

粘性泥石流扇状地发展过程实验研究^{*}

柳金峰^{1,2}, 欧国强^{1,2}, 游勇^{1,2}

(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)

摘要: 通过不同泥石流容重、不同堆积区坡度条件、不同水槽坡度条件的泥石流连续堆积实验共3组106次实验, 定量地探讨了粘性泥石流扇状地发展过程的阶段性及其特征。以泥石流扇状地纵、横方向的平均堆积坡度为依据, 将粘性泥石流扇状地的发展过程划分为三个发展阶段。第一阶段以扇状地在纵、横方向快速发展为特征。第二阶段扇状地纵向不再发展, 以横向发展为主。第三阶段以扇状地纵向发展为主, 横向发展缓慢。

关键词: 粘性泥石流; 扇状地; 发展过程; 实验研究

中图分类号: P642.123 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2012)02-0013-06

0 前言

泥石流是一种饱含大量泥沙石块和巨砾的固液两相流体, 呈粘性层流或稀性紊流等运动状态, 是各种自然因素和人为因素综合作用的结果^[1-2]。泥石流的危害方式主要有冲毁、淤埋等, 其中堆积区的淤埋危害是泥石流造成危害的主要方式之一, 其危害对象主要有铁路、公路、车站、城镇、工厂、矿山、村寨和水利设施等。如2010年8月8日, 甘肃省舟曲县城区三眼峪、罗家峪两沟同时暴发特大泥石流灾害, 泥石流淤埋沟口大量建筑, 造成1501人死亡、264人失踪^[3]; 2010年8月13日, 四川省绵竹县清平乡因暴雨引发成群山洪泥石流, 文家沟泥石流输移泥石流流体约450万方, 堵塞了绵远河, 淤埋清平乡镇, 造成9人遇难、3人失踪, 直接经济损失约4.3亿元^[4]。

泥石流扇状地是泥石流堆积作用的最终产物, 其形成是很复杂的, 它是流体性质、地形变化、流态等要素综合作用的结果^[5]。在一定的地形地貌条件下, 泥石流堆积过程的力学作用控制了泥石流扇状地的堆积坡度和平面形态发育, 同时由于发育历史、地貌形态、外力方式、物源组成、成因类别、人类活动等方面的不同, 又使扇状地形成各种不同的类型^[6]。目前国内外对于泥石流扇状地的研究, 其研究方法主要包括野外考察综合分析方法^[7-9]、室内实验方法^[10-13]和数值模拟^[14-15]的方法, 对泥石流扇状地的地貌形态、堆

积泛滥等进行了研究, 而较少对泥石流扇状地发展过程进行较为系统的定量分析和总结; 崔之久曾将泥石流在沟口的扇状堆积过程描述为^[16]: 泥石流冲出沟道后, 原来的沟道消失, 进入开阔堆积场所的泥石流一面横向扩散, 一面减速, 逐渐停止移动; 流体首先取道正对沟口的堆积扇轴部发生堆积, 沿流向形成条带状或舌状的微起伏, 后续流则有取道原始下垫面纵坡较缓的堆积体轴部两翼漫流堆积, 两翼淤高后, 主流又回到轴部堆积, 如此循环往复。可见, 泥石流在沟口形成扇状堆积具有明显的阶段性, 本文通过室内模拟实验, 对泥石流扇状地发展过程的阶段性进行分析和探讨。

1 实验设计

1.1 实验装置

实验装置包括料斗、水槽、堆积板和物料回收池四大部分(图1)。料斗: 长50 cm, 宽40 cm, 高85 cm, 可装载泥石流流体约0.1 m³; 水槽: 为一内宽20 cm、内高30 cm、有效流动长度为300 cm的钢架结构, 侧面为钢化玻璃便于观测。水槽的坡度调节范围为0~20°; 堆积板: 为一长300 cm、宽180 cm的矩形钢架结构, 表面以平整的木板作为堆积平面; 物料回收池: 位于堆积板末端, 为一长200 cm、宽80 cm、高15 cm的砖砌矩形池。每次实验完成后, 将物料清扫入回收池进行沉淀、

^{*} 收稿日期: 2011-10-17

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(40901008); 国家自然科学基金重点项目(40830742)

作者简介: 柳金峰(1979-), 男, 安徽泾县人, 博士, 助理研究员, 主要从事山地灾害实验与防治工程研究。

E-mail: liujf@imde.ac.cn

回收。

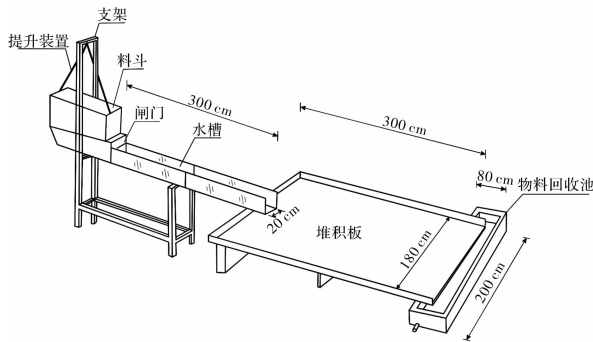


图1 实验装置示意图

1.2 实验物料

蒋家沟是典型的泥石流流域，位于云南省的北部东川，系长江上游金沙江一级水系小江右岸的一条支流，实验物料来源于蒋家沟沟口附近沟道内采集回来的泥石流原样，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10 mm(图2)。

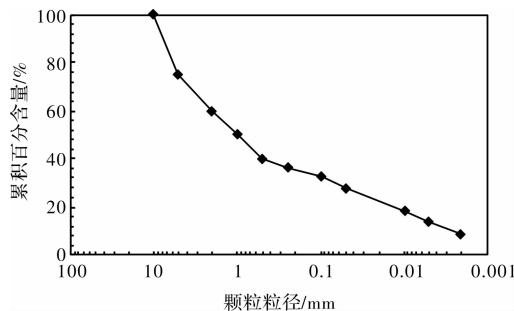


图2 实验物料颗粒级配图

1.3 实验内容及参数定义

实验设计为连续堆积，即后一次在前一次堆积的基础上堆积，实验设定每次的泥石流总量 V 相等(都为 $5\,000\text{ cm}^3$)。本研究共开展了不同泥石流容重、不同堆积区坡度条件、不同水槽坡度条件的泥石流连续堆积实验共3组106次实验。具体实验条件的设定见表1。

表1 实验条件设计表

组次 编号	容重 $r_m/$ (g/cm^3)	水槽坡 度 $\theta_u/(\circ)$	堆积区 坡度 $\theta_d/(\circ)$	次数/次
A ₁	1.80	12.0	0.0	9
A ₂	1.90	12.0	0.0	9
A ₃	2.00	12.0	0.0	9
B ₁	2.00	12.0	0.0	8
B ₂	2.00	12.0	2.0	15
B ₃	2.00	12.0	4.0	14
B ₄	2.00	12.0	5.0	13
B ₅	2.00	12.0	7.0	13
C ₁	2.00	8.0	0.0	8
C ₂	2.00	10.0	0.0	8

图3中定义了泥石流堆积扇的相关参数。 X 轴为横断面方向的坐标， Y 轴表示堆积板中轴线方向的坐标， Z 轴表示堆积厚度； B 表示任意横断面的宽度， B_{\max} 表示扇状地最大堆积宽度； L_c 表示中轴线方向的堆积长度，在堆积区对称的情况下，即为最大堆积长度； Z_c 表示横断面中心线的堆积厚度， Z_0 表示水槽出口中点的堆积厚度； θ_u 表示水槽的坡度， θ_d 表示堆积区的坡度； λ 表示在堆积宽度 B 在最大时(B_{\max})的横向平均堆积坡度(以下简称横断面平均堆积坡度)， γ 表示在最大堆积长度方向纵断面上平均堆积坡度(以下简称纵断面平均堆积坡度)。

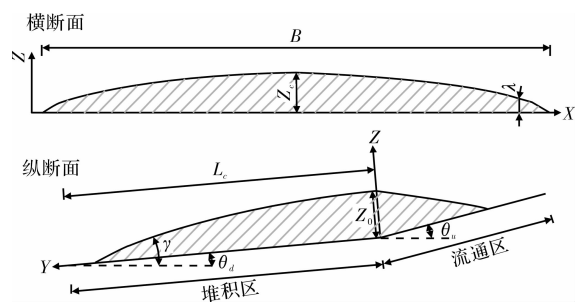


图3 相关参数定义

2 粘性泥石流扇状地堆积范围发展过程实验结果分析

为了探讨泥石流扇状地的发展过程，以表1中的B₂组连续多次粘性泥石流堆积实验来探讨泥石流扇状地的发展过程。本组实验共进行了15次，每一次都是在前一次形成的扇状地的基础上进行堆积。泥石流扇状地的发展过程可用此组第1、6、10、15次泥石流停止运动后的照片说明，如图4所示，照片是在堆积区正上方所拍摄，照片中的堆积板上以黑色油漆笔标上长宽均为10 cm的网格以便于测量和观察。

将此组实验15次泥石流扇状地纵向、横向的平均堆积坡度点绘如图5所示，结合堆积形状图(图6)。以扇状地纵向、横向的平均堆积坡度比($k = \gamma/\lambda$)等于1为依据，将此组泥石流扇状地的发展过程分为三个阶段。现将此三个阶段扇状地发展过程的特征分析如下。

2.1 第一阶段扇状地发展过程特征

第一阶段(第1次~第6次)中，泥石流扇状地的最大堆积长度(L_c)、最大堆积宽度(B_{\max})和堆积面积(S)都随着流出总方量(V_i)的增加而呈对数增加(图7)。这里的对数增加并不是指每次泥石流

的流出长度都比前一次长, 实际上后一次泥石流的流出长度总是比前一次要短, 之所以最后每次的堆积长度都在增加的原因是后一次泥石流将前一次泥石流的堆积前端向前挤动的结果(从图 4 中第 6 次照

片可以看出, 扇状地表面有明显的每次的清晰界限)。此阶段泥石流扇状地的中轴线方向的发展速度约为 14.9 cm/次 , 最大堆积宽度的发展速度约为 17.89 cm/次 , 堆积面积的发展速度为 $1522 \text{ cm}^2/\text{次}$ 。

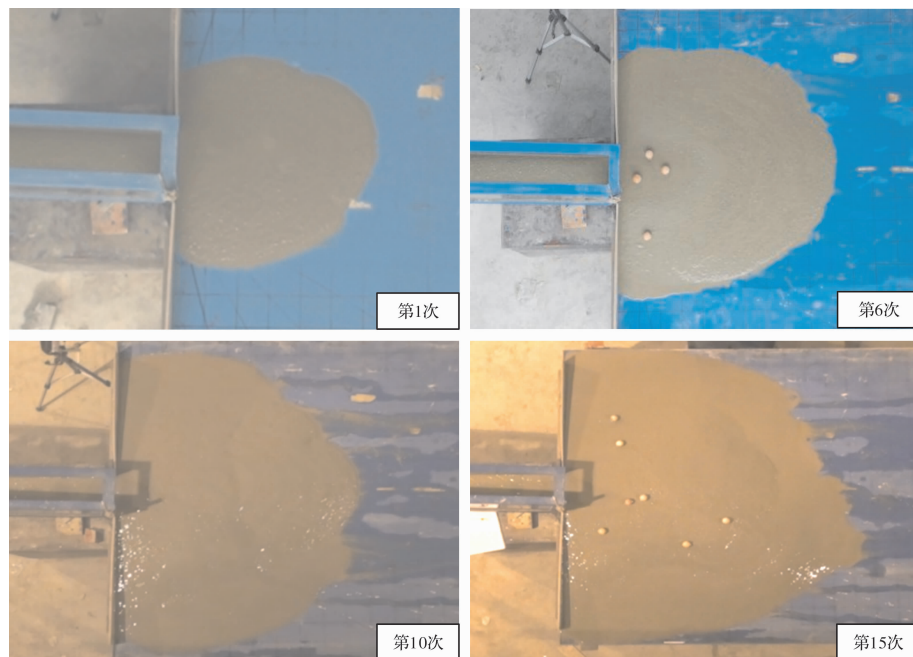


图 4 粘性泥石流扇状地发展过程实验照片

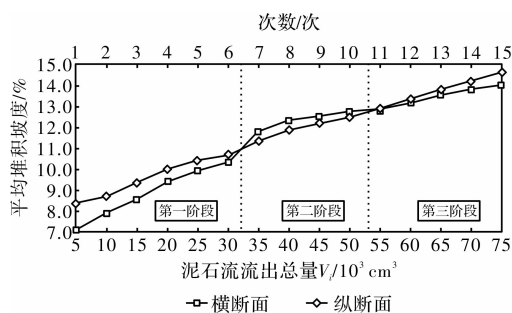


图 5 粘性泥石流扇状地发展阶段划分图

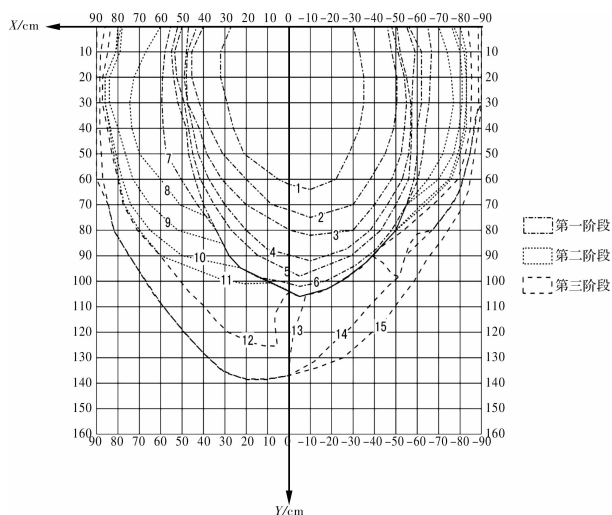


图 6 粘性泥石流扇状地平面形态发展图

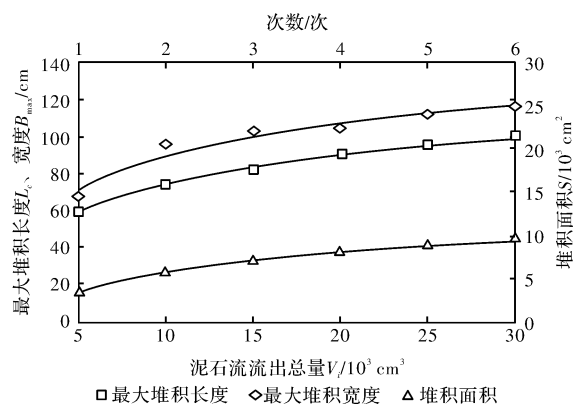


图 7 第一阶段最大堆积长度 L_c 、最大堆积宽度 B_{\max} 、堆积面积 S 与泥石流流出总量 V_i 关系图

对图 7 中 L_c 、 B_{\max} 、 S 与 V_i 的关系进行拟合, 拟合结果如下:

$$L_c = 26.92 \ln(V_i) + 70.75, R^2 = 0.9597;$$

$$B_{\max} = 22.76 \ln(V_i) + 58.74, R^2 = 0.9761;$$

$$S = 3568.1 \ln(V_i) + 3281.4, R^2 = 0.9877.$$

(1)

以第一阶段 6 次实验形成的泥石流扇状地在横断面上和纵断面上的平均堆积坡度点绘如图 8 所示。从图中可以看出, 在扇状地发展的第一阶段, 泥石流扇状地在纵、横断面上的平均堆积坡度都

随冲出总量的增加而呈线性增加, 图中所示, 此阶段纵向的平均堆积坡度大于横向的堆积坡度, 泥石流主要沿纵向坡度较大的方向发展, 而到了第 7 次, 横向堆积坡度(11.8%)大于纵向堆积坡度(11.4%)(图 5), 泥石流开始由纵向发展转向横向发展, 此时, 泥石流扇状地的发展进入第二阶段。

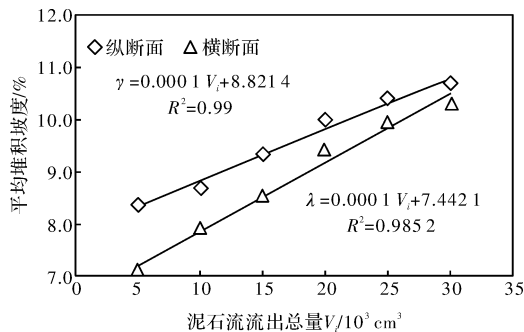


图 8 第一阶段横断面与纵断面平均堆积坡度对比图

2.2 第二阶段扇状地发展过程特征

第二阶段(第 7 次~第 10 次)中, 泥石流所形成的扇状地的长度已经不再增加, 泥石流开始向横断面方向发展。在此过程中, 泥石流出水槽口以后, 沿纵断面方向(Y 轴)流动不久后即开始向横断面方向(X 轴)分流增加扇状地的宽度。当宽度增加到一定程度后, 两侧的泥石流沿着之前所形成的扇状地的两侧边缘流动(见图 4 中第 10 次照片)。此后的泥石流出水槽口后, 首先向纵断面方向流动一定距离后便开始向两侧分流, 当宽度增加了一定程度后, 泥石流继续沿着之前所形成扇状地的边缘向前移动。

将第二阶段扇状地的最大堆积长度(L_e)、最大堆积宽度(B_{max})和堆积面积(S)与泥石流冲出总量的关系点绘如图 9 所示。

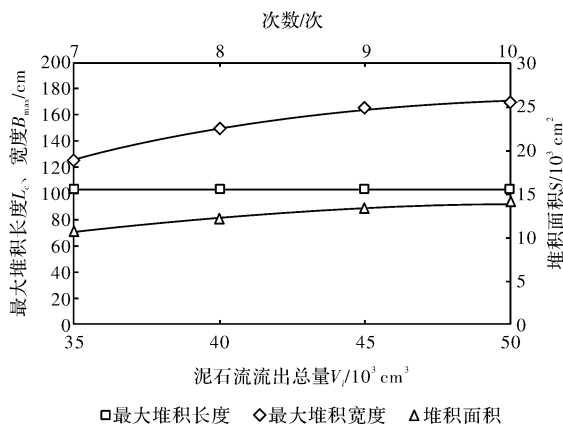


图 9 第二阶段最大堆积长度 L_e 、最大堆积宽度 B_{max} 、堆积面积 S 与泥石流流出总量 V_i 关系图

将图 9 中 B_{max} 、 S 与 V_i 的关系进行拟合, 拟合结果如下:

$$B_{max} = 13.198 \ln(V_i) + 153.14, R^2 = 0.9137;$$

$$S = 1897.5 \ln(V_i) + 12073, R^2 = 0.9986.$$

(2)

由结果可知, 泥石流扇状地发展过程的第二阶段中, 扇状地的最大堆积长度不再发生变化, 扇状地的主要发展方向是在横向上, 此阶段扇状地的堆积宽度和面积都随流出总量的增加而呈对数增加。此阶段最大堆积宽度的发展速度约为 11.0 cm/次, 堆积面积的发展速度为约 1003 cm²/次。与第一阶段相比, 扇状地堆积宽度和面积的发展速度要明显小于第一阶段。

以第二阶段 4 次实验形成的泥石流扇状地在横断面上和纵断面上的平均堆积坡度点绘如图 10 所示。从图中可以看出, 在扇状地发展的第二阶段, 泥石流扇状地在纵、横断面上的平均堆积坡度都随冲出总量的增加而呈线性增加。其中, 在扇状地的纵向上, 泥石流出山口后, 通过在堆积扇上段堆积调节其在纵向的堆积坡度, 当纵向堆积坡度(12.9%)调节到大于横向堆积坡度(12.7%)时(图 5), 泥石流扇状地进入发展过程的第三阶段。

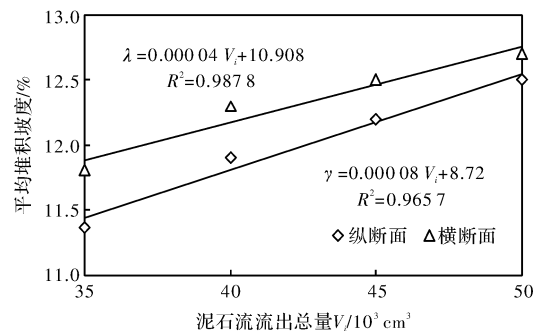


图 10 第二阶段横断面与纵断面平均堆积坡度对比图

2.3 第三阶段扇状地发展过程特征

第三阶段(第 11 次~第 15 次)中, 从第 11 次开始, 泥石流流出水槽出口以后, 仍然是在纵断面方向流动不久后便开始分流向横断面方向发展, 泥石流扇状地的堆积宽度仍然在不断的增加(最大堆积宽度的发展速度为 2.95 cm/次), 但是增加的速度要明显小于第二阶段。在宽度增加到一定程度后, 泥石流仍然沿着之前所形成的扇状地的两侧边缘流动, 但是到达扇状地中轴线后便不沿着其边缘流动, 而是沿着中轴线方向开始向纵向发展。第 14 次当宽度发展一定后, 仍然是沿着之前所形成的扇状地的两侧边缘流动, 在到达扇状地纵断面中轴线后与另一侧的泥石流汇合。第 15 次,

泥石流流出水槽口后, 沿着纵断面和横断面方向同时发展, 将第一阶段形成的扇状地前端完全覆盖后, 继续向下游发展(见图 4 中第 15 次照片)。

将第三阶段扇状地的最大堆积长度(L_c)、最大堆积宽度(B_{\max})和堆积面积(S)与泥石流流出总量的关系点绘如图 11 所示。

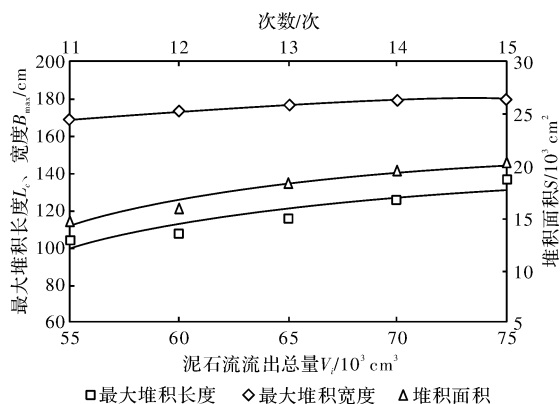


图 11 第三阶段最大堆积长度 L_c 、最大堆积宽度 B_{\max} 、堆积面积 S 与泥石流流出总量 V_i 关系图

将图 11 中 L_c 、 B_{\max} 、 S 与 V_i 的关系进行拟合, 拟合结果如下:

$$L_c = 20.675 \ln(V_i) + 105.57, R^2 = 0.9937;$$

$$B_{\max} = 5.9231 \ln(V_i) + 172.82, R^2 = 0.9589;$$

$$S = 3214.1 \ln(V_i) + 15993, R^2 = 0.9196.$$

(3)

从上述结果可知, 第三阶段泥石流扇状地的发展又重新回到纵向上, 其最大堆积长度、最大堆积宽度和堆积面积都随泥石流流出总量的增加而呈对数增加, 但堆积宽度的发展速度非常缓慢。第三阶段虽然与第一阶段的发展方向同是在纵向上发展, 其不同之处在于第三阶段的长度发展是由于泥石流流出沟口后向两侧分流, 沿第一阶段堆积边缘流动来发展其堆积长度。

以第三阶段 5 次实验形成的泥石流扇状地在横断面上和纵断面上的平均堆积坡度点绘如图 12 所示。从图 12 中可以看出, 在扇状地发展的第三阶段, 泥石流扇状地在纵、横断面上的平均堆积坡度都随冲出总量的增加而呈线性增加。扇状地在纵向的平均堆积坡度大于横向, 其中第 12~14 次, 纵横向的平均堆积坡度相差不多 (0.15% ~ 0.4%), 泥石流冲出沟口后在沿纵向不断向下游推进, 同时仍然还要向两侧分流, 到第 15 次时, 当纵、横向的堆积坡度之差调节到一定程度时 (0.6%), 扇状地的发展转向以纵向发展为主。

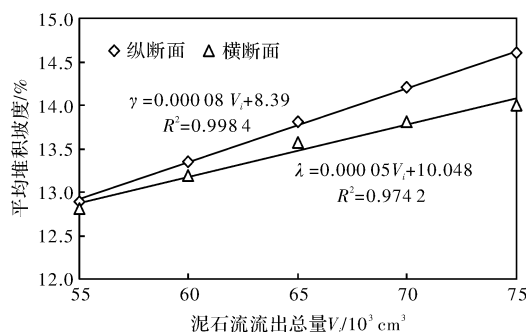


图 12 第三阶段横断面与纵断面平均堆积坡度对比图

3 结论

本文通过室内实验, 定量地探讨了粘性泥石流扇状地发展过程的阶段性及其特征; 依据泥石流扇状地在横向、纵向上的平均堆积坡度, 将粘性泥石流扇状地的发展过程分为三个阶段。第一阶段为扇状地快速发展阶段, 此阶段扇状地在堆积长、宽、厚和面积上都快速发展, 此阶段扇状地在纵、横向通过堆积来调节其坡度, 当横向的堆积坡度调节到大于纵向的堆积坡度, 泥石流扇状地的发展进入第二阶段; 第二阶段以扇状地横向发展为主, 此阶段, 扇状地沿纵向不再发展, 而主要以横向发展为主, 此阶段扇状地的平均堆积坡度横向大于纵向, 当平均堆积坡度调节到纵向大于横向时, 扇状地的发展进入第三阶段; 第三阶段以扇状地纵向发展为主, 此阶段扇状地在横向上发展速度缓慢, 扇状地的主要发展方向以纵向为主。第三阶段完成后, 泥石流的发展过程又重复这三个阶段的发展过程, 如此循环往复。

参考文献:

- [1] 康志成, 李焯芬, 罗锦添, 等. 中国泥石流研究[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [2] 费祥俊, 舒安平. 泥石流运动机制与灾害防治[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [3] 谢映霞. 防灾减灾规划与灾后重建规划的反思——由舟曲泥石流灾害想到的[J]. 灾害学, 2010, 25(S0): 16-19.
- [4] 余斌, 马煜, 吴雨夫. 汶川地震后四川省绵竹市清平乡文家沟泥石流灾害调查研究[J]. 人民长江, 2011, 42(15): 32-35.
- [5] 唐川, 周钜乾. 泥石流堆积扇危险度分区评价的数值模拟研究[J]. 灾害学, 1994, 9(4): 7-13.
- [6] 唐川, 刘洪江, 朱静. 泥石流扇形地危险性评价研究[J]. 干旱区地理, 1997, 20(3): 22-29.

- [7] 奥田节夫, 侯秀英. 泥石流的综合观测[J]. 水土保持科技情报, 1983 (1): 8-14.
- [8] 唐川. 泥石流扇形地研究[J]. 云南地质, 1990, 9(3): 239-246.
- [9] 田连权, 吴积善, 康志成, 等. 泥石流侵蚀搬运与堆积[M]. 成都: 成都地图出版社, 1993: 96-118.
- [10] Takahashi T. Study on the deposition of debris flow (2): process of formation of debris flow [J]. Annuals of Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 1980, 23 (B-2): 443-456.
- [11] 谢正伦, 蔡元芳. 突扩断面土石流淤积形态几何相似性特性之研究[J]. “中华民国力学学会”期刊, 1997, 13(1): 11-20.
- [12] 蔡元芳, 谢正伦. 土石流扇状地几何相似特性之实验与数值研究[J]. 中国工程学报, 1997, 20(6): 629-642.
- [13] 柳金峰, 欧国强, 游勇, 等. 不同出口山脚约束的泥石流淤埋实验研究[J]. 灾害学, 2009, 24(3): 7-10.
- [14] Mizuyama T, Yazawa A. Computer simulation of debris flow depositional processes [C]//International Symposium on Erosion and Sedimentation in the Pacific Rim. Vancouver: IAHS Publ, 1987, 165: 179-190.
- [15] 王光谦, 邵颂东, 费祥俊. 泥石流模拟: I-模型[J]. 泥沙研究, 1998 (9): 7-13.
- [16] 崔之久. 泥石流沉积与环境[J]. 北京: 海洋出版社, 1996: 138-144.

Experimental Study of Fan Development Process of Viscous Debris Flow

Liu Jinfeng^{1,2}, Ou Guoqiang^{1,2} and You Yong^{1,2}

(1. Key Laboratory of Mountain Surface Process and Hazards, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China)

Abstract: This study quantificationally discussed the phased characteristics of fan development process of viscous debris flow based on 3 groups, 106 indoor experiments under the condition of different debris flow densities, different slopes in the accumulation area and different channel slopes. Based on the average deposition slope of debris fan's cross-section and vertical-section, the development process of viscous debris fan can be divided into three stages. The first stage is characterized by rapid development in the longitudinal and transverse of debris fan. In the second stage, the longitudinal of debris fan will not develop and the debris flow will mainly develop in the transverse. The third stage is a longitudinal development stage. And the width of debris fan develops slowly in this stage.

Key words: Viscous debris flow; debris fan; development process; experimental study

(上接第6页)

A Preliminary Study on the Spatial and Temporal Scales of Natural Disaster Risk Analysis

Zhao Sijian^{1,2}

(1. Agricultural Information Institute of Chinese Academy of Agricultural Sciences; Key Laboratory of Digital Agricultural Early-warning Technology, MOA, Beijing 100081, China; 2. Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Ministry of Civil Affairs & Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Natural disaster risk varies in spatial and temporal dimensions. The study on spatial and temporal variance of natural disaster risk is a new challenge, in which the foremost subject is to explore its inherent spatial and temporal scales. As a twin index, the extent and grain play an important role in the scale study. In detail, the spatial and temporal extent could constrain the effective ranges of risk in spatial and temporal dimensions; while the spatial and temporal grain would be as smallest unit to present the variances of risk in spatial and temporal dimensions. In this paper, the expression about the spatial and temporal variance of natural disaster risk is given, and then the scale theory of natural disaster risk is discussed deeply. Finally the choosing of spatial and temporal scales for three kinds of natural disaster risks (earthquake, typhoon and flood) that occur frequently in China is discussed. This study laid a basis for further analysis of the spatial and temporal variance of natural disaster risk.

Key words: natural disaster; risk analysis; spatial and temporal variance; spatial and temporal scale; extent; grain