

文章编号: 1008-2786-(2015)6-713-08

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000086

## 细颗粒迁移在泥石流形成过程中的作用

庄建琦<sup>1</sup>, 崔鹏<sup>2</sup>, 胡凯衡<sup>2</sup>, 陈晓清<sup>2</sup>

(1. 长安大学地质工程与测绘学院/西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710054;

2. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所/中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室, 四川 成都 610041)

**摘 要:** 针对松散物质异常丰富孕灾环境条件下泥石流的形成过程和泥沙来源, 设计了人工降雨条件下泥石流形成试验, 主要获得以下结果: 1. 震后孕灾环境条件下泥石流的形成首先需要细颗粒的起动, 然后夹杂大颗粒运动, 径流量快速增加, 并伴随着沟道堵塞-溃决现象, 形成阵性泥石流; 此后随着细颗粒的迁移, 沟道粗化现象严重, 泥石流现象逐渐消失。2. 坡面首先对降雨开始响应, 发生崩塌形成堰塞体, 对沟道侵蚀产生较大影响, 并伴随着坝体松散物质溃决向下游迁移。3. 泥石流的泥沙主要来源于沟道中下游, 其次是沟道中上游和源头坡面, 三处的泥沙来源占到 70% 以上。4. 土体对降雨的响应明显, 孔隙水压力和含水量在不同时间段和不同部位变化曲线具有明显差异, 并出现一定的波动特征, 其不仅受到降雨的影响, 同时对土体细颗粒含量和土体结构也有明显响应。5. 细颗粒在泥石流的形成过程中扮演者非常重要的角色, 其位移和汇集均对流域地形的演化和泥石流的形成产生影响。在泥石流形成预报时, 应考虑土体细颗粒含量, 不同的细颗粒含量其泥石流起动时临界含水量和孔隙水压力差异较大。

**关键词:** 泥石流形成; 泥沙来源; REE; 孔隙水压力; 含水量

**中图分类号:** P642.23

**文献标志码:** A

泥石流的形成包括起动和汇流, 其中汇流研究是泥石流学科发展及灾害防治的难点和重点。由于泥石流多起于山区流域的源区, 我们所能观测到的仅仅是泥石流的结果, 而对泥石流的形成过程很难观测; 同时泥石流由于物源丰富, 来源不确定, 过程复杂, 在其形成与汇流的过程研究中存在众多的未知空间。目前, 国内外专家已从多方面对泥石流汇流进行了相关研究, 如: 吴积善<sup>[1]</sup>在大量观测资料的基础上, 提出了泥石流的不同汇流类型及其特征; 罗德富等<sup>[2]</sup>、陈晓清等<sup>[3]</sup>对特殊溃坝的泥石流汇流过程进行了一些案例研究。在泥石流形成过程中, 对细颗粒的迁移及其对泥石流起动的影响, 也逐渐得到多数学者的关注, 崔鹏等、陈晓清等、鲁晓兵等通过原型观测、野外试验和数值模拟技术, 分别探

讨了细颗粒在泥石流形成中迁移和汇集及其在泥石流形成过程中的特殊作用。由于泥石流暴发突然, 人工很难进行实际测量和监测, REE(Rare Earth Element) 示踪技术为探测泥石流的物质来源和形成过程提供了可能, 它是一种具有能被土壤颗粒强烈吸附、难溶于水、淋溶迁移不明显、有较低的土壤背景值、中子活化对其检测灵敏度高等特点, 是较理想的稳定性示踪元素, REE 示踪法可在不同地形条件下施放不同的元素, 能精细地确定侵蚀产沙部位及侵蚀方式的演变, 效果比较理想<sup>[4]</sup>。

利用流域模型, 结合 REE 示踪技术, 在人工降雨作用下开展泥石流的形成机理试验研究, 探讨泥石流形成-汇流环节的泥沙来源, 尤其是沟道演化和细颗粒迁移, 对于揭开泥石流汇流具有重要意义。

收稿日期(Received date): 2014-08-21; 改回日期(Accepted): 2014-10-30。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金(41572272), 国家重点基础研究计划项目(973)(2014CB744703)。[Supported by the National Natural Science Foundation of China( Number: 41572272), State Basic Research Development Program of China (973 Program) ( Number: 2014CB744703).]

作者简介(Biography): 庄建琦(1982-), 男, 河南人, 讲师, 博士, 主要从事泥石流方面的研究。[Zhuang Jianqi(1982-), Lecturer, Undertaking research on debris flow.] E-mail: rockfans09@163.com

同时获得泥石流形成过程中的流量变化和土体内部孔隙水压力、含水量等。结果对于了解泥石流形成环节,弥补泥石流形成机理研究中的参数具有一定的作用。研究泥石流起动的力学特征和表现过程,直接采取原型泥石流流域内的准泥石流体,用作试验的固体物料。将土样依据流域模型尺度,按照一定的比例进行缩放,制作成流域模型。为了获取土体在径流作用下孔隙水压力特征,在土体中埋设传感器,实时测量土体孔隙水压力和含水量的变化特征;在流域表面不同子流域和沟道中布设不同厚度的REE示踪元素,获得子流域和沟道在泥石流形成过程中的侵蚀特征。

## 1 试验方案设计

### 1.1 试验装置

泥石流形成试验是一项较大的工程。由于泥石流流域长、宽、沟道宽度等参数比例尺寸差异较大,目前的模型试验设备难满足大比例尺的试验,尤其是难满足模型比例需求。因此,在进行泥石流形成过程的试验中,多研究松散物质在降雨作用下的响应过程,在尽量满足模型试验尺寸的前提下,重视试验现象和机理特征<sup>[5-7]</sup>。试验装置由水槽、降雨系统和径流接受桶组成,试验水槽宽1 m,长5 m,高度为1 m;在水槽内根据试验设计铺设土样,并在

下部设置集流系统,供收集径流、采集泥沙样品用。试验水槽如图1所示。降雨系统由2个侧喷系统相互对喷构成,降雨的喷头由中国科学院水土保持研究所加工,经测定其不同降雨强度下的雨滴大小分布和冲击能量与实际近似,设计喷头间距为5 m左右,每对喷头的有效均匀降雨区域长5 m、宽4 m,面积约为20 m<sup>2</sup>。雨滴往上侧喷后自由落体降下,降雨强度为82.7 mm/h。

### 1.2 试验材料

试验土样取自于“5·12”汶川地震极重灾区的北川县魏家沟,为震后松散土体。土壤颗粒以砂砾为主,粘粒占3.3%,土壤干密度为1.6 g/cm<sup>3</sup>。为了确保施放的均匀度高,各示踪区应无交叉污染,确保分析测量的可靠性<sup>[8]</sup>。目前通常使用逐级稀释法将示踪元素氧化物均匀标记到土壤中。试验用的REE有La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Ce<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Tb<sub>4</sub>O<sub>7</sub>、Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Eu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和Yb<sub>2</sub>O<sub>3</sub>等7个元素,为粉末状的氧化物。采用逐步稀释的方法,分别将7个REE与试验用土混合制成富含REE的试验示踪用土。由于试验目的主要是分析泥石流物源来源状况,只要配置的试验土样的稀土元素远远大于背景值即可,试验用土的稀土元素含量约为30 mg/kg,此后根据泥石流堆积土样含有稀土含量的变化程度,可以获知不同部位对泥石流的贡献程度,研究泥石流形成过程中的物源来源。

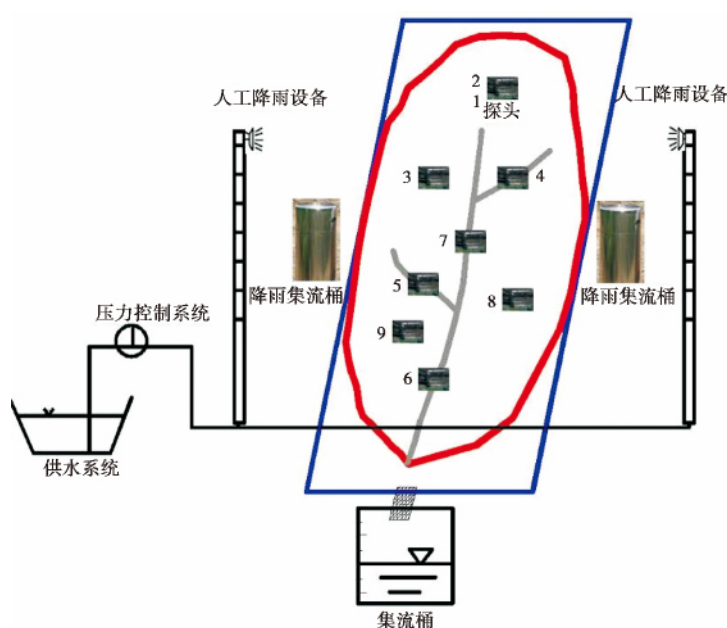


图1 传感器埋设位置与试验装置

Fig. 1 Experimental facilities and sensors site

### 1.3 试验方法

通过对地震后泥石流形成条件的分析<sup>[9-10]</sup>,泥石流的形成主要受到降雨控制,因此在对小流域地貌形态分析、概化、抽象的基础上,并考虑室内模拟试验场地的具体条件,依据过程相似原理设计了小流域模型。该模型的几何特征为实测投影面积 3 m<sup>2</sup>,流域模型长度 3 m,最大宽度 1 m,流域高差 0.9 m,主沟右侧坡面平均坡度为 27°~28°,左侧坡面的平均坡度为 34°,沟道源头的坡面坡度为 36°。该小流域模型具有一条一级沟道和两条二级沟道,主沟沟床比降为 29.3%,左支沟沟床比降为 45.9%,右支沟沟床比降为 39.6%;

试验共进行了 1 h,每 10 min 取样一次,并记录产流产沙情况以及测量流域地貌变化,尤其是泥石流堆积扇的变化情况,用以分析泥石流形成过程中泥沙来源和堆积扇演化速率;同时在源头坡面、左坡面、右坡面、两个支沟和主沟埋设含水量和孔隙水压力探头(图 1)。含水量测量设备采用 TRASE TDR 时域水分仪,每 3 min 可以扫描 12 个通道,孔隙水压力测量采用 PSI Pressure System 系统,传感器是 730-13E-00005 型,测量精度为 0.5 mm 水柱,获取泥石流形成过程中的土体内部变化特征。

### 1.4 示踪元素投放

REE 示踪法的基本原理是将不同的稀土元素分别与土壤均匀混合后,布设在需要观测的各种地形部位,使其在整个泥石流形成过程中,跟随土壤一起移动、迁移和汇集。通过采样分析泥沙和不同部位土壤样品中的浓度,便可以获知泥石流泥沙的来源空间和时间上的分布特征,同时也可以获得泥石流松散物质的运移特征。在该试验中,由于示踪区域较多,在进行流域不同部位布设示踪元素时,要防止邻区之间的交叉污染,又要使不同示踪区域能够紧密结合<sup>[11]</sup>;在流域模型上将配制好的稀土元素氧化物的示踪土样在流域模型上的布设,根据沟道和坡面特征,分别在沟道上部、下部和上游坡面、左坡面、右坡面以及左右支沟铺设 5 cm 厚的示踪元素土样。REE 样品的分析在中国原子能科学研究院原型微反应堆上采用中子活化分析方法进行。

### 1.5 泥沙来源分析

侵蚀过程泥沙样品中不同稀土元素的含量确定后,坡面不同部位侵蚀贡献率按下式计算<sup>[4,11]</sup>

$$D^i = \frac{100L^i}{L} \quad (1)$$

其中

$$L^i = \frac{(M^i - B^i)Q}{E^i} \quad (2)$$

$$L = \sum L^i \quad (3)$$

式中  $L^i$  为某一种示踪元素的侵蚀率,  $M^i$  为某一种示踪元素的测试浓度值,  $B^i$  为某一种示踪元素的背景浓度值,  $E^i$  为某一种示踪元素的释放浓度值,  $Q$  为总的侵蚀率,  $L$  为侵蚀量,  $D^i$  为某示踪元素的侵蚀贡献率。根据式(1)便可以计算得出不同部位对泥石流形成的贡献程度。

## 2 试验现象

### 2.1 径流和泥石流形成过程

降雨初始阶段由于松散物质含水量较低,降雨主要以入渗为主,没有明显产流。随着入渗增加,表层土壤含水量达到接近饱和状态,入渗速率快速降低,开始出现超渗产流,随后汇入沟道形成沟道汇流。随着降雨的持续,流域坡面土体开始出现滑移现象,较大石块和成块土体失稳后进入沟道,并在沟道堆积。随着降雨-径流的增加,坡面细颗粒随着径流进入沟道,对沟道进行侵蚀。沟道径流量达到一定程度后,沟道中细颗粒开始起动,并夹杂较大石块形成泥石流,径流量快速增加,形成的泥石流的重度较小;在这个过程中,堆积在沟道中的小型崩塌体在水流侵蚀作用下发生多次溃决,形成大流量、大重度泥石流。随着坡面和沟道细颗粒的运移,整个流域表面出现粗化,降雨入渗增加,径流含沙量也开始降低,沟道中的崩塌体基本运移完毕,此后,泥石流现象逐渐消失,径流量逐渐减小,以高含沙水流为主(图 2 和图 3)。这种泥石流的形成过程在第一个 10 min 和第二个 10 min 出现,在此后的试验过程中再也没有出现泥石流的形成过程。

图 2 和 3 显示的径流过程可以看出,在第一个 10 min 过程中,径流增加非常迅速,达到峰值后,径流略有下降并趋于平稳。开始时刻土体处于快速入渗阶段,此时土体含水量和孔隙水压力快速增加,细颗粒迁移和孔隙水运移异常波动,随后出现超渗产流,并伴随着坡体失稳现象,形成泥石流。当失稳土体和沟道能够快速带走的细小颗粒被径流以泥石流形式输出流域后,流量开始减少并趋于平稳阶段。在第二个 10 min 降雨过程中,由于在第一个 10 min 降雨过程中,土体表层的细颗粒基本被带走,因此在开始阶段径流缓慢增长,并到达一个平稳阶段,随着

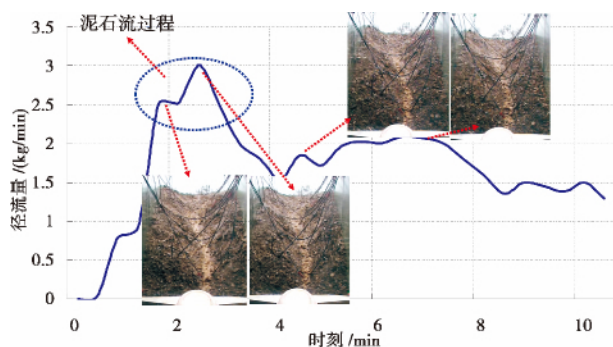


图2 第一个10 min 泥石流形成图

Fig. 2 Process of debris flow in the first 10 min

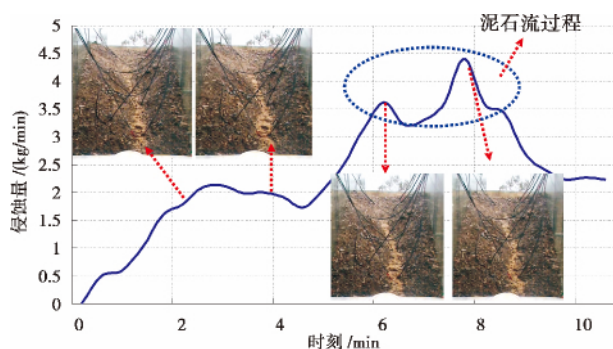


图3 第二个10 min 泥石流形成图

Fig. 3 Process of debris flow in the second 10 min

降雨的持续,土体内部细颗粒开始迁移汇集,并在沟道汇集积累,对沟道形成一定的堵塞,达到一定程度后,这些松散物质在径流作用下逐渐溃决并向下迁移,形成泥石流。对比两个径流过程,在径流总量上,第二个10 min 比第一个10 min 明显增多,同时出现泥石流的时间第一个10 min 较第二个10 min

提前。

## 2.2 地形变化

从坡体位移观测结果来看,降雨开始最初一段时间(1 min)对边坡没有明显影响,经历一段时间之后,首先出现的是崩塌现象,即处于不稳定状态的较陡小块土体开始失稳,并堆积在沟道中;随着降雨的持续增加,沟道两侧的坡体变形开始持续增加,主要表现为下滑过程,并伴随着小面积崩塌,坡度逐渐变缓;在泥石流的形成过程中,沟道冲淤主要表现为上游受到崩塌和侵蚀的影响,表现为松散物质在此堆积;中下游受到崩塌影响在沟道中形成小型坝体,在坝体上方表现为淤积,下方表现为侵蚀,并伴随着坝体松散物质溃决并向下游迁移;泥石流堆积扇在第一个10 min 降雨变化最大,泥石流带出的堆积物较多,在出口处堆积下来,并不断演化为堆积扇。

## 3 结果分析

### 3.1 泥沙来源

在开始的20 min 流域侵蚀泥沙主要来源于沟道中下游(Yb),其次是沟道中上游(Nd)和源头坡面(La),三者占到泥沙来源的70%以上;而支沟和左右坡面泥沙来源相对较少,仅占到15%左右。说明在第一个和第二个10 min 降雨阶段,流域侵蚀产出的泥沙主要来源于主沟道和源头坡面。随着降雨的持续,主沟道泥沙贡献率逐渐降低,源头坡面侵蚀贡献率上升为主要侵蚀贡献区域;同时,支沟和左右坡面泥沙贡献率也开始上升(图4)。

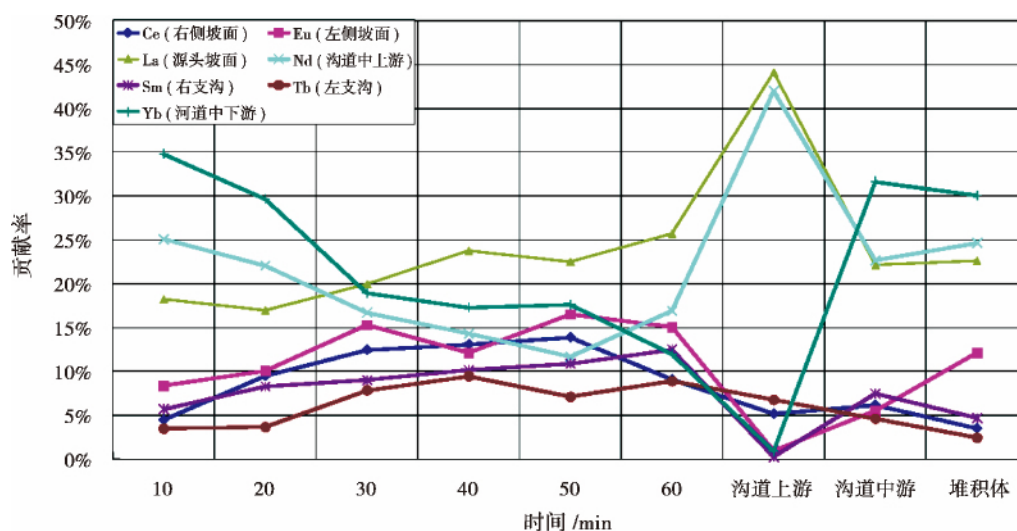


图4 降雨径流和泥石流堆积扇泥沙贡献

Fig. 4 Source of sediment in debris flow fan and runoff



泥石流堆积扇泥沙主要来源于沟道中下游(Yb)、沟道中上游(Nd)和源头坡面(La),三者占到堆积扇总量的77%以上,其次是左侧坡面(Eu)。堆积扇的泥沙贡献率与第一个10 min的泥沙来源贡献程度在空间上具有一致性,这也说明第一个10 min降雨过程是泥石流堆积扇发育的重要阶段,堆积扇的物质主要在第一个10 min发育,与试验现象一致。在沟道中上游,坡面源头侵蚀的泥沙主要堆积在该处,使得该处的泥沙中La的含量较高。

### 3.2 泥石流形成过程中的细颗粒迁移

泥石流堆积扇的土体粒径明显较其他部位的细,<0.25 mm的细颗粒达到17.31%,与原样的4.01%明显增大。在泥石流的形成过程中,降雨首先将坡面上的细颗粒搬运到沟道中,沟道细颗粒增加,径流先将细颗粒携带形成高含沙水流,增大了水流的侵蚀强度,逐渐搬运大颗粒形成泥石流,随着泥石流的搬运侵蚀,细颗粒随着泥石流流出沟口。但是在沟道中部,<0.25 mm的细颗粒含量略小于试验原样,在该地段,细颗粒堆积后,泥石流搬运较为明显,该处大量的细颗粒被输移出流域。泥石流在起动过程中,首先是坡面细颗粒的迁移和汇集,随着水流将细颗粒逐渐携带,径流的侵蚀和搬运能力增加,逐渐搬运和侵蚀沟道松散固体物质,导致岸坡松散物质持续补给,形成泥石流。可见细颗粒的迁移和汇集是泥石流形成的关键环节,同时还需要有足够的松散物质供其搬运侵蚀,只有这样,泥石流才能充分形成(图5)。降雨前后松散物质表面颗粒粗化现象严重,大量的细颗粒被带走,孔隙度和粗糙度明显增加。

### 3.3 土体孔隙水压力和含水量变化特征

不同部位土体在降雨过程中孔隙水压力变化能

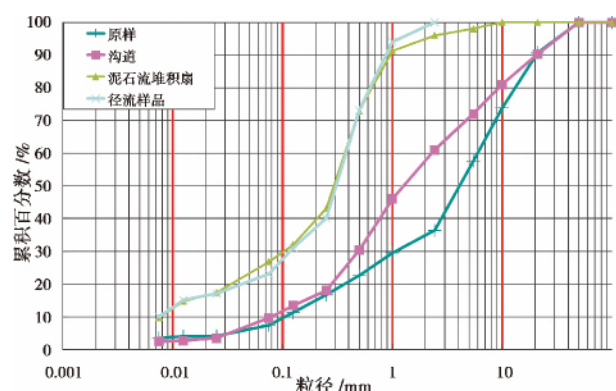


图5 不同部位松散物质颗粒级配

Fig.5 Grain-size distribution for the material in the different site

够反应该处土体内部变化特征<sup>[6,10,12-13]</sup>。根据试验设置,共在试验流域的9个部位测定了孔隙水压力和含水量变化,测定9个土体内部变化曲线(图6)。由于土体的非均一性和随机性,这导致了在降雨过程中土体内部含水量和孔压变化的随机性和不确定性,但变化趋势依然呈现一定规律:

1. 整个降雨过程中,试验土体的孔隙水压力随着降雨的发生而开始增加,并出现波动上升,降雨结束后,孔隙水压力迅速回落。在起初阶段(第一个10 min内)只出现一个明显的峰值,其上升过程没有出现波动现象。第一个10 min降雨结束后,孔隙水压力呈现缓慢下降趋势;第二个10 min降雨开始,孔隙水压力出现波动上升,并具有多个峰值,降雨结束后,孔隙水压力快速回落;此后的降雨过程,孔隙水压力主要表现为快速直线上升,达到峰值后,并持续一段时间,随着降雨的结束开始缓慢回落。

2. 不同位置土体孔隙水压力也具有明显的差异。在第一个10 min降雨过程中,位于右支沟和主沟下游的孔隙水压力变化较大,而其他部位的土体孔隙水压力变化较小,尤其是位于坡面源头土体表层的孔隙水压力变化甚小,主要是因为该处探头埋深较浅,土体空隙较大,不足以堵塞土内孔隙通道,孔隙水压力容易消散,故孔隙水压力增加缓慢,对降雨的响应甚微。沟道中下游的孔隙水压力增加主要受到沟道径流的影响,变化幅度较大。在第二个10 min降雨过程中,位于沟道源头底部的孔隙水压力增幅最大,说明土体的表层经过降雨饱和后,粘粒的吸水膨胀堵塞孔隙,并引起表层的压力传递到下部。

降雨过程中,不同土体的含水量(水体体积占总体积的百分比)通过含水探头测量。其位置与孔隙水压力一致,变化趋势如图7。持续降雨中,位于坡面位置的含水量探头首先开始增加,一定的时段后,位于沟道中的含水量探头开始增加。随着降雨的结束,含水量迅速降低,但是此后土体的含水量维持在较高的状态,较最初的含水量5%左右增加到15%以上。位于边坡右侧的9号探头含水量变化幅度最大,与孔隙水压力变化幅度一致。而位于支沟和主沟的含水量变化幅度和含水量最小,主支沟在径流作用下,细颗粒被带走,土体粗化现象显著,孔隙度增加,相对体积含水量低。在试验过程中,土体含水量的变化没有出现类似于孔隙水压力的波动现象,说明孔隙水压力不仅受到土体含水量的影响,同

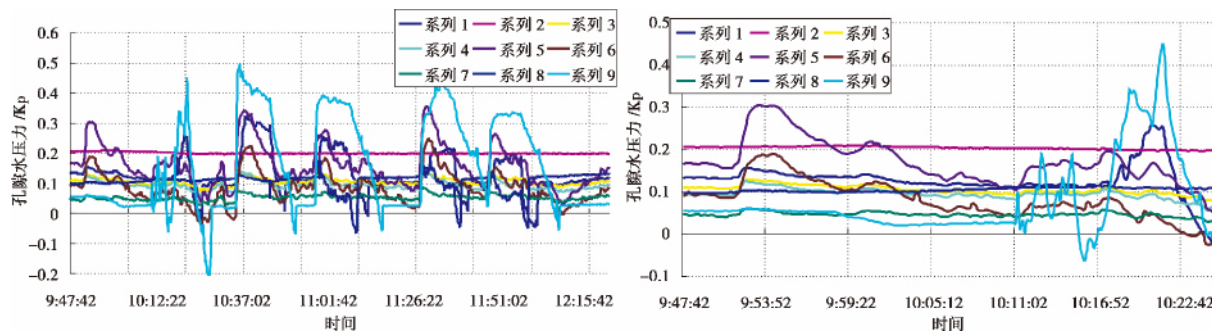


图6 不同时间和部位土体孔隙水压力变化曲线(图例系列数与图1中的探头编号一致)

Fig.6 Changes of pore - water pressure in the experiment( the legend series are consist with the probe No. in fig.1)

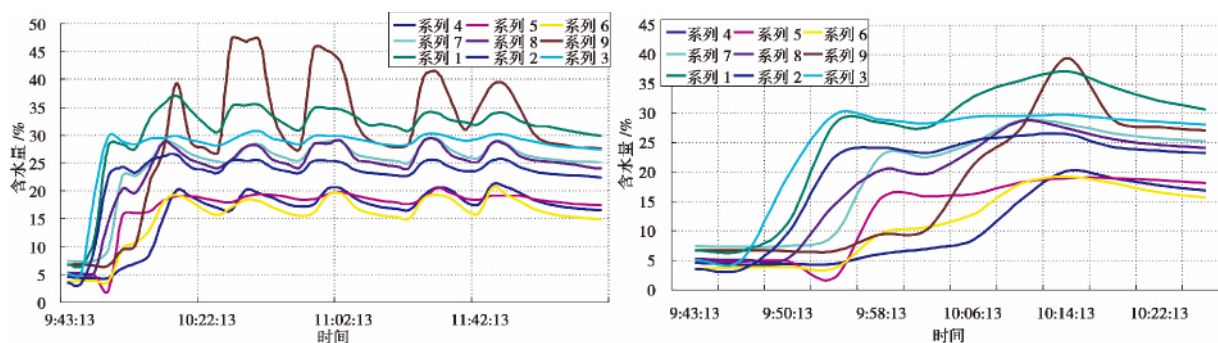


图7 不同时间和部位土体含水量变化曲线(图例系列数与图1中的探头编号一致)

Fig.7 Changes of water content in the experiment( the legend series are consist with the probe No. in fig.1)

时对土体细颗粒含量和土体结构也有响应<sup>[12-13]</sup>。

## 4 讨论

### 4.1 物源来源对泥石流特征的影响

泥石流的物源补给和来源问题一直是泥石流研究的难点问题,对于单一型泥石流的物源来源问题比较清晰,但是大部分泥石流发生往往是一个综合的过程,既有沟道侵蚀补给,又有滑坡补给,同时还会有坡面侵蚀物质的补给,对这些方式的补给特征和补给量目前还没有一个定量的表述。不同的补给过程和特征对泥石流的形成模式、流量特征和规模均有影响,例如舟曲泥石流的补给方式主要以沟道侵蚀为主,兼有拦砂坝库内物质,其形成模式属于侵蚀式和堵溃式,峰值流量大且陡涨陡落<sup>[14]</sup>。但是大凹子沟泥石流则属于典型的滑坡补给型泥石流,其流量过程属于阵式,流量大小与滑坡物质多少直接相关<sup>[15]</sup>。同时不同的补给方式(物质来源),其防治措施也应有所差异,做到针对性的防治。贾松伟和韦方强<sup>[16]</sup>、文安邦等<sup>[17]</sup>利用放射性元素对蒋家沟泥石流的泥沙来源进行了初步研究,获得了不同

土地类型对泥石流的物源贡献,但是对流域整体的贡献程度涉及很少。本试验利用的 REE 技术,定量表述了在降雨条件下泥石流形成过程中的物质补给分布状况,认为在无大型滑坡的情况下,泥石流的物源补给以沟道侵蚀为主,坡面侵蚀为辅,该类型泥石流在植被较好、沟道松散物质堆积较厚且暴雨较为集中的区域分布较多。

### 4.2 细颗粒在泥石流形成中的作用

根据试验现象,在泥石流的形成过程中,首先是要有细颗粒的迁移和汇集,随着径流过程中含沙量的增加,进入沟道的坡面失稳物质开始起动形成泥石流。随着细颗粒的迁移流出,流域中颗粒粗化程度增加,径流的侵蚀能力相对降低,在同样强度的降雨作用下,泥石流形成难度增加。可见细颗粒在泥石流形成过程中起到非常重要的作用。

细颗粒在泥石流形成中的作用已经得到广泛关注,不同的细颗粒含量对泥石流的形成模式、形成条件影响较大。降雨过程中土体内部侵蚀导致细颗粒的汇集和迁移,在泥石流起动过程中起到非常重要的作用。根据陈晓清等野外试验,在试验过程中没有明显的蓄满表面产流,在坡脚处产生出流和汇流,

水流非常浑浊<sup>[6,12]</sup>。这表明雨水渗流携带走了其渗流路径上的细粒土体(主要为粘粒和粉粒),改变了土体组成和结构,产生土体内部侵蚀,水体含沙量增加,侵蚀力加强,同时土体内部结构遭到破坏,稳定性降低,利于滑坡的发生。这种现象在矫滨田的试验中得到进一步证实<sup>[12]</sup>,这说明了降雨诱发泥石流过程中伴随着细颗粒的迁移和汇集。

泥石流的起动临界雨量受到粘粒含量的影响,Chen等<sup>[13]</sup>、Li等<sup>[18]</sup>和Ilstad等<sup>[19]</sup>利用野外试验和数值模拟技术揭示了不同粘粒含量条件下的泥石流起动过程,随着粘粒含量的增加,泥石流起动越容易,需要的降雨强度愈小。试验过程中也体现了类似的特征,随着细颗粒的迁移流出流域,导致泥石流的形成难度越来越大,也证实了多数流域暴发泥石流后,即使遇到较强的降雨在短时间内难以形成泥石流的原因<sup>[20]</sup>。

## 5 结论

1. 震后孕灾环境条件下,降雨初期主要以入渗为主,随后土体表面开始出现超渗产流,产流量主要以坡面为主,随后汇入沟道形成沟道汇流。沟道径流量达到一定程度,沟道中细颗粒开始起动,并夹杂较大石块形成泥石流,径流量快速增加,此后随着细颗粒的迁移、沟道堵塞体的形成和溃决,泥石流现象消失;坡体位移表现为坡面首先对降雨开始响应,并出现崩塌现象,并堆积在沟道,在沟道形成的堰塞体对沟道侵蚀和堆积产生较大影响,并伴随着坝体松散物质不断向下游迁移;泥石流堆积扇主要在泥石流形成时段扩展。

2. 在松散物质充足情况下,流域侵蚀泥沙主要来源于沟道中下游,其次是沟道中上游和源头坡面,而支沟和左右坡面泥沙来源相对较少;泥石流堆积扇泥沙主要来源于沟道中下游、沟道中上游和源头坡面,三者占到堆积扇总量的77%以上,其次是左侧坡面。细颗粒在泥石流的形成过程中扮演着非常重要的角色,其迁移和汇集均对流域地形的演化和泥石流的形成产生影响,降雨前后坡面和沟道土体粗化现象严重。

3. 降雨过程中,土体对降雨的响应明显,孔隙水压力在不同时间段和不同部位变化曲线具有明显差异,并出现一定的波动特征;含水量主要受到降雨的影响,随着降雨的增加,含水量快速增加,降雨结束

后,含水量迅速降低,在沟道由于孔隙度的增大,相对含水量低,变化幅度小。而孔隙水压力不仅受到降雨的影响,同时对土体细颗粒含量和土体结构也有明显响应,细颗粒在泥石流(土壤侵蚀)中起到非常重要的作用。

致谢:REE示踪元素技术得到中国科学院水土保持研究所李占斌教授和王瑄博士的帮助,示踪土样测试得到中国原子能物理研究院倪邦发的帮助。

## 参考文献(References)

- [1] Institute of Mountain Hazards and Environment. Debris flow in China [M]. Beijing: The Commercial Press, 2000: 12-64 [中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所. 中国泥石流[M]. 北京: 商务印书馆, 2000: 12-64]
- [2] Luo Defu, Mao Jizhou, Zhu Pingyi. Mountain hazards and mitigation in Sichuan-Tibet road (in Tibet) [M]. Beijing: Science Press, 1995: 2-48 [罗德富,毛济周,朱平一. 川藏公路南线(西藏境内)山地灾害及防治对策[M]. 北京: 科学出版社, 1995: 2-48]
- [3] Chen Xiaoqing, Chen Ningsheng, Cui Peng. Calculation of discharge of debris flow induced by glacier lake outburst [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2004, 26(3): 357-362 [陈晓清,陈宁生,崔鹏. 冰川终碛湖溃决泥石流流量计算[J]. 冰川冻土, 2004, 26(3): 357-362]
- [4] Tang Zejun, Lei Yanwu, Zhang Jingwen, et al. Rain simulation of dynamic soil erosion processes with rare earth element tracers [J]. Transaction of CSAE, 2006, 22(3): 32-35 [唐泽军,雷廷武,张晴雯,等. 稀土元素(REE)示踪土壤侵蚀动态过程的降雨模拟试验研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(3): 32-35]
- [5] Bai Zhiyong. Analysis and calculation of debris flow initiation [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2001, 36(3): 318-321 [白志勇. 泥石流松散物质启动条件的分析与计算[J]. 西南交通大学学报, 2001, 36(3): 318-321]
- [6] Chen Xiaoqing, Cui Peng, Feng Zili, et al. Artificial rainfall experimental study on landslide translation to debris flow [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(1): 106-116 [陈晓清,崔鹏,冯自立,等. 滑坡转化泥石流起动的人工降雨试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(1): 106-116]
- [7] Cui P, Zhou G D, Zhu X H, et al. Scale amplification of natural debris flows caused by cascading landslide dam failures [J]. Geomorphology, 2012, 123: 1-17
- [8] Zheng Lingyong, Li Zhanbin, Li Peng, et al. Study the erosion process at the precipitation using REE [J]. Transaction of CSAE, 2010, 26(3): 87-91 [郑良勇,李占斌,李鹏,等. 稀土元素示踪坡面次降雨条件下的侵蚀过程[J]. 农业工程学报, 2010, 26(3): 87-91]
- [9] Cui Peng, Zhuang Jianqi, Chen Xingzhang, et al. Debris flow activity characters and mitigation after Wenchuan earthquake [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Edition, 2010, 42(5): 10-19 [崔鹏,庄建琦,陈兴长,等. 汶川地震震后泥石流活动特征与防治对策[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2010, 42(5): 10-19]
- [10] Zhuang Jianqi, Cui Peng, Hu Kaiheng, et al. Research on debris

- flow initiation due to bed failure after Wenchuan earthquake [J]. *Journal of Sichuan University: Engineering Edition*, 2010, 43(5): 230–236 [庄建琦, 崔鹏, 胡凯衡, 等. 震后沟道松散物质起动形成泥石流实验研究[J]. *四川大学学报: 工程科学版*, 2010, 43(5): 230–236]
- [11] Wu Pute, Liu Puling. Study the gully erosion process using the REE experiment [J]. *Water and Soil Conservation Research*, 1997, 4(2): 69–74 [吴普特, 刘普灵. 沟坡侵蚀 REE 示踪法试验研究初探[J]. *水土保持研究*, 1997, 4(2): 69–74]
- [12] Jiao Bintian, Lu Xiaobin, Wang Shuyun, et al. The movement of fine grains and its effects on the landslide and debris flow caused by raining [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2005, 1(7): 1014–1016 [矫滨田, 鲁晓兵, 王淑云, 等. 土体降雨滑坡中细颗粒运移及效应[J]. *地下空间与工程学报*, 2005, 1(7): 1014–1016]
- [13] Chen N S, Zhou W, Yang C L, et al. The processes and mechanism of failure and debris flow initiation for gravel soil with different clay content [J]. *Geomorphology*, 2010, 121: 222–230
- [14] Tang C, Rengers N, van Asch TWJ, et al. Triggering conditions and depositional characteristics of a disastrous debris flow event in Zhouqu city, Gansu Province, northwestern China [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2011, 11: 2903–2912
- [15] Zhuang Jianqi, Cui Peng, Guo Xiaojun, et al. Prediction of the debris flow run-off process based on hydrological model – Take Dawazi gully as example [J]. *Catastrophic*, 2013, 28(2): 55–59 [庄建琦, 崔鹏, 郭小军. 基于水文模型泥石流汇流预测——以蒋家沟一级支沟大巴子沟泥石流为例[J]. *灾害学*, 2013, 28(2): 55–59]
- [16] Jia Songwei, Wei Fangqiang. Tracing Sediment sources using magnetic measurements—a case study of Jiangjiagou Valley, Yunnan Province [J]. *Journal of Sediment Research*, 2009, (1): 54–59 [贾松伟, 韦方强. 利用磁性参数诊断泥石流沟道沉积物来源——以云南蒋家沟流域为例[J]. *泥沙研究*, 2009, (1): 54–59]
- [17] Wen Anbang, Zhang Xinbao, Zhang Yiyun, et al. Comparison study on sediment sources between debris flow gullies and non-debris flow gullies by using the  $^{137}\text{Cs}$  tracing technique in Dongchuan, Yunnan Province of China [J]. *Journal of Sediment Research*, 2003, 4: 51–56 [文安邦, 张信宝, 张一云, 等. 云南东川泥石流沟与非泥石流沟 $^{137}\text{Cs}$ 示踪法物源研究[J]. *泥沙研究*, 2003, 4: 51–56]
- [18] Li Y, Zhou X J, Su P C, et al. A scaling distribution for grain composition of debris flow [J]. *Geomorphology*, 2013, 192: 30–42
- [19] Ilstad T, Elverhvi A, Issler D, et al. Subaqueous debris flow behavior and its dependence on the sand/clay ratio: a laboratory study using particle tracking [J]. *Marine Geology*, 2004, 213: 415–438
- [20] Bovis M J, Jakob M. The role of debris flow conditions in predicting debris flow activity [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1999, 24: 1039–1054

## Fine Particle Size Moving and Its Effective on Debris Flow Initiation

ZHUANG Jianqi<sup>1</sup>, CUI Peng<sup>2</sup>, HU Kaiheng<sup>2</sup>, CHEN Xiaoqing<sup>2</sup>

(1. School of Geological Engineering and Surveying of Changan University Key Laboratory of Western China Mineral Resources and Geological Engineering, Xi'an 710054, China;

2 Institute of Mountain Hazards and Environment/Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Processes, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** Designing the experiment on debris flow formation process at artificial rainfall at the conditions of the loose material unusually rich for studying the debris flow formation process. The main results showed: 1. The fine particles moving first for the initiation of debris flow, and then mixed with the large particle and runoff increased sharply, along with channel block-outburst phenomenon; the debris flow phenomena gradually disappeared with the fine particles migration off and the channel rough serious. 2. The slope failure and moving at the rainstorm, the failure material deposited in channel and formed the dams which effect the erosion and deposits of the channel with moving down to downstream. 3. The erosion sediment was main from middle and lower channel, then from the upstream and slope; the debris flow fan materials was main from the downstream channel, then from the upstream and slope. 4. The pore-water pressure and water content, which not only effected by rainfall, but also effected by fine particles content and soil structure, changed obviously and varied in different time and different sites with fluctuation. 5. The fine particles played an important role in the process of debris flow initiation and its accumulation and displacement effected the evolution of the basin topography and the formation of debris flow. In the debris flow forecast, the fine particles of soil content should be considered due to its critical water content and pore-water pressure quite different in different content of fine particles of debris flow initiation.

**Key words:** debris flow; sentiment originate; REE(Rare Earth Element); pore pressure; water content