

文章编号: 1008-2786-(2013)3-327-07

# 动床条件下粘性泥石流沟道淤积实验研究

林雪平<sup>1 2 3</sup> 游勇<sup>1 2 \*</sup> 柳金峰<sup>1 2</sup> 赵彦波<sup>1 2 3</sup> 刘曙亮<sup>1 2 3</sup>

(1. 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室, 四川 成都 610041;

2. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 泥石流淤积是危害建筑物的主要方式之一。为了探讨动床条件下泥石流沟道淤积规律, 开展了不同泥石流重度、不同沟床物质重度、不同沟道坡度以及不同泥石流总量共 4 组单次淤积实验和 1 组不同沟道坡度下的泥石流连续淤积实验。实验结果表明, 单次淤积时, 泥石流淤积厚度随着沟道坡度的增加而减小, 随着泥石流重度的增大而增大, 随泥石流总量的增大而增大, 受沟床物质重度变化的影响较小; 连续淤积时, 随着沟道坡度的增加, 第 2 次淤积相对于第 1 次淤积结果依次表现为完全淤积、冲淤交替以及完全冲刷, 且冲刷始于沟道前缘, 逐渐向后缘发展。在分析泥石流淤积厚度的影响因素基础上, 通过回归分析建立了动床条件下粘性泥石流沟道淤积厚度的经验预测公式:  $H = 0.005x + (1.63E - 11)e^{x^c} - 0.003\ln(\sin\theta) + 0.22V - 0.02$ 。

**关键词:** 粘性泥石流; 动床; 沟道淤积; 厚度; 实验研究

**中图分类号:** P642.23

**文献标志码:** A

泥石流是山区常发的一种自然灾害, 主要由降水、冰川(雪)融水或溃决洪水诱发而成, 其在沟道内的运动不仅主导着沟床演变进程, 也常常对布置于沟道内的工程设施造成巨大影响, 从而给人民生活和经济财产造成损失<sup>[1-4]</sup>。例如云南东川蒋家沟泥石流导流堤在 1957—1969 年的 12 a 间由于泥石流淤积, 不仅造成排导减灾功能降低, 每年还要花费大量资金进行清淤; 又例如在 2010 年“8.14”特大泥石流灾害中, 四川汶川映秀湾某泥石流沟内的一个涵洞由于净高不足而被泥石流堵塞导致水位迅速上涨危及下游安全。因此, 认识泥石流的沟道淤积规律对泥石流防灾减灾具有重要意义。目前泥石流淤积研究多集中在沟口淤积方面, 有关沟道内的淤积研究也多集中于泥石流淤积厚度的计算方法研究。吴积善等通过野外观察泥石流淤积, 对野外淤

积现象作了较多的整理归纳<sup>[3]</sup>。中国科学院兰州冰川冻土研究所在《甘肃泥石流》中提出泥石流淤积厚度可通过泥石流重度、淤积坡度和泥石流屈服应力计算得到, 提出了泥石流最大淤积厚度的计算公式<sup>[4]</sup>。余斌在最大淤积厚度计算公式基础上, 通过研究泥石流屈服应力的特点提出了不同重度下的泥石流淤积厚度的经验计算方法<sup>[5]</sup>。游勇等人则从力学平衡角度出发推导了沟道任意位置处泥石流淤积厚度的理论计算公式, 进一步完善了泥石流淤积厚度计算方法<sup>[6]</sup>。上述泥石流沟道淤积厚度的计算方法并未考虑沟床物质的影响, 仅是定床条件下的淤积厚度计算方法。为了加强对动床条件下泥石流沟道淤积规律的认识, 本文通过室内模拟实验, 对动床条件下粘性泥石流沟道淤积规律进行初步分析。

收稿日期(Received date): 2012-12-10; 改回日期(Accepted): 2013-03-07。

基金项目(Foundation item): 国家科技支撑计划(2011BAK12B03)和国家基金委中俄国际合作项目(41211120178)资助。[Supported by National Key Technologies R & D Program of China (Grant No. 2011BAK12B03) and the NSFC-RFBR project of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41211120178).]

作者简介(Biography): 林雪平(1987-), 男, 四川广安人, 硕士, 主要从事泥石流模拟实验与防治工程研究。[Lin Xueping(1987-), male, master engaged in the experiment and mitigation research of mountain hazards.]

\* 通信作者(Corresponding author): 游勇(1964-), 男, 四川乐山人, 研究员, 主要从事山地灾害实验与防治工程研究。[You Yong(1964-), male professor engaged in mitigation research of mountain hazards.] E-mail: yyong@imde.ac.cn

# 1 实验设计

## 1.1 实验装置

实验在中科院水利部成都山地灾害与环境研究所泥石流动力学实验室进行。实验装置包括料斗:长50 cm,宽40 cm,高85 cm,可装载泥石流约100 L,与水槽固定连接,连接处通过闸门控制流量大小;概化沟道:长300 cm,宽20 cm,高30 cm的钢架水槽,坡度可自由调节,倾动角度 $0^{\circ} \sim 20^{\circ}$ ,侧面为钢化玻璃,上面贴有坐标纸以方便读数,水槽出口处作为起点,刻度为0 cm,沿水槽往料斗方向每隔10 cm一个刻度,到料斗处为终点刻度300 cm;水槽末端放置尾料回收池以供回收尾料用,实验装置示意图如图1。

## 1.2 实验物料

为更好地贴近野外泥石流研究,实验物料取自高家沟沟口处的泥石流原样。高家沟是岷江右岸的一级支沟,位于都(江堰)汶(川)公路中段,地处岷江上游河谷。泥石流原样级配很宽,包含了粘粒、粉粒、砂砾和砾石等组分,本实验物料最大粒径为20 mm,物料颗粒级配如图2所示。

## 1.3 实验内容

实验设计包括单次淤积实验和连续淤积实验两种,单次淤积实验是指每次实验前在水槽底部自然或人工铺置配好的一定厚度泥石流物料(沟床物质)用来模拟泥石流沟床,然后打开料斗闸门放出泥石流物料用来模拟暴发的泥石流。连续淤积实验是指在首次淤积实验完成基础上接着进行一次泥石流淤积实验,主要用来模拟阵型泥石流的连续两次淤积过程。实验开展了不同沟道坡度、不同泥石流重度、不同沟床物质重度以及不同泥石流总量条件下的共4组泥石流单次淤积实验和1组泥石流连续淤积实验。具体实验条件的设定见表1。

根据实验方案,将泥石流样品放置于敞口容器中浸泡以备实验用。实验开始后,取浸泡后的泥石流样品按实验要求配置一定重度的沟床物质和泥石流流体。先将配好的沟床物质搅拌称重后倒入料斗中,反复搅拌使其均匀后,按实验要求调节闸门开口大小,通过自然或人工方式使其均匀铺满3 m长的水槽,待铺床完成后对其厚度进行测量;再将配好的泥石流流体搅拌称重后倒入料斗中,反复搅拌均匀后按实验要求调节闸门开口大小,同时在水槽侧面放置摄像机以记录泥石流运动过程,待泥石流运动完成后对水槽内淤积厚度进行测量获取实验数据。

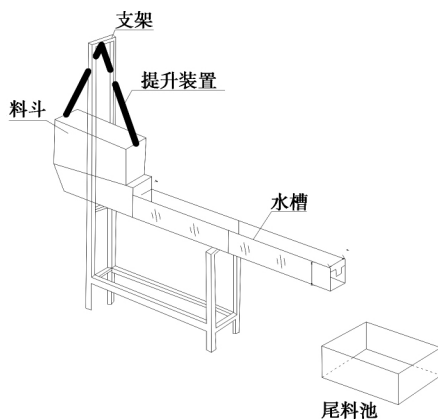


图1 实验装置示意图

Fig. 1 Experimental apparatus

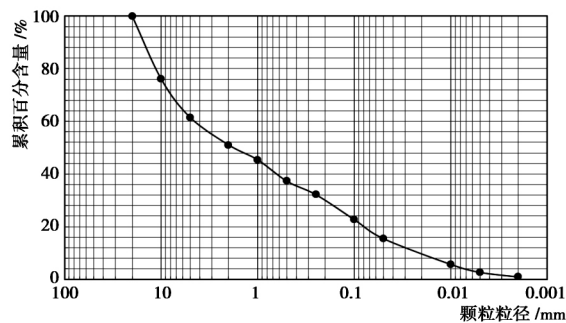


图2 实验物料颗粒级配图

Fig. 2 Particle gradation for the material used in the experiment

表1 实验条件及组合表

Table 1 Experimental conditions

实验组号	沟床物质重度 $\gamma_b$ /( $\text{kN}/\text{m}^3$ )	泥石流重度 $\gamma_c$ /( $\text{kN}/\text{m}^3$ )	沟道坡度 $\theta$ / $^{\circ}$	泥石流总量 $V$ /L	备注
1	20	17、18、18.5、19	7	60	单次淤积
2	20/22	18	4、7、11、15	60	
3	22	18	11	40、50、60、70	
4	20/22	18	4、7	60	
5	20	18	4、7、12、19	每次60 L,两次共120 L	连续淤积

## 2 主要实验结果分析

### 2.1 粘性泥石流沟道淤积形态

以表 1 中所有 1、2、3、4 组及第 5 组第 1 次淤积实验所得数据进行分析。分析时不考虑闸门出口与水槽出口两处受边界条件影响较大的数据, 选取 0.5 ~ 2.5 m 水槽刻度段的实验数据进行分析。根据实验结果, 可从泥石流淤积的表面形态和整体形态两方面来描述, 如图 3、4 所示。

表面部分的淤积具有明显的波状形态, 该波形不是典型的对称型波, 略偏向淤积前缘方向。在全部观测段内, 具波状形态的表面部分平均厚度约占整个淤积厚度的 1/4, 淤积前缘处该比例最大达到 1/2, 淤积后缘处较小, 约为 1/5。波状形态的波长  $\lambda$  范围在 0.4 ~ 0.8 m 之间, 以 0.4 m 最为常见, 振幅  $\delta$  在 0.1 ~ 0.4 cm 之间。从淤积前缘到淤积后缘, 波长  $\lambda$  逐渐增大, 振幅  $\delta$  逐渐减小。推测产生这种现象的主要原因是受到沟床物质表面微形态与泥石流流体扰动共同作用的结果。进行铺床时, 沟床表面本身存在高低不平的微形态, 当泥石流过流时, 受到底面沟床微形态扰动影响, 从而在过流完成后形成表面波状起伏的沉积形态。之所以在淤积前缘波状形态起伏较大, 主要原因是前端出口处泥石流急剧下泄而不是野外通常见到的堆积扇地, 造成前缘部分泥石流扰动增强, 且伴有溯源冲刷, 而后缘受此影响较小, 最终形成实验观察到的表面波状形态现象。

不考虑表面波状形态淤积部分, 而将波状形态的波谷顶点连接起来形成一条曲线, 该曲线可大致反映出粘性泥石流的纵向上的整体淤积形态。从纵向上看, 泥石流整体淤积形态大致呈前缘较陡较薄, 中后部较缓较厚的上凸型曲线。形成该淤积形态主要是由于水槽出口处急剧下降导致泥石流产生溯源

冲刷, 使得前缘部分淤积厚度小而后缘淤积厚度大。横向上看, 观测段内存在上凸形、平缓形以及下凹形三种不同的淤积形态, 这一现象在东川蒋家沟也有发现<sup>[3]</sup>。其中, 下凹形淤积形态主要分布于淤积后缘以及水槽出口处, 前缘淤积可见略微隆起的上凸形态, 水槽中段大致呈平缓形淤积形态。之所以会出现这种现象, 主要是由泥石流中间流速与两侧流速的差异造成的。泥石流运动时两侧流速由于受到边壁阻力的影响小于中间流速, 中间流速大, 携带物质的能力强, 当没有后续泥石流补充时, 中间和后缘部分依次形成平缓形和下凹形淤积形态。前缘部分由于是泥石流携带的大颗粒物质停积的部位, 会形成上凸形淤积形态, 然而由于水槽出口处泥石流迅速下泄导致溯源冲刷, 反而会在局部位置形成下凹形淤积形态, 这就是实验过程中观察到水槽出口处呈下凹形的原因。

### 2.2 粘性泥石流单次淤积规律

为方便对实验结果进行分析, 结合图 5 对有关定义进行如下说明: 1. 泥石流淤积厚度: 单次淤积实验时为第一次淤积表面与铺床表面之间的距离 ( $H_2$ ); 连续淤积实验时为第二次淤积表面与第一次淤积表面之间的距离 ( $H_3$ )。2. 泥石流平均淤积厚度: 水槽 0.5 ~ 2.5 m 范围内泥石流淤积厚度的平均值。实验中每隔 0.2 m 测量厚度数据, 对 0.5 ~ 2.5 m 段测量数据求和取平均值。3. 完全淤积: 在水槽 0.5 ~ 2.5 m 范围内泥石流淤积厚度全都大于 0; 冲淤交替: 在水槽 0.5 ~ 2.5 m 范围内泥石流淤积厚度部分大于 0, 部分小于 0; 完全冲刷: 在水槽 0.5 ~ 2.5 m 范围内泥石流淤积厚度全都小于 0。

#### 2.2.1 淤积厚度 ( $H$ ) 与泥石流重度 ( $\gamma_c$ ) 的关系

以表 1 第 1 组中不同泥石流重度的实验数据来分析重度对粘性泥石流淤积厚度的影响。为了排除闸门开口和水槽出口部分边界条件的影响, 仅选取受

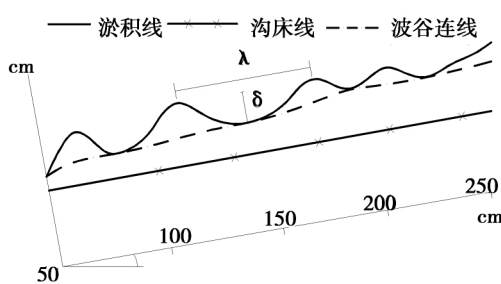


图 3 粘性泥石流淤积形态纵剖面示意图

Fig. 3 Longitudinal sectional view of the viscous debris siltation morphology

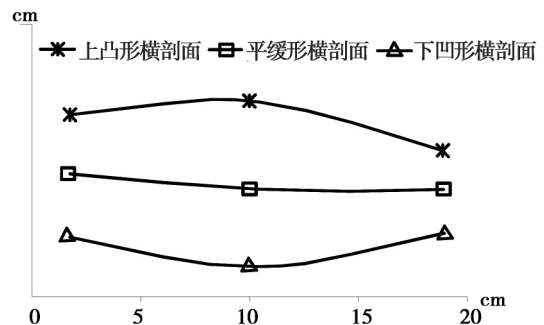
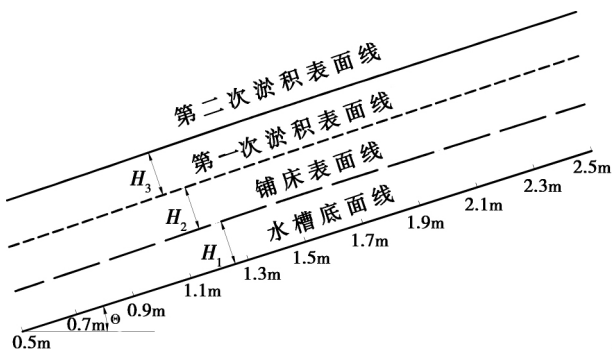


图 4 粘性泥石流淤积形态横剖面示意图

Fig. 4 Cross section of the viscous debris siltation morphology



(注: 图中  $H_1$  表示沟床厚度  $H_2$  表示单次淤积时相对沟床淤积厚度  $H_3$  表示连续淤积时第 2 次相对第 1 次淤积厚度;  $H_1$ 、 $H_2$ 、 $H_3$  分别为水槽横剖面左、中、右三个测量位置处的厚度平均值)

图 5 粘性泥石流淤积实验示意图

Fig. 5 morphology of the viscous debris siltation experiment

边界条件影响较小的 0.5 ~ 2.5 m 段淤积厚度值 (即泥石流平均淤积厚度) 进行分析(下同)。观察图 6 可知, 泥石流重度为 19.0 kN/m<sup>3</sup> 时, 平均淤积厚度为 4.4 cm; 泥石流重度为 18.5 kN/m<sup>3</sup> 时, 平均淤积厚度为 1.3 cm; 泥石流重度为 18.0 kN/m<sup>3</sup> 时, 平均淤积厚度 0.4 cm; 选取泥石流重度为 17.0 kN/m<sup>3</sup> 的稀性泥石流作为对比, 泥石流平均淤积厚度仅为 0.13 cm。可见, 泥石流淤积厚度随泥石流重度的增加而增加。为了探究粘性泥石流淤积厚度  $H$  (cm) 与泥石流重度  $\gamma_c$  (kN/m<sup>3</sup>) 的关系, 选取泥石流平均淤积厚度, 将其与泥石流重度之间的关系拟合如下

$$H = 6E - 15e^{1.803\gamma_c} \quad R^2 = 0.914 \quad (1)$$

从上述拟合关系可见, 泥石流淤积厚度与泥石流重度大致呈指数关系(图 7)。

### 2.2.2 淤积厚度 ( $H$ ) 与沟道坡度 ( $\theta$ ) 的关系

以表 1 第 2 组中不同沟道坡度条件下的实验数

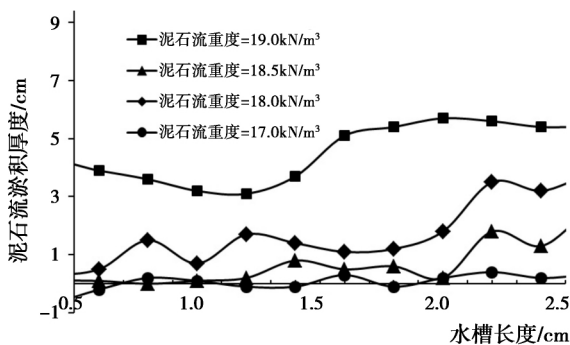


图 6 不同泥石流重度条件下淤积厚度对比图

Fig. 6 The comparison of deposition thickness in different debris flow densities

据来分析沟道坡度对粘性泥石流淤积厚度的影响(图 8)。当保持泥石流重度为 18 kN/m<sup>3</sup>, 沟床物质重度为 20 kN/m<sup>3</sup> 条件不变时, 沟道坡度  $\theta = 4^\circ$  时泥石流平均淤积厚度 1.4 cm;  $\theta = 7^\circ$  时泥石流平均淤积厚度 0.7 cm; 当  $\theta = 11^\circ$  时, 泥石流平均淤积厚度为 0.3 cm;  $\theta = 15^\circ$  时, 泥石流平均淤积厚度为 -0.1 cm, 负数表示冲刷沟床物质。对于泥石流重度为 19 kN/m<sup>3</sup>, 沟床物质重度为 22 kN/m<sup>3</sup> 时, 沟道坡度从 4° 逐渐增加到 15° 时, 所得实验结论与前述基本一致, 即泥石流淤积厚度随着沟道坡度的增加而逐渐减小(图 8b)。根据图 8b 中的测量数据可得到 0.5 ~ 2.5 m 水槽段内泥石流平均淤积厚度值, 并将此结果作为因变量, 同时结合文献 [4] 中的泥石流淤积厚度公式, 将沟道坡度正弦值作为自变量可得到泥石流平均淤积厚度与沟道坡度的拟合关系式如下

$$H = -1.081 \ln(\sin\theta) - 1.5082$$

$$R^2 = 0.9807 \quad (2)$$

### 2.2.3 淤积厚度 ( $H$ ) 与泥石流总量 ( $V$ ) 的关系

以表 1 中第 3 组中 4 组不同泥石流总量的实验数据来分析泥石流总量对粘性泥石流淤积厚度的影响, 如图 10 所示。在保持泥石流重度为 18 kN/m<sup>3</sup>、沟床物质重度为 22 kN/m<sup>3</sup>、沟道坡度为 11° 不变条件下, 泥石流淤积厚度随泥石流总量的增加而增加。泥石流总量为 40 L 时, 平均淤积厚度为 -0.1 cm (泥石流以冲刷为主); 泥石流总量为 50 L 时, 平均淤积厚度为 0.2 cm; 泥石流总量为 60 L 时, 泥石流平均淤积厚度为 0.3 cm; 泥石流总量为 70 L 时, 平均淤积厚度为 0.4 cm。将泥石流总量作为自变量可得到泥石流平均淤积厚度与泥石流总量的拟合关系式如下

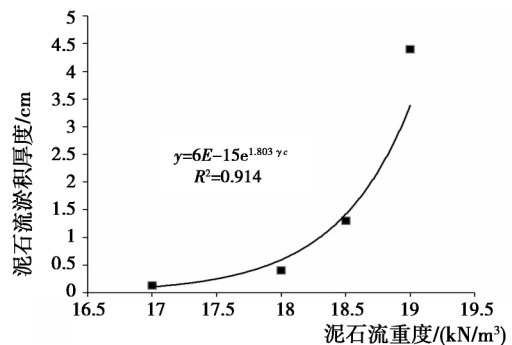
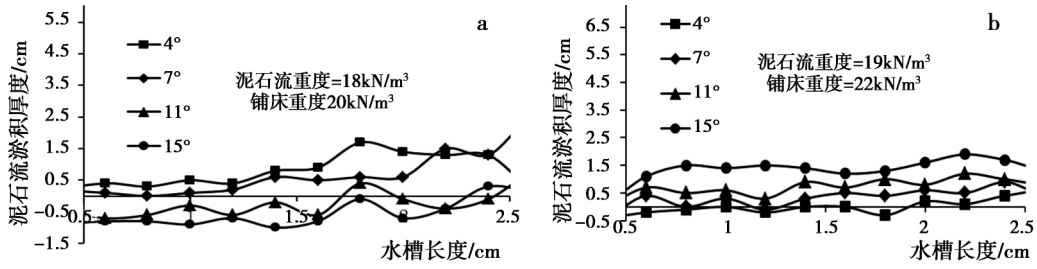


图 7 泥石流平均淤积厚度与泥石流重度关系

Fig. 7 The relative between debris flow deposition thickness and densities



( a.  $\gamma_c = 18 \text{ kN/m}^3$   $\gamma_b = 20 \text{ kN/m}^3$ ; b.  $\gamma_c = 19 \text{ kN/m}^3$   $\gamma_b = 22 \text{ kN/m}^3$ )

图 8 不同沟道坡度条件下淤积厚度对比图

Fig. 8 The comparison of deposition thickness in different channel slopes

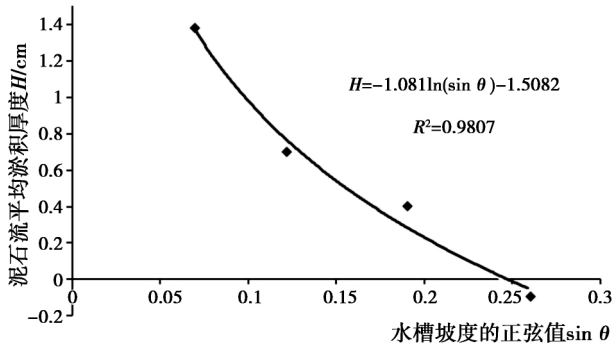


图 9 泥石流淤积厚度值与沟道坡度正弦值的相关关系

Fig. 9 The relative between debris flow deposition thickness and channel slopes

$H = 0.874 \ln(V) - 3.284 \quad R^2 = 0.952 \quad (3)$

2.2.4 淤积厚度 (H) 与沟床物质重量 (γ) 的关系

以表 1 中第 4 组中的 4 组不同沟床重量、不同沟道坡度的实验数据来分析不同沟床重量对粘性泥石流淤积厚度的影响。如图 12, 观察不同沟床物质重量条件下的淤积厚度对比图可知, 沟床物质重量 20 kN/m³ 与沟床物质重量为 22 kN/m³ 的淤积厚度除了闸门口(边界条件影响)处差别较大外其余水槽段的淤积厚度都非常接近, 沟床物质重量对粘

性泥石流淤积厚度的影响不大。选取 0.5 ~ 2.5 m 水槽段的淤积厚度值作为参考, 那么两种不同沟床物质重度的淤积厚度值的相关性表现的很接近, 沟道坡度为 4° 时的相关系数为 0.698 1, 沟道坡度为 7° 的相关系数达到 0.746 6。

2.3 粘性泥石流连续淤积规律

粘性泥石流连续淤积规律可由第 5 组实验数据分析得到, 图 13 表示了粘性泥石流在相同泥石流重量和沟床物质重量、不同沟道坡度条件下的连续淤积情况。归纳起来, 图 13 所示的粘性泥石流连续淤积厚度规律可以概括为:

1. 仅从第 1 次淤积厚度来看, 图 13 中泥石流平均淤积厚度值随着沟道坡度的增加, 淤积厚度逐渐减小并过渡到对沟床物质的冲刷, 与 2.2.2 所得结论一致。

2. 连续淤积时, 第 2 次淤积实验结果并不总是表现为在第 1 次淤积基础上再进行累加淤积, 而是随着沟道坡度的增加, 从完全淤积逐渐变成完全冲刷。沟道坡度为 4° 时, 第 2 次淤积相对于第 1 次为完全淤积, 沟道坡度为 7° 和 11° 时, 第 2 次淤积相对于第 1 次为冲淤交替出现, 沟道坡度为 15° 时, 第 2 次

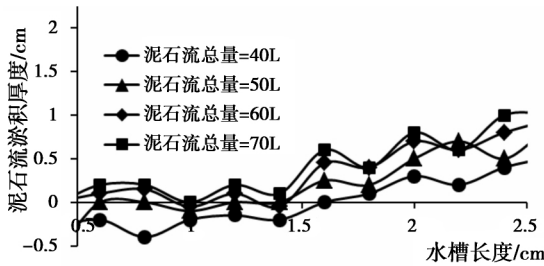


图 10 不同泥石流总量条件下泥石流淤积厚度对比图

Fig. 10 The comparison of deposition thickness in different debris flow total volume

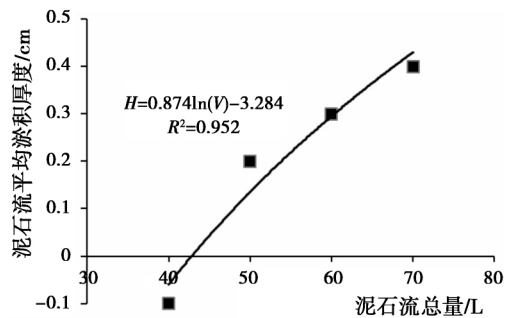
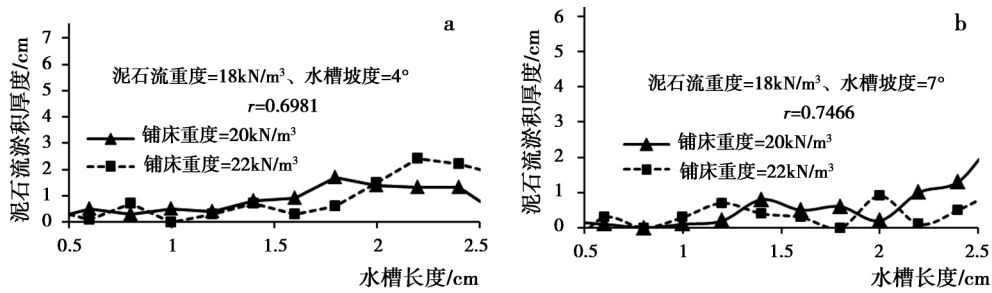


图 11 泥石流淤积厚度与泥石流总量的相关关系

Fig. 11 The relative between debris flow deposition thickness and total volume



(a. 沟道坡度 = 4°; b. 沟道坡度 = 7°)

图 12 不同沟床物质重度条件下淤积厚度对比图

Fig. 12 The comparison of deposition thickness in different bed debris flow density

淤积相对于第 1 次为完全冲刷。推测这种现象的产生原因是: 第 1 次淤积实验后粘性泥石流在沟床物质上形成表层润滑面, 产生“润滑效应”。由于该润滑面的存在, 第 2 次泥石流过流时, 过流底面的摩擦阻力减小, 泥石流淤积条件变差, 甚至产生冲刷现象。当沟道坡度还比较小时尚能保持完全累加淤积, 随着沟道坡度的增加, “润滑效应”就越明显, 在该效应下, 泥石流淤积长度范围及淤积厚度都逐渐减小, 甚至产生冲刷。

3. 在连续淤积过程中, 随着沟道坡度的增加, 第 2 次淤积从完全淤积到完全冲刷时, 冲刷位置首先发生于水槽前缘部分, 然后逐渐向水槽后部发展直至全水槽段发生冲刷。出现这种现象主要由于在同一沟道坡度下, 后端因后续泥石流冲动力不足, 以淤积为主, 而前端因下游泥石流进入下落阶段而快

速运动, 导致侵蚀基准面降低, 淤积较少, 甚至产生溯源冲刷。随着沟道坡度的增加, 这种溯源冲刷就越明显。

#### 2.4 粘性泥石流沟道淤积厚度预测

根据上述对粘性泥石流淤积影响规律的分析, 应用表 1 中 5 组粘性泥石流淤积实验数据, 采用多元回归分析方法, 得到动床条件下粘性泥石流淤积厚度值 ( $H$ ) 随泥石流重度 ( $\gamma_c$ )、沟道坡度 ( $\theta$ ) 以及泥石流总量 ( $V$ ) 变化时在淤积长度 ( $x$ ) 上的厚度变化经验预测公式

$$H = 0.005x + (1.63E - 11)e^{\gamma_c} - 0.003\ln(\sin\theta) + 0.22V - 0.02 \quad (4)$$

上述针对粘性泥石流沟道淤积厚度的预测公式适用范围为: 淤积长度 3 m 内, 宽度 0.2 m 的顺直沟道内, 泥石流总量 70 L 内, 泥石流重度为 18.0 ~ 20

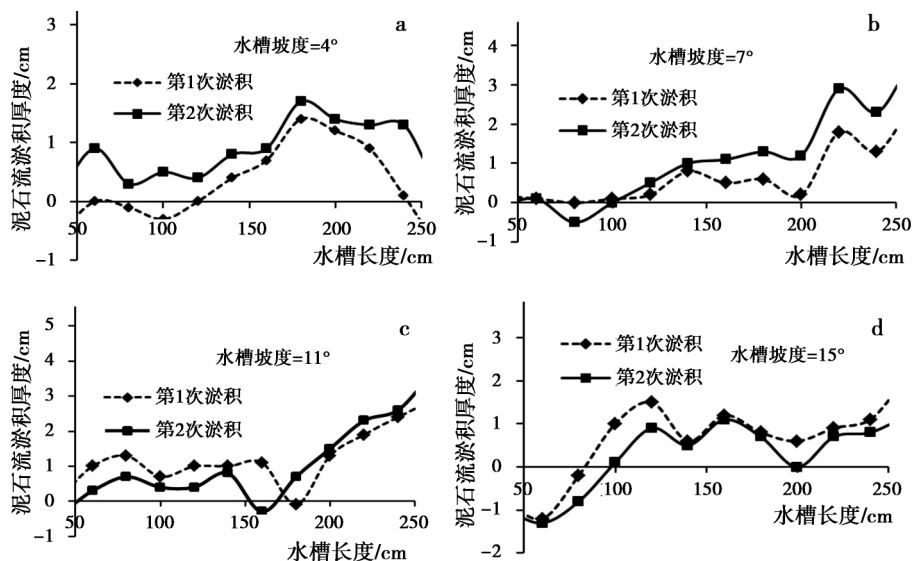
(a.  $\theta = 4^\circ$ ; b.  $\theta = 7^\circ$ ; c.  $\theta = 11^\circ$ ; d.  $\theta = 15^\circ$ )

图 13 不同沟道坡度条件下粘性泥石流连续淤积厚度图

Fig. 13 The comparison of continuous deposition thickness in different channel slope

$\text{kN/m}^3$ , 沟道坡度为  $4^\circ \sim 15^\circ$ , 沟床物质重度为  $20 \sim 22 \text{ kN/m}^3$ 。该预测公式没有经过野外原型大尺度的对比试验研究, 应用于野外预测仍需要进一步检验分析。

### 3 结论

1. 粘性泥石流沟道淤积形态可从表面形态和整体形态两方面说明, 表面淤积形态为倾向淤积前缘的非对称波状形态, 整体淤积形态纵向上表现为前缘较陡较薄, 中后部淤积较缓较厚。

2. 泥石流淤积厚度随着沟道坡度的增加而减小, 随着泥石流重度的增大而增大, 随泥石流总量的增大而增大, 受沟床物质重度变化的影响较小。

3. 动床条件下粘性泥石流连续淤积时, 随着沟道坡度的增加, 第2次淤积在第1次淤积表面上依次表现为完全淤积、冲淤交替和完全冲刷, 并且冲刷始于水槽前缘位置, 逐渐向后缘发展。

4. 粘性泥石流沟道淤积形态中有关表面形态的特征参数还不明确, 影响粘性泥石流淤积厚度的因素除泥石流重度、沟道坡度外, 还有泥石流的剪切强度和颗粒级配等因素。为此, 今后还将继续开展实验来探讨这些问题。

### 参考文献(References)

- [1] Kang Zhicheng, Li Zhuofen, Luo Jintian. Debris flow researches in China [M]. Beijing: Science Press, 2004: 5 - 6 [康志成, 李焯芬, 罗锦添. 中国泥石流研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2004: 5 - 6]
- [2] Tang Bangxing, Zhou Bifan, Wu Jishan et al. Debris flow in China [M]. Beijing: China Commerce and Trade Press, 2000: 15 - 16 [唐邦兴, 周必凡, 吴积善, 等. 中国泥石流 [M]. 北京: 商务出版社, 2000: 15 - 16]
- [3] Wu Jishan, Tian Lianquan, Kang Zhicheng et al. Debris flow and its comprehensive control [M]. Beijing: Science Press, 1993: 176 - 177 [吴积善, 田连全, 康志成, 等. 泥石流及其综合治理 [M]. 北京: 科学出版社, 1993: 1 - 3]
- [4] Lanzhou Institute of Glaciology and Cryopedology, Academia Science and Traffic Science Institute of Gansu Province. China debris flow in Gansu Province [M]. Beijing: the Publishing House of People's Transportation, 1982: 133 - 134 [中国科学院兰州冰川冻土研究所, 甘肃省交通科学研究所. 甘肃泥石流 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1982: 133 - 134]
- [5] Yu Bin. Study on the method for deposition depth calculation of debris flow with different densities [J]. Journal of disaster prevention and Mitigation engineering, 2010, 30(2): 207 - 211 [余斌. 不同重度粘性泥石流淤积厚度计算方法研究 [J]. 防灾减灾工程学报, 2010, 30(2): 207 - 211]
- [6] You Yong, Lin Xueping, Liu Jinfeng. The calculating method of deposition thickness of viscous debris flow [G] // Natural Resources and Sustainable Development II, Hohhot, 2012: 808 - 812 [游勇, 林雪平, 柳金峰. 粘性泥石流淤积厚度的计算方法 [G] // 自然资源与可持续发展 II. 呼和浩特, 2012: 808 - 812]

## Experimental Study on Channel Deposition of Viscous Debris Flow over Erodible Beds

LIN Xueping<sup>1 2 3</sup>, YOU Yong<sup>1 2</sup>, LIU Jinfeng<sup>1 2</sup>, ZHAO Yanbo<sup>1 2 3</sup>, LIU Shuliang<sup>1 2 3</sup>

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Conservancy, Chengdu 610041, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Debris flow deposition is one of the main hazards for buildings. In order to explore the law of debris flow deposition over erodible beds, we carried out 4 groups single siltation experiment and 1 group successive siltation experiment. The single deposition experimental result shows that deposition thickness increases with the increase of channel slope, debris, the increase of debris flow density and the increase of the total amount of debris flow. The bed material density has a small effect on the deposition thickness. By continuous sedimentation, along with the increase of channel slope, the second experiment in turn presented as complete cholestasis, half deposition and half erosion and scouring silting completely, and erosion began at the leading edge, gradually backward to edge of development. On the basis of analyzing of the factors of debris flow deposition thickness, this article established the prediction formula of viscous debris flow single siltation thickness through regression analysis:  $H = 0.005x + (1.63E - 11)e^{x^c} - 0.003 \ln(\sin\theta) + 0.22V - 0.02$ .

**Key words:** viscous debris flow; channel deposition; experimental study; deposition thickness; erodible beds