指数函数模型,构建了采动地裂缝发育区土壤可蚀性 K 值与裂缝宽度、距裂缝水平距离的量化关系式(式(9)),发现当裂缝宽度介于 0~10 cm,且距裂缝水平距离分别超出 89.497、81.144 cm;裂缝宽度介于 10~20 cm,且距裂缝水平距离分别超出 126.573 cm、100.827 cm;裂缝宽度介于 20~30 cm,且距裂缝水平距离分别超出 156.747、138.380 cm 时,它们对周围 0~10 cm、10~20 cm 土层土壤可蚀性的增强效应基本消失;③ 在相同裂缝宽度及水平距离下,土壤可蚀性 K 值随垂直深度的增加而减小;④ 0~10、10~20、20~30 cm 宽采动地裂缝较对照组平均增幅依次为 26.55%、30.98%、35.96% ($p < 0.05$),考虑入渗特性计算的可蚀性 K 值变化幅度比不考虑时^[37]放大了 1.12~2.13 倍。

($\text{hm}^2 \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm}$); w 为采动地裂缝宽度, cm; d 为距裂

缝的水平距离, cm。

4 讨 论

1) 采动地裂缝对土壤入渗特性的影响。采动地裂缝的发育会破坏周围土壤结构及其稳定性, 增加土壤孔隙度, 造成土体结构松散, 对于土壤的渗透性、水分保持能力、养分储存以及潜在侵蚀能力都产生了显著影响^[38]。土壤孔隙度变化会引起包气带宏观结构显著变化, 采动地裂缝的发育改变了沉陷区包气带土壤的结构状态, 增加水分入渗通道和土壤水分蒸发面积^[39]; 另一方面, 形成了地裂缝两侧的土体断层面, 造成土壤与空气的接触面积直接扩大, 导致土壤含水量骤降, 并会与其临近土壤形成一定水势差, 加速周围土壤水分向该区域运动, 进而增加水分差异影响范围。随着土壤水分逐渐减少, 土壤中的水合作用减弱, 胶体的稳定性降低, 颗粒间的相互作用力增强(范德华力或离子桥), 促进了土壤小粒径颗粒在“聚沉效应”作用下聚集成较大颗粒, 加速了土壤中细黏粒的流失, 造成土壤团聚体的减少^[40], 这可能是导致表1中黏粒质量分数平均下降31.32%和 $>0.25\text{ mm}$ 水稳性团聚体含量平均下降36.4%的重要原因。土壤团聚体减少后, 土壤颗粒之间的连接变弱, 使土壤孔隙度增大, 加速了土壤中空气的流通, 提高了土壤对降水和地表水的入渗速率, 造成了沉陷区黄土坡面土壤微小颗粒和养分等在水蚀作用的影响下, 一方面加速向沟道沟谷迁移, 另一方面通过地裂缝流失至地下深层的现象^[40-41], 与本文研究结果一致, 黏粒($<0.002\text{ mm}$)和 $>0.25\text{ mm}$ 水稳性团聚体含量均与土壤累积入渗量及饱和导水率(K_s)呈显著负相关。此外, 采动地裂缝的发育通过增强土壤通气性, 显著改变了土壤的水肥气热环境, 导致土壤酶活性、微生物数量和有机质含量降低^[42-44], 使得供应植物生命活动所需的能量和养分更加稀缺。一方面, 削弱了植物根系通过延伸、穿插和缠绕形成 $>0.25\text{ mm}$ 水稳性团聚体的能力; 另一方面, 削弱了植物活细根周围土粒团聚所依赖的胶结物质(如糖类、有机酸等)的凝聚作用, 从而减弱了植物根系固土作用, 并显著降低了植物根系对水分的吸收能力^[45], 这可能是造成采动地裂缝宽度越大和距裂缝水平距离越小, 土壤入渗速率、累计渗透量、饱和导水率(K_s)越高的重要原因之一。

2) 采动地裂缝对土壤可蚀性 K 值的影响。采动地裂缝的发育通过破坏土壤的结构, 显著改变了土壤的孔隙度, 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, 抑制了微生物的生长繁殖^[46-47], 减少了由于微生物作用而产生的腐殖质^[48]。然而, 腐殖质是由微生物分解植物凋落物等形成的复杂有机物质, 它作为土壤团聚体的主要粘合物质, 有助于增强粘土的松散性与透气性, 并优化砂土的松散特性, 改良土壤的理化性质^[48]。由于腐殖质的降低, 导致土壤黏粒质量分数和有机质含量减少, 土壤粉粒、极细砂粒质量分数和饱和导水率(K_s)增加, 使得土壤可蚀性 K 值增加, 最终加剧了水土流失效应, 这与彭苏萍、毕银丽等学者^[21, 49]研究结果一致。已有研究表明^[49], 影响黄土沟壑区植被根系的主要因素为采动地裂缝宽度以及周边 $0\sim80\text{ cm}$ 以内的土壤, 采动地裂缝的发育会使土壤产生开裂, 周围生长植物的根系难以承受地裂缝引起的应力变化而产生破损, 出现拉断、拉伤、扭曲、皮裂、抽离土壤等多种伤根方式^[50], 损伤类型主要是根系被拉断, 占根系损伤类型的75%, 导致植株撕裂, 严重致使植物死亡^[21], 降低了植物根系对土壤的固定作用, 导致干燥土壤中的团聚体在雨水冲刷下更易发生崩解侵蚀, 增加了土壤侵蚀的潜在物质来源^[45], 这可能是造成地裂缝宽度越宽以及距裂缝水平距离越近, 土壤可蚀性 K 值越大的重要原因之一。本研究的成果显示, 土壤入渗特性的变化趋势与毕银丽等^[21]的研究结果相吻合, 同时土壤可蚀性 K 值的变化趋势也与ZHENG等^[51]的研究结果基本一致。然而, 当将土壤入渗特性纳入可蚀性 K 值的计算考量时, 其变化幅度相较于未考虑入渗特性时显著增大, 具体放大了1.12~2.13倍。究其原因, 多年观测数据显示, 黄土区的侵蚀主要是由少数几场大暴雨所致, 一次暴雨侵蚀量可占年侵蚀量的70%, 甚至80%^[16], 而土壤入渗是降雨、地表水和土壤水之间相互转化的关键步骤^[52]。采动地裂缝的出现打乱了原有的水分流动及含水带分布, 增加了水分散失的途径。降雨发生时, 一方面, 黄土高原矿区, 地势陡峻、沟壑纵横, 具有“跑水”“失土”的侵蚀特征^[53], 沉陷区黄土坡面土壤微小粒径颗粒和养分等在水蚀作用下, 一部分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, 一部分顺着黄土坡面上的裂缝向地下采空区迁移流失, 这些过程使得原本松散的黄土层更加容易受到侵蚀^[54]; 另一方面, 采动地裂缝的发育显著改变了土壤的孔隙结构, 导致土壤孔隙度和水分入渗的通道显著增加, 进而提高了土壤饱和导水率^[55], 这使得垂直方向上土壤水分的流动速度加快, 增强了土壤的垂向侵蚀动能, 从而加剧了表层土壤颗粒的冲刷作用, 造成表层土壤中的微小粒径颗粒和有机质等在垂向上迁移至深层土壤, 最终导致表层土壤潜在侵蚀能力增强,

集中表现为土壤可蚀性 K 值增大,这可能是造成考虑土壤入渗特性计算的可蚀性 K 值变化幅度较大的重要原因之一。

就实践应用价值而言,针对陕北黄土矿区自然水土流失特点和采动地裂缝发育区土壤侵蚀加剧的特殊性,在考虑土壤入渗特性变化及其土壤侵蚀效应的条件下:第一,土壤侵蚀精准防控靶区应扩大至采动地裂缝两侧 1.6 m 以内;第二,土壤侵蚀精准防控靶区应提高雨季时的水土流失风险管控等级;第三,土壤侵蚀精准防控靶区应采取人工修复措施,着重改善土壤孔隙结构,从而精准调控土壤入渗特性,有效降低浅层土壤在垂直方向上的水土流失效应。

5 结 论

1) 无论发育何种宽度的采动地裂缝,土壤入渗速率均随时间的变化呈现出瞬变 (0~3 min)、渐变 (3~60 min) 及稳定 (60~110 min) 3 个阶段的动态变化过程;基于指数函数构建了土壤入渗速率的预测模型,发现当距 0~10、10~20、20~30 cm 宽度裂缝的水平距离分别超出 127、129、226 cm 时,采动地裂缝发育增大周围土壤入渗速率的效应基本消失。

2) 采动地裂缝的发育会产生显著提高周围土壤入渗速率、累积渗透量、饱和导水率 (K_s) 和考虑入渗特性可蚀性 K 值的效应,平均增幅依次为 38.14%、48.64%、60.63%、31.16%,该效应随采动地裂缝宽度的增大和距裂缝水平距离的减小而增强;极细砂粒 (0.05~0.1 mm) 与土壤累积入渗量及饱和导水率 (K_s) 呈极显著正相关 ($p < 0.01$),而黏粒 (< 0.002 mm) 和有机质均与土壤累积入渗量及饱和导水率 (K_s) 呈极显著负相关 ($p < 0.01$), > 0.25 mm 水稳性团聚体也呈显著负相关 ($p < 0.05$)。

3) 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 1.12~2.13 倍;基于指数函数构建了土壤可蚀性 K 值的预测模型,发现当距 0~10、10~20、20~30 cm 宽度裂缝的水平距离分别超出 90、127、157 cm 时,采动地裂缝发育增大周围土壤可蚀性的效应基本消失,可作为黄河中游陕北矿区采动地裂缝发育区水土流失精准防控靶区。

参考文献(References):

- [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 Shuangming, SHEN Yanjun, SONG Shijie, 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 2023 年国民经济和社会发展统计公报[Z]. (2024-02-29)[2024-11-12]. https://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202402/t20240228_1947915.html.
- [3] 彭苏萍,毕银丽. 黄河流域煤矿区生态环境修复关键技术与战略思考[J]. 煤炭学报, 2020, 45(4): 1211–1221.
PENG Suping, BI Yinli. Strategic consideration and core technology about environmental ecological restoration in coal mine areas in the Yellow River Basin of China[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(4): 1211–1221.
- [4] 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 Shijie, ZHANG Jiajie, YANG Shuai, 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.
- [5] 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 Shijie, DU Lin, WANG Shuangming, 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.
- [6] 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)[2024-11-12]. https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202409/content_6974190.htm.
- [7] 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 Fawang, HOU Xinwei, HAN Zhantao, 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.
- [8] SONI A, MISHRA P K, SINGH S S. Certain aspects of land degradation due to coal mining: A case study of the Kamptee coalfield, Maharashtra[J]. International Journal of Environmental Sciences, 2014, 5(1): 9–20.
- [9] HOWLADAR 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 Tingting, HU Zhenqi, CAO Yuanbo, 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] 陈超,胡振琪. 我国采动地裂缝形成机理研究进展[J]. 煤炭学报, 2018, 43(3): 810–823.
CHEN Chao, HU Zhenqi. Research advances in formation mechanism of ground crack due to coal mining subsidence in China[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(3): 810–823.
- [12] 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 Ping, WANG Jinman, QIN Qian, et al. Effects of land subsidence on soil hydraulic properties in mining area of the Loess Plateau

- eau[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(3): 297-304.
- [13] 张延旭, 毕银丽, 陈书琳, 等. 半干旱风沙区采煤后裂缝发育对土壤水分的影响[J]. *环境科学与技术*, 2015, 38(3): 11-14.
ZHANG Yanxu, BI Yinli, CHEN Shulin, et al. Effects of subsidence fracture caused by coal-mining on soil moisture content in semi-arid windy desert area[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 38(3): 11-14.
- [14] 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.
- [15] 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, 28(6): 521-527.
ZHANG Fawang, ZHAO Hongmei, SONG Yaxin, et al. The effect of coal-mining subsidence on water environment in the Shenfu-Dongsheng mining area[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2007, 28(6): 521-527.
- [16] 朱显谟. 我国十年来水土保持工作的成就[J]. *土壤*, 1959(10): 5-9.
ZHU Xianmo. Achievements of soil and water conservation in China in the past ten years[J]. *Soils*, 1959(10): 5-9.
- [17] 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 Qunying, HU Jian, LIU Kai, 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.
- [18] 宋世杰, 张玉玲, 王双明, 等. 陕北煤矿区采动地裂缝对土壤微生物和酶活性的影响[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(5): 1630-1640.
SONG Shijie, ZHANG Yuling, WANG Shuangming, et al. Influence of mining ground fissures on soil microorganism and enzyme activities in Northern Shaanxi coal mining area[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(5): 1630-1640.
- [19] 吴群英, 冯泽伟, 胡振琪, 等. 生态脆弱矿区地表裂缝动态变化对土壤含水量的影响[J]. *煤炭科学技术*, 2020, 48(4): 148-155.
WU Qunying, FENG Zewei, HU Zhenqi, et al. Influence of dynamic variation of ground cracks on soil water content in ecological-fragile coal mining areas[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(4): 148-155.
- [20] 琚成远, 浮耀坤, 陈超, 等. 神南矿区采煤沉陷裂缝对土壤表层含水量的影响[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(4): 309-316.
JU Chengyuan, FU Yaokun, CHEN Chao, et al. Influence of coal mining subsidence cracks on soil surface water content in Shennan Mining Area[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(4): 309-316.
- [21] 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 Yinli, LIU Jing, SHANG Jianxuan, 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.
- [22] Klute A, Dirksen C. Hydraulic conductivity of saturated soils: Field methods[M]. USA: Soil Science Society of America, 1986.
- [23] 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.
- [24] Wischmeier, W H, Smith, D. D. Revised Universal Soil Loss Equation Version 2 [M]. USA: United States Department of Agriculture (USDA), 1996.
- [25] Wischmeier, W H, Smith, D D. Predicting rainfall erosion losses, a guide to conservation planning[M]. USA: United States Department of Agriculture (USDA), 1978.
- [26] 魏慧, 赵文武. 土壤可蚀性 K 值最优估算方法遴选: 以陕北安塞集水区为例[J]. *中国水土保持科学*, 2017, 15(6): 52-65.
WEI Hui, ZHAO Wenwu. The optimal estimation method for K value of soil erodibility: A case study in Ansai Watershed[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2017, 15(6): 52-65.
- [27] 张鹏宇, 王全九, 周蓓蓓. 陕西省耕地土壤可蚀性因子[J]. *水土保持通报*, 2016, 36(5): 100-106.
ZHANG Pengyu, WANG Quanjia, ZHOU Beibei. Cultivated soil erodibility in Shaanxi Province[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2016, 36(5): 100-106.
- [28] 翟睿洁, 赵文武, 贾立志. 基于 RUSLE、InVEST 和 USPED 的土壤侵蚀量估算对比研究: 以陕北延河流域为例[J]. *农业现代化研究*, 2020, 41(6): 1059-1068.
ZHAI Ruijie, ZHAO Wenwu, JIA Lizhi. A comparative study of soil erosion estimation based on RUSLE, InVEST and USPED models: A case study of the Yanhe River Basin in Northern Shaanxi[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2020, 41(6): 1059-1068.
- [29] 黄翌, 汪云甲, 王猛, 等. 黄土高原山地采煤沉陷对土壤侵蚀的影响[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(1): 228-235.
HUANG Yi, WANG Yunjia, WANG Meng, et al. Effect of mining subsidence on soil erosion in mountainous area of the Loess Plateau[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(1): 228-235.
- [30] 李朋飞, 黄霖霖, 臧宇哲, 等. 黄土高原彬长矿区土壤侵蚀特征及其与环境变化的关系[J]. *农业工程学报*, 2024, 40(5): 158-167.
LI Pengfei, HUANG Linlin, ZANG Yuzhe, et al. Spatiotemporal patterns of soil erosion and its relationship with environmental changes in the Binchang mining areas on the Loess Plateau of China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2024, 40(5): 158-167.
- [31] 孟庆俊. 采煤塌陷地氮磷流失规律研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2010.
MENG Qingjun. Study on nitrogen and phosphorus loss in coal mining subsidence land[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2010.
- [32] 刘英, 魏嘉莉, 岳辉, 等. 神东矿区土壤侵蚀时空特征及驱动力分析[J]. *测绘科学*, 2022, 47(1): 142-153.
LIU Ying, WEI Jiali, YUE Hui, et al. Analysis on temporal and spatial characteristics and driving factors of soil erosion in Shendong mining area[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2022, 47(1): 142-153.
- [33] 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 Daoxiang, LI Jianxing, WANG Jianwen, 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.
- [34] 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 Shuang, ZHU Qin, WANG Xiaoting, et al. Effect of winter cover crops on the infiltration properties of top layer of black soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2024, 55(5): 1248–1257.
- [35] XIONG L, LIU X Y, VINCI G, 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.
- [36] 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 Hanqing, LI Yong, JIN Fahui, 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]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2012, 18(4): 876–883.
- [37] 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 Shijie, SUN Tao, DU Lin, 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.
- [38] 张健. 采动地裂缝土壤水分运移规律及伤根微生物修复机理[J]. 测绘学报, 2023, 52(8): 1416.
- ZHANG Jian. The movement law of soil water around mining ground fissures and the mechanism of microbial remediation on root damage[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2023, 52(8): 1416.
- [39] 高云飞, 张凯, 杜坤, 等. 采煤沉陷区地裂缝对土壤含水率的影响[J]. 天津师范大学学报(自然科学版), 2024, 44(1): 62–68.
- GAO Yunfei, ZHANG Kai, DU Kun, et al. Influence of ground fissures on deep soil moisture content in coal mining subsidence area[J]. Journal of Tianjin Normal University (Natural Science Edition), 2024, 44(1): 62–68.
- [40] 宋世杰, 王艺, 彭芮思, 等. 陕北不同地貌类型区采煤沉陷对土壤微生物和酶活性的影响[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(12): 110–124.
- SONG Shijie, WANG Yi, PENG Ruishi, et al. Effects of coal mining subsidence on soil microorganisms and enzyme activities in different landform types of northern Shaanxi[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(12): 110–124.
- [41] 邵亚琴, 汪云甲, 李永峰, 等. 草原区煤电基地土壤风-水复合侵蚀研究[J]. 中国矿业大学学报, 2020, 49(6): 1223–1232.
- SHAO Yaqin, WANG Yunjia, LI Yongfeng, et al. Study on soil water-wind compound erosion of prairie coal-electricity base[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2020, 49(6): 1223–1232.
- [42] 陈士超, 左合君, 胡春元, 等. 神东矿区活鸡兔采煤塌陷区土壤肥力特征研究[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2009, 30(2): 115–120.
- CHEN Shichao, ZUO Hejun, HU Chunyuan, et al. Study on soil fertility characteristics of huojitu excavated coal pits of Shendong diggings[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition), 2009, 30(2): 115–120.
- [43] 刘建新. 不同农田土壤酶活性与土壤养分相关关系研究[J]. 土壤通报, 2004, 35(4): 523–525.
- LIU Jianxin. Correlative research on the activity of enzyme and soil nutrient in the different types of farmland[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2004, 35(4): 523–525.
- [44] 张向前, 黄国勤, 卞新民, 等. 施氮肥与隔根对间作大豆农艺性状和根际微生物数量及酶活性的影响[J]. 土壤学报, 2012, 49(4): 731–739.
- ZHANG Xiangqian, HUANG Guoqin, BIAN Xinmin, et al. Effects of nitrogen fertilization and root separation on agronomic traits of intercropping soybean, quantity of micro organisms and activity of enzymes in soybean rhizosphere[J]. Acta Pedologica Sinica, 2012, 49(4): 731–739.
- [45] 曹波, 曹志东, 王黎明, 等. 植物根系固土作用研究进展[J]. 水土保持应用技术, 2009(1): 26–28.
- CAO Bo, CAO Zhidong, WANG Liming, et al. Technology of Soil and Water Conservation, 2009(1): 26–28.
- [46] 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 Yexin, WANG Daohan, LÜ Gang, 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.
- [47] 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 Tao, BI Yinli, ZOU Hui, 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.
- [48] 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.
- [49] 彭苏萍, 毕银丽. 西部干旱半干旱煤矿区生态环境损伤特征及修复机制[J]. 煤炭学报, 2024, 49(1): 57–64.
- PENG Suping, BI Yinli. Properties of ecological environment damage and their mechanism of restoration in arid and semi-arid coal mining area of western China[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 57–64.
- [50] 蒙仲举, 任晓萌, 陈晓燕, 等. 采煤塌陷对沙柳根系损伤机理研究[J]. 北方园艺, 2014(1): 66–68.
- MENG Zhongju, REN Xiaomeng, CHEN Xiaoyan, et al. Study on damage mechanism of roots of salix psammophila by mining subsidence[J]. Northern Horticulture, 2014(1): 66–68.
- [51] ZHENG B B, SONG S J, CHENG X, et al. The influence of coal mining subsidence on the movement and deformation of loess slope

- in the loess gully area of Northern Shaanxi[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2023, 11: 1273389.
- [52] 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, 33(S1): 83–88.
- JIANG Taiming. Research progress on dynamic model of precipitation infiltration and soil moisture[J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2005, 33(S1): 83–88.
- [53] 白玉川, 张慧茜, 张金良. 晋西北典型黄土陡坡急流冲刷调查研究[J]. 水利水电技术, 2020, 51(7): 186–200.
- BAI Yuchuan, ZHANG (Hui)(Qian) Xi, ZHANG Jinliang. Investigation of typical torrential erosion on steep loess slope in Northwest Shanxi[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2020, 51(7): 186–200.
- [54] Zhao Y, Li X, Zhang J, et al. Erosion and Sediment Yield in the Loess Plateau of China: A Review[J]. *Land Degradation & Development*, 2016, 27(5): 1265–1275.
- [55] 李若凡, 谢云, 辛艳, 等. 东北黑土区不同侵蚀程度土壤入渗特征与模拟[J]. 中国水土保持科学 (中英文), 2024, 22(2): 17–24.
- LI Ruofan, XIE Yun, XIN Yan, et al. Soil infiltration characteristics and simulation of different eroded degrees in the black soil region of NorthEast China[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2024, 22(2): 17–24.