

# 砾石含量及粒径对崩岗崩积体渗透特性的影响

詹振芝, 黄炎和, 蒋芳市, 林金石, 李歆博, 王晓妍, 蔡佳翔

(福建农林大学资源与环境学院, 福建省土壤环境健康与调控重点实验室, 福州 350002)

**摘要:** 为探讨砾石对崩积体渗透性的影响, 采用环刀法对不同砾石含量及粒径条件下崩积体入渗特性的变化进行研究。结果表明: (1) 0%, 10%, 20%, 30% 砾石含量崩积体进入稳渗时间在 9~10 min 之间, 40%, 50% 砾石含量崩积体进入稳定时间在 19~20 min 之间。 (2) 相同粒径砾石条件下, 崩积体的初渗率、稳渗率、平均入渗率及入渗量随砾石含量的增加而增大; 含 2~3 mm, 3~5 mm, 5~10 mm 砾石崩积体的入渗参数在 10%, 20%, 30% 砾石含量时变化不大; 当砾石含量为 40% 时, 入渗参数随着砾石粒径的增大而减小; 当砾石含量为 50% 时, 含 3~5 mm 砾石的崩积体的入渗参数最小。 (3) Kostiakov 公式拟合更适合模拟崩积体的入渗模型。

**关键词:** 崩岗; 崩积体; 砾石含量; 砾石粒径; 土壤渗透

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)03-0085-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2017.03.015

## Effects of Content and Size of Gravel on Soil Permeability of the Colluvial Deposit in Benggang

ZHAN Zhenzhi, HUANG Yanhe, JIANG Fangshi, LIN Jinshi,

LI Xinbo, WANG Xiaoyan, CAI Jiaxiang

(Fujian Provincial Key Laboratory of Soil Environmental Health and Regulation,

College of Resource and Environment, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002)

**Abstract:** The aim of this study was to explore the influence of gravel on infiltration characteristics of the colluvial deposit. The cutting ring method was used to study the changes of infiltration characteristics of the colluvial deposit that mixed with different content and size of gravel. The results were as follows: (1) The steady infiltration time of the colluvial deposit was between 9 min and 10 min when the content of gravel was 0%, 10%, 20%, and 30%, but it was between 19 and 20 min when the content of gravel was 40% and 50%. (2) The initial infiltration rate, steady infiltration rate, average infiltration rate, and accumulative infiltration volume of the colluvial deposit were enhanced with the increasing gravel content. The infiltration parameters changed little at 10%, 20%, and 30% gravel content when the colluvial deposit was mixed with gravels of 2–3 mm, 3–5 mm, and 5–10 mm size. The values of infiltration parameters decreased with increasing size of gravels when the gravel content was 40%; when the gravel content was 50%, the values of infiltration parameters of the colluvial deposit mixed with 2–3 mm gravel were the least. (3) A further comparison showed that the Kostiakov model was more suitable for simulating the infiltration process of the colluvial deposit.

**Keywords:** Benggang; colluvial deposit; gravel content; gravel size; soil permeability

土壤入渗是水分通过地表或入渗界面进入土壤的过程, 土壤入渗特性决定着降雨或地面水转换为土壤水的速度和分布, 是影响土壤侵蚀的重要因子<sup>[1]</sup>。砾石是指粒径 $\geq 2$  mm 的相对独立、不易破碎的岩石碎块, 砾石存在会改变土壤孔隙结构和水力特性, 会改变土壤中水分运动的途径, 限制水分运动或加速水

分入渗过程<sup>[2]</sup>, 这使得土石混合介质中水分的运动更加复杂。已有学者在砾石的分布特征(含量)及物理特性(粒径)对不同土石混合介质的入渗过程的影响展开了大量研究。王慧芳等<sup>[3-4]</sup>研究了黄土混合介质入渗规律, 发现在入渗初始阶段的入渗性能随碎石含量的增加而减小, 较高含量的 2~3 mm 碎石有显著

减缓土壤混合介质的水分入渗。朱元俊等<sup>[5]</sup>研究表明,在含砾石土壤中,只有当土壤水分饱和度达到一定值之后,才能湿润深层土壤。王小燕等<sup>[6]</sup>研究表明,紫色土土壤入渗速率随着碎石含量的增加而增大,30%碎石含量的入渗速率最小。李燕等<sup>[7]</sup>研究发现,紫色土砾石含量增至一定限度后会减小土壤水分下漏率。甘凤玲等<sup>[8]</sup>研究了滑坡堆积体不同土石比的降雨入渗,发现堆积体的土石比随雨强的变化规律存在一个雨强临界值,土石比为 1:2 的土壤入渗特征与土石比为 1:1 的一致。以上说明,由于试验对象及试验设计的不同,砾石影响土壤入渗的研究结果存在差异。

崩岗侵蚀是在水力和重力综合作用下形成的一种特殊侵蚀地面类型,一般由集水坡面、崩壁、崩积体、冲积扇组成;崩积体是经水力和重力作用在崩壁下方堆积形成的物质,土质疏松、坡度大、易被侵蚀;调查发现,崩岗崩积体还有一个重要特征,砾石含量高,最高可达近 70%,属于典型土石混合物<sup>[9-10]</sup>。目前,已有对崩积体入渗特性进行了研究,蒋芳市等<sup>[10]</sup>研究发现,崩积体土体较崩壁风化壳土体稳渗时间短,渗透速率大,张大林等<sup>[11]</sup>研究发现,崩积体的非均质性具有阻渗作用。但关于砾石对崩积体入渗起促进还是抑制作用,目前还未见报道。崩岗崩积体与黄土、紫色土、滑坡堆积体等均为土石混合物,但它们成土气候及母质条件存在差异,造成土壤的矿物组成、颗粒配级,砾石尺寸及形状等均不同,土壤入渗性质必然也存在差异。因此,研究砾石对崩岗崩积体入渗的影响对充分认识土石混合介质水分运动具有重要意义。水分入渗测定的方法有人工模拟降雨法,环刀法,双环法等。环刀法是室内测定土壤入渗过程的常用方法,有储水量少,设备简易,操作简单等特点。本文以安溪县崩岗崩积体为研究对象,采用环刀法测定砾石含量及粒径的崩积体入渗参数,研究不同砾石含量及粒径条件下崩积体的入渗特性,以期阐明砾石对崩积体侵蚀的影响机理提供依据,也为土石混合介质侵蚀理论的完善提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于安溪县南部的东岭北麓的龙门镇(24°57' N, 118°05' E),为河谷小盆地,丘陵地带,属亚热带气候,气候温和,年平均气温 16~22℃,年活动积温 5 633~7 238℃。雨量充沛,年平均降水量 1 600~2 000 mm。龙门镇崩岗侵蚀数量居安溪县之首,共有崩岗 1 228 个,崩岗侵蚀面积 264.77 hm<sup>2</sup><sup>[9]</sup>。供试土壤为花岗岩发育的崩岗崩积土,土壤有机质含量低,仅为 1.68 g/kg, pH 值为 5.19,属酸性土, <2 mm 颗粒

中砂粒(0.05~2 mm),粉粒(0.002~0.5 mm)和黏粒(<0.002 mm)含量分别为 61.29%, 34.59%和 4.12%,土质疏松、结构性差。

### 1.2 研究方法

按照砾石质量含量和砾石粒径,采用两因素组合设计。为了得到不同粒径的砾石,将供试土壤自然风干后过直径 10, 2 mm 不锈钢筛,然后将直径为 2~10 mm 的砾石分别过 5, 3, 2 mm 筛,获得 5~10, 3~5, 2~3 mm 粒径的砾石。砾石质量含量设置 0%, 10%, 20%, 30%, 40%和 50%,将 3 组不同粒径砾石按不同质量含量与细土(<2 mm)混合均匀,得到不同的土石混合物。

设置混合土样的初始含水率为 15%,根据野外调查结果,将土石混合物容重控制在 1.40 g/cm<sup>3</sup> 左右。将环刀(底面积 20 cm<sup>2</sup>, 高 5 cm)内侧涂抹凡士林,防止入渗过程边缘漏水,然后按试验设计,五等分均匀将混匀土样敲入环刀,层与层之间打毛防止土体垂直分层。用保鲜膜密封,以防止水分蒸发,放置 24 h 再进行土壤入渗试验,同时测定土样的孔隙度<sup>[10]</sup>。由表 1 可知,不同砾石含量和粒径的总孔隙度在 47.04%~48.18%之间,毛管孔隙度在 27.33%~30.57%之间,非毛管孔隙度在 17.07%~20.24%之间。相同砾石粒径下,毛管孔隙度随砾石含量的增大而减小,非毛管孔隙度随砾石含量的增大而增大。相同砾石含量下,毛管孔隙度和非毛管孔隙度均差异不大。

表 1 试验土壤孔隙度

| 供试材料         | 砾石含量/% | 土石混合容重/(g·cm <sup>-3</sup> ) | 总孔隙度/% | 毛管孔隙度/% | 非毛管孔隙度/% |
|--------------|--------|------------------------------|--------|---------|----------|
| 纯土           | 0      | 1.41                         | 47.46  | 30.39   | 17.07    |
|              | 10     | 1.39                         | 48.18  | 30.57   | 17.61    |
|              | 20     | 1.40                         | 47.86  | 29.80   | 18.06    |
|              | 30     | 1.41                         | 47.35  | 28.04   | 19.31    |
|              | 40     | 1.40                         | 47.76  | 25.90   | 21.86    |
| 2~3 mm 粒径砾石  | 50     | 1.41                         | 47.31  | 24.07   | 23.24    |
|              | 10     | 1.41                         | 47.57  | 30.17   | 17.40    |
|              | 20     | 1.40                         | 47.82  | 29.80   | 18.02    |
|              | 30     | 1.40                         | 47.73  | 28.39   | 19.34    |
|              | 40     | 1.41                         | 47.39  | 26.33   | 21.06    |
| 3~5 mm 粒径砾石  | 50     | 1.41                         | 47.41  | 24.60   | 22.81    |
|              | 10     | 1.41                         | 47.58  | 30.27   | 17.31    |
|              | 20     | 1.40                         | 47.74  | 29.70   | 18.04    |
|              | 30     | 1.42                         | 47.26  | 27.91   | 19.35    |
|              | 40     | 1.41                         | 47.04  | 26.12   | 20.92    |
| 5~10 mm 粒径砾石 | 50     | 1.41                         | 47.36  | 24.33   | 23.03    |

在装有供试的环刀上方接 1 个同样规格的空环刀,将 2 个环刀用透明胶带固定密封,防止从接口处漏水,一端套上环刀盖,防止土体剥落。将装有试验土样的环刀保持水平固定在一定高度,下方放置漏斗

和已知质量的烧杯以收集入渗水量。烧杯放置电子天平之上测水的质量。之后向空环刀内加水至环刀口并用针管持续加水,保持环刀内 5 cm 高的水量,待漏斗下方滴下第 1 滴水开始计时,前 15 min 每 1 min 记录 1 次,15 min 后每 2 min 记录 1 次,35 min 后每 5 min 记录 1 次,试验周期为 60 min,重复 3 次,共计 48 次。

### 1.3 土壤入渗参数计算与入渗模型确立

采用初始入渗率( $I_0$ )、稳定入渗率( $I_f$ )、入渗速率( $I$ )、平均入渗速率( $I_a$ )、累计入渗量等参数描述土壤渗透特征<sup>[10]</sup>。采用 Kostiakov 模型<sup>[12]</sup>、Horton 模型<sup>[13]</sup>和 Philip 模型<sup>[14]</sup>对入渗数据进行最优拟合,探讨其模拟崩积体土石混合物入渗过程的适用性和精确度。

Kostiakov 模型:

$$I_t = at^{-n}$$

式中: $I_t$  为入渗速率(mm/min); $t$  为入渗时间(min); $a, n$  为模型参数。Kostiakov 模型在实际工作中应用较为广泛,特别是三参数模型广泛应用于地面灌溉入渗过程的模拟。

Horton 模型:

$$I_t = I_f + (I_0 - I_f)e^{-bt}$$

式中: $I_t$  为入渗速率(mm/min); $t$  为入渗时间(min); $I_0$  为初始入渗速率(mm/min); $I_f$  为稳定入渗速率(mm/min); $b$  为模型参数。Horton 公式是从试验中得到的纯经验性方程,Horton 认为,在入渗过程的初始阶段,入渗速率随着时间的推移而减小主要是由于水分受土壤表层因子的影响。

Philip 模型:

$$I_t = c_t^{-0.5} + I_f$$

式中: $I_t$  为入渗速率(mm/min); $t$  为入渗时间(min); $I_f$  为稳定入渗速率(mm/min); $c$  为模型参数。Philip 入渗公式得到了田间入渗试验资料的验证,具有重要的应用价值,但该公式是在半无限均质土壤、初始含水率分布均匀、有薄层积水的条件下求得的,因此该公式只适用于积水条件下入渗时间不长的一维垂直入渗,具有一定的局限性。

### 1.4 数理统计与分析

试验数据采用 Excel 2007、Origin 8.0 进行数据统计和绘图,SPSS 19.0 进行方程拟合。

## 2 结果与分析

### 2.1 崩积体土石混合物入渗变化规律

由图 1 可知,在入渗初始阶段,各砾石含量的崩积体入渗速率均较大,之后呈快速下降的趋势。随着时间的推移,入渗率变化在一个稳定数值上,进入稳定入渗阶段。从入渗时间来看,纯土在 9 min 时进入稳定入渗,10%,20%,30%砾石含量进入稳定渗时间分

别在 9,8,10 min,与纯土相对一致。其原因是砾石含量相对较小,其土体的紧实度相当,各组非毛管孔隙变化不大,导致其入渗速率变化相对一致,从而到达稳定入渗的时间节点相对一致。40%和 50%砾石含量进入稳渗的时间一致,在 19~20 min 之间,但均滞后于≤30%砾石含量的,这是由于崩积体高砾石含量(40%,50%)条件下,水分入渗过程中,高砾石含量的土石混合体孔隙极多,形成的水分通道更加不规则,水分进入土体后,快速向下渗漏,携带了大量土壤颗粒向下运动,入渗过程中不断存在颗粒逐渐冲开或是堵塞部分孔隙的现象<sup>[15]</sup>。

由图 1 可知,不同粒径砾石在 50%砾石含量条件下对土壤入渗过程差异较大。在入渗初始阶段,2~3 mm 粒径砾石组的崩积体入渗率下降幅度比 3~5,5~10 mm 粒径砾石组小,但是从稳定入渗时间来看,其与 3~5,5~10 mm 粒径砾石组进入稳定入渗的时间一致。其原因可能是,在 50%砾石含量条件下,2~3 mm 粒径砾石组土体比 3~5,5~10 mm 粒径砾石组更紧密,太多的小砾石对水分通道阻碍较小,导致含 2~3 mm 粒径崩积体在入渗初始阶段入渗率下降幅度较小。

### 2.2 砾石含量对崩积体入渗参数的影响

初始入渗率、稳定入渗率、平均入渗速率和入渗量是评价土壤渗透性能常用的指标。由图 2 可知,2~3 mm 粒径砾石组,2~5 mm 粒径砾石组和 5~10 mm 粒径砾石组的土壤渗透性能各指标大小均随砾石含量的增加而增大,且呈指数函数关系。结果表明,表征土壤渗透性能的 4 个指标与土壤砾石含量密切相关,且随着砾石含量的增大,崩积体土壤的渗透性越好。

### 2.3 砾石粒径对崩积体入渗参数的影响

由表 2 可知,不同粒径砾石在 10%,20%,30%砾石含量条件下,各组间入渗率、稳渗率、平均入渗率和入渗量差异不大,说明不同粒径在 10%,20%,30%的砾石含量条件下,砾石粒径对土壤入渗过程的影响甚微,但对于 40%和 50%砾石含量条件下,砾石粒径对崩积体水分入渗参数的影响显著。在 40%砾石含量条件下,入渗参数均随着砾石粒径的增大而减小,此时砾石粒径的增大,有减缓入渗下渗速率,其原因可能是,在砾石含量为 40%时,非毛管孔隙度差别不大,但含 5~10 mm 粒径砾石会造成崩积体土壤中水分运动通道曲折复杂,连通性差,对运动流体的阻力大,从而对水分入渗产生限制作用。当砾石含量为 50%时,2~3 mm 粒径砾石崩积体的入渗参数最大,含 5~10 mm 粒径砾石次之,3~5 mm 粒径砾石最小。这说明 3~5 mm 粒径砾石崩积体比 2~3 mm,5~10 mm 粒径砾石对减小土壤入渗的作用更大。

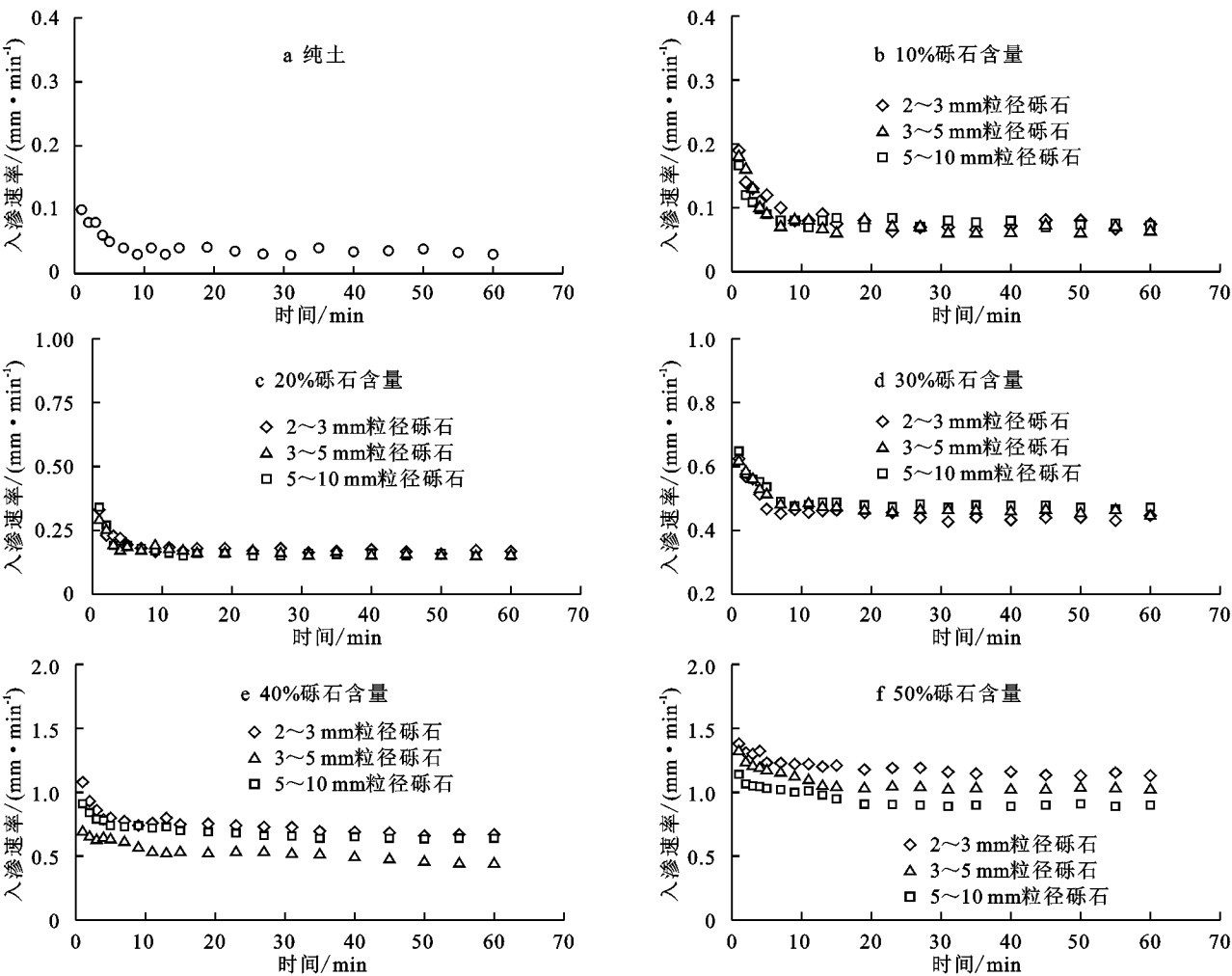


图 1 不同砾石含量崩积体入渗速率随时间变化

表 2 崩积体不同砾石粒径的土壤入渗参数

| 供试材料       | 砾石含量/% | 初渗速率/<br>(mm · min <sup>-1</sup> ) | 稳渗速率/<br>(mm · min <sup>-1</sup> ) | 平均入渗率/<br>(mm · min <sup>-1</sup> ) | 入渗量/<br>mm |
|------------|--------|------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|------------|
| 纯土         | 0      | 0.09                               | 0.03                               | 0.04                                | 4.77       |
| 2~3 mm 砾石  | 10     | 0.15                               | 0.07                               | 0.09                                | 11.98      |
| 3~5 mm 砾石  | 10     | 0.14                               | 0.08                               | 0.09                                | 11.71      |
| 5~10 mm 砾石 | 10     | 0.16                               | 0.07                               | 0.08                                | 11.18      |
| 2~3 mm 砾石  | 20     | 0.26                               | 0.17                               | 0.20                                | 21.67      |
| 3~5 mm 砾石  | 20     | 0.28                               | 0.16                               | 0.18                                | 21.01      |
| 5~10 mm 砾石 | 20     | 0.24                               | 0.16                               | 0.18                                | 19.82      |
| 2~3 mm 砾石  | 30     | 0.48                               | 0.31                               | 0.34                                | 38.97      |
| 3~5 mm 砾石  | 30     | 0.49                               | 0.35                               | 0.38                                | 42.61      |
| 5~10 mm 砾石 | 30     | 0.48                               | 0.33                               | 0.36                                | 40.02      |
| 2~3 mm 砾石  | 40     | 0.96                               | 0.72                               | 0.76                                | 92.41      |
| 3~5 mm 砾石  | 40     | 0.80                               | 0.67                               | 0.70                                | 86.62      |
| 5~10 mm 砾石 | 40     | 0.65                               | 0.50                               | 0.55                                | 68.01      |
| 2~3 mm 砾石  | 50     | 1.33                               | 1.17                               | 1.21                                | 152.87     |
| 3~5 mm 砾石  | 50     | 1.09                               | 0.90                               | 0.96                                | 112.81     |
| 5~10 mm 砾石 | 50     | 1.25                               | 1.03                               | 1.09                                | 134.13     |

2.4 崩积体土石混合物入渗过程拟合

为了进一步研究砾石含量及粒径的入渗率随时间的变化关系,采用 Kostiakov、Horton、Philip 入渗模型对实测结果进行拟合,Kostiakov 经验模型中, $a$  值越大表明入渗曲线的斜率越大,瞬时入渗率衰减越快。由表 3 可知,在不同砾石粒径条件下, $a$  值均随

着砾石含量的增大而增大,说明随着砾石含量的增大,崩积体土壤入渗的瞬时入渗率衰减随之加快。砾石含量为 40% 时,砾石粒径不同条件下,Kostiakov 经验模型的  $a$  值随砾石粒径的增大而减小,此时砾石粒径与瞬时入渗率呈负相关,这是因为砾石粒径越大,阻碍土壤入渗速率的作用越强,导致入渗率越小;

在 50% 的砾石含量时,  $a$  值表现为 2~3 mm 砾石崩积体 > 5~10 mm 砾石崩积体 > 3~5 mm 砾石崩积体, 说明 2~3 mm 砾石崩积体在 50% 含量条件下, 减小瞬时入渗率更大。Horton 公式拟合结果表明,  $c$  值变化在  $(-0.283) \sim (-0.014)$  之间, 其变化规律与 Kostiakov 方程的  $a$  值大概一致, 其物理意义与 Kostiakov 方程的  $a$  值相近。Philip 入渗模型拟合求得的参数  $b$ , 在一定程度上反映了初始入渗率的大小, 从数据中所反映的情况同其他 2 个模型相同, 这与蒋芳市等<sup>[10]</sup>研究的结果一致。

回归方程的决定系数( $R^2$ )越大, 模拟方程拟合效果越好。从表 3 还可以看出, 用 Kostiakov 方程拟合的  $R^2$  值在 0.808~0.978 之间, 平均值为 0.886; Horton 方程拟合的  $R^2$  值在 0.717~0.923 之间, 平均值为 0.819; Philip 方程拟合的  $R^2$  值在 0.631~0.885 之间, 平均值为 0.737, 说明 Kostiakov 入渗模型拟合效果最好, Horton 模型次之, Philip 模型较差。刘春成等<sup>[12]</sup>研究也说明了入渗率与时间关系采用 Kostiakov 公式拟合更接近实测值。刘兴目等<sup>[13]</sup>研究发现 Horton 模型对林地和草地下土壤入渗过程的拟合效果较好。范严伟等<sup>[14]</sup>对不同土质的入渗水头对垂直一维入渗 Philip 模型参数的影响进行了描述。这说明对于不同条件下的土壤入渗过程的拟合效果和模型是不一定相同的。显然, Kostiakov 入渗模型能较好地模拟本试验入渗过程, 更适合本试验崩积体的入渗模型。

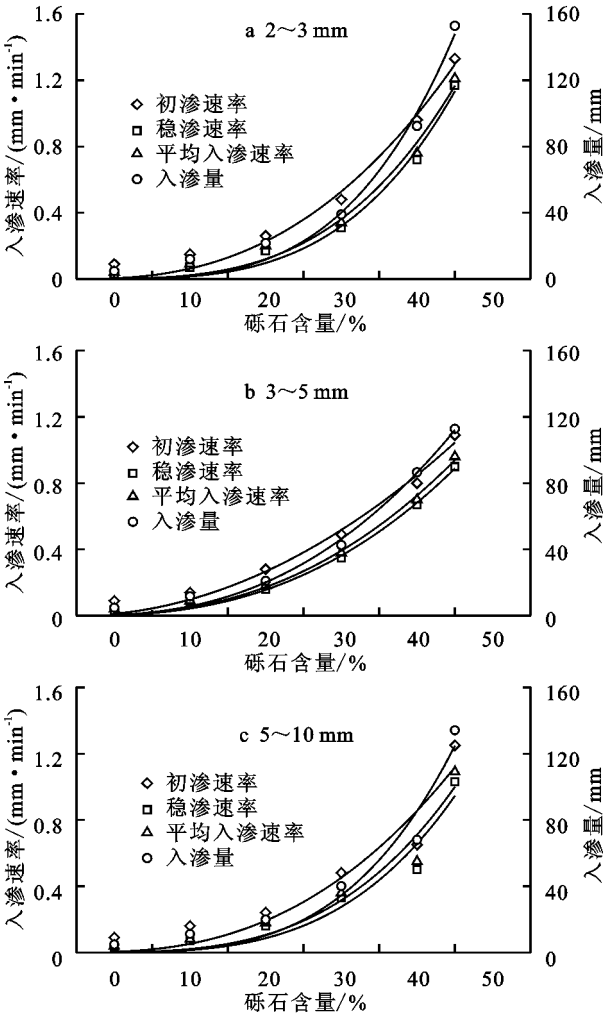


图 2 砾石含量与初渗率、稳渗率、平均入渗率及入渗量关系

表 3 崩积体土石混合物入渗过程拟合方程

| 供试材料        | 砾石含量/% | Kostiakov 方程          |       | Horton 方程                  |       | Philip 方程                |       |
|-------------|--------|-----------------------|-------|----------------------------|-------|--------------------------|-------|
|             |        | $I_t=at^{-n}$         | $R^2$ | $I_t=I_f+(I_0-I_f)e^{-ct}$ | $R^2$ | $I_t=bt^{-0.5}+I_f$      | $R^2$ |
| 纯土          | 0      | $I_t=0.085t^{-2.78}$  | 0.829 | $I_t=0.03+0.06e^{-0.175t}$ | 0.849 | $I_t=0.050t^{-0.5}+0.03$ | 0.776 |
|             | 10     | $I_t=0.160t^{-0.232}$ | 0.923 | $I_t=0.07+0.08e^{-0.135t}$ | 0.845 | $I_t=0.080t^{-0.5}+0.07$ | 0.844 |
|             | 20     | $I_t=0.268t^{-0.140}$ | 0.821 | $I_t=0.17+0.11e^{-0.242t}$ | 0.825 | $I_t=0.103t^{-0.5}+0.16$ | 0.885 |
|             | 30     | $I_t=0.473t^{-0.134}$ | 0.867 | $I_t=0.31+0.17e^{-0.195t}$ | 0.840 | $I_t=0.137t^{-0.5}+0.31$ | 0.705 |
|             | 40     | $I_t=0.969t^{-0.094}$ | 0.921 | $I_t=0.72+0.24e^{-0.175t}$ | 0.783 | $I_t=0.210t^{-0.5}+0.72$ | 0.739 |
| 2~3mm 粒径砾石  | 50     | $I_t=1.350t^{-0.043}$ | 0.947 | $I_t=1.17+0.16e^{-0.111t}$ | 0.855 | $I_t=0.155t^{-0.5}+1.17$ | 0.719 |
|             | 10     | $I_t=0.134t^{-0.180}$ | 0.840 | $I_t=0.08+0.06e^{-0.283t}$ | 0.803 | $I_t=0.042t^{-0.5}+0.08$ | 0.631 |
|             | 20     | $I_t=0.273t^{-0.178}$ | 0.817 | $I_t=0.16+0.12e^{-0.263t}$ | 0.787 | $I_t=0.090t^{-0.5}+0.16$ | 0.677 |
|             | 30     | $I_t=0.498t^{-0.111}$ | 0.883 | $I_t=0.35+0.14e^{-0.176t}$ | 0.834 | $I_t=0.127t^{-0.5}+0.35$ | 0.743 |
|             | 40     | $I_t=0.866t^{-0.078}$ | 0.978 | $I_t=0.67+0.13e^{-0.088t}$ | 0.756 | $I_t=0.167t^{-0.5}+0.67$ | 0.748 |
| 3~5mm 粒径砾石  | 50     | $I_t=1.116t^{-0.057}$ | 0.932 | $I_t=0.90+0.19e^{-0.014t}$ | 0.923 | $I_t=0.202t^{-0.5}+0.90$ | 0.763 |
|             | 10     | $I_t=0.154t^{-0.257}$ | 0.860 | $I_t=0.07+0.09e^{-0.216t}$ | 0.847 | $I_t=0.068t^{-0.5}+0.07$ | 0.672 |
|             | 20     | $I_t=0.246t^{-0.136}$ | 0.828 | $I_t=0.16+0.08e^{-0.193t}$ | 0.717 | $I_t=0.073t^{-0.5}+0.16$ | 0.706 |
|             | 30     | $I_t=0.480t^{-0.114}$ | 0.893 | $I_t=0.33+0.48e^{-0.168t}$ | 0.885 | $I_t=0.129t^{-0.5}+0.33$ | 0.742 |
|             | 40     | $I_t=0.687t^{-0.093}$ | 0.889 | $I_t=0.50+0.15e^{-0.087t}$ | 0.809 | $I_t=0.160t^{-0.5}+0.50$ | 0.635 |
| 5~10mm 粒径砾石 | 50     | $I_t=1.271t^{-0.060}$ | 0.942 | $I_t=1.03+0.22e^{-0.060t}$ | 0.745 | $I_t=0.219t^{-0.5}+1.03$ | 0.799 |

3 讨论

砾石存在改变了土壤物理特性, 从而对土壤的入渗产生影响。混入土体的砾石, 一方面由于其形状的不规则, 破坏土壤结构, 砾石含量增大导致土壤中大孔隙数量增多, 有利于水分下渗<sup>[16]</sup>; 另一方面由于不

同粒径砾石不透水性的差异, 导致水分过水断面也存在差异, 可能会使水流入渗路径弯曲度增大, 从而抑制入渗<sup>[2]</sup>。砾石的存在是促进还是抑制入渗取决于以上两方面的综合作用。本试验中入渗性能随着砾石含量的增加而增强, 说明砾石含量的增加提高了土

壤的大孔隙数量,对入渗起促进作用。一方面,由于土壤中砾石的存在,增加土壤中大孔隙的数量,有利于水分的下渗;另一方面,随着砾石含量的增大,非毛管孔隙随之增大,土壤的透水能力越好,加上砾石与细土之间更容易形成大孔隙,毛管力对垂直入渗的水分驱动力(重力)的抵消作用逐渐减弱<sup>[17]</sup>。吴海娇等<sup>[18]</sup>对掺入碎石的土石混合物入渗研究表明,初始渗透速率、稳定渗透速率随碎石含量的增加均有增加的趋势,这与本研究的结果一致。在野外,若崩积体表层砾石含量高,在降雨条件下,表层水分易入渗到崩积体的底部,使水分在土体底部汇集,可能形成滞水层,易发生潜蚀,从而造成崩积体滑塌;若表层砾石含量低,会减缓水分下渗,可能使水分在崩积体表层汇集,从而造成地表径流冲刷,加大崩积体地表的侵蚀。

不同砾石粒径对崩积体的入渗影响复杂。当砾石含量为 0%,10%,20%,30%时,由于砾石和纯土之间接触紧密,导致非毛管孔隙度和水分入渗差异不大;当砾石含量为 40%时,砾石粒径越大,对入渗抑制作用越明显,崩积体的入渗性能下降;但当砾石含量为 50%时,3~5 mm 粒径砾石对崩积体入渗的抑制作用最大。其原因可能是,一方面,在砾石含量为 40%时,非毛管孔隙度差别不大,但含 5~10 mm 粒径砾石会造成崩积体土壤中水分运动通道曲折复杂,连通性差,运动流体的阻力大,会对水分入渗产生限制作用。周蓓蓓<sup>[19]</sup>在黄土高原地区通过室内土柱模拟试验指出,累积入渗量与碎石直径成反比,这也进一步说明砾石粒径的增大能减缓入渗速率。另一方面,在非毛管孔隙变化不大时,3~5 mm 粒径砾石组的崩积体颗粒级配配比情况较 2~3 mm,5~10 mm 粒径砾石更合理,3~5 mm 粒径砾石组与纯土混合时颗粒大小搭配得当,形成的混合物孔隙均匀且细密,导致崩积体入渗降低。吴海娇等<sup>[18]</sup>研究结果也说明,土石混合物砾石间的级配情况是影响土壤入渗的重要因子。因此,在高砾石含量条件下,崩积体入渗要充分考虑砾石粒径对入渗的影响。特别是 3~5 mm 和 5~10 mm 砾石,其存在阻滞了水分的入渗,易形成滞水层,加上崩积体自身抗蚀性能低,极易造成崩积体的滑塌。

本试验探讨了砾石含量和粒径对入渗的影响,但砾石的形状特征、粒径级配及位置也影响崩积体的土壤结构性质,应进一步加强这些因素对崩积体入渗影响的研究。试验中还发现,砾石影响入渗通道的大小、形态及弯曲度等,然而针对土石混合物的微观结构特性还未有深入的研究,限制了砾石影响崩积体入渗机制的全面认识。因此,从微观角度研究土石混合物入渗通道,也是今后的研究重点。

## 4 结论

(1)从入渗过程分析,0%,10%,20%和 30%砾石含量进入稳渗时间在 9~10 min 之间;40%和 50%砾石含量到达的稳定时间较长,在 19~20 min 之间。

(2)2~3 mm 粒径砾石组,3~5 mm 粒径砾石组和 5~10 mm 粒径砾石组的初渗速率、稳渗速率、平均入渗率和入渗量均随砾石含量的增加呈指数函数增大。3 种粒径砾石在 10%,20%,30%砾石含量时,各砾石组的崩积体入渗参数差异不大;在 40%砾石含量,入渗参数均随着砾石粒径的增大而减小;当砾石含量为 50%时,崩积体入渗参数大小依次为含 2~3 mm 粒径砾石>含 5~10 mm 粒径砾石>含 3~5 mm 粒径砾石。

(3)用 3 种不同入渗模型模拟方程模拟崩积体土壤入渗,Kostiakov 和 Horton 入渗模型均能较好地表达试验入渗过程,但 Kostiakov 公式拟合更接近实测值,适合模拟崩积体的入渗模型。

### 参考文献:

- [1] 樊贵盛,李雪转,李红星.非饱和土壤介质水分入渗问题的实验研究[M].北京:水电出版社,2012:1-16.
- [2] 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.
- [3] 王慧芳,邵明安.田间含碎石土壤水分入渗及再分布试验研究[J].水土保持学报,2009,23(5):81-86.
- [4] 王慧芳,邵明安,王明玉.小碎石与细土混合介质的导水特性[J].土壤学报,2010,47(6):1086-1093.
- [5] 朱元俊,邵明安.含砾石土壤降雨入渗过程模拟[J].水科学进展,2010,21(6):779-786.
- [6] 王小燕,王天巍,蔡崇法,等.含碎石紫色土坡面降雨入渗和产流产沙过程[J].水科学进展,2014,25(2):189-194.
- [7] 李燕,刘吉振,魏朝富,等.砾石对土壤水分入渗(扩散)的影响研究[J].土壤学报,2011,48(2):435-439.
- [8] 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.
- [9] Jiang F, Huang Y, Wang M, et al. Effects of rainfall intensity and slope gradient on steep colluvial deposit erosion in Southeast China[J]. Soil Science Society of America Journal, 2014, 78(5): 1741-1752.
- [10] 蒋芳市,黄炎和,林金石,等.崩岗崩积体土壤渗透特性分析[J].水土保持学报,2013,27(3):49-54.
- [11] 张大林,刘希林.崩岗堆积土体渗透特性及剖面水分特征:以广东省五华县莲塘岗崩岗为例[J].水土保持学报,2015,35(2):251-256.
- [12] 刘春成,李毅,任鑫,等.4 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.
- [13] 刘兴目,聂艳,于婧,等.不同初始含水率下粘质土壤的入渗过程[J].生态学报,2012,32(5):871-878.