

砾石覆盖粒径对土壤入渗过程的影响

吕文聪^{1,2}, 邱阳¹, 谢忠奎¹, 王新平¹, 王亚军¹

(1.中国科学院 西北生态环境资源研究院, 兰州 730030; 2.中国科学院大学 中丹学院, 北京 100049)

摘要:为了研究不同砾石覆盖粒径对土壤入渗过程的影响,选取一维垂直定水头法,进行了室内土柱模拟试验。试验设置 5 个处理:等效粒径为 8.28,16.38,26.36,38.39 mm 的砾石覆盖和无覆盖作为对照。结果表明:砾石覆盖改善了土壤水分入渗性能,湿润锋的运移深度和累积入渗总量明显增加。8.28,16.38,26.36,38.39 mm 粒径砾石覆盖处理入渗总量分别增加了 0.08,0.11,0.18,0.25 倍,且入渗总量随砾石粒径的增大呈线性增加趋势。同时,砾石覆盖改变了土壤水分入渗速率,随着砾石粒径增大,土壤初始入渗率迅速增长,但稳定入渗率增长比较缓慢。8.28,16.38,26.36,38.39 mm 粒径砾石覆盖处理初始入渗率分别显著增加了 0.6,1.01,1.33,1.81 倍($p<0.05$);稳定入渗率分别增加了 0.07,0.08,0.16,0.18 倍。与 Horton 和 Philip 入渗模型相比,Kostiakov 模型可以更好地反映不同粒径砾石覆盖土壤水分入渗过程。总体来看,砾石覆盖显著改善了土壤入渗状况,且大粒径砾石覆盖土壤水分入渗效果最佳。因此,建议在干旱和半干旱区优先选择较大粒径砾石覆盖作为农业水保措施。

关键词:砾石覆盖; 土壤水分; 入渗; 累积入渗量

中图分类号:S152.7

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)06-0046-06

Effects of Mulch Gravels with Different Sizes on the Process of Water Infiltration

LÜ Wencong^{1,2}, QIU Yang¹, XIE Zhongkui¹, WANG Xinping¹, WANG Yajun¹

(1.Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences,

Lanzhou 730030, China; 2.Sino-Danish College, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to study the effect of mulch of gravels with different sizes on the soil infiltration process, an one-dimensional vertical constant head method was selected to conduct indoor soil column simulation experiments. The following five treatments were investigated: 8.28 mm, 16.38 mm, 26.36 mm, 38.39 mm equivalent particle-sized gravel mulch and no gravel mulch as a control (CK). It was found that gravel mulch improved the soil water infiltration performance, and the migration depth and total infiltration of the wet front increased significantly. The total infiltration of 8.28 mm, 16.38 mm, 26.36 mm, 38.39 mm particle-sized gravel mulching treatment increased by 0.08, 0.11, 0.18, and 0.25 times, respectively, and the total infiltration increased linearly with the increase of the particle-sized of the gravel. At the same time, gravel mulch changed the soil water infiltration rate. As the size of the gravel increased, the initial soil infiltration rate increased rapidly, but the stable infiltration rate increased slowly. The initial infiltration rates of the 8.28 mm, 16.38 mm, 26.36 mm, 38.39 mm particle-sized gravel mulching treatments increased significantly by 0.6 times, 1.01 times, 1.33 times, and 1.81 times ($p<0.05$); the stable infiltration rates increased by 0.07 times, 0.08 times, 0.16 times, and 0.18 times, respectively. Compared with the Horton and Philip infiltration models, the Kostiakov model could better reflect the soil moisture infiltration process of mulch of gravels with different particle sizes. In general, gravel mulch can significantly improve soil infiltration, and large-sized gravel mulch has the best effect on soil moisture infiltration. Therefore, it is recommended to choose the large-sized gravel as an agricultural water conservation measure in arid and semi-arid areas.

Keywords: gravel mulch; soil moisture; infiltration; cumulative infiltration

收稿日期:2020-07-06

修回日期:2020-12-20

资助项目:国家自然科学基金(41501043);中国科学院“西部青年学者”B类(Y629931)

第一作者:吕文聪(1996—),男,河南驻马店人,在读博士,研究方向为干旱区农业生态学。E-mail:1255844578@qq.com

通信作者:邱阳(1986—),男,河南驻马店人,博士,副研究员,主要从事干旱区农业生态学研究。E-mail:qiuyang@lzb.ac.cn

土壤入渗是指水分从土壤表层向土壤内部渗透的过程,是土壤水分运动过程中的一个重要阶段。我国西北黄土高原地区生态环境极其脆弱,水土流失严重,每年水土流失量为 4 400~7 600 t/km²^[1]。黄土高原水土流失常伴随着土壤养分的大量流失,破坏了整个土壤微环境,对土壤质量产生不利影响^[2]。在这种条件下,当地居民提出了砾石覆盖这种独具旱作农业特色的耕作方法,即用不同粒径的砾石和粗砂覆盖在农田土壤表面,可以减少土壤蒸发和地表径流,提高水分利用效率,为植物生长提供更适宜的环境,在旱作农业生产中得到了广泛和长期的应用^[3-7]。《甘肃农村年鉴 2017》记载,甘肃境内的砂田面积在 2016 年底已达到 7.2 万 hm²,约是 1949 年的 2.4 倍^[8]。

储存在土壤中的水分可通过毛细管孔隙上升到地表从而蒸发^[9]。砾石覆盖土壤表面后,建立起一道天然屏障,防止土壤表面和空气的接触,有效抑制土壤水分蒸发。砾石覆盖也可以使土壤免受雨滴的溅蚀,从而防止土壤表面密实^[10],进而保持和提高土壤入渗性能;砂石也会嵌入土壤,减少入渗^[11],使覆盖土壤的入渗过程较裸土更为复杂。砾石覆盖主要通过影响地表粗糙度、有效孔隙数量、过水断面大小和土壤水分运移通道等土壤物理特征来改变土壤入渗^[12-14]。具体影响则与砾石粒径、覆盖厚度、覆盖位置、覆盖度及土壤砾石含量有关^[15]。党宏宇等^[16]采用一维垂直定水头法模拟了不同煤矸石覆盖厚度及位置条件下土壤的入渗规律,结果表明当煤矸石位于上层时,稳定入渗率、平均入渗率和累积入渗量随煤矸石厚度的增加呈增大趋势;煤矸石位于中层时,土壤水分的入渗过程受到抑制;煤矸石位于下层时,煤矸石对土壤水分入渗过程影响较小。白一茹等^[17]通过室内土柱模拟试验研究砾石覆盖层厚度对土壤水分入渗的影响,发现砾石覆盖显著提高了土壤入渗速率,且入渗速率和累积入渗量均随着覆盖层厚度的增大而增大。王小燕等^[18]通过人工模拟降雨试验研究了坡耕地 5 个不同砾石覆盖度(0%,11%,20%,33%和 42%)对土壤入渗过程的影响,指出稳定入渗速率及稳定入渗系数与砾石覆盖度呈正相关。李雪垠等^[19]指出在同一粒径砾石覆盖条件下,土壤的初始入渗率、平均入渗率、稳定入渗率和累积入渗量都随砾石含量的增大而降低。但是,关于土壤表面覆盖不同粒径砾石对土壤入渗变化规律的研究分析缺乏。研究砾石粒径对覆盖土壤入渗的影响对覆盖土壤耕作和管理具有十分重要的意义。因此,我们在前人研究的基础上,利用室内土柱模拟试验研究分析不同粒径砾石覆盖对土壤湿润锋运移深度、初始入渗率、稳定入渗率和入渗

总量的影响,探究砾石粒径与入渗总量之间的关系,以为砾石覆盖土壤的水量平衡提供科学依据,为干旱区农业保水措施的改善提供理论支持。

1 研究区概况

试验在中国科学院西北生态环境资源研究院皋兰站进行(甘肃省兰州市皋兰县,北纬 36°13′,东经 103°47′)。皋兰站海拔高度约为 1 800 m,位于黄土高原和内陆侵蚀高原之间的过渡带,且过渡带位于水蚀和风蚀系统之间的交错区域。皋兰县年平均降水量为 263 mm,降水年内分布不均,变化较大,70%的降水集中分布在每年的 6—9 月份。该区域的年平均温度为 7.1℃,月平均最低温度为-9.1℃(1 月),月平均最高温度为 20.7℃(7 月),≥0℃的年积温为 3 324.5℃。该区域的平均日照时数为 2 768 h。土壤为在黄土母质上发育的灰钙土,在中国土壤系统分类中为筒育雏形干旱土。土壤有机质含量 1.0%~1.1%,全氮 0.07%~0.09%,全钾 1.98%~2.10%,速效磷 7~10 mg/kg,速效钾 120~160 mg/kg。机械组成中粉砂粒占 60%左右,物理性黏粒只占 24%~35%,0—150 cm 土壤容重 1.20 g/cm³。

2 材料与方法

2.1 供试样品

在皋兰站黄土坡地取试验用土,过 2 mm 筛去除植物残体等杂质,然后在自然状态下风干,待用。试验所用砾石取自于黄河河床沉积物,人工挑选出具有相近 L 、 I 和 S 值的砾石(L 代表最长的砾石轴线长度, I 代表中间的砾石轴线长度, S 代表最短的砾石轴线长度),按照 5~10 mm,10~20 mm,20~30 mm 和 30~50 mm 的砾石尺寸分布将其分成 A、B、C、D 共 4 种类型(表 1)。从每个砾石类型中取出 100 个砾石,用电子游标卡尺测量砾石 L 、 I 和 S 的值。然后根据公式 $D_i = \sqrt[3]{L \cdot I \cdot S}$ ^[20],计算出砾石的等效粒径,使用等效粒径(D_i)的概念来区分不同类别的砾石,方便拟合砾石粒径与总入渗量之间的函数关系。

表 1 所选的砾石粒径分布特征

砾石类型	砾石尺寸分布	等效粒径 D_i /mm
A	5 mm≤ D_i ≤10 mm	8.28±0.136
B	10 mm≤ D_i ≤20 mm	16.38±0.313
C	20 mm≤ D_i ≤30 mm	26.36±0.356
D	30 mm≤ D_i ≤50 mm	38.39±0.513

注:表中数据为平均值±标准误。

2.2 试验装置

土壤入渗试验装置由圆形土柱、供水装置(马氏

瓶)、夯土器等组成。土柱为有机玻璃柱,厚度为 1 cm,内径为 16 cm,高度为 100 cm,其最底层散布若干个直径为 2 mm 的细孔用于排水。马氏瓶为内径 16 cm,高 100 cm,厚 1 cm 的有机玻璃柱,为降低积水水头变化对入渗过程的影响,所有处理的供水水头均控制在 4~5 cm。

2.3 试验方法

2019 年 12 月在试验室内进行不同粒径砾石覆盖土壤的入渗试验,试验方法采用一维垂直定水头法。在土柱最底层覆盖 5 cm 厚 2~5 mm 粒径的砾石并在其上盖一层滤纸以防土壤颗粒落入。将风干的土样按照 1.3 g/cm³ 的容重分层(每层 5 cm)装入土柱中,为防止分层,用毛刷将土层间打毛。装填到 45 cm 后,将等效粒径分别为 8.28,16.38,26.36,38.39 mm 的砾石按 7 cm 厚度覆盖在土壤表层,共 4 个处理,其中无砾石覆盖为对照(CK)。试验设 3 个重复。试验结束后,取 3 个重复的平均值进行数据分析和作图。

试验开始后,同时读取马氏瓶中水位高度及土柱中湿润锋运移深度,前 5 min,每 1 min 记录 1 次;5~30 min 内,每 5 min 记录 1 次;30~120 min 内,每 10 min 记录 1 次;120 min 后每 30 min 记录 1 次。湿润锋运移深度选取土柱圆筒四周可见湿润区的最远位置,直到湿润锋运移至土柱最底层为止。

2.4 数据处理

初始入渗率取计时 1 min 时的入渗速率。稳定入渗率取 50~120 min 内记录的 8 个人渗率的平均值。用 SPSS 20.0 进行数据分析。利用 Origin Lab 2018 绘制相关图表、拟合 Kostakov, Horton 及 Philip 入渗模型。统计变量均用均值±标准误差(SE)表示。使用单因素方差分析(ANOVA)和 LSD 显著差异检验在 $p<0.05$ (LSD 0.05) 水平下分析数据。

3 结果与分析

3.1 砾石覆盖粒径对湿润锋运移的影响

图 1 为不同粒径砾石覆盖土壤的湿润锋深度随入渗时间的变化过程。由图 1 可知,覆盖砾石后土壤湿润锋的运移特征发生明显变化,且不同砾石粒径处理之间湿润锋深度随时间的变化特征有所差异。所用处理湿润锋向下移动的深度均随时间而逐渐增加,但向下移动的速度都在减小。与 CK 相比,砾石覆盖明显增加了湿润锋推进速度,且湿润锋的推进速度随砾石粒径的增加而明显加快。以入渗历时 30 min 为例,砾石覆盖粒径 8.28,16.38,26.36, 38.39 mm 的湿润锋运移距离分别是 21.9,22.3,23.85,24.43 cm,均高于 CK 的运移距离 17.96 cm。可知随着砾石覆盖

粒径的增加,湿润锋运移速率明显加快,即砾石覆盖粒径与湿润锋运移深度呈正相关。

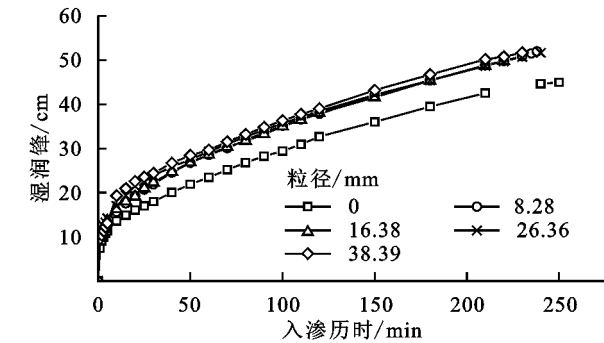


图 1 不同粒径砾石覆盖湿润锋随时间的变化过程

为了进一步研究砾石粒径对湿润锋运移的影响,根据湿润锋随时间的变化趋势,采用幂函数 $F=at^b$ 对湿润锋运移的变化过程进行拟合。式中: F 为湿润锋运移深度(cm); t 为入渗历时(min); a 、 b 为经验系数。拟合结果见表 2。其中 a 表征计时 1 min 后的湿润锋运移深度; b 表征湿润锋进程的衰减程度。表 2 中的拟合结果说明幂函数可以很好地拟合不同粒径砾石覆盖下土壤的湿润锋运移特征,各处理的决定系数(R^2)均大于 0.986。在湿润锋运移深度随时间变化的过程中,随砾石覆盖粒径的增大, a 呈上升趋势, b 为下降趋势,即初始湿润锋运移深度增大,衰减速率减缓。

表 2 幂函数拟合不同粒径砾石覆盖湿润锋随时间变化过程的结果

砾石粒径/mm	a	b	R^2	Sig.
0(CK)	5.065	0.391	0.986	0
8.28	6.317	0.379	0.991	0
16.38	6.835	0.360	0.989	0
26.36	7.441	0.348	0.992	0
38.39	7.564	0.348	0.992	0

注:Sig.为显著性水平。

3.2 砾石覆盖粒径对土壤水分入渗性能的影响

图 2 显示了不同粒径砾石覆盖土壤入渗率随时间的变化过程。土壤入渗初期,入渗速率迅速下降,随着入渗时间的延长,入渗率下降的速度逐渐减缓,各处理土壤都在 20~30 min 左右趋于稳定,达到稳定入渗阶段。土壤水分入渗过程可以分为入渗率迅速下降、入渗率下降速度逐渐减缓和入渗率趋于稳定 3 个阶段。

初始入渗率、稳定入渗率和入渗总量是土壤水分入渗的重要特性。由表 3 方差分析结果可知,砾石粒径对初始入渗率有显著影响。砾石覆盖粒径为 8.28, 16.38,26.36,38.39 mm 的初始入渗率相对于 CK 分别显著增加了 0.6,1.01,1.33,1.81 倍($p<0.05$)。同

时也发现,砾石粒径对稳定入渗率和入渗总量有一定的影响。与 CK 相比,砾石覆盖粒径为 8.28,16.38,26.36,38.39 mm 的稳定入渗率分别增加了 0.07,0.08,0.16,0.18 倍,入渗总量分别增加了 0.08,0.11,0.18,0.25 倍。

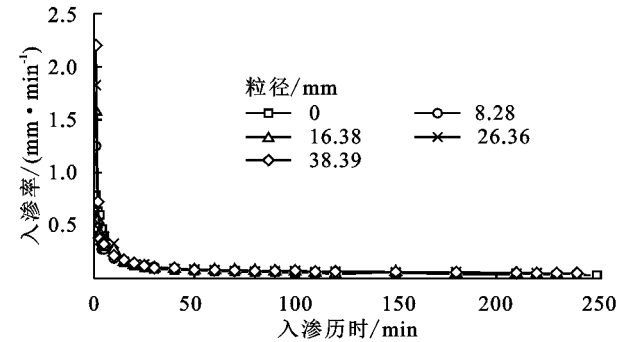


图 2 不同粒径砾石覆盖入渗率随时间的变化特征

表 3 不同粒径砾石覆盖土壤的入渗特征

砾石 粒径/mm	初始入渗率/ (cm·min ⁻¹)	稳定入渗率/ (cm·min ⁻¹)	入渗总量/ cm
0(CK)	0.78±0.0726e	0.0627±0.0032b	17.33±0.3756c
8.28	1.25±0.0289d	0.0669±0.0004ab	18.68±0.1299bc
16.38	1.58±0.0144c	0.0675±0.0036ab	19.18±0.3897bc
26.36	1.83±0.0144b	0.0728±0.0034ab	20.45±0.6928ab
38.39	2.20±0.0577a	0.0738±0.0043a	21.68±1.4578a

注:不同字母代表在 $p<0.05$ 水平上差异显著。

由表 3 和图 3 看出,砾石覆盖下,入渗总量从小到大为 17.33 cm(CK),18.68 cm(粒径 8.28 m),19.18 cm(粒径 16.38 mm),20.45 cm(粒径 26.36 mm)和 21.68 cm(粒径 38.39 mm)。与 CK 相比,覆盖砾石粒径 26.36 mm 和 38.39 mm 显著增加了土壤入渗总量,且这 2 个砾石粒径在曲线上重叠较多,说明较大粒径砾石对土壤水分入渗的促进程度相似。将 4 种不同砾石粒径和入渗总量建立关系,见图 4。从图 4 可以看出,随着砾石粒径的增大其土壤入渗总量以直线形式上升,变化幅度为 4.34 cm,相关方程为: $y=0.103x+17.69(R^2=0.983)$,即入渗总量与覆盖砾石粒径呈正相关关系。

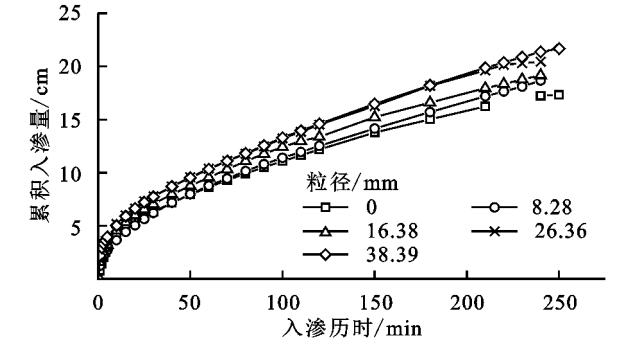


图 3 不同粒径砾石覆盖累积入渗量随时间的变化过程

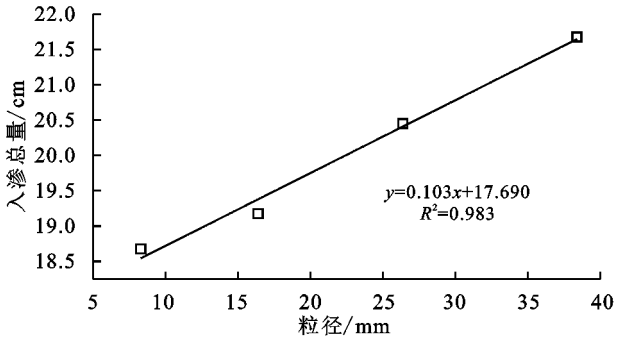


图 4 砾石粒径与入渗总量的关系

3.3 土壤入渗过程模型分析

为了进一步研究覆盖砾石粒径对土壤水分入渗过程的影响,采用 Kostiakov,Horton 及 Philip 入渗模型对不同粒径砾石覆盖的土壤水分入渗速率随时间变化过程进行拟合分析,其表达式如下

Kostiakov 模型:

$$F(t)=at^{-\alpha} \tag{1}$$

式中: $F(t)$ 为入渗速率(cm/min); t 为入渗历时(min); a,α 为根据试验求得的模型参数。

Horton 模型:

$$F(t)=f_c+(f_1-f_c)e^{-bt} \tag{2}$$

式中: $F(t)$ 为入渗速率(cm/min); t 为入渗历时(min); f_1 为初始入渗率(cm/min); f_c 为稳定入渗率(cm/min); b 为试验求得的参数。

Philip 模型:

$$F(t)=0.5St^{-0.5}+A \tag{3}$$

式中: $F(t)$ 为入渗速率(cm/min); t 为入渗历时(min); S 为吸渗率($\text{cm}/t^{0.5}$); A 为稳定入渗率(cm/min)。

表 4 显示各土壤入渗模型的拟合结果。在 Kostiakov 模型的拟合结果中,参数 a,α 的值均随砾石粒径的增大而增大。 a 值增大,说明入渗初期土壤入渗曲线的斜率增大,瞬时入渗率衰减加快, α 值增大,说明随着砾石粒径的增加,入渗率衰减速度增加。这与图 2 中土壤入渗率随入渗时间的变化趋势一致,很好地反映了砾石覆盖对土壤入渗过程的影响。Kostiakov 模型的决定系数 R^2 最小为 0.921,最大为 0.966,其拟合效果最好。在 Horton 模型的拟合结果中, f_1 和 f_c 分别代表初始入渗率和稳定入渗率,均随砾石粒径的增大而增大,这与表 3 的结果一致。由表 4 可知, f_1 的模拟值与实际值相差较大,在 0.11~3.88 cm/min ,但是 f_c 的模拟值和实际值相差较小,仅为 0.001~0.042 cm/min 。Horton 模型的决定系数 R^2 最小为 0.929,最大为 0.990,拟合结果较好。Philip 模型的拟合结果显示,各处理中土壤稳定入渗率 A 均为负值,且随着砾石粒径的增加而增大;吸渗率 S 也随砾石粒径的增大而增加,吸渗率在一定程度上能反

映土壤初始入渗率的大小,说明渗透早期的土壤入渗能力随覆盖粒径的增大而增大。这与表 3 的结果一致,S 值与土壤实际初始入渗率相差 0.76~1.05 cm/min,稳定入渗率 A 与实际值相差 0.002~0.052 cm/min。Philip

模型的决定系数 R^2 最小为 0.761,最大为 0.968,拟合效果较差。综上可知,Horton 模型和 Philip 模型虽然具有一定的物理意义,但在本次土壤水分入渗试验中没有 Kostiakov 模型的适用性好。

表 4 不同粒径砾石覆盖土壤水分入渗模型的拟合结果

砾石 粒径/mm	Kostiakov 模型参数				Horton 模型参数					Philip 模型参数			
	a	α	R^2	Sig.	f_1	f_c	b	R^2	Sig.	S	A	R^2	Sig.
0(CK)	0.876	0.559	0.961	0	0.889	0.062	0.164	0.990	0	1.812	-0.038	0.968	0
8.28	1.172	0.884	0.956	0	2.367	0.087	0.708	0.955	0	2.007	-0.063	0.871	0
16.38	1.487	1.010	0.953	0	3.345	0.097	0.822	0.940	0	2.488	-0.100	0.841	0
26.36	1.719	1.112	0.929	0	4.931	0.115	1.057	0.921	0	2.779	-0.116	0.799	0
38.39	2.155	1.362	0.966	0	6.082	0.102	1.058	0.975	0	3.249	-0.154	0.761	0

4 讨论

作一维垂向运动的湿润锋运移深度均随着入渗时间延长而增加,且入渗初期其运移速率较快,而后运移速率逐渐减慢趋于稳定状态,这与吉恒莹等^[21]的研究结果一致。覆盖砾石后,随着砾石粒径的增大,初始湿润锋的运移距离增大,衰减速度减缓。这是由于随着砾石粒径的增大,覆盖层大孔隙数量增加,因而提高了导水率^[16],但随着入渗深度的增加,覆盖层对入渗的影响逐渐变弱^[11]。

与 CK 相比,砾石覆盖下初始入渗率、稳定入渗率和入渗总量随着砾石粒径增加都呈上升趋势,这与周蓓蓓等^[22]的研究结果相似。砾石覆盖显著提高了土壤初始入渗率,且初始入渗率随着砾石粒径的增加而迅速增加,这主要是由于随着砾石粒径的增加,覆盖层的大孔隙数量增多,水流通渠道好,填满覆盖层孔隙空间所需水分增多。入渗过程中,大孔隙及其传导孔隙是水流的主要通道,土壤中大尺度孔隙的数量和分布直接影响着水分的传输能力和运动状态^[23]。随后,土壤入渗率迅速下降,主要是因为入渗初期水分顺着砾石孔隙快速下渗,导致土体快速湿润,土壤团聚体破碎,堵塞了土壤孔隙结构,阻碍了渗水^[24]。

最终,土壤入渗率逐渐趋于稳定,达到稳定入渗状态。砾石覆盖提高了稳定入渗率,但稳定入渗率随砾石粒径的增加缓慢增大。导致稳定入渗率增速缓慢的原因有两个:一方面,随着入渗深度的增加,覆盖层对入渗的影响逐渐变小^[11];另一方面,由于砾石自身重力的压实,随着砾石粒径增大,土壤容重增大^[25],随着容重增大,土壤孔隙结构变差,土壤透气性、饱和导水率及导水能力迅速下降^[26],导致稳定入渗率增加缓慢,这与 Kostiakov 模型的结果一致:稳定入渗率衰减速度随砾石粒径的增大而增加。

砾石覆盖也提高了土壤水分入渗总量,且入渗总量随砾石粒径的增大呈线性增加趋势。出现这种现

象的原因是:随着砾石粒径的增大,大孔隙数量增多,水流通渠道好,土壤的透水性增加。余海龙等^[27]指出砾石覆盖能够增加大孔隙,促进水分入渗,加快壤中流的发生,改善土壤水文循环过程。由此可见,砾石覆盖可以改良土壤孔隙结构,增加透水性,提高土壤导水能力,在旱作农业水保措施应用中具有很大优势。

Philip 模型的拟合结果中稳定入渗率 A 均为负值,管瑶^[28]和郑健^[29]等在研究中也发现了类似的结果。这可能与 Philip 模型的衰减系数固定为-0.5 有关,-0.5 的衰减系数限制了 Philip 模型只能适用于某些特定土壤^[28]。土壤入渗模型拟合的结果表明:Kostiakov 模型对不同粒径砾石覆盖土壤水分入渗的影响拟合最好;Horton 模型的拟合效果较好;Philip 模型的拟合效果最差。周蓓蓓^[22]和党宏宇^[12]等的研究结果也表明 Kostiakov 模型能够很好地反映砾石覆盖土壤的水分入渗变化过程。本次研究虽然可以使我们了解砾石粒径对土壤水分入渗性能的影响,但是室内土柱模拟试验与研究区实际情况存在一定差异,因此需要在野外建立径流小区进行模拟降雨试验来进一步探讨土壤水分入渗过程。

5 结论

(1) 湿润锋运移距离随时间增长呈幂函数增长,且单位时间内湿润锋运移距离随覆盖砾石粒径的增大而增加。初始入渗率和稳定入渗率均随覆盖砾石粒径的增大呈上升趋势。砾石覆盖粒径对初始入渗率的影响显著,但对稳定入渗率的影响不显著。38.39 mm 粒径砾石覆盖的初始入渗率和稳定入渗率最大。

(2) 随覆盖砾石粒径的增加入渗总量呈上升趋势,且 26.36 mm 和 38.39 mm 粒径砾石覆盖的累积入渗量随时间的变化曲线差异不大,但都明显高于其他处理。Kostiakov 入渗模型与 Horton 和 Philip 模型相比,Kostiakov 入渗模型可以更好地反映砾石覆盖土壤入渗率的变化过程。

参考文献:

- [1] Cheng H, Zou X, Wu Y, et al. Morphology parameters of ephemeral gully in characteristics hillslopes on the Loess Plateau of China[J]. Soil & Tillage Research, 2007, 94(1): 4-14.
- [2] Chen L, Wang J, Wei W, et al. Effects of landscape restoration on soil water storage and water use in the Loess Plateau Region, China[J]. Forest Ecology & Management, 2010, 259(7): 1291-1298.
- [3] Wang Y J, Xie Z K, Malhi S S, et al. Effects of rainfall harvesting and mulching technologies on water use efficiency and crop yield in the semi-arid Loess Plateau, China[J]. Agricultural Water Management, 2009, 96(3): 374-382.
- [4] Yuan C P, Lei T W, Mao L L, et al. Soil surface evaporation processes under mulches of different sized gravel[J]. Catena, 2009, 78(2): 117-121.
- [5] Xie Z, Wang Y, Cheng G, et al. Particle-size effects on soil temperature, evaporation, water use efficiency and watermelon yield in fields mulched with gravel and sand in semi-arid Loess Plateau of northwest China[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(6): 917-923.
- [6] Ma Y J, Li X Y. Water accumulation in soil by gravel and sand mulches: Influence of textural composition and thickness of mulch layers[J]. Journal of Arid Environments, 2011, 75(5): 432-437.
- [7] Wang Y, Xie Z, Malhi S S, et al. Gravel-sand mulch thickness effects on soil temperature, evaporation, water use efficiency and yield of watermelon in semi-arid Loess Plateau, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(5): 261-265.
- [8] 陈年来, 刘东顺, 王晓巍, 等. 甘肃砂田的研究与发展[J]. 中国瓜菜, 2008(2): 29-31.
- [9] 时忠杰, 王彦辉, 于澎涛, 等. 六盘山森林土壤中的砾石对渗透性和蒸发的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(12): 6090-6098.
- [10] Nachtergaele J, Poesen J, van Wesemael B. Gravel mulching in vineyards of southern Switzerland[J]. Soil & Tillage Research, 1998, 46(1/2): 51-59.
- [11] 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(S1): 109-114.
- [12] 党宏宇, 陈洪松, 邵明安. 喀斯特地区不同层次土石混合介质对土壤水分入渗过程的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(8): 38-43.
- [13] 詹振芝, 黄炎和, 蒋芳市, 等. 砾石含量及粒径对崩岗崩积体渗透特性的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(3): 85-90.
- [14] 胡廷飞, 王辉, 胡传旺, 等. 砾石覆盖厚度对斥水土壤入渗特性的影响及模型优选[J]. 水土保持学报, 2019, 33(2): 17-22.
- [15] 符素华. 土壤中砾石存在对入渗影响研究进展[J]. 水土保持学报, 2005, 19(1): 171-175.
- [16] 党宏宇, 邵明安, 陈洪松, 等. 不同煤矸石厚度及位置对土壤水分入渗过程的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(3): 62-66.
- [17] 白一茹, 赵云鹏, 王幼奇, 等. 宁夏砂田不同砾石覆盖厚度土壤入渗过程及模型分析[J]. 水土保持学报, 2017, 31(4): 81-85.
- [18] 王小燕, 李朝霞, 蔡崇法. 砾石覆盖紫色土坡耕地水文过程[J]. 水科学进展, 2012, 23(1): 38-45.
- [19] 李雪垠, 李朝霞, 王天巍, 等. 紫色土中砾石夹层对土壤水分入渗的影响[J]. 水科学进展, 2016, 27(5): 662-669.
- [20] Yang Q, Xie Z, Wang Y, et al. Influence of gravel mulch stratum thickness and gravel grain size on evaporation resistance[J]. Journal of Hydrology, 2014, 519: 1908-1913.
- [21] 吉恒莹, 邵明安, 贾小旭. 水质对层状土壤入渗过程的影响[J]. 农业机械学报, 2016, 47(7): 183-188.
- [22] 周蓓蓓, 邵明安. 不同碎石含量及直径对土壤水分入渗过程的影响[J]. 土壤学报, 2007, 44(5): 35-41.
- [23] 吴军虎, 张铁钢, 赵伟, 等. 容重对不同有机质含量土壤水分入渗特性的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(3): 63-67.
- [24] 范云涛, 雷廷武, 蔡强国. 湿润速度和累积降雨对土壤表面结皮发育的影响[J]. 土壤学报, 2009, 46(5): 764-771.
- [25] Lü W C, Qiu Y, Xie Z K, et al. Gravel mulching effects on soil physicochemical properties and microbial community composition in the Loess Plateau, north-western China[J]. European Journal of Soil Biology, 2019, 94. DOI: 10.1016/j.ejsobi.2019.103115.
- [26] 王小彬, 蔡典雄, 高绪科, 等. 不同农业措施对土壤持水特征的影响及其保水作用[J]. 植物营养与肥料学报, 1996, 2(4): 297-304.
- [27] 余海龙, 黄菊莹. 砂田砾石覆盖对土壤大孔隙特征及其土壤水文过程的影响研究进展[J]. 水土保持研究, 2012, 19(4): 284-288.
- [28] 管瑶, 雷廷武, 刘芳芳, 等. 土壤点源入渗自动测量系统监测滴头下土壤湿润过程[J]. 农业工程学报, 2016, 32(14): 1-7.
- [29] 郑健, 张彦宁, 王燕, 等. 沼液穴灌入渗特征及 Philip 入渗模型拟合[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(1): 144-150.