

砾石覆盖厚度对斥水土壤入渗特性的影响及模型优选

胡廷飞, 王辉, 胡传旺, 何杏杰, 刘华涛

(湖南农业大学工学院, 长沙 410128)

摘要: 基于室内一维垂直入渗土柱试验, 研究砾石覆盖厚度(0, 3, 6, 9, 12 cm)对斥水土壤积水入渗及水分再分布的影响, 并利用不同入渗模型进行拟合。结果表明: 砾石覆盖显著增加斥水土壤湿润锋运移距离($p < 0.05$); 同一时段内, 各处理累积入渗量皆高于对照组($p < 0.05$), 斥水性红壤累积入渗量与砾石覆盖厚度呈正相关关系; 斥水性红壤初渗率与稳渗率随砾石覆盖厚度变化均可用指数函数来描述, 决定系数分别为 0.91 和 0.87, 砾石覆盖使得斥水性潮土初渗率与稳渗率增大, 其中稳渗率与砾石覆盖厚度呈二次函数关系, 决定系数为 0.78, 覆盖 6 cm 时稳渗率达到最大; 砾石覆盖明显提高斥水土壤剖面平均含水率, 斥水性红壤和潮土最大分别增长 180.8% 和 57.6%; 隔绝蒸发条件下, 再分布过程斥水土壤湿润体含水率表现为停渗时刻 > 再分布 1 天 > 再分布 3 天 > 再分布 7 天; Horton 模型对砾石覆盖斥水土壤入渗过程的拟合效果最好, 是分析和预测砾石覆盖斥水土壤水分入渗特征的适宜模型。

关键词: 斥水土壤; 砾石厚度; 入渗; 水分再分布; 入渗模型

中图分类号: S152.7⁺2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)02-0017-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2019.02.003

Effect of Thickness of Gravel Cover on Infiltration Characteristics of Water Repellent Soils and Its Model Optimization

HU Tingfei, WANG Hui, HU Chuanwang, HE Xinjie, LIU Huatao

(Department of Engineering, Hunan Agricultural University, Changsha 410128)

Abstract: Based on one-dimensional vertical infiltration experiments, we studied the effects of thickness of gravel (0, 3, 6, 9, 12 cm) on water infiltration and redistribution in water repellent soils with constant bulk density, and the infiltration process were simulated using different models. The results showed that the migration distance of the wetting fronts were increased significantly ($p < 0.05$). Within the same period, all the cumulative infiltrations, which were positively correlated with the thickness of gravel, were higher under gravel covered treatments than that of the control group ($p < 0.05$) in water repellent red soil. Both the stable infiltration rate and initial infiltration rate of the water repellent red soil could be described by exponential function with the thickness of gravel cover, and the coefficients of determination were 0.91 and 0.87 respectively. Compared with the control group, the gravel cover increased the stable infiltration rate and initial infiltration rate of water repellent tidal soil, the stable infiltration rate had a quadratic relationship with the thickness of gravel, the coefficient of determination was 0.78. The stable infiltration rate reached the maximum when the thickness of gravel was 6 cm. The water content in the section of water repellent soils was increased, with the largest increases of 180.8% and 57.6% respectively in red soil and tidal soil. Under the condition of isolated evaporation, the water contents of the upper layer in the water repellent soil under different thicknesses of gravel cover (above the wetting front) showed: stop infiltration > redistributed for 1 day > redistributed for 3 days > redistributed for 7 days. Horton infiltration model had the best fitting effect on water repellent soil infiltration under gravel cover, which made it suitable to analyze and predict the infiltration process in water repellent soils under gravel cover.

Keywords: water repellent soil; thickness of gravel; infiltration; water redistribution; infiltration model

农田砾石覆盖是一种古老的保护性耕作方式^[1],具有蓄水保墒、防止水土流失、增强水分入渗和促进作物生长的作用^[2-3]。当前有关砾石覆盖对土壤物理性质^[4-5]、地表水文^[6-7]及土壤侵蚀^[8-9]等方面的影响研究都取得较好的成果,研究者从砾石粒径^[10]、覆盖量^[11]、覆盖度^[12]以及砾石所处位置^[13]等方面进行深入的探讨。但研究对象多以亲水土壤为主,结果均表明砾石覆盖可以增强土壤水分入渗能力。斥水土壤中斥水性的存在导致土壤颗粒与水分子间产生相斥作用^[14],使得水分入渗、再分布以及蒸发过程均与亲水土壤明显不同^[15],并且影响到地表水文过程的诸多重要环节,包括抑制水分入渗、促进地表径流和侵蚀等^[16-17]。斥水土壤可以在各种气候背景、土壤类型和植被覆盖条件下广泛存在,世界各地均有关于土壤斥水性的报道^[15,18]。即使通常认为的亲水土壤,当干燥至低于某一临界含水率时,也会表现出一定的斥水性^[19]。国内近些年相继就不同质地、初始含水率以及斥水程度的斥水土壤入渗规律进行了研究^[20],但有关砾石覆盖对斥水土壤入渗过程的影响方面鲜见报道。因此,本文通过人工配置 2 种斥水土壤,采用一维垂直定水头入渗法分析砾石覆盖厚度对斥水土壤入渗过程的影响,揭示砾石覆盖斥水土壤入渗参数的变化规律,评价不同入渗模型对砾石覆盖斥水土壤的适用性,以期斥水土壤入渗模型及砾石覆盖更好地应用于生产实际和土壤改良等领域提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤与预处理

供试土壤分别取自湖南长沙(28°32′49″N,113°16′46″E)和湖南岳阳(29°17′55″N,112°43′42″E),主要土地利用方式为旱地。土样运回实验室,经自然风干、碾碎、过筛(2 mm)混合均匀后,利用比重计法测定土壤机械组成。红壤粒径<0.002,0.002~0.05,0.05~2 mm 的土壤颗粒占比(质量分数)分别为 30.10%,31.04%和 38.86%,潮土的土壤颗粒占比分别为 20.73%,43.53%和 35.75%。根据国际制土壤质地分级标准可知,红壤为壤质黏土,潮土为黏壤土。

采用刘畅等^[20]配置斥水土壤的方法,通过向潮土和红壤中添加斥水性材料(十八烷基伯胺)制成斥水土壤。根据 Doerr^[21]提出的滴水穿透时间(water drop penetration time,WDPT)法分类标准,预处理后,2 种土壤斥水程度等级均为弱斥水,红壤初始含水率为 5.40%,潮土初始含水率为 3.60%。

1.2 试验内容与方法

砾石覆盖斥水土壤水分入渗试验于 2018 年 4—

6 月在湖南农业大学灌溉排水工程实验室内进行,室温控制在 21℃。

试验土柱利用内直径 10 cm、高 50 cm 的有机玻璃管制成,玻璃管四周 15 cm 以下,每隔 5 cm 开 1 个直径为 1 cm 的圆形取样孔,便于取土测定土壤含水率,土柱设计装填高度 35 cm,设计容重 1.2 g/cm³。马氏瓶供水水头控制在 2 cm。

利用一维垂直定水头入渗法测定砾石覆盖下斥水土壤水分入渗过程。有机玻璃管底部填放滤网,防止土样流失,分层(5 cm)填装土壤至设计高度,自然沉降 24 h 后,将砾石按照 0(对照),3,6,9,12 cm 厚度覆盖到土壤表面,为方便作图和叙述,分别记作 CK、C3、C6、C9 和 C12。砾石均为光滑的椭圆形硬质鹅卵石,粒径为 9~16 mm。试验过程中按先密后疏的时间间隔观测马氏瓶读数与湿润锋运移距离,每次读取土柱上 8 个湿润锋点,取平均值作为湿润锋运移距离。当入渗时间超过 720 min 或湿润锋垂直运移至土柱高度 2/3 时停止供水并迅速吸干土柱表层积水,使用土钻从预留的取样孔从下往上取土,采用薄膜覆盖土柱防止蒸发并将取土孔封闭。1,3,7 天后从土柱另外三侧取土,以便研究水分再分布规律。每种试验处理进行 3 次重复。

1.3 入渗模型选择

参考前人^[22]的研究成果,本研究选用 Philip、Kostiakov 和 Horton 模型对试验数据进行拟合,探讨其模拟砾石覆盖斥水土壤入渗过程的适用性和准确度。

(1) Philip 模型:

$$f(t) = 0.5St^{-0.5} + A \quad (1)$$

式中: $f(t)$ 为入渗率(mm/min); t 为入渗时间(min); A 为常数; S 为土壤吸渗率(mm/min^{1/2})。

(2) Kostiakov 模型:

$$f(t) = at^{-b} \quad (2)$$

式中: a 、 b 为根据试验求得的模型参数。

(3) Horton 模型:

$$f(t) = f_c + (f_i - f_c)e^{-kt} \quad (3)$$

式中: f_i 为初渗率(mm/min); f_c 为稳渗率(mm/min); k 为试验求得的参数。

1.4 数据分析

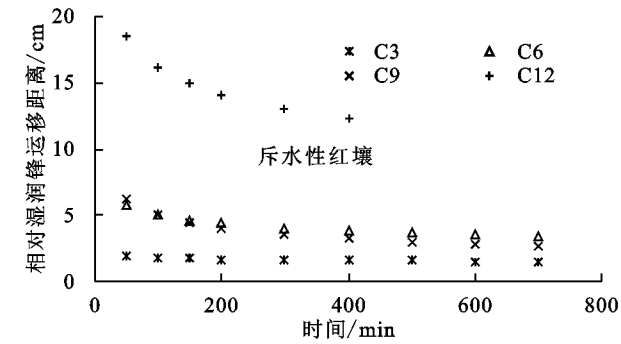
试验数据均取 3 次重复的平均值,所用含水率均为质量含水率,使用 SPSS 21.0 软件进行统计分析,采用 Excel 和 Origin 8.5 软件进行绘图和斥水土壤入渗过程模拟。

2 结果与分析

2.1 砾石覆盖厚度对斥水土壤湿润锋运移距离的影响

图 1 为砾石覆盖斥水土壤相对湿润锋运移距离

(同一时刻不同处理湿润锋运移距离与对照组的比值)随时间的动态变化过程。从图 1 可以看出,不同厚度砾石覆盖下 2 种斥水土壤湿润锋运移距离显著增加($p<0.05$),除 C6 处理土壤湿润锋运移距离与 C9 处理之间无显著差异外,其他处理之间湿润锋运移距离变化均呈两两显著($p<0.05$)或极显著($p<0.01$),同



一覆盖厚度下湿润锋运移距离增长程度表现为斥水性红壤>斥水性潮土。

从图 1 还可看出,2 种斥水土壤相对湿润锋运移距离随时间的延续而逐渐减小,说明随入渗过程进行斥水土壤湿润锋运移趋于平缓,这与柴红阳等^[23]的研究结果相似。

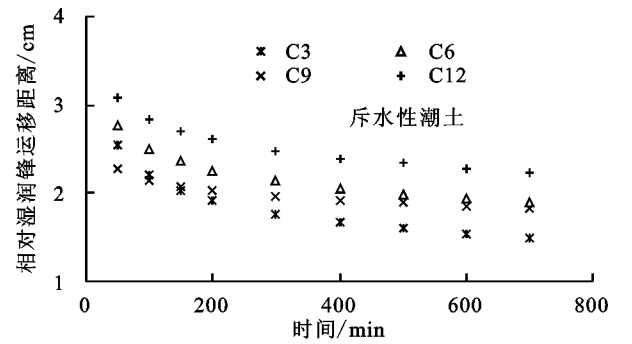


图 1 砾石覆盖斥水土壤相对湿润锋运移距离的动态变化

2.2 砾石覆盖厚度对斥水土壤水分入渗性能的影响

砾石覆盖下 2 种斥水土壤入渗率随入渗时间的延长迅速降低。由表 1 可知,不同处理下 2 种斥水土壤初渗率与稳渗率皆高于对照组。斥水性红壤初渗率与稳渗率均随砾石覆盖厚度增加而增大,表明两者与砾石覆盖厚度之间呈正相关关系。斥水性潮土初渗率与稳渗率随砾石覆盖厚度增加表现出先增大后减小的规律,且覆盖 6 cm 时稳渗率达到最大。回归分析表明,斥水性红壤初渗率和稳渗率随砾石覆盖厚度变化可分别用指数函数 $f_i=0.03e^{0.32h}$ 和 $f_e=0.04e^{0.29h}$ 来表示。式中: h 为砾石覆盖厚度(cm),决定系数分别为 0.91 和 0.87。斥水性潮土稳渗率与砾石覆盖厚度呈二次函数关系($f_e=-0.0002h^2+$

$0.0032h+0.0053$, $R^2=0.78$),因初渗率与砾石覆盖厚度之间并未表现出任何规律,故未列出。这说明砾石覆盖对斥水土壤入渗特征的影响不仅与砾石覆盖厚度有关,而且还受到斥水土壤质地的影响。

从表 1 和图 2 可以看出,相比 CK,砾石覆盖下同一入渗时间 2 种斥水土壤累积入渗量显著增加($p<0.05$)。这表明砾石覆盖明显增大 2 种斥水土壤的累积入渗量,这对防治水土流失和减小降水产流具有极大潜力。相同时间内,斥水性红壤累积入渗量随砾石覆盖厚度的增加而增加,即砾石覆盖厚度与累积入渗量呈正相关关系。但对于斥水性潮土而言,C3 土柱累积入渗量运移曲线与 C6 和 C12 土柱累积入渗量运移曲线分别在 230、162 min 时发生交叉,入渗后期累积入渗量最大。

表 1 砾石覆盖斥水土壤入渗特征指标

土壤类型	砾石覆盖厚度/cm	初始入渗率/(mm·min ⁻¹)	稳定入渗率/(mm·min ⁻¹)	平均入渗率/(mm·min ⁻¹)	400 min 累积入渗量/mm
斥水性红壤	0(CK)	0.11±0.01a	0.03±0.01a	0.02±0.02a	9.50±2.31a
	3	0.14±0.01a	0.04±0.01a	0.03±0.01a	13.20±4.32ab
	6	0.16±0.02a	0.07±0.01a	0.06±0.01a	22.36±3.41bc
	9	0.62±0.03b	0.09±0.02a	0.07±0.21a	31.66±4.16c
	12	0.95±0.08c	0.50±0.14b	0.33±0.07b	114.30±10.71d
斥水性潮土	0(CK)	0.28±0.03a	0.04±0.01a	0.03±0.01a	13.46±3.23a
	3	0.36±0.05ab	0.15±0.02c	0.14±0.02d	64.09±6.53c
	6	1.10±0.11b	0.17±0.01c	0.11±0.02c	55.39±4.61c
	9	0.45±0.05c	0.11±0.01b	0.08±0.01b	35.29±5.52b
	12	0.78±0.07d	0.11±0.01b	0.09±0.02bc	44.50±3.12b

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同字母表示处理在 5% 水平差异显著。

2.3 砾石覆盖厚度对斥水土壤剖面含水率的影响

由于不同厚度砾石覆盖对斥水土壤水分入渗的影响不同,导致不同处理土壤剖面平均含水率差异明显。从图 3 可以看出,砾石覆盖下斥水土壤上层(湿润锋以

上)具有较高含水率,相比 CK,停渗时刻斥水性红壤 C3、C6、C9 和 C12 土柱 0—15 cm 土层平均含水率分别增长—2.3%,10.5%,67.8%和 180.8%;斥水性潮土 C3、C6、C9 和 C12 土柱 0—20 cm 土层平均含水率分别增长

31.8%, 10.5%, 57.6% 和 53.3%。说明砾石覆盖明显提高斥水土壤剖面平均含水率, 且提高程度与砾石覆盖厚

度和斥水土壤质地密切相关。这对增加斥水土壤耕层含水率、提高灌水和降雨利用效率具有重要意义。

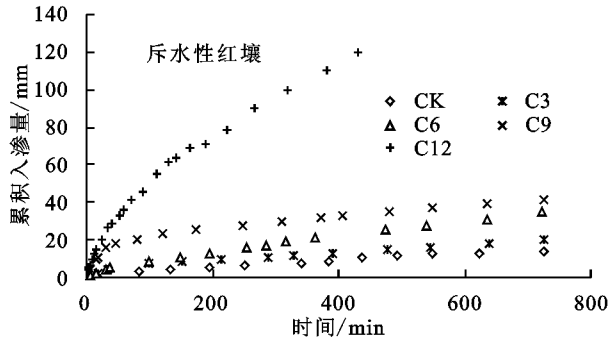


图 2 砾石覆盖斥水土壤累积入渗量的动态变化

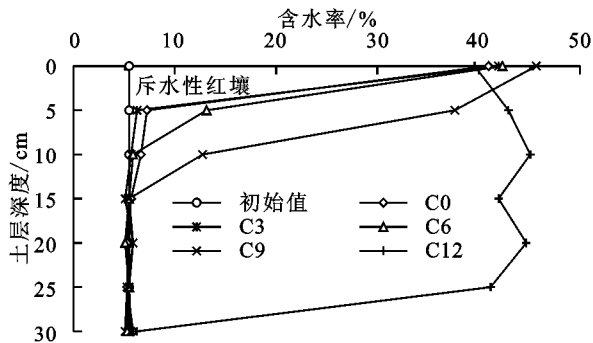
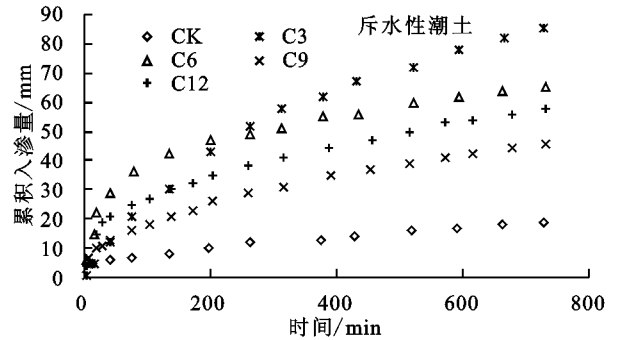
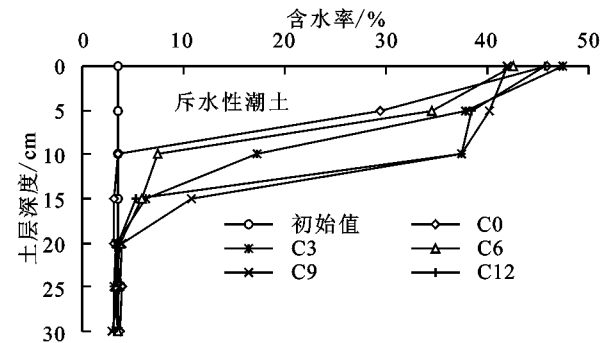


图 3 停渗时刻砾石覆盖斥水土壤剖面含水率垂直分布



2.4 砾石覆盖厚度对斥水土壤水分再分布的影响

从图 4 可以看出, 隔绝条件下, 砾石覆盖 2 种斥水土壤水分再分布过程使得同一土层土壤剖面含水率差异明显, 湿润锋以上土壤随再分布时间延续含水率明显减少, 而下层土壤(湿润锋以下)含水率较停渗时刻明显增加。以斥水性红壤为例: C3、C6、C9 土柱 0—15 cm 土层和 C12 土柱 0—25 cm 土层平均含水率均随再分布时间延续明显减少, 含水率大小均表现为停渗时刻 > 再分布 1 天 > 再分布 3 天 > 再分布 7 天。表明斥水土壤在水分再分布过程中, 湿润层出现脱湿现象。斥水性潮土也表现出相似规律。

从图 4 还可看出, 水分再分布 7 天后, 斥水性红壤 C3 和 C6 土柱湿润深度分别超过 10, 20 cm, C9 土柱介于 15~20 cm, C12 土柱湿润深度超过 30 cm; 斥水性潮土再分布 7 天后, CK 和 C3 土柱湿润深度分别达到 10, 15 cm, C6 和 C12 土柱湿润深度为 15~20 cm, C9 土柱湿润深度超过 20 cm。表明入渗停止后, 各处理土壤湿润锋仍不断运动, 水分入渗速率表现为再分布 1 天 > 再分布 3 天 > 再分布 7 天。邹焱等^[24]指出, 在隔绝蒸发条件下, 土壤水分在重力和吸力梯度作用下会继续向较干土层缓慢运移, 在作用力逐渐减弱的情况下, 再分布速率随时间的推移逐步减慢, 本试验结果与其相似。这是由于再分布过程中, 水分向含水量较低的下层土壤运移, 重力势逐渐减小, 导致再分布过程中水分运动速率越来越慢, 剖面含水率

的差异也逐渐缩小。

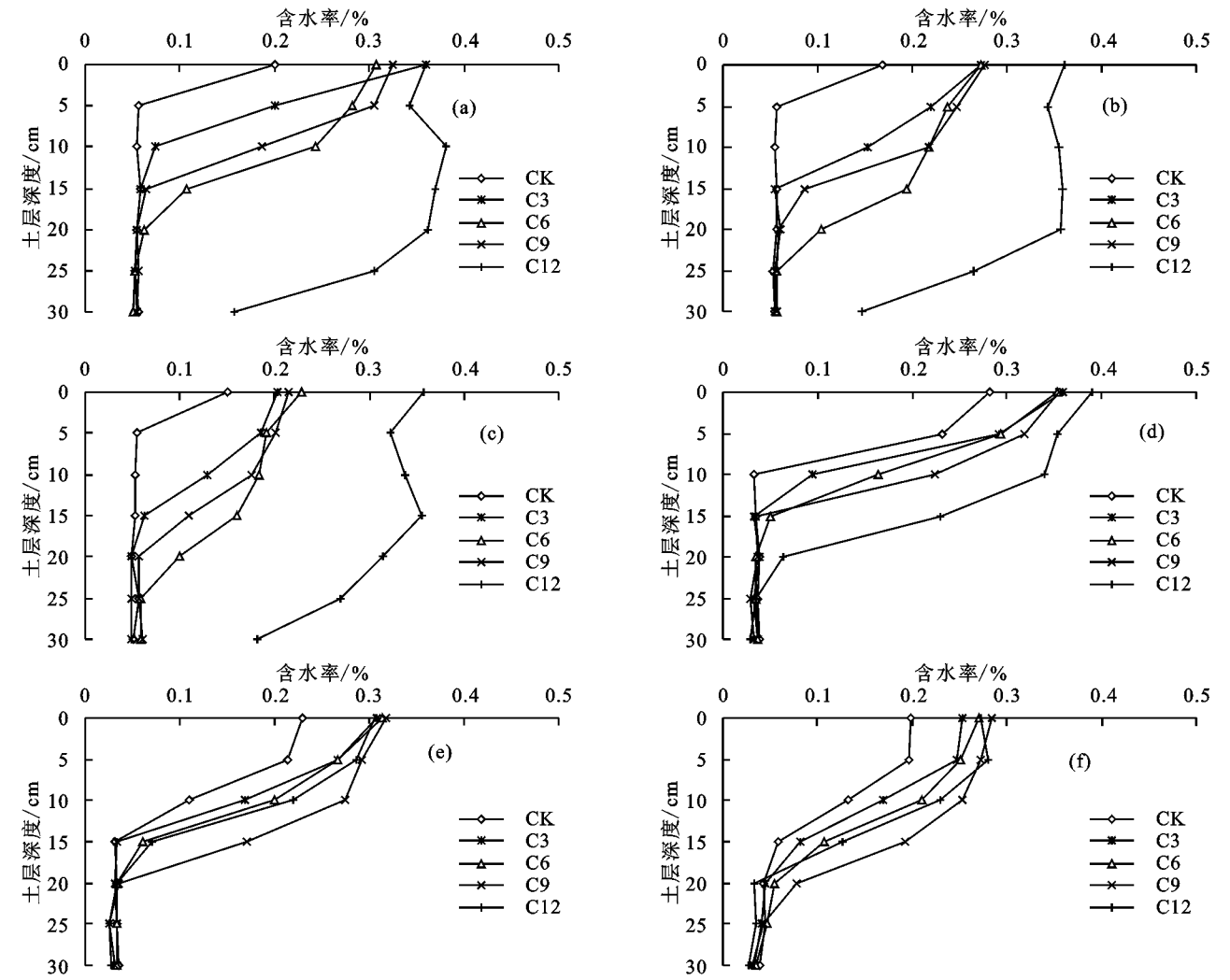
2.5 斥水土壤水分入渗过程拟合与误差分析

土壤水分入渗是一个复杂的物理过程, 为了进一步研究砾石覆盖厚度对斥水土壤水分入渗的影响, 筛选出模拟砾石覆盖斥水土壤入渗过程的最优入渗模型, 选用 Philip、Kostiakov 和 Horton 模型对试验数据进行拟合(表 2), 并引入相对误差 δ 来反映 3 种模型计算入渗率与实测入渗率之间的离散程度, 计算公式为:

$$\delta = \frac{|f_m - f_r|}{f_r} \times 100\% \quad (4)$$

式中: δ 为入渗率相对误差; f_m 为模型计算的入渗率 (mm/min); f_r 为实测入渗率 (mm/min)。

根据 2 种斥水土壤的入渗模拟方程误差分析(表 3)可知, Philip 公式的计算入渗率与实测入渗率的平均相对误差为 0.01%~1.66%, Kostiakov 模型的平均相对误差为 0.05%~89.70%, Horton 模型的平均相对误差为 0.03%~1.46%。说明 Philip 公式和 Horton 模型都能较好地拟合砾石覆盖斥水土壤的入渗规律, 而 Kostiakov 模型拟合效果较差。结合表 2 的入渗模拟方程可知, Philip 公式拟合方程 R^2 为 0.62~0.98, 平均值为 0.90, Horton 模型拟合方程 R^2 为 0.84~0.99, 平均值为 0.95, 后者明显优于前者。说明 Horton 入渗模型模拟砾石覆盖斥水土壤的入渗过程精确度最高, 适用性最强。



注:(a)、(b)、(c)分别为斥水性红壤再分布 1,3,7 天剖面含水率;(d)、(e)、(f)分别为斥水性潮土再分布 1,3,7 天剖面含水率。

图 4 砾石覆盖斥水土壤水分再分布过程

表 2 2 种斥水土壤入渗过程拟合结果

土壤类型	砾石覆盖厚度/cm	Philip 模型		Kostiakov 模型		Horton 模型	
		$f(t)=0.5St^{-0.5}+A$	R^2	$f(t)=at^{-b}$	R^2	$f(t)=f_c+(f_i-f_c)e^{-kt}$	R^2
斥水性红壤	0(CK)	$f(t)=0.03t^{-0.5}+0.001$	0.85	$f(t)=0.02t^{-0.284}$	0.82	$f(t)=0.003+0.10e^{-0.017t}$	0.91
	3	$f(t)=0.06t^{-0.5}+0.001$	0.90	$f(t)=0.06t^{-0.438}$	0.97	$f(t)=0.003+0.14e^{-0.008t}$	0.97
	6	$f(t)=0.05t^{-0.5}+0.005$	0.92	$f(t)=0.04t^{-0.308}$	0.99	$f(t)=0.007+0.02e^{-0.015t}$	0.98
	9	$f(t)=0.23t^{-0.5}+0.001$	0.87	$f(t)=0.37t^{-0.597}$	0.97	$f(t)=0.009+0.08e^{-0.014t}$	0.99
	12	$f(t)=0.27t^{-0.5}+0.004$	0.92	$f(t)=0.27t^{-0.333}$	0.98	$f(t)=0.043+0.12e^{-0.025t}$	0.98
斥水性潮土	0(CK)	$f(t)=0.33t^{-0.5}-0.005$	0.98	$f(t)=0.20t^{-0.645}$	0.99	$f(t)=0.005+0.06e^{-0.035t}$	0.98
	3	$f(t)=0.10t^{-0.5}+0.019$	0.62	$f(t)=0.07t^{-0.209}$	0.85	$f(t)=0.013+0.03e^{-0.004t}$	0.98
	6	$f(t)=0.96t^{-0.5}-0.004$	0.98	$f(t)=0.90t^{-0.666}$	0.99	$f(t)=0.023+0.30e^{-0.055t}$	0.94
	9	$f(t)=0.68t^{-0.5}-0.009$	0.98	$f(t)=0.35t^{-0.590}$	1.00	$f(t)=0.013+0.18e^{-0.060t}$	0.97
	12	$f(t)=0.65t^{-0.5}-0.0002$	0.95	$f(t)=0.40t^{-0.556}$	0.97	$f(t)=0.018+0.18e^{-0.044t}$	0.84

表 3 不同砾石覆盖厚度下 2 种斥水土壤入

渗模拟方程相对误差分析 单位: %

入渗模型	土壤类型	0(CK)	3 cm	6 cm	9 cm	12 cm
Philip 模型	斥水性红壤	0.80	0.80	0.10	0.25	1.66
	斥水性潮土	0.03	0.21	0.06	0.17	0.01
Kostiakov 模型	斥水性红壤	0.90	0.30	0.09	89.70	0.81
	斥水性潮土	3.80	0.05	24.51	2.72	2.76
Horton 模型	斥水性红壤	1.30	0.60	0.03	0.08	1.46
	斥水性潮土	0.24	0.30	0.11	0.15	0.04

3 讨论

表层土壤是土壤水文过程发生和转化的介质,在水文循环中起着极其重要的作用。砾石覆盖改变土壤特性如粗糙度、孔隙度、层次结构、地表土壤结皮与表土结构稳定性等^[5],提高土壤表层积水深度,土壤水向下移动的压力势和土壤水势增大^[12,20],使得斥水土壤湿润锋运移距离、累积入渗量、初渗率与稳渗率以及剖面含水率等明显增加,且增加程度与砾石覆

盖厚度密切相关。斥水性导致入渗过程中湿润锋运移的不均匀^[23],斥水性潮土 C12 处理湿润锋运移距离最大,但累积入渗量却小于 C3 和 C6,这可能与之有关。随着砾石覆盖厚度增加,斥水性红壤湿润锋运移距离、累积入渗量、初渗率与稳渗率随之增加,表明其与砾石覆盖厚度呈正相关;斥水性潮土除稳渗率外其他水分入渗特征与砾石覆盖厚度之间并未表现出任何规律,这表明土壤质地也是影响斥水土壤水分入渗的重要因素。

再分布过程中,斥水性抑制土壤基质势对水分的吸附,仅依靠土壤毛细作用使水分逐渐润湿土壤颗粒^[20],缓慢向垂直方向扩散,使得对照组湿润深度最小。其他处理由于砾石覆盖增加土壤水分入渗,重力势作用增强,水分更易于向下入渗,导致湿润锋运移距离出现不同程度增加。刘畅等^[20]、刘春成等^[22]和柴红阳等^[23]基于不同初始含水率、不同质地、入渗水头以及斥水程度土壤入渗规律研究认为,Kostiakov 模型拟合斥水土壤入渗过程更接近于实测值。本研究与之相反,砾石覆盖对斥水土壤入渗水头以及土壤表面特性等均产生明显影响,使得入渗过程更为复杂,且试验土壤类型及斥水程度不同,可能造成研究结果存在较大差异。2 种斥水土壤在砾石覆盖 12 cm 时均表现出较好的入渗能力,但实际生产中还需考虑砾石覆盖厚度对耕作和作物发芽的影响,根据斥水土壤质地选择合理的覆盖厚度。

4 结论

(1)砾石覆盖改变斥水土壤水分入渗曲线,显著增加斥水土壤湿润锋运移距离($p < 0.05$),斥水性红壤初渗率与稳渗率随砾石覆盖厚度的变化均可用指数函数来描述,决定系数分别为 0.91 和 0.87;斥水性潮土稳定入渗率与砾石覆盖厚度呈二次函数变化($R^2 = 0.78$),且砾石覆盖 6 cm 时达到最大,初始入渗率较对照组均有不同程度增长,但与砾石覆盖厚度之间未表现出任何趋势。同一时段内,砾石覆盖下 2 种斥水土壤累积入渗量皆高于对照组($p < 0.05$),斥水性红壤累积入渗量与砾石覆盖厚度呈正相关。

(2)砾石覆盖明显增加斥水土壤剖面平均含水率,斥水性红壤和斥水性潮土分别增长 $-2.3\% \sim 180.8\%$ 和 $10.5\% \sim 57.6\%$ 。隔绝蒸发条件下,砾石覆盖斥水土壤湿润体含水率均表现出停渗时刻 $>$ 再分布 1 天 $>$ 再分布 3 天 $>$ 再分布 7 天的规律,而下层土壤含水率(湿润锋以下)较停渗时刻均明显增加;再分布过程中,随着再分布时间的延续,湿润锋运移距离增加,水分运动速率减缓,剖面含水率的差异也逐渐缩小。

(3)3 种入渗模型拟合砾石覆盖斥水土壤水分入渗过程表明,Horton 模型拟合结果更接近实测值,最适合

模拟砾石覆盖斥水土壤水分入渗过程,其次是 Philip 入渗公式,Kostiakov 模型的计算入渗率与实测入渗率的平均相对误差最大为 89.7%,拟合效果较差。

参考文献:

- [1] Qiu Y, Wang Y, Xie Z. Long-term gravel-sand mulch affects soil physicochemical properties, microbial biomass and enzyme activities in the semi-arid Loess Plateau of North-western China[J]. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B: Soil and Plant Science*, 2014, 64(4): 294-303.
- [2] Li X Y, Gong J D. Effects of different ridge: Furrow ratios and supplemental irrigation on crop production in ridge and furrow rainfall harvesting system with mulches[J]. *Agricultural Water Management*, 2002, 54(3): 243-254.
- [3] 陈心逸,李丽,余冬立. 砾石覆盖条件下盐碱土边坡降雨侵蚀水动力学特征[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(1): 116-120.
- [4] 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.
- [5] Poesen J, Lavee H. Rock fragments in top soils: Significance and processes[J]. *Catena*, 1994, 23(1/2): 1-28.
- [6] Qiu Y, 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.
- [7] 赵文举,马宏,徐裕,等. 模拟降雨条件下压砂地土壤水分入渗规律研究[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(4): 79-84.
- [8] 王小燕,李朝霞,徐勤学,等. 砾石覆盖对土壤水蚀过程影响的研究进展[J]. *中国水土保持科学*, 2011, 9(1): 115-120.
- [9] Jomaa S, Barry D A, Brovelli A, et al. Rain splash soil erosion estimation in the presence of rock fragments[J]. *Catena*, 2012, 92: 38-48.
- [10] 陈士辉,谢忠奎,王亚军,等. 砂田西瓜不同粒径砂砾石覆盖的水分效应研究[J]. *中国沙漠*, 2005(3): 433-436.
- [11] 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): 801-807.
- [12] 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.
- [13] Katra I, Lavee H, Sarah P. The effect of rock fragment size and position on topsoil moisture on arid and semi-arid hillslopes[J]. *Catena*, 2008, 72(1): 49-55.
- [14] Dekker L W, Ritsema C J. Wetting patterns and moisture variability in water repellent Dutch soils[J]. *Journal of Hydrology*, 2000, 231/232: 148-164.
- [15] 王秋玲,施凡欣,刘志鹏,等. 土壤斥水性影响土壤水分运动研究进展[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(24): 96-103.
- [16] 闵雷雷,于静洁. 土壤斥水性及其对坡面产流的影响研究进展[J]. *地理科学进展*, 2010, 29(7): 855-860.

- ence and Pollution Research International, 2018, 25(4): 3480-3487.
- [7] Qian F, Cheng D, Ding W, et al. Hydraulic characteristics and sediment generation on slope erosion in the Three Gorges Reservoir Area, China[J]. Journal of Hydrology and Hydromechanics, 2016, 64(3): 237-245.
- [8] He J J, Cai Q G, Liu S B. Effects of slope gradient on slope runoff and sediment yield under different single rainfall conditions[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(5): 1263-1268.
- [9] 耿晓东, 郑粉莉, 张会茹. 红壤坡面降雨入渗及产流产沙特征试验研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(4): 39-43.
- [10] He J J, Sun L Y, Gong H L, et al. The characteristics of rill development and their effects on runoff and sediment yield under different slope gradients[J]. Journal of Mountain Science, 2016, 13(3): 397-404.
- [11] 蒋荣, 张兴奇, 纪启芳, 等. 坡度和雨强对喀斯特地区坡面产流产沙的影响[J]. 环境保护科学, 2012, 38(5): 13-17.
- [12] Zhao X, Wu P, Chen X, et al. Runoff and sediment yield under simulated rainfall on hill slopes in the Loess Plateau of China[J]. Soil Research, 2013, 51(1): 50-58.
- [13] Ma Y, Xie H H, Li C. Experimental analysis on runoff and sediment from sloping lands in Karst region[J]. Advanced Materials Research, 2015, 1073/1076: 1624-1629.
- [14] Liu D, She D, Yu S, et al. Rainfall intensity and slope gradient effects on sediment losses and splash from a saline-sodic soil under coastal reclamation[J]. Catena, 2015, 128: 54-62.
- [15] 代数, 蒋光毅, 夏清, 等. 坡度和雨强对重庆市黄壤旱坡地产流产沙特征的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(4): 1-5.
- [16] 张汉雄. 黄土高原的暴雨特性及其分布规律[J]. 地理学报, 1983, 38(4): 416-425.
- [17] 彭旭东, 戴全厚, 李昌兰, 等. 模拟雨强和地下裂隙对喀斯特地区坡耕地养分流失的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(2): 131-140.
- [18] 程琴娟, 蔡强国, 廖义善. 土壤表面特性与坡度对产流产沙的影响[J]. 水土保持学报, 2007, 21(2): 9-11.
- [19] 王秀英, 曹文洪, 陈东. 土壤侵蚀与地表坡度关系研究[J]. 泥沙研究, 1998(2): 36-41.
- [20] 胡尧, 侯雨乐, 李懿. 模拟降雨入渗对岷江流域红壤坡面产流产沙的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(2): 62-67.
- [21] 卫喜国, 严昌荣, 魏永霞, 等. 坡度和降雨强度对坡耕地入渗的影响[J]. 灌溉排水学报, 2009, 28(4): 114-116.
- [22] 吴发启, 范文波. 土壤结皮对降雨入渗和产流产沙的影响[J]. 中国水土保持科学, 2005, 3(2): 97-101.
- [23] Moore D C, Singer M J. Crust formation effects on soil erosion processes[J]. Soil Science Society of America Journal, 1990, 54(4): 1117-1123.
- [24] 蔡强国, 王贵平, 陈永宗. 黄土高原小流域侵蚀产沙过程与模拟[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [25] Levy G J, Levin J, Shainberg I. Seal formation and interrill soil erosion[J]. Soil Science Society of America Journal, 1994, 58(1): 203-209.
- [26] 卜崇峰, 蔡强国, 张兴昌, 等. 黄土结皮的发育机理与侵蚀效应研究[J]. 土壤学报, 2009, 46(1): 16-23.
- [27] 高燕, 郑粉莉, 王彬, 等. 土壤结皮对黑土区坡面产流产沙的影响[J]. 水土保持研究, 2014, 21(4): 17-20.
- [28] 唐泽军, 雷廷武, 张晴雯, 等. 雨滴溅蚀和结皮效应对土壤侵蚀影响的试验研究[J]. 土壤学报, 2004, 41(4): 632-635.
- [29] 倪九派, 魏朝富, 谢德体, 等. 坡度对三峡库区紫色土坡面径流侵蚀的影响分析[J]. 泥沙研究, 2009(2): 29-33.
- (上接第22页)
- [17] Wang Z, Wu Q J, Wu L, et al. Effects of soil water repellency on infiltration rate and flow instability[J]. Journal of Hydrology, 2000, 231/232: 265-276.
- [18] Doerr S H, Ritsema C J, Dekker L W, et al. Water repellence of soils: New insights and emerging research needs[J]. Hydrological Processes, 2007, 21(17): 2223-2228.
- [19] 陈俊英, 吴普特, 张智韬, 等. 土壤斥水性对含水率的响应模型研究[J]. 农业机械学报, 2012, 43(1): 63-67.
- [20] 刘畅, 陈俊英, 张林, 等. 初始含水率对斥水黏壤土入渗特性的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2018, 36(4): 354-361.
- [21] Doerr S H. On standardizing the 'Water Drop Penetration Time' and the 'Molarity of an Ethanol Droplet' techniques to classify soil hydrophobicity: A case study using medium textured soils[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2015, 23(7): 663-668.
- [22] 刘春成, 李毅, 任鑫, 等. 四种入渗模型对斥水土壤入渗规律的适用性[J]. 农业工程学报, 2011, 27(5): 62-67.
- [23] 柴红阳, 陈俊英, 张林, 等. 不同斥水程度粘壤土一维入渗特性的试验研究[J]. 排灌机械工程学报, 2018. DOI:10.3969/j.issn.1674-8530.17.0178.
- [24] 邹焱, 陈洪松, 苏以荣, 等. 红壤积水入渗及土壤水分再分布规律室内模拟试验研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(3): 174-177.