

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2026.01.034 CSTR:32310.14.stbcbx.2026.01.034

毕银丽,白祖诚,武超.采煤沉陷裂缝不同距离下植被类型对土壤蒸渗特征的影响[J].水土保持学报,2026,40(1):331-339.

BI Yinli, BAI Zucheng, WU Chao. Influence of vegetation types on soil evaporation-infiltration characteristics at different distances from coal mining subsidence fissures[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(1):331-339.

采煤沉陷裂缝不同距离下植被类型对土壤蒸渗特征的影响

毕银丽^{1,2}, 白祖诚¹, 武超¹

(1.西安科技大学西部矿山生态环境修复研究院,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] 探讨采煤沉陷区地裂缝对土壤水分运移规律的影响,揭示其运移机制,并阐明植被与土壤理化性质在该过程中的调控作用。[方法] 以曹家滩矿区的典型植被[沙蒿(*Artemisia desertorum*)、早熟禾(*Poa annua*)、生物结皮]作为研究对象,采用双环入渗仪和微型蒸渗仪,监测不同处理下土壤水分入渗率和蒸发特征。结合土壤理化性质(体积质量、孔隙度、机械组成等),分析不同植被-土壤系统下地裂缝对水分运移的影响机制。[结果] 1) 采动地裂缝对周边土壤水分运移产生显著影响,地裂缝的存在增加周围土壤水分入渗速率和蒸发量,距离裂缝越近入渗速率和蒸发量显著增加。随着水平距离的增加而减弱。2) 不同植被覆盖下,土壤水分的动态响应存在差异。其中,沙蒿覆盖下的稳定入渗率显著高于其他处理,其根系形成大孔隙促进优先流发育,入渗速率和蒸发量均遵循沙蒿>早熟禾>裸地>苔藓结皮。3) 土壤入渗速率和蒸发量均与土壤体积质量呈极显著负相关;与总孔隙度和毛管孔隙度均呈极显著正相关。较高的孔隙度有利于增强土壤的持水能力和导水性能,从而促进水分入渗和蒸发。[结论] 采动地裂缝显著促进周围土壤水分的运移过程;该过程主要受孔隙结构调控,其中主要影响因子为总孔隙度和土壤体积质量。研究结果可为采煤沉陷区生态修复提供一定的理论参考。

关键词: 采煤沉陷区; 植被恢复; 水分入渗; 土壤蒸发; 风沙区

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)01-0331-09

Influence of Vegetation Types on Soil Evaporation-Infiltration Characteristics at Different Distances from Coal Mining Subsidence Fissures

BI Yinli^{1,2}, BAI Zucheng¹, WU Chao¹

(1. Institute of Ecological Environment Restoration in Mine Areas of West China, Xi'an University of Science and Technology,

Xi'an 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] To explore the soil moisture migration patterns influenced by ground fissures in coal mining subsidence areas on soil water migration and reveal their migration mechanisms, and clarify the regulatory roles of different vegetation types and soil physical and chemical properties in this process. [Methods] Typical vegetation types (*Artemisia desertorum*, *Poa annua*, and biological soil crusts) in the Caojiatan mining area were taken as the research objects. Soil infiltration rate and evaporation characteristics under different treatments were monitored using a double-ring infiltrometer and a micro-lysimeter. Combined with analyses of soil physicochemical properties (bulk density, porosity, mechanical composition, etc.), analyze the influence mechanisms of ground fissures on moisture migration were elucidated under different plant-soil system. [Results] 1) Mining-induced ground fissures significantly affected soil moisture migration in surrounding areas. Their existence increased soil infiltration rate and evaporation, both of which rose significantly closer to the fissures and declined with increasing horizontal

收稿日期: 2025-07-30

修回日期: 2025-09-04

录用日期: 2025-10-13

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-11-11

资助项目: 国家重点研发计划项目(2022YFF1303305); 国家自然科学基金重大项目(52394194)

第一作者: 毕银丽(1971—), 女, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事矿区土地复垦与生态修复研究。E-mail: ylb88@126.com

通信作者: 毕银丽(1971—), 女, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事矿区土地复垦与生态修复研究。E-mail: ylb88@126.com

http://stbcbx.alljournal.com.cn

distance. 2) The dynamic responses of soil moisture varies under different vegetation covers. Among them, the stable infiltration rate under *A. desertorum* was significantly higher than in other treatments, as its root system formed macropores that promoted the development of preferential flow. Infiltration rate and evaporation followed the order of *A. desertorum* > *P. annua* > bare land > moss crust. 3) Both soil infiltration rate and evaporation showed extremely significant negative correlations with soil bulk density, but extremely significant positive correlations with total porosity and capillary porosity. Higher porosity enhanced soil water-holding capacity and hydraulic conductivity, thus promoting water infiltration and evaporation. [Conclusion] Mining-induced ground fissures significantly promote the migration process of surrounding soil moisture. This process is mainly controlled by pore structure, with total porosity and soil bulk density being the key influencing factors. The research results provide theoretical references for ecological restoration in coal mining subsidence areas.

Keywords: coal mining subsidence area; vegetation restoration; water infiltration; soil evaporation; sandy area

Received: 2025-07-30

Revised: 2025-09-04

Accepted: 2025-10-13

Online(www.cnki.net): 2025-11-11

在我国能源消费结构中,煤炭占比超过70%,该格局预计将在未来较长时期内持续存在。因此,深入开展煤炭资源开发、加工及储运环节对环境生态影响机制的研究,构建高效的动态综合监测体系,探索综合治理与调控的理论方法,已成为一项亟待深入研究的重要科研课题。该研究不仅具有重要的理论价值,对推动能源行业可持续发展具有重大现实意义^[1]。我国煤炭开采以井工为主,占总产量95%以上。开采过程中引发的开采沉陷问题一直是生态修复的难点^[2-3]。采煤沉陷导致上覆岩层变形沉降,不仅破坏土壤水分分布和植被生长,还损毁建筑物、道路等基础设施^[4-5],造成一定经济损失。降雨时,地裂缝成为雨水快速入渗的优先通道,加剧入渗速率和深度,导致土壤水分空间分布不均^[6];非降雨期,由于裂缝带土壤结构松散,蒸发增强,水分加速流失,土壤含水率进一步下降。该水分动态失衡严重制约植被恢复,极大地加大生态修复难度。作为植被恢复的关键因子,土壤水分直接影响植被生长与土壤环境演变^[7]。

在干旱区生态系统中,土壤水分是连接大气-植被-土壤系统的关键纽带,为植被生长的决定性环境因子^[8-9]。以往研究多集中于采煤塌陷地裂缝对土壤结构及水分的影响,主要包括土壤质地^[10]、土壤水分和体积质量等方面^[11]。裂缝导致表层土壤水难以赋存,蒸发加剧,甚至引起地下水位下降。聂文杰等^[12]研究发现,裂缝导致土壤质量整体下降,体积质量、微生物及酶活性显著降低;赵红梅等^[13]研究指出,塌陷区土壤含水率低于非塌陷区,垂直方向变异性更大;毕银丽等^[14]研究表明,塌陷促进水分垂直入渗,降低表面土壤持水性,增加蒸发;张延旭等^[15]研究风沙区采煤裂缝对土壤水分的影响发现,

裂缝区土壤含水率最小;其次为沉陷无裂缝区土壤含水率,最后是未开采区;赵红梅^[16]研究发现,采煤塌陷对土壤基础物理性质造成影响,其中包括土壤机械组成、土壤体积质量、土壤水分、土壤孔隙度等,沉陷区土壤含水量显著降低;YANG等^[17]在沉陷区监测不同点位土壤物理性质的变化发现,煤炭开采降低土壤水分、有机质和内聚力,对土壤体积质量、干密度和孔隙率的影响不显著。除土壤质地与地貌类型的调控作用外,植被因子对土壤水分入渗和蒸发动态亦具有影响^[18]。

然而,现有研究较少关注沉陷区不同植被类型对土壤入渗和蒸发特征的影响。因此,本文以不同类型植被为研究对象,通过系统监测不同条件下土壤水分入渗速率和蒸发量,结合土壤的物理性质,揭示地裂缝影响下土壤水分运移规律,为矿区生态修复提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省榆林市曹家滩煤矿(图1)(38°15'N,109°45'E)。该区域地处鄂尔多斯高原东北部、陕北黄土高原北部及毛乌素沙漠东南缘,风蚀作用强烈。地貌类型为沙丘沙地和风沙滩地、盖沙黄土梁峁地貌,土壤质地单一,固定沙地植被覆盖度较高,固定沙地同时伴有生物土壤结皮生长,表层土壤有机质较高,质量分数为1.325%^[19]。

该区域植被覆盖度35%以上,植被以沙蒿、花棒、柠条、紫穗槐、沙打旺、沙柳等灌木和半灌木为主,局部有少量杨树、柳树等高大乔木,地表广泛分布杂草类植物。研究区为典型的中温带半干旱大陆性季风气候,昼夜温差悬殊,四季冷热多变。常年干旱少雨,年蒸发量较大。多年平均气温8.6℃,极端

最高气温 38.9℃,极端最低气温 -29.0℃;多年平均降水量 418.52 mm,年最多降水量 631.63 mm(2013年),最少降水量 305.90 mm(2005年),日最大降水量 141.1 mm,年平均蒸发量 1 891.0 mm。全年降水量分配很不均匀,不同年份降水量变化明显。

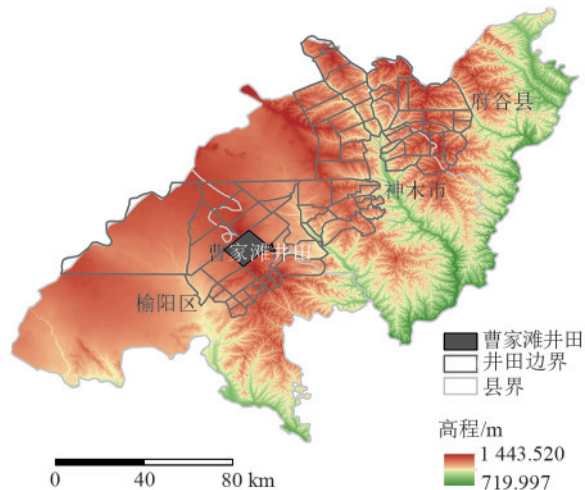


图 1 研究区位置

Fig. 1 Schematic diagram of study area location

1.2 样品采集

2024年3月,随着12盘区2-2煤的122105工作面推进至试验样地下方,地表出现大量裂缝和错位移动。本次试验于2024年7月进行,在研究区调查裂缝分布情况,使用卷尺测量裂缝宽度与深度,以其中尺度较大的裂缝(宽度约30 cm,深度约80 cm)作为研究对象,沿着裂缝延伸方向选取典型植被包括沙蒿、早熟禾和苔藓结皮展开研究。其中,所取沙蒿个体平均株高为60~80 cm;早熟禾为浅根植物,根系主要分布0~20 cm土层;生物结皮厚度约0.5~1.5 cm,盖度40%~65%,主要由苔藓组成。双环法入渗测定时,外环土壤表层垫小块塑料布,缓慢注水,避免对结皮的扰动,以尽量保持结皮完整性。根据采样区实际情况,设计采样方案为:在裂缝一侧,沿着裂缝法向方向,布置水平方向距离裂缝0.3、0.8、1.3 m 3个监测点进行入渗和蒸发试验,测定土壤水分的入渗速率和蒸发速率。每个监测点都位于植物1 m距离之内。相同距离内,每个监测点使用环刀采集原状土,测定土壤机械组成及物理指标,采样深度为10~20 cm,每个土样取3个重复。

1.3 测定方法

1.3.1 土壤机械组成 土壤粒径组成使用激光粒度仪(MASTER SIZER 3 000, Malvern Panalytical)测定。土壤体积质量、土壤孔隙度采用环刀法^[20]测定,具体计算公式为:

$$\rho_b = (W_3 - W_1) / V \times 100\% \quad (1)$$

$$TP = (W_2 - W_3) / V \times 100\% \quad (2)$$

$$CP = (W_4 - W_3) / V \times 100\% \quad (3)$$

式中: ρ_b 为土壤体积质量, g/cm^3 ; TP为土壤总孔隙度, %; CP为土壤毛管孔隙度, %; W_1 为空环刀重, g; V 为环刀体积, cm^3 ; W_2 为环刀+饱水土壤重, g; W_3 为烘干后环刀+干土重, g; W_4 为饱和静置12 h排出重力水后的环刀+湿土重, g。

1.3.2 土壤水分入渗速率测定 使用双环土壤水分入渗仪测定土壤水分的入渗速率,该装置主要由双套环和供水的马氏瓶两部分组成。内环和外环组成入渗双套环,其中内环直径25 cm,外环直径50 cm,高度为25 cm;另一部分,马氏瓶高度为160 cm,直径13 cm,其外壁有一根刻度管长度为160 cm(精度0.1 cm),入渗期间马氏瓶内水分损失可由外壁联通管道反映。

试验过程中,内环由马氏瓶自动供水,外环则是在水位低于5 cm时手动添加。在样地进行原位入渗试验,前20 min内,每min记录1次耗水量,之后记录次耗水量,总入渗时间为60 min。入渗速率为单位面积土壤表面在单位时间内入渗的水量(cm/min),计算公式为:

$$I = Q / At \quad (4)$$

式中: I 为入渗率, cm/min ; t 为入渗时间, min; Q 为 t 时间入渗的水量, L; A 为土壤表面积, m^2 。

1.3.3 土壤水分蒸发量测定 使用自制土壤微型蒸发器测定土壤水分蒸发失水量。首先将蒸发器垂直压入原状土中,使其表面与土壤齐平,用切土刀削去周围多余的土壤,再用滤纸封住底部,称重后放回原位。从上午10:00开始,每隔2 h称重1次,至下午6:00结束。2次质量差值为水分蒸发量。

1.4 数据处理

数据通过Microsoft Excel 2016软件进行整理,采用IBM SPSS 27软件进行单因素方差分析,并以平均值和标准误差的形式表示,显著性为 $p < 0.05$ 。使用Origin 2021软件进行图表绘制。

2 结果与分析

2.1 采动地裂缝对周围土壤水分入渗特征的影响

不同处理下土壤水分入渗、蒸发速率的结果见表1。不同植被覆盖下土壤水分入渗和蒸发速率存在差异。稳定入渗速率和平均入渗速率均表现为沙蒿>早熟禾>裸地>苔藓结皮。平均蒸发量同样为沙蒿>早熟禾>裸地>苔藓结皮。裂缝对不同植被覆盖下土壤水分的入渗和蒸发具有明显的促进作用。不同处理的土壤水分入渗过程见图2。

相较于裸地而言,早熟禾和沙蒿覆盖下土壤水分的人渗速率较高;而苔藓结皮覆盖下土壤水分的人渗和蒸发速率最低。苔藓结皮覆盖下土壤水分人渗速率在距离裂缝 0.3 m 处达到最大。0.3 m 处稳定入渗速率较 0.8 m 增加 23.08%,较 1.3 m 稳定入渗速率增加 38.76%。早熟禾覆盖下土壤水分人渗和蒸发速率在距离裂缝 0.3 m 处最大,在 0.3 m 处稳定

入渗速率较 0.8 m 增加 19.51%,较 1.3 m 稳定入渗速率提高 32.93%。沙蒿周围土壤水分稳定入渗速率在 0.3 m 处最大,相较于 0.8 m 处稳定入渗速率增加 27.82%,较于 1.3 m 稳定入渗速率增加 42.79%。裸土的稳定入渗速率略高于生物结皮,低于早熟禾和沙蒿,其稳定入渗速率在距裂缝 0.3 m 处最大,较 0.8 m 增加 18.53%,较 1.3 m 处增加 33.28%。

表 1 不同裂缝距离下不同植被土壤水分入渗和蒸发特征

Table 1 Soil infiltration and evaporation characteristics of different vegetation at different distances from fissures

处理	水平距离/cm	初始入渗速率/ ($\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$)	稳定入渗速率/ ($\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$)	平均入渗速率/ ($\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$)	平均蒸发量/mm
生物结皮	30	1.565±0.010d	0.784±0.079ef	0.913±0.068de	1.485±0.284cde
	80	1.370±0.098e	0.637±0.057hi	0.739±0.107fg	1.222±0.300de
	130	1.291±0.066e	0.565±0.005i	0.668±0.007g	1.085±0.281e
早熟禾	30	2.038±0.011b	0.980±0.031bc	1.135±0.031b	1.983±0.267bc
	80	1.793±0.013c	0.820±0.026def	0.952±0.039cd	1.634±0.257bc
	130	1.646±0.011cd	0.721±0.015fgh	0.861±0.015def	1.520±0.279cde
沙蒿	30	2.342±0.017a	1.305±0.007a	1.441±0.008a	2.591±0.288a
	80	1.948±0.017b	1.021±0.008b	1.176±0.004b	2.072±0.311b
	130	1.780±0.020c	0.914±0.008bcd	1.059±0.007bc	1.876±0.267bc
裸地	30	1.986±0.013b	0.889±0.016cde	1.059±0.143bc	1.578±0.247bcde
	80	1.726±0.111c	0.750±0.108fg	0.903±0.113de	1.357±0.287de
	130	1.557±0.182d	0.667±0.073ghi	0.809±0.097ef	1.227±0.171de

注:数据为平均值±标准误差;同列不同小写字母表示同一植物类型不同水平距离间在 0.05 水平下差异显著($p<0.05$);初始入渗速率为 0~3 min 的平均入渗率;稳定入渗率为入渗后稳定时的入渗率;平均入渗率指达到稳渗时的累计入渗量与时间的比值。下同。

不同处理的入渗情况类似,前 10 min 入渗速率较大,在入渗开始 10 min 后就达到稳定阶段,且达到稳定入渗速率的时间也相近。入渗速率随着距离裂缝远近变化明显,采动地裂缝会增加周围土壤水分的人渗和蒸发速率,随着水平距离的增加而减弱。不同处理在距离裂缝 30 cm 处的平均入渗速率显著高于 130 cm 处。采动地裂缝周围土壤水分入渗规律类似,随着距离的增加入渗速率呈现降低的趋势。沙蒿由于其根系和大孔隙结构,显著提高土壤入渗能力,而苔藓结皮因表层堵塞作用抑制水分入渗。

2.2 采动地裂缝对周围土壤水分蒸发特征的影响

图 3 为距离裂缝 0.3、0.8、1.3 m 处不同处理的土壤水分蒸发曲线。其中沙蒿覆盖下土壤水分蒸发量最大,苔藓结皮覆盖下土壤水分蒸发量最小。规律与入渗速率类似,依次为沙蒿>早熟禾>裸土>苔藓结皮。

相较于裸地而言,早熟禾和沙蒿覆盖下水分蒸发量较高;而苔藓结皮覆盖下土壤水分蒸发速率最低。由表 1 和图 3 可知,苔藓结皮覆盖下蒸发量在距离裂缝 0.3 m 处达到最大,为 1.485 mm,与 0.8、1.3 m 处蒸发量无显著差异。0.3 m 处平均蒸发量较 0.8 m 增加 21.52%,较 1.3 m 增加 36.87%。早熟禾覆盖下

土壤蒸发量在距离裂缝 0.3 m 处较大,为 1.983 mm。0.3 m 处平均蒸发量较 0.8 m 处增加 21.36%,较 1.3 m 处增加 30.46%。沙蒿覆盖下 0.3 m 处达到最大,为 2.591 mm,平均蒸发量较 0.8 m 处增加 38.25%,较 1.3 m 处增加 38.11%。距离 0.3 m 裸地的平均蒸发量较 0.8 m 处增加 16.29%,较 1.3 m 处增加 28.61%。

与裸地相比,苔藓结皮距离裂缝 0.3、0.8、1.3 m 的平均蒸发量分别降低 5.89%、9.95%、11.57%。早熟禾覆盖下距离裂缝 0.3、0.8、1.3 m 的平均蒸发量分别增加 25.67%、20.41%、23.88%。沙蒿覆盖下距离裂缝 0.3、0.8、1.3 m 的平均蒸发量分别增加 64.20%、52.69%、52.89%,增幅最为明显。沙蒿作为深根半灌木,可能在试验期间通过根系从深层土壤吸取水分,并经由叶片蒸腾(生理蒸发),而裸土和结皮物理蒸发作用较弱。研究区土壤水分较低,沙蒿的蒸腾量远超其他处理的表层蒸发量。原因可能为降雨发生时,沙蒿叶片拦截雨水,使得部分雨水短时间存于浅层,而降雨后的裸土,短时间发生入渗和蒸发。因此,尽管研究区土壤水分含量较低,沙蒿处理仍表现出最高的水分散失速率。

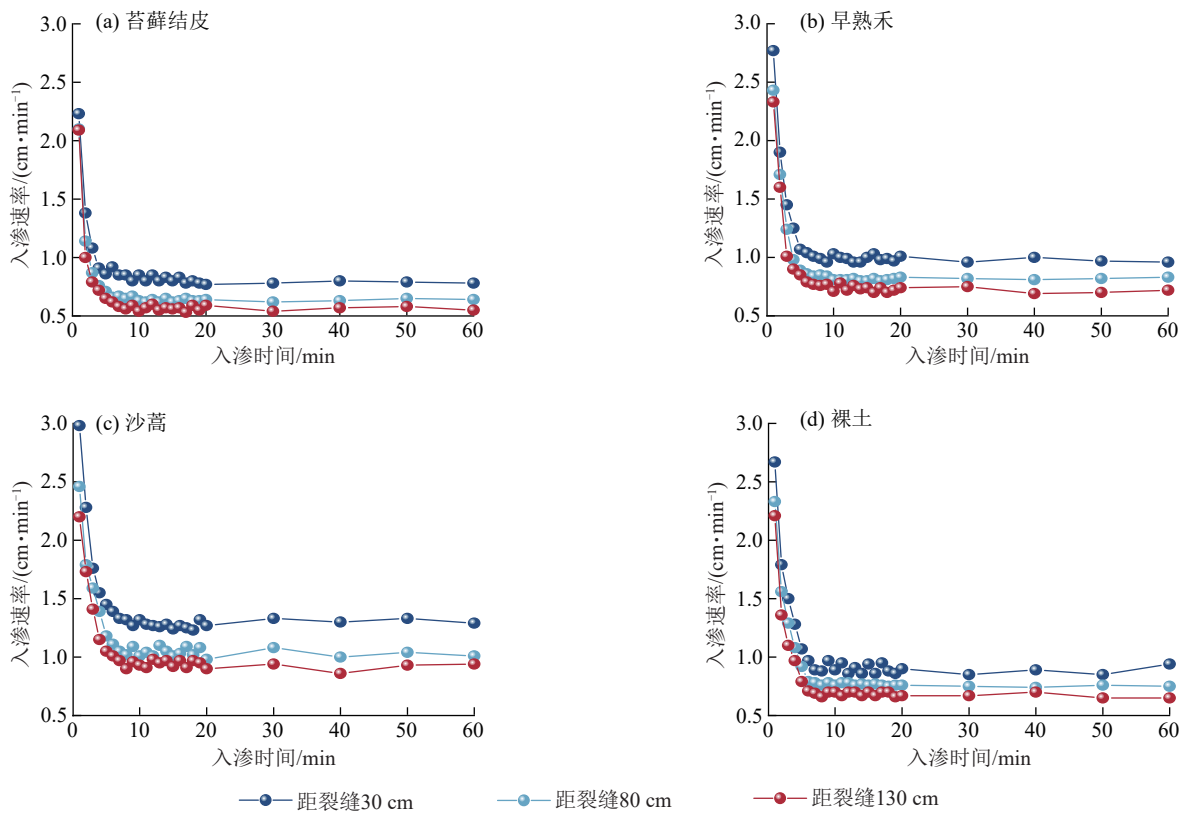


图 2 不同处理土壤水分入渗速率
 Fig. 2 Soil infiltration rates under different treatments

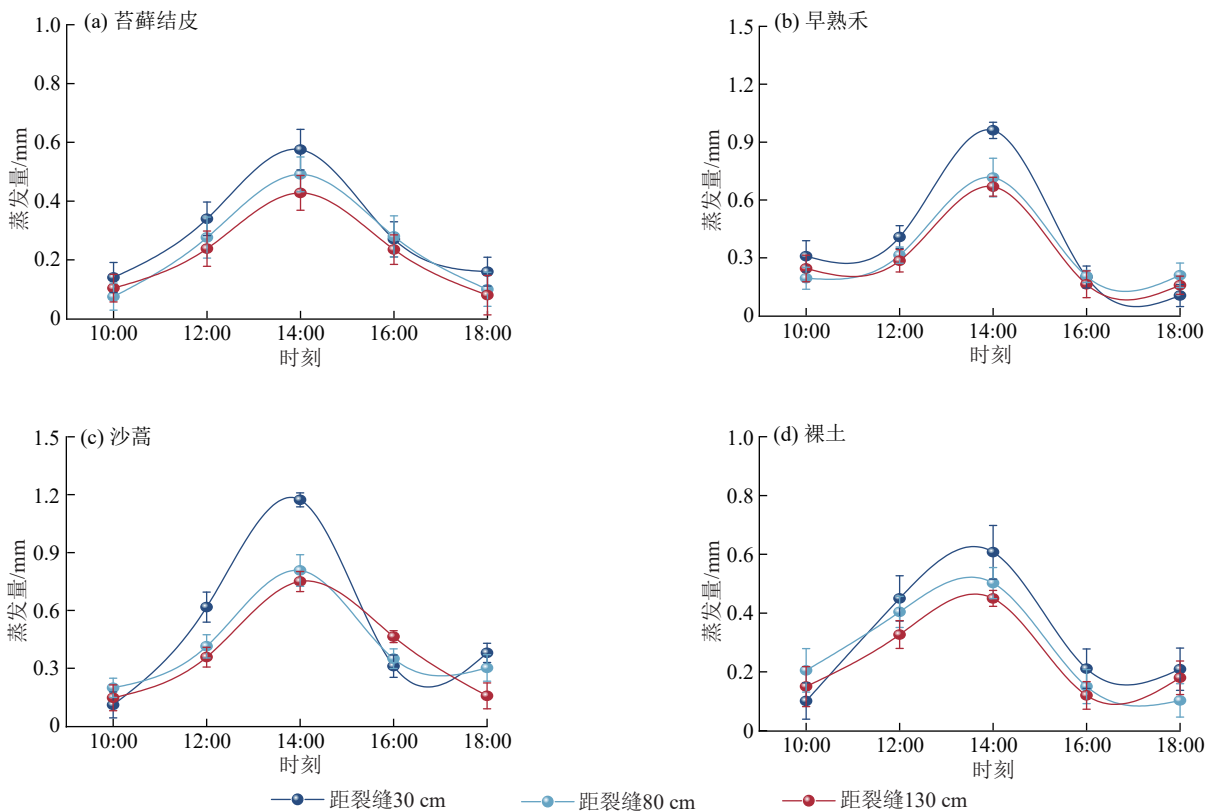


图 3 不同处理土壤水分蒸发
 Fig. 3 Soil evaporation under different treatments

2.3 土壤水分入渗和蒸发及其影响因子

土壤质地改良是土壤生态修复的第一目标,而

土壤颗粒组成变化又是土壤形成、发育及进化的标志^[21]。土壤入渗能力受含水率、体积质量、孔隙度、

土质等综合因素的影响。表 2 为土壤物理性质及机械组成,包括粒径分布、孔隙度、土壤体积质量等。基于美国农业部分类,不同处理砂粒占比均>94%,属于典型砂质土壤,机械组成随深度变化相对均匀。在裂缝水平距离 30 cm 处,沙蒿旁土壤的总孔隙度显著高于其他植被处理,此差异可能与沙蒿发达的根系系统有关,其根系在生长过程中形成大量通道,从而促进土壤大孔隙发育,提高总孔隙度。同样沙蒿处理的毛管孔隙度也显著高于其他处理。土壤体积质量分析表明,早熟禾、沙蒿和裸土处理的土壤体积质量在距离裂缝 0.3、1.3 m 处均无显著差异。距离裂缝 0.3 m 处的生物结皮、早熟禾和沙蒿处理的土壤毛

管孔隙度显著高于 1.3 m 处,表明裂缝近缘更有利于毛管孔隙的形成。然而,各处理的非毛管孔隙度在不同距离间未呈现明显变化。该结果说明裂缝距离对土壤毛管孔隙度具有一定影响,而对土壤体积质量和非毛管孔隙度的影响相对有限。

为明确地裂缝对土壤属性和植被覆盖的相对贡献,采用方差分析方法(ANOVA)和回归方法。结果表明,总孔隙度和土壤体积质量对入渗速率解释率达到 54.42%。进一步分析各因子的相对重要性发现,土壤体积质量是影响入渗速率的主要因子,其次为总孔隙度。说明地裂缝主要通过改变土壤结构来影响水分的入渗过程。

表 2 土壤物理性质及机械组成

Table 2 Soil physical properties and mechanical composition

处理	水平距离/cm	总孔隙度/%	毛管孔隙度/%	非毛管孔隙度/%	土壤体积质量/(g·cm ⁻³)	砂粒/%	粉粒/%	黏粒/%
生物结皮	30	39.86±0.92bc	15.97±1.40ab	23.90±2.32cde	1.41±0.02c	95.19±0.44	4.75±0.39	0.05±0.06
	80	39.72±1.01bcd	14.65±0.89bc	25.07±0.11bcd	1.47±0.02bc	98.79±0.06	1.21±0.06	0
	130	38.29±1.21cde	12.54±1.46cd	25.75±0.25bc	1.55±0.03a	94.49±0.36	5.48±0.35	0.03±0.02
早熟禾	30	39.12±1.39bcd	17.02±0.85a	22.10±0.54efg	1.40±0.02c	100.00	0	0
	80	38.34±0.67cde	15.47±0.91ab	22.87±0.24def	1.43±0.02c	100.00	0	0
	130	38.60±14.55bce	14.53±2.35bc	24.07±1.48cde	1.45±0.02bc	95.01±0.21	4.99±0.20	0.01±0.02
沙蒿	30	45.92±0.76a	17.02±1.08a	28.90±1.84a	1.42±0.10c	94.76±0.13	5.20±0.13	0.04±0.01
	80	37.01±0.68e	16.92±0.51a	20.09±1.19g	1.42±0.03c	95.95±0.01	4.05±0.01	0
	130	35.17±1.39f	14.55±0.23bc	20.62±1.16fg	1.45±0.02bc	100.00	0	0
裸土	30	40.36±1.29b	14.32±1.75bc	26.04±3.04b	1.48±0.07abc	93.91±0.47	6.02±0.43	0.06±0.05
	80	38.77±0.78bcde	11.74±1.06d	27.03±0.28ab	1.51±0.02ab	100.00	0	0
	130	37.84±0.94de	12.38±0.85cd	25.46±1.79bd	1.55±0.02a	94.31±0.19	5.57±0.18	0.12±0.01

注:黏粒为 0~0.002 mm,粉粒为 0.002~0.05 mm,砂粒为 0.05~2 mm。

由图 4 可知,距离裂缝 30 cm 土层深度 5 cm 的裸土含水率小于其他处理。与苔藓结皮相比含水率增加 124.8%;与早熟禾相比含水率增加 87.52%;与沙蒿相比含水率增加 48.32%。土层深度 10 cm 处,裸土含

水率仍小于其他处理。与苔藓结皮相比含水率增加 70.44%;与早熟禾相比含水率增加 83.88%;与沙蒿相比含水率增加 80.27%。整体来看,裸土表层含水率低于其他处理,所以,导致蒸发量小于其他处理。

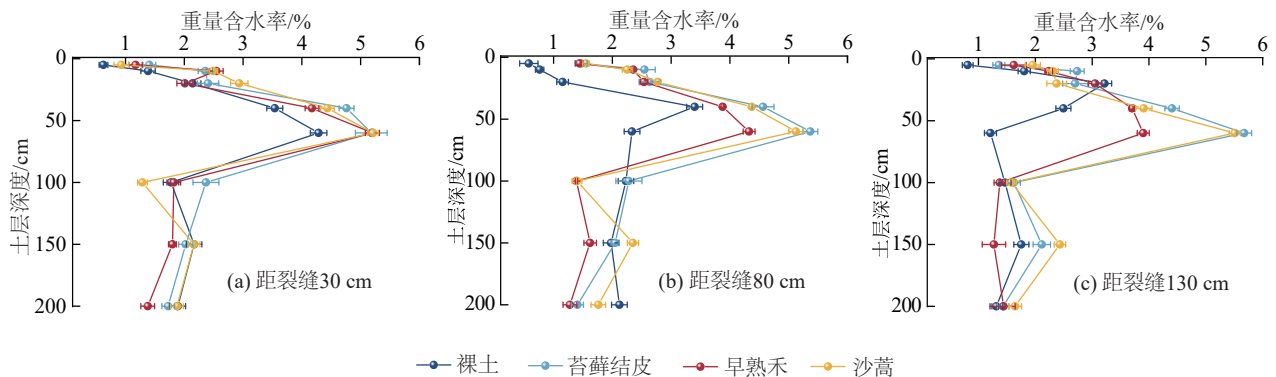


图 4 不同距离土壤剖面质量含水率

Fig. 4 Gravimetric moisture content of soil profiles at different distances

表 3 为土壤水分入渗和蒸发能力及其影响因子的相关性分析,其中包括初始入渗速率、稳定入渗速率、平均入渗速率和蒸发量等指标。结果显示,

不同距离、不同处理的土壤水分入渗速率和蒸发量,与总孔隙度达到极显著正相关,与毛管孔隙度也达到极显著正相关,而与体积质量达到极显著负

相关。由于研究区砂粒占比达 98%，入渗和蒸发能力与机械组成无相关关系。结果表明，土壤入渗和

蒸发特征主要受总孔隙度、毛管孔隙度、体积质量等因素影响。

表 3 土壤水分入渗和蒸发能力及其影响因子相关性

Table 3 Correlation analysis of soil infiltration and evaporation capacity and their influencing factors

项目	总孔隙度	毛管孔隙度	非毛管孔隙度	土壤体积质量	砂粒	粉粒	黏粒
初始速率	0.501**	0.514**	0.093	-0.461**	0.025	-0.025	-0.021
稳定速率	0.531**	0.595**	0.062	-0.524**	0	0	-0.025
平均速率	0.504**	0.579**	0.048	-0.507**	0.001	-0.001	-0.015
蒸发量	0.482**	0.608**	0.006	-0.443**	0.034	-0.033	-0.077

注:*表示显著相关($p < 0.05$);**表示极显著相关($p < 0.01$)。

3 讨论

采煤地裂缝通过多种途径改变土壤水分特性,首先,裂缝的形成增加孔隙度,降低土壤体积质量,促使空气流通和对流,从而增强降水入渗能力;其次,在径流和风蚀作用下,裂缝导致土壤细颗粒向裂缝深处流失^[22];再次,裂缝侧壁直接暴露于空气,加速水分蒸发损失^[23]。地裂缝对水分运移过程具有双重影响:一方面,裂隙结构为水分入渗提供优先路径,促使水分向深层迁移;另一方面,加速入渗降低土壤的持水能力^[24]。地裂缝的形成与扩展的过程中,拉断植物的根系,尤其是深根植物,根系被破坏后,进一步影响植物对水分和养分的吸收;植物的生存依赖土壤、水分和养分环境,地裂缝成为地表水向更深处渗漏的优先通道,使得原本供给植物的土壤水快速沿裂缝流失,导致裂缝两侧的土壤含水率下降,使得植被处于水分胁迫状态。由图 4 可知,裸土和早熟禾处理下的土壤含水率空间规律明显,距裂缝 30 cm 处的含水率最低,随着距离增加而逐渐升高,表现为 30 cm < 80 cm < 130 cm。沙蒿与结皮处理下的土壤含水率未表现出明显的变化规律。

通过对沉陷区 3 种生物(沙蒿、早熟禾、苔藓结皮)及裸土的土壤水分入渗和蒸发试验测定,结果表明,苔藓结皮对土壤水分的入渗表现出阻碍作用。其发育过程阻塞表土的基质孔隙,形成相对的不透水层,同时,苔藓结皮的斥水性增加地表径流,进一步减少水分下渗^[25]。该结论与 WANG 等^[26]在黄土高原的研究一致,即生物结皮能有效阻止水分入渗。沙蒿的土壤水分初始入渗速率和稳定入渗速率显著高于早熟禾、苔藓结皮及裸地,尤其在距离裂缝 0.3 和 0.8 m。此现象主要归结于沙蒿的根系结构主根发达,根系通道能形成优先流,从而显著改善土壤的入渗能力,主根较深、根系空间较大,对土壤结构有一定影响,进而改变土壤体积质量和孔隙度^[27],提高沙

蒿周围水分渗透作用,可见沙蒿可有效地延缓地表径流的产生,有利于储蓄雨水,抑制土壤侵蚀。相比之下,早熟禾根系主要分布于表层范围^[28],虽然其根系通道较沙蒿更为纤细,但与裸地相比仍能促进水分下渗。卢丽媛等^[29]在库布齐沙漠的研究表明,油蒿能显著降低土壤水分蒸发量,可使累计蒸发量减少 32.5%。本次试验结果显示,在相同距离条件下,沙蒿处理的蒸发量均为最大(0.3 m 处为 2.591 mm,0.8 m 处为 2.072 mm,1.3 m 处为 1.876 mm)。此结果可能源于试验前期发生的降雨事件,沙蒿和早熟禾叶片拦截部分降水,导致表层土壤含水率较高;而裸地由于缺乏植被截留,降雨直接下渗,从而减少表层土壤水分蒸发;植被类型不同,冠层结构的差异引起土壤水分较大差异^[30]。在入渗方面,试验结果显示出明显的空间规律,4 种处理在距离裂缝 0.3 m 的入渗速率显著高于 1.3 m,其中距离裂缝 0.3 m 的沙蒿入渗速率和蒸发量显著高于其他处理。

值得注意的是,当前研究结果可能受到特定试验条件的限制。若进一步探究采动地裂缝对土壤水分循环的影响,以后的研究还需进一步考虑:不同尺度裂缝的差异性效应;不同土质的水分入渗和蒸发特征;地形起伏的影响;不同形态裂缝,对周围水分入渗和蒸发的影响。

4 结论

1)采动地裂缝显著促进周边土壤水分的运移过程,并表现出明显的空间梯度特征。不同植被类型对水分的调控效果存在差异,入渗速率由高到低依次为沙蒿 > 早熟禾 > 裸地 > 苔藓结皮。蒸发生态与入渗速率的变化趋势基本一致。在不同距离,入渗速率均呈相同规律,距裂缝 30 cm 处 > 距裂缝 80 cm 处 > 距裂缝 130 cm 处。其中,距离裂缝 130 cm 处的生物结皮处理组平均蒸发量和平均入渗速率最小,分别达到 1.085 mm、0.668 cm/min;而距离裂缝 30 cm 处的沙蒿处理组平均蒸发量和平均入渗速率最大,分

别达到2.591 mm、1.441 cm/min。

2)不同处理的土壤水分存在差异。其中,裸土处理下浅层(0~10 cm)土壤含水率低于其他处理。各处理组的土壤含水率均在60 cm深处达到最大值。其中,在沙蒿覆盖条件下的含水率最高,为5.51%;而裸土表层含水率最低,为0.58%。整体上,各处理的含水率分布表现为沙蒿与苔藓结皮较为接近,且均高于早熟禾与裸土。

3)土壤水分运移过程主要受孔隙结构调控。相关性分析表明,土壤初始入渗速率、稳定入渗速率、平均入渗速率和蒸发量均与体积质量呈极显著负相关($p < 0.01$),与总孔隙度、毛管孔隙度呈极显著正相关($p < 0.01$)。因此,总孔隙度和体积质量是调控水分运移过程的关键因子。

综上,采动裂缝通过改变土壤物理属性(体积质量下降、孔隙度增加)与植被覆盖特征,导致水分入渗和蒸发的空间差异。不同植被在裂缝影响下形成差异化的水分调控模式,其中沙蒿促进作用最强。该结果强调在采煤沉陷区生态修复中应考虑因裂缝诱发的土壤结构变化与植被配置策略。

参考文献:

- [1] 郭达志,金学林,盛业华. 矿区地表塌陷与治理的遥感应用研究[J]. 煤矿环境保护, 1994(6):9-10.
GUOD Z, JIN X L, SHENG Y H. Study on remote sensing application of surface subsidence and treatment in mining area[J]. Energy Environmental Protection, 1994(6):9-10.
- [2] 时伟. 我国煤矿塌陷区土地利用方式综述[J]. 安徽农业通报, 2015, 21(增刊1):96-97.
SHI W. A summary of the comprehensive utilization of the land in coalmine subsidence area[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2015, 21(S1):96-97.
- [3] 胡振琪,龙精华,王新静. 论煤矿区生态环境的自修复、自然修复和人工修复[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8):1751-1757.
HU Z Q, LONG J H, WANG X J. Self-healing, natural restoration and artificial restoration of ecological environment for coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8):1751-1757.
- [4] TRIPATHI N, SINGH R S, SINGH J S. Impact of post-mining subsidence on nitrogen transformation in southern tropical dry deciduous forest, India[J]. Environmental Research, 2009, 109(3):258-266.
- [5] 芦家欣,汤伏全,赵军仪,等. 黄土矿区开采沉陷与地表损害研究述评[J]. 西安科技大学学报, 2019, 39(5):859-866.
LU J X, TANG F Q, ZHAO J Y, et al. Review of study on mining subsidence and ground surface damage in loess mining area[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2019, 39(5):859-866.
- [6] 邹慧,毕银丽,朱郴韦,等. 采煤沉陷对沙地土壤水分分布的影响[J]. 中国矿业大学学报, 2014, 43(3):496-501.
ZOU H, BI Y L, ZHU C W, et al. Effect of mining subsidence on soil moisture dynamic changes of sandy land[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2014, 43(3):496-501.
- [7] 郑海峰,米俊珍,周永利,等. 不同植被复垦对露天矿土壤水热环境的影响[J]. 露天采矿技术, 2019, 34(5):1-3.
ZHENG H F, MI J Z, ZHOU Y L, et al. Effect of different vegetation reclamation on soil hydrothermal environment in open-pit mine[J]. Opencast Mining Technology, 2019, 34(5):1-3.
- [8] CUI Y S, PAN C Z. Hydrological responses to litter density on runoff-infiltration patterns and water conservation in *Pinus tabulaeformis* plantation[J]. Journal of Hydrology, 2023, 619:e129293.
- [9] LI X Y, CONTRERAS S, SOLÉ-BENET A. Unsaturated hydraulic conductivity in limestone dolines: Influence of vegetation and rock fragments[J]. Geoderma, 2008, 145(3/4):288-294.
- [10] 陈龙乾,邓略中,赵志海,等. 开采沉陷对耕地土壤物理特性影响的空间变化规律[J]. 煤炭学报, 1999, 24(6):586-590.
CHEN L Q, DENG K Z, ZHAO Z H, et al. Space variation law of physical characteristics about farmland soil due to mining subsidence[J]. Journal of China Coal Society, 1999, 24(6):586-590.
- [11] 栗丽,王曰鑫,王卫斌. 采煤塌陷对黄土丘陵区坡耕地土壤理化性质的影响[J]. 土壤通报, 2010, 41(5):1237-1240.
LI L, WANG Y X, WANG W B. Effects of mining subsidence on physical and chemical properties of soil in slope land in hilly-gully region of Loess Plateau[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2010, 41(5):1237-1240.
- [12] 聂文杰,赵晓光,杜华栋,等. 榆神府矿区不同导水裂隙发育对地表土壤性质的影响[J]. 西安科技大学学报, 2021, 41(3):464-473.
NIE W J, ZHAO X G, DU H D, et al. Influence of development of different water-conducting fissures on the topsoil properties in Yushenfu mining area[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2021, 41(3):464-473.
- [13] 赵红梅,张发旺,宋亚新,等. 大柳塔采煤塌陷区土壤含水量的空间变异特征分析[J]. 地球信息科学学报, 2010, 12(6):753-760.
ZHAO H M, ZHANG F W, SONG Y X, et al. Spatial variation of soil moisture content in mining subsidence areas of DaLiuta, Shenmu County, Shaanxi Province[J]. Journal of Geo-Information Science, 2010, 12(6):753-760.
- [14] 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(增刊2):490-496.
BI Y L, ZOU H, PENG C, et al. Effects of mining sub-

- sidence on soil water movement in sandy area[J].Journal of China Coal Society,2014,39(S2):490-496.
- [15] 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 Y X, BI Y L, CHEN S L, et al. Effects of subsidence fracture caused by coal-mining on soil moisture content in semi-arid windy desert area[J].Environmental Science and Technology,2015,38(3):11-14.
- [16] 赵红梅.采矿塌陷条件下包气带土壤水分分布与动态变化特征研究[D].北京:中国地质科学院,2006. ZHAO H M. Research of soil water distribution and dynamic characteristics under the coal mining condition[D].Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences,2006.
- [17] YANG D J, BIAN Z F, LEI S G. Impact on soil physical qualities by the subsidence of coal mining: A case study in western China [J]. Environmental Earth Sciences,2016,75(8):e652.
- [18] KIDRON G J. The effect of shrub canopy upon surface temperatures and evaporation in the Negev Desert[J].Earth Surface Processes and Landforms,2009,34(1):123-132.
- [19] 张军红.毛乌素沙地油蒿群落土壤水分分布与动态[D].北京:中国林业科学研究院,2013. ZHANG J H. Distribution and dynamic of soil moisture in *Artemisia ordosica* community in Mu Us sandy land [D].Beijing: Chinese Academy of Forestry,2013.
- [20] 国家林业局.森林土壤水分-物理性质的测定:LY/T 1215—1999[S].北京:中国标准出版社,1999. State Forestry Administration. Determination of forest soil water-physical properties: LY/T 1215—1999[S]. Beijing: China Standards Press,1999.
- [21] 罗雅曦,刘任涛,张静,等.腾格里沙漠草方格固沙林土壤颗粒组成、分形维数及其对土壤性质的影响[J].应用生态学报,2019,30(2):525-535. LUO Y X, LIU R T, ZHANG J, et al. Soil particle composition, fractal dimension and their effects on soil properties following sand-binding revegetation within straw checkerboard in Tengger Desert, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2019,30(2):525-535.
- [22] 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 Y Q, WANG Y J, LI Y F, et al. Study on soil water-wind compound erosion of prairie coal-electricity base[J].Journal of China University of Mining and Technology,2020,49(6):1223-1232.
- [23] 张川,闫浩芳,大上博基,等.表层有效土壤水分参数化及冠层下土面蒸发模拟[J].农业工程学报,2015,31(2):102-107. ZHANG C, YAN H F, Oue Hiroki, et al. Parameterization of surface soil available moisture and simulation of soil evaporation beneath canopy[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2015,31(2):102-107.
- [24] 张中彬,彭新华.土壤裂隙及其优先流研究进展[J].土壤学报,2015,52(3):477-488. ZHANG Z B, PENG X H. A review of researches on soil cracks and their impacts on preferential flow[J].Acta Pedologica Sinica,2015,52(3):477-488.
- [25] XIAO B, SUN F H, HU K L, et al. Biocrusts reduce surface soil infiltrability and impede soil water infiltration under tension and ponding conditions in dryland ecosystem[J].Journal of Hydrology,2019,568:792-802.
- [26] WANG H, ZHANG G H, LIU F, et al. Temporal variations in infiltration properties of biological crusts covered soils on the Loess Plateau of China [J]. Catena,2017,159:115-125.
- [27] 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. 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 and Technology,2022,51(5):839-849.
- [28] 王小君,宋桂龙.践踏胁迫对三种草坪草地下生物量及土壤物理性质的影响[J].中国园林,2007,23(7):65-67. WANG X J, SONG G L. Effects of traffic stress on the underground biomass of three turf grasses and soil physical properties[J].Chinese Landscape Architecture,2007,23(7):65-67.
- [29] 卢丽媛,吴永胜,席查斯娜,等.库布齐沙漠3种固沙灌木对土壤水分蒸发的影响[J].干旱区资源与环境,2025,39(3):141-151. LU L Y, WU Y S, XI C, et al. Effects of three sand-fixing shrubs on soil moisture evaporation in Hobq Desert [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment,2025,39(3):141-151.
- [30] TAVAKOL A, MCDONOUGH K R, RAHMANI V, et al. The soil moisture data bank: The ground-based, model-based, and satellite-based soil moisture data [J]. Remote Sensing Applications: Society and Environment,2021,24:e100649.