

排土场土体裂缝特征对土壤物理性质的影响

李叶鑫^{1,2}, 吕刚², 王道涵², 王双³, 刘爽³, 朱肃⁴

(1. 沈阳工业大学建筑与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110870; 2. 辽宁工程技术大学环境科学与工程学院, 辽宁 阜新 123000
3. 铁岭县自然资源事务服务中心, 辽宁 铁岭 112600; 4. 铁岭市自然资源事务服务中心, 辽宁 铁岭 112000)

摘要:以内蒙古胜利东二号露天煤矿南排土场为研究对象,研究排土场不同土体裂缝区土壤机械组成、孔隙状况、水分空间分布以及饱和导水率的特征和差异。结果表明:3个样地土壤机械组成以砂粒为主,土壤质地为砂质土壤,具有质地疏松、通气透水能力强、蓄水能力差等特点;3个样地土壤容重为1.22~1.45 g·cm⁻³,且随着土层深度的增加先增大后减小;3个样地土壤含水率偏低,且随着土层深度的增加而减小;土壤饱和含水量、田间持水量和土壤有效水含量呈先减小后增大的变化规律,凋萎系数呈先增大后减小的变化规律,且不同土层之间存在差异。随着土层深度的增加,3个样地各个土层(0~10、10~20、20~30、30~40、40~50、50~60 cm)土壤饱和导水率平均值依次为1.16、1.02、0.95、0.71、0.47、0.27 mm·min⁻¹;土壤饱和导水率与土层深度之间具有较好的幂函数关系。土体裂缝的出现改变土壤容重、孔隙状况和土壤水分空间分布等土壤物理性质,进而影响排土场水分入渗、地表径流及产流产沙等水土流失过程。

关键词:排土场;土壤水分;土体裂缝;土壤机械组成;土壤孔隙状况;饱和导水率
中图分类号:S157 **文献标志码:**A

Effects of ground fissure characteristics on soil physical properties in the dump

LI Yexin^{1, 2}, LV Gang², WANG Daohan², WANG Shuang³, LIU Shuang³, ZHU Su⁴

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang, Liaoning 110870, China;
2. College of Environmental Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China;
3. Tieling County Natural Resources Service Center, Tieling, Liaoning 112600, China;
4. Tieling City Natural Resources Service Center, Tieling, Liaoning 112000, China)

Abstract: Taking the south dump of the Shengli Dong No. 2 open-pit coal mine of Datang international power generation company in Xilinhot City, Xilingol League, Inner Mongolia as the research site, the characteristics and differences of soil mechanical composition, pore status, spatial distribution of moisture, and saturated hydraulic conductivity with different ground fissures in the dump were studied. The results indicated that the soil texture in the ground fissures of the dump was sandy soil, which has the characteristics of loose texture, strong air and water permeability, and poor water storage capacity according to the international system of soil particle composition. The soil bulk density with the three plots was 1.22~1.45 g·cm⁻³, and it first increased and then decreased with the increasing of soil depth. The soil water content with the three plots was low and decreased with the increasing of soil depth. Soil saturated water content, field water holding capacity, and soil available water first decreased and then increased, and the wither coefficient first increased and then decreased, and there were significant differences between different soil layers. The saturated hydraulic conductivity of each soil layer (0~10、10~20、20~30、30~40、40~50、50~60 cm) with the three plots was 1.16, 1.02, 0.95, 0.71, 0.47, and 0.27 mm·min⁻¹, respectively. There was a good power function relationship between the soil saturated hydraulic conductivity and soil depth. The

physical properties changed with appearing of ground fissures, such as soil bulk density, pore status, and spatial distribution of soil moisture, which in turn affected soil erosion processes, such as infiltration, surface runoff, and runoff and sediment production in the dump.

Keywords: dump; soil moisture; ground fissure; soil mechanical composition; soil pore status; saturated hydraulic conductivity

煤炭是我国的主要能源,也是重要的工业原料,2018年全国煤炭消费总量27.4亿吨标准煤,占全国一次能源消费总量的59%,预测2025年中国能源消费总需求为55~56亿吨标准煤^[1]。煤炭资源的开采不仅能够带来经济的快速发展,也会产生严重的生态环境问题,其中以露天开采最为严重。我国大型煤矿多位于干旱半干旱地区的内蒙古高原、黄土高原及沙漠化地带^[2],生态环境极其脆弱,其中大规模的露天开采活动会破坏当地的生态系统,形成不同的地貌单元,改变矿区及其周围的土壤理化性质和水文平衡^[3]。排土场是在露天开采过程中形成的平台-边坡相间的阶梯宝塔状巨型人工松散堆积体,作为矿区的一种典型地貌单元,具有坡度陡、坡长长的松散坡面和岩土压实的平台,以及物质组成复杂、孔隙发达、沉陷不均匀等特性^[4],其生态环境恶劣,降雨量少且分布不均匀、蒸发量大,不利于植被的自然恢复。目前,土地复垦与人工植被构建是生态恢复的主要措施,也是最有效的恢复方法之一,它可通过整治改造使丧失的生产能力重新得到利用,有效地恢复受损的生态系统,从而提高生态系统的稳定性,防治水土流失,增强土壤水源涵养功能,被广泛应用于矿区生态修复^[5]。然而,排土场土地复垦与植被恢复后仍然存在较多的生态环境问题。排土场塌陷(塌陷盆地、塌陷坑)、冒落、沉陷、土体裂缝等地质灾害的发生,不仅改变排土场下垫面地形地貌,还能诱发潜蚀、管涌、崩塌、滑坡等水土流失次生灾害^[6]。因此,露天煤矿排土场的治理对于该区域的生态安全以及绿色矿山建设具有重要意义。

在干旱半干旱地区进行植被恢复和生态建设最主要的制约因素就是土壤水分^[7],土壤水分亏缺会严重影响区域植被恢复与重建^[8-9]。因此,水分在排土场土壤的高效节约利用是干旱半干旱露天矿区生态重构的关键^[10]。目前,已有一些学者开展了排土场土壤水分的相关研究。潘德成等^[11]采用变异系数和有效水分参数相结合的方法研究了排土场土壤水分时空分布对植被恢复的影响。杨政等^[12]研究了不同草地群落地上生物量及其对矿区新土体土壤水分、入渗性能的影响,并提出草灌混

播人工草地可以有效地改善土壤水分状况。杨国敏等^[13]利用稳定性同位素示踪技术分析排土场2种典型植物水分来源的差异及水分利用策略。张燕乐等^[14]研究了不同林草地条件下土壤水分蒸散、剖面分布、时间变化等特征,揭示排土场土体重构对时间稳定性的影响。吕刚等^[15]研究了排土场表层土壤饱和和导水率的空间变异特征,得出排土场土壤饱和和导水率的变异系数高达248%,造成这一现象的原因是坡面颗粒分布不均。土体裂缝是煤矿区最直观、分布最广、危害最大的一种衍生地质灾害,极大程度地影响着煤矿区地表径流、入渗、蒸发等水文循环过程和矿区生态安全^[16-18]。张延旭等^[19]研究了采煤塌陷地土体裂缝及其周边区域土壤含水率分布特征,得出土体裂缝会造成土壤水分的大量流失。王强民等^[20]以西部风沙区浅埋煤矿为研究对象,划分采煤塌陷对包气带结构的影响,构建不同裂缝宽度二维土壤水分运移模型,提出地面塌陷影响下的土壤水分运移调控方法。毕银丽等^[21]模拟研究了不同土壤盐浓度条件下裂缝区土壤水盐分布特征,建立采煤地裂缝土壤水盐运移模型。然而,已有研究成果多集中在有采煤塌陷而引起的土体裂缝及其对土壤水分、养分流失等方面的研究,建立了不同的水分运移模型,但却较少关注排土场土体裂缝特征及其对土壤物理性质的影响。在排土场自重及不均匀沉降作用下,土体裂缝在排土场平台前缘形成、发育,不仅加快土壤水分的入渗速率和蒸发强度^[22],增强土壤水分分布的不均匀性和变异程度^[23],也增加了排土场泻溜、崩塌、滑坡等水土流失灾害发生的可能性^[6]。基于此,本文以北方草原区露天煤矿排土场为研究对象,对比分析土体裂缝区土壤质地、孔隙状况、水分空间分布和饱和和导水率的特征和差异,阐明土体裂缝对土壤水分特征的影响,以期对露天煤矿排土场水土流失防治与矿区水资源高效利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古锡林郭勒盟锡林浩特市大唐国际胜利东二号露天煤矿南排土场,地处东经

116°06′~116°14′, 北纬 44°02′~44°07′。该排土场位于矿区的东南部, 总面积 13.66 km², 属中温带干旱半干旱气候, 年均气温 1.7℃, 年均降水量 284.74 mm, 主要集中在 6—8 月份, 占全年降雨量的 71% 以上, 暴雨多发生在此 3 个月内, 7 月中旬到 8 月中旬则更是暴雨频发时段, 多年平均 24 h 最大降水量为 46.8 mm。年平均蒸发量 1 794.6 mm, 年均风速 3.4 m·s⁻¹, 冻结期为 10 月初至 12 月上旬, 解冻期为 3 月末至 4 月中旬, ≥10℃ 积温为 1 750℃, 多年平均无霜期 90~115 d, 最大冻土深度 2.89 m, 土壤为典型栗钙土。露天矿剥离采用单斗-卡车工艺, 排土场采用履带推土机排土。排土场位于采区南侧, 使用年限为 20 a, 排土场总排弃高度、台阶高度、平台宽度依次为 100、25、20 m, 排土场容量为 592×10⁶ m³, 最终松散系数为 1.15。为尽快恢复排土场的植被, 平台和边坡复垦采取覆土措施, 平台覆土厚度约为 1 m, 边坡覆土厚度约为 0.5 m, 复垦植被有柠条 (*Caragana korshinskii*)、沙柳 (*Salix psammophila*)、沙棘 (*Hippophae rhamnoides*)、沙打旺 (*Astragalus adsurgens*)、草木樨 (*Melilotus officinalis*) 等灌木或草本。

1.2 研究方法

于 2017 年 8 月全面调查排土场 1 105 平盘(复垦年限为 5 a) 土体裂缝分布特征, 测定每条土体裂缝的长度、宽度和深度, 根据数理统计原理和描述性统计结果(表 1) 从中选取 3 条典型土体裂缝(GF I、GF II、GF III) 作为研究对象, 土体裂缝形态特征见表 2。在每个土体裂缝区按照 0~10、10~20、20~30、30~40、40~50、50~60 cm 土层深度处分别采集土壤样品, 以测定土壤机械组成(<2 mm)、孔隙状

况、持水能力和导水能力, 每个指标 3 个重复。测定方法: 土壤机械组成采用吸管法测定, 并按照国际制砂粒(2~0.02 mm)、粉粒(0.02~0.002 mm)、粘粒(<0.002 mm) 含量划分土壤质地类型, 土壤容重、孔隙度(总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度)、饱和含水量、田间持水量均采用环刀法测定, 将野外采集的环刀土样浸泡 12 h 使其达到饱和以测定饱和持水量, 再将其悬空 48 h 排出重力水后测定田间持水量, 土壤含水率采用烘干法测定^[24]; 土壤凋萎系数是通过测定土壤最大吸湿量来间接计算的, 土壤最大吸湿量采用饱和硫酸钾测定, 凋萎系数为土壤最大吸水量的 1.5 倍^[24]; 土壤有效水是田间持水量和凋萎系数之差, 反映土壤水分对于植物有效程度。土壤饱和导水率采用定水头法测定, 按照公式(1)^[25] 计算, 并按照公式(2) 将其他温度下测定的饱和导水率换算成标准温度(10℃) 下饱和导水率^[25]:

$$K_t = \frac{R_s}{\frac{h}{C_1 h_1 + C_2 D_1} + \frac{1}{a(C_1 h_1 + C_2 D_1)} + 1} \quad (1)$$

$$K_s = \frac{K_t}{0.7 + 0.03t} \quad (2)$$

式中, K_t 为 $t^\circ\text{C}$ 的饱和导水率($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$); R_s 为稳定入渗率($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$); h 为水头高(cm), 本次试验为 5 cm; C_1 和 C_2 为无量纲经验常数, 分别为 0.316π 和 0.184π; h_1 为环刀打入土壤深度(cm), 本次试验室内环刀法为 5 cm; D_1 为环刀内径(cm), 本次试验室内环刀法为 7 cm; a 为常数, 为 0.2(cm^{-1}); K_s 为 10℃ 的饱和导水率($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)。

表 1 排土场土体裂缝统计特征
Table 1 Statistical characteristic of ground fissures in the dump

形态参数 Morphological parameter	最大值/cm Max.	最小值/cm Min.	中位数/cm Median	平均值/cm Mean	极差/cm Range	标准差 Standard deviation	变异系数/% Coefficient variation	P 值 P value	样本数 Number of samples
地表长度 Surface length	3998.5	11.3	290.4	412.9	3987.2	586.70	142.07	0.000	61
地表宽度 Surface width	40.4	4.3	17.7	18.1	36.1	7.26	40.19	0.964	61
深度 Depth	55.3	5.7	25.5	25.7	49.6	15.13	58.97	0.908	61

2 结果与分析

2.1 土壤质地

土壤机械组成是指土壤中矿物颗粒的大小及其组成比例, 其各粒径颗粒含量比例直接影响土壤结构、孔隙度和透气透水能力, 良好的土壤颗粒组成有利于植物生长, 为根系吸收水分和养分提供条

件^[26]。由图 1 可知, GF I、GF II、GF III 0~60 cm 土层土壤机械组成表现为砂粒>粉粒>粘粒, 随着土层深度的增加, 土壤砂粒、粉粒、粘粒含量无明显变化规律, 土壤砂粒含量为 69.58%~78.62%, 粉粒含量为 10.25%~17.64%, 粘粒含量为 6.72%~14.85%, 不同土体裂缝之间无显著差异($P>0.05$)。土壤机械组成以砂粒含量为主, 粉粒含量和粘粒含量低于

20%;由国际制土壤颗粒组成划分依据可知,土壤质地为砂质土壤。砂质土壤质地疏松,通气透水能力强,蓄水能力差,同时土壤有机质分解速度快,不容易积累,进而导致其保肥性差。

2.2 土壤孔隙状况

土壤容重是土壤物理性质的重要指标之一,反映了土壤的松紧程度,其数值直接影响着土壤通气性、透水性和持水性^[27]。由表 3 可知,GF I 0~60 cm 土层土壤容重为 1.30~1.41 g·cm⁻³,GF II 为 1.22~1.45 g·cm⁻³,GF III 为 1.26~1.43 g·cm⁻³,随着土层深度的增加,土壤容重呈现先增大后减小的变化规律,其最大值出现在 10~20 cm 和 20~30 cm 土层,显著大于其他土层($P<0.05$)。土壤总孔隙度由土壤毛管孔隙度和非毛管孔隙度组成。毛管孔隙度反映土壤的蓄水能力,由表 3 可知,GF I 0~60 cm 土层土壤毛管孔隙度为 29.28%~36.70%,GF II 为 19.88%~39.30%,GF III 为 27.91%~37.18%。随着土层深度的增加,毛管孔隙度呈现先减小后增大的变化规律,其最小值出现在 10~20 cm 或 20~30 cm 土层,显著小于其他土层($P<0.05$)。说明该土层蓄水能力较差,不能为植物生长发育提供充分水

分。非毛管孔隙度反映土壤的通气透水能力,为土壤水分的暂时贮存提供空间,起到削减洪峰、水源涵养的作用。GF I 0~60 cm 土层土壤非毛管孔隙度为 14.27%~18.11%,GF II 为 14.20%~26.14%,GF III 为 14.39%~19.03%。随着土层深度的增加,非毛管孔隙度先增大后减小,与毛管孔隙度的变化规律相反,其最大值出现在 10~20 cm 或 20~30 cm 土层,显著大于其他土层($P<0.05$)。

2.3 土壤水分空间分布

土壤水分是土壤的重要组成部分,为植物生长发育的基础条件,影响植物生长状态^[28]。由表 4 可知,GF I 0~60 cm 土层土壤含水率为 4.14%~6.36%,GF II 为 4.29%~7.16%,GF III 为 4.89%~7.42%,3 个样地土壤含水率偏低。随着土层深度的增加,土壤含水率呈现减小的变化规律,GF I 0~10 cm 和 10~20 cm 土层土壤含水率显著大于其他土层($P<0.05$),GF I 30~40 cm、40~50 cm、50~60 cm 之间无显著差异($P>0.05$);GF II 0~10 cm 土层土壤含水率最高,为 7.16%,显著大于其他土层($P<0.05$);GF III 0~10 cm 土层土壤含水率小于 10~20 cm 土层,20~30 cm 土层土壤含水率显著小于其他土层($P<0.05$)。

表 2 典型土体裂缝形态特征
Table 2 Morphological characteristics of typical ground fissures

样地 Plot	长度/cm Length	宽度/cm Width	深度/cm Depth	周长/cm Perimeter	面积/cm ² Area	长度密度/(cm·cm ⁻²) Length density	面积密度/% Area density
GF I	120.83	9.85±3.48a	29.00±6.08a	287.65	983.92a	0.012	9.84a
GF II	109.90	2.86±0.84c	30.67±5.03a	230.65	286.47c	0.011	2.86c
GF III	104.84	5.77±2.76b	28.67±15.82a	228.58	576.70b	0.010	5.76b

注:裂缝宽度和深度为多个测点的平均值;不同字母表示不同样地间差异显著($P<0.05$)。
Note:The width and depth are the average of multiple measuring points; Different letters indicate significant differences between different plotas ($P<0.05$).

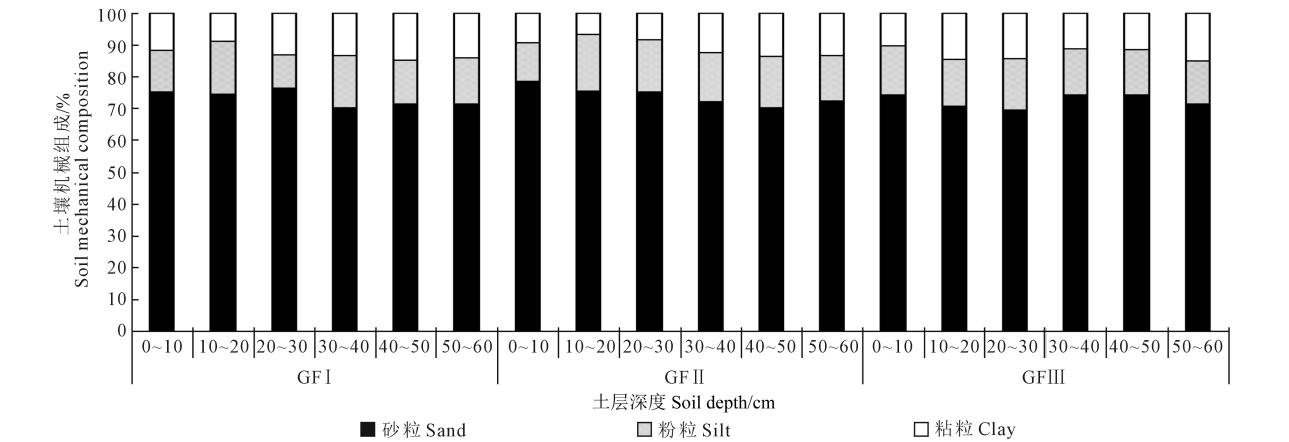


图 1 排土场土壤机械组成
Fig.1 Soil mechanical composition in the dump

表 3 排土场土壤孔隙状况

Table 3 Soil porosity characteristics in the dump

样地 Plot	土层深度 Soil depth /cm	土壤容重 Soil bulk density /(g·cm ⁻³)	毛管孔隙度 Capillary porosity/%	非毛管孔隙度 Non-capillary porosity/%
GFⅠ	0~10	1.30±0.01d	36.70±0.42a	14.27±0.29d
	10~20	1.41±0.00a	29.28±0.02d	18.11±0.01a
	20~30	1.41±0.01a	30.42±0.90c	16.95±0.58b
	30~40	1.36±0.01b	33.17±0.10b	15.76±0.07c
	40~50	1.34±0.01c	32.72±0.18b	17.17±0.12b
	50~60	1.34±0.01c	32.70±0.74b	17.14±0.36b
GFⅡ	0~10	1.31±0.01b	33.41±0.66c	17.35±0.44b
	10~20	1.45±0.00a	19.88±0.10f	26.14±0.06a
	20~30	1.31±0.00b	34.49±0.07d	16.27±0.05c
	30~40	1.25±0.00c	36.51±0.22c	16.19±0.15c
	40~50	1.22±0.00d	38.29±0.06b	15.35±0.04d
	50~60	1.23±0.01d	39.30±0.24a	14.20±0.18e
GFⅢ	0~10	1.39±0.01b	29.55±0.20c	18.40±0.13b
	10~20	1.42±0.00a	29.12±0.34c	17.97±0.22c
	20~30	1.43±0.01a	27.91±0.11d	19.03±0.07a
	30~40	1.26±0.01e	37.18±0.62a	15.07±0.43d
	40~50	1.31±0.01c	36.19±0.26b	14.39±0.18e
	50~60	1.29±0.01d	36.10±0.26b	15.17±0.18d

注:数据为平均值±标准差;不同小写字母表示同一样地不同土层之间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note:The datas are the mean ± standard deviation. Different lower-case letters indicate significant differences between different soil layers in the same plot ($P<0.05$). The same as below.

土壤饱和含水量是指土壤在完全饱和状态下土壤的最大水分含量^[29]。GFⅠ0~60 cm 饱和含水量为 30.19%~37.71%,GFⅡ为 23.16%~40.65%,GFⅢ为 28.59%~37.92%,3 个样地土壤饱和含水量随着土层深度的增加而呈现先减小后增大的变化规律,不同土层之间存在差异($P<0.05$);土壤饱和含水量在土体裂缝深度最大值处出现转变,其数值降低至最小值,GFⅠ和 GFⅡ土壤饱和含水量最小值出现在 10~20 cm 土层,数值为 30.19%和 23.16%,GFⅢ则出现在 20~30 cm 土层,为 28.59%,均显著小于其他土层($P<0.05$);土体裂缝区 0~30 cm 土层内土壤饱和含水量较高,而 30 cm 以下的土壤饱和含水量较小,这可能是受裂缝自身深度影响,土体裂缝的出现会破坏土壤结构,影响土壤持水能力,这与韩振英^[30]研究结果相一致;当土层深度大于 30 cm 时,土壤饱和含水量增加,部分土层高于 0~10 cm 土层。

田间持水量是土壤所能稳定保持的最高土壤含水量,也是土壤中所能保持悬着水的最大量^[29]。GFⅠ0~60 cm 土壤田间持水量为 28.08%~35.38%,GFⅡ为 21.18%~38.42%,GFⅢ为 27.18%~35.89%,不同土层之间存在差异($P<0.05$);随着土

层深度的增加,田间持水量表现为先减小后增大的变化规律,变化规律与土壤饱和含水量一致。

凋萎系数是指植物发生永久性凋萎时的含水量,是植物可利用水的下限^[31]。GFⅠ0~60 cm 凋萎系数为 3.64%~4.50%,GFⅡ为 3.41%~4.83%,GFⅢ为 3.79%~4.50%,不同土层之间存在差异($P<0.05$);随着土层深度的增加,凋萎系数呈现先增大后减小的变化规律,其变化规律与土壤饱和含水量和田间持水量相反;凋萎系数最小值均出现在 30~40 cm 土层,GFⅠ、GFⅡ、GFⅢ依次为 3.64%、3.41%、3.79%。对比不同土体裂缝的土壤含水率和凋萎系数可知,各土层土壤含水率均大于凋萎系数,且土壤含水率是凋萎系数的 1.04~1.87 倍,说明土体裂缝区的土壤水分可以被植物吸收利用,但供给能力较弱。

土壤有效水受土壤、植物、气候等共同影响,是干旱半干旱区农业生态系统中作物产量的主要限制因子之一^[31]。由表 4 可知,GFⅠ0~60 cm 土壤有效水为 23.58%~31.30%,GFⅡ为 16.81%~33.59%,GFⅢ为 22.68%~32.10%,分别占土壤田间持水量的 83.97%~88.57%、79.37%~90.37%、83.44%~89.43%,所占比例较高。3 个样地不同土层之间的土壤有效水有所差异,均表现为 10~20 cm 或 20~30 cm 土层最小,说明该土层土壤水分的利用效率较低。随土层深度的增加,土壤有效水表现为先减小后增大,其变化规律与土壤饱和含水量和田间持水量相一致。

2.4 土壤饱和导水率

土壤饱和导水率是土壤在水分饱和状态下,单位时间内通过单位面积的水量,反映了土壤入渗性能和导水能力^[32-33],其大小直接影响地表径流量和土壤水分分布特征。由图 2 可知,GFⅠ0~10、10~20、20~30、30~40、40~50、50~60 cm 土壤饱和导水率依次为 1.10、0.94、0.87、0.90、0.73、0.42 mm·min⁻¹,GFⅡ依次为 1.18、1.05、0.73、0.40、0.27、0.18 mm·min⁻¹,GFⅢ依次为 1.19、1.06、1.25、0.84、0.40、0.22 mm·min⁻¹,3 个样地表层 0~10 cm 土壤饱和导水率显著大于其他土层($P<0.05$);50~60 cm 土层土壤饱和导水率最小,显著小于其他土层($P<0.05$);随着土层深度的增加,3 个样地土壤饱和导水率的平均值依次为 1.16、1.02、0.95、0.71、0.47、0.27 mm·min⁻¹,呈减小趋势。土壤饱和导水率与土层深度之间具有较好的幂函数关系,其拟合方程为 $K_t = 3.997x^{-0.499}$ (K_t 为土壤饱和导水率, x 为土层深度, $R^2 = 0.72$, $F = 52.157$, $P = 0.002$)。

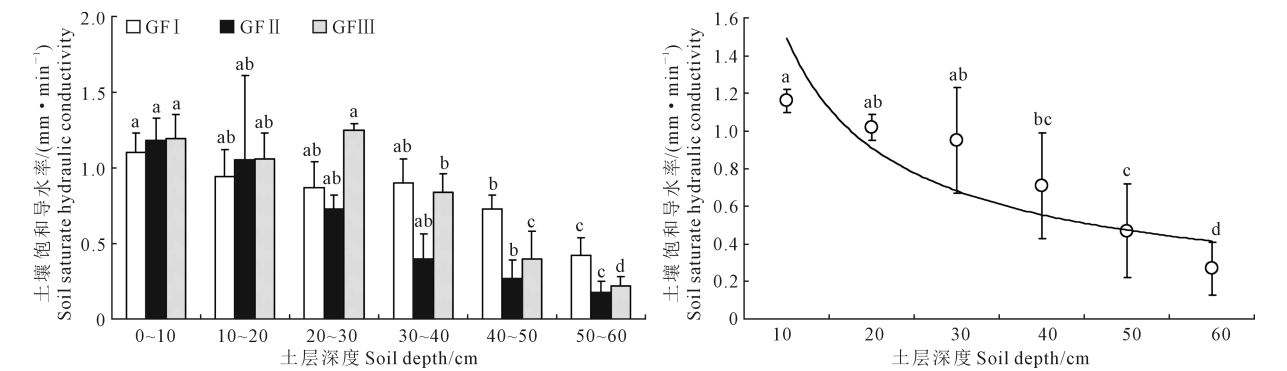
选取土壤含水率(X1)、土壤容重(X2)、饱和含水量(X3)、田间持水量(X4)、凋萎系数(X5)、砂粒含量(X6)、粉粒含量(X7)、粘粒含量(X8)与土壤饱和导水率(Y)进行相关分析,具体结果见表 5。

由表 5 可知,土壤饱和导水率与土壤容重和饱和含水量呈极显著负相关($P<0.01$),与田间持水量呈显著负相关($P<0.05$),与其他指标相关性不显著($P>0.05$)。

表 4 排土场土壤水分分布特征

Table 4 Distribution characteristics of soil water in the dump

样地 Plot	土层深度/cm Soil depth	土壤含水率/% Soil water content	土壤饱和含水量/% Soil saturated water content	田间持水量/% Field water holding capacity	凋萎系数/% Wither coefficient	土壤有效水/% Soil available water
GF I	0~10	6.03±0.33a	37.71±0.42a	35.38±0.41a	4.09±0.31b	31.30±0.42a
	10~20	6.36±0.01a	30.19±0.02d	28.08±0.02e	4.50±0.05a	23.58±0.02e
	20~30	5.09±0.72b	31.21±0.90c	29.42±0.89d	3.99±0.75b	25.42±0.89d
	30~40	4.26±0.08c	34.03±0.10b	31.89±0.10b	3.64±0.15d	28.24±0.10b
	40~50	4.31±0.14c	33.44±0.18b	31.56±0.18bc	3.83±0.24bc	27.72±0.18bc
	50~60	4.14±0.06c	33.29±0.54b	30.90±0.46c	3.75±0.34c	27.15±0.46c
GF II	0~10	7.16±0.53a	36.77±0.68d	34.61±0.66d	3.83±0.57c	30.77±0.67d
	10~20	4.71±0.09bc	23.16±0.10f	21.18±0.10f	4.37±0.12b	16.81±0.10f
	20~30	4.30±0.06c	35.63±0.08e	33.39±0.07e	3.93±0.04c	29.46±0.07e
	30~40	4.29±0.17c	37.80±0.22c	35.42±0.21c	3.41±0.19d	32.01±0.21c
	40~50	4.68±0.05bc	40.04±0.06b	37.38±0.06b	4.38±0.05b	33.01±0.06b
	50~60	5.00±0.18b	40.65±0.24a	38.42±0.24a	4.83±0.21a	33.59±0.24a
GF III	0~10	6.04±0.17b	30.39±0.20c	28.80±0.20d	4.03±0.18c	24.77±0.20d
	10~20	7.42±0.28a	30.23±0.34c	28.73±0.34d	4.21±0.38ab	24.52±0.34d
	20~30	4.89±0.09c	28.59±0.11d	27.18±0.11e	4.50±0.09a	22.68±0.11e
	30~40	5.99±0.48b	37.92±0.62a	35.89±0.61a	3.79±0.57d	32.10±0.61a
	40~50	6.05±0.20b	37.19±0.26b	34.56±0.26b	4.12±0.25bc	30.44±0.26b
	50~60	6.02±0.21b	36.68±0.26b	32.95±0.25c	4.20±0.21ab	28.75±0.25c



注:不同小写字母表示同一样地不同土层之间差异显著($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences between different soil layers in the same plot ($P<0.05$).

图 2 排土场土壤饱和导水率随土层深度的变化

Fig.2 Variation of soil saturated hydraulic conductivity with soil depth in the dump

表 5 土壤饱和导水率与土壤物理性质指标的相关性分析

Table 5 Correlation analysis between soil saturated hydraulic conductivity and soil physical property indexes

	Y	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8
Y	1.000	0.384	-0.688 **	-0.619 **	-0.584 *	0.034	0.199	0.137	-0.293
X1		1.000	0.154	-0.100	-0.112	0.420	0.378	-0.348	-0.201
X2			1.000	-0.966 **	-0.960 **	0.165	0.059	0.326	-0.092
X3				1.000	0.996 **	-0.188	-0.020	-0.385	0.053
X4					1.000	-0.210	0.010	-0.370	0.013
X5						1.000	-0.034	0.181	0.029
X6							1.000	-0.275	-0.777 **
X7								1.000	-0.288
X8									1.000

注: * 表示在 $P<0.05$ 水平下显著相关, ** 表示在 $P<0.01$ 水平下显著相关。

Note: * represents the significant correlation at $P<0.05$, ** represents the significant correlation at $P<0.01$.

3 讨 论

排土场属于一种典型的矿山工程扰动土,其形成与复垦的过程是土壤重构的过程,进而影响土壤孔隙结构和土壤水分分布特征。相关研究表明,排土场平台稳定入渗率低于 $0.2\text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ^[4],植物根系穿透阻力高达 $30\sim 60\text{ kg} \cdot \text{cm}^{-3}$ ^[34]。Reisinger 等^[35]研究得出,土壤容重达到 $1.40\text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 是根系生长的限制值。马迎宾等^[36]研究结果表明裂缝的出现会在一定程度上打破坡面储蓄降水的格局,加剧坡面局部土壤水分散失。毕银丽等^[21]对比分析了 HYDRUS 模拟数值与实测水盐运移特征。由本研究结果可知,排土场 3 个样地土壤容重为 $1.22\sim 1.45\text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,GF I 的 $10\sim 20\text{ cm}$ 和 $20\sim 30\text{ cm}$ 土层、GF II 的 $10\sim 20\text{ cm}$ 土层、GF III 的 $10\sim 20\text{ cm}$ 和 $20\sim 30\text{ cm}$ 土层土壤容重大于 $1.40\text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,不同土体裂缝区出现不同深度的高容重土层,说明上述土层会限制排土场植物生长。同时,韩振英^[30]研究表明,采煤塌陷区裂缝密度为 $1\text{ 条} \cdot 3\text{ m}^{-1}$ 、 $3\text{ 条} \cdot 3\text{ m}^{-1}$ 、 $5\text{ 条} \cdot 3\text{ m}^{-1}$ 、 $7\text{ 条} \cdot 3\text{ m}^{-1}$ 的土壤容重依次为 $1.37\sim 1.57$ 、 $1.50\sim 1.59$ 、 $1.48\sim 1.60$ 、 $1.48\sim 1.56\text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,其数值略高于本研究结果,这是由于本文的研究对象为排土场,属于人工重构土壤,相比于塌陷地其结构松散,孔隙发达,进而导致排土场土壤容重偏小。

排土场 3 个样地 $0\sim 10\text{ cm}$ 土层土壤含水率表现为 $\text{GF II} > \text{GF III} > \text{GF I}$,其变化规律与 3 个样地裂缝宽度相反,这是由于裂缝宽度越小,外露土体与空气的接触面积越小,土壤蒸发速度慢,土壤含水率相对较高,韩振英^[30]也认为裂缝越宽,对裂缝周围的土壤水分影响越大。对于 $10\sim 20\text{ cm}$ 或 $20\sim 30\text{ cm}$ 土层,其土壤有效水相对较低,造成这一现象的原因有两点:一是由于土壤含水率随土层深度的增加而减小;二是由于该土层土体裂缝发育明显,加速水分流失,限制植物对土壤水分的吸收利用。土体裂缝的形成与发育破坏土体连续性和完整性,改变排土场下垫面微地形和土壤结构,进而影响地表径流的运动路径,使水流由水平流动为主转向纵向运动,大量地表径流直接由裂缝向排土场内部运动,能够瞬间增大入渗量和入渗能力,改变渗流场的分布特征。然而,尽管土体裂缝区土壤饱和导水率表现为随土层深度的增大而减小,由此产生的入渗量仍小于直接通过土体裂缝这一导水通道的水分,Liu 等^[37]、张展羽等^[38]也认为土体裂缝能够显著提高入渗,刘展等^[39]研究得出裂缝产生的入渗量占总降雨量的 $42.3\%\sim 51.1\%$,这在一定程度上增加

排土场边坡失稳的可能性^[40]。

排土场土地复垦与生态修复是一个复杂的系统工程,尤其是植被恢复后土体裂缝的出现会改变现有状况,影响排土场水分入渗、地表径流及产流产沙等多个水土流失过程。然而,土体裂缝的形成与发育对排土场水分运移机制的影响仍不清楚,土体裂缝对排土场渗流场、应力场分布以及边坡失稳的作用机理尚不明晰。因此,在今后的研究中,应加强对不同土体裂缝形态参数条件下排土场土壤水分运移规律的探索,监测土体裂缝发育与土壤水分的关系,以期为露天煤矿排土场水分运移机制与水土流失防治提供科学依据。

4 结 论

- 1) 3 个土体裂缝土壤机械组成以砂粒含量为主,土壤质地为砂质土壤,具有较好的通气透水能力;3 个土体裂缝的土壤容重均偏大,这与复垦过程中的压实作用有关,且土壤容重随土层深度呈现先增大后减小的变化规律,其最大值出现在 $10\sim 30\text{ cm}$ 土层。
- 2) 3 个土体裂缝的土壤含水率均偏低,但能够维持植物生长发育所需的水分;随着土层深度的加深,各土壤水分指标呈现不同的变化规律,且各土层之间存在差异;土壤水分在土体裂缝深度最大值处出现转变,其数值降低至最小值,这与土体裂缝破坏土壤结构、降低土壤蓄水能力等有关。
- 3) 3 个土体裂缝土壤饱和导水率随土层深度呈现减小的变化规律,且表层 $0\sim 10\text{ cm}$ 土壤饱和导水率显著大于其他土层;土壤饱和导水率与土层深度具有较好的幂函数关系,与土壤容重、饱和含水量和田间持水量呈极显著或显著负相关。

参 考 文 献:

[1] 谢和平,吴立新,郑德志.2025 年中国能源消费及煤炭需求预测[J]. 煤炭学报,2019,44(7):1949-1960.
XIE H P, WU L X, ZHENG D Z. Prediction on the energy consumption and coal demand of China in 2025[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(7): 1949-1960.

[2] 谷裕,王金满,刘慧娟,等.干旱半干旱煤矿区土壤含水率研究进展[J].灌溉排水学报,2016,35(4):81-86.
GU Y, WANG J M, LIU H J, et al. Advance of soil moisture in arid and semi-arid mining areas[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2016, 35(4): 81-86.

[3] AHIRWAL J, MAITI S K. Assessment of soil properties of different land uses generated due to surface coal mining activities in tropical sal (*Shorea robusta*) forest, India[J]. Catena, 2016, 140: 155-163.

[4] 魏忠义,白中科.露天矿大型排土场水蚀控制的径流分散概念及其分散措施[J].煤炭学报,2003,28(5):486-490.

- WEI Z Y, BAI Z K. The concept and measures of runoff-dispersing on water erosion control in the large dump of opencast mine[J]. Journal of China Coal Society, 2003, 28(5): 486-490.
- [5] LE HOUEROU H N. Restoration and rehabilitation of arid and semiarid Mediterranean ecosystems in North Africa and West Asia; a review[J]. Arid Soil Research and Rehabilitation, 2000, 14(1): 3-14.
- [6] 吕刚,李叶鑫,宁宝宽,等.暴雨作用下排土场平台-边坡系统土壤侵蚀过程模拟研究[J].煤炭学报,2021,46(5):1463-1476.
- LV G, LI Y X, NING B K, et al. Soil erosion process of platform-slope system of dump under heavy rain[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(5): 1463-1476.
- [7] 王金满,郭凌俐,白中科,等.黄土区露天煤矿排土场复垦后土壤与植被的演变规律[J].农业工程学报,2013,29(21):223-232.
- WANG J M, GUO L L, BAI Z K, et al. Succession law of reclaimed soil and vegetation on opencast coal mine dump of loess area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(21): 223-232.
- [8] 张春梅,焦峰,温仲明,等.延河流域自然与人工植被地上生物量差异及其土壤水分效应的比较[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2011,39(4):132-138,146.
- ZHANG C M, JIAO F, WEN Z M, et al. Differences of above-ground biomass and comparisons of its effect on soil moisture between natural vegetation and artificial vegetation in Yanhe Basin[J]. Journal of Northwest A & F University(Natural Science Edition), 2011, 39(4): 132-138, 146.
- [9] 张志南,武高林,王冬,等.黄土高原半干旱区天然草地群落结构与土壤水分关系[J].草业学报,2014,23(6):313-319.
- ZHANG Z N, WU G L, WANG D, et al. Plant community structure and soil moisture in the semi-arid natural grassland of the Loess Plateau[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2014, 23(6): 313-319.
- [10] 毕银丽,彭苏萍,杜善周.西部干旱半干旱露天煤矿生态重构技术难点及发展方向[J].煤炭学报,2021,46(5):1355-1364.
- BI Y L, PENG S P, DU S Z. Technological difficulties and future directions of ecological reconstruction in open pit coal mine of the arid and semi-arid areas of western China[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(5): 1355-1364.
- [11] 潘德成,邓春晖,吴祥云,等.矿山复垦区土壤水分时空分布对植被恢复的影响[J].干旱区资源与环境,2014,28(3):96-100.
- PAN D C, DENG C H, WU X Y, et al. Influence of spatiotemporal distribution characteristics of soil moisture on vegetation restoration in mine reclamation area[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2014, 28(3): 96-100.
- [12] 杨政,王冬,刘玉,等.矿区排土场人工草地土壤水分及入渗特征效应[J].草业学报,2015,24(12):29-37.
- YANG Z, WANG D, LIU Y, et al. Soil moisture and infiltration characteristics for artificial pasture planted on opencast coal mining tailings[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2015, 24(12): 29-37.
- [13] 杨国敏,王力.黑岱沟露天矿区排土场2种典型植物的水分来源及利用策略[J].自然资源学报,2016,31(3):477-487.
- YANG G M, WANG L. Water use patterns of two typical plants based on hydrogen and oxygen stable isotopes at dumping site in the opencast coal mining area of Heidaigou[J]. Journal of Natural Resources, 2016, 31(3): 477-487.
- [14] 张燕乐,甄庆,张兴昌,等.露天煤矿排土场不同植被土壤水分特征及其时间稳定性[J].水土保持学报,2020,34(3):212-218.
- ZHANG Y L, ZHEN Q, ZHANG X C, et al. Soil water characteristics and temporal stability under different vegetation patterns in opencast coal mine dump[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(3): 212-218.
- [15] 吕刚,刘雅卓,李叶鑫,等.露天煤矿排土场边坡表层土壤水分物理性质空间变异特征[J].土壤通报,2018,49(1):69-77.
- LV G, LIU Y Z, LI Y X, et al. Spatial variation characteristics of physical properties of surface soil moisture in dump slope of Haizhou open-pit coal mine[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2018, 49(1): 69-77.
- [16] 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 C, HU Z Q. 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.
- [17] 马施民,王洋,杨雯,等.山西煤矿潞安矿区地裂缝发育特征及形成机理分析[J].中国地质灾害与防治学报,2014,25(1):28-32.
- MA S M, WANG Y, YANG W, et al. Characteristics of ground fissures development and formation mechanism in Lu'an mining area, Shanxi Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2014, 25(1): 28-32.
- [18] 李叶鑫,吕刚,王道涵,等.北方草原区露天煤矿外排土场平台土体裂缝形态特征[J].煤炭学报,2020,45(11):3781-3792.
- LI Y X, LV G, WANG D H, et al. Morphological characteristics of ground fissures at surface coal mine dump in northern grassland of China[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(11): 3781-3792.
- [19] 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 & Technology, 2015, 38(3): 11-14.
- [20] 王强民,董书宁,王皓,等.西部风沙区采煤塌陷地裂缝影响下的土壤水分运移规律及调控方法[J].煤炭学报,2021,46(5):1532-1540.
- WANG Q M, DONG S N, WANG H, et al. Influence of mining subsidence on soil water movement law and its regulation in blown-sand area of western China[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(5): 1532-1540.
- [21] 毕银丽,伍越,张健,等.采用 HYDRUS 模拟采煤沉陷地裂缝区土壤水盐运移规律[J].煤炭学报,2020,45(1):360-367.
- BI Y L, WU Y, ZHANG J, et al. Simulation of soil water and salt movement in mining ground fissure zone based on HYDRUS[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 360-367.
- [22] NOVÁK V. Soil-crack characteristics-estimation methods applied to heavy soils in the NOPEX area[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1999, 98/99: 501-507.
- [23] 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].生态杂志,2018,37(12):3769-3779.
- LI Y X, WANG D H, LV 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.

[24] 张洪江.水土保持与荒漠化防治实践教程[M].北京:科学出版社,2013.

ZHANG H J. Practical course of soil and water conservation and desertification control[M]. Beijing: Science Press, 2013.

[25] 朱良君,张光辉,任宗萍.4种土壤入渗测定方法的比较[J].水土保持通报,2012,32(6):163-167.

ZHU L J, ZHANG G H, REN Z P. Comparing four methods for soil infiltration measurement[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012, 32(6): 163-167.

[26] 王长庭,王根绪,刘伟,等.高寒草甸不同类型草地土壤机械组成及肥力比较[J].干旱区资源与环境,2013,27(9):160-165.

WANG C T, WANG G X, LIU W, et al. Comparison of soil mechanical composition and soil fertility at different grassland types in alpine meadow[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013, 27(9): 160-165.

[27] 刘洁,李贤伟,纪中华,等.元谋干热河谷三种植被恢复模式土壤贮水及入渗特性[J].生态学报,2011,31(8):2331-2340.

LIU J, LI X W, JI Z H, et al. Soil water holding capacities and infiltration characteristics of three vegetation restoration models in dry-hot valley of Yuanmou[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(8): 2331-2340.

[28] 莫保儒,蔡国军,杨磊,等.半干旱黄土区成熟柠条林地土壤水分利用及平衡特征[J].生态学报,2013,33(13):4011-4020.

MO B R, CAI G J, YANG L, et al. Soil water use and balance characteristics in mature forest land profile of *Caragana korshinskii* in semiarid loess area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(13): 4011-4020.

[29] 伍海兵.上海中心城区典型绿地土壤物理性质特征研究[J].土壤,2018,50(1):155-161.

WU H B. Study on soil physical properties of green belts in central urban area of Shanghai[J]. Soils, 2018, 50(1): 155-161.

[30] 韩振英.风沙区采煤塌陷裂缝对土壤物理及水分特性影响研究[D].焦作:河南理工大学,2017.

HAN Z Y. Study on the effect of coal mining collapse crack on soil physical and water characteristics in sandy area[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2017.

[31] 王超花.半干旱黄土区不同土地利用方式对土壤生态水文性质的影响[D].兰州:兰州大学,2016.

WANG C H. The effect of different land uses on soil eco-hydrology properties in the semiarid loess area[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2016.

[32] FARES A, ALVA A K, NKEDI-KIZZA P, et al. Estimation of soil hydraulic properties of a sandy soil using capacitance probes and Guelph permeameter[J]. Soil Science, 2000, 165(10): 768-777.

[33] 王子龙,赵勇钢,赵世伟,等.退耕典型草地土壤饱和导水率及其影响因素研究[J].草地学报,2016,24(6):1254-1262.

WANG Z L, ZHAO Y G, ZHAO S W, et al. Study on soil saturated hydraulic conductivity and its influencing factors in typical grassland of farmland conversion[J]. Acta Agrestia Sinica, 2016, 24(6): 1254-1262.

[34] 白中科,王文英,李晋川,等.黄土区大型露天煤矿剧烈扰动土地生态重建研究[J].应用生态学报,1998,9(6):63-68.

BAI Z K, WANG W Y, LI J C, et al. Ecological rehabilitation of drastically disturbed land at large opencut coal mine in loess area[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1998,9(6): 63-68.

[35] REISINGER T W, SIMMONS G L, POPE P E. The impact of timber harvesting on soil properties and seedling growth in the South[J]. Southern Journal of Applied Forestry, 1988, 12(1): 58-67.

[36] 马迎宾,黄雅茹,王淮亮,等.采煤塌陷裂缝对降雨后坡面土壤水分的影响[J].土壤学报,2014,51(3):497-504.

MA Y B, HUANG Y R, WANG H L, et al. Effects of collapse fissures caused by coal mining on soil moisture in slope lands after rain[J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, 51(3): 497-504.

[37] LIU C W, CHENG S W, YU W S, et al. Water infiltration rate in cracked paddy soil[J]. Geoderma, 2003, 117(1/2): 169-181.

[38] 张展羽,陈于,孔莉莉,等.土壤干缩裂缝几何特征对入渗的影响[J].农业机械学报,2015,46(10):192-197.

ZHANG Z Y, CHEN Y, KONG L L, et al. Impacts of desiccation crack geometric characteristics on infiltration in soil[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(10): 192-197.

[39] 刘展.间歇性降雨条件下高陡边坡系统侵蚀特征试验研究[D].西安:西安理工大学,2020.

LIU Z. Experimental study on erosion characteristics of high and steep slope system under intermittent simulated rainfall[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020.

[40] 邹飞,程肖,赵炼恒,等.水力效应对裂缝边坡稳定性影响的上限分析[J].北京工业大学学报,2016,42(12):1864-1872.

ZOU F, CHENG X, ZHAO L H, et al. Upper bound analysis of cracked slopes subject to hydraulic effect[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2016, 42(12): 1864-1872.