

# 从蒋家沟泥石流阵流看泥石流堆积

李泳, 姚寿福, 胡凯衡, 陈晓清, 崔鹏

(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:** 野外观测和实验证明, 泥石流的堆积是经过无数随机的“元堆积”叠加形成的。“元堆积”保留了泥石流的活动特征。根据云南东川蒋家沟泥石流阵流资料和阵流的数值模拟, 发现堆积厚度与阵流的深度和速度, 在统计上是一致的, 说明了堆积与运动之间的系统性联系。这种联系为泥石流活动的系统性和泥石流灾害的评估提供了新的线索。

**关键词:** 泥石流; 阵流; 堆积; 统计

中图分类号: P642.23

文献标识码: A

泥石流的堆积历来有过大量的研究, 不论实验的还是理论的研究, 几乎都把堆积作为确定流体的确定过程, 而没有特别考虑随机作用的影响。实际上, 即使在同一条沟, 不同场次的泥石流和同一场泥石流的不同阵次, 都有着不同的流体本性和活动特征, 因而表现出不同的堆积过程。这些表现都是随机的。另一方面, 泥石流堆积一般是泥石流在野外留下的唯一活动证据, 从某种意义上讲, 它们是“凝固”的泥石流。我们可以通过它们来认识泥石流的性质和特征。本文以云南东川蒋家沟泥石流的堆积和阵流观测来具体说明堆积与阵流的关系, 在实践上, 它可能为泥石流的灾情评估提供新的材料和思路; 而更重要的是, 它联系着泥石流的许多系统动力学特征。

## 1 泥石流的“元堆积”

如果把泥石流作为具有一定屈服应力的 Bingham 体, 那么, 泥石流是堆积还是启动, 决定于剪切力(流体重力在流向的分量)是小于还是大于屈服应力。就是说, 泥石流的堆积与启动, 有着相同形式的临界关系<sup>[1]</sup>

$$\tau = D \rho g j \quad (1)$$

式中  $D$  为流体发生堆积(或启动)的临界厚度;  $\rho$  为流体密度;  $g$  为重力加速度;  $j$  为运动的坡降(如沟床比降或堆积坡面的坡度)。当然, 在具体情形, 公式中的各个变量可以有复杂的表达形式, 但在本质上都是这样一个关系。

泥石流流体是非均匀的, 不可能有均匀的堆积行为, 即几乎不会发生整体堆积(像一列火车那样停下来)。根据我们的实验和野外观测, 堆积总是从流体前缘(如“龙头”)开始的, 后续流体源源不断叠加上来, 有时超越前面的堆积, 或者推动它向前蠕动。堆积的平面形态显然主要受边界条件(如地形)的影响, 与流体特征没有严格的依存关系。根据这些现象, 我们肯定泥石流堆积是叠加形成的, 而叠加的痕迹反映了不同性质的泥石流流动力学特征。

泥石流堆积在运动方向的纵剖曲线, 在前缘附近总是表现出抛物线的形态<sup>[1~3]</sup>, Coussot(1996)<sup>[4]</sup>在一般的简化模型下求得一个统一的堆积表面在各方向的纵剖面形态曲线, 结果也说明了堆积形态在原则上是“各向同性”的。这些简单条件下的模拟的成功, 也说明了堆积主要是流体本性决定的(公式里的应力  $\tau_c$ ), 边界条件的影响是次要的。另一方面,

收稿日期(Received date): 2002-12-26 改回日期(Accepted): 2003-07-09.

基金项目(Foundation item): 国家杰出青年科学基金项目(No. 40025103); 国家自然科学基金项目(No. 40101001)[The National Foundation Project for Outstanding Youth, No. 40025103; The National Science Foundation Project, No. 40101001].

作者简介(Biography): 李泳(1967-), 男, 重庆永川人, 副研, 主要研究方向为泥石流的系统动力学。[Li Yong (1967-), born in Chongqing, male, associate professor, majoring on the system dynamics of debris flow.]

成功仅限于堆积的前缘,又说明只有前缘的堆积保留了流体本性的痕迹。在很大程度上,这跟水滴形成的道理是一样的,只不过水滴的力是表面张力,而泥石流堆积的力是屈服应力。

同时,边缘曲线也部分揭示了堆积的形成方式:如果以前缘为坐标原点, $y$ 为堆积厚度,写成微分形式即 $y' \sim 1/y$ ,堆积在抛物线的控制下进行,后来的流体在停积时,也可能遵照这个模式,即堆积厚度与所在点的堆积坡度成反比,越陡的地方,堆积越薄;越缓的地方,堆积越厚<sup>[9]</sup>。直观上看这也是很自然的。不过,这只是堆积的“元过程”,一个泥石流堆积是无数这样的“元过程”叠加的结果,因此最后的堆积体呈现着复杂得多得剖面形态。这样的叠加过程

值得进一步的考察,因为简单模式的迭代过程可能揭示泥石流堆积的混沌行为。

我们还可以从另一个角度来理解“元过程”:把堆积看作启动的“逆过程”。一般都认为,泥石流流体必须超过一定临界厚度才可能启动,<sup>[5, 6]</sup>有些模型不过更多考虑了流深(水深和泥深)和容重(物质组成)的细节<sup>[7]</sup>,或者更具体地考虑泥石流流体中水与固体颗粒的不同作用<sup>[8]</sup>。所以,关系(1)也可以看作泥石流的启动条件。根据野外观测,真实的启动几乎就是一个小堆积的复活,堆积前缘就是运动的龙头。在蒋家沟许多小分枝沟谷,我们常常能看到刚启动就停下了的“元泥石流”。对于一般的阵流,如果只看照片,我们也分不清它在流动还是堆积(如图1)。

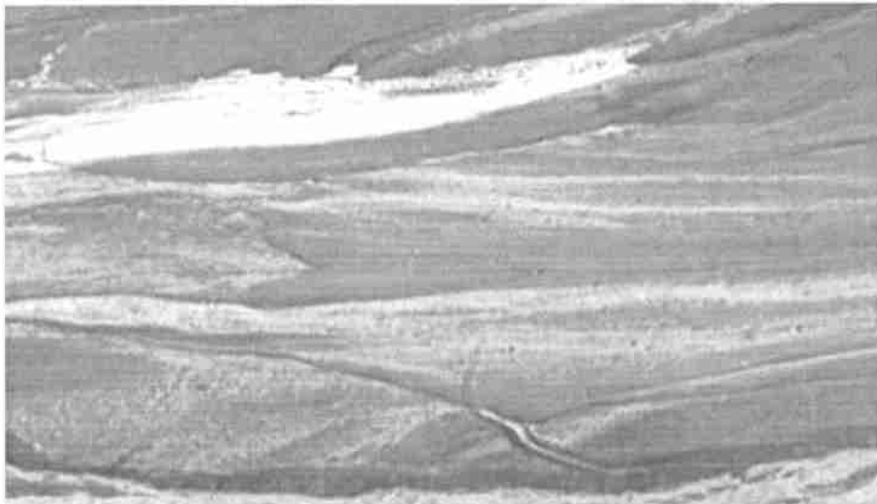


图1 多次泥石流堆积形态

Fig. 1 Deposition relics left by various debris flows

实际的剖面形态是叠加的结果,特别是不同场次的泥石流叠加的结果。叠加的结果往往掩盖了原始的动力学“痕迹”,因此野外堆积很难直接反映泥石流的动力学特征,而以上分析的“元堆积”,则是直接与运动相关联的。于是,我们可以从阵流的统计来说明堆积的随机特征。

## 2 从阵流看堆积

元堆积的叠加重新调整了堆积厚度的分布,简单的坡度—厚度反比关系不再成立。堆积厚度在很大程度上反映了泥石流的危害方式和程度,在灾害评估方面具有重要意义。我们关心的则是它的理论意义,因为野外难得保留真实代表一个泥石流过程

的堆积,我们没有堆积厚度的可靠资料。在这一点,浊流沉积(turbidite deposits)提供了可以比较的例子。浊流也是一种具有屈服应力的流体的堆积,在机理上跟泥石流是相似的。实际上,即使水底的含沙重力流堆积,也服从类似的规律<sup>[9]</sup>。Rothman等(1994)发现<sup>[10]</sup>,堆积层的数量 $N$ 与厚度 $h$ 有如下关系

$$N (> h) \sim h^{-a} \quad (2)$$

对泥石流来说,堆积厚度不像浊流那么均匀,我们所谓的泥石流堆积厚度实际上是堆积剖面的渐近厚度(相当于前面几个理论剖面曲线在远离前缘的厚度),这个量是相对均匀的(如图1代表的就是正在停积和已经停积的泥石流阵流),而且明显表现出与流深的关系。直观地看,在照片上我们几乎分不清阵流的流动与停积,因而也就不能区分流深与堆积

厚度。这是就“平均效果”而言的,可以利用我们在蒋家沟的观测数据获得。结果表明,在双对数坐标系中,泥石流流深和泥深的累积曲线,在较大的厚度范围,是一条直线(图2),也就是满足关系(2)。曲线的弯曲,则表现了普遍存在的所谓“有限尺度效应”(我们统计的数据的尺度总是有限的)。

图2中有3条不同意义的曲线。“事件阵流”是一场真实泥石流(为了显示清楚,阵流数量扩大了30倍)，“观测阵流”的数据来自蒋家沟近年几十场泥石流的近6000个阵流。因为没有实际的堆积厚度的数据,我们数值模拟了泥石流阵流的堆积,计算

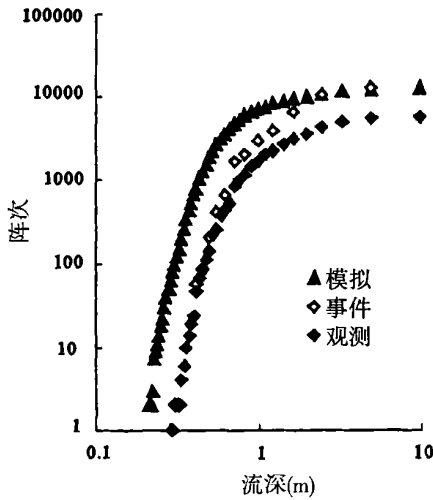


图2 泥石流阵流(泥)深分布

Fig 2 Distribution of depth of debris-flow surges

了的堆积区的厚度分布(14316个数据点),即图中的“模拟阵流”曲线。显然,分布曲线的相似证明了流深与堆积厚度在统计意义上的对应;模拟结果似乎还说明了,如果把阵流作为一个“单元”,那么它跟阵流中的一个点,有着相同的“效应”。这从另一个角度说明我们提出的“元堆积”,确实具有基本的意义。

同样,我们可以考虑流速与流深的关系。图3是一场泥石流的阵流的速度与流深的分布,图4是数值模拟的“一个阵流”的速度、流深和堆积厚度在空间分布情形。

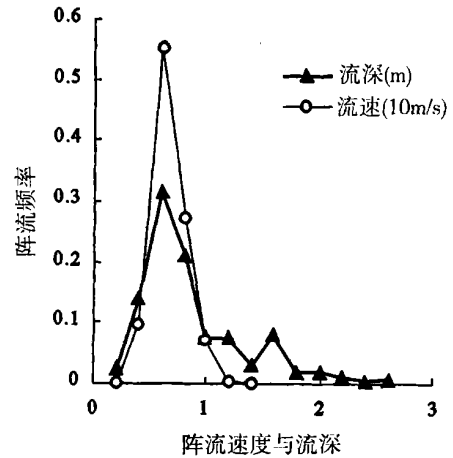


图3 真实阵流的速度与流深

Fig 3 Velocity and flow depth of real debris-flow surges

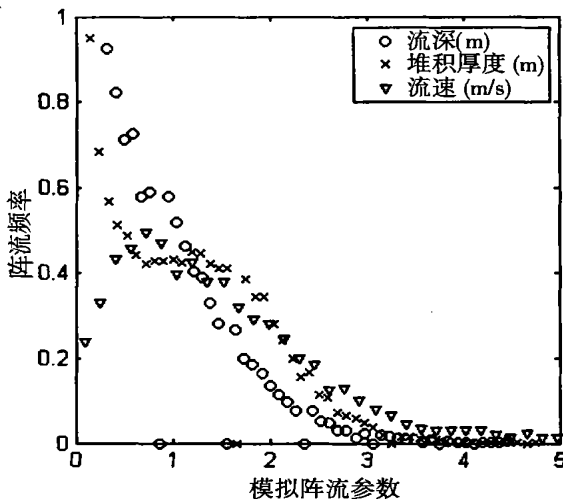


图4 模拟阵流的速度、流深、堆积厚度的分布

Fig 4 Distribution of velocity, flow depth and deposition thickness of simulated debris-flow surge

除去边缘效应,图3和图4的速度和流深分布是很相似的。因此,一场泥石流由若干阵流组成,与一个阵流由若干“点”组成,似乎只是系统在不同时空尺度的表现,而统计规律是一致的。从模拟的曲线我们还可以看到,堆积厚度与速度都有相对集中的趋势。换句话说,堆积的叠加是与阵流内的速度分布相关的,最可能出现的速度,对应着最可能的堆积行为。

模拟曲线也为我们评价泥石流的堆积提供了理论依据。例如,以堆积厚度作为一个危险度指标,可以自然将它划分为3级,对应于图中分布曲线的3个“台阶”,而且,3个级别的厚度具有不同的几率,对灾害评估来说,应该有不同的“权重”。

### 3 结论

根据野外观测和泥石流的堆积、启动条件,提出泥石流堆积是以“元堆积”方式叠加形成的,元堆积过程保留了泥石流的运动特征。在这个事实的基础上,我们可以根据阵流的观测来估计堆积的特征。结果发现:

1 泥石流的堆积厚度与流深和流速具有相似的统计分布,在一定尺度内满足负幂关系;这些分布可能改变我们在泥石流评估研究中的确定性观念;

2 阵流的数值模拟说明,泥石流的堆积是由速度决定的,最可能的堆积厚度对应着最可能的速度。这为划分堆积区提供了定量的依据;

3 构成一场泥石流的阵流,与构成一个阵流的“点”,可能只是一个系统在不同尺度下的表现,这意味着我们可以用统一的系统方法来研究。

#### 参考文献(References):

- [1] Johnson, A. M., *Physical Process in Geology*[M]. Freeman, Cooper & Company. 1970. 450~458.  
 [2] Takahashi, T., and Yoshida, H., 1979. Study on the deposition of de-

bris flows, part I: deposition due to abrupt change of bed slope[J]. *Annals, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University*, Japan. 22B-2.

- [3] Huhn, G., The interpretation of lava flow morphology. *Geophys. J. R. Astrphys. Soc.* 1974. 39, 361~383.  
 [4] Coussot, P., Proust, S., and Ancey, C.. Rheological interpretation of deposits of yield stress fluids. *J. non-Newtonian Fluid Mech.*, 1996. 66 (1): 55~70.  
 [5] Johnson, A. M., and Rodine, J. R.. Debris flow. In: Brunsden, D., and Prior, D. B., Eds. *Slope Instability*. John Wiley & Sons Ltd. 1984. 257~361.  
 [6] Ellen, S. D., Fleming, R. W., Mobilization of debris flows from soil slips, San Francisco Bay region, California. In: Costa, J. E., and Wieczorek, G. F. eds. *Debris Flows/Avalanches: Process, Recognition, and Mitigation*, 1987. 7. Boulker, Co; Geol. Soc. Am. *Eng. Geol.* 31~40.  
 [7] Chen, C. L.. Generalized viscoplastic modeling of debris flow. *Journal of the Hydraulic Division, ASCE*, 1988. 114(3), 237~258.  
 [8] Iverson, R. M.. The physics of debris flows. *Review of Geophysics*, 1997. 35 (3): 245~296.  
 [9] Marr, J. G., Haff, P. A., Shanmugan, G., et al.. Experiments on subaqueous sandy gravity flows: the role of clay and water content in flow dynamics and depositional structures[J]. *Geol. Soc. Am. Bull.* 2001. 113 (11): 1377~1386.  
 [10] Rothman, D. H., Grotzinger, J., and Flemings, P., 1994. Scaling in turbidite deposition. *Journal of Sedimentary Research* A64: 59~67.

## Surges and Deposits of Debris Flow in Jiangjia Gully

LI Yong, YAO Shou-fu, HU Kai-heng, CHEN Xiao-qing and CUI peng

(*Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Conservancy, Chengdu, 610041*)

**Abstract:** Debris flow has been observed to start its deposition at the front of the surge, with consequent piling up in ways of randomness. The original deposition suggests a relationship to the initiation of the surge; the stopped surge in the semblance of flowing allows one to take up flowing surges to explore the deposition. In this paper, observations of debris-flow surges in Jiangjia Gully are amassed to make clear the statistical properties. Deposition thickness assumes distribution similar to that of the flow depth, in form of power law, with effect of finite size. On the other hand, numerical simulation of surge provides a micro-picture of deposition, showing that there is a statistical commonality in velocity, flow depth, and deposition thickness, especially, the coincidence of the most probable depth with the most probable velocity. Furthermore, statistics of data from a single simulation surge is the same as the statistics on surges composing an event of debris flow. In other words, a surge in an occurrence plays the role of a point in a surge, suggesting that surge is the composition unit of debris flow. This maybe opens our eyes to the systematic behavior of debris flow.

**Key words:** debris flow; surge; deposition; statistics