

引用格式:李春雨,刘晶晶,陈晓清,李琪敏. 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, LI Qimin. Experimental investigation on the morphological evolution of superimposed deposition of debris flow [J]. Mountain Research, 2022, 40(2):235-248.

泥石流叠加堆积形态演化特征的实验研究

李春雨^{1,2}, 刘晶晶^{1,2*}, 陈晓清¹, 李琪敏^{1,2}

(1. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所 山地灾害与地表过程重点实验室, 成都 610041;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 泥石流堆积扇因叠加堆积过程而呈现复杂的地貌演化特征,如主体流路改变、扇体形态偏移等。目前对泥石流叠加堆积过程的研究较少,也未提出定量的形态偏移指标,这为泥石流预防和堆积扇土地利用带来困难。本文以代表性宽级配泥石流堆积物为原型材料,通过水槽实验,模拟不同密度泥石流的叠加堆积及其形态演化。利用3D扫描重建技术,对堆积形态的几何特征及演化过程进行了定量分析。结果表明:(1)泥石流叠加堆积过程可概括为纵向—垂向—横向三个发展阶段;(2)在密度相同的条件下,泥石流的堆积长度随叠加次数增加呈指数型衰减,堆积厚度呈幂次增加并逐渐稳定于一定极限值,堆积宽度随叠加次数增加呈现先增加后减小的趋势;(3)扇体形态偏移度与泥石流性质、运动特征以及堆积区地形之间存在幂函数关系。本研究明确了泥石流叠加堆积的物理过程和演化特征,建立了泥石流扇体形态偏移度的判别公式,为预测泥石流冲淤及致灾范围提供了理论基础,也为泥石流防治工程优化设计提供数据支撑。

关键词: 泥石流;叠加堆积;堆积形态;偏移度

中图分类号: P642.23

文献标志码: A

泥石流冲出沟口后,流速随沟道展宽和纵坡减缓而降低,输沙能力减弱,其所携带的大量泥沙、石块停积形成大小不等的扇形堆积体^[1-3]。泥石流堆积过程及其堆积形态的相关研究主要基于“泥石流堆积是简单的整体堆积”这一假设^[4-9]。然而,一些研究表明,在小而陡峭的集水区,泥石流堆积扇往往是由多阵次或多场性质相似的泥石流叠加堆积形成的^[10-11]。例如,云南昆明东川蒋家沟泥石流是典型的黏性间歇性阵流,其最终堆积扇是由一场泥石流中的几十至几百个阵流叠加组成(图1a)^[12]。甘肃白龙江流域内的高频泥石流沟,其堆积扇往往是

由相隔数天到数周的多场泥石流相互堆积叠加形成^[13]。在泥石流堆积叠加的过程中,其堆积形态会随时间和空间发生变化^[14-15]。受前期堆积体的影响,后续泥石流会出现流路改变、扇体形态偏移等现象^[16-19]。泥石流堆积扇扇轴的偏转会改变和扩大泥石流的致灾范围,造成冲毁房屋、淹没农田等突发性灾害^[20-21]。因此,开展泥石流叠加堆积的研究,有利于堆积区土地利用的科学规划。

国内外学者对泥石流叠加堆积形态演化开展了实验研究。Major^[11]完成了大型泥石流堆积实验,解释了单场泥石流中的堆积叠加过程;泥石流是以

收稿日期(Received date):2022-03-03;改回日期(Accepted date):2022-04-21

基金项目(Foundation item):国家自然科学基金(41877261,U19A2049);中国科学院西部青年学者项目(E2R2180180)。[National Natural Science Foundation of China(41877261,U19A2049);West Young Scholars Program of the Chinese Academy of Sciences(E2R2180180)]

作者简介(Biography):李春雨(1997-),女,河南驻马店人,硕士研究生,主要研究方向:山地灾害理论及工程防治。[LI Chunyu(1997-), female, born in Zhumadian, Henan province, M. Sc. candidate, research on mountain disaster theory and engineering prevention] E-mail: lichunyu0331@126.com

* 通讯作者(Corresponding author):刘晶晶(1981-),女,四川成都人,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, born in Chengdu, Sichuan province, Ph. D., associate professor, research on mountain disaster theory and engineering prevention] E-mail: liujingjing@imde.ac.cn

阵流形式输出,后续阵流通过挤压和叠加覆盖到前期堆积体之上,逐渐扩大堆积范围。泥石流叠加过程中的形态偏移现象主要发生在泥石流性质相似、但相互独立的多场泥石流之间,各场泥石流之间往往存在一定的时间间隔^[22-23]。泥石流堆积偏移特征与原主通道堵塞以及堆积区地形密切相关。原主通道的坡度由于回淤积高,迫使后场泥石流寻找优先流动路径,发生改道而引起形态偏移^[24-26]。De Haas^[27]等和 Leenman^[28]等通过对堆积区地形的量化分析,发现当局部堆积厚度达到或超过通道深度时,会引起泥石流流动路径改变而造成形态偏移,并以堆积厚度与通道深度的比值作为判断流动路径改变的标准。堆积区地形直接影响泥石流出沟口的流速,但由于叠加过程的复杂性,很少有研究将叠加堆积过程的形态演变与泥石流的动力学相联系,也没有形成界定堆积扇体形态偏移的定量指标。

四川省平武县碓窝梁子沟是一条高频泥石流沟,其堆积体是由多场泥石流叠加堆积而成。2020年8月11日碓窝梁子沟爆发泥石流,发生改道溢流,在左侧堆积形成纵长约85 m,扇前缘宽约60 m的锥形堆积扇(图1b)。本研究以碓窝梁子沟泥石流堆积物为实验材料,进行了系列水槽实验,模拟多次泥石流的叠加堆积过程及其形态演化过程,探究形态偏移与堆积区地形条件以及泥石流动力条件之间的关系,建立形态偏移特征的判别公式。研究成果将为预测泥石流冲淤及致灾范围提供判别依据,也为泥石流防治工程优化设计提供数据支撑。

1 水槽实验

1.1 实验装置

实验装置包括堆积模拟装置和数据测量装置两部分(图2和图3)。其中堆积模拟装置包括泥石流形成区、堆积区和回收区,可模拟泥石流的堆积叠加过程;数据测量装置包括3D扫描仪、激光测距传感器和高清数码摄像机,用于测量叠加堆积过程中的几何形态及运动特征。

1.1.1 泥石流堆积模拟装置

泥石流形成区由料斗与水槽固定连接组成,水槽尺寸为1.0 m×0.2 m×0.2 m(长×宽×高),两侧为透明有机玻璃,水槽坡度固定为12°。堆积区位于水槽出口处,堆积板为2.5 m×1.8 m(长×宽)

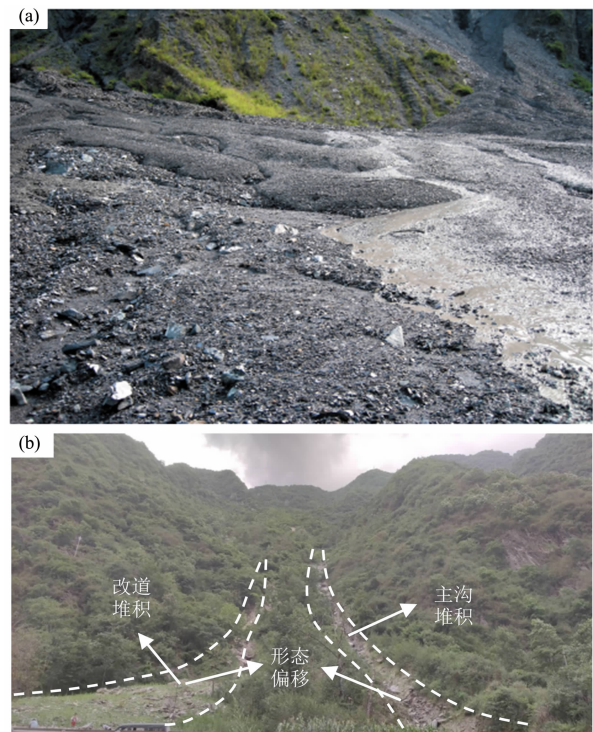


图1 泥石流多次堆积形态:(a)蒋家沟^[12];(b)碓窝梁子沟

Fig. 1 Morphology of superimposed deposition of debris flows:

(a) Jiangjia gully; (b) Duiwoliangzi gully

的聚乙烯塑料板,厚度为10 mm,底部以1.6 m×1.0 m的矩形钢架支撑;左右两侧安装有5 cm高的透明玻璃挡板,以防止泥石流溢出。同时,板面以0.1 m为间隔共划分450个方格以测定泥石流堆积情况,堆积板坡度为2°。堆积板末端连接回收区的尾料池,尺寸为1 m×1 m×0.7 m(长×宽×高),用于回收泥石流物料(图2)。

1.1.2 数据测量装置

数据测量装置包括3D扫描仪和高清数码摄像机。图3a为EinScan Pro 2X 2020手持式3D扫描仪,该仪器的单片扫描范围为250 mm×200 mm,数据采集帧率为30 FPS,结合USB 3.0相机接口,可以高速、稳定的获取实物的高质量3D点云数据,还原堆积体的立体形态。每次实验之后,使用3D扫描仪以0.5 mm的分辨率和精度测量堆积体形态,捕获其3D点云投影;随后用MATLAB和Surfer等第三方软件处理获得的点云数据,使用Kriging插值获得高分辨率的网格化数字高程模型、堆积体的三维表面地形图以及剖面图,以分析堆积形态特征。

本实验采用三台高清数码摄像机监测泥石流的堆积过程和流速,分别为索尼AX45、索尼AX60和

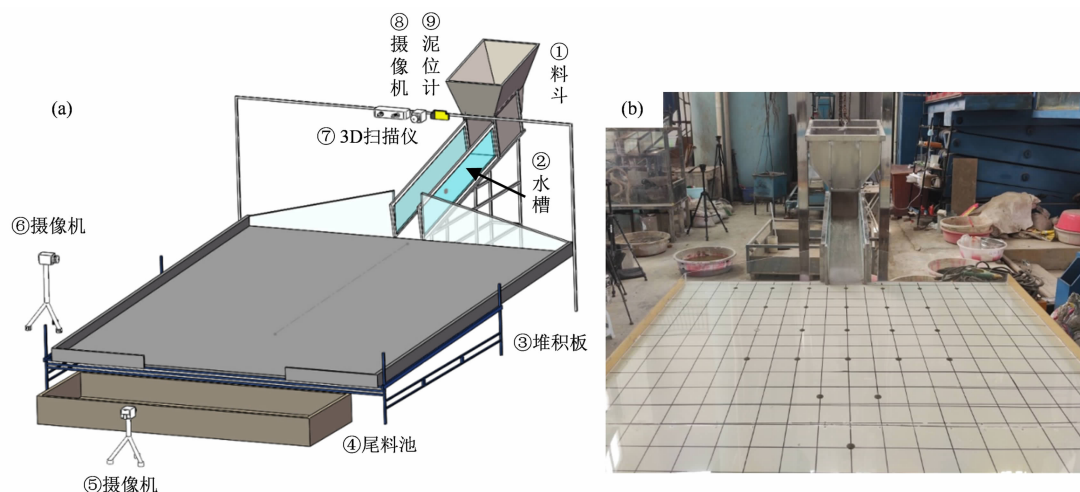


图2 实验水槽装置:(a)模型图;(b)实物图

Fig. 2 Experimental flume setup: (a) model diagram; (b) material object



图3 数据测量装置:(a)3D扫描仪;(b)摄像机;(c)激光测距传感器

Fig. 3 Data measuring equipment: (a) 3D scanner; (b) camera; (c) laser distance sensor

大疆灵眸 OSMO Pocket 云台相机,布置于水槽出口正上方 2.0 m 处(图 3b)、堆积区侧面靠近水槽出口处、堆积板正前方。三台摄像机的帧率均设置为 50 FPS。采用一个激光测距传感器,精度为 0.3 mm,设置反映时间为 10 ms;安装于水槽与堆积板交界处正上方 30 cm 的位置,来记录堆积区的泥深变化过程(图 3c)。

由于泥石流是以沟口为基点向堆积区扩散,为了解堆积过程中堆积位置的变化情况,同时设置直角坐标系和角度坐标系。如图 4 所示,泥石流在水槽中的前进方向为 0° 方向(x 轴),垂直于 0° 方向并指向右侧的为 90° 方向(y 轴)、左侧为 -90° 方向,垂直于 $x-y$ 平面方向为 z 方向。则泥石流出口处的角度区间为 $[-90^\circ, 90^\circ]$ 。

1.2 实验物料

本实验模拟泥石流物源取自碓窝梁子沟泥石流

堆积物。为减小边界条件对泥石流流体运动的影响,依据实验泥石流试样的最大粒径应不超过实验水槽宽度 $1/5$ 的原则^[29],本研究在原样的基础上,剔除粒径大于 20 mm 的颗粒作为实验土样;并采用振动筛和激光粒度仪进行粒径分析,取三个样品的平均值得出该泥石流样品的颗粒粒径级配曲线。如图 5 所示,中值粒径 $d_{50} = 2.40$ mm,黏粒成分 (<0.005 mm) 含量为 2.0%,颗粒密度为 $2.70 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。与蒋家沟和天摩沟等泥石流堆积物对比,表明碓窝梁子沟泥石流堆积物是典型的宽级配土体,具有典型性和代表性。因此本实验利用该土样配制不同密度的实验流体。

1.3 实验工况

泥石流叠加堆积现象普遍存在于黏性(密度大于 $1.80 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$) 和过渡性泥石流(密度介于 $1.60 \sim 1.80 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$) 中^[30]。因此,本实验选取

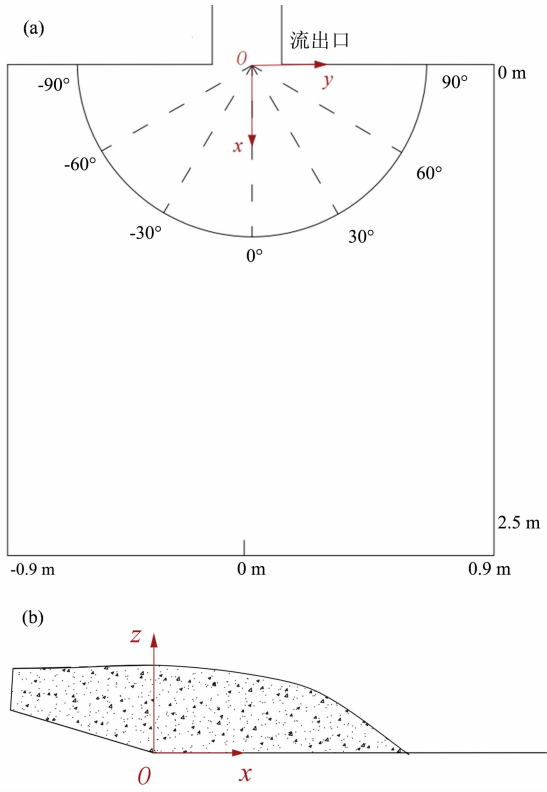


图 4 堆积位置坐标系:(a)俯视图;(b)左视图
Fig. 4 Coordinate system of depositional position:
(a) top view; (b) left view

2.00、1.90、1.80 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 共三种密度,分别探究黏性和过渡性泥石流的叠加堆积过程及形态演变。各场次泥石流之间相互独立,时间间隔为 3 h,同时利用小型加热器对前序堆积进行烘干处理,使其达到半固性状态^[31]。实验工况见表 1。

1.4 实验流程

按实验设定(表 1)配置实验物料,搅拌均匀后倒入料斗内,并持续搅拌维持流体状态;打开所有摄像机,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,用照相机记录实验效果;待泥石流固结 3 h 后,使用 3D 扫描仪获得堆积体的 DEM 数字高程模型 D_n (n 表示当

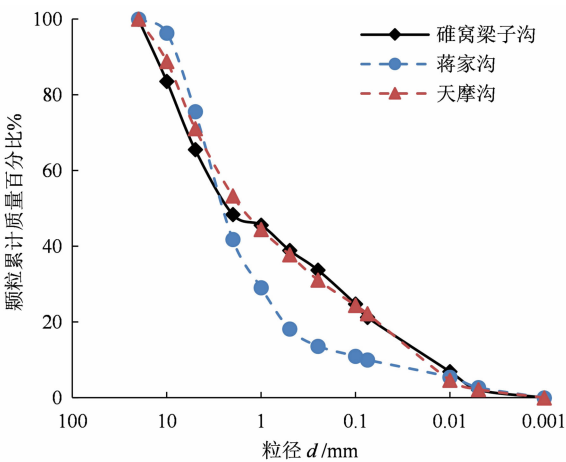


图 5 泥石流试样的颗粒级配
Fig. 5 Particle size distribution of debris flow material

前期次)。随后重复上述过程,继续进行下一期次实验。当水槽内淤积深度(堆积宽度)达到水槽高度(堆积板宽度)的 90% 时,该组次实验完成。

2 实验结果分析

2.1 泥石流叠加堆积过程

图 6 为不同密度泥石流叠加堆积形成的堆积扇,其形态特征与天然泥石流呈高度相似(图 1a)。其中黏性泥石流所形成的堆积扇表面呈凸形,沟口处坡度可达 20°,厚度接近水槽高度 20 cm(图 6a、图 6b)。过渡性泥石流的堆积扇表面平缓而面积较大,宽度达 160 cm,几乎布满整个堆积板(图 6c)。

在总量相同的条件下,泥石流叠加堆积过程可分为纵向(x 方向)—垂向(z 方向)—横向(y 方向)三个阶段。分别表现为堆积长度、厚度和宽度的变化,并会出现形态偏移现象。

图 7 为黏性泥石流(密度 $2.00 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,堆积次数 13 次)的叠加堆积过程。初始时泥石流沿纵向发展,随着泥石流不断向沟口处回填淤积,原流动通道坡度呈阶梯状降低而形成一低梯度带(图 7

表 1 实验工况

Tab. 1 Experimental conditions

组次	泥石流密度 $\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	固体质量 分数/%	水的质量 分数/%	泥石流 体积/L	沟道初始 坡度/(°)	各场次时间 间隔/h	堆积次数
1	2.00	83.80	16.20	5	12	3	13
2	1.90	79.60	20.40	5	12	3	18
3	1.80	74.10	25.90	5	12	3	18

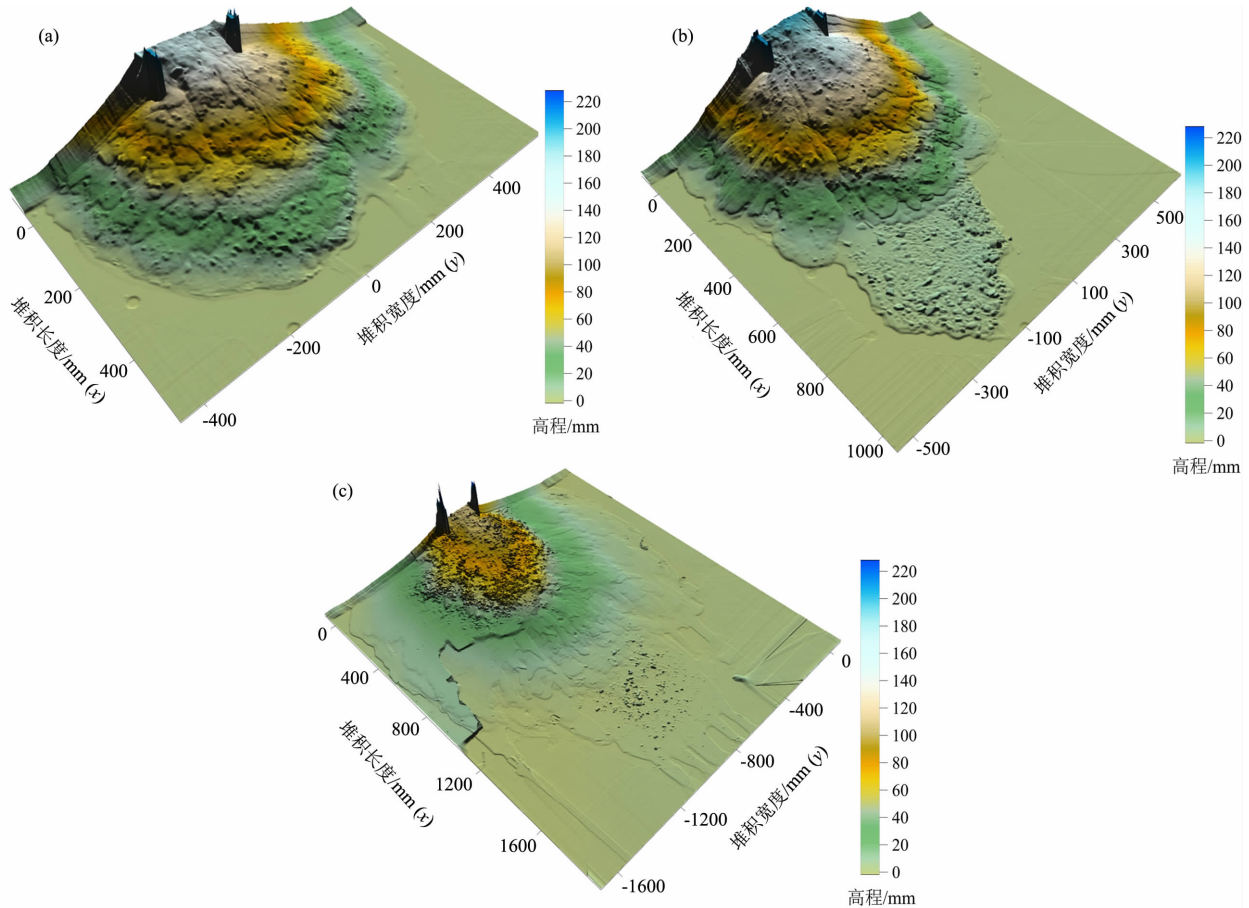


图6 泥石流叠加堆积的数字高程模型:(a) $\rho = 2.00 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$; (b) $\rho = 1.90 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$; (c) $\rho = 1.80 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$

Fig. 6 Digital elevation map of superimposed deposition of debris flows: (a) $\rho = 2.00 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$; (b) $\rho = 1.90 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$; (c) $\rho = 1.80 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$

中 0° 方向坡度的变化),迫使后续泥石流迅速沉积。随后进入堆积扇的垂向发展阶段,此时沟口处的堆积厚度和自由面高程逐渐增大,表面呈纵向宽缓、横向陡峭的平凸状(图7b)。当堆积体沟口处横向坡度值达到0.2以上时,在重力作用下泥石流开始向两侧溢流,进入堆积扇的横向发展阶段。

在横向发展阶段,受沟口两侧地形差异影响,后场次泥石流倾向于较陡侧堆积,产生扇体形态偏移。如图7c所示,该场次泥石流主要向右侧偏移堆积,并逐渐在扇中、扇缘部位形成低洼地形(图7d、图7e)。后续泥石流逐渐向地形低洼处汇聚,形成新的补充扇瓣(图7e、图7f)。

过渡性泥石流也会产生扇体形态偏移现象。其冲出的浆体细颗粒会在沟口两侧侵蚀形成新的流动通道(图8),后场次泥石流沿新通道流动堆积,导致扇体形态发生偏移。图9为过渡性泥石流(密度 $1.80 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,堆积次数18次)的叠加堆积过程。

起初泥石流堆积呈对称分布(图9a),第2次堆积开始向左侧偏移(图9b)。由于泥石流的不对称淤积,右侧地形逐渐变陡,从第9次堆积开始堆积区域逐渐向右侧偏移(图9c)。随后沟口左侧逐渐侵蚀形成沟槽,后场次泥石流主要沿沟槽流动,堆积位置开始向左侧偏移(图9d)。整个过程中共发生三次偏移方向的改变。

2.2 泥石流叠加堆积的形态演化

图10分别为各场次泥石流的堆积长度 L 、堆积宽度 B 以及沟口(0,0)点位置处堆积体总厚度 H 随堆积次数 n 的演变特征。在密度相同的条件下,堆积长度 L 整体上随堆积次数 n 的增加呈指数型衰减(图10a)。这是因为泥石流的回填淤高导致沟道输沙能力降低,后场次泥石流没有足够能量运动至更远的距离。堆积宽度 B 随堆积次数增加呈先增加后减小的抛物线变化趋势(图10b),但过渡性泥石流的增长速率相对较快。这是因为在实验中,过渡

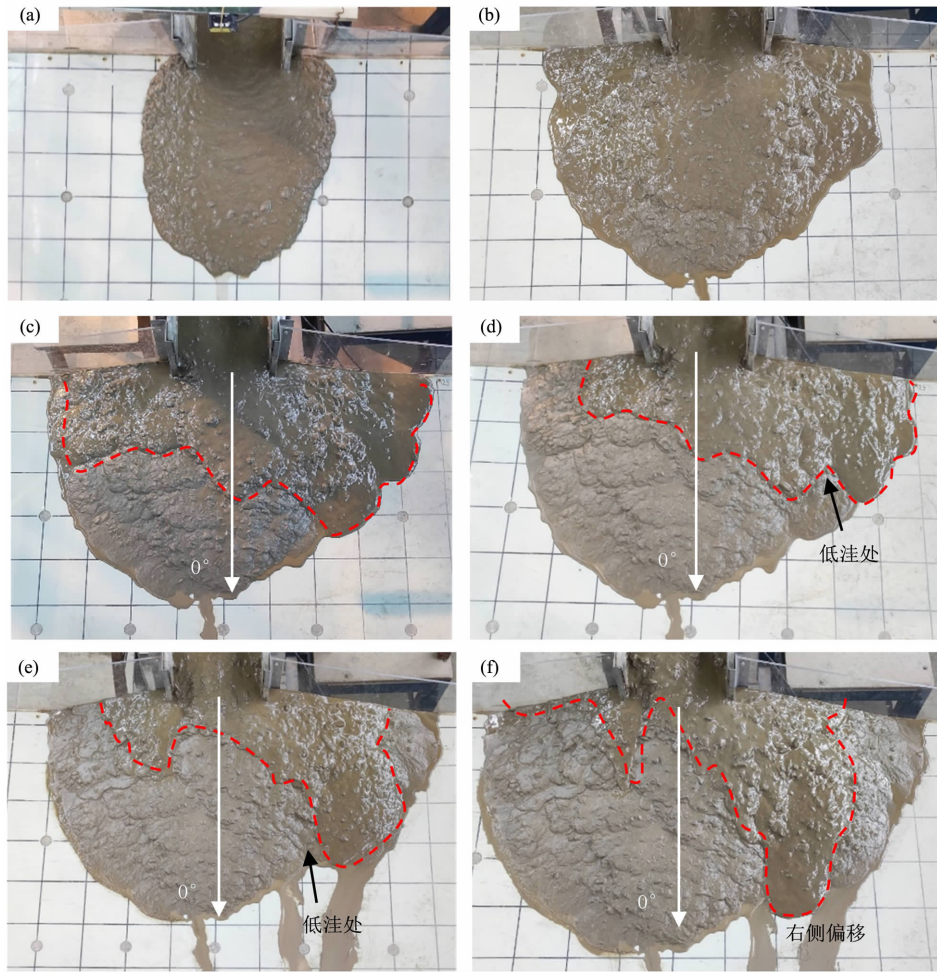


图 7 黏性泥石流叠加堆积过程:(a)第 1 次;(b)第 6 次;(c)第 8 次;(d)第 9 次;(e)第 11 次;(f)第 12 次

Fig. 7 Superimposed deposition of viscous debris flows;

(a) the first time; (b) the sixth time; (c) the eighth time; (d) the ninth time; (e) the eleventh time; (f) the twelfth time

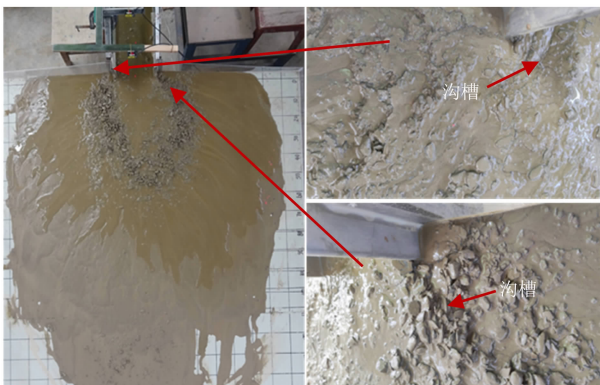


图 8 侵蚀形成的沟壑与沟槽

Fig. 8 Gullies and grooves formed by erosion

性泥石流流动性强,输出量大,能在横向发展阶段形成宽度更大的堆积扇。堆积体总厚度 H 总体上呈幕次增长,但增长速率逐次减小并趋近于零,此时,

堆积体达到多次堆积的极限厚度(图 10c)。上述几何形态的演化规律及拟合数据见表 2。

对比不同密度泥石流叠加堆积的形态变化,可以看到,在其他条件相同的情况下,泥石流密度越小,堆积长度 L 和堆积宽度 B 越大,而堆积厚度 H 越小。因此高密度泥石流叠加堆积更易形成厚度较大的堆积体,低密度泥石流则更易形成面积较大的堆积体。

2.3 扇体形态偏移的影响因素

2.3.1 偏移度

在泥石流叠加堆积的横向发展阶段,会出现扇体形态偏移现象。如图 7 与图 9 所示,由于堆积区地形的差异,扇体形态的偏移方向、偏移程度以及偏移发生的次数各不相同。本文以 0° 方向左右两侧偏移大小的差值表示偏移程度,定义为:

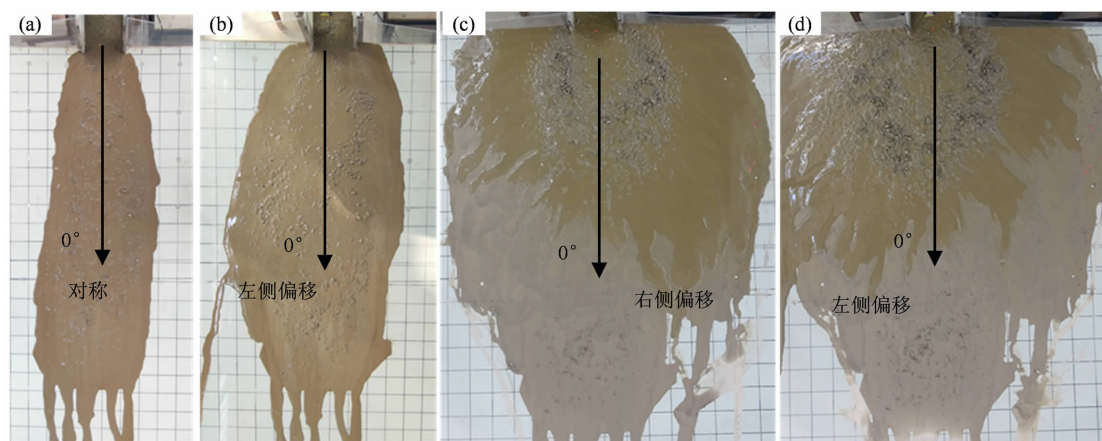


图9 过渡性泥石流叠加堆积过程:(a)第1次;(b)第2次;(c)第9次;(d)第16次

Fig. 9 Superimposed deposition of sub-viscous debris flows:

(a) the first time; (b) the second time; (c) the ninth time; (d) the sixteenth time

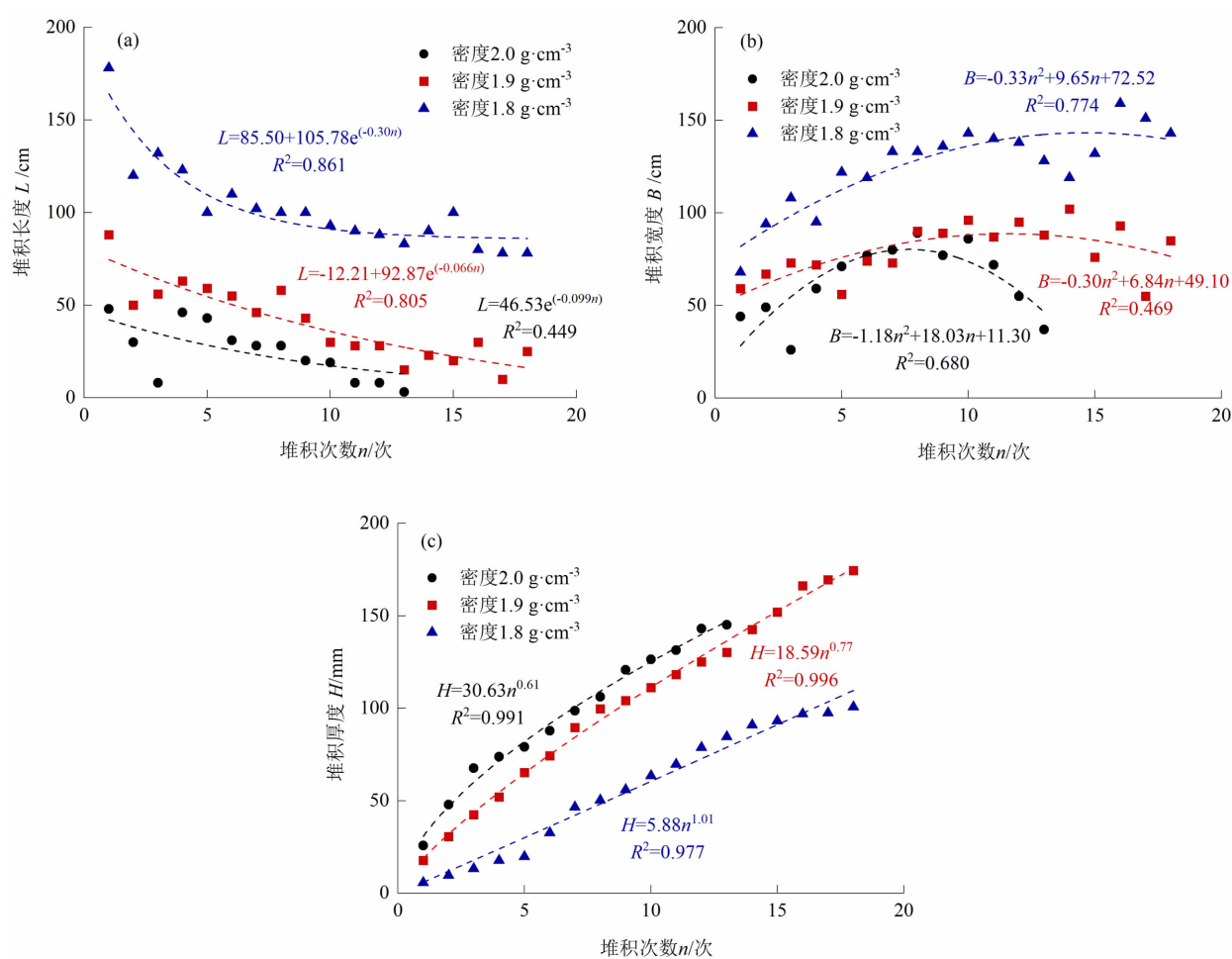


图10 泥石流叠加堆积过程中的形态演化:(a)堆积长度;(b)堆积宽度;(c)堆积厚度

Fig. 10 Morphological evolution of superimposed deposition of debris flows:

(a) deposition length; (b) deposition thickness; (c) deposition width

$$\psi = (B_r - B_l)/L \tag{1}$$

式中, ψ 为堆积形态的偏移度, ψ 值越大, 堆积形态的偏移度越大(左偏为“ $-$ ”, 右偏为“ $+$ ”); B_l 和 B_r 分别为 0° 方向左右两侧的半堆积宽度 (cm); L 为各场次泥石流沿 0° 方向的堆积长度 (cm)。各参数如图 11 所示。

堆积形态的偏移度 ψ 主要由沟口处地形特征与泥石流流动惯性之间的平衡确定^[19]。依据实验现象, 沟口处的地形特征用 -90° 、 0° 和 90° 三个主要方向上的地形坡度共同表示:

$$(\chi_r - \chi_l) = \frac{\cos \alpha_2}{\cos \alpha_1} - \frac{\cos \alpha_3}{\cos \alpha_1} \tag{2}$$

式中, $(\chi_r - \chi_l)$ 为偏移系数差值, χ_r 和 χ_l 数值上表示泥石流倾向于所在方向的流动程度; $\cos \alpha_1$ 、 $\cos \alpha_2$ 、 $\cos \alpha_3$ 分别为沟口处 0° 方向 $0 \sim 10$ cm 范围内、 90° 方向 $10 \sim 20$ cm 范围内和 -90° 方向 $10 \sim 20$ cm 范围内的地形坡降。三者均通过处理 3D 扫描仪获得的堆积体 DEM 数字高程模型获得。

优势坡度方向可由偏移系数差值 $(\chi_r - \chi_l)$ 决定; 泥石流运动特征与泥石流性质、泥深 h 以及重力加速度 g 有关, 其中泥石流性质用泥石流密度 ρ 与固相颗粒密度 ρ_s 表示, h 为各场次泥石流龙头在沟口 $(0, 0)$ 点位置处的泥深。因此, 偏移度 ψ 可表示为:

表 2 泥石流叠加堆积几何形态与堆积次数的关系

Tab.2 The relationship between depositional morphology and superposition times of debris flow

几何形态	泥石流密度 $\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	拟合式	系数			R^2
			a	b	c	
堆积长度 L	2.00	$L = ae^{-bn} + c$	46.53	0.10	0	0.45
	1.90		92.87	0.07	-12.21	0.81
	1.80		105.78	0.30	85.50	0.86
堆积宽度 B	2.00	$B = an^2 + bn + c$	-1.18	18.03	11.30	0.68
	1.90		-0.30	6.84	49.10	0.47
	1.80		-0.33	9.65	72.52	0.77
堆积厚度 H	2.00	$H = an^b$	30.63	0.61	-	0.99
	1.90		18.59	0.77	-	1.00
	1.80		5.88	1.01	-	0.98

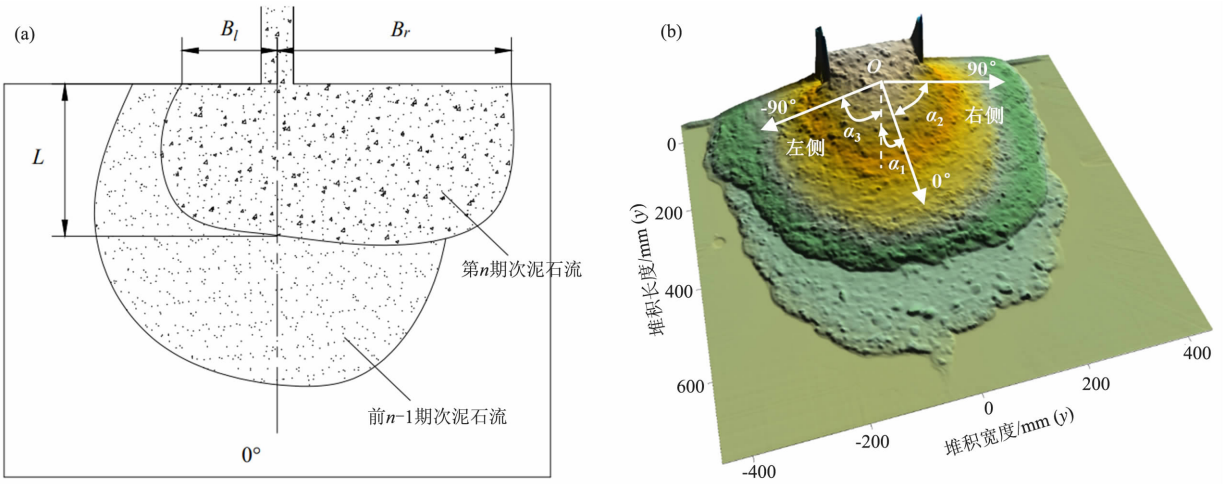


图 11 堆积形态示意图: (a) 堆积形态; (b) 堆积地形

Fig.11 Schematic diagram of depositional morphology: (a) depositional morphology; (b) depositional landform

$$\psi = f(v, \rho, \rho_s, g, h, (\chi_r - \chi_l)) \tag{3}$$

(1) $\psi - \rho$ 关系

2.3.2 偏移度 ψ 与各影响因素的关系

表3 为不同影响因素下泥石流偏移度 ψ 的实验数据。

泥石流密度主要影响偏移度 ψ 值的大小。在其他条件相同的情况下,初始时期泥石流密度 ρ 越小越易发生偏移。随着堆积次数的增加,泥石流密

表 3 偏移度与各影响因素数据表
Tab.3 Data of offset degree and influencing factors

实验 组次	泥石流密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	偏移度		流速 $v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	泥深 $h/(10^{-3} \text{ m})$	$v^2/(gh)$	ρ_s/ρ	偏移系数差值 $(\chi_r - \chi_l)$
		ψ	$ \psi $					
1	2.00	-0.12	0.12	0.84	7.40	9.68	1.35	-0.26
	2.00	-0.10	0.10	0.71	10.50	4.93	1.35	-0.85
	2.00	0.32	0.32	0.56	10.40	3.03	1.35	-0.19
	2.00	1.15	1.15	0.47	13.20	1.70	1.35	0.15
	2.00	1.05	1.05	0.62	12.10	3.28	1.35	0.24
	2.00	2.25	2.25	0.27	11.80	1.16	1.35	0.23
	2.00	1.88	1.88	0.19	9.40	0.37	1.35	0.19
2	1.90	-0.13	0.13	1.03	10.30	10.60	1.42	0.00
	1.90	-0.22	0.22	0.75	16.70	3.42	1.42	0.24
	1.90	-0.13	0.13	0.89	12.90	6.19	1.42	3.13
	1.90	0.13	0.13	1.00	10.40	9.75	1.42	-1.27
	1.90	0.07	0.07	0.88	11.60	6.85	1.42	1.28
	1.90	0.07	0.07	0.94	10.50	8.49	1.42	1.12
	1.90	0.12	0.12	0.75	6.50	8.79	1.42	-0.04
	1.90	0.18	0.18	0.76	11.10	4.71	1.42	-0.73
	1.90	0.18	0.18	0.88	13.70	5.80	1.42	-0.59
	1.90	0.80	0.80	0.56	6.20	5.08	1.42	-0.60
	1.90	0.96	0.96	0.54	12.40	3.50	1.42	-1.30
	1.90	0.30	0.30	0.60	9.80	3.76	1.42	-0.29
	1.90	0.50	0.50	0.41	5.20	3.23	1.42	-0.30
3	1.80	-0.15	0.15	1.15	7.30	18.47	1.50	-0.14
	1.80	-0.17	0.17	1.15	4.20	32.35	1.50	0.36
	1.80	-0.12	0.12	1.07	0.40	292.85	1.50	4.71
	1.80	-0.10	0.10	1.00	11.50	8.87	1.50	1.32
	1.80	0.07	0.07	1.24	8.20	19.12	1.50	3.57
	1.80	0.07	0.07	1.07	13.80	8.43	1.50	12.44
	1.80	0.20	0.20	1.00	10.50	9.92	1.50	-1.60
	1.80	0.14	0.14	1.01	15.00	6.80	1.50	8.31
	1.80	0.18	0.18	1.00	6.50	15.70	1.50	-8.68
	1.80	-0.14	0.14	1.02	6.90	11.45	1.50	-5.72
	1.80	-0.14	0.14	1.25	2.10	75.92	1.50	-7.12
	1.80	-0.19	0.19	0.99	4.10	24.56	1.50	-0.37
	1.80	-0.35	0.35	0.83	6.50	13.80	1.50	-17.97

注： ρ_s 为泥石流试样中固体颗粒的密度,取 $2.70 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

度 ρ 越大,偏移度 ψ 值越大(图 12a)。这是因为高黏性泥石流结构性强,倾向于同一个方向整体堆积,在 13 次叠加累积后呈现出较大的偏移度。密度较低的泥石流由于结构性弱呈现分散堆积,偏移的累

加效应相对较弱。

(2) $\psi - v$ 关系

泥石流流速同样是偏移度 ψ 值大小的主要影响因素。依据图 12b,得出在其他条件相同的情况

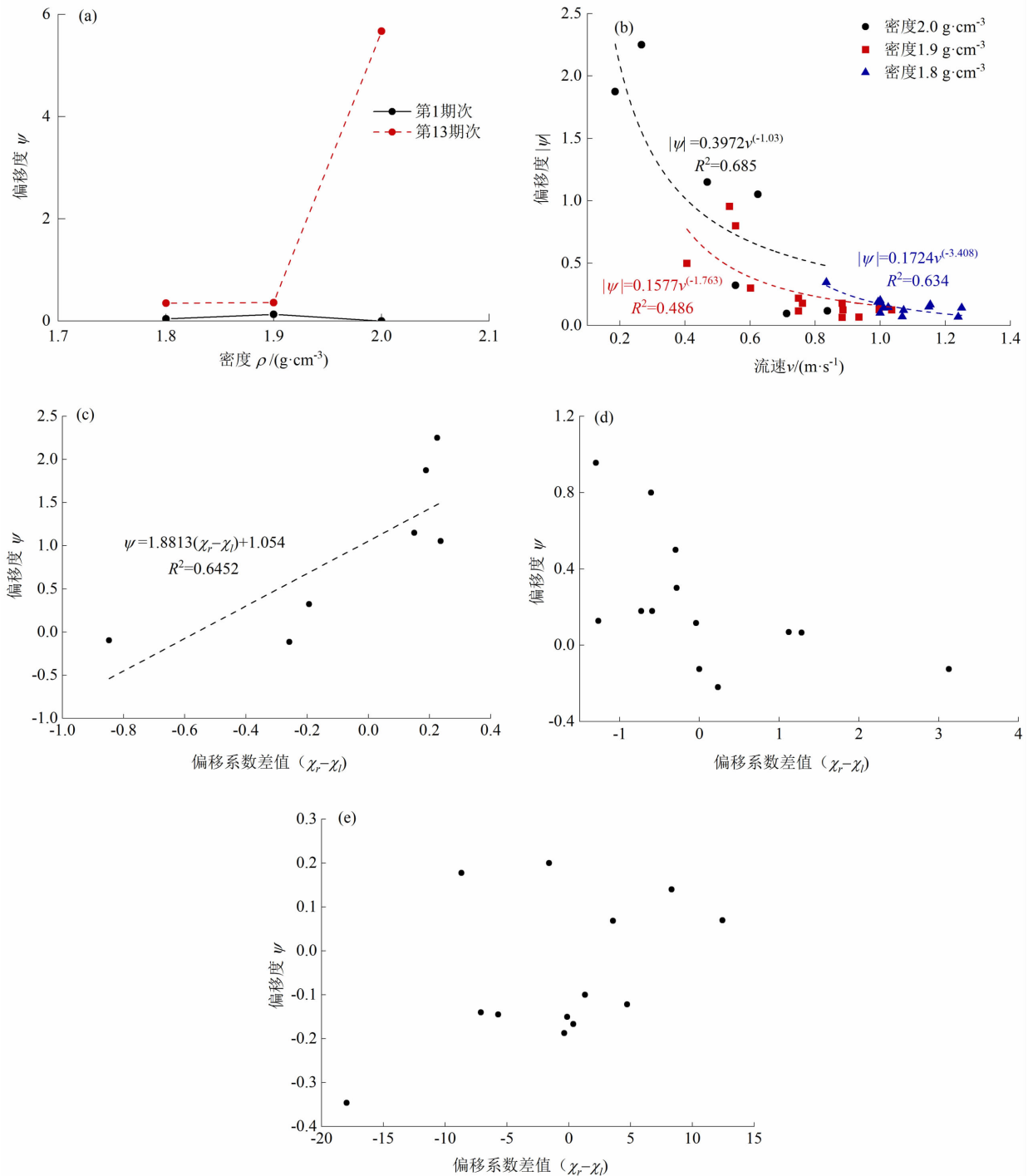


图 12 不同影响因素下的偏移度:(a)密度;(b)流速;(c)偏移系数差值

($\rho = 2.00\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$);(d)偏移系数差值($\rho = 1.90\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$);(e)偏移系数差值($\rho = 1.80\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)

Fig. 12 Offset degree under different influencing factors: (a) density; (b) velocity; (c) offset coefficient difference ($\rho = 2.00\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$);

(d) offset coefficient difference ($\rho = 1.90\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$); (e) offset coefficient difference ($\rho = 1.80\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)

下,扇体形态偏移度 $|\psi|$ (以 $|\psi|$ 表示 ψ 值大小)随着泥石流沟口流速 v 的增加而减小,并且二者之间呈负幂相关。

(3) $\psi - (\chi_r - \chi_l)$ 关系

偏移系数差值 $(\chi_r - \chi_l)$ 在影响偏移度 ψ 值大小的同时,还决定着形态偏移的方向。依据图 12(c-e)可知,泥石流形态偏移方向整体上与偏移系数差值 $(\chi_r - \chi_l)$ 的方向一致;偏移度 $|\psi|$ 则随着沟口处偏移系数差值 $|\chi_r - \chi_l|$ 的增加而增大。其中,对于高密度的黏性泥石流,二者之间呈线性正关系;而其他密度条件下,二者并无明显的函数关系,证明在低密度条件下,偏移系数差值并不是影响偏移度大小的主要影响因素。

2.3.3 偏移度 ψ 的综合表达式

结合公式(3)以及上述偏移度与各影响因素之间的分析,得出偏移度是多种因素下共同作用的结果。对公式(3)进行量纲分析,取 ρ 、 g 、 h 三个量作为基本量,得到偏移度与各影响因素之间的综合函数关系为:

$$\psi = f\left(\frac{v^2}{gh}, \frac{\rho_s}{\rho}, (\chi_r - \chi_l)\right) \quad (4)$$

依据式(4)并利用 MATLAB 对表 3 中的数据进行多元非线性回归分析,得到偏移度 ψ 与 $\frac{v^2}{gh}$, $\frac{\rho_s}{\rho}$, $(\chi_l - \chi_r)$ 之间的关系为:

$$\psi = 0.53 \left(\frac{\rho_s v^2}{\rho gh} \right)^{-0.467} (\chi_r - \chi_l)^{-0.656}, \quad (5)$$

$$R^2 = 0.568$$

式(5)定量解释了泥石流堆积形态的偏移度与泥石流性质、运动特征以及堆积区地形之间的关系。可以看出偏移度随着泥石流流速的增大而减小,随泥石流密度的增加而增加;表明在高密度、低流速的条件下,泥石流会集中堆积于堆积区某一侧,堆积形态发生较大程度的偏移,表现为堆积宽度增加而堆积长度减小。

3 讨论

泥石流叠加堆积过程中,主体流路改变、扇体形态偏移等现象会改变和扩大泥石流的致灾范围^[19]。有学者发现扇体形态偏移与堆积区地形密切相

关^[24]。本文基于室内水槽实验再现了泥石流叠加堆积过程,发现泥石流倾向堆积于地形较陡侧;此外,本文还发现扇体形态偏移与泥石流的动力学参数有关,并基于实验数据建立了形态偏移度与二者之间的函数关系式。该公式表明,在高密度、低流速的条件下,泥石流堆积会产生较大的偏移度。实验结果为预测泥石流冲淤及致灾范围提供更准确的理论依据,可为泥石流防治工程优化设计提供指导。

考虑到泥石流堆积过程的复杂性,本实验对泥石流的颗粒组成进行了简化,即不同密度泥石流均采用同一颗粒级配固体材料配置而成。但实际情况下,不同密度的泥石流具备不同的颗粒组成,因而具备不同的内在运动机制,这会增加泥石流堆积过程中形态发展的随机性。未来研究中,可进一步探讨颗粒组成对泥石流叠加堆积的影响。

此外由于现有实验场地的限制,本研究是基于小尺度的室内水槽实验,可能存在一定的尺度效应;同时由于野外观测的困难,目前实例分析只能局限于现象对比。未来研究中,期待进行大规模泥石流的模拟实验,并结合野外实例对实验结果进行修正。

4 结论

本文结合室内水槽实验和理论分析,利用 3D 扫描重建技术,分析了不同密度泥石流叠加堆积形态的几何特征及其演化规律;探究了扇体形态偏移与堆积区地形、泥石流性质及其运动特征之间的关系,主要得到以下结论:

(1) 泥石流叠加堆积过程可概括为纵向—垂向—横向三个发展阶段;黏性泥石流易形成厚度较大的堆积体,过渡性泥石流易形成面积较大的堆积体。

(2) 泥石流堆积长度随叠加次数的增加呈指数型衰减,堆积厚度呈幂次增加,最终趋近于叠加堆积的极限厚度。而堆积宽度随叠加次数的增加呈先增加后减小的抛物线变化趋势。

(3) 泥石流叠加堆积会出现形态偏移现象,偏移方向取决于堆积区的非对称地形,偏移度可表达为泥石流密度、流速等动力学参数的函数。在高密

度、低流速的条件下,泥石流会发生较大偏移,集中向某一侧发展。

参考文献 (References)

- [1] CUI Peng, GE Yonggang, ZHUANG Jianqi, et al. Soil evolution features of debris flow waste-shoal land [J]. *Journal of Mountain Science*, 2009, **6**(2):181 – 188. DOI: 10.1007/s11629 – 009 – 1035 – 1
- [2] 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**(3):1639 – 1650. DOI: 10.1007/s10064 – 019 – 01641 – 9
- [3] 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
- [4] TAKAHASHI T. Debris flow [J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1981, **13**(1):57 – 77. DOI: 10.1146/annurev.fl.13.010181.000421
- [5] PIERSON T C. Dominant particle support mechanisms in debris flows at Mt Thomas, New Zealand, and implications for flow mobility [J]. *Sedimentology*, 1981, **28**(1):49 – 60. DOI: 10.1111/j.1365 – 3091.1981.tb01662.x
- [6] BLAIR T C, MCPHERSON J G. Alluvial fans and their natural distinction from rivers based on morphology, hydraulic processes, sedimentary processes, and facies assemblages [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1995, **65**(3a):450 – 489. DOI: 10.1306/d42681b7 – 2b26 – 11d7 – 8648000102c1865d
- [7] WHIPPLE K X, DUNNE T. The influence of debris-flow rheology on fan morphology, Owens Valley, California [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1992, **104**(7):887 – 900. DOI: 10.1130/0016 – 7606 (1992)1042 <0887:TIODFR >2.3.CO;2
- [8] 舒安平,张欣,唐川,等. 不同坡度条件下非均质泥石流堆积过程与特征[J]. *水力学报*, 2013, **44**(11):1333 – 1337 + 1346. [SHU Anping, ZHANG Xin, TANG Chuan, et al. Analysis on the deposition processes and characteristics of non-homogeneous debris flow [J]. *Journal of Hydraulics*, 2013, **44**(11):1333 – 1337 + 1346] DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2013.11.001
- [9] 侯圣山,曹鹏,陈亮,等. 基于数值模拟的耳阳河流域泥石流灾害危险性评价[J]. *水文地质工程地质*, 2021, **48**(2):1 – 9. [HOU Shengshan, CAO Peng, CHEN Liang, et al. Debris flow hazard assessment of the Eryang River watershed based on numerical simulation [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2021, **48**(2):1 – 9] DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000 – 3665.202003057
- [10] 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
- [11] MAJOR J J. Depositional processes in large-scale debris-flow experiments [J]. *The Journal of Geology*, 1997, **105**(3):345 – 366. DOI: 10.1086/515930
- [12] 李泳. 蒋家沟泥石流阵流的时空特征[J]. *自然杂志*, 2014, **36**(5):319 – 324. [LI Yong. Spatiotemporal characteristics of debris flow in Jiangjia Gully [J]. *Chinese Journal of Nature*, 2014, **36**(5):319 – 324] DOI: 10.3969/j.issn.0253 – 9608.2014.05.002
- [13] 马超,何晓燕,胡凯衡. 我国高频率泥石流的雨量特征[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2015, **26**(2):43 – 50. [MA Chao, HE Xiaoyan, HU Kaiheng. Rainfall parameter characteristics of high-frequency debris flow in China [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2015, **26**(2):43 – 50] DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003 – 8035.2015.02.08
- [14] 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
- [15] DELORME P, DEVAUCHELLE O, BARRIER L, et al. Growth and shape of a laboratory alluvial fan [J]. *Physical Review E*, 2018, **98**(1):012907. DOI: 10.1103/PhysRevE.98.012907
- [16] CLARKE L, QUINE T A, NICHOLAS A. An experimental investigation of autogenic behavior during alluvial fan evolution [J]. *Geomorphology*, 2010, **115**(3):278 – 285. DOI: 10.1016/j.geomorph.2009.06.033
- [17] VENTRA D, NICHOLS G J. Autogenic dynamics of alluvial fans in endorheic basins: Outcrop examples and stratigraphic significance [J]. *Sedimentology*, 2014, **61**(3):767 – 791. DOI: 10.1111/sed.12077
- [18] DE HAAS T, BERG W V D, 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
- [19] D'AGOSTINO V, CESCO M, MARCHI L. Field and laboratory investigations of runout distances of debris flows in the Dolomites (Eastern Italian Alps) [J]. *Geomorphology*, 2010, **115**(3 – 4):294 – 304. DOI: 10.1016/j.geomorph.2009.06.032
- [20] DENSMORE A L, DE HAAS T, MCARDELL B, et al. Making sense of avulsions on debris-flow fans [G]//KEAN J W, COE J A, SANTI P M, et al. *Proceedings of 7th International Conference on Debris – Flow Hazards Mitigation*. Golden Colorado USA: Association of Environmental and Engineering Geologists, 2019:

- 637–644.
- [21] 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
- [22] DE HAAS T, DENSMORE A L, STOFFEL M, et al. Avulsions and the spatio-temporal evolution of debris-flow fans [J]. *Earth Science Reviews*, 2017, **177**:1–52. DOI: 10.1016/j.earscirev.2017.11.007
- [23] 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
- [24] FIELD J. Channel avulsion on alluvial fans in southern Arizona [J]. *Geomorphology*, 2001, **37**(1):93–104. DOI: 10.1016/S0169-555X(00)00064-7
- [25] THOMAS D S G. *Arid zone geomorphology: Process, form and change in drylands* [M]. Britain: Blackwell Press, 2011:333–364
- [26] REITZ M D, JEROLMACK D J. Experimental alluvial fan evolution: Channel dynamics, slope controls, and shoreline growth [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2012, **117**:F02021. DOI: 10.1029/2011JF002261
- [27] DE HAAS T, DENSMORE A L, HOND T, et al. Fan-surface evidence for debris-flow avulsion controls and probabilities, Saline Valley, California [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2019:1–100. DOI: 10.1029/2018JF004815
- [28] LEENMAN A, EATON B. Mechanisms for avulsion on alluvial fans: Insights from high-frequency topographic data [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2021:1–17. DOI: 10.1002/esp.5059
- [29] 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]
- [30] 崔之久. 泥石流沉积与环境 [M]. 北京: 海洋出版社, 1998:37–39. [CUI Zhijiu. *Debris flow deposition and environment* [M]. Beijing: China Ocean Press, 1998:37–39]
- [31] HOOKE R L. Processes on arid-region alluvial fans [J]. *The Journal of Geology*, 1967, **75**(4):438–460. DOI: 10.2307/30085004

Experimental Investigation on the Morphological Evolution of Superimposed Deposition of Debris Flow

LI Chunyu^{1,2}, LIU Jingjing^{1,2*}, CHEN Xiaoqing¹, LI Qimin^{1,2}

(1. *Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Process, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Conservancy, Chengdu 610041, China*; 2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: Debris flow fans are generally created by superposition of multiple debris flows. As a chain of debris flows successively run out of gully mouth and then deposit on piedmont slope, they generally alter main flow path of debris flow and lead to deformation of alluvial fan, quite possibly resulting in deviation of the axis of debris flow fan and expansion in sedimentation ground, posing great threats to the local community in the vicinity. Unfortunately, little attention was paid to the phenomenon of superposition of debris flow fans as well as associated morphological evolution, and there was no quantitative description on morphological migration of debris flow fans. In this study, a flume model experiment was designed to simulate the superimposed deposition of multiple debris flows. Debris flows with densities of $2.00 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, $1.90 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, and $1.80 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ were modelled using wide grading debris flow deposits. Then the morphology of debris flows was measured and visualized in form of DEM, and the evolution was described by the geometry and flow parameters. The results show that: (1) According to the features of superimposed deposition of multiple debris flows, the process could be divided into three stages: longitudinal,

vertical and horizontal development stage. (2) Under the condition of the same density, the deposition length of debris flow decayed exponentially with the superposition times, while the deposition thickness increased exponentially to a limit; And the deposition width of debris flow increased at first and then decreases with the superposition times. (3) The offset degree of depositional morphology was a function of debris flow density, velocity and topography of the deposition area, which was greater under the condition of high density and low velocity of debris flow. This research not only clarifies the physical process and morphological evolution of superimposed deposition of multiple debris flows, but also establishes a discrimination formula for the offset degree of depositional morphology. It provides a theoretical basis for predicting the disaster range of debris flow.

Key words: debris flow; superimposed deposition; depositional morphology; offset degree