

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.06.016.

张伟, 郭小平, 李文烨. 干旱矿区重构土体蓄水层适宜粒径级配研究[J]. 水土保持研究, 2024, 31(6): 290-298.

Zhang Wei, Guo Xiaoping, Li Wenye. Study on Suitable Particle Size Gradation of Reconstructed Soil Aquifer in Arid Mining Area[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(6): 290-298.

干旱矿区重构土体蓄水层适宜粒径级配研究

张伟, 郭小平, 李文烨

(北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083)

摘要: [目的] 探究粒径级配对重构土体蓄水层持水性能的影响, 以期提高西部矿区排土场重构土体保水能力。[方法] 基于砂土的颗粒级配标准, 将砂岩和泥岩风化物筛分成 4 个粒径等级 (极粗砂: 2~5 mm; 粗砂: 0.5~2 mm; 中砂: 0.25~0.5 mm; 细砂: <0.25 mm), 设计了砾砂土、粗砂土和中砂土各 11 组不同粒径级配方案, 进行土柱模拟试验, 研究了不同重构土体在入渗和蒸发条件下的持水性能。[结果] (1) 重构土体各入渗指标受粒径级配影响显著, 累积入渗量与极粗砂含量呈显著负相关关系 ($p < 0.01$); 入渗时间与极粗砂和粗砂含量呈显著负相关关系 ($p < 0.05$), 与中砂和细砂含量呈显著正相关关系 ($p < 0.01$)。 (2) 重构土体土壤累积蒸发量随着粒径增大而减小, 随着粒径减小而增大。 (3) 主成分分析结果表明: 极粗砂: 粗砂: 中砂: 细砂以 4: 2: 2: 2, 0: 2: 4: 4 质量比混合的重构蓄水层在持水性能综合评价结果中得分较高; 但第二组细砂、中砂需求量大, 并不适合实际应用。[结论] 粒径级配对重构土体持水性能影响显著, 且本研究所筛选出的粒径级配 (粒径依次降低) 为 4: 2: 2: 2 的蓄水层结构持水能力强, 可作为西部干旱矿区排土场适宜推广的蓄水层粒径级配结构。

关键词: 干旱矿区; 重构土体; 粒径; 主成分分析; 持水能力

中图分类号: S152.3; S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)06-0290-09

Study on Suitable Particle Size Gradation of Reconstructed Soil Aquifer in Arid Mining Area

Zhang Wei, Guo Xiaoping, Li Wenye

(School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to examine the influence of particle size level pairing on the water-holding capacity of the reconstructed soil aquifer, and to improve the water retention and storage capacity of the reconstructed soil in the dump in the western mining area. [Methods] Based on the particle size grading standard of sand soil, sandstone and mudstone weathering were screened into 4 particle size grades (extremely coarse sand: 2~5 mm, coarse sand: 0.5~2 mm, medium sand: 0.25~0.5 mm and fine sand: <0.25 mm). Eleven groups of different particle size grading schemes were designed for gravel sand, coarse sand and medium sand, and soil column simulation tests were conducted to study the water retention performance of different restructured soils under infiltration and evaporation conditions. [Results] (1) The infiltration indexes of restructured soil were significantly affected by particle size grading, and the cumulative infiltration amount was significantly negatively correlated with the content of extremely coarse sand ($p < 0.01$). The infiltration time was significantly negatively correlated with the content of extremely coarse sand and coarse sand ($p < 0.05$), and significantly positively correlated with the content of medium sand and fine sand ($p < 0.01$). (2) The cumulative evaporation of restructured soil decreased with the increase of particle size, and increased with the decrease of particle size. (3) The results of principal component analysis showed

收稿日期: 2023-11-16

修回日期: 2023-12-19

资助项目: 国家重点研发计划 (2017YFC0504406); 内蒙古自治区科技重大 (2020ZD0021)

第一作者: 张伟 (1998—), 男, 甘肃会宁人, 硕士研究生, 研究方向为矿区生态修复。E-mail: 18810125095@163.com

通信作者: 郭小平 (1962—), 男, 甘肃天水人, 博士, 教授, 主要从事工程绿化研究。E-mail: guoxp@bjfu.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

that the restructured aquifer with the mass ratio of extremely coarse sand : coarse sand : medium sand : fine sand of 4 : 2 : 2 : 2 and 0 : 2 : 4 : 4 had higher scores in the comprehensive evaluation results of water retention performance; but the second group of fine sand and medium sand required a large amount, which was not suitable for practical application. [Conclusion] The particle size gradation has a significant effect on the water-holding capacity of restructured soil. The two groups of aquifer structures with particle size gradation (the particle size decreases in turn) of 4 : 2 : 2 : 2 have strong water-holding capacity, which can be used as the suitable particle size gradation structure of the aquifer for dumping in the western arid mining area.

Keywords: arid mining area; restructured soil; particle size; principal component analysis; water-holding capacity

西部矿区作为我国煤炭能源供给的重要战略基地,属于典型矿产资源高强度开采区,且多以露天开采为主^[1]。该开采方式破坏了矿区原地貌,使得采矿剥离物堆积而成的排土场成为露天矿区开采后的主要地貌形式。然而排土场上剥离物在堆放过程中,忽视了土壤层序构建,出现土壤结构变差、持水能力下降等问题^[2]。加之该地区又处于干旱区,降水稀少,蒸发强烈,水资源严重缺乏,制约着植被的自然生长,从而对矿区生态环境产生严重影响^[3]。因此,露天矿区排土场土体重构工作迫在眉睫,可通过改善土壤孔隙结构及土壤空间分布特征,提高土壤保蓄水能力,为植被恢复提供保障^[4]。

大量学者对矿区土体重构进行了研究^[5]。矿区及其周边的土壤是重构的主要材料,适宜的覆土质地和厚度,可提高土体的含水率,对于露天矿区排土场的植被恢复有积极作用^[6]。但矿区表土资源有限,需筛选适宜的矿区剥离物作为表土替代材料,并设置不同重构结构以提高重构土壤质量^[7]。严子循等^[8]研究表明内蒙古典型草原矿区土体重构可选择在矿剥离物自然堆积体上覆盖岩土剥离物、煤矸石和粉煤灰的混合物,且当岩土剥离物:煤矸石:粉煤灰的比值为3:4:3时,土壤持水能力较优。矿区剥离物与表土搭配进行土体重构也较为常见,吴奇凡等^[9]筛选出“沙土-黄绵土-砒砂岩风化物”型层状土体在短时间内能储存大量水分,可作为晋陕蒙接壤区露天矿排土场较理想的重构土体结构。表层为50 cm黄土、中间20 cm砒砂岩风化物,下层设置容重较高的土石混合结构也是一种良好的排土场重构结构^[10]。砒砂岩风化物与表土混合构建出“上层为沙黄土和砒砂岩风化物混合,下层以砒砂岩风化物为防渗层”的处理,且当沙黄土和砒砂岩风化物以7:3掺混时,重构土体土壤蒸发较小、土壤水分供给稳定,提高了植物对土壤水分的利用效率^[11]。综上所述,目前研究大多数集中于不同基质配比和结构对露天矿区排土场重构土体水分运移的影响,而粒径级配对矿区重构土体水分运移的影响相关的研究较少;且粒径级配对改善土壤持水性能至关重

要,因此研究粒径级配对矿区重构土体水分运移的影响机理很有必要。

西部矿区剥离物以砂岩和泥岩为主,相较于排土场排放的其他岩石,泥岩和砂岩的风化速率较高,二者成土速度也会对应更快^[12]。加之砂岩、泥岩风化物中单项养分含量丰富,具有一定的养分供给能力,因此适宜作为土体重构的备选材料^[13]。故本研究针对西部矿区排土场土壤蒸发强烈、水分下渗快、保蓄水差等问题,将砂岩和泥岩风化物进行粒径级配,设置不同重构模式进行土柱模拟试验,分析入渗、蒸发过程中各土柱持水性能变化,筛选出水分保蓄效果较适宜的重构土体模式,为西北干旱荒漠区露天矿排土场近自然土体重构提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

新星煤矿位于内蒙古乌海市,地理坐标为39°42′03″—39°42′36″N,106°52′50″—106°54′17″E,该区域气候为典型的温带大陆性气候,年平均气温为9.8℃,多年平均降水量为150 mm,降水稳定性差,年际变化大,近70%的降雨集中在7—9月。年平均蒸发量为3 249 mm,远大于年平均降水量,气候干旱。年均风速3.1~4.7 m/s,最大风速28 m/s,大风天气频繁,主要集中在4—8月,多年平均大风日数10~32 d。土壤类型主要为棕钙土、风沙土。植被多具耐旱性、抗风性,主要植物种为四合木(*Tetraena mongolica*)、霸王(*Sarcosyium xanthoxylon*)和油蒿(*Artemisia ordosica*)等,植被稀疏,以灌-草结构为主要植物群落特征^[14]。

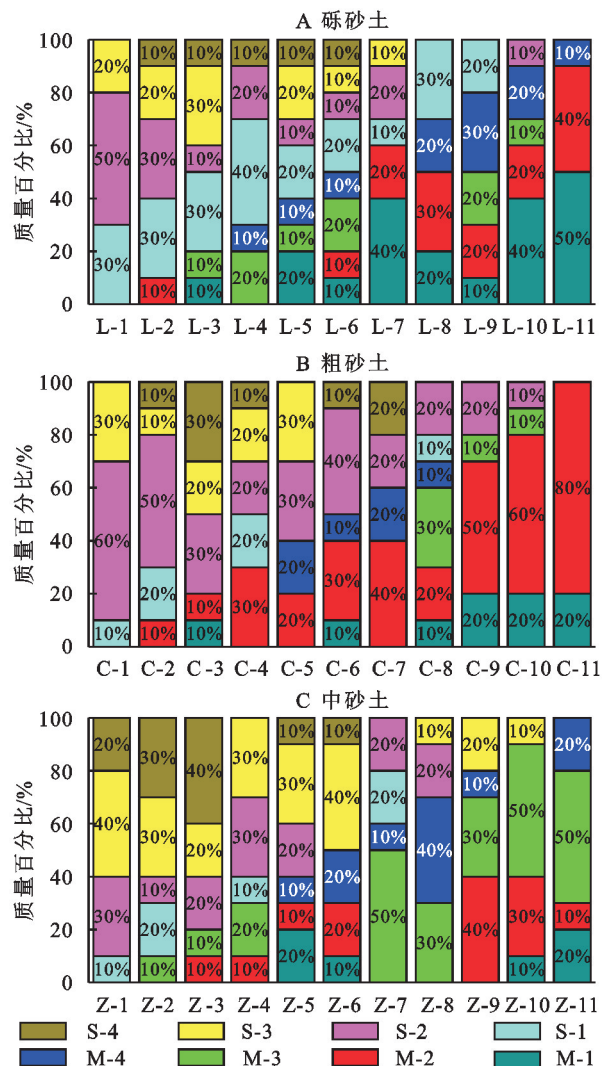
1.2 试验材料

试验所需砂岩风化物(S)、泥岩风化物(M)均采集于新星煤矿开采区,将已剥离基质分类采集,自然风干后除杂;采用4目、10目、35目和60目的标准筛进行手动筛分,较大颗粒需用磨粉机粉碎,筛分时将基质均匀撒在筛网上,水平震荡3 min并不断拍打,最终筛分出极粗砂(2~5 mm)、粗砂(0.5~2 mm)、中砂(0.25~0.5 mm)和细砂(<0.25 mm)4组粒级

的样品备用。试验土柱为内径 17.5 cm, 高 25 cm 的塑料桶, 供水系统为内径 20 cm、高 30 cm 的马氏瓶。

1.3 试验设计

依据国标《GB50007—2002》砂土的分类标准, 将粒径大于 2 mm 的颗粒质量占总质量 25%~50% 的砂土定名为砾砂土; 将粒径大于 0.5 mm 的颗粒质量超过总质量 50% 的砂土定名为粗砂土; 将粒径大于 0.25 mm 的颗粒质量超过总质量 50% 的砂土定名为中砂土。本研究采用 Design-Expert 软件的“最佳混料配比设计”功能进行试验设计。将 4 种不同粒径泥岩和砂岩风化物含量设置为变量, 在各变量占比总和为 100% 的约束条件下, 采用 D-Optimal 的试验设计方法得到了混合配比方案, 并在该方案中筛选出满足砾砂土、粗砂土和中砂土的粒径配比。最终得到砾砂土(编号 L)、粗砂土(编号 C)和中砂土(编号 Z)各 11 组试验处理, 其质量百分比如图 1 所示。



注: S 和 M 分别表示砂岩和泥岩风化物; 1, 2, 3, 4 分别为粒径 2~5 mm, 0.5~2 mm, 0.25~0.5 mm 和 <0.25 mm; S-1 即表示 2~5 mm 粒径的砂岩风化物, 以此类推。

图 1 试验设计

Fig. 1 Experimental design

1.3.1 入渗模拟试验 按乌海排土场土壤平均容重 1.53 g/cm³ 称取 19 cm 土柱相应重量, 将粒级级配的土样充分混合, 均匀填装到土柱中并压实, 静置 24 h 完成自然沉降。试验过程水头控制在 2 cm, 根据水头高度和土柱内径计算出最初加水的体积, 用量筒直接量取, 瞬时倒入土柱, 立即打开马氏瓶供水, 定时读取累积入渗量, 并记录湿润峰运移刻度。当湿润峰运移到土柱底部时, 停止供水, 试验结束。试验过程中尽量减少人为活动造成的室内温度大幅度变化, 并用保鲜膜密封土柱顶端(保鲜膜密封后扎若干个小孔), 不考虑蒸发对入渗过程的影响^[15]。

1.3.2 蒸发模拟试验 采用马氏瓶继续向土柱供水, 使土柱达到饱和。用塑料薄膜密封土柱上表面, 防止土壤表层水蒸发, 开始排出重力水。在排水过程中用称重法测定整个土柱持水量的变化, 当电子秤每 6 h 读数稳定则表明重力水排空, 去除保鲜膜开始蒸发。开启 100 W 的红外线灯开始蒸发试验, 土壤表面与灯的垂直距离为 30 cm。光照时段设置为每天 8:00—17:00, 并配合使用风扇以加速空气的流动。蒸发试验持续 30 d, 每 24 h 对土柱进行称重并记录, 以计算累积蒸发量^[15]。

1.4 数据统计与分析

试验数据采用 Excel 2018 进行初步整理统计, 采用 Origin Pro2016 进行图表绘制。应用 SPSS 软件中的 Pearson 相关分析法对重构土体粒径级配与入渗指标及累积蒸发量进行相关性分析。并利用 SPSS 软件对不同重构土体持水能力进行主成分分析, 从入渗能力、持水能力和蒸发水平 3 个方面综合评价重构土体持水能力, 同时结合各处理基质研磨成本, 筛选出适宜推广的蓄水层粒径级配结构。

2 结果与分析

2.1 排土场重构土体入渗特征分析

2.1.1 重构土体累积入渗量和平均入渗速率的变化特征 试验组的累积入渗量和平均入渗速率的描述性统计如图 2 所示。各试验组的累积入渗量的变化幅度较小, 范围为 2.6~4.9 cm。砾砂土、粗砂土和中砂土各试验组累积入渗量均值分别为 3.51, 3.94, 3.85 cm。其平均入渗速率的变化总体呈较为平稳的趋势, 但处理 L-7, L-11 和 C-11 的平均入渗速率明显大于其他处理, 分别为 3.16, 3.10, 4.40 cm/min, 这是因为以上三组处理的粒径级配中极粗砂和粗砂含量达到了 90%, 增大了土壤孔隙度, 土壤导水率也随之提高, 水分入渗速率增大。砾砂土、粗砂土和中砂土各试验组的平均入渗速率的均值分别为: 0.70, 0.57, 0.03 cm/min, 则说明土壤粒径越小, 吸附能力越强, 故入渗速率也就越小。

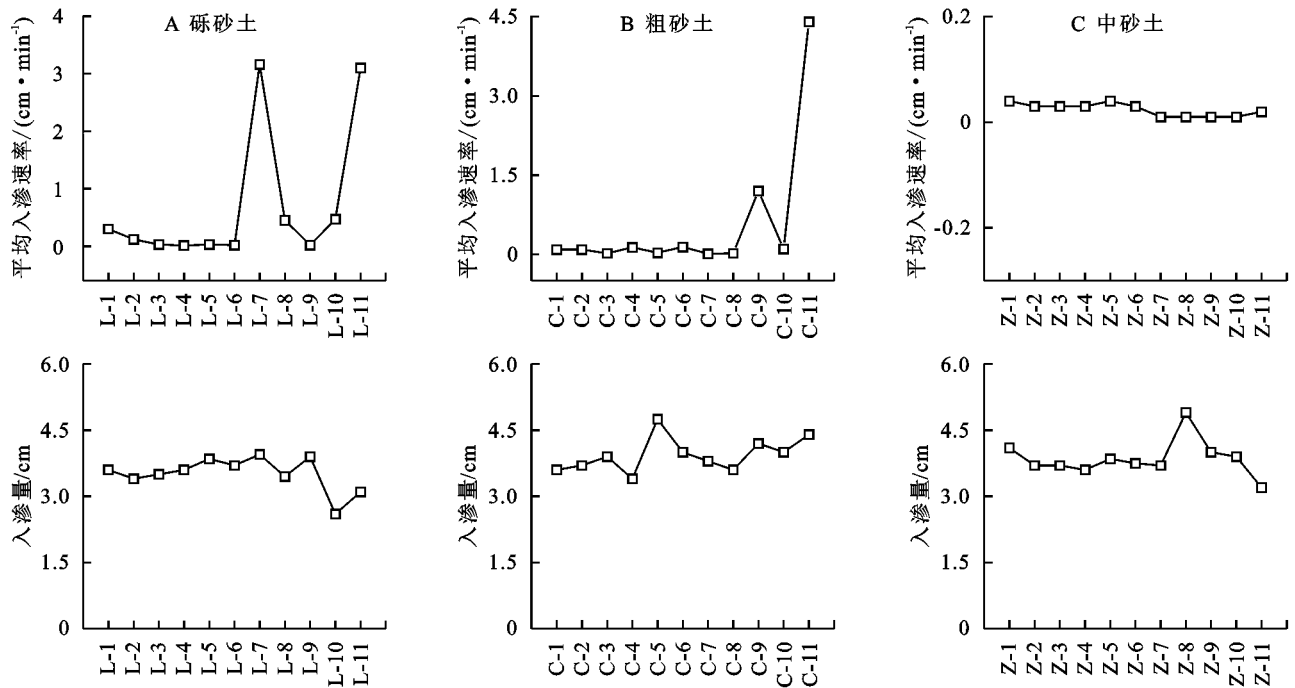


图2 累积入渗量与平均入渗速率

Fig. 2 Cumulative infiltration and average infiltration rate

2.1.2 重构土体湿润峰运移特征 如图3所示,不同处理的湿润峰的运移均随入渗时间的延长而增加,但到达土柱底部所需的时间各不相同。如图3A所示,砾砂土试验组累积入渗时间在1~361.5 min。当极粗砂含量在25%~40%时,部分试验组入渗时间随着泥岩风化物含量的增加而加长;但当极粗砂含量达到50%时,入渗时间较短且不再受泥岩含量的影响,如试验组L-7, L-8和L-11的累积入渗时间均小于10 min。如图3B所示,粗砂土试验组累积

入渗时间在1~292 min。当极粗砂和粗砂含量为50%~60%时,累积入渗时间较长,如处理C-3, C-5, C-7和C-8的入渗时间分别为193, 184, 291.5, 213.75 min;而当极粗砂和粗砂含量超过70%时,累积入渗时间远小于以上几组处理。如图3C所示,中砂土试验组累积入渗时间在94~339 min,均值为190.14 min,而砾砂土、粗砂土的平均入渗时间分别为:95.32, 96.61 min,则说明随着重构土体粒径的减小,入渗时间有加长的趋势。

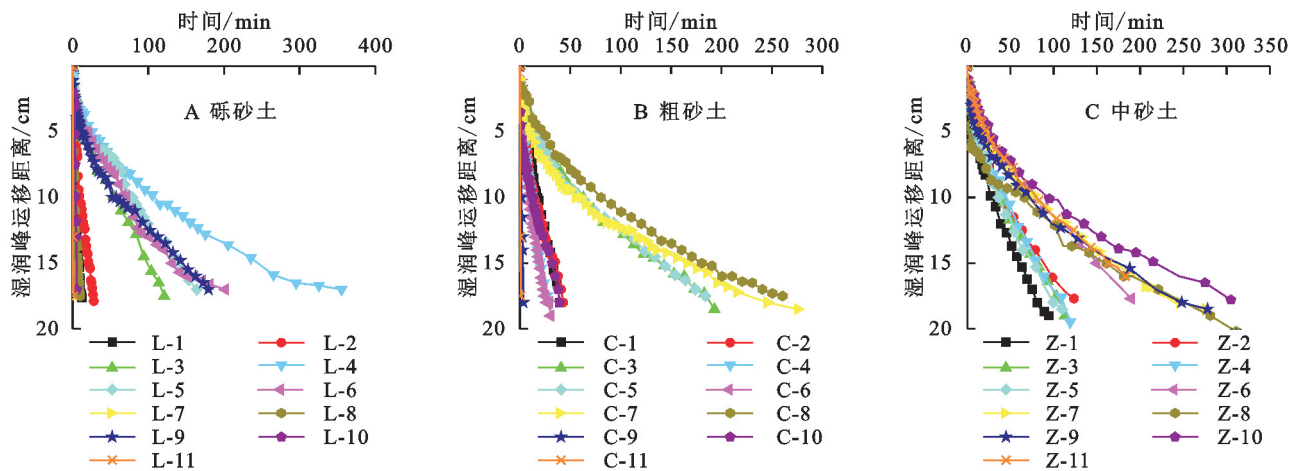


图3 湿润锋运移距离随时间变化

Fig. 3 Wetting front migration distance over time

2.1.3 重构土体粒径级配与入渗指标相关性分析 将重构土体的粒径级配与入渗指标做相关性分析,结果见表1。就入渗时间而言,其与极粗砂和粗砂含量呈负相关关系,相关系数分别为-0.385 ($p < 0.05$)和-0.464 ($p < 0.05$);而与中砂和细砂含量呈正相关关系,相关系数分别

为0.560 ($p < 0.01$)和0.422 ($p < 0.01$)。累积入渗量只与极粗砂含量呈负相关关系,相关系数为-0.528 ($p < 0.01$)。平均入渗速率与极粗砂含量呈正相关关系,相关系数为0.462 ($p < 0.01$),而与中砂和细砂含量呈负相关关系,相关系数分别为-0.519 ($p < 0.01$)和-0.350 ($p < 0.05$)。

表 1 级配与入渗指标的相关性分析

Table 1 Correlation analysis of particle size gradation and infiltration index

各类基质	入渗时间	累积入渗量	平均入渗速率
极粗砂(2~5 mm)	-0.385 *	-0.528 **	0.462 **
粗砂(0.5~2 mm)	-0.464 *	0.255	0.322
中砂(0.25~0.5 mm)	0.560 **	0.095	-0.519 **
细砂(<0.25 mm)	0.422 **	0.112	-0.350 *

注：* 代表在 0.05 级别(双尾)，相关性显著。** 代表在 0.01 级别(双尾)，相关性显著。下表同。

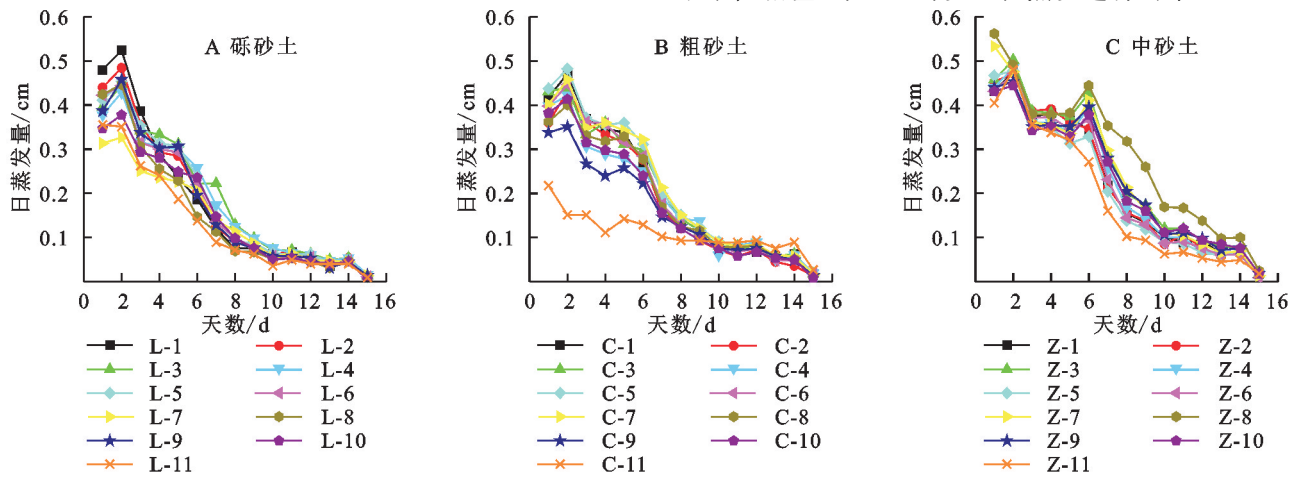


图 4 不同重构土体的日蒸发量变化趋势

Fig. 4 Daily evaporation trends of different reconstructed soils

2.2.2 不同重构土体累积蒸发量的变化特征 图 5 为不同重构土体累积蒸发量随蒸发时间的变化趋势图。总体而言,不同土体的累积蒸发量呈现出逐渐上升的趋势,并且随着蒸发时间加长,上升的趋势逐渐趋向平稳。由图 5A 可知,砾砂土试验组中处理 L-3 的累积蒸发量最大,达到 2.82 cm,比其他处理高 4.3%~30.2%;处理 L-11 的累积蒸发量最小,数值为 1.97 cm。由图 5B 可知,粗砂土试验组中处理 C-11 的蒸发强度显著小于其他处理,累积蒸发量为 1.65 cm;处理 C-4,C-8 和 C-10 的累积蒸发量相差不大,分别为 2.77,2.78,2.62 cm。由图 5C 可知,中砂土试验组的累积蒸发量范围在 2.82~4.26 cm,最大值和最小值对应的试验组为处理 Z-8 和处理 Z-11。就所有试验组而言,其累积蒸发量的变化与泥岩和砂岩风化物比例之间并不存在一定的规律性,但将砾砂土、粗砂土和中砂土的各处理的累积蒸发量求均值可发现,砾砂土累积蒸发量<粗砂土累积蒸发量<中砂土累积蒸发量,其数值分别为:2.49,2.74,3.42 cm,说明重构土体累积蒸发量的变化可能受粒径级配因素的影响较大。累积蒸发量与各粒径基质含量之间的相关性分析结果显示:累积蒸发量与极粗砂含量呈明显的负相关关系,相关系数分别为 $-0.718(p <$

2.2 排土场重构土体蒸发特征分析

2.2.1 不同重构土体日蒸发量的变化特征 图 4 为不同重构土体日蒸发量随蒸发时间的变化趋势图,不同重构土体的日蒸发强度变化趋势基本一致,均随着时间增加呈现速率逐渐减小的趋势。砾砂土的试验组日蒸发强度最大值在 0.36~0.52 cm,粗砂土的试验组日蒸发强度最大值在 0.22~0.48 cm,中砂土的试验组日蒸发强度最大值在 0.47~0.56 cm,且基本发生在蒸发进行的第 1~2 天;各试验组日蒸发强度最小值相差不大,且均发生在蒸发进行的第 15 天。

0.01),而与中砂和细砂含量呈明显的正相关关系,相关系数分别为 0.699($p < 0.01$)和 0.444($p < 0.01$)。则说明重构土体粒径越大,土壤累积蒸发量越小,土壤粒径越小,土壤累积蒸发量越大。

2.3 排土场重构土体持水能力分析

2.3.1 重构土体持水系数变化特征 持水系数(C_{WR})可综合入渗和蒸发过程土壤的持水量,来定量分析重构土壤持水能力, C_{WR} 值越大土壤的持水能力越大, C_{WR} 值越小土壤的持水能力越差^[16]。由图 6 可知,砾砂土、粗砂土和中砂土试验组入渗结束持水量均值分别为 3.26,3.40,3.85 cm,说明随着土壤粒径减小,重构土体蓄水能力增强;但 3 类重构土体蒸发结束持水量却表现为:砾砂土>粗砂土>中砂土,因为在蒸发过程中,随着重构土体粒径减小,累积蒸发量增大,蒸发结束土壤持水量则减少。砾砂土试验组持水系数平均值为 22.86%,其中处理 L-10 的持水系数最小为 10.09%,处理 L-9 的持水系数最大为 33.04%。粗砂土试验组持水系数在 12.98%~30.76%,最小值和最大值对应的试验处理分别为 C-11 和 C-5。中砂土试验组的持水系数相对较小,范围为 2.94%~18.74%,均值为 11.01%,远小于砾砂土和粗砂土试验组。

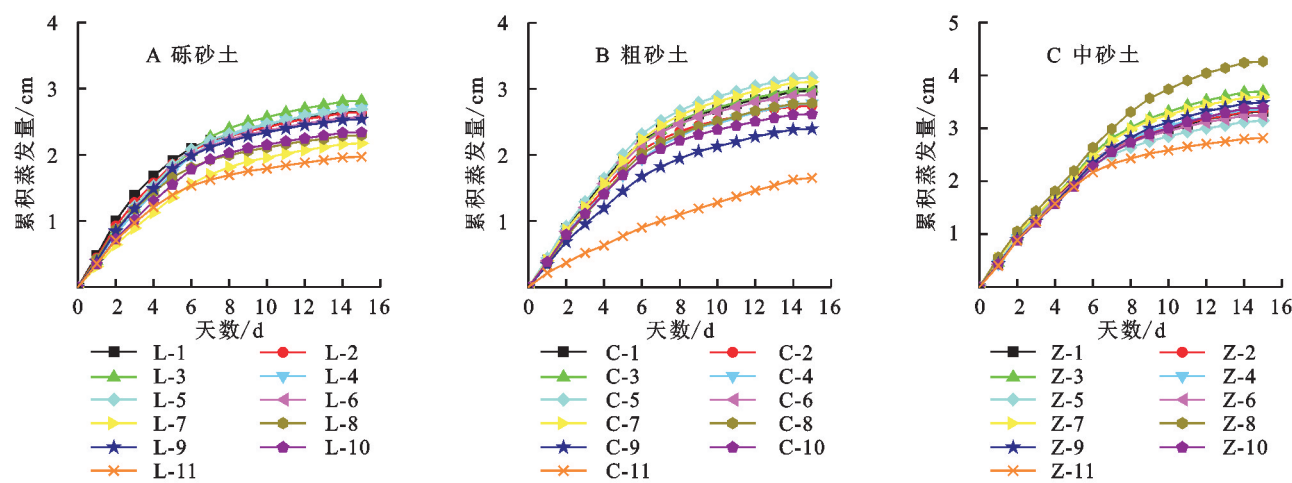


图 5 不同重构土体的累积蒸发量变化趋势

Fig. 5 Cumulative evaporation trend of different reconstructed soils

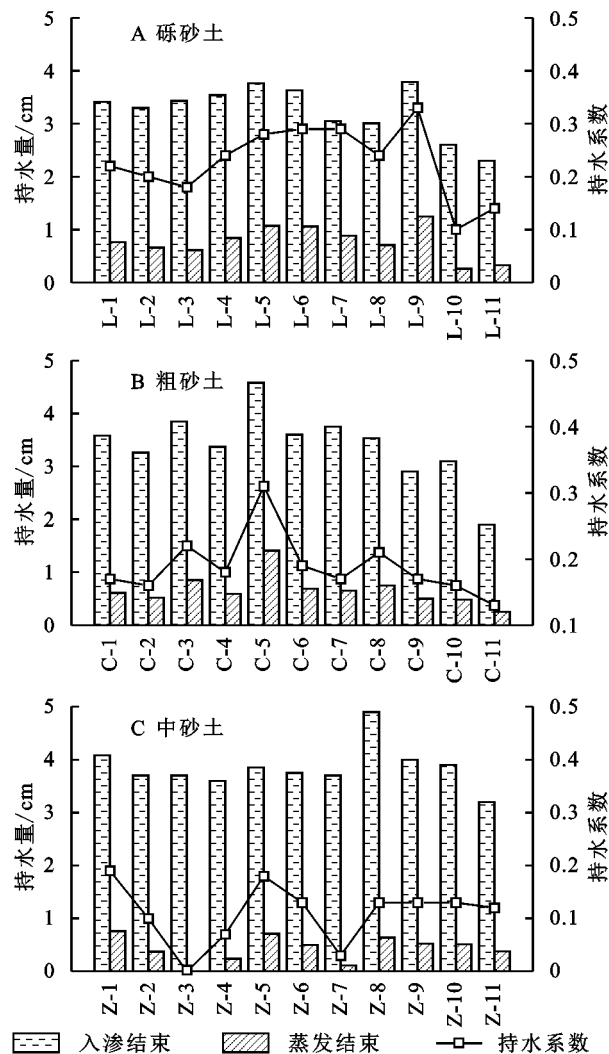


图 6 重构土体持水系数

Fig. 6 Water holding coefficient of reconstructed soil

2.3.2 基于主成分分析法综合评价重构土体持水能力 在入渗和蒸发条件下,重构土体水分运移规律是复杂的,受多种因素的影响。本文从重构土体的入渗能力、持水能力和蒸发水平 3 个方面选取入渗时间、累积入渗量、平均入渗速率、累积蒸发量和持水系数

5 个重要指标,同时结合各处理基质研磨成本(极粗砂、粗砂、中砂和细砂的研磨成本分别为 6.25 元/ m^3 、15 元/ m^3 、28.48 元/ m^3 和 45 元/ m^3),对不同重构土体持水能力进行主成分分析。第一主成分的特征根为 3.250,贡献率为 54.161%;第二主成分的特征根为 1.331,贡献率为 22.176%;二者合计贡献率大于 75%,因此提取 2 个主成分。根据主成分综合模型即可计算综合主成分值,并对按综合主成分值进行排序,即可对不同重构土体持水性进行综合评价,结果见表 2,可以得出处理 L-4 和 Z-8 的综合排名靠前,持水能力较强,但 Z-8 处理的中砂和细砂需求量较大,不适合实际推广应用。

表 2 综合得分

Table 2 Composite score

试验组	综合得分	排名	试验组	综合得分	排名
L-4	0.81	1	Z-1	0.06	18
Z-8	0.77	2	L-7	-0.01	19
L-6	0.55	3	L-8	-0.04	20
C-5	0.54	4	L-3	-0.12	21
C-9	0.38	5	Z-11	-0.14	22
L-9	0.36	6	Z-6	-0.19	23
C-11	0.33	7	Z-4	-0.21	24
L-5	0.26	8	Z-2	-0.22	25
Z-10	0.24	9	C-4	-0.25	26
C-8	0.2	10	Z-7	-0.26	27
C-7	0.19	11	L-1	-0.418	28
C-3	0.18	12	L-2	-0.42	29
C-6	0.15	13	C-1	-0.52	30
C-2	0.11	14	Z-3	-0.73	31
Z-5	0.1	15	L-11	-0.79	32
C-10	0.09	16	L-10	-1.1	33
Z-9	0.08	17			

3 讨论

土壤水分入渗是水文循环的重要环节,决定着土壤水分分布和植物对水分的有效利用^[17]。本研究部分试验组的累积入渗时间随着泥岩风化物含量的增加而加长,与张豫川等^[18]研究结果一致。这是由于泥岩风化物内部含有伊利石、高岭石和蒙脱石等黏土矿物,吸水易发生水解作用,宏观上使其内部小颗粒发生迁移而导致其空间结构发生变化,将原本畅通的渗流通道充填甚至堵塞,使得渗透系数减小^[19];微观上水解作用导致泥岩风化物内部硅氧双键水化断裂生成硅羟基,使其亲水性增加,吸水能力增强,从而抑制水分下渗^[20]。但总体来看入渗指标受粒径级配的影响更加显著,部分试验组泥岩风化物含量很高但累积入渗时间却很短。如 L-9, L-11, C-10 和 C-11 等处理,其泥岩风化物含量高达 80%~100%,但其累积入渗时间却只有 1~6 min。这是因为以上 4 组处理的极粗砂和粗砂含量达到了 70%~100%,导致重构土体非毛管孔隙度较大,基质吸力较小,入渗过程中容易发生优先流现象,水流沿着大孔隙快速到达土体底部,导致水分入渗速率较快。适当增加中、细砂含量可改善这种“漏水”现象、有效延长水分入渗时间^[15]。缩小土壤粒径,土壤大孔隙减少,毛管孔隙增多,毛管力对水分入渗驱动力的抵消作用增强,在相同势能下水分通量减小,从而导致入渗速率降低^[21]。本研究结果表明,相较于砾砂土,粗砂土和中砂土试验组的平均入渗速率分别下降了 19.2% 和 96.4%。但土壤细颗粒含量过高,会阻碍土壤内部氧气和水分的流通,降低土壤的透气性和排水性能,导致土壤缺氧和积水^[22]。因此排土场土体重构需选择适宜的粒径级配,以提高重构土体透水性和保水持水性。

土壤水分蒸发是土壤水分平衡的基本组成部分,减少土壤水分蒸发对提高西部地区土壤水分利用率具有重要意义^[23]。本研究数据显示,各处理前 1~2 d 日蒸发量最大,因为蒸发初期土壤含水率充足,下层土体中的水分在基质吸力作用下克服重力,以毛管水的形式向上运动,以供给表层土体蒸发,大量的土壤水分因蒸发而损失,该阶段蒸发强度主要受大气蒸发力的影响^[24]。各处理的日蒸发量在蒸发开始的 2~10 d 出现直线下降趋势,随着土壤含水量的降低,毛细管中水分连续状态受到破坏而中断,土壤导水率减小,毛管水供给表层土体蒸发的水分逐渐减少,蒸发速率逐渐减小。在蒸发 10 d 之后,各处理的日蒸发强度很低,该阶段土体中毛管水不再上升,蒸发仅发生在深层土体中,水汽通过土壤孔隙,再扩散到大

气中去^[25]。相应的各处理累积蒸发量变化情况较为一致,大致可分为线性增加、缓慢增加和平稳增加 3 个阶段^[26]。相关性结果表明粒径级配对累积蒸发量有显著影响,重构土体的粒径越小,土壤累积蒸发量越大。如处理 Z-8 的累积蒸发量最大,达到 4.26 mm,其细砂和中砂含量高达 80%。这是由于重构土体粒径越小,其毛管孔隙也更加发达,在蒸发拉力的作用下,更能促进深层土壤水分向上移动。而处理 L-11 和 C-11 的粒径级配(极粗砂:粗砂:中砂:细砂)为 5:4:0:1, 2:8:0:0,其土壤累积蒸发量分别为 1.97 cm 和 1.65 cm,远小于其他处理,即重构土体粒径越大,粒间大孔隙数量越多,毛管作用越弱,下层的水分向上运动难度则增大,土壤累积蒸发量减小^[27]。而处理 Z-11 中砂和细砂含量为 70%,但累积蒸发量却小于中砂土其他处理,这是由于该处理粒径较小且所采用基质均为泥岩风化物,具有较高的持水能力。故可通过增大土壤粒径来抑制重构土体的水分蒸发,但需综合考虑粒径对土壤保水性能的影响,避免发生粒径过大导致土壤水分下渗快、保蓄水能力差的问题。

土壤持水能力是评价土壤水源涵养功能的重要指标,受土壤粒径级配影响显著^[28]。本研究数据显示,砾砂土、粗砂土和中砂土试验组持水系数均值分别为 22.86%, 18.78% 和 11.01%。即随着重构土体粒径的减小,持水系数也呈减小趋势。在入渗结束的水分再分配过程中,小粒径重构土体具有更强的水分吸附能力,抑制重力水的排出,从而增加了入渗结束土壤持水量;但在后期的蒸发过程中,小粒径重构土体的累积蒸发量较大,导致蒸发结束时的土壤持水量较小,故其相应的持水系数也较小^[29]。如 Z-8 处理的粒径组成较细,其细砂和中砂含量为 80%,在入渗结束后的土壤持水量高达 4.9 cm;但该处理的累积蒸发量较高,因此蒸发结束的土壤持水量仅有 0.64 cm,持水系数也较低,为 12.97%。因此需综合考虑土壤入渗和蒸发过程,调整适宜的重构土体粒径级配,以提高土壤持水能力。本研究主成分分析结果表明重构土体粒径级配较为均匀时土壤持水能力较强,这与杨振奇等^[30]研究结果一致。考虑经济成本的基础上, L-4 处理在重构土体持水能力综合评价中得分最高,其相应的粒径级配(粒径依次降低)为 4:2:2:2,则该粒径级配结构可在西部干旱矿区排土场重构中推广应用。

4 结论

总体来看,各入渗指标受泥岩风化物含量的影响

不显著,受粒径级配的影响更加显著,随着重构土体粒径减小,累积入渗时间增长,平均入渗速率则减小;随着土壤粒径增大,累积入渗量减少,累积入渗时间缩短,平均入渗速率增大。故为避免粒径过大、过小导致出现土壤漏水和积水问题,重构土体需选择较为均匀的粒级级配。累积蒸发量受土壤粒级级配的影响显著,重构土壤累积蒸发量随土壤粒径的增大而减小,随土壤粒径的减小而增大。主成分分析结果表明,粒径级配(粒径依次降低)为4:2:2:2的蓄水层结构持水能力强,可作为西部干旱矿区排土场适宜推广的蓄水层粒径级配结构。

参考文献(References):

- [1] 周婷婷.西部浅埋煤层开采地表移动规律及生态环境影响[D].合肥:安徽大学,2021.
Zhou T T. Surface Movement Law and Ecological Environment Influence of Shallow Coal Seam Mining in Western China[D]. Hefei: Anhui University, 2021.
- [2] 樊翔.露天矿区重建植被动态变化对气候因子的响应研究[D].北京:中国地质大学(北京),2021.
Fan X. Re-established Vegetation Response to Climate Factors on Surface Mined Land[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2021.
- [3] 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.
- [4] 王靖伟.露天煤矿排土地层重构试验研究[D].江苏徐州:中国矿业大学,2019.
Wang J W. Experimental Study on Stratum Reconstruction of Dump Soil in Open-Pit Coal Mine[D]. Xuzhou, Jiangsu: China University of Mining and Technology, 2019.
- [5] Li X F, Yang J H, Li R J, et al. Layered construction of novel reconstituted soils in coal mining sites[J]. Journal of Resources and Ecology, 2023,14(4):744-756.
- [6] 孙洁.露天矿区采煤水位下降和土壤重构对地下水补给的影响[J].煤矿安全,2021,52(5):59-65.
Sun J. Influence of coal mining water level decline and soil reconfiguration on groundwater recharge in open pit mining area[J]. Safety in Coal Mines, 2021,52(5):59-65.
- [7] 周国驰.露天矿表土替代材料研究进展[J].露天采矿技术,2021,36(1):26-29.
Zhou G C. Research progress on topsoil substitute material of open-pit coal mine[J]. Opencast Mining Technology, 2021,36(1):26-29.
- [8] 严子循,吴大为,吴静,等.内蒙古草原矿区重构土壤典型理化性质差异分析[J].露天采矿技术,2022,37(4):34-40.
Yan Z X, Wu D W, Wu J, et al. Difference analysis of typical soil physicochemical properties in Inner Mongolia grassland mining area[J]. Opencast Mining Technology, 2022,37(4):34-40.
- [9] 吴奇凡,樊军,杨晓莉,等.晋陕蒙接壤区露天矿层状土壤水分入渗特征与模拟[J].土壤学报,2015,52(6):1280-1290.
Wu Q F, Fan J, Yang X L, et al. Experiment and simulation of infiltration from layered soils in open pit mine in Jin-Shaan-Meng adjacent region[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015,52(6):1280-1290.
- [10] 甄庆.新构土体土壤质量及水分与溶质运移研究[D].北京:中国科学院研究生院,2016.
Zhen Q. Experimental Study on Soil Quality and Water Movement and Solute Transport of Restructured Soils [D]. Beijing: Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2016.
- [11] 朱世雷.晋陕蒙能源区新构土体孔隙结构及土壤水分入渗特征研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2020.
Zhu S L. Study on pore structures and soil water infiltration characteristics of the newly formed soil in Jin-Shan-Meng energy district [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2020.
- [12] 孙利辉,纪洪广,杨本生.西部典型矿区弱胶结地层岩石的物理力学性能特征[J].煤炭学报,2019,44(3):866-874.
Sun L H, Ji H G, Yang B S. Physical and mechanical characteristic of rocks with weakly cemented strata in Western representative mining area [J]. Journal of China Coal Society, 2019,44(3):866-874.
- [13] 崔潇,周妍如,刘孝阳,等.平朔露天煤矿复垦区不同地质层组岩土质量综合评价[J].水文地质工程地质,2021,48(2):164-173.
Cui X, Zhou Y R, Liu X Y, et al. Comprehensive evaluation of rock and soil quality of different geological stratum groups in Pingshuo opencast coal mine reclamation area [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021,48(2):164-173.
- [14] 薛东明,郭小平,张晓霞.干旱矿区排土场不同边坡生态修复模式下减流减沙效益[J].水土保持学报,2021,35(6):15-21,30.
Xue D M, Guo X P, Zhang X X. Runoff and sediment reduction under different slope ecological restoration modes of waste dump in arid mining area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021,35(6):15-21,30.
- [15] 荣颖,王淳,胡振琪.表土替代材料不同夹层位置对风

- 沙土水分入渗和蒸发的影响[J].农业资源与环境学报,2022,39(5):967-977.
- Rong Y, Wang C, Hu Z Q. Effects of different layer positions of topsoil alternatives on infiltration and evaporation of sandy soil water[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2022,39(5):967-977.
- [16] 王晓彤.黄河泥沙充填复垦土壤夹层结构的作用机理及模拟研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2020.
- Wang X T. Mechanism of Action of Interlayers in Reconstructed Soil Filled with Yellow River Sediments and Its Simulation[D].Beijing: China University of Mining and Technology, 2020.
- [17] 张满想,陈军锋,臧红飞,等.黄土台塬区不同时代黄土水分入渗特性和迁移规律的试验研究[J].节水灌溉,2023(2):51-56,64.
- Zhang M X, Chen J F, Zang H F, et al. Experimental study on water infiltration characteristics of loess in different epochs and migration regularities in loess tableland area[J]. Water Saving Irrigation, 2023(2):51-56,64.
- [18] 张豫川,潘增志,王祖耀,等.砂岩与砂质泥岩渗透性能试验研究[J].地下空间与工程学报,2017,13(2):301-306.
- Zhang Y C, Pan Z Z, Wang Z Y, et al. Testing study on permeability of sandstone and sandy mudstone[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017,13(2):301-306.
- [19] 李杨.沉积岩破碎后形态及其渗透性特征试验研究[D].江苏徐州:中国矿业大学,2018.
- Li Y. Experimental Study on Morphology and Permeability of Crushed Sedimentary Rocks [D]. Xuzhou, Jiangsu: China University of Mining and Technology, 2018.
- [20] 邹晨阳,陈芳,叶霞.含水量对细粒沉积岩力学性质及变形特性的影响研究[J].水力发电,2018,44(1):35-38,42.
- Zou C Y, Chen F, Ye X. Effect of water content on the mechanical characteristics and deformation properties of fine-grained sedimentary rocks[J]. Water Power, 2018,44(1):35-38,42.
- [21] 马力,罗强,武璟,等.露天矿外排土场粒径及土层厚度对表土渗透规律影响[J].太原理工大学学报,2021,52(6):953-959.
- Ma L, Luo Q, Wu J, et al. Influence law of particle size and soil thickness on the permeability of topsoil of open-pit dump[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2021,52(6):953-959.
- [22] 孙宇轩.黄泛区沙土地不同改良措施对土壤结构及入渗的影响[D].山东泰安:山东农业大学,2022.
- Sun Y X. Effects of Different Improvement Measures on Soil Structure and Infiltration of Sandy Land in Yellow River Flooded Area [D]. Taian, Shandong: Shandong Agricultural University, 2022.
- [23] Guida G, Vespo V S, Musso G, et al. The role of hydraulic and thermal properties of soil on evaporation: A numerical insight[J]. Environmental Geotechnics, 2023, 40:1-18.
- [24] Jia J C, Zhang P P, Yang X F, et al. Feldspathic sandstone addition and its impact on hydraulic properties of sandy soil[J]. Canadian Journal of Soil Science, 2018, 98:399-406.
- [25] 王兴,李王成,董亚萍,等.压砂地不同砂土混合比下土壤水分蒸发动态研究[J].中国农村水利水电,2019(8):56-62.
- Wang X, Li W C, Dong Y P, et al. Dynamic research on soil water evaporation under different sand mixing ratio in pressed sand land[J]. China Rural Water and Hydropower, 2019(8):56-62.
- [26] Wang T T, Stewart C E, Sun C C, et al. Effects of biochar addition on evaporation in the five typical Loess Plateau soils[J]. Catena, 2018,162:29-39.
- [27] 郭梦.不同含砂量土壤蒸发机理及水盐运移数值模拟[D].西安:长安大学,2020.
- Guo M. Evaporation Mechanism of Soil with Different Sand Content and Numerical Simulation of Water-Salt Transport[D].Xi'an: Chang'an University, 2020.
- [28] 刘百灵,李仓水.复垦植被对排土场土壤持水能力的影响与评价[J].山西农业大学学报:自然科学版,2023,43(6):89-98.
- Liu B L, Li C S. Effects and evaluation of vegetation restoration on the soil's water retention capacity in reclaimed soil area[J]. Journal of Shanxi Agricultural University: Natural Science Edition, 2023,43(6):89-98.
- [29] 韩湘,张超英,耿玉清,等.添加粉煤灰对煤矸石基质有效水和持水性能的影响[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2023,51(10):89-96.
- Han X, Zhagn C Y, Geng Y Q, et al. Effect of adding fly ash on water availability and holding capacity of coal gangue matrix[J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2023,51(10):89-96.
- [30] 杨振奇,秦富仓,李龙,等.砒砂岩区不同侵蚀程度表土多重分形特征与持水特性关系[J].土壤,2021,53(3):620-627.
- Yang Z Q, Qin F C, Li L, et al. Relationship between soil particle multifractals and water holding capacity under different erosion degrees in feldspathic sandstone region[J]. Soils, 2021,53(3):620-627.