

矿渣型泥石流源区土体的入渗特性

朱兴华^{1,2}, 庄建琦^{1,2}, 李亚哲^{1,2}, 张利勇^{1,2}

(1. 西部矿产资源与地质环境教育部重点实验室, 陕西 西安 710054;

2. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054)

摘要: [目的] 分析矿渣型泥石流源区不同类型土体的入渗特性及差异, 为矿渣型泥石流源区的流域水文过程分析提供可靠的基础数据。[方法] 以小秦岭金矿区大西岔泥石流沟为研究流域, 通过野外双环原位试验, 分别测定大西岔沟源区的新矿渣, 堆积 1 a 的矿渣, 堆积 4 a 的矿渣, 耕地和草地这 5 种不同类型土体的入渗特性, 并以霍顿模型对试验数据进行了拟合率定。[结果] 通过试验数据分析发现, 新矿渣的初始入渗率最大, 而堆积 4 a 的矿渣入渗率最小; 稳定入渗率方面, 耕地的稳定入渗率最大, 达到了 0.062 mm/s。[结论] 土体的初始入渗率由土体密实度决定; 而土体的稳定入渗率则由土体的级配特性所决定。

关键词: 矿渣; 泥石流; 双环试验; 初始入渗率; 稳定入渗率

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2016)05-0096-04

中图分类号: TV144

文献参数: 朱兴华, 彭建兵, 庄建琦, 等. 矿渣型泥石流源区土体的入渗特性[J]. 水土保持通报, 2016, 36(5): 096-099. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2016.05.024

Infiltration Characteristics of Soil in Mine Waste Debris Flow Source Region

ZHU Xinghua^{1,2}, ZHUANG Jianqi^{1,2}, LI Yazhe^{1,2}, ZHANG Liyong^{1,2}

(1. Key Laboratory of Western Mineral Resources and Geological Engineering Ministry of Education, Xi'an,

Shaanxi 710054, China; 2. School of geological engineering and surveying, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: [Objective] We aim to analyze the infiltration characteristics of mine waste in order to provide the scientific research data for the hydrological processes analysis in mine waste debris flow basin. [Methods] Daxicha gully in Xiaoqinling gold mine was chosen as the research area. The infiltration characteristics of 5 different types of soil including fresh mine waste, the 1-year mine waste, the 4-year mine waste, the grass and farmland were investigated by double-ring infiltration experiments. The experimental data were then used to fit into Horton experience formula. [Results] According to the analysis results, fresh mine waste had the largest initial infiltration rate and the 4-year mine waste had the least initial infiltration rate. The stable infiltration rate of farmland was highest, which reached to 0.062 mm/s. [Conclusion] Initial infiltration rate of soil is affected by the soil compaction degree, and the stable infiltration rate is determined by the grading characteristic of mine waste debris flow prevention.

Keywords: mine waste; debris flow; double-ring infiltration experiment; initial infiltration rate; stable infiltration rate

矿渣型泥石流是山地地区矿产资源开发活动中不合理堆排废石弃渣引发或加剧的, 严重危及矿山正常生产和人员安全的一种地质灾害类型^[1]。在矿山开采过程中, 最容易使非泥石流沟演变为泥石流沟, 低频泥石流沟演变为高频泥石流沟。由于矿山泥石流往往具有人为性、频发性、一次灾情严重等特

点^[2-3], 近年来造成的重大生命安全和财产损失的灾害性事件已屡见不鲜, 如 1994 年 7 月 11 日, 暴雨引发了小秦岭金矿区西峪沟矿渣型泥石流, 导致 51 人死亡、上百人失踪, 直接经济损失达上亿元^[4]。因此, 开展矿渣型泥石流成灾机理尤其是起动及运动机理研究, 对矿渣型泥石流的监测预警和工程防治设计中

收稿日期: 2016-01-07

修回日期: 2016-02-20

资助项目: 国家重点基础研究发展规划(973 计划)项目“黄土重大灾害及灾害链的发生、演化机制及防控理论”(2014CB744702); 国家自然科学基金项目(41402255); 国家科技支撑计划(2012BAC06B02); 中国博士后基金项目(2015M572512)

第一作者: 朱兴华(1984—), 男(汉族), 湖北省宜昌市人, 博士, 讲师, 主要从事地质灾害形成机理及防治措施研究。E-mail: zhuxinghua@chd.edu.cn。

关键参数的确定具有重要意义^[1,5]。

泥石流物源入渗过程则是泥石流形成过程中的关键环节^[6],物源的入渗特性对于量化泥石流形成的临界条件至关重要。源区土体的土性特征及利用类型的不同,均会对水分入渗产生直接影响,土壤的水理性质决定了土壤吸水性和透水性的大小和变化,而土壤的吸水性、持水性和透水性的变化则直接影响水分的入渗,土地利用方式能改变土壤的孔隙度,进而改变土壤的下渗率^[7]。陈宁生等^[6]通过径流产流试验对云南东川蒋家沟泥石流源区弱固结砾石土的渗透特性进行了研究,提出了适用于该区域的入渗模式;郭晓军等^[8]通过野外双环试验进一步对蒋家沟泥石流源区不同土壤类型的入渗特性进行了率定,并分析比较了不同土壤类型的产流特点;宋孝玉等^[9]通过野外径流小区降雨试验,开展了黄土地区不同降雨强度和不同初始土壤含水率条件下的降雨,入渗产流试验,并通过数值模拟对人工降雨的入渗及产流过程进行了模拟。然而,目前国内外针对矿渣型泥石流源区土体的原位入渗特性还鲜有研究。

本文拟在总结分析前人研究方法的基础上,通过野外双环试验,对陕西省潼关县金矿区矿渣型泥石流源区不同类型土体的入渗特性进行率定及对比分析,旨在为今后该区域泥石流源区的入渗分析以及小流域的水文过程计算提供可靠的基础数据。

1 研究区概况

陕西省潼关县金矿区位于陕西省与河南省接壤的小秦岭金矿区西段北坡,矿区由于多年无序开采,矿渣在各沟谷中乱堆乱放,成为泥石流灾害的直接物源,在历史上曾诱发过多次泥石流灾害,如1994年在西峪和1996年在东桐峪由暴雨引发特大泥石流灾害,造成大量的经济损失和人员伤亡^[10]。本研究即以该区域的大西岔沟源区开展原位入渗试验,研究流域的沟口坐标为:34°29'12"N,110°22'28"E。

1.1 地质条件

流域位于华北地台南缘,北与太要断裂和汾渭盆地相邻,南与松树地一周家山断裂和朱阳断凹盆地相接。地台基底是太古界太华群变质岩系,岩性为角闪斜长片麻岩、黑云母斜长片麻岩、黑云母角闪斜长片麻岩、石英岩、大理岩、斜长角闪片麻岩等。燕山期花岗岩分布也较广泛,太华群变质岩系中,赋存有大量与构造破碎带有关的含金石英脉,多呈透镜状、串珠状、细脉、单脉,个别为密脉或网脉在构造带中断续分布。在第四纪新构造运动作用下,太华群山前断裂发生间歇性强烈抬升,山麓冲洪积扇群覆盖,渭河断凹

盆地的继续下降、河流长期的剥蚀切割,形成了现在高山、深谷的地质构造现象。

1.2 地貌条件

流域山脉主体呈东西向展布,山脉北麓山势陡峭,沟谷切割强烈;南部地形相对较缓,平均高度1500 m,谷坡平均坡度25°~35°,山谷多呈“V”字形,相对高差大,多在400~600 m。沟床比降大,平均都在10%~15.2%,地形有利于坡面径流迅速汇集,暴涨猛落,具有强大的侵蚀和搬运能力。

1.3 气候水文

研究流域属暖温带季风型大陆性气候。据潼关县气象站资料统计,流域年平均气温13.8°,年均降水量645.8 mm,降水多集中在7—9月,占全年降水量的50.8%,且多为暴雨;最大24 h降雨量194.9 mm,最大1 h降雨量93.2,10 min最大降雨量26.2 mm;平原区多年平均降水量587.4 mm,年最小降水量319.1 mm,年最大降水量958.6 mm,日最大降雨量113.4 mm。沟内的地下水类型主要为基岩裂隙水和松散土孔隙水,而沟谷中的潜水赋存于大西岔沟的冲、洪积碎石层中,主要由大气降水,地表水入渗及裂隙水补给。由于沟谷中的节理、裂隙发育,极可能可能导致崩塌、滑坡等新的地质灾害,进一步扩大大西岔沟的物源储量^[5]。

从地质、地貌及气候条件可以看出,该地区的矿渣一旦在沟道中无序堆积,将形成非常有利的孕灾条件,并具备诱发大规模泥石流灾害可能性。因此,对源区不同类型土体的入渗特性进行率定,对后期的小流域风险评价和泥石流灾害的监测预警研究尤为重要。

2 双环入渗试验

2.1 试验对象选取

大西岔沟位于东桐峪镇以南5.5 km处,属于潼关县桐峪镇境内,为东桐峪水系的二级支流,大西岔沟流向由西向东,流域面积1.89 km²,主沟长2.31 km,平均沟床纵比降达0.325,相对高差为751 m,该沟平面呈勺型,主沟居中,主沟两侧发育多条冲沟。作者于2014年3月21日对该沟的物源储量及分布进行了调查,发现沟内仍有8处矿渣堆在沟中随意堆放,其中最高的矿渣堆甚至高达19 m,这些矿渣堆的坡脚接近40°,呈台阶状层叠式堆放,部分沟段甚至填满了整个沟道,形成堵塞坝。本次调查初估大西岔沟内已堆积废石渣8.20×10⁵ m³,这些矿渣将是潜在泥石流灾害的直接物源。

影响矿渣堆积物入渗特性的因素主要有2个:物

质级配组成以及结构特征。在天然条件下,矿渣堆积体的结构特征与固结时间有关。

因此,本研究选取了大西岔沟道中的刚开挖松散矿渣,堆弃 1 a 左右的弱固结矿渣以及堆弃 4 a 的矿渣为研究对象。在物质级配组成方面,3 组矿渣样品的级配曲线如图 1 所示。

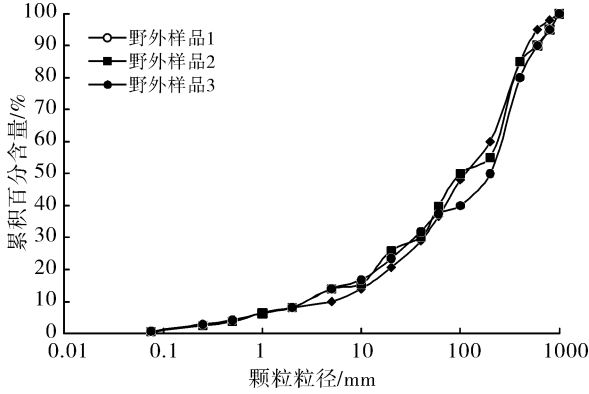


图 1 矿渣型泥石流的物源级配曲线

从图 1 中可以明显的发现:同一条沟道中,3 组矿渣样品的颗粒级配差异不大。物源中 2 mm 以下的细颗粒所占比例不超过 10%,而大于 50 mm 的粗颗粒含量则超过了 70%,且矿渣的磨圆度很差。这样的级配结构,使得矿渣有一定的架空作用,孔隙条件良好,从而成为了地表水入渗的良好通道。

本研究作为今后小流域水文过程分析计算的基础性参数研究,不同的土地利用类型,入渗特性必然不同。因此,本研究中也考虑了对流域中林地和草地入渗特性进行测定。

2.2 试验过程介绍

对物源入渗率的测定,主要有 2 种方法:一种是利用室内的渗透试验仪器,但这种室内的测定往往采用重塑土体,很难保证土体的结构不受扰动,最终所测试验结果往往与真实结果存在差异;另一种是在原地开展土壤入渗试验。目前,原地土壤入渗试验常用方法主要有两种:双环试验和人工降雨试验。相对于人工降雨试验而言,双环试验由于操作简单,更适用于野外各种不同的地形条件,因而在野外测试中被广泛应用^[8]。

本研究以野外双环试验为研究手段,分别对刚开挖的松散矿渣,堆弃 1 a 左右的弱固结矿渣,堆弃 4 a 的矿渣以及流域内林地和草地入渗特征分别进行了测定,具体的操作过程如下:试验时,先将双环打入至土中约 10 cm,环中插 1 根标尺来观测水位;然后向内外环注水,并用带刻度尺的水桶供水,在测试时按照设定的时间间隔记录内环下渗的水量;保持内外一定的水位高度,并记下加水时刻,内环的供水量。

2.3 试验数据分析

对 5 组双环入渗试验的数据分析及处理结果如下。

(1) 数据处理方法。有关入渗试验数据分析方法,前人在模型试验的基础上,提出了若干模式^[6,11]。其中霍顿公式对参数要求较少,形式简单且拟合性良好,从而得到广泛应用,其基本形式如下^[12]:

$$f_t = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt} \quad (1)$$

式中 f_t —— t 时刻的下渗速率(mm/s); f_0 ——初始入渗率(mm/s); f_c ——稳定入渗率(mm/s); k ——系数,用于反映土壤的下渗性能,本研究以霍顿公式对试验数据进行拟合分析。

(2) 试验结果分析。

① 新开挖矿渣的入渗特性研究。根据上述试验步骤,对新堆弃矿渣的入渗特征进行了测定,其入渗过程如图 2 所示。

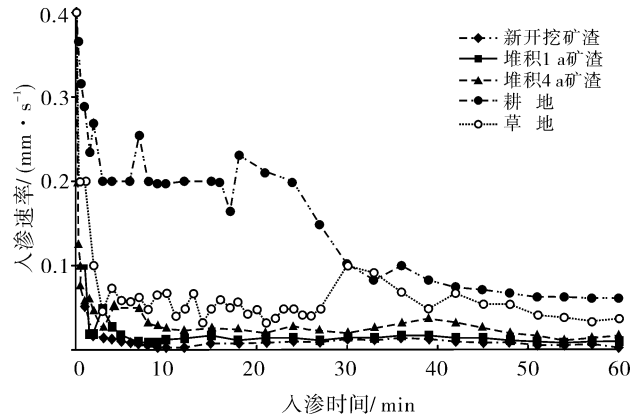


图 2 不同类型物源的入渗曲线

由图 2 可以看出,新堆积矿渣的初始入渗率 f_0 为 2 mm/s,稳定入渗率为 0.011 1 mm/s,根据霍顿公式拟合的入渗速率计算公式为:

$$f_t = 0.011 1 + 1.988e^{-0.034t} \quad (2)$$

相关性系数 $R^2 = 0.913 3$,相关性良好。

② 堆积 1 a 的矿渣。堆弃约 1 a 的矿渣入渗过程如图 2 所示,其初始入渗率 f_0 为 0.6 mm/s,稳定入渗率为 0.011 1 mm/s,根据霍顿公式拟合的入渗速率计算公式为:

$$f_t = 0.011 1 + 0.589e^{-0.015t} \quad (3)$$

相关性 $R^2 = 0.794 8$,相关性尚可。

③ 堆积 4 a 左右的矿渣。堆弃约 4 a 的矿渣入渗曲线如图 2 所示,其初始入渗率 f_0 为 0.2 mm/s,稳定入渗率为 0.017 5 mm/s,根据霍顿公式拟合的入渗速率计算公式为:

$$f_t = 0.017 5 + 0.182e^{-0.003 1 t} \quad (4)$$

相关性 $R^2 = 0.804 4$,相关性尚可。

④ 耕地的入渗特征。大西岔沟沟道中除了矿渣堆弃之外,还有部分草地和耕地。本研究还进一步对大西岔沟沟道中的土体入渗特征进行了分析,从而为后续的研究提供关键参数。由图2可见,耕地的初始入渗率 f_0 为 0.6 mm/s,稳定入渗率为 0.062 mm/s,根据霍顿公式拟合的入渗速率计算公式为:

$$f_t = 0.062 + 0.538e^{-0.0046t} \quad (5)$$

相关性 $R^2 = 0.7435$,相关性一般。

⑤ 草地的入渗曲线。由图2可见草地初始入渗率 f_0 为 0.4 mm/s,稳定入渗率为 0.0378 mm/s,根据霍顿公式拟合的入渗速率计算公式为:

$$f_t = 0.038 + 0.362e^{-0.0034t} \quad (6)$$

相关性 $R^2 = 0.8043$ 。

3 讨论与结论

(1) 初始入渗率方面:新矿渣 > 堆积 1 a 矿渣 ≈ 耕地 > 草地 > 堆积 4 a 的矿渣。双环试验当天,测得新堆积矿渣的初始入渗率为 2 mm/s,堆弃 1 a 矿渣的初始入渗率为 0.6 mm/s,堆弃 4 a 的矿渣初始入渗率为 0.2 mm/s,耕地的初始入渗率为 0.6 mm/s,草地初始入渗率为 0.4 mm/s。

(2) 稳定入渗率方面:耕地 > 草地 > 堆积 4 a 的矿渣 > 堆积 1 a 矿渣 ≈ 新矿渣。开展试验当天,测得新堆积矿渣的稳定入渗率为 0.0111 mm/s,堆积 1 a 矿渣的稳定入渗率为 0.0111 mm/s,堆弃 4 a 矿渣的稳定入渗率为 0.0175 mm/s,耕地的稳定入渗率为 0.062 mm/s,草地的稳定入渗率为 0.0378 mm/s。

(3) 对比分析发现不同类型土体入渗特性发现:土体的初始入渗速率由土体密实度决定;而土体的稳定入渗率则由土体的级配特性所决定。本次测试时新矿渣的自然固结时间最短,土体密实度最低,堆积 4 a 的矿渣密实度最高,而耕地和草地的密实度居中,土体初始入渗率特性与土体的密实度性质完全吻合。随着水的不断入渗,土体的入渗率逐渐趋于稳定,其稳定入渗率最终由土体级配特征所决定,如图2所示,新矿渣,堆积 1 a 和堆积 4 a 矿渣的级配变化不大,因此 3 者的稳定入渗率也相差不大。

通过上述研究,初步率定了小秦岭金矿区不同土体类型的入渗特性,这些率定参数将用于后续的小流域泥石流产汇流过程分析计算之中,同时也为该地区其他相关研究以及泥石流监测预警提供的科学参考。同时,在本研究过程中,也发现了一个有趣的现象,在此予以讨论:入渗试验过程中,多条入渗曲线随着试验的逐步开展表现出强烈的波动。以图2中新矿渣的入渗曲线为例,放大下渗 11~46 min 区间段(图3),可以发现矿渣的下渗速率波动较大。

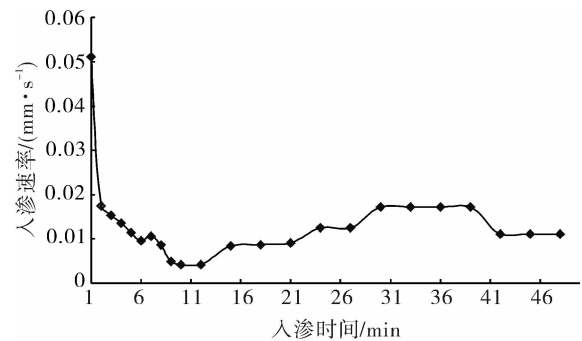


图3 新堆积矿渣的入渗曲线局部(出现较大的波动)

分析渗流速率出现较大波动的原因,笔者认为:以矿渣为代表的宽级配物源,随着降雨入渗的不断进行,可能伴随着强烈的细颗粒迁移,这是宽级配物源入渗的一个重要特点。在宽级配物源中,粗颗粒构成土体结构的骨架,细颗粒随着入渗过程在入渗路径中迁移;在细颗粒的输移过程中,或短暂堵塞渗流通道,或随着孔压的急剧上升而瞬间疏通,在这个过程中,渗流速率必然出现较大的波动。如何量化分析这种细颗粒的运移效应?如何分析土体的稳定入渗率与土体级配特征的内在关系?这些问题是今后本领域研究的重点和难点。

[参考文献]

- [1] 徐友宁,曹琰波,张江华,等.基于人工模拟试验的小秦岭金矿区矿渣型泥石流起动研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(7):1388-1395.
- [2] 徐友宁,陈社斌,何芳,等.潼关金矿区矿渣型泥石流灾害及防治对策[J].山地学报,2006,24(6):667-671.
- [3] 徐友宁,何芳,陈华清.西北地区矿山泥石流分布及特点[J].山地学报,2007,25(6):729-736.
- [4] 刘世建,谢洪,韦方强,等.小秦岭金矿区人为泥石流[J].山地学报,1996,14(4):259-263.
- [5] 邓龙胜,范文,熊炜,等.矿渣型泥石流发育特征及危险性评价[J].工程地质学报,2009,17(3):415-420.
- [6] 陈宁生,张军.泥石流源区弱固结砾石土的渗透规律[J].山地学报,2001,19(2):169-171.
- [7] 吴钦孝,韩冰,李秧秧.黄土丘陵区小流域土壤水分入渗特征研究[J].中国水土保持科学,2004,2(2):1-5.
- [8] 郭晓军,崔鹏,朱兴华.泥石流多发区蒋家沟流域的下渗与产流特点[J].山地学报,2012,30(5):585-591.
- [9] 宋孝玉,白鹏,王娟,等.陕北黄土坡地枣园降雨入渗产流试验与模拟[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2014,42(11):163-168.
- [10] 李昭淑.陕西潼关金矿区9.4人工泥石流灾害研究[J].灾害学,1995,10(3):51-56.
- [11] 王燕生.工程水文学[M].北京:水利电力出版社,1991:35-36.
- [12] Horton R E. An approach toward a physical interpretation of infiltration-capacity[J]. Soil Science Society of America Journal, 1941,5(C): 399-417.