

荒漠草原不同土壤类型水分入渗特征

陈娟^{1,2}, 陈林^{1,2}, 宋乃平^{1,2}, 李月飞^{1,2}, 苏莹^{1,2}, 杨东东^{1,2}

(1. 宁夏大学西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室, 银川 750021;

2. 宁夏大学西北土地退化与生态恢复国家重点实验室培育基地, 银川 750021)

摘要: 为了研究荒漠草原不同土壤类型对降水的响应过程, 在宁夏盐池县皖记沟村选取分布较广的灰钙土、风沙土和基岩风化残积土为研究对象, 采用双环法测定其入渗过程, 分析并比较三者的入渗特征, 利用模型拟合土壤入渗过程。结果表明: 研究区内3种类型土壤入渗过程大致可分为3个阶段, 0~5 min入渗速率急剧下降阶段, 5~10 min入渗速率逐渐变缓并趋于稳定及30 min后入渗速率达到相对稳定的状态。通过对不同土壤初始入渗速率、稳定入渗速率及60 min累积入渗量对比分析, 发现不同土壤类型的入渗特征存在差异, 风沙土的入渗性能最好, 基岩风化残积土次之, 灰钙土入渗性能最差, 原因是由于不同土壤结构的差异所导致。各土壤类型物理性质的差异性分析表明, 土壤的机械组成和非毛管孔隙度是影响研究区土壤入渗的主要因素。利用4种土壤入渗模型拟合不同类型土壤的入渗过程, 通用经验模型更适宜于描述研究区内土壤入渗速率随时间变化的情况。

关键词: 水分入渗; 入渗特征; 土壤类型; 荒漠草原

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)04-0018-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.04.004

Soil Infiltration Characteristics of Different Soils Types in Desert Steppe

CHEN Juan^{1,2}, CHEN Lin^{1,2}, SONG Naiping^{1,2},

LI Yuefei^{1,2}, SU Ying^{1,2}, YANG Dongdong^{1,2}

(1. Key Laboratory of Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystem in North-Western China, Ministry of Education, Ningxia University, Yinchuan 750021; 2. Breeding Base for State Key Laboratory of Land Degradation and Ecological Restoration of North-western China, Ningxia University, Yinchuan 750021)

Abstract: In order to study the response process of different soil types in desert steppe to precipitation, the sierozem, aeolian sandy soil, and bedrock weathered residual soil were selected as the research objects in Wanjigou village, Yanchi country, Ningxia. The infiltration process was determined by double-ring sampling method, and the infiltration characteristics of the three were analyzed and compared. The models were used to fit the soil infiltration process. The results indicated that three types of soil infiltration process can be divided into three stages. The first stage was from 0 to 5 minutes, in which the infiltration rate decreased rapidly; during 5 min to 10 min, the infiltration rate brought a gradual decreased and tended to be stable, and reached a relatively stable state after 30 min. By comparing the initial infiltration rate, stable infiltration rate and cumulative infiltration rate of 60 minutes in different soils, it was found that the infiltration characteristics of different soil types were different. Soil infiltration of the aeolian sandy soil was the best, followed by bedrock weathered residual soil, while sierozem was the worst. The differences in soil infiltration characteristics were caused by the differences in soil structures. The analysis of the differences in soil physical properties showed that the mechanical composition and non-capillary porosity were the main factors affecting soil infiltration in the study area. Using four soil infiltration models to fit the infiltration process of different types of soil, the universal empirical model was more suitable for describing the change of soil infiltration rate with time in the study area.

收稿日期: 2018-03-12

资助项目: 国家自然科学基金项目(41461046); 宁夏高等学校一流学科建设(生态学)项目(NXYLXK2017B06); 国家重点研发计划项目(2016YFC0500709)

第一作者: 陈娟(1993—), 女, 硕士研究生, 主要从事恢复生态学研究。E-mail: chenjuan923@qq.com

通信作者: 宋乃平(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事土地利用与生态过程研究。E-mail: songnp@163.com

Keywords: water infiltration; infiltration characteristics; soil type; desert steppe

荒漠草原由于长期的自然条件和人为过度开垦导致草地植被及其物理生境退化。针对于此,近年来普遍采取了引种补播、营造灌木林、围栏禁牧等一系列恢复措施,遏制了草地退化的势头。然而,退化草地根本性恢复的重点在于其生境的恢复^[1]。生态—水文过程已经成为生态系统恢复研究中的热点之一^[2]。水分是荒漠草原区域生态系统的主要限制因素,决定了植物群落类型、分布、结构和组成。土壤水文过程与土壤类型密切相关。因此,研究荒漠草原不同土壤类型下的土壤水文特征,有助于采取更加有针对性的草地恢复措施。

目前学者们对土壤入渗展开了一系列研究,并取得了丰富的成果。解文艳等^[3]研究表明,土壤质地由重变轻,土壤的入渗能力由小变大;入渗能力与土壤砂粒含量呈正相关,与黏粒含量呈负相关;Helalia^[4]研究表明,土壤入渗能力与土壤的毛管孔隙度和非毛管孔隙度密切相关,并与非毛管孔隙度相关最大;刘目兴等^[5]用了室内环刀法研究了不同初始含水率下土壤的入渗特征;吴军虎等^[6]采用一维土柱入渗试验装置研究了有机质含量及容重对土壤入渗性能的影响;陈文媛等^[7]采用原状土柱入渗法研究不同土地利用方式的土壤入渗性能;赵景波等^[8]利用双环法测定了沙层水分入渗性能,结果表明沙层具有入渗率高、达到稳定入渗快、入渗率变化小等特点;李贵玉等^[9]研究了黄土丘陵区不同地类的土壤入渗性能,认为表层入渗能力的提高对整个土壤入渗能力的提高十分重要。以上成果为研究土壤入渗特征积累了思路和方法。我国干旱半干旱区土壤入渗的研究多集中于黄土高原地区,但对于地理过渡性质明显、土壤空间异质性较大的荒漠草原地区的研究较少。荒漠草原经过长期人为和自然的干扰引起原生生境退化、破碎化,退化草地恢复的关键在于土壤的水文特征。因此,本文以宁夏盐池县荒漠草原为研究对象,选取灰钙土、风沙土和基岩风化残积土3种不同类型的土壤,研究其土壤入渗特征,为制定更加合理的恢复措施提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于宁夏回族自治区盐池县皖记沟村(37°47′—37°57′N,107°22′—107°33′E)。该区位于宁夏东部,北与毛乌素沙地相连,南接黄土高原,属于中温带半干旱区,年均气温8.1℃,≥10℃有效积温2 949.9℃,年日照时间2 867.9 h,多年平均降水量280 mm,主要分布在7—9月,占全年降水的60%以

上。年蒸发量2 136 mm,年无霜期162 d。灰钙土、黑垆土和风沙土为主要的土壤类型,此外还有较大面积的风化砂岩残积物。土壤质地多为沙壤、粉砂壤和沙土,结构松散,肥力较低。植被类型主要有干草原、荒漠草原、沙生及隐域性的盐生植被和草甸植被。研究区主要植物种有:短花针茅(*Stipa breviflora*)、猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)、猪毛菜(*Salsola collina* Pall.)、蒙古冰草(*Agropyron mongolicum*)、苦豆子(*Sophora alopecuroides* L.)、赖草(*Leymus secalinus*)、雾冰藜(*Bassia dasyphylla*)和糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)等。

1.2 研究方法

1.2.1 样地选择 于2017年6月19日在杨寨子自然村和皖记沟自然村选择地势较为平坦的灰钙土、风沙土和基岩风化残积土3种土地作为样地。其中灰钙土样地主要植物种为针茅,风沙土和基岩风化残积土样地主要植物种为猪毛蒿。

1.2.2 入渗试验方法 本研究入渗试验采用双环入渗仪,其内外环直径分别为30,60 cm。入渗试验前先将待测地面的草本植被修剪至近似地面平整,再将双环压入到土壤表面以下约15 cm。并保持入渗水头高度5 cm,同时使内外环水位齐平以防止侧渗。试验开始后按照先密后疏的原则记录入渗水量,当单位时间内注入水量基本保持稳定时结束试验。入渗试验在每种土壤类型样地重复3组,取代表性最强的一组作为该土壤类型的入渗特征曲线。

1.2.3 土壤物理性质的测定 在不同土壤类型样地中均选3个样点,用环刀法采集原状土,采样深度为0—5 cm。采集后带回室内进行土壤容重、含水量、孔隙度等物理性质的测定。3个样点的混合土样在通风阴凉处风干,过2 mm筛,使用马尔文3000激光粒度仪检测土壤粒径。土壤硬度采用数显式土壤紧实度仪(USA,SC-900)测量。

1.2.4 入渗模型 试验样地的入渗曲线分别采用Kostiakov模型、Horton模型、Philip模型和通用经验模型进行拟合,各模型方程为:

(1)Kostiakov模型

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

式中: $f(t)$ 为入渗速率(mm/min); t 为入渗时间(min); a 、 b 为拟合的模型参数。

(2)Horton模型

$$f(t) = f_c + (f_0 - f_c)e^{-bt}$$

式中: $f(t)$ 为入渗速率(mm/min); t 为入渗时间(min); f_0 为初渗率(mm/min); f_c 为稳渗率(mm/

min); k 为模型参数。其中参数 k 决定 f 从 f_0 减小到 f_c 的速度。

(3) Philip 模型

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

式中: $f(t)$ 为入渗速率 (mm/min); t 为入渗时间 (min); S 为土壤吸渗率 (mm/min^{0.5}); A 为稳定入渗率 (mm/min)。

(4) 通用经验模型

$$f(t) = a_1 t^{-n} + b_1$$

式中: $f(t)$ 为入渗速率 (mm/min); t 为入渗时间 (min); a_1, b_1 为拟合的模型参数; n 为经验系数。

1.2.5 数据处理与分析 采用 Excel 2010 进行统计与分析, 采用 SPSS 21.0 对土壤物理性质进行差异性分析, 采用 Origin 2017 进行模型拟合。

2 结果与分析

2.1 不同土壤类型的物理特征

影响土壤入渗特性的主要因素有土壤质地、土壤容

重、孔隙度、含水量、有机质含量等, 不同土壤类型的土壤物理性质具有差异, 从而影响土壤的入渗性能。

表 1 为荒漠草原地区 3 种土壤的物理性质。灰钙土的硬度显著高于风沙土和基岩风化残积土, 基岩风化残积土表层由于混杂有少量风沙土, 硬度略高于风沙土。风沙土的容重最大, 基岩风化残积土次之, 灰钙土最小, 且灰钙土和风沙土、基岩风化残积土的容重具有显著差异。由于风蚀作用, 风沙土和基岩风化残积土砂粒较大且含量较多, 土壤粗化。王蕙等^[10]研究表明, 随着土壤粗粒化, 土体分散, 土壤结构遭到破坏, 使土壤容重增加, 总孔隙度降低。本研究中土壤的总孔隙度和毛管孔隙度的变化规律与容重相反, 表现为: 灰钙土 > 基岩风化残积土 > 风沙土; 非毛管孔隙度表现为: 风沙土 > 基岩风化残积土 > 灰钙土。毛管孔隙具有毛细作用, 持水性能较强; 而非毛管孔隙的孔隙直径大, 其中的水分主要受重力作用, 通气和渗水能力较强^[11]。这表明风沙土较基岩风化残积土和灰钙土具有更高的非毛管空隙, 更有利于水分的入渗。

表 1 同列不同类型土壤物理性质对比

土壤类型	土壤容重/ (g·cm ⁻³)	土壤 硬度/kPa	饱和 含水率/%	含水率/ %	毛管 孔隙度/%	总孔 隙度/%	非毛管 孔隙度/%	机械组成/%		
								粗砂粒 (2~0.1 mm)	细砂粒 (0.1~0.05 mm)	黏粉粒 (<0.05 mm)
灰钙土	1.49±0.02a	1963.20±338.81a	29.27±0.76a	4.84±0.65a	41.19±0.91a	43.66±0.73a	2.47±0.81a	2.48±0.71a	47.23±4.97a	50.29±5.56a
风沙土	1.58±0.02b	651.90±54.81b	23.94±0.93b	3.74±0.59a	33.88±0.87c	40.32±0.83b	6.45±0.16b	14.33±4.59c	73.84±3.37b	11.83±31.51b
基岩风化残积土	1.57±0.01b	806.60±106.79b	24.59±0.93b	4.29±0.65a	37.24±1.44b	40.63±0.43b	3.40±1.17a	27.14±2.21b	64.56±2.21b	8.30±0.84b

注: 同列不同字母表示在 $P < 0.05$ 水平上差异显著。

土壤质地通常由黏粒、粉粒和砂粒的百分比来表征, 不同质地的土壤由于各种矿物颗粒所占的比例和粗细状况不同, 使土壤的保水、透水能力差异很大。本研究表明, 灰钙土的黏粉粒 (<0.05 mm) 含量达到 50.29%, 显著高于风沙土和基岩风化残积土。而风沙土和基岩风化残积土的砂粒含量较高, 均大于 88%, 其中细砂粒 (0.1~0.05 mm) 为主要机械组成成分, 风沙土和基岩风化残积土的细砂粒含量分别为 73.84%, 64.56%。

研究区干旱少雨, 3 种土壤的含水率均较低, 介于 3%~5%, 无显著差异; 灰钙土的饱和含水率显著高于其他两类土壤, 含水率和饱和含水率的大小依次为灰钙土 > 基岩风化残积土 > 风沙土。

2.2 不同土壤类型水分入渗特征

2.2.1 土壤入渗过程 土壤入渗过程一般分为 3 个阶段^[12]: 渗透初期分子力作用下的入渗瞬变阶段、毛管力和重力作用的渗漏阶段和重力作用下的稳定入渗阶段。从 3 种类型土壤水分入渗过程 (图 1) 可见, 水分入渗速率均表现为初期入渗速率非常高, 之后又迅速下降, 随着时间的推移, 逐渐稳定, 并达到稳定入渗速率的规律。前 5 min 内, 入渗速率急剧下降; 10

min 后入渗速率逐渐减慢; 在瞬变和渗漏阶段, 入渗速率曲线波动较大, 30 min 后 3 种土壤的水分入渗速率均能达到相对稳定的状态。整个入渗过程中, 灰钙土的入渗速率较低, 入渗速率曲线也较为稳定, 风沙土反之。不同土壤类型水分入渗达到相对稳定阶段的时间存在一定差异, 灰钙土达到稳定入渗的时间最短, 约为 20 min, 基岩风化残积土次之, 约为 24 min, 风沙土用时最长, 约为 30 min。

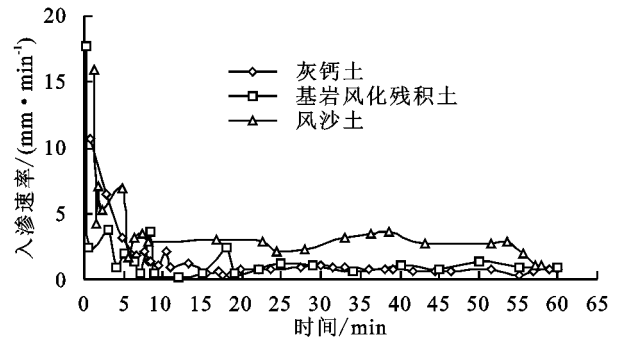


图 1 3 种类型土壤的入渗过程

2.2.2 土壤入渗特征 从表 2 可知, 不同土壤类型的入渗特征差异比较明显。初始入渗速率、稳定入渗速率、前 60 min 累积入渗量由大到小的顺序均为风沙土 > 基岩风化残积土 > 灰钙土。有研究^[13]表明,

初始入渗速率反映了土壤的物理性能;稳定入渗速率与土壤的饱和导水率相等或接近,常被用作定量描述土壤渗透能力的综合指标。

表2 3种类型土壤入渗特征参数

土壤类型	灰钙土	风沙土	基岩风化残积土
初始入渗速率/(mm·min ⁻¹)	2.86	5.98	3.96
稳定入渗速率/(mm·min ⁻¹)	0.67	2.43	0.88
60 min 累积入渗量/mm	52.22	114.47	73.98

累积入渗量为水分在某时间段内通过单位地面积的总入渗量。从图2可以看出,3种土壤类型的累积入渗曲线均表现为在水分入渗初期累积入渗量增长较快,之后随着时间的推移而逐渐趋于稳定。不同土壤的累积入渗量具有明显差异,且在入渗后期差异逐渐增大,在60 min内,风沙土的累积入渗量最大,达到114.47 mm;基岩风化残积土次之,为73.98 mm;灰钙土最小,仅为52.22 mm。可见,风沙土的土壤渗透性能较好,基岩风化残积土次之,灰钙土入渗性能较差。风沙土结构松散,由于风蚀作用,较细的颗粒被风吹蚀,留下的土壤砂粒含量增多,土壤机械组成较为单一,土粒间空隙大,易分散,连通性好,毛管力和持水性弱,漏水严重^[14]。基岩风化残积土也是由于母岩含砂量高及风蚀作用,土壤表层砂质化程度较高,结构较为松散,但20 cm以下主要为母岩,结构坚硬且有钙积层分布。通常情形下,钙积层非常黏重,持水能力强,根系很难穿透,是其所在区域主要的土壤障碍层^[15]。Gile等^[16]研究表明,土壤水分与植物根系的分布范围受控于钙积层,钙积层影响了土壤水分运动和根系的生长。因此基岩风化残积土入渗后期入渗速率在一定程度上受到了钙积层的阻碍。而灰钙土质地、结构较为均一,结构紧实,硬度较大,水分不易下渗。

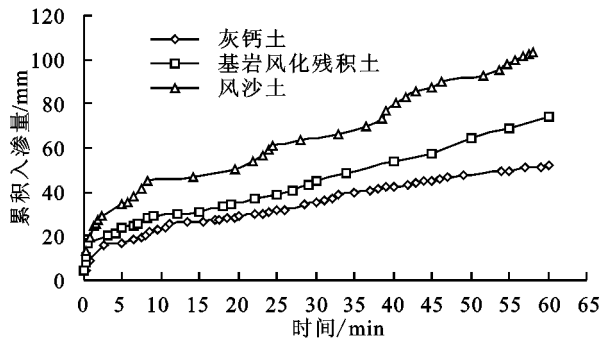


图2 3种类型土壤的60 min累积入渗量

2.3 土壤入渗模型分析

土壤水分入渗是一个复杂的物理过程,国内外学者在研究土壤入渗过程中建立了许多入渗模型来模拟入渗速率随时间变化的规律。根据模型是否具有

物理意义分为两类:一类是物理模型,包括 Horton 模型和 Philip 模型;另一类是经验模型,包括 Kostiaikov 模型和通用经验模型。为进一步研究不同土壤类型对入渗过程的影响,选用以上4个模型对土壤入渗过程进行模拟。由表3可知,4种模型的决定系数 R^2 均在0.82以上,说明拟合效果良好。

Kostiakov 模型中,参数 a 为经验入渗系数,在数值上近似等于前2 min的入渗速度, a 值的大小与初始入渗速率呈正比;灰钙土、基岩风化残积土、风沙土的 a 值分别为7.903, 8.524, 13.150,与实测初始入渗率的大小顺序一致,说明拟合结果与实测值偏差较小。参数 b 为经验入渗指数,反映了土壤入渗能力的衰减速度, b 值的大小与入渗能力的衰减速度呈正比。 b 值在基岩风化残积土样地中最大,在风沙土样地中最小。

Horton 模型中,参数 f_0 代表初始入渗速率,反映的情况与实测值有一定偏差。参数 f_c 代表稳定入渗率,表现为风沙土>基岩风化残积土>灰钙土,与实测值大小顺序一致。参数 k 是经验常数,决定着土壤水分入渗过程中达到稳渗速率的快慢, k 值越大,则越快达到稳定入渗速率。因此由拟合结果看出,基岩风化残积土最先达到稳渗状态,灰钙土次之,风沙土最慢,与实测结果灰钙土最先达到稳渗状态有所不同。

Philip 模型中,参数 S 表示土壤吸渗率,反映了土壤入渗能力的大小, S 值越大,表示土壤入渗能力越强。从拟合结果来看, S 值大小依次为基岩风化残积土>风沙土>灰钙土。与实测值存在一定偏差。

通用经验模型中,参数 a_1 、 b_1 分别表示初始入渗速率和稳定入渗速率,从拟合结果可以看出,风沙土的初始入渗速率和稳定入渗速率最高,其次是基岩风化残积土,灰钙土最小,其结果与实测值大小顺序一致,说明拟合结果与实测值偏差较小。

通过比较拟合模型的决定系数 R^2 可以判定4种模型的拟合效果, R^2 越大,模型拟合效果越好。对于灰钙土,模型拟合的效果依次为 Kostiakov 模型、通用经验模型、Philip 模型和 Horton 模型;对于风沙土,模型拟合效果依次为通用经验模型、Horton 模型、Kostiakov 模型和 Philip 模型;对于基岩风化残积土,模型拟合效果依次为和 Horton 模型、Kostiakov 模型、通用经验模型和 Philip 模型。

综合以上模型的决定系数 R^2 和各参数所反映的结果进行分析,通用经验模型的 R^2 介于0.889~0.974,较其他3个模型高,且参数反映的结果与实测值的偏差较小,表明通用经验模型更适宜于描述本研究区土壤入渗速率随时间变化的过程。

表 3 4 种土壤入渗模型的拟合参数

土壤类型	Kostiakov 模型			Horton 模型				Philip 模型			通用经验模型			
	$f(t)=at^{-b}$			$f(t)=f_c+(f_0-f_c)e^{-kt}$				$f(t)=St^{-0.5}+A$			$f(t)=a_1t^{-n}+b_1$			
	a	b	R^2	f_c	f_0	k	R^2	A	S	R^2	a_1	b_1	n	R^2
灰钙土	7.903	0.657	0.975	0.868	32.555	1.614	0.933	-0.982	10.253	0.958	7.894	0.004	0.658	0.974
风沙土	13.150	0.631	0.854	2.720	45.853	1.526	0.888	-0.284	13.766	0.824	8.665	2.260	1.023	0.911
基岩风化残积土	8.524	0.817	0.892	0.985	85.963	4.262	0.934	-2.479	15.885	0.842	8.104	0.310	0.838	0.889

3 讨论

荒漠草原区土壤发育程度不高,质地粗,孔隙大,碳酸钙含量高,有机质含量低,这些性状既有有利于水分入渗的,也有不利于水分入渗的。同时,这些性状在灰钙土、风沙土和基岩风化残积土中的组合不同使得 3 类土壤的入渗性能有较大差别。熊东红等^[17]研究发现,砂黏比与土壤初始入渗率、稳定入渗率、累积入渗量均呈显著正相关关系;郑存德等^[18]通过室内培养试验证实,随含砂量增加,土壤容重、非毛管孔隙度增加,总孔隙度与毛管孔隙度均减少,持水量减少;解文艳等^[3]研究表明,土壤黏粒含量越高,颗粒越细,固相比表面积越大,土壤颗粒表面能越高,对水分的吸附能力越强;土壤的饱和含水率与土壤水分保持和蓄集的能力呈正比^[19],与本研究结果一致。可见,土壤物理性质的差异在一定程度上影响了土壤的入渗特征。也有研究^[20]表明,土壤容重越大,土壤越紧实,孔性越差,入渗性能越差;容重越小,土壤越松散,孔性越好,入渗性能越好,而本研究中没有呈现相同的结果,是由于不同类型的土壤本身的条件与结构不同,入渗性能最好的风沙土在 3 类土壤中容重最大,入渗性能最差的灰钙土容重却最小,主要是由于风沙土砂粒含量高,硬度低;且荒漠草原区土壤有机质含量低,容重对渗透性能的影响较小^[6],说明土壤机械组成的差异是影响这 3 类土壤容重大小的主要因素。本研究中土壤的含水率虽与入渗性能呈反比,但研究区气候干旱,土壤含水率仅为 3%~5%,且无显著差异,因此认为含水率对入渗性能的影响较小。风沙土砂粒含量高,其较高的渗透性很大程度上取决于其松散的土壤结构和土粒间的大孔隙,有研究^[21]表明,粗粒土层的孔隙度虽不一定高,但构成的孔隙直径较大,决定了孔隙的连通性较好,利于水分下渗。灰钙土的容重较其他两种土壤小,但渗透性能却最低,说明在研究区域内容重不是影响水分入渗的主要因素,入渗速率慢可能是由于灰钙土土壤结构紧实,黏粉粒含量高,CaCO₃ 含量高,非毛管孔隙度低造成的。基岩风化残积土表层松散,利于入渗,但下层的钙积层阻碍了水分的入渗,土壤质地的不均一使入渗性能较小。因此土壤的机械组成和非毛管孔隙度是影响研究区域内土壤入渗的主要因素。本研究仅从水分入

渗的角度分析了不同土壤入渗的差异,今后应综合考虑土壤质量和植物的因素并加以研究。

4 种入渗拟合模型的结果表明,通用经验模型对本研究区的土壤入渗过程拟合效果最好。虽然 Kostiakov 模型拟合灰钙土的决定系数 R^2 略高于通用经验模型,但 Kostiakov 模型中,当 t 无穷大时, $f(t)$ 趋向于 0,与实测情况不符,因此该模型在物理概念上还不够严谨;而通用经验模型中, t 无限大时, $f(t)$ 则为 b_1 ,也就是稳定入渗速率。且通用经验模型的决定系数 R^2 介于 0.889~0.974,说明通用经验模型更适用于描述本研究区域的土壤入渗特征,这与陈文媛等^[7]对黄土丘陵区土壤的研究结果相一致。赵景波等^[8]对腾格里沙丘沙层水分渗透的研究表明,Kostiakov 模型最适宜沙丘水分的研究,而通用经验模型不适宜,这与本文结果不同,有研究^[22]认为 Kostiakov 模型适用于入渗率较高的情况,也有研究^[23]表明,Kostiakov 模型适用于毛乌素沙地南缘人工柠条林地,而同样在毛乌素沙地,李柏^[24]研究表明,油蒿、杨柴和花棒群落均以 Horton 模型描述水分入渗过程最为适宜,这可能是由于植物群落的不同,不同区域适用的入渗模型存在差别。本研究中,Philip 模型在 4 个模型中效果较差,与许多学者^[25]的研究结果一致。土壤的入渗特征存在着很大的空间变异性,因此在今后的试验中应增加样点的数目,筛选出更为精确的入渗模型。

4 结论

(1) 试验结果表明,初始入渗速率、稳定入渗速率、前 60 min 累积入渗量由大到小顺序均为风沙土>基岩风化残积土>灰钙土。由于荒漠草原区土壤发育程度低,3 类土壤的入渗性能主要取决于土壤的机械组成和非毛管孔隙度。研究区内 3 种类型土壤的水分入渗过程大致可以分为 3 个阶段:0~5 min 呈急剧下降阶段,5~10 min 下降速率逐渐变缓并趋于稳定,30 min 后达到相对稳定的状态。

(2) 4 种入渗拟合模型的结果表明,通用经验模型对本研究区的土壤入渗过程拟合效果最好,Philip 模型在 4 个模型中效果较差,其他两个模型分别对灰钙土和基岩风化残积土的模拟效果略好于通用经验模型。

参考文献:

- [1] 李新荣,张志山,刘玉冰,等.长期生态学研究引领中国沙区的生态重建与恢复[J].中国科学院院刊,2017,32(7):790-797.
- [2] 李新荣,张志山,黄磊,等.我国沙区人工植被系统生态—水文过程和互馈机理研究评述[J].科学通报,2013(5):397-410.
- [3] 解文艳,樊贵盛.土壤质地对土壤入渗能力的影响[J].太原理工大学学报,2004,35(3):272-275.
- [4] Helalia A M. The relation between soil infiltration and effective porosity in different soils[J]. Agricultural Water Management, 1993, 24(1):39-47.
- [5] 刘目兴,聂艳,于婧.不同初始含水率下黏质土壤的入渗过程[J].生态学报,2012,32(3):871-878.
- [6] 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.
- [7] 陈文媛,张少妮,华瑞,等.黄土丘陵区林草恢复进程中土壤入渗特征研究[J].北京林业大学学报,2017,39(1):62-69.
- [8] 赵景波,马延东,邢闪,等.腾格里沙漠宁夏回族自治区中卫市沙层水分入渗研究[J].水土保持通报,2011,31(3):12-16.
- [9] 李贵玉,胡慧方,廖建文,等.黄土丘陵区不同地类土壤入渗性能研究[J].中国水土保持,2010(12):36-40.
- [10] 王蕙,赵文智,武利玉.河西走廊荒漠区土壤物理性质沿降水梯度的变化[J].水土保持通报,2010,30(6):46-51.
- [11] 李红,范素芳,张光灿,等.黄土丘陵区退耕还林后不同林地土壤孔隙与贮水特性[J].水土保持通报,2010,30(1):27-30.
- [12] 魏恒,赵成义,孙栋元.塔里木河上游绿洲典型地表特征土壤水分入渗性能研究[J].冰川冻土,2010,32(4):837-843.
- [13] 王佩将,戴全厚,丁贵杰,等.喀斯特地区植被恢复过程中土壤渗透性能及其影响因素[J].中国水土保持科学,2012,10(6):12-18.
- [14] 吴楠,梁少民,王红玲,等.动物践踏干扰对生物结皮下微生物生态分布的影响[J].干旱区研究,2006,23(1):50-55.
- [15] 彭海英,童绍玉,李小雁.内蒙古典型草原土壤及其水文过程对灌丛化的响应[J].自然资源学报,2017,32(4):642-653.
- [16] Gile L H, Peterson F F, Grossmon R B. Morphological and genetic sequences of carbonate accumulation in desert soils[J]. Soil Science, 1966, 101(5):347-360
- [17] 熊东红,翟娟,杨丹,等.元谋干热河谷冲沟集水区土壤入渗性能及其影响因素[J].水土保持学报,2011,25(6):170-175.
- [18] 郑存德,程岩,张明明.质地对土壤物理性质的影响及调节研究[J].干旱区资源与环境,2014,28(4):174-178.
- [19] 王强.老砂田土壤容重和饱和含水率的测定[J].甘肃农业科技,2016(8):46-49.
- [20] 林代杰,郑子成,张锡洲,等.不同土地利用方式下土壤入渗特征及其影响因素[J].水土保持学报,2010,24(1):33-36.
- [21] 赵景波,陈颖,曹军骥,等.青海湖西北部土壤入渗规律研究[J].陕西师范大学学报(自然科学版),2011,39(3):90-96.
- [22] 刘洁,李贤伟,纪中华,等.元谋干热河谷3种植被恢复模式土壤贮水及入渗特性[J].生态学报,2011,31(8):2331-2340.
- [23] 刘凯,王磊,宋乃平,等.毛乌素沙地南缘不同林龄人工柠条林土壤渗透性研究[J].干旱区资源与环境,2013,27(5):89-94.
- [24] 李柏.不同荒漠生态系统生物结皮分布及水文特征研究[D].北京:北京林业大学,2015.
- [25] 姚宝林,李光永,李发永.南疆滴灌棉田休闲期土壤入渗特性研究[J].中国农业科学,2014,47(22):4453-4462.
- [14] 刘国彬.黄土高原草地土壤抗冲性及其机理研究[J].水土保持学报,1998,4(1):93-96.
- [15] 中国科学院林业土壤研究所.中国东北土壤[M].北京:科学出版社,1980:193-349.
- [16] 陈肖柏,刘建坤,刘鸿绪,等.土的冻结作用与地基[M].北京:科学出版社,2006:132.
- [17] 魏霞,李勋贵, Huang C H,等.交替冻融对坡面产流产沙的影响[J].农业工程学报,2015,31(13):157-163.
- [18] 周丽丽,王铁良,范昊明,等.未完全解冻层对黑土坡面降雨侵蚀的影响[J].水土保持学报,2009,23(6):1-4.
- [19] Sharratt B S, Lindstrom M J. Laboratory simulation of erosion from a partially frozen soils [C]//Ascough J C, Flanagan D C. Soil Erosion Research for the 21st Century. St. Joseph, MI: ASAE, 2001:159-162.
- [20] 刘彦辰,王瑄,周丽丽,等.冻融坡面土壤剥蚀率与侵蚀因子关系分析[J].农业工程学报,2016,32(8):136-141.
- [21] 范昊明,郭萍,武敏,等.春季解冻期白浆土融雪侵蚀模拟研究[J].水土保持通报,2011,31(6):130-133.
- [22] 周丽丽,范昊明,武敏,等.白浆土春季解冻期降雨侵蚀模拟[J].土壤学报,2010,47(3):574-578.
- [23] Ban Y, Lei T, Chen C, et al. Study on the facilities and procedures for meltwater erosion of thawed soil [J]. International Soil and Water Conservation Research, 2016, 4(2):142-147.
- [24] 刘目兴,聂艳,于婧.不同初始含水率下黏质土壤的入渗过程[J].生态学报,2012,24(3):871-878.
- [25] 朱冰冰,张平仓,丁文峰,等.长江中上游地区土壤入渗规律研究[J].水土保持通报,2008,28(4):43-47.
- [26] 甘凤玲,何丙辉,王涛.汶川震区滑坡堆积体坡面人工降雨入渗模拟研究[J].水土保持学报,2015,29(6):19-24.

(上接第17页)