

上覆蓄水陶土层对黄土高原土壤水分入渗与蒸发的影响

常艺睿, 马娟娟, 孙西欢, 郑利剑, 郭向红

(太原理工大学水利科学与工程学院, 太原 030024)

摘要: 为探究蓄水陶土持水能力及改良黄土高原土壤水分运移特性,进行了蓄水陶土持水特性试验及室内上覆蓄水陶土层的土柱入渗和蒸发试验。蓄水陶土设置 3 个粒径水平(20~30, 5, 2 mm),土柱试验上覆蓄水陶土层厚 5 cm,并以不覆盖蓄水陶土的处理为对照(CK)。结果表明:室温 15 ℃下,3 种粒径的蓄水陶土 40 s 内均能达到饱和,且蓄水陶土吸水倍率介于 30%~90%,同时释水速率较为缓慢,蓄水陶土持水性较好;就土柱入渗而言,不同粒径的蓄水陶土均显著促进土壤湿润锋运移距离,累积入渗量较 CK 处理增加 40%~60%,且随粒径的增大而增大;在土柱蒸发方面,连续蒸发 7 天时,不同粒径蓄水陶土均在不同程度上抑制土壤蒸发,且粒径为 5 mm 时的效果最明显,其累积蒸发量比 CK 减小 67.23%;上覆蓄水陶土层可减少土壤水分散失,上覆不同粒径蓄水陶土的土柱,在 10—25 cm 土层内的土壤含水率较 CK 可提高 4~5 倍。综合考虑土壤入渗及蒸发过程,上覆蓄水陶土的粒径为 5 mm 时效果最佳。研究结果能够为构建提高黄土高原坡面渗蓄能力的方法提供理论依据。

关键词: 蓄水陶土; 粒径; 水分运移; 土壤水分; 土壤改良

中图分类号: S152.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2022)06-0101-09

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.06.014

Effect of Overlying Water Storage Clay Layer on Soil Water Infiltration and Evaporation on the Loess Plateau

CHANG Yirui, MA Juanjuan, SUN Xihuan, ZHENG Lijian, GUO Xianghong

(College of Water Resources Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024)

Abstract: In order to explore water hold capacity of water storage clay and improve soil water movement characteristics of the Loess Plateau, the water retention test of water storage clay and the indoor infiltration and evaporation test of soil column with water storage clay layer were carried out. Three particle size levels (20~30, 5 and 2 mm) were set for water storage clay. The thickness of water storage clay layer over the soil column was 5 cm, and the treatment without water storage clay was used as control (CK). The results showed that when the room temperature was 15 ℃, three particle sizes of water storage clay could reach saturation within 40s, and the water absorption rate was between 30%~90%. Meanwhile, the water release rate was relatively slow, so it indicated that the water retention of water storage clay was better. In terms of the infiltration of the soil column, the migration distance of wetting front was significantly promoted by water storage clay with different particle sizes, and the cumulative infiltration amount increased by 40%~60% compared with CK, and it increased with the increasing of the particle size. In terms of soil column evaporation, after continuous evaporation of seven days, soil evaporation was inhibited in varying degrees by water storage clay with different particle sizes. Moreover, the inhibition effect was the most obvious when the particle size was 5 mm, its accumulated evaporation was 67.23% lower than that of CK. The overlying water storage clay layer could reduce the loss of soil water. The soil moisture content in the 10—25 cm soil layer of the soil column covered by water storage clay with different particle sizes increased by 4~5 times compared with CK. With comprehensive consideration of soil infiltration and evaporation, the effect was the best when the particle size of water storage clay was 5 mm. This study could provide theoretical basis for

constructing methods to improve the infiltration and storage capacity of slope on the Loess Plateau.

Keywords: water storage clay; particle size; water movement; soil moisture; soil improvement

黄土高原是中国水土流失最严重的地区,也是中国生态建设和治理的重点地区。根据国家水土保持公报数据^[1]显示,截至 2020 年,黄土高原地区水土流失面积 20.84 万 km²,占总面积的 36.25%,中度及以上等级水土流失面积占黄土高原区域水土流失总面积的 40.17%。黄土高原沟壑区土壤抗蚀能力差,表层土壤受水后易结皮,引起土壤入渗率减小。土壤孔隙结构不合理,使得蓄水保水能力差,极易造成水土流失。因此,提高土壤的入渗能力和蓄水性能是黄土高原坡面防止水土流失的重要途径之一^[2]。如何改善土壤入渗与蓄水性能国内外已有不少研究报道,如混掺砂子^[3]、铺设碎石^[4]等无机材料能够显著提高土壤入渗率;在土壤中添加有机材料^[5]也能有效改善土壤入渗能力,其中黄土高原地区砾石因含量和粒径等自身性质的不同与土壤入渗性能的关系可能是正相关,也可能是负相关^[4];在坡面施加聚丙烯酰胺^[6]、沸石^[7]为主的高吸水性化合物类土壤改良材料,具有极强的吸收和蓄持土壤水分的能力,但其吸水性能易受改良材料内部结构及土质的影响^[6]。同时,黄土高原坡面对施用此类土壤改良材料的成本与可能造成的环境问题还未明晰。因此,对可提升黄土高原坡面渗蓄能力的土壤改良材料持水特性的研究,有利于黄土高原坡面地区改善生态环境,推进水资源高效利用。目前,新型多孔材料如泡沫砂^[8]、多孔改良剂^[9]等,因其比表面积大、孔隙丰富、渗透性强等优点,具有应用于坡面提升土壤渗蓄能力的潜力。其中,蓄水陶土是在发泡陶土的基础上经过改造而发明的一种新型无机多孔陶粒,具有吸水率高、孔隙度大、原料广、成本低和无污染的特点^[10]。安黛宗等^[11]研究表明,蓄水发泡陶土及柱状陶土块均具有高达 80%~110%的吸水率。目前蓄水陶土的应用研究多集中于水质净化^[12]、城市绿化^[13]等方面,而将蓄水陶土应用于提高土壤渗蓄能力等水土保持方面的研究较少。同时,上覆不同粒径蓄水陶土层条件下土壤蓄持水分机理还未明晰,其对土壤水分运移特性的影响尚需进一步研究。

本文基于蓄水陶土持水特性试验及室内土柱试验,研究不同粒径的蓄水陶土吸释水特性及上覆蓄水陶土层后土壤的入渗及蒸发过程,以期揭示上覆不同粒径蓄水陶土层条件下的土壤水分运移规律,从而筛选出本试验条件下最佳粒径的蓄水陶土,为黄土高原坡面土壤改良提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

以黄土高原东部山西省太原市西山砂壤土为供试土壤,采集深度为 0—20 cm。土样去除杂质后,避光条件下自然风干,碾压过 2 mm 筛备用。土壤机械组成利用 MS 2000 激光粒度分析仪测定,土壤砂粒、粉粒、黏粒质量分数分别为 84.05%,14.20%及 1.75%,质地为砂质壤土。蓄水陶土由武汉铭创新海生态科技有限公司提供,经烘干、破碎后过筛,制备成不同粒径。

1.2 蓄水陶土持水性试验

1.2.1 吸水特性 室温 15℃下,取不同粒径直径分别为 20~30,5,2 mm 的烘干蓄水陶土,放置于吸水饱和后的滤纸上,然后将滤纸包裹的蓄水陶土置于水中,试验时间尺度采用先密后疏原则称其质量变化,吸水时长为 3 h。按公式(1)计算吸水倍率,公式(2)计算吸水速率。

$$Q_t = \frac{(G_t - G_0)}{G_0} \times 100\% \quad (1)$$

$$V_{\Delta t} = (G_{t_2} - G_{t_1}) / G_0 \times (t_2 - t_1) \quad (2)$$

式中: Q_t 为某一粒径的蓄水陶土在吸水 t 时刻的吸水倍率(%); G_t 为该粒径的蓄水陶土在吸水 t 时刻的总质量(g); G_0 为该粒径蓄水陶土的烘干质量(g); $V_{\Delta t}$ 为单位质量的某一粒径蓄水陶土在 Δt 时段的吸水速率(s⁻¹); G_{t_2} 为该粒径的蓄水陶土在吸水 t_2 时刻的总质量(g); G_{t_1} 为该粒径的蓄水陶土在吸水 t_1 时刻的总质量(g); t_1 为吸水 t_1 时刻(s); t_2 为吸水 t_2 时刻(s); Δt 为吸水($t_2 - t_1$)时段(s)。

1.2.2 释水特性 将吸水饱和后不同粒径的蓄水陶土放于铝盒中,将铝盒置于恒温装置中,温度设为 15℃,试验时间尺度采用先密后疏原则测定蓄水陶土含水率随时间的变化情况,释水试验时长为 36 h。按公式(3)计算释水倍率,公式(4)计算释水速率。

$$H_t = \frac{(Y_s - Y_t)}{Y_0} \times 100\% \quad (3)$$

$$U_{\Delta t} = (Y_{t_1} - Y_{t_2}) / Y_0 \times (t_1 - t_2) \quad (4)$$

式中: H_t 为某一粒径的饱和蓄水陶土在释水 t 时刻的释水倍率(%); Y_s 为该粒径的蓄水陶土饱和质量(g); Y_t 为该粒径的蓄水陶土在释水 t 时刻后的总质量(g); Y_0 为该粒径蓄水陶土烘干质量(g); $U_{\Delta t}$ 为单位质量的某一粒径蓄水陶土在释水 Δt 时段的释水速率(min⁻¹); Y_{t_1} 为该粒径的蓄水陶土在释水 t_1 时

刻的总质量(g); Y_{t_2} 为该粒径的蓄水陶土在释水 t_2 时刻的总质量(g); t_1 为释水 t_1 时刻(min); t_2 为释水 t_2 时刻(min); Δt 为释水(t_1-t_2)时段(min)。

1.3 上覆蓄水陶土层的入渗与蒸发试验设计

土壤水分入渗和蒸发试验装置见图 1。试验土柱采用 5 mm 厚有机玻璃材料制作,内径 15 cm,高 50 cm,自底部垂直向上 5~35 cm 处每隔 5 cm 设置 1 个孔径 2 cm 的取土孔,共 7 个,便于取土进行土壤剖面水分分析。采用马氏筒供水,供水水头控制在 2 cm,入渗时长为 180 min。将土样按田间采样原状土容重为 1.38 g/cm³分层(每层 5 cm)均匀填装。试验共 4 个处理,编号分别为 CK、B、M 和 L,每个处理重复 3 次,以不施加蓄水陶土的处理为 CK;B、M 和 L 处理上层 5 cm 为不同粒径的蓄水陶土,粒径分别为 20~30, 5, 2 mm;容重分别为 0.71, 0.75, 0.97 g/cm³。测试时间尺度采用先密后疏原则记录马氏筒水位和湿润锋运移距离随时间的变化,入渗完成后立

即通过取土孔取土,取土深度为 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 cm,采用烘干法测定土壤含水率。

土壤水分蒸发试验装置见图 1b 所示,由远红外灯、土柱、和电子秤(精度 0.01 kg)组成。本次试验采用室内人工热源模拟太阳辐射蒸发的方法,以 250 W 红外光照射灯为光源,模拟黄土高原地区大气蒸发^[14]。白天加热蒸发 12 h,夜晚自然蒸发,蒸发 7 天,土壤表面与供热源间距均固定为 20 cm,试验期间平均室温为 25 ℃,蒸发试验期间不进行通风。蒸发过程中,每天早上 9 点定时用精度为 0.01 kg 的电子秤称量土柱以计算水分蒸发量。蒸发结束后立即通过土柱边壁取土孔沿土壤垂向剖面进行取土,取土深度为 0—35 cm,采用烘干法测定土壤含水率。日蒸发量计算公式为:

$$E=M_{\text{差}} \times 10 / (\pi r^2 \times \rho) \tag{5}$$

式中: E 为土柱日蒸发量(mm); $M_{\text{差}}$ 为土柱日质量变化值(g); r 为土柱内半径(cm); ρ 为水的密度(g/cm³)。

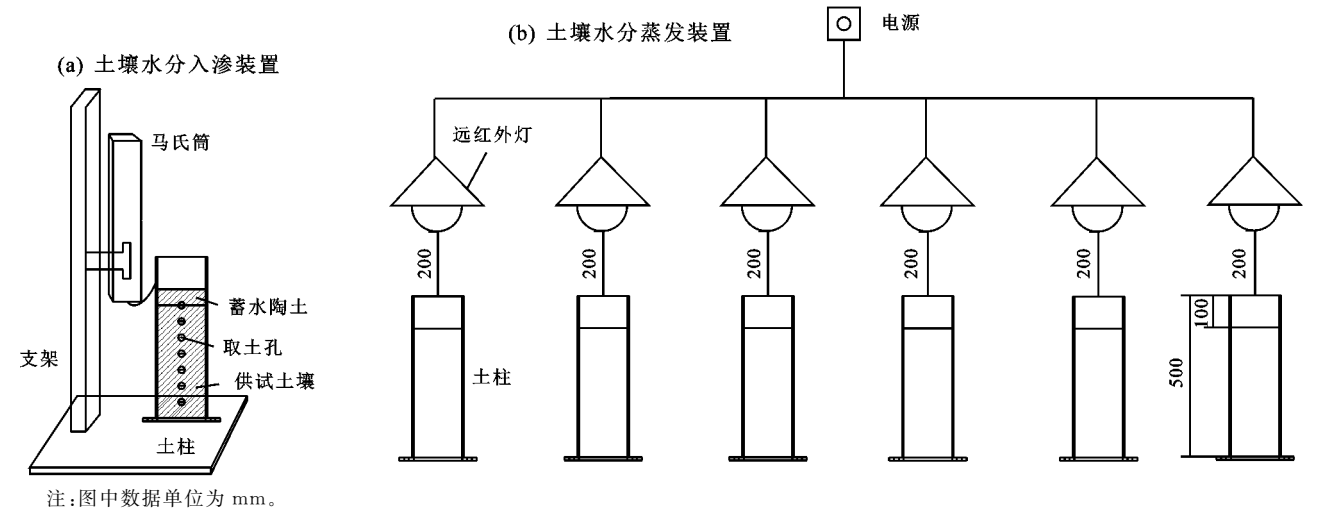


图 1 试验装置示意

1.4 模型模拟与评价

1.4.1 入渗模型 采用 Kostiakov 模型描述累积入渗量的变化趋势。

$$I=k \cdot t_1^\beta \tag{6}$$

式中: I 为土壤水分累积入渗量(mm); t_1 为土壤水分入渗时间(min); k 为第 1 个计时单位后的累积入渗量(mm); β 为累积入渗量的衰减指数。

1.4.2 蒸发模型 采用 Rose 模型描述累积蒸发量变化趋势。

$$E_{\text{累}}=A \sqrt{t_E}+B \cdot t_E \tag{7}$$

式中: $E_{\text{累}}$ 为累积蒸发量(mm); t_E 为蒸发历时(d); A 为水分扩散参数; B 为稳定蒸发参数。

1.4.3 精度评价指标 采用相对均方根误差(RRMSE)、整群剩余系数(CRM)和效率系数(CE)作为评价模型指标。

$$\text{RRMSE}=\frac{\sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (S_i - P_e)^2}}{\overline{P_e}} \tag{8}$$

$$\text{CRM}=\frac{\sum_{i=1}^n P_e - \sum_{i=1}^n S_i}{\sum_{i=1}^n P_e} \tag{9}$$

$$\text{CE}=1-\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - P_e)^2}{\sum_{i=1}^n (P_e - \overline{P})^2} \tag{10}$$

式中: n 为实测数据和模拟数据的个数; S_i 为模型模拟值; P_e 为实测数据; $\overline{P}$ 为 P_e 的平均值。

1.5 数据处理与分析

试验中所有数据均为各重复测定的平均值,采用 Excel 2010 进行数据处理,Origin 2017 软件作图,SPSS 19.0 软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 蓄水陶土吸释水特性

不同粒径的蓄水陶土吸水特性见图 2。不同粒径的蓄水陶土吸水倍率曲线趋势基本相同,初期快速吸水,随着时间的推移吸水变慢,达到饱和后不再吸水。20~30,5,2 mm 粒径的蓄水陶土均在 0~2 s 快

速吸水,20~30 mm 粒径蓄水陶土在 2~40 s 吸水变慢,40 s 时达到饱和后不再吸水,5 mm 粒径蓄水陶土在 2~8 s 吸水变慢,8 s 时达到饱和后不再吸水,2 mm 粒径蓄水陶土在 2~6 s 吸水变慢,6 s 时达到饱和后不再吸水,20~30,5,2 mm 粒径达到饱和时的吸水倍率分别为 31.33%,83.75%,86.67%,蓄水陶土粒径与吸水倍率间呈负相关关系。

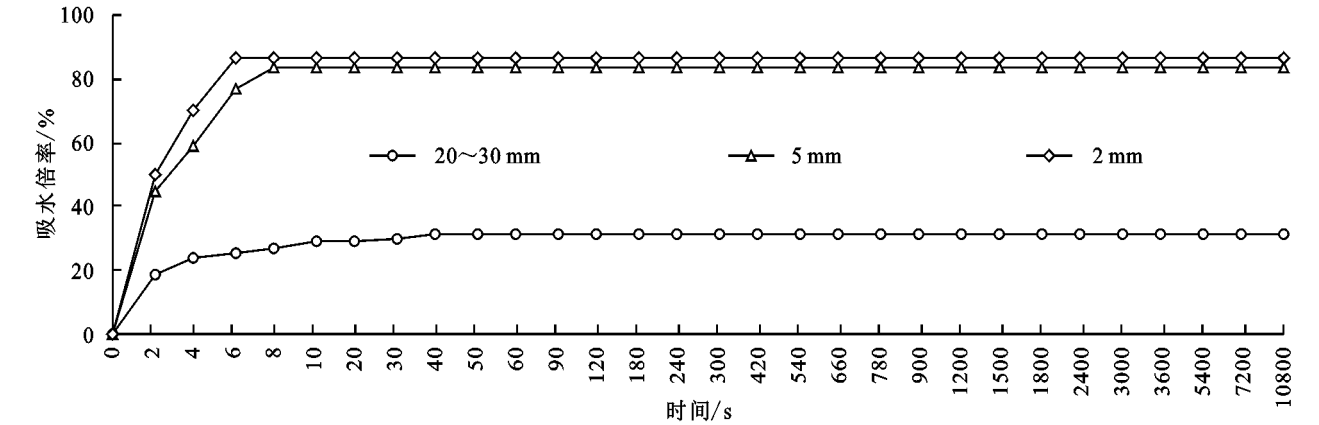


图 2 不同粒径蓄水陶土吸水倍率

选取 3 种粒径蓄水陶土从吸水至饱和过程的吸水倍率与时间的数据点,采用动力学方程^[15]对不同粒径的蓄水陶土吸水过程进行拟合,拟合结果见图 3,参数见表 1。

$$Q_t = Q_e (1 - e^{-\lambda t}) \tag{11}$$

式中: Q_t 为某一粒径的蓄水陶土在吸水 t 时刻的吸水倍率(%); Q_e 为该粒径蓄水陶土吸水平衡时吸水倍率(%); λ 为吸水动力学参数。

3 种粒径的蓄水陶土吸水曲线拟合的决定系数 R^2 均大于 0.96,表明该动力学方程能较好地反映蓄水陶土吸水倍率与时间的关系。随着蓄水陶土粒径的减小, R^2 与 CE 逐渐增大,RRMSE 逐渐减小,参数 λ 的绝对值增大,吸水速率加快。3 种粒径蓄水陶土

的单位质量吸水速率趋势相同,初期速率较大,随着时间推移速率减小,吸水饱和后速率为零。20~30 mm 粒径蓄水陶土在 0~2 s 单位质量吸水速率最快为 $0.093\ 2\ s^{-1}$,在 2~10 s 单位质量吸水速率降低为 $0.043\ 6\ s^{-1}$,在 10~40 s 单位质量吸水速率继续降低为 $0.008\ 0\ s^{-1}$,在 40 s 时完成饱和;5 mm 粒径蓄水陶土在 0~2 s 单位质量吸水速率最快为 $0.2\ s^{-1}$,在 2~6 s 单位质量吸水速率降低为 $0.05\ s^{-1}$,8 s 完成饱和;2 mm 粒径蓄水陶土在 0~2 s 单位质量吸水速率最快为 $0.333\ 0\ s^{-1}$,在 2~4 s 单位质量吸水速率降低为 $0.2\ s^{-1}$,6 s 已吸水饱和。2 mm 粒径蓄水陶土吸水速率最快,原因是其孔隙通道较小,水分子进入内部路径比大颗粒相对较短,接触水的表面积较大。

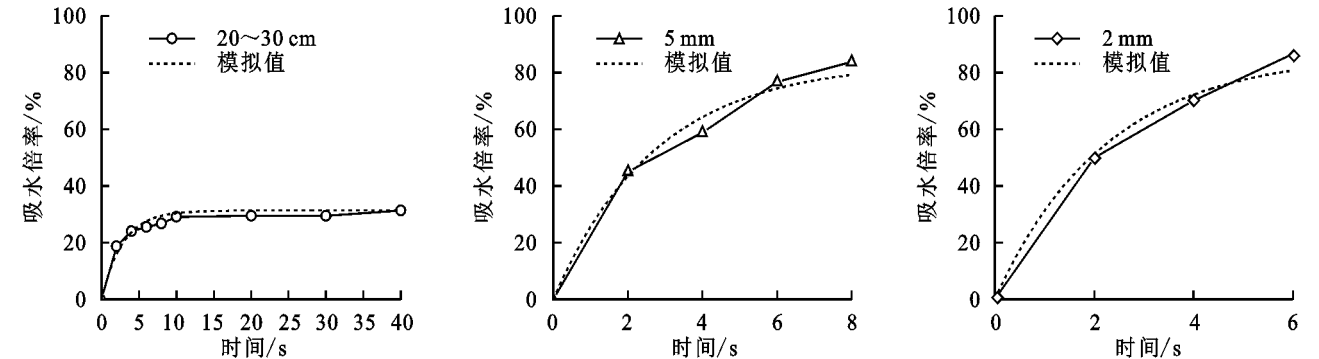


图 3 不同粒径蓄水陶土的动力学拟合曲线

表 1 吸水倍率与入渗时间的拟合参数

粒径/mm	λ	R^2	RRMSE	CRM	CE
20~30	-0.3520	0.9623	0.0663	-0.2990	0.8464
5	-0.3640	0.9865	0.0535	0.0238	0.9324
2	-0.4460	0.9902	0.0467	0.0131	0.9387

由图 4 可知,3 种粒径的蓄水陶土释水倍率曲线趋势基本相同,初期缓慢释水,随着时间的推移,释水加快,后期释水缓慢。20~30,5 mm 粒径的蓄水陶土均在 0~540 min 时缓慢释水,540~720 min 时释水加快,720~2 160 min 时释水缓慢;2 mm 粒径的

蓄水陶土在 0~600 min 时缓慢释水,在 600~720 min 释水加快,720~2 160 min 时释水缓慢。20~30,5,2 mm 粒径的蓄水陶土在 2 160 min 时释水倍率分别为 35.27%,67.9%,97.03%,蓄水陶土粒径与释水倍率间呈负相关关系。

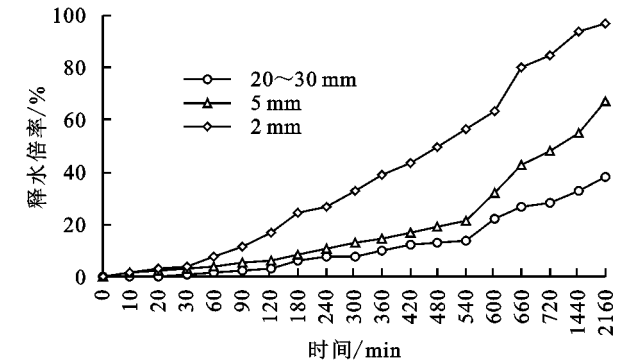


图 4 不同粒径蓄水陶土释水倍率

释水倍率与时间的关系采用幂函数 $H_t = at^b$ 进行拟合。式中: a 为第 1 个单位时间的释水倍率; b 为释水倍率的衰减指数。由表 2 可知,3 种粒径的蓄水陶土释水曲线拟合的决定系数 R^2 均大于 0.91,表明该幂函数能较好地反映蓄水陶土释水倍率与时间的关系;RRMSE 与 CE 分别趋近 0 和 1,CRM 均为负值,说明模拟值均较实测值大。随着蓄水陶土粒径减小,参数 a 增大,参数 b 均小于 1,说明初期释水倍率随粒径减小而增大,且当释水时间趋于无穷大时,单位时间释水倍率的增加速率逐渐减小并最终趋于稳定。3 种粒径蓄水陶土单位质量释水速率趋势相同,初期速率较小,随着时间推移速率增大,后期速率大幅减小。20~30,5 mm 粒径的蓄水陶土在 0~540 min 时单位质量释水速率分别为 0.001 8,0.001 2 min^{-1} ,在 540~720 min 时单位质量释水速率增大分别为 0.004 9,0.005 1 min^{-1} ,在 720~2 160 min 时单位质量释水速率减小分别为 0.000 44,0.000 46 min^{-1} ;2 mm 粒径蓄水陶土在 0~600 min 时单位质量释水速率 0.002 9 min^{-1} ,在 600~720 min 时单位质量释水速率加快为 0.005 3 min^{-1} ,在 720~2 160 min 时释水速率减慢为 0.000 23 min^{-1} 。由此看出,蓄水陶土吸水较快,但释水较为缓慢,持水性较好。

表 2 释水倍率与入渗时间的拟合参数

粒径/mm	a	b	R^2	RRMSE	CRM	CE
20~30	0.2060	0.6940	0.9124	0.2788	-0.0432	0.9072
5	0.2540	0.7380	0.9195	0.2678	-0.0223	0.9147
2	1.6510	0.5520	0.9118	0.2312	-0.0337	0.9039

2.2 上覆蓄水陶土层对土壤湿润锋运移的影响

上覆不同粒径蓄水陶土层的湿润锋运移距离随时间的变化见图 5,所有处理的湿润峰运移距离均随

入渗时间而逐渐增加。20~30 mm 与 5 mm 粒径的蓄水陶土前 5 min 内湿润锋运移距离较大,原因是由蓄水陶土持水特性可知,蓄水陶土吸水速率较快易达到饱和,且大粒径与中粒径颗粒间空隙较大,使单位时间内进入蓄水陶土层的水分流动通量增大,可较快在空隙间蓄持水分。随着入渗历时增加,各处理差异逐渐显著。入渗时间为 180 min 时各湿润锋运移深度分别为 15.2(CK),25(B),21.2(M),20.4 cm(L),上覆蓄水陶土层的湿润锋运移距离较 CK 分别增加 64.47%(B),39.47%(M),34.21%(L),且均达到显著性水平($p<0.05$),表明上覆蓄水陶土层对土壤水分入渗具有促进作用,且粒径越大,效果越明显。

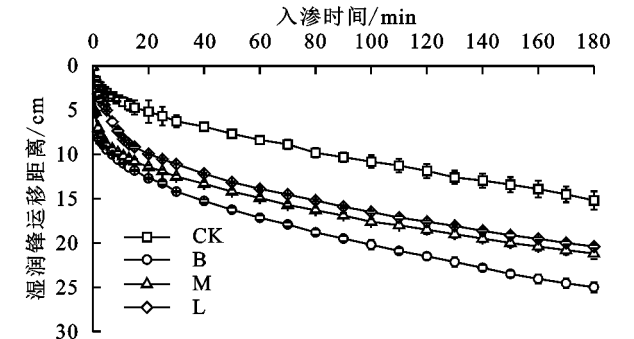


图 5 各处理湿润锋随入渗时间的动态变化过程

湿润锋与时间的关系采用幂函数 $F = ct^d$ 进行拟合。式中: c 为第 1 个单位时间的湿润锋运移距离; d 为湿润锋运移的衰减指数。由表 3 可知,各处理拟合的决定系数 R^2 均大于 0.99,表明该幂函数能较好地反映上覆蓄水陶土层后的湿润锋运移规律。随蓄水陶土粒径的增加, R^2 与 CE 逐渐减小,CRM 绝对值逐渐增大,且 5 mm 粒径的蓄水陶土 RRMSE 值最小。与 CK 相比,参数 c 增大,参数 d 减小,参数 c 受粒径大小所决定,初始湿润锋运移距离随粒径增大而增大,而参数 d 受到水势梯度、粒径大小及铺设容重的综合影响而不同。

表 3 湿润锋运移距离与入渗时间的拟合参数

处理	c	d	R^2	RRMSE	CRM	CE
CK	1.2980	0.4650	0.9954	0.0338	0.0050	0.9951
B	5.6120	0.2820	0.9927	0.0348	0.0334	0.9912
M	5.4520	0.2560	0.9932	0.0317	0.0329	0.9914
L	3.2170	0.3560	0.9942	0.0375	-0.0014	0.9935

2.3 上覆蓄水陶土层对累积入渗量的影响

由图 6 可知,各土柱累积入渗量均随时间延长呈增大趋势,入渗结束时各处理的累积入渗量分别为 6.12(CK),9.86(B),9.15(M),8.84 cm(L);入渗结束时上覆蓄水陶土层处理的累积入渗量比 CK 处理分别增加 61.11%(B),49.51%(M),44.44%(L)。由此可见,上覆蓄水陶土层后,累积入渗量增大,与 CK 相

比,均有显著性差异($p<0.05$)。上覆蓄水陶土层后,累积入渗量显著增大的原因主要是蓄水陶土孔隙丰富,吸水倍率较土壤饱和含水率大且饱和速度快,正如蓄水陶土吸水特性试验所揭示的蓄水陶土粒径 20~30,5,2 mm 的吸水倍率分别为 31.33%,83.75%,86.67%,吸水饱和时间分别为 40,8,6 s。因此,入渗初期较易达到饱和且累积入渗量大,且蓄水陶土颗粒粒间空隙较大,蓄持水能力较强,粒径越大,其空隙体积越大,蓄持水量越多,累积入渗量越大。此外,由于蓄水陶土的空隙和孔隙的快速蓄持水的作用,使蓄水陶土层形成蓄水区,这对于其下部的土壤而言,增大入渗水头,促进土壤水分的入渗。

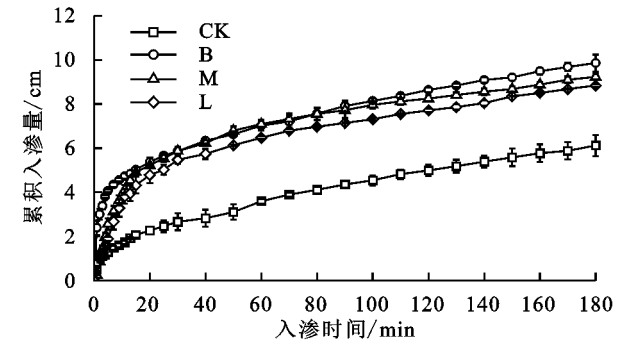


图 6 上覆不同粒径蓄水陶土层对累积入渗量的影响

土壤累积入渗量 $I(\text{cm})$ 与入渗时间 $t(\text{min})$ 之间可用 Kostiakov 模型进行拟合。由表 4 可知,各处理拟合方程决定系数 R^2 均大于 0.96,RRMSE 与 CE 分别趋近 0 和 1,拟合效果较好。上覆蓄水陶土层后,随着粒径减小,参数 k 减小,而参数 β 增加。参数 k 的物理意义是入渗单位时刻的累积入渗量,显然入渗层面的空隙和孔隙的大小对其起主导作用^[16]。由表 4 可以看出,蓄水陶土各处理由于其丰富的孔隙和空隙其 k 值显著大于 CK 处理;粒径越大, k 值越大,这说明颗粒间空隙对于 k 值的影响要大于蓄水陶土的空隙。参数 β 反映累积入渗量随时间的变化趋势。说明蓄水陶土各处理 β 值均小于 CK 处理,且随着蓄水陶土粒径的增大, β 值趋于减小。但从图 6 可知,参数 β 值的减少并不意味着累积入渗量的减少。

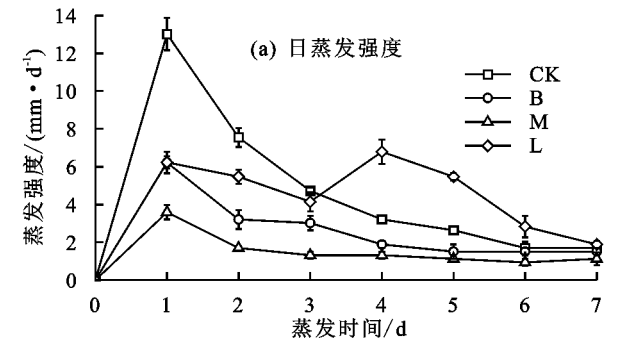


图 7 上覆不同粒径蓄水陶土层对土壤蒸发的影响

不同处理的累积蒸发量($E_{\text{累}}$)与蒸发时间(t_{E})符

表 4 Kostiakov 模型拟合参数						
处理	k	β	R^2	RRMSE	CRM	CE
CK	0.5820	0.4490	0.9971	0.0303	0.0033	0.9968
B	2.4910	0.2600	0.9958	0.0253	-0.0005	0.9947
M	1.6980	0.3340	0.9621	0.0983	0.0227	0.9553
L	1.4620	0.3510	0.9728	0.0846	-0.0060	0.9686

2.4 上覆蓄水陶土层对土壤蒸发的影响

土壤蒸发是指水蒸气从土壤表面进入大气的过程,水分蒸发是土壤水分损失的重要因素之一,有效抑制土壤水分的无效蒸发对提高土壤水分的利用效率有重要意义。图 7a 为上覆不同粒径蓄水陶土层的日蒸发强度随时间变化情况。CK 处理第 1 天蒸发强度最大为 13.02 mm/d;20~30,5,2 mm 粒径的蓄水陶土第 1 天蒸发强度分别为 6.22,3.59,6.23 mm/d。20~30,5 mm 粒径的蓄水陶土蒸发强度趋势与 CK 处理较为一致,均为日蒸发强度随时间逐渐降低。2 mm 粒径的蓄水陶土在第 4 天蒸发强度出现峰值,原因可能是 2 mm 粒径蓄水陶土与下层土壤的接触面形成毛细通道,使下层土壤水分在蒸发力的作用下向上迁移;且蓄水陶土颗粒间空隙对蓄水陶土层内的蓄热能力影响较大,空隙越小,热容越大,蓄热能力越强^[17],2 mm 粒径蓄水陶土颗粒间空隙较小,热容较大,经过 3 天蒸发,热量可传导至下层土壤中,使土壤水分汽化,增加蒸发,导致 2 mm 粒径蓄水陶土日蒸发强度出现双峰值。

由图 7b 可知,上覆蓄水陶土层的土壤累积蒸发量都有不同程度的下降,蒸发 1 天时,20~30 mm 与 2 mm 粒径蓄水陶土的土壤累积蒸发量无显著差异,蒸发历时在 4~7 天时,2 mm 粒径的蓄水陶土与 CK 处理的变化趋势相近,蒸发历时在 1~7 天时,5 mm 粒径的蓄水陶土累积蒸发量最小。连续蒸发 7 天后,各处理的累积蒸发量分别为 34.54(CK),19.24(B),11.32(M),32.84 mm(L),比 CK 分别下降 44.29%(B),67.23%(M),4.92%(L)。由此可见,连续蒸发 7 天时,上覆不同粒径的蓄水陶土层均可抑制土壤蒸发,且 5 mm 粒径的蓄水陶土对蒸发的抑制作用最明显。

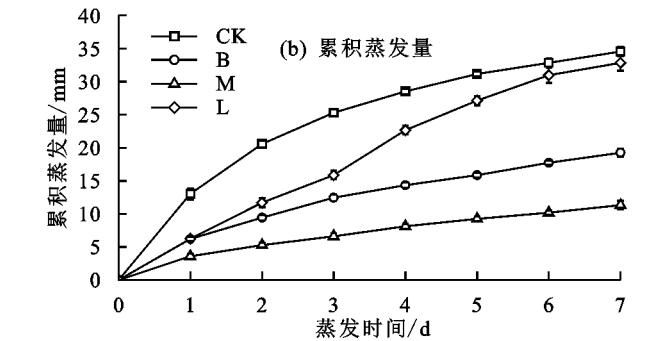


图 7 上覆不同粒径蓄水陶土层对土壤蒸发的影响

合 Rose 蒸发模型。由表 5 可知,各处理拟合方程决定

系数 R^2 均大于 0.95,上覆蓄水陶土层处理的 CRM 均为负值,说明 Rose 模型模拟值均大于实测值。随粒径减小,RRMSE 及 CRM 的绝对值均呈先降低后增加的趋势, CE 呈先增加后降低的趋势;且 5 mm 粒径蓄水陶土的 RRMSE 系数与 CRM 绝对值最小, CE 最趋近于 1,说明 Rose 模型对 5 mm 粒径的蓄水陶土水分蒸发过程模拟效果较好。参数 A 随粒径减小逐渐递减,2 mm 粒径的蓄水陶土参数 B 最大,这可能取决于蓄水陶土对水分的束缚能力和土壤水分向蒸发面补给能力,由于 2 mm 粒径的蓄水陶土释水速率较快,对水分约束能力较弱,因此稳定蒸发参数较高为 4.518。

表 5 累积蒸发量与蒸发时间拟合参数

处理	A	B	R^2	RRMSE	CRM	CE
CK	11.647	0.532	0.9597	0.0888	0.0755	0.9185
B	6.048	0.505	0.9981	0.0202	-0.0041	0.9958
M	3.138	0.431	0.9994	0.0099	-0.0001	0.9991
L	1.818	4.518	0.9971	0.0699	-0.0249	0.9752

2.5 上覆蓄水陶土层对土壤剖面水分分布的影响

由于上覆不同粒径蓄水陶土层对土壤水分入渗和蒸发特性的影响不同,导致各处理的土壤水分分布出现差异。图 8 为上覆不同粒径蓄水陶土层蒸发前后的土壤质量含水率分布情况。从图 8a 可以看出,入渗刚结束时土壤水分随土层深度增加而递减,随着时间的推移,均达到稳定。CK 处理在 0—10 cm 土

层含水率较高介于 20%~30%,上覆蓄水陶土层的处理在 0—20 cm 左右土层含水率较高介于 20%~60%。2 mm 粒径的蓄水陶土表层含水率较高,原因可能是蓄水陶土粒径较小,吸水性较强,致使孔隙弯曲程度变得复杂,水分运移阻力较大,水分滞留在表层。上覆蓄水陶土层的处理在 0—15 cm 土层土壤平均含水率分别较 CK 增加 20.96(B),19.61(M),18.33 倍(L)($p<0.05$)。

由图 8b 可知,CK 处理在 10—15 cm 土层含水率较高,平均为 10%,上覆蓄水陶土层的处理在 5—25 cm 土层含水率较高介于 15%~30%,这是因为蓄水陶土改变大气与土壤之间的交换界面,从而使得土壤水分蓄持在土壤中。20—30 mm 粒径的蓄水陶土在 5 cm 土层处含水率较高为 27.71%,原因是 5 cm 土层处测的是蓄水陶土的含水率,蓄水陶土自身吸水快,释水慢,且大孔隙间蓄存水蒸发较慢,最终导致蓄水陶土的含水率较高;而在 10 cm 土层处含水率较低为 17.53%,原因是 10 cm 土层处测的是土壤含水率,由于土体结构不同,从而测得土壤的含水率较 5 cm 土层处低。上覆蓄水陶土层的处理在 0—20 cm 土层土壤平均含水率分别较 CK 增大 4.37(B),5.09(M),4.01 倍(L)($p<0.05$),上覆蓄水陶土层明显增加土壤水分,提高土壤渗蓄能力,其中,蓄水陶土粒径为 5 mm 时,蓄持水作用显著增强。

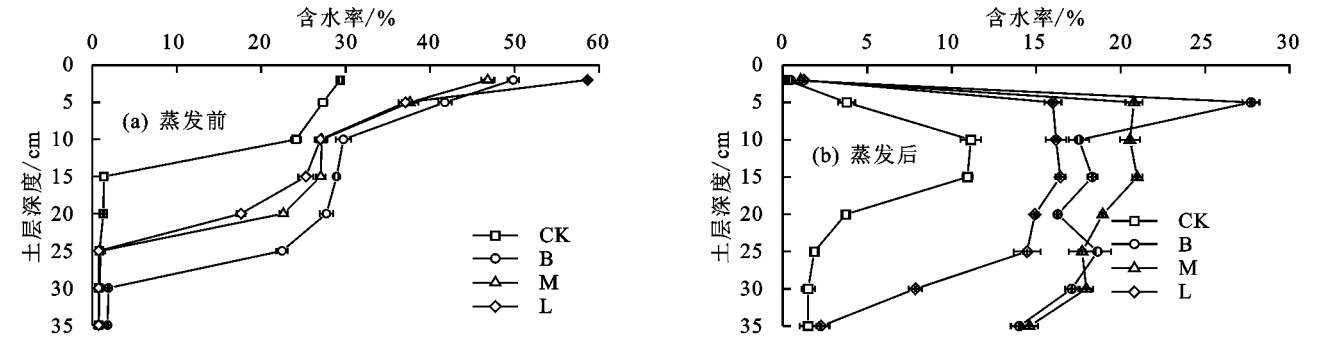


图 8 各处理不同蒸发历时土壤剖面质量含水率

3 讨论

土壤改良材料的持水能力是一项重要评价指标^[18]。土壤改良材料吸水倍率曲线趋势大致相同,初期吸水较快,后期吸水变慢,直至饱和不再吸水^[15];释水过程主要为缓慢释水、释水加快及释水缓慢 3 个阶段。蓄水陶土吸水 40 s 内均能达到饱和,且吸水倍率最高为 86.67%;蓄水陶土释水 36 h 后,释水倍率介于 35%~97%,并未完全释水。蓄水陶土的持水性较强,原因是蓄水陶土会产生一种纤维状莫来石雏晶平行排列的孔壁结构^[10],其可在孔壁的莫来石雏晶之间形成无数个晶间毛细孔,导致其快速吸水,缓慢释水。前人^[18]研究发现,有机材料的吸水

倍率最高为 30%,而保水剂^[19]及高分子吸水材料^[20]的吸水倍率较高为 200%;但是保水剂释水 18 h 后部分保水剂已完全释水^[21],掺料为粉煤灰的发泡剂^[22]添加量为 1.35 mL 时,释水完全时间为 1.575 h;聚丙烯酰胺^[20]等高分子吸水改良材料在蒸发 5 h 后仅持 42.54% 的水分。由此可见,蓄水陶土的释水较慢,持水性相对较好。

土壤入渗能力主要由土壤本身的物理特性决定^[16]。而蓄水陶土作为一种土壤改良材料,可以通过改变土体结构,使土水势在蓄水陶土与土壤交界面发生变化,从而促进土壤水分入渗。入渗开始,上覆蓄水陶土层后由于蓄水陶土孔隙较大,且颗粒间空隙

大,水分快速穿过大孔隙系统,并沿优先路径入渗,进而引发优先流现象^[23],导致初始入渗速率较大;随着入渗的进行,水分进入土壤层后,基质势减小,入渗速率降低,入渗曲线整体呈先陡峭后平缓的趋势变化。不同土壤改良材料会影响土壤水分入渗,本研究中上覆蓄水陶土层处理的累积入渗量较 CK 处理增加 40%~60%。前人^[24]研究发现,砾石粒径的增大使累积入渗量呈线性增加趋势,土壤水分入渗性能随砂子粒径的增大而增强,腐殖酸^[25]可增加累积入渗量 10%左右,这与本文研究结论一致,但促进土壤入渗的机制却有所差异。砂子能够稀释黏粒含量,增加导水率,促进土壤水分入渗;砾石能够改变土壤孔隙度和表面积等物理性状,从而影响土壤水分入渗,但砂砾石本身不具有吸水特性;有机物能增加土壤的团聚体及土壤表面粗糙度,使土壤颗粒和孔隙结构保持稳定,进而提高土壤入渗率。蓄水陶土的空隙和孔隙的快速蓄持水的作用,单位时间内进入蓄水陶土层的水分流动通量增大,使蓄水陶土层形成蓄水层,这对于其下部的土壤而言,增大了入渗水头,促进了土壤水分的入渗。

蒸发阻力是反映土壤水汽由蒸发面向大气传输难易程度的重要指标^[26]。本研究中 CK 处理、20~30,5 mm 粒径的蓄水陶土的土壤累积蒸发量随时间的变化呈现明显的阶段性,1~3 天土壤蒸发速率较大,累积蒸发量线性增加;4~7 天蒸发速率降低,累积蒸发量缓慢增加。上覆 20~30,5 mm 粒径的蓄水陶土后,改变土壤导水能力的连续性,导致蒸发阻力增大,阻滞作用增强,从而切断土壤毛细管作用,显著降低水分蒸发。蔡永坤等^[27]研究发现,砂石覆盖能有效抑制土壤累积蒸发量的增长,粒径越小,其抑制效果越明显,这与本文研究结论不一致,原因可能是该研究只有 2 种粒径(10,5 mm),并未研究更小粒径(<2 mm)时的累积蒸发量,砂石覆盖抑制蒸发的原因主要是增加土壤的渗透能力,降低土壤蒸发。蓄水陶土对土壤蒸发量的影响主要源于蓄水陶土阻隔到达土壤表面的热能,降低土壤所受到的热辐射^[28],从而抑制土壤蒸发。

4 结论

(1)20~30,5,2 mm 粒径的蓄水陶土分别在 40,8,6 s 时达到饱和,吸水倍率在 30%~90%;而不同粒径的蓄水陶土释水速率较为缓慢,蓄水陶土持水能力较好。

(2)上覆蓄水陶土层可显著促进土壤水分入渗能力,使湿润锋运移距离与累积入渗量明显增大,入渗

结束时湿润锋最大运移距离达到 25 cm(B),较 CK 增加 64.47%;累积入渗量较 CK 处理增加 40%~60%,且随着蓄水陶土粒径增大,促进作用逐渐增强,湿润锋与时间呈幂函数正相关。

(3)连续蒸发 7 天时,上覆不同粒径的蓄水陶土层均可抑制土壤水分蒸发,5 mm 粒径的蓄水陶土累积蒸发量最小,较 CK 处理减小 67.23%,抑制效果最明显。

(4)上覆蓄水陶土层可显著提高 10—25 cm 土层水分含量,均可较 CK 提高 4~5 倍的土壤含水率。当蓄水陶土粒径为 5 mm 时,蓄水陶土的持水作用显著增强,持水能力优于其他处理。

综上所述,蓄水陶土吸水较快,释水较慢,持水性较好,且上覆蓄水陶土层可加快入渗、减少蒸发、提高土壤水分蓄持能力,蓄水陶土粒径为 5 mm 时持水性最佳。该研究拓宽蓄水陶土的使用情景,能为黄土高原坡面水土流失治理提供依据。

参考文献:

- [1] 水利部.中国水土保持公报(2020 年)[R].北京:中华人民共和国水利部,2021.
- [2] 王承书,杨晓楠,孙文义,等.极端暴雨条件下黄土丘陵沟壑区土壤蓄水能力和入渗规律[J].土壤学报.2020,57(2):296-306.
- [3] 宋日权,褚贵新,冶军,等.掺砂对土壤水分入渗和蒸发影响的室内试验[J].农业工程学报,2010,26(增刊 1):109-114.
- [4] 王慧芳,邵明安.含碎石土壤水分入渗试验研究[J].水科学进展,2006,17(5):604-609.
- [5] Zhang S N, Wang Y, Sun L T, et al. Organic mulching positively regulates the soil microbial communities and ecosystem functions in tea plantation[J].BMC Microbiology,2020,20(1):1-13.
- [6] 杨永秦,潘英华,张振华,等.聚丙烯酰胺对土壤保蓄水性能及盐分淋溶的影响[J].鲁东大学学报(自然科学版),2022,38(1):18-26,42.
- [7] Ibrahim H M, Alghamdi A G. Effect of the particle size of clinoptilolite zeolite on water content and soil water storage in a loamy sand soil[J].Water,2021,13:607-625.
- [8] 孙益权,王美艳,张龙,等.“泡沫砂”改良黏重黄壤孔隙结构的粒径效应[J].土壤,2020,52(3):597-602.
- [9] 黄化刚,刘世碧,班国军,等多孔改良剂对毕节烟区植烟土壤重金属铬镉铅的影响[J].土壤,2019,51(2):346-351.
- [10] 蓝剑强.蓄水陶土材料的制备、性能及其应用研究[D].北京:中国地质大学,2007.
- [11] 安黛宗,肖劲东,刘珩,等.柱状蓄水多孔发泡陶土块[P].湖北:CN2656409,2004-11-17.
- [12] 谭凌智,安黛宗,萧劲东.蓄水陶土对雨水面源污染物的吸

附性能研究[J].中国给水排水,2008,24(5):98-101.

[13] 蓝剑强,安黛宗,萧劲东.发泡陶土在城市绿化中的应用研究[J].广东建材,2007(1):10-11.

[14] 梁进秋,申彦波,胡丽琴,等.FY-4A 地表太阳入射辐射产品在山西高原的适用性研究[J].气象,2020,46(12):1575-1585.

[15] 郁丽萍.功能型复合高吸水树脂的制备及其性能研究[D].武汉:武汉理工大学,2018.

[16] 郭华,樊贵盛.考虑土壤结构变形的 Kostiakov 入渗模型参数非线性预报模型[J].节水灌溉,2015(12):11-15.

[17] 侯党员.空气—沙子热交换器传热特性的实验研究[D].北京:华北电力大学,2021.

[18] 陈超萍,乔丽芳,韩阳,等.景观环境常用有机地表覆盖物的吸水性能研究[J].中国园林,2020,36(11):79-83.

[19] 杨静静,王秀峰,魏珉,等.保水剂吸水、释水及吸肥特性研究[J].山东农业大学学报(自然科学版),2016,47(5):696-700.

[20] 姜雄,铁生年,膨润土/聚丙烯酰胺复合吸水保水材料的制备及性能研究[J].硅酸盐通报,2014,33(4):731-735.

[21] 马文博.不同用量保水剂对玉米生育性状、产量与土壤性质的影响[D].哈尔滨:东北农业大学,2021.

[22] 王立宁,陈振,张增志.发泡剂对矿渣地质聚合物气孔结构及吸水性的影响[J].硅酸盐通报,2020,39(7):2085-2091.

[23] 曹丹妮,邸涵悦,郭忠录,等.演替梯度下土壤优先流特征及影响因素[J].水土保持研究,2021,28(2):99-107.

[24] 吕文聪,邱阳,谢忠奎,等.砾石覆盖粒径对土壤入渗过程的影响[J].水土保持研究,2021,28(6):46-51.

[25] 李晓菊,单鱼洋,王全九,等.腐殖酸对滨海盐碱土水盐运移特征的影响[J].水土保持学报,2020,34(6):288-293.

[26] 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.

[27] 蔡永坤,李毅,冯浩.不同砂石覆盖度和粒径对土壤水分蒸发的影响[J].水土保持学报,2014,28(6):273-277,297.

[28] Edward C, Melamie L, Andrea V, et al. Obstacles, interfacial forms, and turbulence: A numerical analysis of soil-water evaporation across different interfaces [J]. Transport in Porous Media, 2020, 134(2):275-301.

(上接第 100 页)

[11] 中华人民共和国水利部.SL 419—2007 水土保持试验规程[S].北京:北京科文图书业信息技术有限公司,2008:5-9.

[12] 中华人民共和国水利部.GB/T 15774—2008 水土保持综合治理效益计算方法[S].北京:中国标准出版社,2009:11-13.

[13] 李新荣,谭会娟,回嵘,等.中国荒漠与沙地生物土壤结皮研究[J].科学通报,2018,63(23):2320-2334.

[14] 孙丽丽,查轩,黄少燕,等.花岗岩红壤区不同治理模式土壤抗冲性因素试验[J].水土保持学报,2019,33(5):34-40,49.

[15] 杨凯,赵军,赵允格,等.生物结皮坡面不同降雨历时的产流特征[J].农业工程学报,2019,35(23):135-141.

[16] 易婷,张光辉,王兵,等.退耕草地近地表层特征对坡面流流速的影响[J].山地学报,2015,33(4):434-440.

[17] 吉静怡,赵允格,杨凯,等.黄土丘陵区生物结皮坡面产流产沙与其分布格局的关联[J].生态学报,2021,41(4):1381-1390.

[18] 冉茂勇,赵允格,刘玉兰.黄土丘陵区不同盖度生物结皮土壤抗冲性研究[J].中国水土保持科学,2011,12(12):43-45,67.

[19] Rey A, Carrascal L M, Báez G G, et al. Impact of climate and land degradation on soil carbon fluxes in dry semiarid grasslands in SE Spain[J]. Plant and Soil, 2021,461(1/2):1-17.

[20] 许欢欢,张宝琦,汪建芳,等.黄土高原典型生物结皮对坡面产流产沙过程的影响[J].水土保持通报,2020,40(6):8-13.

[21] 张冠华,易亮,丁文峰,等.三峡库区生物结皮对土壤分离过程的影响及其机制[J].土壤,2021,53(3):630-639.

[22] 高丽倩,赵允格,秦宁强,等.黄土丘陵区生物结皮对土壤蚀性的影响[J].应用生态学报,2013,24(1):105-112.