

引用格式:李琪敏,刘晶晶,汪洋,刘兆旭,龚旭. 叠覆堆积过程中泥石流偏移的实验研究[J]. 山地学报, 2024, 42(2): 249-259.

LI Qimin, LIU Jingjing, WANG Yang, LIU Zhaoxu, GONG Xu. Experiments on debris flow migration in the process of overlapping deposition [J]. Mountain Research, 2024, 42(2): 249-259.

叠覆堆积过程中泥石流偏移的实验研究

李琪敏^{1,2}, 刘晶晶^{1,2*}, 汪洋¹, 刘兆旭³, 龚旭^{1,2}

(1. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所 山地自然灾害与工程安全全国重点实验室, 成都 610299,

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 西藏大学 工学院, 拉萨 850000)

摘要: 泥石流堆积扇经过多期叠覆堆积, 其在空间和时间分布上有随机性, 存在主流偏移和堆积摆动等各向异性现象, 给合理规划与利用泥石流滩地带来困难。本文在野外调查四川平武县碓窝梁子沟堆积扇的基础上, 开展室内水槽模型实验, 结合 3D 扫描技术和基底压力传感器, 探讨泥石流在叠覆堆积过程中的阶段性流态变化以及主流偏移的成因和发展。实验发现: (1) 泥石流密度差异导致不同的偏移形式, 高密度泥石流易出现层面整体偏移; 低密度泥石流易形成插入式的叠覆堆积。 (2) 泥石流多期堆叠过程中偏移行为并不一定是沿地势更低处, 而是取决于后期来流的性态。 (3) 泥石流偏移角度和距离依赖于流体密度、流速和堆积体几何特征, 可以建立以上述参数为变量的堆积偏移角度与偏移距离的计算公式。本研究成果可以为了解泥石流堆积扇的形成机制、致灾范围和演化趋势提供依据。

关键词: 泥石流堆积扇; 叠覆堆积; 流态变化; 主流偏移

中图分类号: 642.23

文献标志码: A

泥石流作为非均质、非恒定的非牛顿流体^[1], 具有高强度输沙能力, 可携带大量混杂固体颗粒 (粒径为 $10^{-6} \sim 10$ m)^[2]。泥石流冲出沟口后, 由于地形展宽、纵坡减缓、速度下降, 输沙能力减弱, 流体携带的固体物质以沟口为轴顶开始扇状堆积^[3], 在地球内外营力长期作用下, 最终形成平缓的泥石流堆积扇滩地。

泥石流堆积扇的形成一般经过多期叠覆堆积^[4-5], 其沉积过程在空间和时间分布上有随机性, 沉积结构存在各向异性^[6-7]。在多时相叠覆演化过程中, 停积的前锋部分迫使后期上覆泥石流改道或

下切^[8], 扇轴偏转, 扇翼摆动, 扇地形态变异^[9-10]。离开主通道的泥石流绕避原来流向^[11-14], 可能通过冲击或淤积对居民点和基础设施造成新的损失^[15]。例如: 1978—2005 年的日本 Kamikamihori 泥石流沟道, 发生了 4 次大规模改道^[16]; 1988—1991 年中国云南的查箐沟, 4 年间发生了 3 次主流通道改变^[17]; 1957—2004 年的中国云南蒋家沟, 发生了无数次改道, 2004 年改道冲毁了当地保护农田修筑的拦挡坝, 淹没了下游大量农田^[18-19]。

堆积扇多时相叠覆过程中, 后期泥石流或后续泥石流部分或全部改道, 破坏邻近滩地原规划的安

收稿日期 (Received date): 2024-01-27; 改回日期 (Accepted date): 2024-04-20

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金 (42271092, 41877261); 中国科学院特别交流计划 (E3R5050050); 中国科学院西部青年学者项目 (E2R2180180)。 [National Natural Science Foundation of China (42271092, 41877261); Special Exchange Program of Chinese Academy of Sciences (E3R5050050); West Young Scholars Program of Chinese Academy of Sciences (E2R2180180)]

作者简介 (Biography): 李琪敏 (1998 -), 女, 河北沧州人, 硕士研究生。主要研究方向: 山地灾害理论及工程防治。 [LI Qimin (1998 -), female, born in Cangzhou, Hebei province, M. Sc. candidate, research on mountain disaster theory and engineering prevention] E-mail: 913971668@qq.com

* 通讯作者 (Corresponding author): 刘晶晶 (1981 -), 女, 博士, 副研究员。主要研究方向: 山地灾害理论及工程防治。 [LIU Jingjing (1981 -), female, Ph. D., associate professor, research on mountain disaster theory and engineering prevention] E-mail: liujingjing@imde.ac.cn

全区^[20-21]。后期泥石流上覆堆积扇滩地的过程中,在没有人工输导干预的前提下,发生流道偏转,是泥石流扇地貌形成的突变点,但对流道的变迁预测仍存在技术困难,鲜有研究。

本文以中国四川平武县碓窝梁子沟堆积扇为例,野外调查多期叠覆特征,以此为基础开展室内水槽模型实验,探讨泥石流扇地叠覆堆积过程中流态变化规律,以及影响主流道偏移的因素。实验结果可为分析泥石流堆积扇的形成与演化、评估其发展趋势及致灾范围提供基础。

1 研究区和实验原型选择

1.1 研究区背景

碓窝梁子沟位于四川省平武县龙安镇羊肠关平南公路旁,沟口地理位置坐标为 $104^{\circ}32'6.304''E$, $32^{\circ}26'36.119''N$ (图 1),是一条小型高频粘性泥石流沟,该沟为涪江左侧一级支流。流域面积约 0.57 km^2 ,主沟流向由东北向西南,沟口以 260° 方向汇入涪江,主沟沟道长 2.3 km ,高程为 $885 \sim 1880 \text{ m}$,流域相对高差为 995 m ,相对平均比降为 519.5% 。泥石流沟下游有十余户农户居住并开垦田地,堆积区地势平缓。

碓窝梁子沟于 2017 年 7 月 12 日、2017 年 8 月 27 日、2018 年 4 月 23 日、2018 年 7 月 11 日、2020

年 8 月 11 日发生了数场泥石流。虽然当地政府在 2019 年按照早期流通沟道修建了桥梁,但由于后期的泥石流主流流通过程偏移造成了原本安全范围的农户受灾(图 2)。本文以此沟为实验原型,探究多次泥石流堆积造成流向偏移现象。

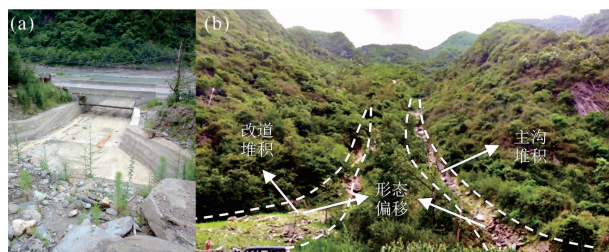


图 2 碓窝梁子沟泥石流: (a) 泥石流排导工程;

(b) 碓窝梁子沟沟道主流通道变迁(拍摄于 2021)^[21]

Fig. 2 The Duiwoliangzi gully: (a) debris flow drainage project;

(b) changes of mainstream channel in the Duiwoliangzi gully channel (photographed in 2021)

1.2 研究区土样采集和分析

依据实验泥石流试样的最大粒径不超过实验水槽宽度 $1/5$ 的原则^[22],本研究在原样的基础上,剔除粒径大于 20 mm 的颗粒后(图 3a),进行颗分测试、液塑限实验、固结实验等室内土工实验,分析原样土的物理力学特性。

样本颗粒级配曲线如图 3b 所示,中值粒径 $d_{50} = 2.20 \text{ mm}$,天然含水率 0.35% ,塑限 $W_p = 14.26\%$,液限 $W_L = 21.79\%$,基于此,当堆积物含水率在 $14\% \sim 18\%$ 时,其已达到半塑性半固性状态,可以进行下一次堆积。通过固结实验(图 4), 1.9 g/cm^3 、 2.0 g/cm^3 、 2.1 g/cm^3 3 种密度样品达到液限所需时间分别为 2.1 h 、 2.4 h 、 2.9 h ,正式实验前进行预实验,当堆积时间间隔为 5 h 时,3 种样品均已到达相对稳定状态,可继续堆积。

2 实验装置设计

2.1 实验装置和比尺

室内水槽实验可以呈现泥石流运动、堆积、固结的过程^[23],满足过程相似性。本试验主要保证的相似条件有:流通区和堆积区的几何因素(包括流通区沟道比降以及堆积区比降)、泥石流的物理特性及力学性质等因素。根据实验目的要求和模型场地大小条件,确定本次模型实验的几何比尺为 $1:200$,

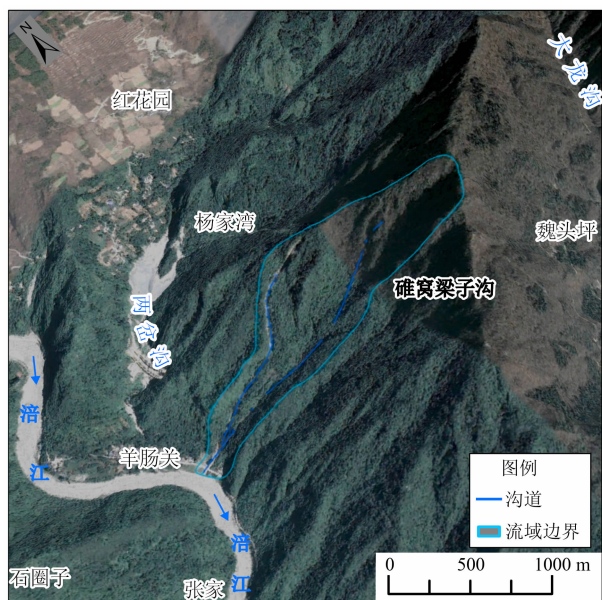


图 1 碓窝梁子沟卫星影像图

Fig. 1 Satellite image of the Duiwoliangzi gully

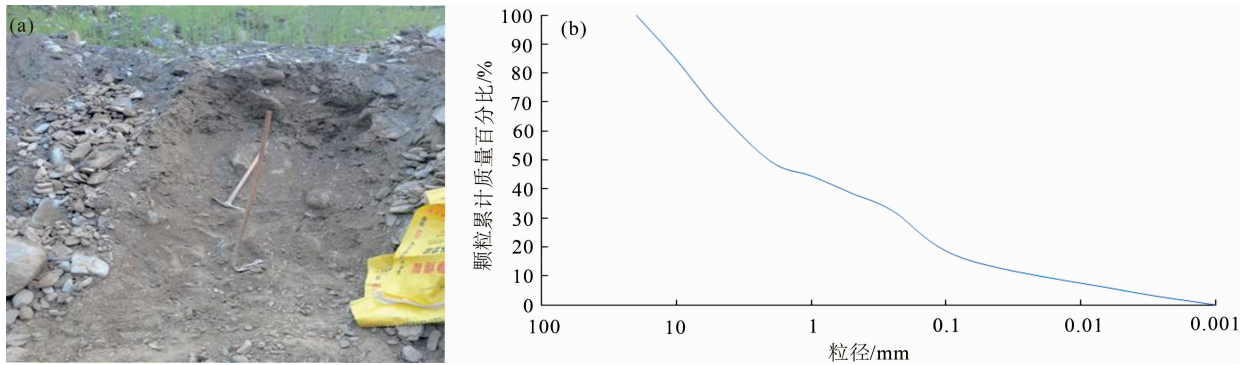


图3 碓窝梁子沟采样断面与样品颗分曲线: (a) 采样断面; (b) 样品颗分曲线

Fig. 3 Sampling section and particle distribution of the Duiwoliangzi gully: (a) sampling section; (b) particle size distribution

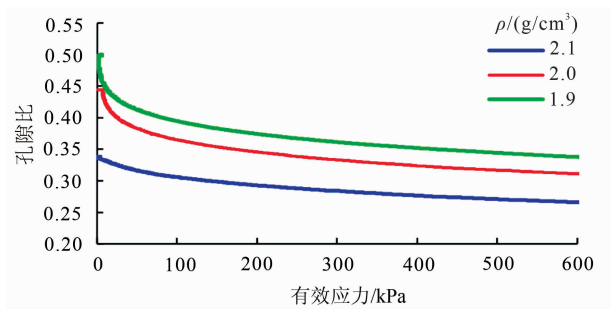


图4 样品的 $e-p$ 曲线图

Fig. 4 The $e-p$ curve of the samples

表1 模型实验相似比尺

Tab. 1 Similarity scale of model experiment

参数	符号	相似比
支沟宽度	λ_B	200
支沟长度	λ_L	200
总量	λ_V	200^3
浆体容重	λ_γ	1
级配	λ_j	1

模型和原型满足几何相似、物理性质相似、运动和重力相似,得到各参数比尺见表1。泥石流沟坡度为 9° ,沟口宽0.2 m,堆积区坡度为 0° ,泥石流密度为 $1.9 \sim 2.1 \text{ g/cm}^3$ 。

为保证不同参数条件的实验能同时同地开展、减少环境和人为误差、保证实验固定条件的一致性、提高结果的可信度,本实验设计由3套完全相同的

水槽堆积板装置组成(图5)。每套装置包括从上到下逐渐收缩且底部具有一定坡度形状的料斗,下方前侧开有 $0.2 \text{ m} \times 0.3 \text{ m}$ (长 \times 高)的正方形泥石流供给口,由闸门开关控制。水槽尺寸为 $1.0 \text{ m} \times 0.2 \text{ m} \times 0.3 \text{ m}$ (长 \times 宽 \times 高),两侧为透明有机玻璃以便于实验过程现象观测;堆积板为 $2.5 \text{ m} \times 2.0 \text{ m}$ (长 \times 宽)的聚乙烯塑料板。

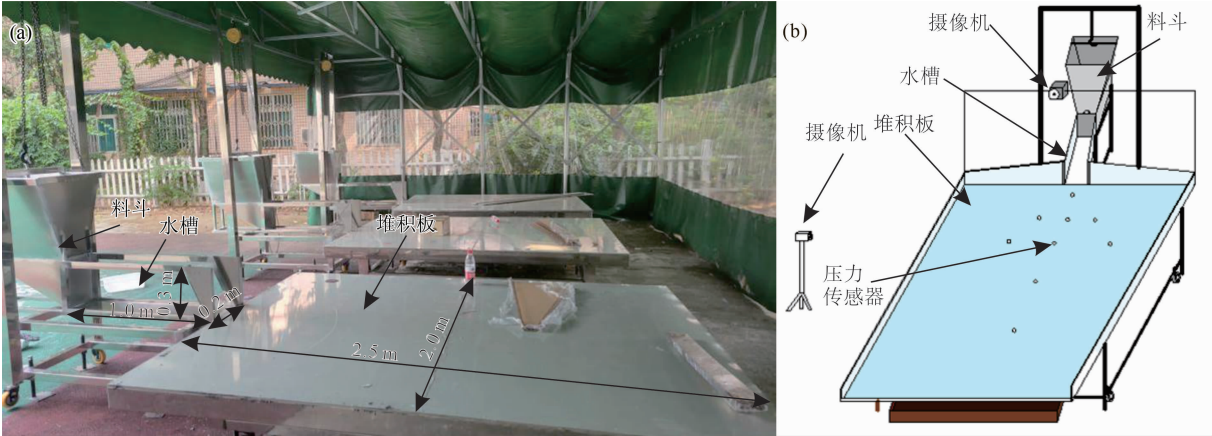


图5 实验装置图: (a) 实物图; (b) 示意图

Fig. 5 Diagram of experimental device: (a) physical diagram of experimental device; (b) diagram of experimental device

2.2 实验测量

实验数据测量装置包括高清数码摄像机、3D 扫描仪和基底压力传感器(图 6)。高清数码摄像机主要用于记录泥石流形态和运动过程;3D 扫描仪主要用于每次实验结束后扫描当前堆积体的堆积形态,建立 DEM 数字高程模型,从而获取各传感器位置的堆积高度;基底压力传感器主要用于测量泥石流堆积扇流通过过程基底压力变化反演泥石流流动力学过程。



图 6 数据测量装置:

(a) 3D 扫描仪;(b) 摄像机;(c) 基底压力传感器

Fig.6 Equipment of data measuring;

(a) 3D scanner; (b) camera; (c) base pressure sensor

2.3 实验方案和参数变更

开展不同密度泥石流多期次堆叠实验,根据预实验结果,泥石流规模为 10 L 时泥石流堆积次数均

能达到 10 次以上,符合本文多期次堆叠研究要求,具体实验工况如表 2 所示。每次实验前根据设定调整实验装置并安置仪器,主要包括:使用坡度仪将沟道坡度调整到预设值,在堆积板的正前方架设一部摄像机以记录泥石流的堆积过程;实验前将物料搅拌均匀后倒入料斗内,并持续搅拌防止物料下沉,打开所有摄像机和数据采集系统等设备,调试校准测压传感器,随后迅速开启料斗闸门,泥石流沿水槽流入堆积板,待泥石流停止运动后,关闭摄像机和数据采集系统等设备;泥石流停止运动后,使用 3D 扫描仪获得堆积体失水固结完成后的 DEM 数字高程模型 D_n (n 指该组次泥石流的当前期次)。待泥石流达到半固结状态后,继续进行下一期次实验,当泥石流水槽内剩余可淤积深度小于上一期次沟道内泥石流淤积厚度,或者堆积板覆盖范围 $>90\%$ 以上时,视为该组次实验完成。

为更好地研究泥石流堆积扇在多次堆积过程中的偏移现象,探究每次泥石流主流改道与冲出方向(0° 方向)的偏移角 θ 和偏移方向流出距离 r ,建立如图 7 所示的坐标系。以出山口为原点,沿出山口

表 2 实验工况

Tab. 2 Conditions of experiments

泥石流密度/(g/cm^3)	固体质量分数/%	水质量分数/%	泥石流体积/L	沟道初始坡度/($^\circ$)	各场次间隔时间/h	堆积次数/次
1.90	73.68	26.32	10.00	9.00	5.00	12
2.00	77.77	22.23	10.00	9.00	5.00	15
2.10	81.48	18.52	10.00	9.00	5.00	10

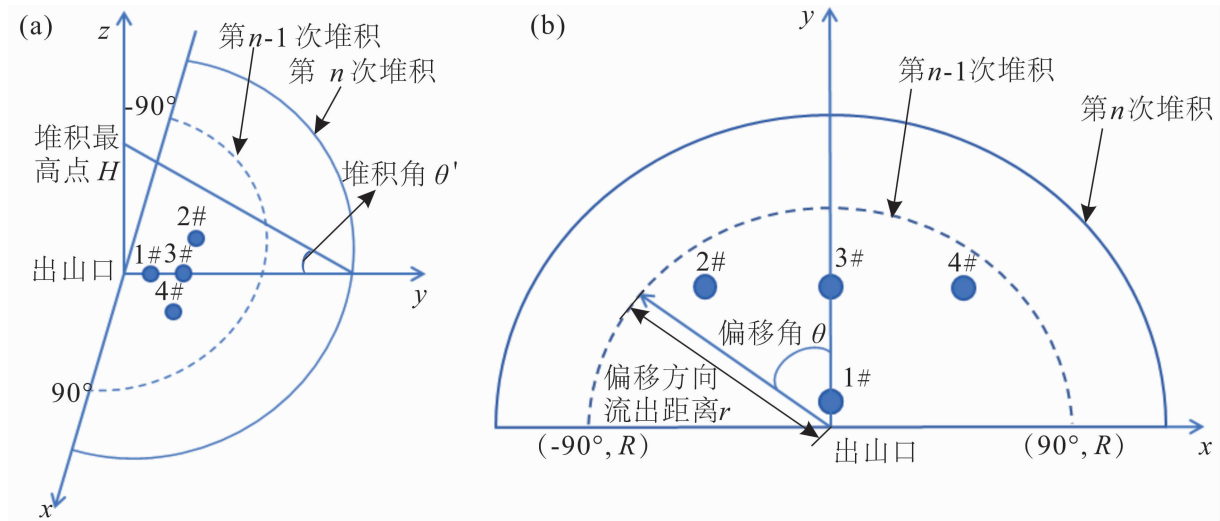


图 7 偏移计算坐标图

Fig.7 Diagram of migration calculation coordinate

方向为 y 轴正方向和 0° 方向,垂直 y 轴在堆积板上顺时针方向为 x 轴正方向和 90° 方向,垂直 $x-y$ 平面向上为 z 轴正方向。各传感器偏移坐标系如表 3 所示,其中 1#传感器位于沟口处,3#传感器位于 0° 方向距离沟口 30 cm 处,2#、4#传感器沿 0° 方向对称分布。

表 3 传感器布置坐标

Tab. 3 Coordinates of sensor	
传感器编号	坐标
1#	(0° , 5 cm)
2#	(-40° , 39 cm)
3#	(0° , 30 cm)
4#	(40° , 39 cm)

3 泥石流叠覆堆积流态变化和主流偏移

3.1 泥石流叠覆堆积现象

泥石流堆积扇地的形成是多期次泥石流事件发生后堆积物相互影响、共同作用的结果,最终形成具有一定厚度的组合型堆积扇(表 4)。有平坦开阔、固液分离区明显的堆积扇(图 8a),有环状结构明显、更加陡峭的堆积扇(图 8b)。同时主流的偏移也会呈现不同动态变化,有扇顶点的横向或纵向偏移(图 8b),有扇缘的横向移动(图 8a),最终导致堆积物的粒径组差异。

3.2 叠覆堆积过程中的阶段性流态变化

泥石流堆积过程中的内部流态变化和多次堆积

表 4 不同组次泥石流堆积参数表

Tab. 4 Debris flow accumulation parameter of different groups				
泥石流密度/ (g/cm^3)	堆积 次数/次	最大堆积 长度/cm	最大堆积 宽度/cm	最大堆积 厚度/cm
1. 90	10	158. 00	200. 00	13. 40
2. 00	15	88. 50	167. 50	23. 00
2. 10	12	51. 00	125. 00	20. 50

过程扇面两侧堆积压力变化可能导致主流变化。但由于内部观测的困难,拟通过基底压力变化对泥石流内部流态变化进行反演。

对比 3 个不同密度组次的实验,发现密度为 $2.0\text{ g}/\text{cm}^3$ 的泥石流流动性较高、大颗粒含量较丰富、覆盖传感器多,以该组次基底压力的变化揭示泥石流流态变化。泥石流自狭窄的出山口流出后进入相对宽阔平坦的堆积板,浆体包裹固体大颗粒高速向前发展,浆体翻滚飞溅(图 9a),由于冲出出山口泥石流向前移动的惯性更大,堆积体先沿冲出方向流向更远位置(图 9b),聚集在龙头处的泥石流大颗粒物质先停止运动,其后携带细颗粒的泥石流浆体不断从沟槽内流下向四周扩散,堆积体缓慢发展(图 9c)。

图 10 可以清晰反映泥石流流动过程。泥石流冲出沟口流动初期混合体中大颗粒不断翻滚撞击基底传感器,此时传感器数值发生剧烈波动;其后堆积扇开始缓慢向侧向发展,流至 2#和 4#传感器位置,此时堆积扇大部分区域停止运动,距离出山口较远的传感器 2#、3#、4#传感器先进入稳定状态,沟槽内

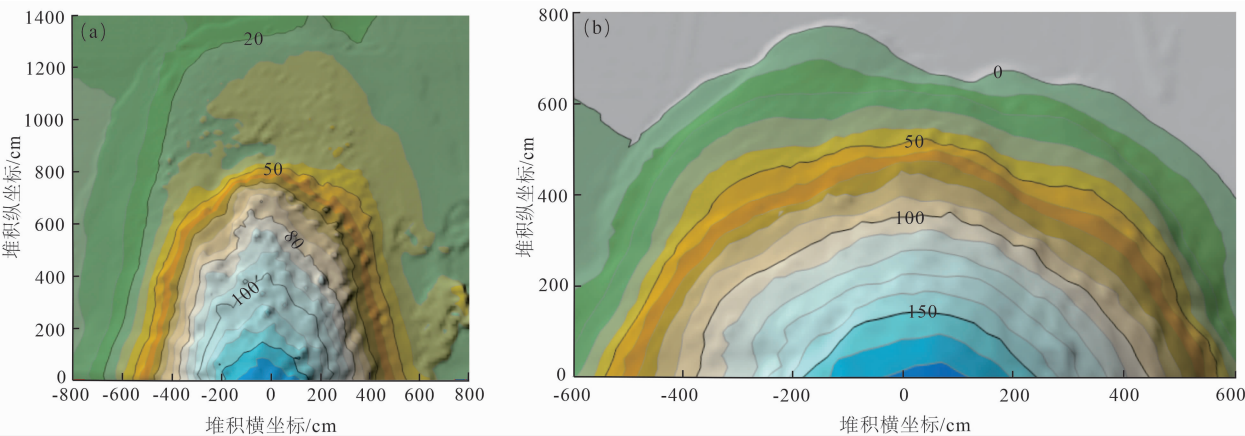


图 8 不同形态泥石流叠覆堆积扇高程图:(a)扇缘横向偏移;(b)堆积扇顶点偏移
Fig. 8 Elevation map of different forms of debris flow superimposed accumulation fan;
(a) fan edge lateral migration; (b) accumulation fan vertex migration

剩余浆体持续流下,位于出山口的 1#传感器仍有细微波动;最终泥石流停止运动,泥石流扇地整体进入沉积阶段。

通过基底压力的变化和视频拍摄对比,结合湍流激烈、层流相对缓和的特点,可认为泥石流流态随运动过程的变化如下:(1)基底压力的显著提高和上下剧烈波动,视频解释为泥石流进入了高速运移阶段,此阶段泥石流以湍流方式向前流动发展。(2)基底压力只有微弱变动时,视频解释为泥石流扇地龙头缓慢停积,此阶段扇面主要为浆体与细颗粒物运移的层流形式发展。

沿 y 轴对称的 2#传感器和 4#传感器首次堆积已经出现了压力不平衡的现象(图 10),后续随着泥石流的不断叠加,扇面两侧基底压力发展不同步(图 11),不平衡的压力分布可能导致泥石流流向发生变化,形成新的流道或者分支。

3.3 泥石流扇地叠覆堆积过程中主流通道偏移

通过布置在堆积板上方的摄像机观察每次泥石流堆积的偏移情况和整体流向,结合泥石流事件视频记录得到偏移方向与冲出方向的夹角 θ 和偏移方向的流出长度 r (图 7)。实验中密度更大的泥石流堆积体会发生更加明显的整体偏移:密度 $\rho = 1.90 \text{ g/cm}^3$ 的系列实验过程未发生明显的整体偏移。密度 $\rho = 2.00 \text{ g/cm}^3$ 的泥石流 15 次堆积过程中共发生 5 次整体偏移。 $\rho = 2.10 \text{ g/cm}^3$ 的泥石流 10 次堆积过程中共发生 5 次整体偏移。偏移角 θ 和偏移方向的流出距离 r 见表 5。

(1) 泥石流叠加堆积的偏移角 θ

泥石流每次堆积时产生偏移角 θ 主要与以下因素相关:①泥石流自身性质:泥石流密度 ρ ,密度越大泥石流偏移整体性越强;②泥石流运动学特征,主要以冲出沟口的速度 v 表示;③泥石流堆积环境:由

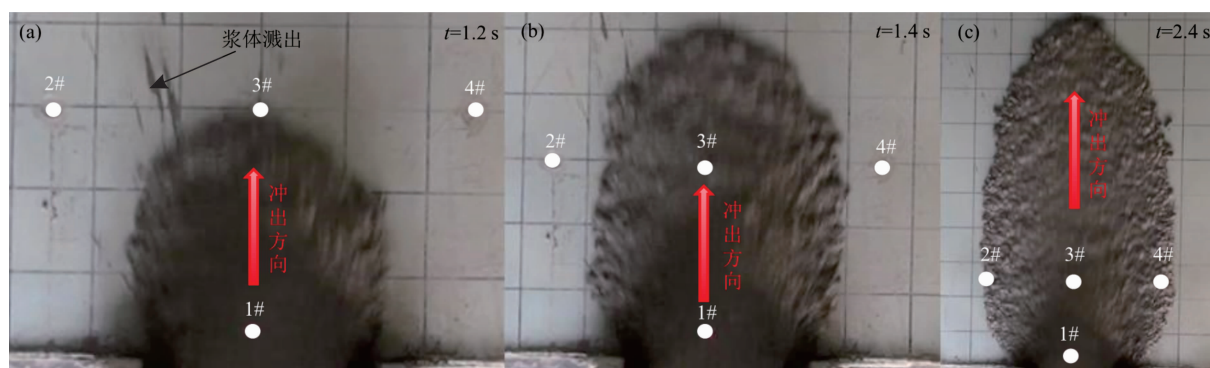


图 9 组次 2 泥石流第 1 次堆积流动过程:

(a) 到达 3#传感器; (b) 龙头向前高速移动; (c) 到达 2#、4#传感器

Fig. 9 First accumulation flow process of debris flow in group 2:

(a) reaches 3 # sensor; (b) tap moves forward at a high speed; (c) reaches 2 # and 4 # sensors

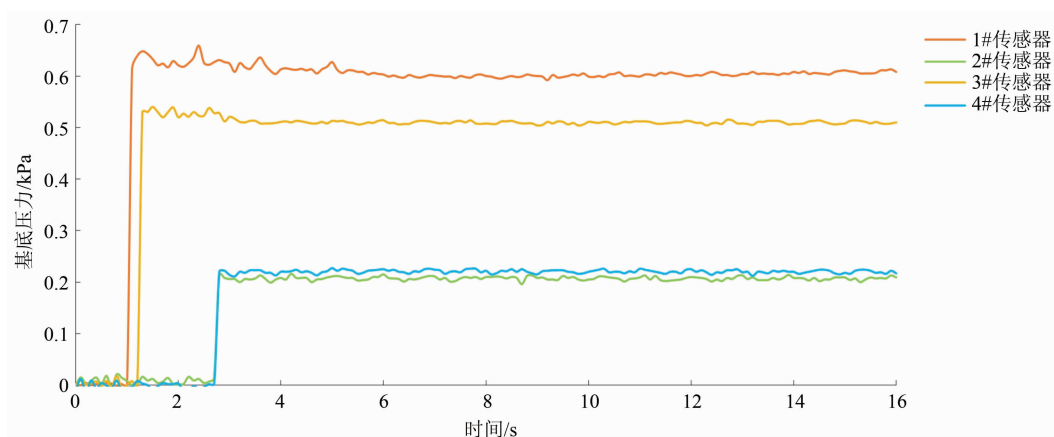


图 10 组次 2 泥石流第 1 次堆积流动过程传感器数值变化

Fig. 10 Changes in sensor value due to the first accumulation of group 2 debris flow

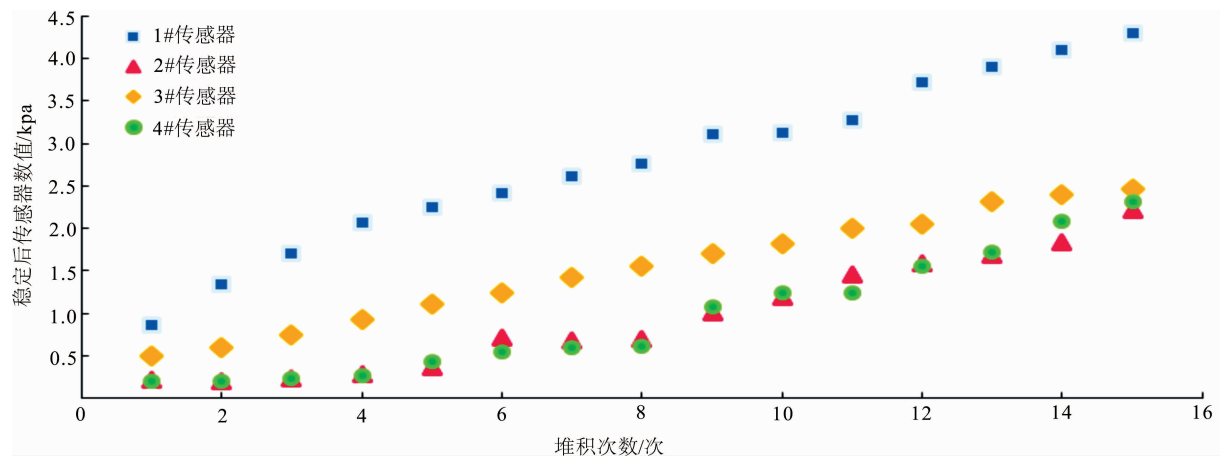


图 11 2.0 g/cm³ 泥石流多期次叠覆堆积过程基底压力变化

Fig. 11 Change of base pressure in the process of multi-stage overlapping accumulation of 2.0 g/cm³ debris flow

表 5 不同组次泥石流堆积角 θ 和偏移距离 r

Tab. 5 Debris flow accumulation angle θ and outflow length r of different groups

泥石流密度/ (g/cm ³)	堆积次数/次	偏移角/(°)	偏移距离/cm
2.00	8	-26.40	67.08
	9	-11.60	74.04
	11	-2.13	77.06
	12	-7.50	53.46
	15	16.90	68.96
2.10	4	32.20	28.49
	5	30.50	19.72
	6	21.00	32.80
	9	-17.40	41.91
	10	16.40	53.16

于扇面微地貌的存在,关于 y 轴对称位置并不相同,微地貌可能影响泥石流下次来流的偏移角度^[24]。用关于中轴线对称的 2#、4#传感器的堆积高度差 Δh_{2-4} 表示泥石流堆积扇面的微地貌差异,用基底压力差 ΔP_{2-4} 来表征两侧扇面多次堆积过程关于 0°线对称位置堆积差异。定义偏移度 Ψ_n 来表示第 n 次泥石流爆发前堆积扇整体地貌:

$$\Psi_n = \frac{B_{l(n-1)} - B_{r(n-1)}}{L_{n-1}} \quad (1)$$

式中, Ψ_n 为第 n 次堆积时堆积扇面的偏移度; $B_{l(n-1)}$ 为第 $n-1$ 次堆积堆积扇左半扇宽度; $B_{r(n-1)}$

为第 $n-1$ 次堆积堆积扇右半扇宽度; L_{n-1} 第 $n-1$ 次堆积的堆积扇沿 0°方向的堆积长度。

表 6 为不同影响因素下泥石流偏移角 θ 的实验数据。

依据实验数据表 6 对于泥石流多期次叠覆堆积的偏移角大小 $|\theta|$ 进行非线性回归分析,得到偏移角的大小 $|\theta|$ 与各影响因素之间的关系为:

$$\ln |\theta| = -13.774 + 10.128\rho + 0.0166 |\Delta P_{2-4}| - 0.687 |\Delta P_{2-4}| - 0.4068v - 0.461\Psi_n \quad (2)$$

式(2)定量解释了泥石流多期次堆积过程中泥石流偏移角度大小和泥石流性质、运动特征和堆积区地形之间的关系。可以看出:密度更大的泥石流可能会产生角度更大的整体偏移;高速冲出的泥石流形成的偏移角角度更小;泥石流多期次堆叠过程中偏移方向并不一定是沿地势更低处。

(2) 泥石流叠加堆积的偏移距离

泥石流扇地每次堆积产生偏移时沿偏移方向的流动距离 r 往往是该次堆积物边缘距离原点最长堆积,偏移方向流动距离 r 主要与以下因素相关:①泥石流自身性质:用泥石流密度 ρ 表示,低密度泥石流会形成更加宽阔的堆积扇,高密度泥石流会形成沟口更加陡峭的堆积扇;②泥石流运动学特征,主要以沟道坡比 J 表示;③泥石流堆积环境,除了用于表示泥石流前期堆积扇整体形态的偏移系数 Ψ_n 外,据分析,泥石流沟口处坡度存在较大差异性,沟口坡度会影响泥石流冲出后的加速度,进而影响流动距离。因此以沟口附近 3 个方向坡度平均值定义沟口平均

坡度 S 如下:

$$S = \frac{S_{12} + S_{13} + S_{14}}{3}$$

(3)

式中, S 为泥石流沟口平均坡度; S_{12} 为 1# 传感器至 2# 传感器的高程差与水平距离的比值; S_{13} 为 1# 传感器至 2# 传感器的高程差与水平距离的比值; S_{14} 为 1# 传感器至 4# 传感器的高程差与水平距离的比值。表 7 为不同影响因素下泥石流偏方向流动距离 r 的实验数据。

依据表 7 中实验数据对于泥石流多期次叠覆堆

积的偏移方向的流动距离 r 进行多元线性回归分析, 得到偏移方向的流动距离 r 与各影响因素之间的关系为:

$$r = 407.49 + 145.58J - 151.24\rho$$

$$+ 44.08|\Psi| - 243.69S$$

$$R^2 = 0.86$$

(4)

式(4)定量解释了泥石流多期次堆积过程中泥石流偏移方向流动距离 r 和泥石流性质、运动特征和堆积环境之间的关系。可以看出高速流出的低密度泥石流在沟口地势起伏大的条件下, 发生偏移时

表 6 发生偏移的组次偏移角 θ 与各影响因素数据表

Tab. 6 Data table of offset angle θ and various influencing factors

第 n 次堆积偏移角/(°)		密度/ (g/cm^3)	第 $n-1$ 次压力差/Pa		第 $n-1$ 次高度差/cm		第 n 次冲出的 速度/(m/s)	第 n 次堆积偏 移度绝对值
θ	$ \theta $		ΔP_{2-4}	$ \Delta P_{2-4} $	Δh_{2-4}	$ \Delta h_{2-4} $		
-26.4	26.4	2.00	-26.38	26.38	0.1	0.1	0.95	0.02
-11.6	11.6	2.00	93.52	93.52	0	0	0.93	0.07
-2.13	2.13	2.00	-56.24	56.24	0.1	0.1	1.21	0.05
-7.5	7.5	2.00	220.63	220.63	1.2	1.2	0.97	0.02
16.9	16.9	2.00	-243.44	243.44	-0.9	0.9	0.97	0.06
32.2	32.2	2.10	—	—	—	—	1.03	0.02
30.5	30.5	2.10	—	—	—	—	1.19	0.21
21.0	21.0	2.10	—	—	—	—	1.03	0.25
-17.4	17.4	2.10	92.01	92.01	0.6	0.6	0.96	0.01
16.4	16.4	2.10	33.42	33.42	0.3	0.3	0.98	0.29

表 7 偏移方向流动距离 r 与各影响因素数据表

Tab. 7 Data of flow distance r in offset direction and various influencing factors

偏移方向最远 运动距离/cm	密度/(g/cm^3)	沟道坡比	偏移程度	第 $n-1$ 次沟口平均坡度			
				S_{12}	S_{13}	S_{14}	S
67.08	2.00	0.19	0.02	0.28	0.24	0.28	0.27
74.04	2.00	0.17	0.07	0.29	0.28	0.29	0.29
77.06	2.00	0.21	0.05	0.25	0.25	0.29	0.26
53.46	2.00	0.23	0.02	0.29	0.33	0.31	0.31
68.96	2.00	0.26	0.06	0.28	0.36	0.27	0.30
28.49	2.10	0.17	0.02	0.29	0.42	0.29	0.33
19.72	2.10	0.20	0.21	0.36	0.51	0.36	0.41
32.80	2.10	0.21	0.25	0.37	0.53	0.37	0.42
41.91	2.10	0.25	0.01	0.36	0.44	0.37	0.39
53.16	2.10	0.27	0.29	0.34	0.43	0.35	0.37

偏移方向的流动距离会相对较长。

4 讨论

泥石流扇堆积在时间和空间上具有高度随机性和各向异性,堆积过程存在主沟摆动并引起扇地偏移堆积现象。本文通过实验揭示了这种偏移现象并进行了物理解释。基于实验现象和结论,还可就以下几方面进行讨论。

本研究针对泥石流多期堆积导致的主流偏移问题首次进行了实验研究,揭示了泥石流在堆积扇上的偏移形式、来流的性态、泥石流密度、流速、沟床坡度等特征,初步探讨了泥石流多期叠覆堆积过程及主流偏移问题,建立了堆积偏移角度与偏移距离的计算公式,与 Haas^[25-26]、Iverson^[24]等学者对于泥石流堆积偏移的研究结果相互印证。研究结果可为分析泥石流堆积扇的形成与演化、评估其发展趋势及致灾范围提供坚实的实验基础。

本文关注泥石流多次爆发后在堆积扇上堆叠位置变化的现象,提供了泥石流整体偏移的研究思路和方法,并给出偏移的量化公式。研究结果可应用于堆积偏移实验对比和野外验证。但由于水槽缩尺实验的特殊性,水槽实验可测量的基底压力等部分数据在自然条件下难以直接测量,需要通过参数换算或新的技术手段实现数据的获取,实验结果在野外的适用性研究有待进一步深入。

自然情况下同一沟道内每次泥石流具备不同的颗粒组成、运动路径和堆积模式,具有高度随机性,本实验仅进行了相同密度、相同参与总量的实验组次。未来研究中可以进一步探究不同密度、不同流通长度的单沟泥石流多期次爆发对比。室内水槽实验可以呈现泥石流运动、堆积、固结的过程,很难完全还原与自然界泥石流的动态相似性,未来研究中期待更多原地、长时间的大型实验。

5 结论

本文基于室内水槽实验,利用 3D 扫描建模技术,研究叠覆堆积过程中的泥石流偏移现象;根据基底压力传感器实时数据反演泥石流动力学过程,确定扇体形态角度大小和流出距离。

(1) 泥石流叠覆堆积过程中存在扇面主流偏移

现象。若初次堆积发生扇轴不对称形态,后期次的叠覆堆积过程中会进一步扩大形态不规则,容易形成新的流道或者分支。

(2) 泥石流密度差异导致偏移形式的不同。泥石流密度越大,越容易出现整体偏移;密度越小,越容易形成插入式堆积。

(3) 泥石流多期堆叠过程中,流道偏移取决于后续流性质。高速冲出的低密度泥石流在沟口地势起伏大的条件下,形成了横轴偏移角度小、纵轴更长的堆积。

(4) 综合考虑泥石流密度、沟道坡比、冲出速度、扇面微地貌和整体地貌等因素,针对高密度泥石流主流偏移现象,建立了扇地整体偏移情况下偏移角的大小 $|\theta|$ 和偏移方向流动距离 r 的计算公式。

参考文献 (References)

- [1] 康志成, 李焯芬, 马蔼乃, 等. 中国泥石流研究[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 24-39. [KANG Zhicheng, LEE Chackfan, MA Ainai, et al. Study on debris flow in China [M]. Beijing: Science Press, 2004: 24-39]
- [2] 陈德明. 泥石流与主河水流交汇机理及其河床响应特征[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2000: 2-10, 60-90. [CHEN Deming. Mechanism of confluence between debris flow and the main river [D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2000: 2-10, 60-90]
- [3] 费祥俊, 舒安平. 泥石流运动机理与灾害防治[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 20-30. [FEI Xiangjun, SHU Anping. Movement mechanism and disaster control for debris flow [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 20-30]
- [4] DING Mingtao, TANG Chuan, MIAO Cheng. Response analysis of valley settlements to the evolution of debris flow fans under different topographic conditions: A case study of the upper reaches of Min River, China [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2020, 79(1): 1639-1650. DOI: 10.1007/s10064-019-01641-9
- [5] BRIGHENTI R, SPAGGIARI L, SEGALINI A, et al. Debris flow impact on a flexible barrier: Laboratory flume experiments and force-based mechanical model validation [J]. Natural Hazards, 2021, 106(1): 735-756. DOI: 10.1007/s11069-020-04489-5
- [6] BRANNEY M J, KOKELAAR P. A reappraisal of ignimbrite emplacement: progressive aggradation and changes from particulate to non-particulate flow during emplacement of high-grade ignimbrite [J]. Bulletin of Volcanology, 1992, 54(6): 504-520. DOI: 10.1007/BF00301396
- [7] 崔鹏, 何易平, 陈杰. 泥石流输沙及其对山区河道的影响[J]. 山地学报, 2006, 24(5): 539-549. [CUI Peng, HE Yiping,

- CHEN Jie. Debris flow sediment transportation and its effects on rivers in mountain area [J]. *Mountain Research*, 2006, **24**(5): 539–549. DOI: 10.3969/j.issn.1008-2786.2006.05.005
- [8] 李彦稷, 颜春达, 胡凯衡, 等. 典型暴雨泥石流堆积扇危害范围演变规律[J]. *长江流域资源与环境*, 2017, **26**(5): 789–796. [LI Yanji, YAN Chunda, HU Kaiheng, et al. Variation of hazard areas of typical rainstorm debris flow alluvial fans [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2017, **26**(5): 789–796. DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201705017]
- [9] DENSMORE A L, HAAS T D, MCARDELL B, et al. Making sense of avulsions on debris-flow fans [C]//Colorado School of Mines Golden, Colorado USA. 7th International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation. 2019:54.
- [10] DE HAAS T, VAN DEN BERG W, BRAAT L, et al. Autogenic avulsion, channelization and backfilling dynamics of debris-flow fans [J]. *Sedimentology*, 2016, **63**(6): 1596–1619. DOI: 10.1111/sed.12275
- [11] ZHOU Wei, FANG Jiaoyong, TANG Chuan, et al. Empirical relationships for the estimation of debris flow runout distances on depositional fans in the Wenchuan earthquake zone [J]. *Journal of Hydrology*, 2019, **577**: 123932. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.123932
- [12] KORUP O. Landslide-induced river channel avulsions in mountain catchments of south-west New Zealand [J]. *Geomorphology*, 2004, **63**(1–2): 57–80. DOI: 10.1016/j.geomorph.2004.03.005
- [13] THOMOS D S G. Arid zone geomorphology [M]. John Wiley & Sons, Ltd, 2011: 62–97.
- [14] CHAKRABORTY T, KAR R, GHOSH P, et al. Kosi megafan: Historical records, geomorphology and the recent avulsion of the Kosi River [J]. *Quaternary International*, 2010, **227**(2): 143–160. DOI: 10.1016/j.quaint.2009.12.002.
- [15] DAVIES T R, MCSAVENEY M J. Principles of sustainable development on fans [J]. *Journal of Hydrology (New Zealand)*, 2008, **47**(1): 43–65.
- [16] SUWA H, OKANO K, KANNO T. Behavior of debris flows monitored on test slopes of Kamikamihorizawa Creek, Mount Yakedake, Japan [J]. *International Journal of Erosion Control Engineering*, 2009, **2**(2): 33–45. DOI: 10.13101/ijece.2.33
- [17] 柳金峰, 游勇, 范建容, 等. 汶川地震触发潜在性泥石流研究——以岷江上游关山沟为例[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2009, **41**(S1): 70–75. [LIU Jinfeng, YOU Yong, FAN Jianrong, et al. The study on the potential debris flow triggered by Wenchuan Earthquake: A case study of the Guanshan Gully in the upper reaches of Minjiang River [J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2009, **41**(S1): 70–75. DOI: 10.15961/j.jsuese.2009.s1.010]
- [18] 崔之久. 混杂堆积与环境[M]. 河北: 河北科学技术出版社, 2013: 20–30. [CUI Zhijiu. *Diamicton and Environment* [M]. Hebei: Hebei Science and Technology Press, 2013: 20–30]
- [19] 陈杰, 韦方强, 崔鹏. 小江流域泥石流堆积扇形成的制约因素及其特征[J]. *地理科学*, 2005, **25**(6): 6704–6708. [CHEN Jie, WEI Fangqiang, CUI Peng. Restricting conditions and their characteristics for debris flow fans in Xiaojiang River valley [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2005, **25**(6): 6704–6708. DOI: 10.3969/j.issn.1000-0690.2005.06.009]
- [20] 范念念, 吴保生, 刘乐. 地震导致河流改道与古蜀文明的变迁[J]. *山地学报*, 2010, **28**(4): 453–462. [FAN Niannian, WU Baosheng, LIU Le. River avulsion by earthquake and the transition of ancient Shu civilization [J]. *Mountain Research*, 2010, **28**(4): 453–462. DOI: 10.3969/j.issn.1008-2786.2010.04.008]
- [21] 李春雨, 刘晶晶, 陈晓清, 等. 泥石流叠加堆积形态演化特征的实验研究[J]. *山地学报*, 2022, **40**(2): 235–248. [LI Chunyu, LIU Jingjing, CHEN Xiaoqing, et al. Experimental investigation on the morphological evolution of superimposed deposition of debris flow [J]. *Mountain Research*, 2022, **40**(2): 235–248. DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000668]
- [22] 周必凡, 李德基, 罗德富, 等. 泥石流防治指南[M]. 北京: 科学出版社, 1991: 50–90. [ZHOU Bifan, LI Deji, LUO Defu, et al. *Guide for debris flow prevention and control* [M]. Beijing: Science Press, 1991: 50–90]
- [23] MAJOR J J, IVERSON R M. Debris-flow deposition: Effects of pore-fluid pressure and friction concentrated at flow margins [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1999, **111**(10): 1424–1434. DOI: 10.1130/0016-7606(1999)111<1424:DFDEOP>2.3.CO;2
- [24] IVERSON R M. Elementary theory of bed-sediment entrainment by debris flows and avalanches [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2012, **117**: F03006. DOI: 10.1029/2011JF002189
- [25] DE HAAS T, KRUIJT A, DENSMORE A L. Effects of debris flow magnitude-frequency distribution on avulsions and fan development [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2018, **43**(13): 2779–2793. DOI: 10.1002/esp.4432
- [26] HAAS T D, BRAAT L, LEUVEN I R, et al. Effects of debris flow composition on runout, depositional mechanisms, and deposit morphology in laboratory experiments [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2015, **120**(9): 1949–1972. DOI: 10.1002/2015JF003525

Experiments on Debris Flow Migration in the Process of Overlapping Deposition

LI Qimin^{1, 2}, LIU Jingjing^{1, 2*}, WANG Yang¹, LIU Zhaoxu³, GONG Xu^{1, 2}

(1. *State Key Laboratory of Mountain Hazards and Engineering Resilience, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Science, Chengdu 610299, China*; 2. *University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China*; 3. *College of Engineering, Tibet University, Lhasa 850000, China*)

Abstract: A debris flow fan is a typical debris flow sedimentary facies, which generally suffered from overlapping and accumulating by multiple debris flow torrents, and has randomness in spatial and temporal distribution, with anisotropic features such as mainstream migration and oscillating sedimentation, all of which brings difficulties in rational planning and utilization of piedmont beach-land created by debris flow sedimentation.

In this paper, a debris flow fan located at the Duiwoliangzi gully, Lianghebao village, Pingwu county, Sichuan province, China was surveyed and exemplified to reveal the formation of debris flow fan created by overlapping and accumulating of multiple debris flow torrents; a series of flume experiments equipped with 3D scanning devices and a set of pressure sensors was conducted to measure the phrasal changes of fluid regime in the process of creating a debris flow fan by artificial multiple debris flow release. The genesis of mainstream migration in the fan and resulting debris accumulation shift was examined.

(1) Mainstream migration in debris flow fan was controlled mainly by the density of debris flow fluid. The higher density of the fluid, the more possible it was to an overall mainstream deviation; the lower the density, the easier it to form debris body wedging into old underlying fan.

(2) The migration occurred not quite along lower relief of the fan, but depended mainly on the properties of a following wave of flows.

(3) An empirical formula for estimating of deviation angle and distance was proposed in terms of flow density, velocity and fan morphology.

The research provides a theoretical basis for understanding the formation, disaster range and evolutionary trend of debris flow fans.

Key words: debris flow fan; multi – phase deposition; flow transition; deviation from mainstream

(责任编辑 朱颖彦 李嵘)