

砒砂岩区原状和扰动土壤水分入渗过程

马文梅^{1,2}, 马云飞³, 张兴昌⁴

(1. 宝鸡文理学院, 陕西省灾害监测与机理模拟重点实验室, 陕西 宝鸡 721013; 2. 宝鸡文理学院地理与环境学院, 陕西 宝鸡 721013; 3. 宝鸡市农业技术推广中心, 陕西 宝鸡 721031; 4. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 基于内蒙古准格尔旗砒砂岩区为研究对象, 通过野外原状土的采集和室内模拟土柱试验, 采用一维垂直入渗试验, 分析了砒砂岩区黄土、砒砂岩、风沙土的原状土和填装土的水分入渗过程。结果表明: 原状情况下入渗率、累积入渗量的变化趋势为风沙土>黄土>砒砂岩; 扰动情况下入渗率、累积入渗量的变化趋势为风沙土>砒砂岩>黄土; 两种土壤中湿润锋的变化趋势与累积入渗量变化趋势一致。利用 Philip 模型、Kostiakov 经验公式和 Green-Ampt 模型对原状土和扰动土累积入渗量和入渗历时的关系拟合方程均可较好地描述原状土扰动土的入渗过程, 其中 Kostiakov 经验公式拟合值更接近于实测值, 拟合精度更高。

关键词: 原状土; 扰动土; 土壤水分; 入渗; 砒砂岩区

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)02-0128-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.02.019

Water Infiltration Process in the Undisturbed and Disturbed Soil in the PiSha Sand Stone Area

MA Wenmei^{1,2}, MA Yunfei³, ZHANG Xingchang⁴

(1. Key Laboratory of Disaster Monitoring and Mechanism Simulation, Baoji University of Arts and Sciences, Baoji, Shaanxi 721013; 2. College of Geography and Environment Engineering, Baoji University of Arts and Sciences, Baoji, Shaanxi 721013; 3. The Center of Baoji Agricultural Technology Extension, Baoji, Shaanxi 721031; 4. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: Based on the Pisha sand stone in the Inner Mongolia ZhunGeErQi as the research object, in this paper, through the field sampling of undisturbed soil and laboratory simulation of soil-column experiment, soil water infiltration were analyzed by one-dimensional vertical infiltration experiment to study the process of water infiltration on the loess soil, aeolian sandy soil and Pisha sand stone. The results showed that the infiltration rate and cumulative infiltration changed trend was: aeolian sandy soil>loess soil>Pisha sand stone in the undisturbed soil, and aeolian sandy soil>Pisha sand stone>loess soil in the disturbed soil. The wetting front and the cumulative infiltration showed the same trend both in the undisturbed and disturbed soil. Fitting the relationship between infiltration rate and time with Kostiakov empirical formula, Philip model and Green-Ampt equation, the results showed both Kostiakov infiltration equation, Green-Ampt and Philip equation were suitable for simulating the change of cumulative infiltration capacity for the disturbed and undisturbed soils, but Kostiakov formula was more accurate fitting the water infiltration on the disturbed and undisturbed soil than other models.

Keywords: undisturbed soil; disturbed soil; soil moisture; infiltration; the area of Pisha sand stone

土壤水分入渗是水分通过全部或部分地表向下流动进入土壤, 并且在土壤中运动和储存的过程^[1], 它是大气降水、地表水、土壤水和地下水相互转化的一个重要环节^[2]。土壤水分入渗受土壤性质和人为活动的影响^[3-4]。目前国外学者关于土壤水分入渗的研究中, Han 等^[5]通过向土壤中添加保水剂, 研究分析了保水剂对土

壤饱和含水率、电导率及土壤水分扩散率的影响, 保水剂的应用可显著增加土壤饱和含水率。致使土壤电导率和水分扩散率下降, 研究还利用指数函数对土壤水分扩散进行了数值模拟, 结果显示实测值与模拟值之间具有较高的一致性。Szymkiewicz^[6]在使用有限差分的方法对一维非饱和情况下土壤的入渗和规律进行了模拟,

并计算出相关的特征参数。国内水分入渗研究主要是李卓等^[7]通过人工改变土壤质地,设置不同容重水平,在室内利用土柱积水入渗模型研究了容重变化对入渗能力的影响;党宏宇等^[8]、周蓓蓓等^[9]通过室内模拟土柱试验,研究了不同碎石粒径及粒径大小对水分入渗的影响;肖庆礼等^[10]利用 Hydrus-1D 模型和 Trime-IPH 手持式 TDR 利用双环入渗仪对土壤水分的入渗和再分布进行了研究。“砒砂岩”不是科学名词,而是群众对广泛出露于鄂尔多斯高原、整体呈现红色的沉积岩层的俗称,由于该岩层极易发生土壤侵蚀,群众深受其水土流失危害,视其危害毒如砒霜,故称为“砒砂岩”^[11-13]。砒砂岩区是黄河粗沙的重要来源之一,成为黄土高原侵蚀最剧烈、治理难度最大的地区,被中外专家称为“世界水土流失之最”和“环境癌症”^[14]。前人主要是从砒砂岩地区的水文地质条件^[15]、砒砂岩的理化性质对抗侵蚀性的影响^[16]、侵蚀动力学、岩性特征^[17-18]和砒砂岩小流域产沙量^[19]等方面进行研究,但对于砒砂岩区土壤水分的研究较少,本文通过对该区原状土壤和扰动土壤入渗变化规律进行研究,以期为本研究区矿区土地复垦提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试土样

试验所用土样为风沙土、黄土和砒砂岩,取自内蒙古准格尔旗一带。砒砂岩直接在裸露的地表采集,风沙土和黄土的采集除去植被和耕层 0—10 cm 的土壤,平整表面后,取 0—20 cm 深的土壤(每 10 cm 一个样),样品在自然条件下充分风干后过 2 mm 的土筛^[20]。用英国马尔文公司生产的 MS 2000 激光粒度仪分析测定土壤颗粒组成(表 1),采用国际制标准划分土壤质地。原状土和填装土的初始含水量见表 2。原状土是在野外直接将底部有棱角的有机玻璃土柱(内径 5 cm,高 25 cm)轻轻打入土壤,然后挖取原状土样,取出后盖上底盖制成原状土柱,取样深度为 20 cm。

表 1 土壤颗粒组成 单位: %

土样	土壤质地	$D \geq 0.02 \text{ mm}$	$0.02 > d \geq 0.002 \text{ mm}$	$d < 0.002 \text{ mm}$
风沙土	砂土	77.86	19.78	2.36
黄土	壤黏土	60.71	21.94	17.35
砒砂岩	砂壤土	78.20	13.70	8.10

表 2 土壤初始含水量 单位: %

土壤质地	原状土	填装土
风沙土	0.040	0.004
黄绵土	0.072	0.009
砒砂岩	0.040	0.043

1.2 试验方法

室内土壤水分入渗试验在陕西杨凌中科院水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室内进行,采用一维垂直定水头法测定原状土和

扰动土的入渗过程^[21]。试验装置由试验土柱和供水系统两部分组成,试验土柱是选用厚度为 0.5 cm 的透明有机玻璃材料制作,内径 5 cm,高 25 cm(其中土柱高度为 20 cm),底部挡板厚度为 0.5 cm,挡板上均匀分布内径为 0.3 cm 的细孔,并放置滤纸,防止土样流失。供水系统的横截直径为 10 cm,高 50 cm 的马氏瓶装置,供水水头控制在 4 cm 左右。

扰动土的土柱按照风沙土 1.6 g/cm³、黄土 1.4 g/cm³、砒砂岩 1.4 g/cm³ 的容重填装,每 5 cm 一层进行填装,层与层之间打毛,防止分层现象,装土完后自然沉降 1 天。马氏瓶向土柱供水过程中,瓶身用刻度尺标注,以厘米为单位,精确到毫米。试验过程中记录马氏瓶中的水面高度和湿润峰的运移距离。0~6 min 每 30 s 读取 1 次,7~20 min 每 1 min 读取 1 次,20~40 min 每 2 min 读取 1 次,60 min 后每 5 min 读取 1 次,直至湿润峰到达土柱底部为止,测定其饱和导水率。整个试验过程实验室温度为 20 ℃左右。

2 结果与分析

2.1 不同原状土和扰动土对入渗率的影响

入渗率反映了土壤的入渗特性,它受土壤质地、孔隙状况、供水强度等因素的影响^[22]。从图 1 可以看出,在整个入渗过程中,不同质地原状土和扰动土的入渗率随入渗时间的增加,入渗性能逐渐减缓,最终趋于稳定。风沙土容重从原状土 1.50 g/cm³ 增大到扰动土 1.60 g/cm³,入渗率从 0.731 0 cm/min 减小到 0.659 3 cm/min;黄土容重从原状土 1.28 g/cm³ 增大到扰动土 1.40 g/cm³,入渗率从 0.432 1 cm/min 减小到 0.308 8 cm/min;砒砂岩容重从原状土 1.59 g/cm³ 减小到 1.40 g/cm³,入渗率从 0.134 0 cm/min 增大到 0.420 0 cm/min。可知土壤入渗率受土壤容重影响较大,土壤入渗率均随着容重的增大递减。张振华等^[23]研究表明,入渗过程中土壤容重对入渗率的影响表现为同一时刻容重越大,入渗率越低。此外土壤的入渗率与土壤质地有密切关系,土壤质地越粗,透水性越强^[24-25]。

同时,试验结果表明扰动土的入渗率大于原状土。在原状土中,风沙土、黄土、砒砂岩的孔隙度依次为 44.45%,51.71%,41.49%;在扰动土中,风沙土、黄土、砒砂岩的孔隙度为 41.15%,47.75%,47.75%。由于土壤入渗的速率和途径受土壤孔隙的大小和结构控制^[26],扰动土的土壤颗粒进行了重新排列,改变了土壤孔隙度,使得扰动后的土壤入渗率发生了变化。原状土中风沙土和黄土的入渗率大于扰动土中的风沙土和黄土,而砒砂岩的入渗率反之。由于原状土良好的层理结构和孔隙结构是扰动土所不具备的,因此与原状土相比,扰动土的入渗能力大大降低。砒砂岩岩

体属于不等粒岩,粗细颗粒较为混杂,颗粒的大小不均,而且大颗粒形成的小空隙都被小颗粒占据,从而

导致扰动后的砒砂岩渗透能力发生变化,金争平等^[27]的研究结果也应证了本结论。

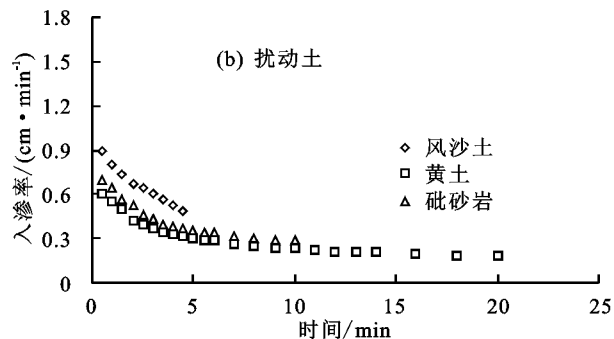
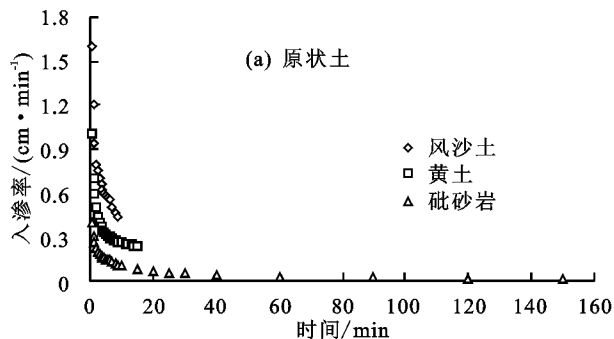


图 1 不同填装方式下土壤入渗率的变化

2.2 不同原状土和扰动土对累积入渗量的影响

累积入渗量是入渗开始后一定时间内,通过地表单位面积入渗到土壤中的总水量,对于分析水分入渗等问题有一定的指导意义^[28]。从图 2 可以看出,随着入渗历时的延长,累积入渗量均呈增加趋势,原状土的风沙土、黄土的平均累积入渗量分别为 3.51, 2.73 cm,均大于扰动土的平均累积入渗量 2.12, 2.49 cm。而原状砒砂岩的平均累积入渗量 1.57 cm 小于扰动土的 2.3 cm。原状土中累积入渗量的变化趋势依次为风沙土最大,黄土次之,砒砂岩最小;在扰动土中风沙土最大,砒砂岩次之,黄土最小。整个入渗过程中扰动后砒砂岩的累积入渗量大于黄土,是

由于扰动后砒砂岩中粉粒含量大,缺乏黏粒,减少了土壤中的胶结物质,土壤结构变差,稳定性降低,从而使入渗过程中累积入渗量大于黄土。李卓等^[7]指出同一质地的土壤,土壤容重增大,土壤团粒结构丧失,土壤孔隙减小,土壤变得紧密坚实,导致入渗能力降低。土壤水分入渗过程中大孔隙是水分流动的主要通道,原状黄土中大孔隙的存在加速了水分的移动能力,导致黄土的入渗能力大于砒砂岩。在扰动土中,风沙土的累积入渗量最大,砒砂岩和黄土次之,砂粒含量越高,入渗速率越快,累积入渗量越大,肖庆礼等^[10]的研究表明不同土壤性质的差异导致累积入渗量的变化。

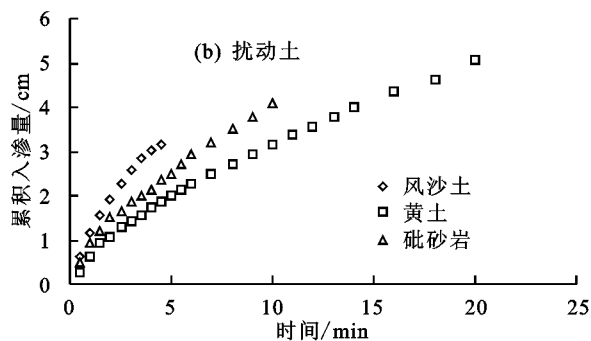
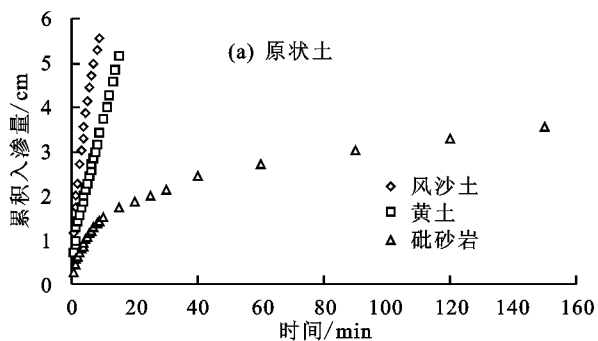


图 2 不同填装方式下土壤累积入渗量的变化

2.3 不同原状土和扰动土对湿润峰的影响

湿润锋是表征水分在土壤基质吸力和重力作用下的运动特征^[29]。从图 3 可以看出,随着入渗的进行,湿润峰运移的距离不断增加。在原状土中,0~30 min 风沙土、黄土的湿润峰运移较快,而砒砂岩在 40 min 后湿润峰的运移逐步减慢,但在短时间内缓慢前移,直至湿润峰消失。在扰动土中,3 种土壤的湿润锋运移距离与累积入渗量的变化趋势一致。总体上,原状土和填装土中,土体湿润峰的变化趋势与累积入渗量的变化趋势一致。

2.4 原状土和填装土的水分入渗过程模拟

国内外学者对土壤水分入渗进行了大量研究,提出了具有不同特点和用途的入渗模型,主要有 Philip^[30]模型、Kostiakov^[31]经验公式和 Green-Ampt^[32]

模型,其中 Philip 模型为:

$$I = St^{1/2} + At \quad (1)$$

式中: I 为累积入渗量(cm); t 为入渗时间(min); A 为常数; S 为土壤吸渗率($\text{cm}/\text{min}^{1/2}$)。

Kostiakov 经验公式为:

$$I = Kt^{-\alpha} \quad (2)$$

式中: I 为累积入渗量(cm); t 为入渗时间(min); K 和 α 为入渗参数。

Green-Ampt 模型为:

$$i = k_d \left[\frac{h_f}{z_f} \right] \quad (3)$$

式中: i 为入渗率(cm/min); k_d 为土壤表征饱和导水率,有时称为饱和导水率(cm/min); h_f 为湿润峰面吸力(cm); z_f 为概化的湿润锋深度(cm)。

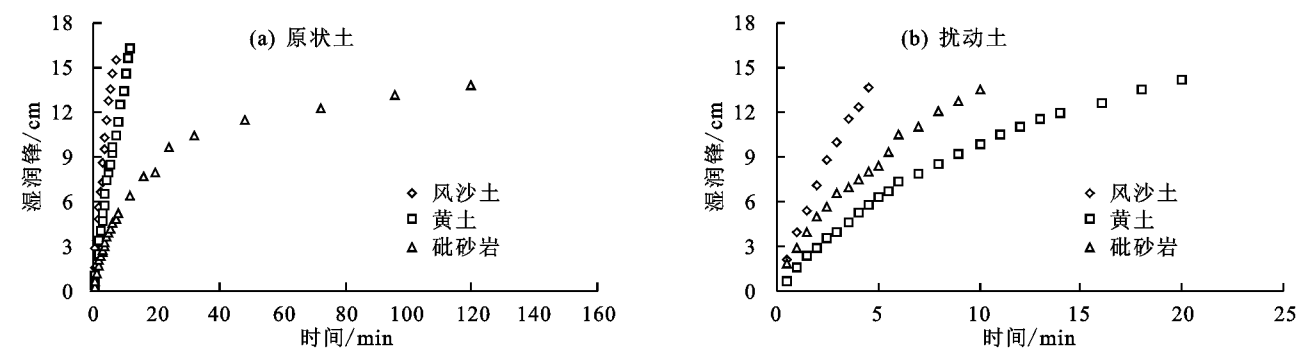


图 3 不同填装方式下土壤湿润锋的变化

在 Green-Ampt 模型中包括两个特征参数,即土壤表征饱和导水率和湿润锋面吸力,而表面积水深度可以根据试验条件来决定,概化的湿润锋深度可以根据累积入渗量确定,具体表示为:

$$I=(\theta_s-\theta_i)z_f \tag{4}$$

式中: I 为累积入渗量 (cm); θ_s 为土壤饱和含水率 (cm^3/cm^3); θ_i 为初始土壤含水率 (cm^3/cm^3)。

根据以上模型公式分析,为了进一步验证这些理论关系的合理性,本文采用 3 种模型对原状土和扰动土入渗率进行拟合,并与实测入渗率值进行比较(图 4)。从

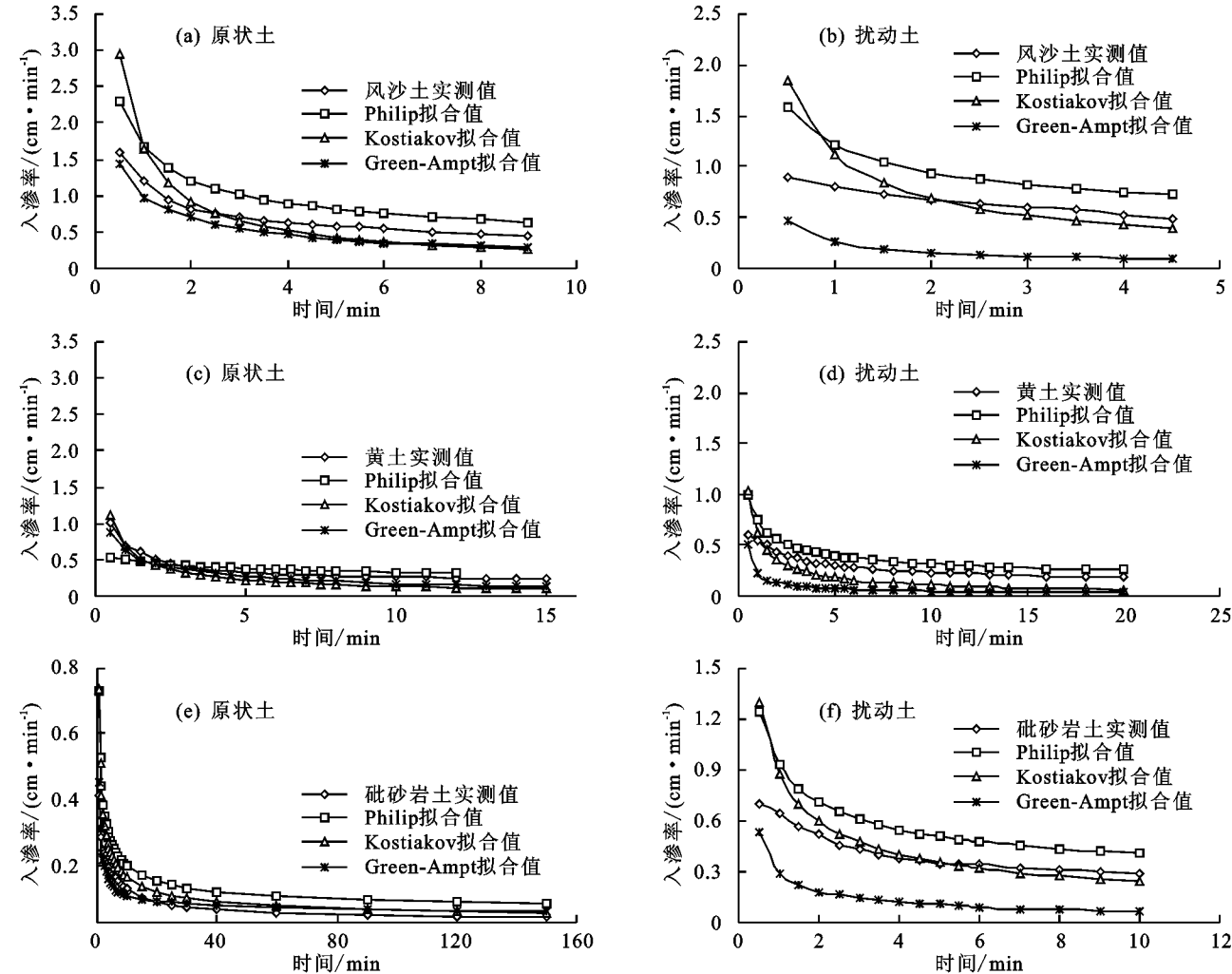


图 4 入渗模型入渗率计算结果与实测结果对比

根据实测试验数据,利用拟合方程对试验结果进行分析,将所得公式参数列于表 2。由表 2 可以看出,无论扰动土和原状土,Kostiakov 经验公式、Philip 和 Green-Ampt 模型的分析结果都有较高的相关参数,因此 3 个模型都可较好地反映原状土和扰动土中累积入渗量随时间变化的过程。由表 2 还可看出,Kostiakov 中参数 α 的大小代表了累积入渗量随时间变化的速率,参数 α 在原状扰动土中大小依次为风沙土、黄土、砒砂岩;而在 Philip 公式中,参数 S 值的变化趋势和实际测得的累积入渗量的变化趋势不一致;Green-Amp 公式中,参数 K_d 的值近似为实测的饱和导水率值,其值与实测饱和导水率的变化趋势不一

致。因此,得出 Kostiakov 经验公式能更好地拟合原状土扰动土的水分入渗过程。研究表明原状土不同土层之间水分入渗的差异较小^[33],这与本研究的结果一致。由此可以推断在原状土和扰动土中,土壤水分入渗均可用水分入渗模型进行模拟。人为改变土壤容重、有机质、砂粒含量和饱和含水量可以预测复垦区或者改变土地利用类型,从而改变土壤中的水分入渗值。相对壤土而言,砂土中大量砂粒和大孔隙的存在,降低了土壤的持水能力,同时增加了土壤的饱和导水率,从而使水分在砂土中比壤土中更容易入渗。本研究中原状土和扰动土的土壤治理和颗粒大小不同,导致原状土和扰动土在水分入渗过程中存在差异。

表 2 不同填装方式及土质的累积入渗量随时间变化的拟合结果

填装方式	土壤	Philip 模型拟合参数			Kostiakov 模型拟合参数			Green-Ampt 模型拟合参数	
		A	S	R	K	α	r	k_d	z_f
原状土	风沙土	0.1234	1.5431	0.9950	1.6455	0.5636	0.9960	0.3867	19.2940
	黄土	0.1514	0.7092	0.9952	0.9553	0.5821	0.9963	0.2370	9.5981
	砒砂岩	0.0181	0.5015	0.9943	0.5008	0.4241	0.9732	0.0365	11.1190
扰动土	风沙土	0.3051	0.9044	0.9872	1.1264	0.7304	0.9936	0.0730	17.1960
	黄土	0.1150	0.6277	0.9980	0.6161	0.7167	0.9891	0.1525	2.8786
	砒砂岩	0.1664	0.7660	0.9979	0.8784	0.6675	0.9948	0.1238	7.2907

注:A 为 Philip 方程的稳定入渗速率;S 为吸渗率;R 为运用 Philip 方程拟合的参数;K 和 α 为 Kostiakov 入渗模型的经验系数;r 为运用 Kostiakov 经验公式拟合的参数; K_d 为 Green-Ampt 方程中的表征饱和导水率; z_f 为湿润锋面吸力。

3 结 论

(1)在原状土中,随着入渗历时的增加,土壤的入渗速率开始较大,最后趋于一个平衡值,其中风沙土的入渗率最大,其次是黄土;在扰动土中,风沙土的入渗率最大,其次为砒砂岩。

(2)在原状土中,随着入渗历时的增加,风沙土的累积入渗量最大,其次是黄土;当土壤受到扰动后,随着入渗历时的增加,风沙土的累积入渗量仍为最大,其次是砒砂岩;两种类型土壤湿润锋的变化趋势与累积入渗量的变化一致。

(3)Kostiakov 经验公式与 Philip 模型和 Green-Ampt 模型都可较好地描述原状土扰动土累积入渗量的变化过程,其中 Kostiakov 经验公式模拟效果更好。

参考文献:

[1] Ma W M, Zhang X C, Zhen Q, et al. Effect of soil texture on water infiltration in semiarid reclaimed land[J]. Water Quality Research Journal of Canada,2016,51(1): 33-41.

[2] 雷志栋,杨诗秀,谢森传.土壤水动力学[M].北京:清华大学出版社,1988.

[3] 郭忠升,邵明安.半干旱区人工林地土壤入渗过程分析[J].土壤学报,2009,46(5):953-958.

[4] 刘贤赵,康绍忠.黄土高原沟壑区小流域土壤入渗分布

规律的研究[J].吉林林学院学报,1997,13(4):203-208.

[5] Han Y G, Yu X X, Yang P L, et al. Dynamic study on water diffusivity of soil with super-absorbent polymer application[J]. Environmental Earth Sciences, 2013, 69 (1):289-296.

[6] Szymkiewicz A. Approximation of internodal conductivities in numerical simulation of one-dimensional infiltration, drainage, and capillary rise in unsaturated soils[J] Water Resources Research,2009,45(10):2815-2839.

[7] 李卓,吴普特,冯浩,等.容重对土壤水分入渗能力影响模拟试验[J].农业工程学报,2009,25(6):40-45.

[8] 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.

[9] 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.

[10] 肖庆礼,黄明斌,邵明安,等.黑河中游绿洲不同质地土壤水分的入参与再分布[J].农业工程学报,2014,30 (2):124-131.

[11] 毕慈芬,邵源林,王富贵,等.防止砒砂岩地区土壤侵蚀的水土保持综合技术探讨[J].泥沙研究,2003,6(3): 63-65.

[12] 叶浩,石建省,侯宏冰,等.内蒙古南部砒砂岩岩性特征对重力侵蚀的影响[J].干旱区研究,2008,25(3):402-405.

[13] 徐双民,田广源.沙棘治理砒砂岩技术探索[J].国际沙

- 棘研究与开发,2008,6(3):17-20.
- [14] 王愿昌,吴永红,寇权,等.砒砂岩分布范围界定与类型区划分[J].中国水土保持科学,2007,5(1):14-18.
- [15] 金争平,苗宗义,王正文,等.砒砂岩区水土保持与农牧业发展研究[M].郑州:黄河水利出版社,2003:1-15.
- [16] 石迎春,叶浩,候宏冰,等.内蒙古南部砒砂岩侵蚀内因分析[J].地球学报,2004,25(6):659-664.
- [17] 叶浩,石建省,程彦培,等.砂岩重力侵蚀定量计算的GPS、GIS方法初探[J].地球学报,2004,25(4):479-482.
- [18] 叶浩,石建省,李向全.砒砂岩岩性特征对抗侵蚀性影响分析[J].地球学报,2006,27(2):145-150.
- [19] 王晓.砒砂岩区小流域泥沙来源研究[J].中国水土保持,2000(4):17-19.
- [20] 王全九,邵明安.非饱和土壤导水特性分析[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1998,4(6):16-22.
- [21] 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.
- [22] 张振华,谢恒星,刘继龙,等.PAM对一维垂直入渗特征量影响的试验研究[J].中国农村水利水电,2006(3):75-77.
- [23] 张振华,谢恒星,刘继龙,等.气相阻力与土壤容重对一维垂直入渗影响的定量分析[J].水土保持学报,2005,19(4):36-39.
- [24] Lipiec J, Kuś J, Słowińska-Jurkiewicz A, et al. Soil porosity and water infiltration as influenced by tillage methods[J]. Soil and Tillage Research, 2006, 89(2): 210-220.
- [25] 费良军,谭奇林,王文焰,等.充分供水条件下电源入渗特性及其影响因素[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1999,5(2):70-74.
- [26] Kutilek M. Soil hydraulic properties as related to soil structure[J]. Soil and Tillage Research, 2004, 79(2): 175-184.
- [27] 金争平,史培军.内蒙古半干旱地区土壤侵蚀过程的研究[J].干旱区资源与环境,1987,1(2):57-66.
- [28] 白文波,宋吉青,李茂松,等.保水剂对土壤水分垂直入渗特征的影响[J].农业工程学报,2009,25(2):18-23.
- [29] 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.
- [30] Mollerup M. Philip's infiltration equation for variable-head ponded infiltration[J]. Journal of Hydrology, 2007, 347:173-176.
- [31] Furman A, Warrick A W, Zerihun D, et al. Modified Kostiaikov infiltration function: Accounting for initial and boundary conditions[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2006, 132(6):587-596.
- [32] Ma Y, Feng S Y, Su D Y, et al. Modeling water infiltration in a large layered soil column with a modified Green-Ampt model and HYDRUS-1D[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2010, 71(1):40-47.
- [33] Cheng X G, Huang M B, Si B C, et al. The differences of water balance components of Caragana korshinskii grown in homogeneous and layered soils in the desert: Loess Plateau transition zone[J]. Journal of Arid Environments, 2013, 98(11):10-19.
- (上接第127页)
- [9] 谭波,郑建龙,张锐.宁明膨胀土三向胀缩规律室内试验研究[J].公路交通科技,2014,31(4):1-6.
- [10] 杨和平,张锐,郑健龙.有荷条件下膨胀土的干湿循环胀缩变形及强度变化规律[J].岩土工程学报,2006,28(11):1936-1941.
- [11] 魏星,王刚.干湿循环作用下击实膨胀土胀缩变形模拟[J].岩土工程学报,2014,36(8):1423-1431.
- [12] 李志清,余文龙,付乐,等.膨胀土胀缩变形规律与灾害机制研究[J].岩土力学,2014,31(2):270-275.
- [13] 谭云志,喻波,刘晓玲,等.压实红黏土失水收缩过程的孔隙演化规律[J].岩土力学,2015,36(2):369-375.
- [14] 朱建群,龚琰,胡大伟,等.干湿循环作用下红黏土收缩特征研究[J].冰川冻土,2016,38(4):1028-1035.
- [15] 黄丁俊,张添锋,孙德安,等.干湿循环下压实红黏土胀缩特性试验研究[J].水文地质工程地质,2015,42(1):79-86.
- [16] 王莹莹,张文慧,朱德志.初始含水率对红黏土胀缩变形特性的影响试验研究[J].科学技术与工程,2014,14(6):242-246.