

农业资源与环境学报中文核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 http://www.aed.org.cn

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

荣颖,王淳,胡振琪

引用本文:

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.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0468

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同残膜含量对淡灰钙土水分入渗过程的影响

白一茹, 张兴, 王幼奇, 赵云鹏, 王宇

农业资源与环境学报. 2019, 36(2): 227-235 https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0084

施用生物质炭5年后夏玉米土壤呼吸研究

马雯琪, 蒋靖佰伦, 李典鹏, 唐光木, 徐万里, 贾宏涛

农业资源与环境学报. 2021, 38(1): 111-118 https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0044

生物降解地膜降解性能对南疆棉田籽棉产量形成的影响

夏文, 林涛, 邓方宁, 何文清, 汤秋香

农业资源与环境学报. 2020, 37(6): 951-959 https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0470

油菜绿肥翻压还田对新疆盐碱土壤的改良效果研究

刘慧,李子玉,白志贵,刘建国

农业资源与环境学报. 2020, 37(6): 914-923 https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0566

模拟酸雨对我国亚热带森林土壤有机碳矿化的影响研究

程锦萍, 王鹭, 唐志珍, 史文竹, 李庆, 项剑, 王艮梅, 张焕朝

农业资源与环境学报. 2022, 39(3): 520-526 https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0093



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

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.



开放科学OSID

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

荣颖1,王淳2,胡振琪3*

(1.中原工学院系统与工业工程技术研究中心,郑州 451191; 2.土肥高效利用国家工程研究中心,山东农业大学资源与环境学院,山东 泰安 271000; 3.中国矿业大学环境与测绘学院,江苏 徐州 221116)

摘 要:为探究表土替代材料不同夹层位置对风沙土水分入渗和蒸发过程的影响,以风沙土和由风沙土、红黏土、煤矸石、玉米秸秆和腐植酸5种材料重构的表土替代材料为研究对象,通过室内土柱试验,设置3种不同夹层位置(T1、T2、T3,分别距离土表5、10、15 cm),以传统均质土壤剖面为对照(CK),研究了不同夹层位置对入渗率、湿润锋运移、累积入渗量、累积蒸发量及土壤水分分布的影响。结果表明:CK、T1、T2、T3处理的平均入渗率分别为3.714、0.238、0.182、0.271 mm·min⁻¹,入渗率随着夹层深度的增加呈先减小后增加的趋势;当湿润锋在土柱中完成运移时,CK、T1、T2、T3处理的入渗时间分别为56、860、1 190、810 min,即随着夹层深度的增加,入渗时间呈先延长后缩短的趋势。与CK相比,T1、T2、T3处理的累积蒸发量分别减少13.57%、9.83%、9.52%,即累积蒸发量随夹层深度的增加而逐渐增加,水分蒸发损失主要来自夹层上部和下部风沙土,夹层部分含水率变化幅度较小。Kostiakov入渗模型和Rose蒸发模型拟合的 R²均在0.91以上,说明两种模型适合描述含表土替代材料夹层土壤水分入渗及蒸发过程。研究表明,在风沙土中10 cm深度处夹15 cm厚度的表土替代材料层,是西部露天矿区排土场土壤剖面重构的理想选择。

关键词:土壤重构;表土替代材料;入渗;蒸发;夹层土壤

中图分类号:S152.7 文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2022)05-0967-11

doi: 10.13254/j.jare.2021.0468

Effects of different layer positions of topsoil alternatives on infiltration and evaporation of sandy soil water RONG Ying¹, WANG Chun², HU Zhenqi^{3*}

(1.The Research Center of System and Industrial Technology, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 451191, China; 2. National Engineering Research Center for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, College of Resource and Environment, Shandong Agricultural University, Tai' an 271000, China; 3.School of Environment Science and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: To examine the effects of the layer positions of topsoil alternatives on sandy soil water infiltration and evaporation, soil column simulation experiments were conducted on sandy soil and topsoil alternatives composed of sand soil, red clay, coal gangue, corn straw, and humic acid. Three-layer positions of topsoil alternatives were designed at 5 (T1), 10 cm (T2), and 15 cm (T3) below the soil surface, respectively, and using one traditional homogeneous soil profile as the control (CK). Infiltration rate, wetting front, cumulative infiltration, cumulative evaporation, and volumtric moisture content were investigated during the experiment. The results showed that the average infiltration rate of CK, T1, T2, T3 was 3.714, 0.238, 0.182 mm·min⁻¹, and 0.271 mm·min⁻¹, respectively, which indicated infiltration rate increased and then decreased with the increasing depth of the layer position. The infiltration time of CK, T1, T2, T3 was 56, 860, 1 190

收稿日期:2021-07-29 录用日期:2021-11-02

作者简介:荣颖(1988—),女,河南商丘人,博士,讲师,主要从事土地复垦与生态修复方面研究。E-mail:rongying0626@126.com

^{*}通信作者:胡振琪 E-mail:huzq1963@163.com

基金项目:河南省哲学社会科学规划项目(2019CJJ096);中原工学院基本科研业务费用专项(K2020YY020)

Project supported: Philosophy and Social Science Planning Project of Henan Province (2019CJJ096); The Fundamental Research Funds for Zhongyuan University of Technology(K2020YY020)

min, and 810 min at the end time of infiltration, respectively, which indicated that infiltration time prolonged and then decreased with the increasing of depth of the layer position. The cumulative evaporation decreased by $13.57\% \ 9.83\% \ 9.52\%$ for T1~T3 treatments contrast to CK, respectively, which indicated the cumulative evaporation gradually increased with the increasing depth of the layer position. Water evaporation loss in the layer structure was mainly from the upper and lower parts of the topsoil alternatives layer, while the volumtric moisture content of the topsoil alternatives layer had a small change range. The R^2 of the fitted Kostiakov infiltration model and Rose evaporation model were above 0.91, which indicated that the two models were suitable for describing the water infiltration and evaporation process of interlayer soil containing topsoil alternatives. The study indicated that it was the optimal choice for soil profile reconstruction of dump sites in western open-pit mines when 15 cm thick topsoil alternatives were at 10 cm below the soil surface in the sandy soil.

Keywords: soil reconstruction; topsoil alternatives; infiltration; evaporation; layered soil

露天煤矿开采需剥离矿层上方的全部表土和岩 层,必然会对土地和生态环境产生最直接的影响。 我国露天煤矿开采比例已由原来的不足10%提高到 16.9%,且主要分布在生态环境脆弱的西部地区,使 得该区域土地生态呈现出强烈扰动的态势,极大地影 响了区域生态环境的可持续发展四。西部露天矿区 土地复垦多是先在底部填埋煤矸石、砂砾等固体废弃 物,然后在其上部覆盖一定厚度的原表土(风沙土)。 由于表土不足,这种覆土技术形成的土壤结构性差、 漏水漏肥严重,同时该地区降水稀少且分布不均,蒸 发强烈,因此排土场复垦土壤面临水分入渗过快和蒸 发量过大的问题。土壤水分的高效节约利用是西部 干旱半干旱地区植被恢复的关键[3]。因此,如何通过 有效措施减少土壤水分渗漏和蒸发损失,提高土壤保 水性能,是实现西部露天矿区排土场生态恢复的重要 研究内容。

土壤入渗和蒸发是土壤水分运动的重要环节,直 接决定着土壤水分分布和植物对水分的有效利用吗。 在均质土壤一维垂直入渗研究基础上,国内外学者对 自然界中普遍存在的非均质层状土壤的入渗特征开 展了大量研究。层状土的土壤结构比均质土复杂,使 得层状土壤的入渗过程与均质土壤存在明显差异。 夹层土壤无论质地比上层土壤粗或细,都具有阻碍水 分下移的作用,从而起到减渗或保水的作用。夹层 结构中夹层的埋深、厚度及不同土层组合方式等均会 改变土壤水力特性和剖面水分分布状况。如李毅 等阿研究了夹层位置对土壤水分入渗的影响,认为距 土表中间(10~15 cm)的夹层层位对水分入渗的阻碍 作用最强;ZETTL等可研究发现随着夹层层位的加深, 对水分下移的阻碍作用逐渐减小;多层复合结构能够 更大程度上降低土壤水分入渗量圈。土壤蒸发直接 决定土壤中水分流出量,是造成土壤水分损失的主要 途径。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。现阶段关于化学改良剂、生物炭及作物秸秆等添加物对土壤蒸发的影响研究较多。如哈丽代姆·居麦等阿研究发现随着改良剂施加量的增加,土壤的累积蒸发量显著降低;李娜等阿研究发现生物炭与化学改良剂混施能有效改变煤矸石基质水分的蒸发特性,且施加生物炭对基质水分蒸发的抑制效果低于施加化学改良剂;孙池涛等阿研究发现覆盖秸秆能够有效降低滨海土壤蒸发强度,秸秆覆盖阻力与秸秆覆盖量成正比。但这些研究大多集中在自然条件下农业土壤的水分垂直入渗方面,对于矿区排土场强扰动土壤水分的研究较少,且忽略了层状土壤结构对土壤蒸发过程的影响。

土壤重构是露天煤矿土地复垦的核心内容,主要 涉及土壤剖面重构材料的选择和土壤剖面层次的重 构两个环节[12-13]。在土壤剖面重构材料的选择上,首 要选择是土壤或者土壤母质[14-15],但矿区土地复垦的 难点之一就是表土不足或者土源稀缺,因此有学者提 出使用采矿产生的固体废弃物[16-17]或者将其与土壤 混合[18-19]研制适宜的表土替代材料。也有学者利用 秸秆、草炭、生物炭对表土替代材料进行改良[20-21]。 在土壤剖面层次的重构方面,主要是根据当地土壤条 件,利用不同质地的土壤构建层状土壤剖面。甄庆 等[22]研究发现,风沙土、黄土和砒砂岩等土壤构建的 土壤剖面构型能够有效阻止水分下渗;吴奇凡等[23]将 沙土、黄绵土、砒砂岩和红黏土作为土壤剖面重构的 材料,结果显示黄-沙-红和沙-黄-砒型这两种层状 土壤剖面能有效储存水分。现有的土壤重构研究大 多是单一的,如较多集中在表土替代材料筛选和研制 环节,而将表土替代材料应用和土壤剖面层次重构两 个环节结合起来的研究较少。

本课题组通过前期筛选试验发现,风沙土与红黏 土经过1:2质量比复配,同时添加15%煤矸石、5%玉 米秸秆及0.05%腐植酸作为培肥材料,是理想的表土 替代材料。为了改变矿区排土场的土壤剖面结构和减少表土替代材料的用量,本研究利用表土替代材料和风沙土构建夹层式土壤剖面,基于室内土柱模拟试验,研究表土替代材料不同夹层位置对重构土壤剖面入渗和蒸发过程的影响,优选出适宜的重构土壤剖面,旨在揭示不同类型重构土壤剖面的水分运行、分布规律和持水机理,为表土替代材料夹层土壤剖面在西部露天矿区排土场复垦中的推广应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于中国矿业大学(北京)土地复垦实验室进 行。填充土柱所需材料包括风沙土和表土替代材料, 表土替代材料由风沙土与红黏土1:2、15%煤矸石、 5% 玉米秸秆及0.05% 腐植酸混合得到,其中风沙土、 红黏土、玉米秸秆取自神东天隆集团武家塔矿区,煤 矸石取自陕西省神木县北部的大海则矿区,腐植酸来 自神东天降腐植酸科技有限公司。风沙土、红黏土、 腐植酸室内风干、去杂、研磨、过2mm筛,煤矸石自然 风干、去杂、粉碎、过1mm筛,玉米秸秆洗净、腐熟、自 然风干、粉碎、过1 mm筛。将经过上述处理后的风沙 土、红黏土、玉米秸秆、煤矸石及腐植酸按比例混合均 匀后备用。土壤颗粒组成采用吸管法测定,粒径范围 为黏粒≤0.002 mm、粉粒 0.002~0.05 mm、砂粒 0.05~2 mm, 其中风沙土所占的体积分数分别为3.30%、 6.40% 和90.30%, 质地为砂土; 表土替代材料所占的 体积分数分别为6.75%、47.40%和45.85%,质地为砂 壤土。风沙土和表土替代材料初始体积含水率通过 时域反射仪 TDR 测定, 分别为 0.032、0.069 cm³·cm⁻³。 风沙土和表土替代材料的容重和孔隙度利用环刀法 测定,容重分别为1.62、1.31 g·cm⁻³,毛管孔隙度分别 为 22.39%、44.28%。

1.2 试验设计

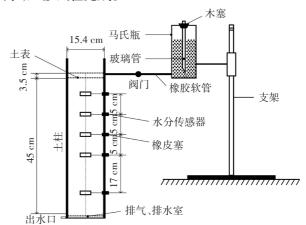
根据"就地取材、减少表土替代材料用量、减少外力作用对表土替代材料的破坏、工程易于实现、效果持久"的原则,考虑研究区排土场常见覆土厚度和种植植物根系特征[2],设计以下土壤重构方案:传统复垦的土壤剖面构型全沙土柱(CK)及含表土替代材料的夹层式土壤剖面构型(T1、T2、T3),其中表土替代材料夹层厚度均为15 cm,夹层位置分别在土表以下5(T1)、10 cm(T2)和15 cm(T3)处,夹层以下部分均为风沙土。试验土柱高45 cm,每个处理3个重复。人渗装置包括土柱、马氏瓶和土壤水分传感器(图

1a)。风沙土和表土替代材料分别按照 1.62、1.31 g·cm⁻³的容重以 5 cm厚度分层填装入有机玻璃管(内径 15.4 cm、高 60 cm)中,层间打毛,土柱底层放置纱布和滤纸,以防土粒从多孔板中漏出。在距离土表 2.5、7.5、12.5、17.5 cm 和 37.0 cm 处安装土壤水分传感器(ECH₂O),在数据采集器(EM50)控制下实时测量土壤剖面的含水量变化,土柱下方设有多孔板,用以排气和排水,玻璃管外壁三侧贴有米尺用以读取湿润锋运移情况。马氏瓶(内径 13 cm、高 50 cm)用于恒定供水水头,同时在其外壁贴上刻度尺测定马氏瓶内水位下降情况。蒸发装置是在土柱正上方 25 cm 处放置 250 W 的红外灯,用以模拟一定强度的稳定蒸发(图 1b)。

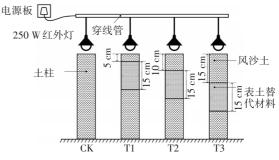
1.3 试验过程

1.3.1 入渗试验过程

土柱填装完成后,进行定水头垂直积水入渗试验,马氏瓶定水头3.5 cm。按照前密后疏的原则记录马氏瓶水位变化及湿润锋运移深度,同时设定数据采集器按照2 min步长自动记录土壤剖面含水量随时间的变化过程。当湿润锋到达土柱底部时,停止马氏瓶供水,入渗试验完成。



a. 土壤水分入渗实验装置 Test device of soil water infiltration



b. 土壤水分蒸发实验装置 Test device of soil water evaporation

图1 试验装置示意图

Figure 1 Schematic diagram of test device

1.3.2 蒸发试验过程

将入渗完毕的土柱放置 48 h后进行蒸发试验,连续蒸发 30 d。利用远红外灯进行模拟和调控 E₀=10 mm 的稳定大气蒸发能力,数据采集器按照 30 min步长自动记录土壤剖面含水量随时间的变化过程。同时使用蒸发皿(半径与土柱相同)测定水面蒸发量。土柱每日蒸发时间设定为 8 h,在 17:00 用电子秤称量土柱质量,测定土壤水分日损失量,日蒸发量的计算公式参考宋日权等[²⁴]的研究。蒸发试验期间实验室温度为 24 ℃左右。

1.4 评价模型与指标

采用 Kostiakov 模型和 Rose 模型分别模拟累积人 渗量和累积蒸发量的变化趋势,分析模型对均质风沙 土和重构的夹层土壤剖面水分入渗和蒸发过程的适 用性。

Kostiakov 入渗模型[25]:

$$I=k\times t^a$$
 (1)

式中:I为累积入渗量,mm;t为入渗时间,min;k和 a均为拟合参数。

Rose 蒸发模型[26]:

$$E = c \times \sqrt{t_e} + d \times t_e \tag{2}$$

式中:E代表累积蒸发量,mm; t_e 为蒸发时间,d;c 为水分扩散参数;d 为稳定蒸发参数。

决定系数(Coefficient of determination, R^2)及相对 均方根误差(Relative root mean square error, RRMSE) 是评价 Kostiakov 模型和 Rose 模型模拟水分入渗和 蒸发过程效果的指标, R^2 值越接近于 1, RRMSE 值越 小, 拟合效果越好。

1.5 数据处理与分析

试验数据均为3次重复的平均值,用Origin 2019 软件进行制图和函数拟合,SPSS 18软件进行统计分析,Sketch软件绘制装置示意图。

2 结果与分析

2.1 夹层位置对土壤水分入渗特性的影响

2.1.1 夹层位置对入渗率的影响

人渗率是单位时间内通过单位面积土壤的水量。 从图2可以看出,不同处理的人渗率整体上呈现出基本一致的变化趋势,均随着时间的推移而减小并逐渐趋于稳定,人渗初期人渗率快速下降,随着人渗进程推进降幅减缓,而后达到稳定人渗。在整个人渗过程中,均质土柱CK处理的人渗率均显著高于同一时间的表土替代材料夹层处理,这说明表土替代材料夹层 能够降低土壤入渗率。

本研究利用平均人渗速率和稳定人渗速率等表征土壤入渗过程。由表1可知,在整个人渗过程中,CK处理的平均入渗率最高(3.714 mm·min⁻¹),T2处理最低(0.182 mm·min⁻¹),较CK处理降低了95.10%,T1和T3之间无显著差异,二者显著高于T2处理。同时,CK处理进入稳定入渗所需的时间最长(13.0 min),其稳定入渗率也最高(1.812 mm·min⁻¹),表土替代材料夹层处理的稳定入渗率均显著低于CK处理,其中T2处理最低(0.161 mm·min⁻¹)。这说明在风沙土中布设表土替代材料夹层能够显著降低土壤入渗率,但不同夹层位置对土壤的减渗效果不同,在表土替代材料夹层距土表10 cm时(T2处理),减渗效果最好,而随着夹层深度的增加,表土替代材料夹层的减渗效果随之减弱。

2.1.2 夹层位置对湿润锋运移的影响

从图 3a 可知,各处理的湿润锋到达土柱底部时 所用时间不同,CK处理的入渗时间最短(56 min),T2 处理的入渗时间最长(1 190 min),是CK处理的21.25 倍,其次为T1处理(860 min),然后是T3处理(810

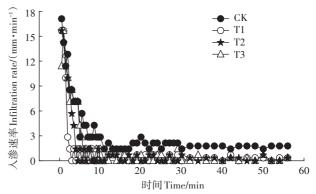


图 2 不同处理入渗速率随时间的动态变化

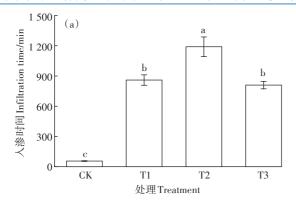
Figure 2 The variations of infiltration rate with time for different treatments

表1 不同处理的土壤入渗特征

Table 1 Soil infiltration characteristics of different treatments

处理 Treatment	平均人渗速率 Average infiltration rate/(mm·min ⁻¹)	稳定人渗速率 Stable infiltration rate/(mm·min ⁻¹)	稳定人渗时间 Stable infiltration time/min
CK	3.714±0.042a	1.812±0.023a	13.0±0.449a
T1	$0.238 \pm 0.018 \mathrm{b}$	$0.195 \pm 0.004 \mathrm{b}$	$2.5 \pm 0.041 c$
T2	$0.182 \pm 0.013 c$	$0.161 \pm 0.006 c$	$5.5 \pm 0.082 \mathrm{b}$
Т3	0.271 ± 0.011 b	$0.203 \pm 0.005 \mathrm{b}$	6.0 ± 0.093 b

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)。下同。 Note: The different lowercase letters in a column indicate significant differences among treatments(P<0.05). The same below.



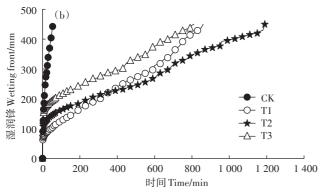


图 3 不同处理湿润锋随入渗时间的动态变化

Figure 3 Variation of wetting front with infiltration time for different treatments

min),T1和T3处理无显著差异。说明表土替代材料 夹层土壤剖面入渗时间延长,这有利于将水分保持在 土壤中。从图3b可知,在整个入渗过程中,均质土柱 CK处理湿润锋随时间的推移而逐渐推进,表现为连 续函数特征,而在风沙土中设置表土替代材料夹层 后,T1、T2及T3处理的湿润锋运移随时间的推移均 出现明显转折,使得重构土壤剖面构型的湿润锋运移 特性较CK处理均得到不同程度的改善。在入渗初期 T1、T2及T3处理的湿润锋运移规律基本相同,主要 是由于0~5 cm均为风沙土层。3个夹层处理之间的 差异出现在3 min 以后,湿润锋先后穿过风沙土与表 土替代材料夹层界面,进入表土替代材料夹层后,湿 润锋运移速度均有所降低,但由于夹层位置的不同, 湿润锋进入表土替代材料夹层的时间亦不相同,其中 T3 处理的湿润锋运移速度显著高于T1、T2处理,T2处 理在350 min之前高于T1处理,而在350 min之后始终 低于T1处理,但二者之间差异不显著。这说明表土替 代材料夹层能够有效改善风沙土漏水现象,其中夹层 距土表 10 cm 处的 T2 处理湿润锋运移速度最慢。由 此推测,表土替代材料夹层位置存在一个临界值,当夹 层深度为该临界值时,夹层的减渗阻水效果最强,夹层 深度大于或小于该临界值时,夹层虽有减渗阻水的作用,但减渗作用未达到最大。

2.1.3 夹层位置对累积入渗量的影响

累积入渗量是一定时间内渗入单位面积土壤的总水量。由于入渗试验是在湿润锋到达土柱底部时结束,因此将这一时刻的累积入渗量作为各个土壤剖面的持水量。各处理的累积入渗量均随时间的推移而增加(图4)。入渗初期累积入渗量增速较快,表土替代材料夹层处理的累积入渗量均随时间的推移呈非线性变化,这与CK处理累积入渗量变化特征一致,但湿润锋穿过表土替代材料上界面后,累积入渗量随时间变化呈线性关系,其增速减缓。这说明表土替代材料夹层土壤剖面水分入渗速率下降,入渗时间延长,增加了水分的停留时间,从而优化土壤水分分布。整个入渗试验结束时,T3处理的累积入渗量最多(222 mm),其次为T2处理(217 mm),T3与T2处理之间无显著差异,然后是CK处理(208 mm),T1处理的累积入渗量最少(205 mm)。

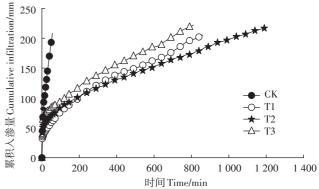


图 4 不同处理累积入渗量随时间的动态变化

Figure 4 Variation of cumulative infiltration with time for different treatments

不同处理的湿润锋到达和穿过夹层界面的时间与对应的累积入渗量变化情况如表2所示。T1、T2、T3湿润锋到达土层界面的时间分别为1、3、5.5 min,对应的累积入渗量分别为22、46、66 mm,说明表土替代材料夹层位置越靠上,湿润锋到达土层界面的时间越短,累积入渗量越小。同时,T2处理湿润锋穿过夹层界面需要的时间最长(517 min),显著长于T1和T3处理。说明夹层位置深度居中者对水分下移的控制作用最强,能够有效阻滞水分入渗到植物根系难以到达的深层,将水分保持于表土替代材料层及其上下部,供植物根系吸收和利用。

表2 湿润锋到达和穿过土层界面的时间和累积入渗量

Table 2 Time and cumulative infiltration when wetting front reaching and crossing interface layers

处理 Treatment	夹层距土表距离 Distance of interlayer from soil surface/cm	湿润锋到达夹层界面 Wetting front arriving at the layer interface		湿润锋穿过夹层界面 Wetting front crossing the layer interface	
		时间Time/min	累积入渗量Cumulative infiltration/mm	时间Time/min	累积入渗量Cumulative infiltration/mm
T1	5	1	22	310	125
T2	10	3	46	517	145
Т3	15	5.5	66	430	170

利用 Kostiakov 模型对不同处理的累积人渗量 I (mm) 随入渗时间 t (min) 变化的数据进行拟合,结果如表3 所示。由表3 可知,各处理 R²均在0.91 以上, RRMSE 均小于0.11, Kostiakov 模型对表土替代材料夹层土壤剖面水分入渗过程拟合效果较好。参数 k 反映土壤的初始入渗能力,参数 a 反映入渗量的衰减程度,在风沙土中布设表土替代材料夹层后,参数 k 随夹层位置的加深呈增大趋势,而参数 a 呈递减趋势,说明重构的"风沙土+表土替代材料+风沙土"夹层土壤剖面在入渗初期的累积入渗量较大,随着时间的推移,累积入渗量曲线的衰减程度减小。

2.1.4 入渗过程中土壤剖面含水率的动态变化

因表土替代材料夹层位置对土壤水分入渗过程的影响有所差异,各处理的土壤剖面含水率也随之变化。由图5可知,不同处理各土层含水率的变化规律一致,均随着湿润锋的到达而急速上升之后逐渐平稳。在入渗过程中,CK处理剖面含水率随土层深度增加而递减,其剖面水分分布具有连续性,然而在风沙土中布设表土替代材料层后形成的夹层土壤结构,使水分入渗过程更加复杂,其剖面水分分布具有明显的分层,不再符合连续性特征;CK处理在2.5、7.5、12.5 cm和17.5 cm深度处的含水率均显著低于T1、T2和T3处理,说明表土替代材料夹层的存在阻滞了水分入渗,明显改善了均质全沙土壤剖面水分分布情况。在湿润锋到达土柱底部时,在2.5 cm和7.5 cm深度处,T1处理的土壤含水率均达到饱和状态,且显著

表3 累积入渗量与入渗时间 Kostiakov 模型拟合参数

Table 3 Kostiakov fitting parameters of accumulative infiltration and infiltration time

处理 Treatment	参数 Parameter		R^2	RRMSE
	k	a	Λ	KKMSE
CK	26.607±0.905b	0.511±0.013a	0.973	0.050
T1	17.235±0.025e	$0.345 \pm 0.016 \mathrm{b}$	0.972	0.092
T2	$25.533 \pm 0.054 \mathrm{b}$	$0.283 \pm 0.035 e$	0.957	0.101
Т3	30.262±0.468a	0.277±0.016e	0.911	0.109

高于其他处理;12.5 cm深度处,T2处理的含水率达到饱和状态,且显著高于其他处理;在17.5 cm深度处,T3处理的含水率达到饱和状态,且显著高于其他处理;37.0 cm深度处,各处理土壤含水率均处于非饱和状态。这表明夹层部分土壤含水率显著高于夹层上部和下部风沙土,夹层上部风沙土含水率均显著高于夹层上部和下部风沙土,并且夹层上部的土壤含水率随夹层位置的加深而减小。综合来看,T1处理在土表水分饱和后易形成地表径流,而研究区降水多以暴雨形式出现,T1处理不利于降水资源的有效利用,T2处理的平均剖面含水率高于T3,因此,结合研究区降雨条件,夹层在距土表10 cm处(T2处理)可以最大限度将水分固持在夹土层及夹土层上部。

2.2 夹层位置对土壤蒸发特性的影响

2.2.1 夹层位置对土壤累积蒸发量的影响

从图 6a 中可以看出,不同处理土壤蒸发过程随时间的变化均呈现出明显的阶段性特征,在前期基本呈线性增加趋势,中期增速变缓,后期增速进一步减缓。蒸发第 4 天,各处理土壤累积蒸发量无显著差异;连续蒸发至第 8 天,表土替代材料夹层土壤剖面的累积蒸发量均大于 CK 处理,其中 T2(28.65 mm)和T3(28.39 mm)较 CK 处理(24.55 mm)显著高出16.70%和15.64%;连续蒸发30 d后,T1(50.56 mm)、T2(52.75 mm)和T3(52.93 mm)处理累积蒸发量均显著低于 CK 处理(58.50 mm),降幅分别为13.57%、9.83%和9.52%,T1、T2、T3处理之间差异显著。这说明表土替代材料夹层显著降低了后期的土壤蒸发量,且夹层位置距离土表越近,对土壤累积蒸发量的抑制作用越强。

由于人渗试验结束后各处理的累积人渗量有所差异,蒸发前土壤初始含水率不同,因此本研究引人蒸发系数(累积蒸发量与累积入渗量的比值)来消除不同土壤初始含水率引起的累积蒸发量差异[25]。蒸发系数作为土壤蒸发损失比例和土壤保水能力的定量表征,其值越小,说明土壤蒸发损失比例越小,土壤

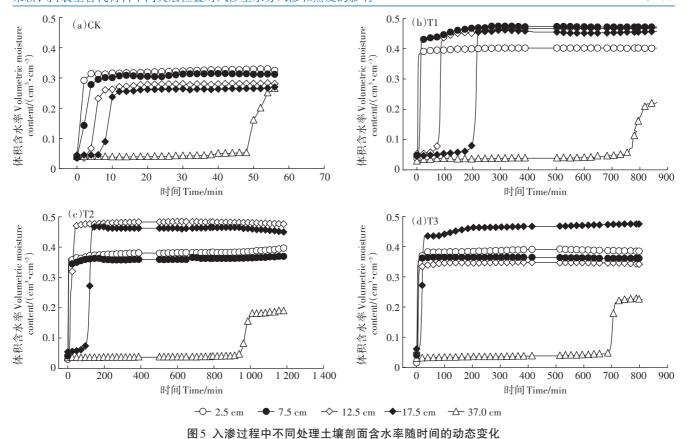


Figure 5 Variation of volumetric moisture content of soil profile with time for different treatments in the infiltration process

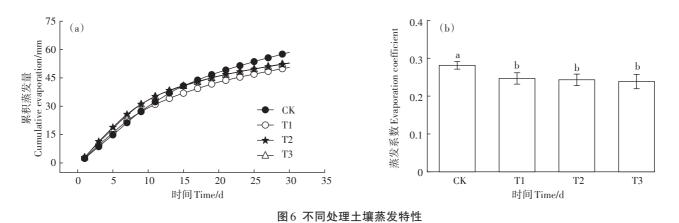


Figure 6 Soil evaporation characteristics of different treatments

保水能力越强。由图 6b 可知,表土替代材料夹层各处理的蒸发系数均显著小于 CK 处理,说明含有表土替代材料夹层的土壤蒸发损失比例减小,保水能力增强;表土替代材料夹层各处理之间蒸发系数差异不显著。

利用Rose模型分别对不同处理的土壤累积蒸发量E(mm)与蒸发时间 $t_e(d)$ 之间的关系进行模拟,拟合结果见表4。各处理 R^2 均在0.96以上,RRMSE在

0.069~0.075 之间,Rose 模型对表土替代材料夹层土壤剖面水分蒸发过程拟合效果较好。随夹层位置的加深,参数c显著提高,参数d显著降低,T1与T2、T3处理差异显著。

2.2.2 蒸发过程中土壤剖面含水率的动态变化

因表土替代材料夹层位置对土壤水分入渗和蒸 发过程的影响有所差异,各处理的土壤剖面含水率变 化也有所不同。在蒸发过程中,不同深度土壤水分通

表4 累积蒸发量与蒸发时间Rose模型拟合参数

Table 4 Rose fitting parameters of cumulative evaporation and evaporation time

处理 Treatment	水分扩散参数 Moisture diffusion parameter(c)	稳定蒸发参数 Stable evaporation parameter(d)	R^2	RRMSE
CK	5.952±0.080c	0.982±0.016a	0.976	0.069
T1	7.282 ± 0.023 b	$0.447 \pm 0.024 \mathrm{b}$	0.973	0.067
T2	9.423±0.495a	$0.134 \pm 0.014 c$	0.963	0.073
Т3	9.148±0.163a	0.192±0.083c	0.962	0.075

过毛管孔隙具有整体向上移动的能力。由图7可知, CK处理土壤含水率分布具有连续性,随土层深度增加而递增,且不同深度处的含水率变化规律一致,均随着时间的推移表现为快速下降后持续降低并趋于稳定的过程。表土替代材料夹层土壤剖面水分分布具有明显的分层,T1、T2和T3处理的夹层部分含水率均显著高于夹层上部和上部风沙土,夹层部分含水率变化幅度较小,夹层上部和上部风沙土含水率变化幅度较大,且均随深度的增加而增大,说明夹层部分水分损失量小,且夹层部分抑制了下层水分的上行。在连续蒸发30d后,T1、T2和T3处理在表土层

2.5 cm处的土壤含水率分别为0.101、0.066 cm³·cm⁻³和0.101 cm³·cm⁻³,在夹层17.5 cm处分别为0.413、0.412 cm³·cm⁻³和0.392 cm³·cm⁻³。综上所述,表层覆盖风沙土且以表土替代材料作为夹层的重构土壤能够有效减少剖面中水分的蒸发,从而提高土壤剖面的持水能力。

3 讨论

降雨是西部露天矿区土壤水分的主要补给来源,水分入渗过快会导致土壤含水率降低,进而可供植物利用的水分不足。通常情况下,质地越粗的土壤,大孔隙越多,土壤颗粒的比表面积也就越小,吸附能力也越弱,进而相同势能下的水分通量越大。本研究中均质风沙土质地较粗,平均入渗率和稳定入渗率均较高,不利于降雨资源的有效利用,而表土替代材料夹层处理的入渗率明显降低,且累积入渗量和湿润锋在进入夹层界面前随时间非线性变化,进入界面后趋于线性,斜率变小,这与范严伟等[26]的研究结果一致。这主要是由于层状土入渗过程主要由细质土控制,并且入渗初期表层土壤含水率较低,土壤吸力较大,入渗较快,随着湿润锋的运移,土壤含水率增加,基质势

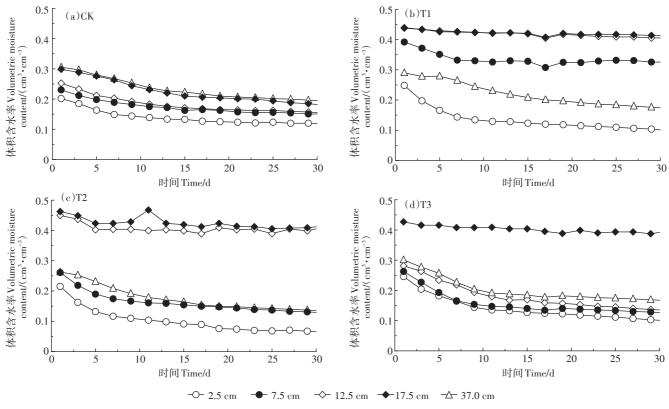


图7 蒸发过程中不同处理土壤剖面含水率随时间的动态变化

Figure 7 Variation of volumetric moisture content of soil profile with time for different treatments in the evaporation process

变小,入渗率随之减小且逐渐趋于稳定[27-28]。本研究 中表土替代材料夹层在位于土表下10cm时,土壤入 渗率最低,湿润锋运移速度最慢,这可能是由于层状 土壤入渗率与上层土壤饱和导水率和下层土壤进水 吸力有关,同时重构剖面中风沙土和表土替代材料的 孔隙、黏粒含量等不同,导致渗透性、持水能力有所差 异[29],这与李毅等[6]、王晓彤等[30]的研究结果一致。李 毅等同对比分析了不同夹层位置下塿夹砂和砂夹塿 的入渗过程,结果表明距土表10~15 cm的夹层层位 对水分入渗的阻碍作用最强。王晓彤等[30]的研究也 表明,在黄河泥沙中不同位置设置黏土夹层后,入渗 率随着夹层深度的增加呈先增大后减小的趋势,入渗 率在土表下55 cm 深度处达到最低值。入渗过程中 夹层之上的风沙土的含水率显著高于夹层以下风沙 土,这主要是由于夹层界面以下的风沙土的基质吸力 小于表土替代材料夹层部分,存在毛管障碍。这与柴 成武等四的研究结果一致。柴成武等四的研究表明, "沙土+黏土+沙土"夹层结构能够有效将水分固持于 黏土层上部。综上可以看出,表土替代材料夹层位置 对土壤水分入渗过程的影响机制,主要是通过降低土 壤孔隙度和通透性来改变或阻断土壤剖面的孔隙分 布状况和过水断面大小,进而影响土壤质地和土壤结 构均一性[32-33]。对于重构的夹层土壤,在入渗初期降 雨能够快速进入风沙土表层,有效减少地表径流,而 后期水分在进入土壤夹层后入渗率降低,从而有效减 少水分向深层的流失和渗漏。

土壤蒸发是土壤水和大气水连接的主要过程,蒸 发过程可划分为三个阶段:第一阶段土壤蒸发强度大 且蒸发速率较稳定,主要受大气蒸发强度影响;第二 阶段土壤蒸发强度急剧降低,与土壤导水率有关;第 三阶段土壤蒸发强度较低并趋于稳定,主要受水汽扩 散的能力控制[34]。本研究中土壤累积蒸发量随时间 的变化具有明显的阶段性特征,在第一阶段土壤累积 蒸发量线性增加,第二阶段累积蒸发量增加缓慢,第 三阶段土壤蒸发速率基本稳定,累积蒸发量增加平 稳。在蒸发的初期,均质风沙土与表土替代材料夹层 处理的土壤累积蒸发量无明显差异,主要是由于蒸发 初期表土层土壤含水率均较高,主要受温度等外界因 子的影响,土壤蒸发能力接近[35],加上风沙土大孔隙 较多,吸附能力弱,土壤表层保存的水分少且下层水 分向上运动难度大[23]。随着蒸发时间的推移,表土替 代材料夹层处理的累积蒸发量明显小于均质风沙土, 这主要是由于在蒸发中后期,表土层土壤含水量降

低,蒸发速率主要取决于土壤的孔隙特征,土壤孔隙的数量、大小和形态通过对水分的存在形态和连续性产生影响,夹层界面处的毛管孔隙被夹层界面阻断,使土壤剖面的孔隙连通性明显降低[36],从而抑制了水分由下向上运动,只能以水汽扩散形式蒸发,导致土壤累积蒸发量明显降低。

任利东等[37]的研究表明,在砂黄土表层覆盖砂土可明显减少土壤蒸发,且不同分层厚度层状土柱的累积蒸发量无明显差异。HUANG等[38]的研究表明,不同分层类型的土壤蒸发存在差异,上砂下黏型层状土累积蒸发量显著低于上黏下砂型层状土,而多层复合层状土的累积蒸发量最高。综合来说,重构的表土替代材料夹层相对于均质风沙土更能抑制土壤蒸发,夹土层对水分束缚力较强,可以长期保证植物生长所需水分,这适合在西部干旱半干旱矿区土地复垦中推广应用。

本研究基于室内土柱模拟试验探讨了表土替代材料不同夹层位置对西部露天矿区风沙土的入渗和蒸发特征的影响,未涉及气象、植物生长及地下水等因素,与田间实际情况有所差异,试验结论需进一步在田间验证。此外,本研究只确定3种不同夹层位置对水分运移有阻滞作用,且夹层距土表10cm时阻滞作用最强,但还不能确定夹层厚度为多少时可以达到水分蒸发损耗最小的最佳水分储存效果,夹层厚度设置需要进一步探索验证。

4 结论

- (1)表土替代材料3种夹层位置均显著降低了土壤入渗率和湿润锋运移速度,其中夹层位置在距土表10cm时,重构土壤的入渗率最低,湿润锋运移速度最慢,入渗时间最长,能够有效地将水分截留在夹土层及夹土层上部,是当地矿区重构土壤剖面构型的理想选择。
- (2)表土替代材料夹层对土壤蒸发具有显著抑制作用,可提高土壤剖面保水能力。土壤累积蒸发量随夹层深度的增加而减小,说明夹层位置距离土表越近,对土壤累积蒸发量的抑制作用越强。以表土替代材料作为夹层的重构土壤剖面水分分布得到了改善,土壤水分损失主要来自夹层上部和下部风沙土,夹层部分含水率变化幅度较小。
- (3) Kostiakov 入渗模型和 Rose 蒸发模型能够较好地模拟含表土替代材料夹层的重构土壤水分入渗和蒸发过程。

参考文献:

- [1] 胡振琪. 论露天煤矿复垦的有关问题[J]. 煤矿环境保护, 1996(5): 11-14. HU Z Q. Discussion on related problems of opencast coal mine reclamation[J]. Energy Environmental Protection, 1996(5): 11-14
- [2] 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
- [3] 姚雪玲, 傅伯杰, 吕一河. 黄土丘陵沟壑区坡面尺度土壤水分空间变异及影响因子[J]. 生态学报, 2012, 32(16): 4961-4968. YAO X L, FU B J, LU Y H. Spatial patterns of soil moisture at transect scale in the Loess Plateau of China[J]. *Acta Ecologic Sinica*, 2012, 32(16): 4961-4968.
- [4] 王全九, 邵明安, 郑继勇. 土壤中水分运动与溶质迁移[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007. WANG Q J, SHAO M A, ZHENG J Y. Water movement and solute migration in soil[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2007.
- [5] SI B, DYCK M, PARKIN G. Flow and transport in layered soils[J]. Canadian Journal of Soil Science, 2011, 91(2):127-132.
- [6] 李毅, 任鑫, HORTON R. 不同质地和夹层位置对层状土人渗规律的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2012, 30(4):485-490. LI Y, REN X, ROBERT R. Influence of various soil textures and layer positions on infiltration characteristics of layered soils[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2012, 30(4):485-490.
- [7] ZETTL J D, BARBOUR S L, HUANG M B, et al. Influence of textural layering on field capacity of coarse soils[J]. Canadian Journal of Soil Science, 2011, 91(2):133-147.
- [8] 任利东, 黄明斌, 樊军. 不同类型层状土壤持水能力的研究[J]. 农业工程学报. 2012, 29(19):104-111. REN L D, HUANG M B, FAN J. Study on water retention capacity for drained soils with different textural layering[J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(19):105-111.
- [9] 哈丽代姆·居麦, 宁松瑞, 王全九, 等. 施加 PAM 与 CMC 对土壤水分 人渗与蒸发特征的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(1):121-127, 134. HALIDAIMU J M, NING S R, WANG Q J, et al. Comparative analysis of the effects of PAM and CMC on soil infiltration and evaporation[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(1):121-127, 134.
- [10] 李娜, 耿玉清, 赵新宇, 等. 生物炭和 PAM 混施影响煤矸石基质水分的人渗和蒸发[J]. 水土保持学报, 2020, 34(2):290-295. LI N, GENG Y Q, ZHAO X Y, et al. Mixed application of biochar and PAM in fluences water infiltration and evaporation of coal gangue matrix[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(2):290-295.
- [11] 孙池涛, 邓亚鹏, 张俊鹏, 等. 秸秆覆盖条件下滨海土壤蒸发阻力模型研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(12): 284-291. SUN C T, DENG Y P, ZHANG J P, et al. Model on coastal soil evaporation resistance under straw coverage[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(12): 284-291.

- [12] 胡振琪, 多玲花, 王晓彤. 采煤沉陷地夹层式充填复垦原理与方法 [J]. 煤炭学报, 2018, 43(1): 198-206. HU Z Q, DUO L H, WANG X T. Principle and method of reclaiming subsidence land with interlayers of filling materials[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43 (1):198-206.
- [13] 胡振琪, 魏忠义, 秦萍. 矿山复垦土壤重构的概念与方法[J]. 土壤, 2005, 37(1):8-12. HU Z Q, WEI Z Y, QIN P. Concept and methods for soil reconstruction in mined land reclamation[J]. Soil, 2005, 37 (1):8-12.
- [14] 胡振琪, 王培俊, 邵芳. 引黄河泥沙充填复垦采煤沉陷地技术的试验研究[J]. 农业工程学报, 2015, 31(3): 288-295. HU Z Q, WANG P J, SHAO F. Technique for filling reclamation of mining subsidence land with Yellow River sediment[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(3): 288-295.
- [15] 曹梦竺, 费波, 李向东. 采煤塌陷区湖泥充填复垦土壤的营养元素研究[J]. 能源环境保护, 2018, 32(6):21-24. CAO M Z, FEI B, LI X D. Study on nutrient elements of lake mud filling reclaimation soil in coal mining subsidence area[J]. *Energy Environmental Protection*, 2018, 32(6):21-24.
- [16] 胡振琪, 位蓓蕾, 林杉, 等. 露天矿上覆岩土层中表土替代材料的 筛选[J]. 农业工程学报, 2013, 29(19): 209-214. HU Z Q, WEI B L, LIN S, et al. Selection of topsoil alternatives from overburden of surface coal mines[J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(19): 209-214
- [17] WILSON K L, SKOUSEN J. Nutrient concentrations in tree leaves on brown and gray reclaimed mine soils in west Virginia[J]. Science of the Total Environment, 2014, 481(1):418–424.
- [18] JIA J C, YANG X F, ZHANG P P, et al. Use of montmorillonite-enriched sandstone to remediate a sandy mined soil[J]. *Ecological Engineering*, 2019, 130(3):101–109.
- [19] 王志刚, 毕银丽, 宋子恒, 等. 东部草原露天矿区黏土改良模拟研究[J]. 生态学报, 2018, 38(16):5865-5875. WANG Z G, BI Y L, SONG Z H, et al. Substrate compositions facilitate clay restoration of the simulation study in an opencast coal mine in the eastern steppe of China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(16):5865-5875.
- [20] 况欣宇, 曹银贵, 罗古拜, 等. 基于不同重构土壤材料配比的草木樨生物量差异分析[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(4):453-461. KUANG X Y, CAO Y G, LUO G B, et al. Analysis of biomass differences in *Melilotus suaveolens* Ledeb. based on different ratios of reconstructed soil materials[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(4):453-461.
- [21] 黄雨晗, 曹银贵, 周伟, 等. 秸秆生物炭对草原矿区重构土苜蓿生长状况的影响[J]. 生态学报, 2021, 41(2): 588-602. HUANG Y H, CAO Y G, ZHOU W, et al. Effects of straw biochar on the growth of *Medicago falcata* in the reconstructed soil of grassland mining area [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(2): 588-602.
- [22] 甄庆, 摄晓燕, 张应龙, 等. 晋陕蒙能源区不同构型土体水分入渗特性模拟[J]. 农业机械学报, 2015, 46(8):90-96. ZHEN Q, SHE X Y, ZHANG Y L, et al. Simulation of infiltration characteristics with various soil configurations in Shanxi-Shaanxi-Inner Mongolia energy zone[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,

2015, 46(8):90-96.

- [23] 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-Shan-Meng adjacent region [J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52(6):1280-1290.
- [24] 宋日权, 褚贵新, 张瑞喜, 等. 覆砂对土壤入渗, 蒸发和盐分迁移的 影响[J]. 土壤学报, 2012, 49(2): 282-288. SONG R Q, CHU G X, ZHANG R X, et al. Effects of sand mulching on soil infiltration, evaporation, and salt distribution[J]. Acta Pedologica Sinica, 2012, 49(2): 282-288.
- [25] 牛文全, 邹小阳, 刘晶晶, 等. 残膜对土壤水分入渗和蒸发的影响及不确定性分析[J]. 农业工程学报, 2016, 32(14):110-119. NIU W Q, ZOU X Y, LIU J J, et al. Effects of residual plastic film mixed in soil on water infiltration, evaporation and its uncertainty analysis[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(14):110-119.
- [26] 范严伟, 毕贵权, 赵文举. 不同影响因素下砂夹垆土壤水分运动的 模拟分析[J]. 兰州理工大学学报, 2017, 43(1):61-66. FAN Y W, BI G Q, ZHAO W J. Simulative analysis of soil moisture movement in interlayer of sand with loessal soil under various influencing factors [J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2017, 43(1):61-66.
- [27] 王春颖, 毛晓敏, 赵兵. 层状夹砂土柱室内积水入渗试验及模拟 [J]. 农业工程学报, 2010, 26(11):61-67. WANG CY, MAOXM, ZHAOB. Experiments and simulation on infiltration into layered soil column with sand interlayer under ponding condition[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(11):61-67.
- [28] ZHANG Y L, ZHEN Q, CUI Y X, et al. Use of montmorillonite-enriched siltstone for improving water condition and plant growth in sandy soil[J]. *Ecological Engineering*, 2020. 145:1–9.
- [29] 马蒙蒙, 林青, 徐绍辉. 不同因素影响下层状土壤水分入渗特征及水力学参数估计[J]. 土壤学报, 2020, 57(2):347-358. MA M M, LIN Q, XU S H. Water infiltration characteristics of layered soil under influences of different factors and estimation of hydraulic parameters [J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(2):347-358.
- [30] 王晓彤, 胡振琪, 赖小君, 等. 黏土夹层位置对黄河泥沙充填复垦土壤水分入渗的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(18):86-93.

- WANG X T, HU Z Q, LAI X J, et al. Influence of clay interlayer position on infiltration of reclaimed soil filled with Yellow River sediment [J]. *Transactions of the CSAE*, 2019, 35(18):86–93.
- [31] 柴成武, 徐先英, 王方琳, 等. 石羊河尾闾黏土质夹层结构土壤对降雨入渗的响应[J]. 水土保持研究, 2021, 28(2):163-167, 175. CHAI C W, XU X Y, WANG F L, et al. Response of clay interlayers structure soil to rainfall infiltration in the lower reaches of Shiyang River[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(2):163-167, 175.
- [32] 邵明安, 王全九, 黄明斌. 土壤物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006. SHAO M A, WANG Q J, HUANG M B. Soil physics[M]. Beiiing: Higher Education Press, 2006.
- [33] 任志胜, 申卫博, 解倩, 等. 砒砂岩区排土场新构土体保水效应研究[J]. 土壤学报, 2016, 53(5):1148-1159. REN Z S, SHEN W B, XIE Q, et al. Study on the water retention effect of earth disposal site's soil reconstruction in soft sandstone region[J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, 53(5):1148-1159.
- [34] WANG T, STEWERT C E, SUN C, et al. Effects of biochar addition on evaporation in the five typical Loess Plateau soils[J]. *Catena*, 2018, 162:29-39.
- [35] 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(3):399–406.
- [36] 任志胜, 解倩, 王彤彤, 等. 晋陕蒙露天煤矿排土场不同新构土体 土壤蒸发特征研究[J]. 土壤, 2016, 48(4): 824-830. REN Z S, XIE Q, WANG T T, et al. Characteristics of evaporation of different reconstruction soils in mining area's earth disposal sites of Shanxi-Shaanxi-Inner Mongolia adjacent area[J]. Soils, 2016, 48(4): 824-830.
- [37] 任利东, 黄明斌. 砂性层状土柱蒸发过程实验与数值模拟[J]. 土壤学报, 2014, 51(6):1282-1289. REN L D, HUANG M B. Experiment and numerical simulation of soil evaporation from layered sandy soil columns[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(6):1282-1289.
- [38] HUANG M B, BRUCH P G, BARBOUR S L. Evaporation and water redistribution in layered unsaturated soil profiles[J]. *Vadose Zone Journal*, 2013, 2(1):1-14.