

# 黄河源区高寒草地草毡层滑塌体入渗特性及其适宜模型

徐得忠<sup>1</sup>, 李华坦<sup>1</sup>, 张鹏飞<sup>1</sup>, 王泽磊<sup>1</sup>, 梁 桑<sup>2</sup>, 庞景豪<sup>2</sup>, 刘亚斌<sup>2,3</sup>

(1.中国地质调查局 西宁自然资源综合调查中心, 青海 西宁 810000;

2.青海大学 地质工程学院, 青海 西宁 810016; 3.青藏高原北缘新生代资源环境重点实验室, 青海 西宁 810016)

**摘要:** [目的] 明确黄河源区高寒草地草毡层滑塌体入渗过程及特征, 为黄河源区高寒草地草毡层滑塌变形破坏防治和水土保持工作提供数据基础和理论依据。[方法] 以黄河源区高寒草地草毡层滑塌体为研究对象, 通过双环入渗试验, 获得黄河源鄂陵湖区斜坡草毡层滑塌体入渗速率与时间关系曲线, 明确适宜入渗模型。[结果] 黄河源区高寒草地草毡层滑塌体入渗曲线总体上表现出入渗速率随入渗时间的增加先急剧减小后逐渐趋于平缓的变化趋势; 3个试验点的平均渗透系数分别为  $(5.81 \pm 2.18) \times 10^{-3}$  cm/s,  $(4.53 \pm 0.82) \times 10^{-3}$  cm/s 和  $(4.42 \pm 0.51) \times 10^{-3}$  cm/s, 相互之间不存在显著差异性。相比于 Kostikov 模型和通用经验模型, Horton 模型对研究区高寒草地草毡层滑塌体水分入渗过程的模拟具有较高的适用性。[结论] 黄河源区高寒草地草毡层滑塌体水分入渗过程使用 Horton 模型模拟较为适宜。

**关键词:** 黄河源; 草毡层滑塌体; 渗透系数; 入渗模型; 水土流失

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2024)05-0019-09

**中图分类号:** S152.7

**文献参数:** 徐得忠, 李华坦, 张鹏飞, 等. 黄河源区高寒草地草毡层滑塌体入渗特性及其适宜模型[J]. 水土保持通报, 2024, 44(5): 19-27. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.05.003; Xu Dezhong, Li Huatan, Zhang Pengfei, et al. Infiltration characteristics and suitable models of grass felt layer slump body in alpine grassland in source region of Yellow River [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(5): 19-27.

## Infiltration Characteristics and Suitable Models of Grass Felt Layer Slump Body in Alpine Grassland in Source Region of Yellow River

Xu Dezhong<sup>1</sup>, Li Huatan<sup>1</sup>, Zhang Pengfei<sup>1</sup>, Wang Zelei<sup>1</sup>, Liang Shen<sup>2</sup>, Pang Jinghao<sup>2</sup>, Liu Yabin<sup>2,3</sup>

(1.Xining Natural Resources Comprehensive Survey, China Geological

Survey, Xining, Qinghai 810000, China; 2.School of Geological Engineering,

Qinghai University, Xining, Qinghai 810016, China; 3.Key Laboratory of Cenozoic Resources and

Environment on the Northern Edge of the Qinghai-Xizang Plateau, Xining, Qinghai 810016, China)

**Abstract:** [Objective] The infiltration process and characteristics of the slump body in the alpine grassland blanket layer in the source region of the Yellow River were analyzed to provide data and theoretical basis for the slump body deformation and damage prevention and soil and water conservation. [Methods] This study used the alpine grass felt layer slump body in the source area of the Yellow River as the research object. The relationship curve between infiltration rate and time and the permeability coefficient of the slope grass felt layer slump body in the Eling Lake area of the Yellow River source were obtained through the double loop permeability test, and the suitable permeability model was determined. [Results] The infiltration rate of the grass felt layer slump body in the study area generally decreased sharply and then gradually flattened with the increase of infiltration time. The average permeability coefficients of the three test points were  $(5.81 \pm 2.18) \times 10^{-3}$ ,  $(4.53 \pm 0.82) \times 10^{-3}$ , and  $(4.42 \pm 0.51) \times 10^{-3}$  cm/s, respectively, and there was no significant difference between each other. Compared to the Kostikov model and the general empirical model, the

收稿日期: 2024-03-18

修回日期: 2024-06-11

资助项目: 中国地质调查局项目“黄河源鄂陵湖—扎陵湖地区生态保护修复支撑调查”(DD20220960)

第一作者: 徐得忠(1992—), 男(汉族), 青海省海东市人, 工程师, 主要从事水工环地质方面的工作。Email: 1297408128@qq.com。

通信作者: 刘亚斌(1987—), 男(汉族), 青海省西宁市人, 博士, 副教授, 主要从事生态地质工程方面的研究。Email: liuyabincug@163.com。

Horton model had a higher applicability in simulating the water infiltration process of the grass felt layer slump body in the study area. [Conclusion] The Horton model is more suitable for simulating the water infiltration process of the grass felt layer slump body.

**Keywords:** Yellow River source; grass felt layer slump body; permeability coefficient; penetration model; soil erosion

土壤本身所具有的导水性能称之为土壤入渗特性<sup>[1]</sup>。影响土壤入渗特性最直接的因素是不同粒径土颗粒含量<sup>[2]</sup>。此外,土壤含水量、降雨特性、植被、地形等因素对土壤入渗特性有重要的间接影响<sup>[3]</sup>。研究土壤入渗特性能够认识土壤的抗侵蚀能力和水源涵养功能<sup>[4]</sup>。

目前,有关土壤入渗特性评价方面的研究主要围绕入渗曲线和渗透系数两个关键指标开展。土壤入渗曲线显示了土壤中的孔隙随时间的推移而被水填满的过程,且能够表征土壤的入渗能力<sup>[5]</sup>。现有的土壤入渗曲线方面的研究主要通过模拟法、定水位法、双环原位入渗试验及室内土柱法以获得土壤入渗曲线进而研究土壤水分运动规律。李燕等<sup>[5]</sup>用孔隙分布曲线预测了压实黄土非饱和入渗曲线并探讨了其入渗范围;李华等<sup>[6]</sup>将滤纸法和瞬态剖面法结合后,通过土柱装置测定了土体的入渗性曲线;郁耀闯等<sup>[7]</sup>采用双环入渗试验,描述了宝鸡地区 L<sub>1</sub>-S<sub>5</sub> 黄土和古土壤水分入渗曲线及其入渗影响因素。为方便且准确揭示水分在土壤中的运动规律,诸多学者通过建立土壤水分入渗模型,用于描述和预测降雨后水分在土壤中的入渗过程<sup>[8]</sup>。该方法通常基于试验和观测,考虑降雨特性、土壤类型和地形等因素对水分入渗的影响,应用数学分析方法,建立描述土壤水分运动的模型。常用的土壤水分入渗模型包括 Kostiakov 模型、Horton 模型和通用经验模型等<sup>[9-11]</sup>。岳海晶等<sup>[12]</sup>利用多元线性回归方法,建立了 Kostiakov 二参数、三参数入渗模型,预测结果证明了两种预测模型的可行性。赵炯昌等<sup>[13]</sup>提到 Horton 模型为半经验模型,在土壤入渗的稳定阶段,拟合的  $f$  接近实际值,能够较好地模拟长时间的土壤入渗过程,何子森等<sup>[14]</sup>的研究亦得出了一致的结果。

渗透系数是单位时间内单位面积土壤的水分入渗速率,其大小直接反映了土壤的入渗性能,通常用  $k$  表示<sup>[15]</sup>。目前有关土壤渗透系数方面的研究,主要根据达西定律及其拓展原理,或者在理想模型和试验的基础上提出预测模型,来确定不同土壤质地的渗透系数<sup>[15]</sup>。Chapuis<sup>[16]</sup>概述了从 1880—2010 年 130 a 内众多学者提出的 45 个土体渗透系数预测模型,并进行了细粒土和粗粒土预测模型的分类。此

外,亦有相关学者研究得出渗透系数的影响因素包括土体孔隙、干密度和含根量等<sup>[17-18]</sup>。徐用之等<sup>[17]</sup>初步研究了孔径和饱和土体渗透系数的关系;蒋希雁等<sup>[18]</sup>通过对比重塑土与原状土,得出了含根量与根土复合体饱和渗透系数的变化规律。

黄河源区地处青藏高原东北部,素有“中华水塔”之称,是中国最重要的生态安全和水源涵养功能区<sup>[19]</sup>。作为青藏高原水源涵养的主体基质之一,高寒草甸分布区域广阔,发育环境多样,在维系区域经济发展、保障高原水源涵养和保持生物多样性等方面发挥着不可替代的作用<sup>[19]</sup>。黄河源地处高海拔地区,年均气温低,植被以高寒草甸为主,植被矮小而丰富。然而,在全球气候变暖的背景下,受降雨和融雪作用,黄河源区斜坡草毡层极易发生滑塌破坏。草毡层滑塌体形成后,滑塌体四周和内部发育的张拉裂隙会加快降雨和融雪作用下的水分入渗,在冲蚀和潜蚀的共同作用下,使之更易于受到侵蚀和破坏,从而加剧黄河源区水土流失现象<sup>[20]</sup>。因此,明确草毡层滑塌体入渗特性和适宜入渗模型,对于进一步分析草毡层滑塌体稳定性和明确其水土流失机理具有重要科学意义。然而,目前有关黄河源地区草毡层滑塌体入渗特性和适宜入渗模型方面,还未有相关研究见诸报道。同时,鉴于黄河源区独特的地理环境和特殊的土壤和植物条件,在其他地区开展的土壤入渗特性相关研究成果,难以为黄河源区草地草毡层滑塌体入渗特性研究所借鉴。基于此,本研究以黄河源区高寒草地草毡层滑塌体为研究对象,通过双环入渗试验,明确草毡层滑塌体入渗特性和适宜入渗模型,以期对草毡层滑塌体稳定性分析评价和水土流失机理研究提供科学依据。

## 1 研究区概况

研究区位于青海省东南部黄河源区玛多县,地理位置为东经 98°13′—99°33′,北纬 34°55′—35°33′,海拔为 4 000~4 900 m<sup>[21]</sup>。区内多年降水在 390~420 mm 区间内,主要集中在 4—9 月,多年平均气温为 -3.7℃,是典型的高原气候<sup>[22]</sup>。研究区内湖泊众多,扎陵湖和鄂陵湖(简称“两湖”)是区内最为重要的水源涵养地。两湖海拔 4 300 m 左右,湖水主要来源于降水、

地下水以及周围山区的融雪<sup>[22]</sup>。扎陵湖和鄂陵湖区具有独特的高原湿地生态系统,生物多样性丰富。草毡层是黄河源区特殊的根系交织缠结的土壤表层部分<sup>[23]</sup>。草毡层滑塌体是草毡层沿着下附基岩界面

发生滑移现象且已经出现滑塌变形破坏的草毡层。滑塌变形破坏是天然斜坡草地草毡层最主要的变形破坏类型(图1),对当地生态地质环境构成了严重威胁。



a 鄂陵湖南岸滑塌变形破坏现象



b 鄂陵湖北岸滑塌变形破坏现象

图1 天然斜坡草地草毡层滑塌变形破坏现象

Fig.1 Natural slope grassland felt layer and its sliding deformation failure phenomenon

2 试验材料与方法

2.1 双环入渗试验

该项研究采用双环入渗试验以获得草毡层滑塌体入渗曲线和渗透系数。双环入渗试验是一种用于测量土壤水分入渗性能的试验方法<sup>[24]</sup>。该试验旨在确定土壤的入渗速率,即单位时间内水分渗入土壤的量。其原理是在一定的水文地质边界以内,向两个环

内都注水,外环保持内环周围土壤的饱和状态,确保水分垂直向下入渗,而非侧向扩散,避免因土壤的侧向导水性而影响入渗速率的准确测量<sup>[24]</sup>。该项研究于2023年7月在鄂陵湖北部和西部地区共选取3个典型草毡层滑塌破坏点进行双环入渗试验。各试验点位背景信息详见表1。为了避免随机因素形成的误差,在同一试验点,重复进行3组双环入渗试验,共开展9组试验。

表1 各试验点位背景信息

Table 1 Background information of each test point

试验点	经度	纬度	海拔/m	坡向	坡度/(°)	物种组成	覆盖度/%
1-1	97°54′29″	35°5′31″	4 320	EN	10.3	A,B,C,D,E	73
1-2	97°54′29″	35°5′31″	4 320	EN	13.2	A,B,C,D,E,F,G,H,I	81
1-3	97°54′29″	35°5′31″	4 321	EN	11.3	A,B,C,D,E,G,J	78
2-1	97°32′33″	35°0′3″	4 385	ES	14.9	A,B,C,E,G,H,K	76
2-2	97°32′33″	35°0′3″	4 384	ES	13.5	A,B,D,E,G,H,I,K,L,M,N,O	72
2-3	97°32′33″	35°0′3″	4 385	ES	13.8	C,D,E,G,H,K,M,N,P,Q	75
3-1	97°32′32″	35°0′3″	4 389	ES	7.8	C,D,E,G,H,K,R	87
3-2	97°32′32″	35°0′3″	4 391	ES	7.3	B,D,E,G,H,K,N,R,S	92
3-3	97°32′32″	35°0′3″	4 386	ES	8.9	E,G,M,N,T,U	83

注:表中A为青藏苔草(*Carex moorcroftii*);B为紫花茅(Stipa purpurea);C为多枝黄耆(*Astragalus polycladus*);D为冷蒿(*Artemisia frigida*);E为早熟禾(*Poa annua*);F为蒲公英(*Taraxacum mongolicum*);G为弱小火绒草(*Leontopodium pusillum*);H为短穗兔耳草(*Lagotis brachystachya*);I为禾叶风毛菊(*Saussurea graminea*);J为马蔺(*Iris lactea*);K为二裂委陵菜(*Potentilla bifurca*);L为雪灵芝(*Eremogone brevipetala*);M为高山嵩草(*Kobresia pygmaea* var. *pygmaea*);N为急弯棘豆(*Oxytropis deflexa*);O为重齿风毛菊(*Saussurea katochaete*);P为细叶亚菊(*Ajania tenuifolia*);Q为单子麻黄(*Ephedra monosperma*);R为唐松草(*Thalictrum aquilegifolium* var. *sibiricum*);S为茵陈蒿(*Artemisia capillaris*);T为野决明(*Thermopsis lupinoides*);U为青海棘豆(*Oxytropis qinghaiensis*)。

双环入渗仪内环直径15.5 cm,外环直径31 cm,内外环高度均为17.5 cm。测定土壤水分入渗过程具

体步骤分为4步:平整土地(除去石块等)、安置铁环(内外环先后垂直置入土中5 cm,内外环同心)、标注



标记(紧靠内环内壁插入钢尺,离土壤表面 6 cm 处做标记)以及加水计时(内外环维持同样水头 6 cm,并记录加入水量和时间)。

试验过程中始终保持水面在标准刻度上,为保证入渗试验结果的精度,采用马氏瓶供水。试验布设情况如图 2 所示。



a 双环现场布设



b 双环入渗试验

图 2 双环入渗试验现场状态

Fig.2 Field status of double-ring infiltration test

在入渗试验开始时,每 5 min 记录 1 次入渗水量,共记录 5 次,入渗水量可以通过内环马氏瓶上的刻度读出。后每 15 min 测读一次入渗水量,共记录 2 次。之后延长每次测读的时间,为每 30 min 测读一次。当连续 2 次观测流量之差不大于 5%,即可结束试验,取最后一次注入流量作为计算值<sup>[25]</sup>。试验结束后,以试坑内环直径所在直线为基准向下垂直开挖,通过对土层浸润湿峰面的观测来确定渗入深度,最后由公式(1)计算出渗透系数<sup>[25]</sup>。

$$k=\frac{16.67Qz}{F(H+z+0.5H_a)} \tag{1}$$

式中: $k$  为渗透系数(cm/s); $Q$  为内环的最后一次注入流量(L/s),本次试验因蒸发量对测试结果的影响极小,故不考虑蒸发量; $F$  为内环底面积( $\text{cm}^2$ ); $H$  为试验水头(cm),本次试验  $H=6$  cm; $z$  为渗入深度(cm); $H_a$  为试验土层的毛细上升高度(cm),该项研究中取经验值 100 cm。

在进行双环入渗试验的同时,采用大环刀采集土体试样(环刀规格  $\varphi 100\text{ mm}\times 63.7\text{ mm}$ ),带回实验室后,采用烘干法获得土体初始含水量(土体水分重量和干土重量的比值),并进一步计算得出土体干密度<sup>[26]</sup>。9 个点位各采样 10 次,共 90 次。

按国标《土的工程分类标准(GB/T50145-2007)》<sup>[27]</sup>所采用的方法,粒径 0.075 mm 为土粒粒组粗粒和细粒的界线。因此,该项研究采用筛分法<sup>[26]</sup>将事先称过重量的烘干土样过筛,称量小于 0.075 mm 的土样所占比例,确定细粒含量。9 个点位各采样 1 次,共开展 9 次重复。表 2 为各试验点土壤物理性质指标。

2.2 土壤水分入渗模型

土壤水分入渗模型用来描述水分在土壤中的入渗过程<sup>[28-30]</sup>。该项研究选取以下 3 种常见土壤水分入渗模型,来模拟不同模型下黄河源草地草毡层水分入渗速率和土壤水分分布的变化规律。

表 2 各试验点土壤物理性质指标

Table 2 Soil physical properties at each test point

试验点	干密度/ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	含水量/%	颗粒级配			不均匀系数
			>0.250 mm	0.250~0.075 mm	<0.075 mm	
1	1.15±0.08	12.37±7.36	6.12±2.22	68.35±5.88	25.53±4.46	8.54±2.04
2	1.19±0.04	7.08±4.42	9.31±1.93	81.88±2.01	8.81±2.86	8.60±1.97
3	1.09±0.05	15.75±0.76	0.27±0.22	78.02±2.56	21.71±2.54	4.73±0.55

注:表中数据为平均值±标准误。下同。

2.2.1 Kostikov 模型 Kostikov 模型是一个经验模型,用于描述土壤水分入渗过程的时间动态。该模型假设入渗速率随时间的减少并不是恒定的,而是随

着时间的推移以某种幂函数关系递减。其计算公式为:

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



式中:  $f(t)$  为入渗速率 (mm/min);  $t$  为入渗时间 (min);  $a, b$  为参数。

2.2.2 Horton 模型 Horton 模型是一个描述土壤水分入渗过程的半经验模型。模型基于观察到入渗速率随时间指数衰减的现象而建立。其计算公式为:

$$f(t) = f_0 + (f_0 - f_c)e^{-kt} \quad (3)$$

式中:  $f(t)$  为入渗速率 (mm/min);  $t$  为入渗时间 (min);  $f_c$  为稳定入渗率 (mm/min);  $f_0$  为初始入渗率 (mm/min);  $k$  为参数。

2.2.3 通用经验模型 在描述土壤水分入渗过程中,除了 Kostikov 和 Horton 模型外,还有一些更通用的方法,可以用来拟合多种土壤和环境条件下的入渗数据。这些方法通常包括更多的参数,以便更灵活地描述入渗过程的不同特征。其计算公式为:

$$f(t) = a + bt^{-n} \quad (4)$$

式中:  $f(t)$  为入渗速率 (mm/min);  $t$  为入渗时间 (min);  $a, b, n$  为由实测数据确定的拟合经验参数。

### 3 结果与分析

由图 3 可知,不同试验点土壤入渗曲线总体上均

表现出入渗速率随时间的增加先急剧减小后逐渐趋于平缓的变化趋势。

各试验点的入渗速率分别在 0~30, 0~20, 0~20 min 内表现为急剧下降趋势。其中,试验点 1 的初始入渗率、平均入渗率和稳定入渗率的变化范围分别为 1.59~2.22 mm/min, 0.85~1.16 mm/min 和 0.71~1.22 mm/min; 试验点 2 的初始入渗率、平均入渗率和稳定入渗率的变化范围分别为 1.33~2.12 mm/min, 0.94~1.06 mm/min 和 0.93~1.15 mm/min; 试验点 3 的初始入渗率、平均入渗率和稳定入渗率的变化范围分别为 1.59~2.92 mm/min, 1.38~1.82 mm/min 和 1.19~1.41 mm/min。已有的研究表明,土壤入渗过程可分为入渗瞬变阶段、入渗渐变阶段和入渗稳定阶段<sup>[29]</sup>。由图 3a 可知,试验点 1 的入渗瞬变阶段基本上在 0~30 min, 入渗渐变阶段为 30~60 min, 入渗稳定阶段在 60 min 以后。由图 3b 可知,试验点 2 的入渗瞬变阶段基本上在 0~20 min, 入渗渐变阶段为 20~60 min, 入渗稳定阶段在 60 min 以后。由图 3c 可知,试验点 3 的入渗瞬变阶段基本上在 0~20 min, 入渗渐变阶段为 20~40 min, 入渗稳定阶段在 40 min 以后。

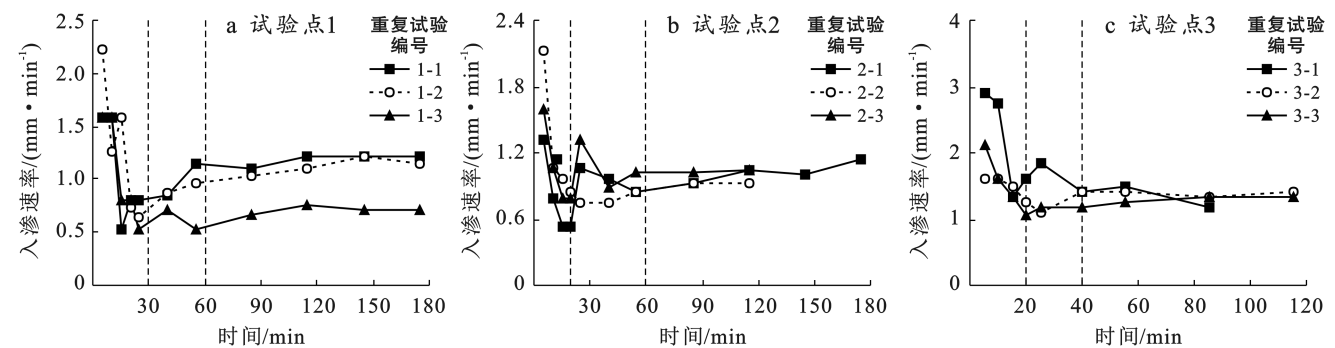


图 3 不同试验点入渗速率随时间的变化规律

Fig.3 Variation of infiltration rate with time at different test sites

分别采用 Kostikov, Horton 和通用经验模型对 3 个试验点草毡层滑塌体双环入渗试验结果进行拟合<sup>[30]</sup>, 模型参数及拟合结果详见表 3。Kostikov 中的参数  $a$  的大小一般反映土壤的初始含水量, 而  $b$  值则与土壤入渗率的减缓程度有关,  $b$  值越大, 土壤入渗率随时间减小得越快<sup>[30]</sup>。由表 3 可知, 各试验点的参数  $b$  平均值分别为  $0.18 \pm 0.15$ ,  $0.15 \pm 0.18$  和  $0.18 \pm 0.15$ , 即各试验点土壤入渗率随时间减小的平均速度中试验点 1 与试验点 3 相同且快于试验点 2, 说明试验点 1 与试验点 3 土壤入渗率的减缓程度高于试验点 2。Horton 模型能够较好地描述入渗初期快速下降和随后逐渐稳定的过程, 该模型中  $f_0$  表示初始入渗率,  $f_c$  表示稳定入渗率。在各试验点中,  $f_0$

— $f_c$  值的变化范围为 0.05~1.73, 其中试验点 2 初始入渗率和稳定入渗率相差最小, 试验点 3 初始入渗率和稳定入渗率相差最大。通用经验公式中  $a$  的值相当于稳定入渗率,  $b$  与  $t^{-n}$  的乘积的大小反映了入渗率随时间变化的快慢, 其值越大, 则入渗速率下降越快。由表 3 可知, 试验点 1 的平均稳定入渗率最小, 为  $0.87 \pm 0.24$ ; 试验点 3 的平均稳定入渗率最大, 为  $1.17 \pm 0.18$ 。

图 4~6 分别为试验点 1, 试验点 2 和试验点 3 重复开展 3 次试验的 3 种入渗模型的拟合曲线。结合表 3 计算各试验点平均拟合优度可知, 相比于 Kostikov 模型和通用经验模型, Horton 模型平均拟合优度相对最大, 与各试验点由实测值得出的入渗曲线拟合程度最高。

表 3 入渗模型参数及拟合结果

Table 3 Parameters and fitting results of infiltration model

试验点	Kostiakov 模型			Horton 模型				通用经验模型			
	$a$	$b$	$R^2$	$f_0$	$f_c$	$k$	$R^2$	$a$	$b$	$n$	$R^2$
1-1	1.21	0.03	0.10	1.59	1.22	0.23	0.75	1.02	32.81	2.48	0.29
1-2	2.32	0.20	0.30	2.23	1.24	0.03	0.65	1.00	38.22	2.13	0.69
1-3	2.50	0.32	0.61	1.59	0.71	0.02	0.62	0.59	5.92	1.04	0.74
2-1	0.87	-0.01	0.19	1.06	1.01	0.19	0.76	1.01	1.06	0.97	0.69
2-2	3.04	0.35	0.57	2.12	0.94	0.25	0.95	0.84	88.74	2.63	0.97
2-3	1.51	0.11	0.19	1.59	1.04	0.18	0.77	0.99	1 361.61	4.80	0.60
3-1	4.97	0.34	0.69	2.92	1.19	0.06	0.75	0.97	6.29	0.70	0.78
3-2	1.65	0.05	0.21	1.59	1.41	0.01	0.54	1.33	2.21	1.26	0.36
3-3	2.31	0.16	0.45	2.12	1.34	0.11	0.83	1.22	24.10	2.04	0.86

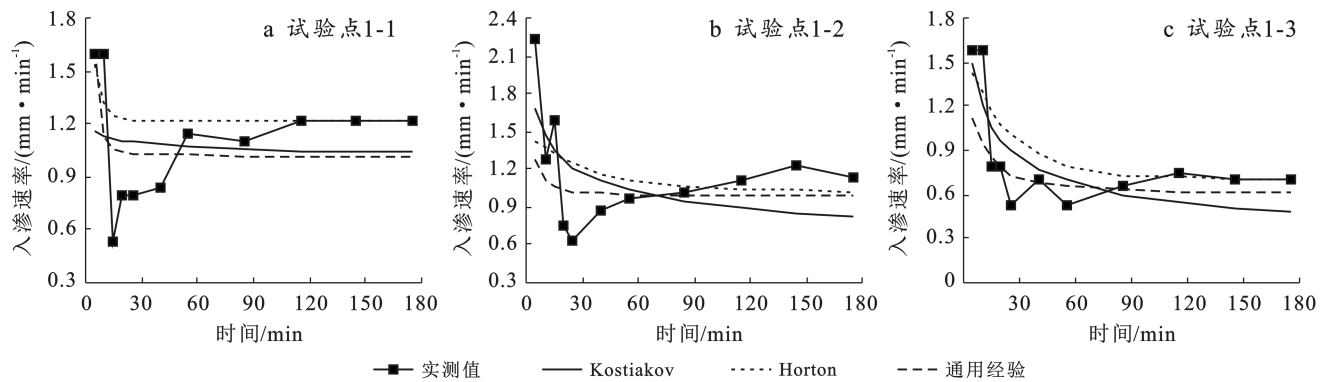


图 4 试验点 1 不同入渗模型拟合曲线

Fig.4 Fitting curves of different infiltration models at test point 1

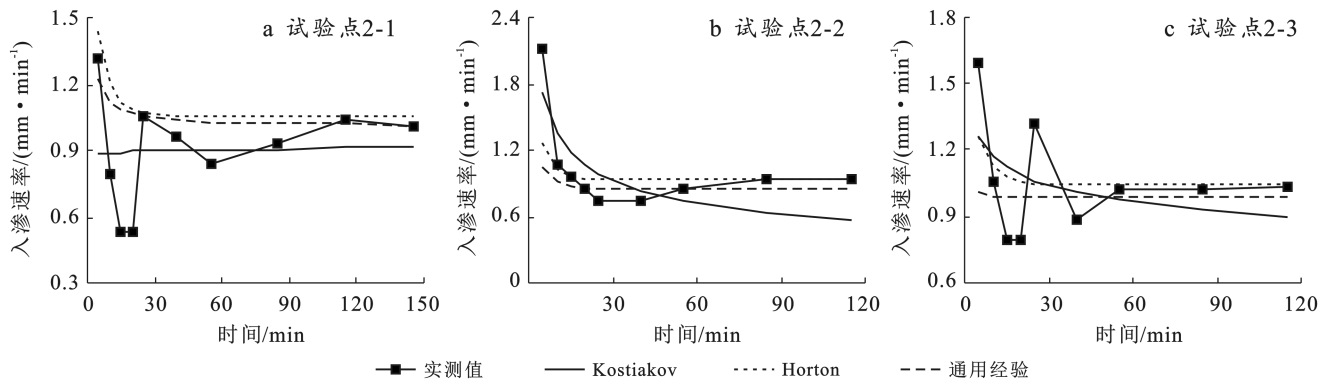


图 5 试验点 2 不同入渗模型拟合曲线

Fig.5 Fitting curves of different infiltration models at test point 2

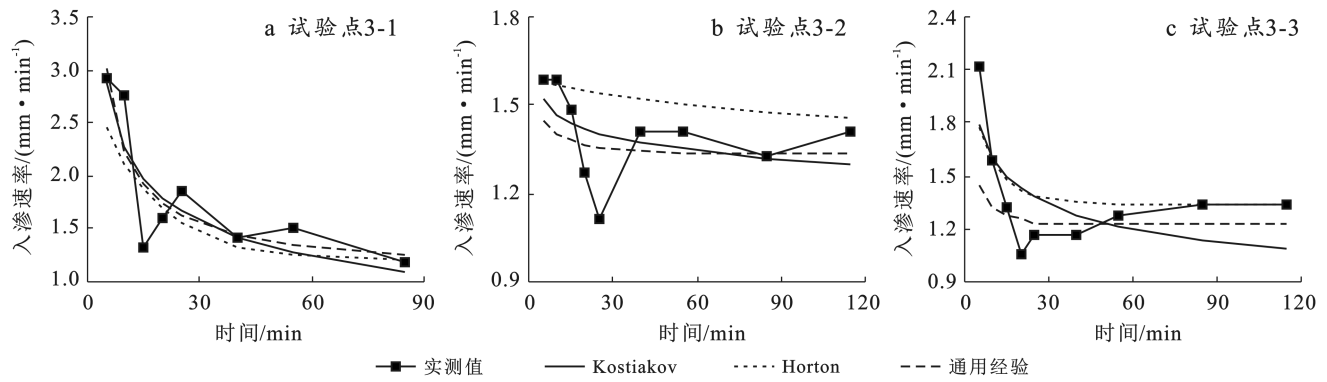


图 6 试验点 3 不同入渗模型拟合曲线

Fig.6 Fitting curves of different infiltration models at test point 3

该项研究各试验点平均初始入渗率、稳定入渗率及渗透系数详见表 4。由表 4 可知,各试验点平均初始入渗率、稳定入渗率和渗透系数分别为  $(1.68 \pm 0.33) \sim (2.21 \pm 0.54) \text{ mm/min}$ ,  $(0.99 \pm 0.04) \sim (1.32 \pm 0.09) \text{ mm/min}$  和  $(4.42 \pm 0.51) \times 10^{-3} \sim (5.81 \pm 2.18) \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ 。3 个试验点的平均初始入渗率、稳定入渗率、渗透系数均不存在显著性差异( $p > 0.05$ )。说明 3 个试验点之间的入渗性能相似,均能体现黄河源区高寒草地草毡层滑塌体入渗特性。

表 4 各试验点平均初始入渗率、稳定入渗率和渗透系数  
Table 4 Average initial infiltration, stable infiltration and permeability coefficient of each test site

试验点	初始入渗率/ (mm · min <sup>-1</sup> )	稳定入渗率/ (mm · min <sup>-1</sup> )	渗透系数 10 <sup>-3</sup> cm/s
1	1.80±0.30 <sup>a</sup>	1.02±0.22 <sup>a</sup>	5.81±2.18 <sup>a</sup>
2	1.68±0.33 <sup>a</sup>	0.99±0.04 <sup>a</sup>	4.53±0.82 <sup>a</sup>
3	2.21±0.54 <sup>a</sup>	1.32±0.09 <sup>a</sup>	4.42±0.51 <sup>a</sup>

注:表中小写字母表示不同试验点的初始入渗率之间、稳定入渗率之间和渗透系数之间的差异显著(LSD 法)。

4 讨论

程慧艳等<sup>[30]</sup>研究表明,土壤入渗过程可分为入渗瞬变阶段,入渗渐变阶段和入渗稳定阶段。本项研究通过对黄河源草毡层滑塌体入渗过程进行分析,得出各草毡层滑塌体入渗曲线总体上表现出入渗速率随着时间的增加均呈现先急剧减小后逐渐趋于平缓的变化趋势,且亦可划分为以上 3 个阶段。在入渗瞬变阶段,当水与草毡层滑塌体表面接触时,会出现瞬时的迅速入渗,其入渗时间长短取决于草毡层滑塌体的干燥程度以及压实程度。由于在入渗初期,草毡层滑塌体初始土壤含水量较低,水分在分子力的作用下,初始入渗率较高,但这一阶段持续时间较短<sup>[30]</sup>。之后水分逐渐向下入渗,在草毡层滑塌体内部逐渐形成稳定的入渗通道,进入入渗渐变阶段。在该阶段,由于毛细管作用,水分开始向下运输,入渗速率逐渐减缓。入渗渐变阶段可以持续较长的时间,直到大部分孔隙通道被水分填满,开始接近饱和状态。当草毡层滑塌体中的孔隙被水填满,入渗速率逐渐趋于稳定,进入入渗稳定阶段。该阶段草毡层滑塌体基本饱和,且水分较为均匀地向下入渗,入渗速率相对稳定。

本项研究采用 Kostiakov, Horton 和通用经验 3 种模型对不同试验点入渗曲线进行拟合。结果表明,相比于其他入渗模型, Horton 模型更适用于高寒草地草毡层滑塌体水分入渗过程的研究。然而,相比于其他研究<sup>[7,30]</sup>中使用 Horton 模型进行土壤入渗曲

线拟合所得到的拟合优度,该项研究中 Horton 模型对应的拟合优度相对较低。究其原因,除与现场试验随机性导致的误差影响有关以外,亦与黄河源区草毡层滑塌体植被类型复杂程度有关。与此同时,该项研究得出的 Horton 模型  $f_0 - f_c$  值的变化范围也要小于其他研究<sup>[7,30]</sup>,说明相较于其他土质类型和根—土复合体材料,黄河源区草毡层滑塌体初始入渗率和稳定入渗率的差异相对较小。

5 结论

(1) 黄河源鄂陵湖区高寒草地草毡层滑塌体入渗速率在初始阶段急剧减小,随后逐渐趋于平缓;鄂陵湖北部和西部地区 3 个试验点草毡层滑塌体的平均渗透系数分别为  $(5.81 \pm 2.18) \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ ,  $(4.53 \pm 0.82) \times 10^{-3} \text{ cm/s}$  和  $(4.42 \pm 0.51) \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ ,三者间无显著差异,表明这些区域土壤入渗性能相似。

(2) Horton 模型在研究区高寒草地草毡层滑塌体的水分入渗过程中表现良好,具有较高的适用性;相对而言, Kostiakov 模型和通用经验模型对试验点的入渗过程拟合效果并不理想,对各试验点的入渗过程拟合效果较差。

参考文献 (References)

[1] 吕刚, 吴祥云. 土壤入渗特性影响因素研究综述[J]. 中国农学通报, 2008, 24(7): 494-499.  
Lv Gang, Wu Xiangyun. Review on influential factors of soil infiltration characteristics [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2008, 24(7): 494-499.

[2] 黄俊, 金平伟, 李敏, 等. 径流小区尺度土壤入渗率影响因子与估算模型研究[J]. 农业机械学报, 2016, 47(8): 171-178.  
Huang Jun, Jin Pingwei, Li Min, et al. Influencing factors of soil infiltration rate and its estimation model at runoff-plot scale [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(8): 171-178.

[3] 郭智辉, 简文彬, 刘青灵, 等. 基于现场原型试验的斜坡降雨入渗分析及入渗模型研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(6): 1635-1647.  
Guo Zhihui, Jian Wenbin, Liu Qingling, et al. Rainfall infiltration analysis and infiltration model of slope based on in situ tests [J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(6): 1635-1647.

[4] 贾莲莲. 模拟降雨条件下黄土坡面侵蚀过程与调控试验研究[D]. 陕西 西安: 西安理工大学, 2010.  
Jia Lianlian. Experiment study on soil erosion process and regulation on loess slope under simulating rainfall [D]. Xi'an, Shaanxi: Xi'an University of Technology, 2010.



- [5] 李燕,李同录,侯晓坤,等.用孔隙分布曲线预测压实黄土非饱和渗透曲线及其适用范围的探讨[J].岩土力学, 2021,42(9):2395-2404.  
Li Yan, Li Tonglu, Hou Xiaokun, et al. Prediction of unsaturated permeability curve of compaction loess with pore-size distribution curve and its application scope [J]. Rock and Soil Mechanics, 2021,42(9):2395-2404.
- [6] 李华,李同录,江睿君,等.基于滤纸法的非饱和渗透性曲线测试[J].岩土力学,2020,41(3):895-904.  
Li Hua, Li Tonglu, Jiang Ruijun, et al. Measurement of unsaturated permeability curve using filter paper method [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020,41(3):895-904.
- [7] 郁耀闯,杨树瑶,王长燕,等.宝鸡地区  $L_1$ - $S_5$  黄土和古土壤水分入渗及影响因素[J].水土保持研究,2023,30(6):78-85.  
Yu Yaochuang, Yang Shuyao, Wang Changyan, et al. Water infiltration and influencing factors of  $L_1$ - $S_5$  loess-paleosol in Baoji Region [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023,30(6):78-85.
- [8] 寇小华,王文,郑国权.土壤水分入渗模型的研究方法综述[J].亚热带水土保持,2013,25(3):53-55.  
Kou Xiaohua, Wang Wen, Zheng Guoquan. Summary of research methods of soil water infiltration model [J]. Subtropical Soil and Water Conservation, 2013,25(3):53-55.
- [9] Kostiakov A N. On the dynamics of the coefficient of water-percolation in soils and on the necessity of studying it from a dynamic point of view for purposes of amelioration [J]. Trans. 6 th Cong. International. Soil Science, Russian Part A, 1932:17-21.
- [10] Richards L A. Capillary conduction of liquids through porous mediums [J]. Physics, 1931,1(5):318-333.
- [11] Horton R E. An approach toward a physical interpretation of infiltration-capacity [J]. Soil Science Society of America Journal, 1941,5:399-417.
- [12] 岳海晶,樊贵盛.土壤入渗模型参数的多元线性预测模型精度的对比分析[J].灌溉排水学报,2016,35(10):73-77.  
Yue Haijing, Fan Guisheng. Comparison of multivariate linear prediction model precision of soil infiltration model parameters [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2016,35(10):73-77.
- [13] 赵炯昌,潘岱立,卫伟,等.植被格局对土壤入渗和水分过程影响的模拟试验研究[J].生态学报,2021,41(4):1373-1380.  
Zhao Jiongchang, Pan Daili, Wei Wei, et al. Simulation experiment on the influence of vegetation pattern on soil infiltration and water and sediment process [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021,41(4):1373-1380.
- [14] 何子森,肖培青,郝仕龙,等.黄丘区野外草被坡面土壤入渗参数变化规律与模拟研究[J].水土保持学报, 2018,32(2):74-79.  
He Zimiao, Xiao Peiqing, Hao Shilong, et al. Study on the change and simulation of soil infiltration parameters on the field grass slope in the loess hilly region [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018,32(2):74-79.
- [15] 刘海伟,党发宁,田威,等.修正 Kozeny-Carman 方程预估黏土渗透系数的研究[J].岩土工程学报,2021,43(S1):186-191.  
Liu Haiwei, Dang Faning, Tian Wei, et al. Prediction of permeability of clay by modified Kozeny-Carman equation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021,43(S1):186-191.
- [16] Chapuis R P. Predicting the saturated hydraulic conductivity of soils: A review [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2012,71(3):401-434.
- [17] 徐用之,刘金阳,许成波,等.饱和土体渗透系数与孔径关系初探[J].安全与环境工程,2024,31(1):67-74.  
Xu Yongzhi, Liu Jinyang, Xu Chengbo, et al. Preliminary investigation on the relationship between permeability coefficient and pore size of saturated soil [J]. Safety and Environmental Engineering, 2024,31(1):67-74.
- [18] 蒋希雁,杨尚青,冯峰,等.植被根系对土体渗透特性影响的试验研究[J].合肥工业大学学报(自然科学版), 2022,45(3):370-375.  
Jiang Xiyan, Yang Shangqing, Feng Feng, et al. Experimental study on the influence of vegetation roots on soil permeability [J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2022,45(3):370-375.
- [19] 李小娟,张莉,张紫萍,等.高寒草甸生物结皮发育特征及其对土壤水文过程的影响[J].水土保持研究,2019,26(6):139-144.  
Li Xiaojuan, Zhang Li, Zhang Ziping, et al. Characteristic of biological soil crust and its effects on hydrological processes in alpine meadow [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019,26(6):139-144.
- [20] 严作良,周华坤,刘伟,等.江河源区草地退化状况及成因[J].中国草地,2003,25(1):73-78.  
Yan Zuoliang, Zhou Huakun, Liu Wei, et al. Preliminary discuss on grassland degradation in the source region of Yangtze and Yellow Rivers [J]. Grassland of China, 2003,25(1):73-78.
- [21] 唐恬,王磊,文小航.黄河源鄂陵湖地区辐射收支和地表能量平衡特征研究[J].冰川冻土,2013,35(6):1462-1473.  
Tang Tian, Wang Lei, Wen Xiaohang. A study of the

- radiation and surface energy balance around the Ngoring Lake in source regions of the Yellow River [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(6):1462-1473.
- [22] 运志辉.高原冻土路基边坡病害机制研究[D].陕西 西安: 长安大学, 2023.
- Yun Zhihui. Study on disease mechanism of plateau permafrost subgrade slope [D]. Xi'an, Shaanxi: Chang'an University, 2023.
- [23] 苏培玺,周紫鹃,侍瑞,等.高寒草毡层基本属性与固碳能力沿水分和海拔梯度的变化[J].*生态学报*, 2018, 38(3):1040-1052.
- Su Peixi, Zhou Zijuan, Shi Rui, et al. Variation in basic properties and carbon sequestration capacity of an alpine sod layer along moisture and elevation gradients [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(3):1040-1052.
- [24] 王长燕,郁耀闯,黄土丘陵区退耕草地土壤稳定入渗率生长季变化[J].*干旱地区农业研究*, 2017, 35(3): 107-113.
- Wang Changyan, Yu Yaochuang. Variation of soil stable infiltration rate in growing season for rehabilitated grassland in Loess Hilly Region [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2017, 35(3):107-113.
- [25] 于永堂,刘争宏,张继文,等.双环注水试验装置的研制及其应用[J].*岩土工程学报*, 2017, 39(S1):27-31.
- Yu Yongtang, Liu Zhenghong, Zhang Jiwen, et al. Development and application of double-ring infiltrometer [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39(S1):27-31.
- [26] 赵法锁,李相然.工程地质学[M].北京:地质出版社, 2009.
- Zhao Fasuo, Li Xiangran. *Engineering Geology* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009
- [27] 中华人民共和国建设部.土的工程分类标准: GB/T 50145-2007[S].北京: 中国计划出版社, 2008.
- Ministry of Construction of the People's Republic of China. GB/T50145-2007 Standard for engineering classification of soil [S]. Beijing: China Planning Press, 2008.
- [28] 韩冰,吴钦孝,李秧秧,等.黄土丘陵区人工油松林地土壤入渗特征的研究[J].*防护林科技*, 2004(5):1-3.
- Han Bing, Wu Qinxiao, Li Yangyang, et al. Study on the characteristics of soil infiltration of pinus tabulaeformis stand in the loess hilly areas [J]. *Protection Forest Science and Technology*, 2004(5):1-3.
- [29] 王经民,吴钦孝,韩冰,等.陕北黄土区土壤入渗模型的比较探讨[J].*农业系统科学与综合研究*, 2004, 20(4): 288-290.
- Wang Jingmin, Wu Qinxiao, Han Bing, et al. Distribution law on infiltration of loess hilly region [J]. *System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture*, 2004, 20(4):288-290.
- [30] 程慧艳.黄河源区高寒草甸草地覆被变化的水文过程与生态功能响应研究[D].甘肃 兰州: 兰州大学, 2007.
- Cheng Huiyan. The hydrology process and ecological functions response under the vegetation coverage change of alpine-cold meadow in the headwater region of the Yellow River [D]. Lanzhou, Gansu: Lanzhou University, 2007.
- ~~~~~
- (上接第 18 页)
- [19] 贺蕊,苏怀,李岫峰,等.滇东高原红壤酸处理后粒度增粗现象及原因探究[J].*土壤*, 2018, 50(2):428-433.
- He Rui, Su Huai, Li Xiufeng, et al. Phenomenon and reason of grain size increasing after adding HCl in red soil in eastern Yunnan Plateau [J]. *Soils*, 2018, 50(2): 428-433.
- [20] 伯桐震,黄英,石崇喜,等.酸污染红土物理性质的变化特征[J].*水文地质工程地质*, 2012, 39(2):111-115.
- Bo Tongzhen, Huang Ying, Shi Chongxi, et al. Variation characteristics of physical properties of acid pollution laterite [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2012, 39(2):111-115.
- [21] 潘泰,赵贵涛,黄英.pH 值对云南红黏土力学特性及微观结构的影响[J].*硅酸盐通报*, 2021, 40(10):3427-3434.
- Pan Tai, Zhao Guitao, Huang Ying. Effect of pH value on mechanical properties and microstructure of Yunnan laterite [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2021, 40(10):3427-3434.
- [22] 肖桂元.酸雨作用下桂林红黏土损伤规律研究[D].湖北 武汉:中国地质大学, 2021.
- Xiao Guiyuan. Study on strength attenuation law of red clay subgrade under the action of acid rain [D]. Wuhan, Hube: China University of Geosciences, 2021.
- [23] 牟春梅,付青,刘奕畅.桂林地区酸污染红黏土力学效应弱化试验[J].*河南科技大学学报(自然科学版)*, 2019, 40(4):52-57.
- Mu Chunmei, Fu Qing, Liu Yichang. Experimental of mechanical effect weakening of acid-contaminated red clay in Guilin [J]. *Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science)*, 2019, 40(4):52-57.