

# 泥石流堆积运动特征分析

罗元华

(国务院三峡建委办公室规划司, 北京 100038)

**摘要:** 以云南省东川市深沟泥石流堆积区为研究对象, 根据深沟可能爆发泥石流灾害的区域范围、规模、性质和介质特征, 按爆发 20 年一遇(频率 5%)和 100 年一遇(频率 1%)的泥石流灾害预测规模, 运用数值模拟方法模拟了泥石流爆发历时过程的堆积运动特征及空间分布形态; 分析了不同规模泥石流堆积运动过程中, 泥石流堆积厚度及堆积运动速度在空间上和时间上的变化发展趋势。

**关键词:** 泥石流; 堆积; 数值模拟; 特征。

中图分类号: P642.23 文献标识码: A

文章编号: 1000-2383(2003)05-0533-04

**作者简介:** 罗元华(1962—), 男, 博士, 研究员, 主要从事资源经济规划与管理、山地灾害管理与研究、移民政策研究与规划等方面的研究。E-mail: Luoyh@public3.bta.net.cn

泥石流是山区常见的一种自然现象, 在其活动区内给人类社会造成危害时, 就构成了泥石流灾害。研究可能爆发泥石流灾害的区域范围、规模、性质和介质特征, 分析其堆积规律, 对于人们认识泥石流, 预测其发生、发展趋势, 有效防治泥石流灾害具有重要意义。

## 1 泥石流堆积数学模型

泥石流是一种产生于沟谷和坡地的包含泥沙、岩石块体或巨砾和水的固液两相重力流体, 其发生需要具备 3 个基本条件, 即丰富的松散固体物质、数量足够的水体和促使这两者迅速起动、混合、运动和停积的地貌条件; 同时还要具备激发条件, 如雨水泥石流需要暴雨或大暴雨激发, 沟蚀泥石流要有足够大的暴雨径流才能起动<sup>[1]</sup>。泥石流运动具有突发性、局地性、短暂性和凶猛性等特点, 其历时过程短暂, 运动能量巨大, 因而具有极强的破坏力, 它不仅造成山区局地环境的破坏, 还直接威胁山区人民的生命财产安全, 造成人员伤亡和重大经济损失<sup>[2]</sup>。在泥石流堆积区, 其危害方式主要表现为淤埋、撞击、漫流改道和超高淤埋等<sup>[3]</sup>, 体现在泥石流的运动特征上, 可表征为泥石流最大流速和最大堆积厚度及其在堆

积区(成灾区)的分布规律。堆积厚度主要反映泥石流淤埋深度, 最大流速主要反映冲击力大小。

泥石流运动呈现出非牛顿流体特性, 根据粘性流体动力学原理<sup>[4]</sup>, 结合泥石流的流变特性, 可建立泥石流堆积数学模型<sup>[5]</sup>。其基本方程包括: 连续性方程、运动方程和能量方程。在泥石流堆积区, 泥石流运动可近似描述为二维扩散流。根据质量守恒定律, 即流体在流动过程中质量保持不变, 并假设泥石流流体与固体间无相对速度, 则控制体内质量的增加量应等于单位时间的流入量减去流出量。对考虑堆积(侵蚀)影响的泥石流二维模型, 有

$$\partial h / \partial t + \partial q_x / \partial x + \partial q_y / \partial y = i,$$

式中:  $q_x$  为  $x$  方向单位宽度流量,  $q_y$  为  $y$  方向单位宽度流量,  $h$  为泥石流堆积厚度,  $i$  表示泥石流的堆积和侵蚀影响, 是一个与固体颗粒的直径、流体的速度、流过的坡度等有关的函数, 可简化表达为:  $i = -\partial Z_b / \partial t$ ,  $Z_b$  为河床的标高, 在侵蚀或堆积作用下随时间变化, 侵蚀时  $i$  大于 0, 堆积时  $i$  小于 0。

设  $x$  和  $y$  方向的沟床坡角分别为  $\theta_x$  和  $\theta_y$ , 取  $x$  和  $y$  方向分别为  $\Delta x$ 、 $\Delta y$  的泥石流有限单元体进行分析,  $x$  和  $y$  方向的平均流速分别为  $u$ 、 $v$ 。根据动量守恒原理, 并考虑泥石流运动修正系数  $\beta$  的影响, 可推导出

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} + \beta \frac{\partial u q_x}{\partial y} + \beta \frac{\partial v q_x}{\partial y} = gh \sin \theta_x - gh \frac{\partial h}{\partial x} \cos \theta_x - \frac{\tau_{b,x}}{\rho_m},$$

$$\frac{\partial q_y}{\partial t} + \beta \frac{\partial u q_y}{\partial x} + \beta \frac{\partial v q_y}{\partial y} = gh \sin \theta_y - gh \frac{\partial h}{\partial y} \cos \theta_y - \frac{\tau_{b,y}}{\rho_m}$$

$\rho_m$  为泥石流混合体的平均容重,  $\rho_m = c(\rho_s - \rho_f) + \rho_f$ , 其中  $\rho_s$  为颗粒密度,  $\rho_f$  为流体容重,  $c$  为体积浓度;  $\tau_{b,x}$ 、 $\tau_{b,y}$  分别为泥石流  $x$  和  $y$  方向的底床剪切应力,  $g$  为重力加速度. 上述泥石流堆积控制方程是一组非线性双曲线方程组, 目前还没有确切的解析解, 采用有限差分法可求出数值解<sup>[6]</sup>. 根据数值模拟结果, 本文进一步分析泥石流的堆积规律.

## 2 泥石流堆积基本条件

为了定量评价不同灾害频率条件下泥石流成灾范围、强度和规模, 本文以云南昆明市东川区深沟为例进行研究. 深沟是一条老泥石流沟, 从堆积物剖面特征分析, 历史上是粘性泥石流和稀性泥石流交替活动的沟谷, 到了近代, 逐渐演变成稀性泥石流为主. 深沟泥石流的性质: 根据分析多发为稀性泥石流, 泥质含量较低, 其密度为  $1.5 \sim 1.6 \text{ g/cm}^3$ . 泥石流堆积物颗粒组成见表 1.

根据杜榕桓等<sup>[7]</sup>的计算结果, 深沟爆发泥石流在 20 年一遇频率(5%)下最大流量值为  $493.7 \text{ m}^3/\text{s}$ , 100 年一遇频率(1%)下为  $791.2 \text{ m}^3/\text{s}$ . 根据吴积善等<sup>[8]</sup>的研究, 一次泥石流爆发过程一般都较短暂, 呈 F 分布或卡方分布, 泥石流在成灾过程中, 流量

表 1 深沟泥石流堆积物颗粒组成

Table 1 Grain compositions of debris flow deposition in Dongchuan area, Kunming

粒径/mm	>100	100~40	40~10	10~2	2~0.5	0.5~0.1	0.1~<0.05
比例/%	1.65	15.93	35.75	15.12	4.52	10.98	4.61

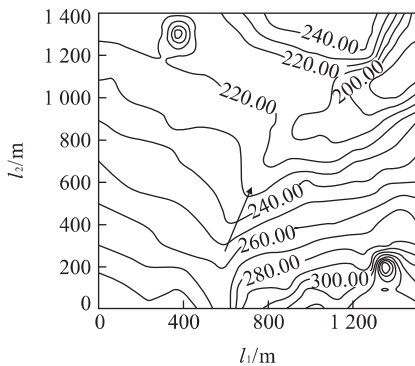


图 1 深沟泥石流堆积模拟区地形简图(等高线单位 m)  
Fig. 1 Topographic elevation contour in research area

快速增至峰值后即开始降低, 降速初期较快而后逐步减慢, 一般整个过程为 30 min 左右. 为了便于模拟研究, 本文假定深沟泥石流灾害发生过程呈 F 分布, 取历时过程为 30 min. 深沟堆积区地形特征见图 1. 根据实际地形地貌条件, 高程 1 260 m 处的沟口为堆积区入口, 模拟区范围取: 长 1 500 m × 宽 1 000 m, 网格长度为 100 m × 75 m, 模拟区各节点的高程值为地形图标示的高程.

## 3 泥石流堆积运动一般特征

取深沟分别爆发 20 年一遇(5%频率)和 100 年一遇(1%频率)泥石流的堆积动态过程, 分析泥石流的堆积运动特征. 根据数值模拟结果, 在深沟发生 20 年一遇(5%频率)泥石流时, 其堆积厚度平面变化趋势见图 2. 在深沟发生 100 年一遇(1%频率)泥石流时, 其堆积厚度平面变化趋势见图 3. 由图 2, 3 可见, 不同规模泥石流堆积运动呈现以下共同特征: (1) 泥石流首先在出山口处迅速堆积, 堆积厚度增加很快, 迅速淤高, 在爆发的前 10 min 内即接近最大值, 之后, 逐步向下游推进, 呈现堆积缓坡, 在下游堆积区前沿, 厚度变化加快变薄, 呈现“舌”状特征. (2) 泥石流堆积运动速度刚开始爆发时在出山口处最大, 之后, 变化不大而向下游推进, 在泥石流爆发 10 min 后, 堆积运动速度往下游堆积区加快, 说明深沟在堆积区由于有一定的下降坡度, 在泥石流堆积中后期, 主要是向下游推进, 扩大堆积面积. (3) 从泥

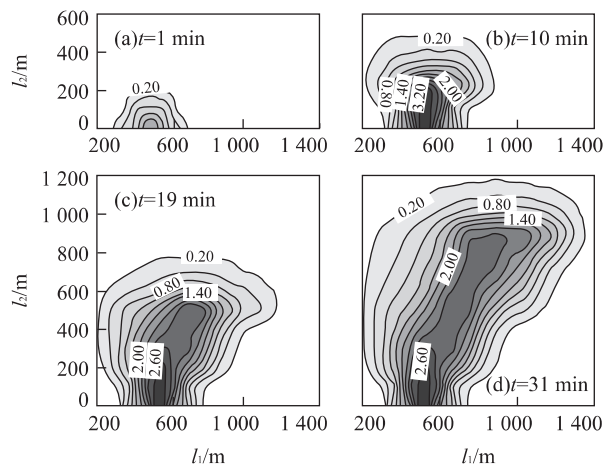


图 2 深沟爆发 5% 频率泥石流堆积厚度变化(厚度单位 m)  
Fig. 2 Plan-map of debris flow eruption and deposit process with 5% frequency in Shengou flume

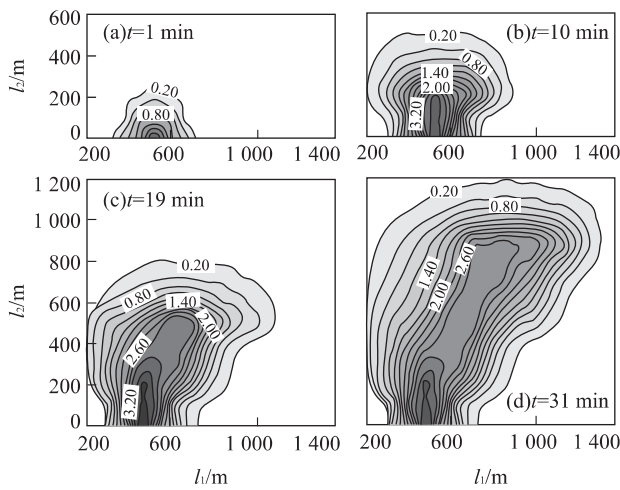


图 3 深沟爆发 1% 频率泥石流堆积厚度变化(厚度单位 m)  
Fig. 3 Plan-map of debris flow eruption and deposit process with 1% frequency in Shengou flume

石流堆积的平面形态看,在泥石流爆发初期,首先在出山口附近堆积,沿主坡角方向发展最快,同时向两边侧向堆积,在泥石流爆发后的 7 min 左右,近山口

的堆积区(扇)顶部厚度和宽度基本达到最大值,之后主要沿主坡角方向延伸堆积,向下游堆积区发展,逐渐减缓到最终停止;最大堆积运动速度在 7 min 左右开始离开出山口,沿主坡角方向向下游推进,最终停于堆积区的中部地带。

#### 4 不同规模泥石流堆积运动差异分析

深沟泥石流规模不同,其堆积运动的特点就不同:(1)从堆积厚度特征看,在泥石流爆发初期,较小规模(5%频率)的泥石流在出山口的堆积厚度明显小于较大规模(1%频率)泥石流的堆积厚度,而堆积延伸长度差别不大;随着时间的延续,泥石流堆积区两者几乎同步不断往前延伸,在平面上展布的形态近于一致,主要表现为堆积厚度的明显差别(图 4)。

(2)从堆积速度分布看,在泥石流爆发初期,不同规模泥石流的堆积运动速度在空间上的展布基本一致,差别很小;随着时间的延续,较小规模(5%频率)

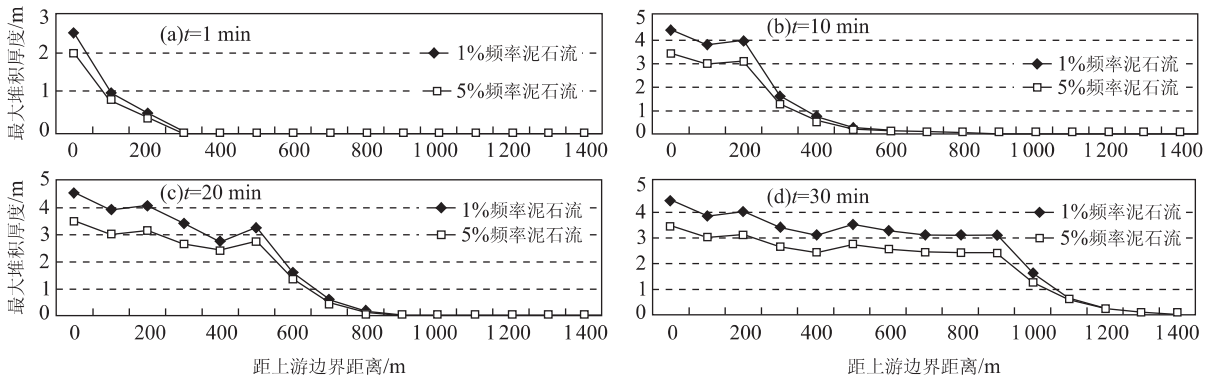


图 4 不同规模泥石流堆积沿主流线厚度变化趋势

Fig. 4 Debris flow accumulated thickness in syncline with different scales

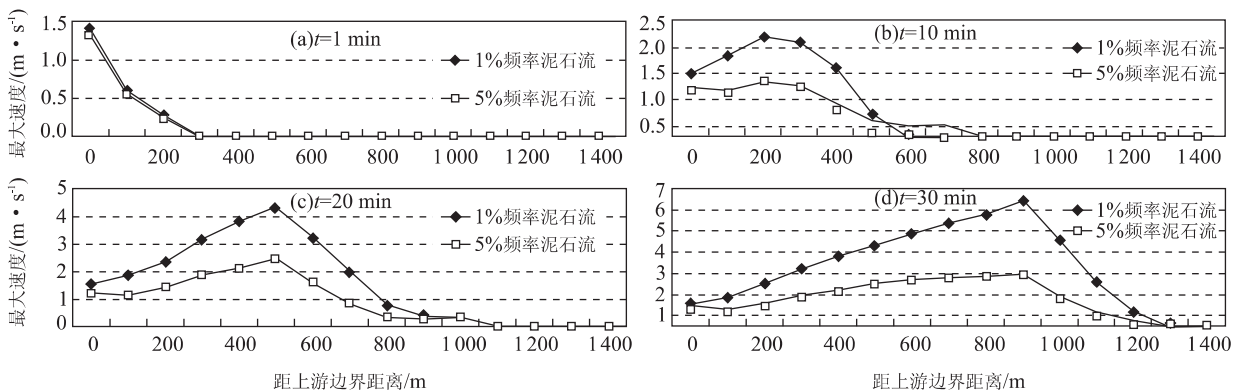


图 5 不同规模泥石流堆积沿主流线运动速度变化趋势

Fig. 5 Debris flow deposit speed in syncline with different scales

的泥石流堆积运动速度逐步明显小于较大规模(1%频率)泥石流的堆积运动速度;在泥石流堆积中后期,较大规模泥石流的堆积速度与较小规模泥石流相比,其在堆积区中部逐步加大的趋势更为明显,反映泥石流规模越大,泥石流的动能越大,往前推进的惯性越大。从成灾角度看,其破坏能力越强(图 5)。

## 5 结语

泥石流堆积的数值模拟是泥石流研究的前沿领域,本文在以往工作成果基础上,以云南省东川市深沟为实例,根据模拟区的实际地形条件,以各节点的实际地形高程值作为数值模拟的底边界初值,按爆发 20 年一遇(5%频率)和 100 年一遇(1%频率)的泥石流灾害预测规模,运用数值模拟方法模拟了泥石流爆发历时过程的堆积运动特征及空间分布形态,分析了不同规模泥石流堆积运动过程中,泥石流堆积厚度及堆积运动速度在空间上和时间上的变化发展趋势。根据本研究成果,可进一步评价不同规模泥石流灾害可能造成的经济损失与社会危害,从而提高对泥石流灾害的防灾减灾能力。

### 参考文献:

- [1] 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.  
TIAN L Q, WU J S, KANG Z C, et al. Erosion transportation and deposition of debris flow [M]. Chengdu: Chengdu Map Press, 1993.
- [2] 刘希林, 唐川. 泥石流危险性评价[M]. 北京: 科学出版社, 1995.
- [3] 吴积善, 田连权, 康志成, 等. 泥石流及其综合防治[M]. 北京: 科学出版社, 1993.  
WU J S, TIAN L Q, KANG Z C, et al. Debris flow and its comprehensive prevention and cure [M]. Beijing: Science Press, 1993.
- [4] 钱宁, 万兆惠. 泥沙运动力学[M]. 北京: 科学出版社, 1983.  
QIAN N, WAN Z H. Sand-kinetics [M]. Beijing: Science Press, 1983.
- [5] Tamotsu T. Debris flow [M]. Rotterdam: Balkema A A, 1991.
- [6] 罗元华, 陈崇希. 泥石流堆积数值模拟及泥石流灾害风险评估方法[M]. 北京: 地质出版社, 2000.  
LUO Y H, CHEN C X. Methodological research on numerical simulation and disaster risk assessment of debris flow deposition fan [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2000.
- [7] 杜榕桓, 康志成, 陈循谦, 等. 云南小江泥石流综合考察与防治规划研究[M]. 重庆: 科学技术文献出版社重庆分社, 1987.  
DU R H, KANG Z C, CHEN X Q, et al. Comprehensive investigation and research of the prevention and cure program of Xiaojiang debris flow in Yunnan Province [M]. Chongqing: Scientific and Technical Publishing House (Chongqing Division), 1987.
- [8] 吴积善, 康志成, 田连权, 等. 云南蒋家沟泥石流观测研究[M]. 北京: 科学出版社, 1990.  
WU J S, KANG Z C, TIAN L Q, et al. Debris flow observation and research in Jiangjiagou, Yunnan, China [M]. Beijing: Science Press, 1990.

## Analysis for Process of Debris Flow Deposition

LUO Yuan-hua

(Department of Planning Executive Office of State Council Three Gorges Project Construction Committee, Beijing 100038, China)

**Abstract:** With the example of Shengou flume in Dongchuan of Yunnan Province, the dynamic process and space appearance of debris flow deposit were studied in the case of the debris flow disasters every 20 years (5% frequency) and every 100 years (1% frequency), using numerical simulation method. The debris flow deposit thickness and speed characteristics on the space are analyzed in different times.

**Key words:** debris flow; deposition; numerical simulation; characteristics.