22 卷 3 期 332～336 页
2004 年 5 月

山 地 学 报
JOURNAL OF MOUNTAIN SCIENCE

Vol. 22, No. 3 pp 332～336
May., 2004

文章编号: 1008－2786(2004)03－0332－05

泥石流堆积的分布

李 泳, 胡凯衡, 陈晓清
(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: 野外观测和实验模拟表明, 泥石流堆积是通过若干阵流在保持相对完整的形态下叠加形成的。本文利用蒋家沟阵流的观测数据, 根据阵流流深－流速关系和各自分布, 并结合浊流的堆积分布、数值模拟的流深、堆积分布, 提出泥石流堆积厚度的分布具有与流深相同的负幂分布形式, 并估计了分布指数的下限。结果表明, 泥石流堆积厚度的分布很不均匀, 分布的估计为堆积区的危险性的划分提供了新的定量依据。

关键词: 泥石流阵流; 堆积; 分布
中图分类号: P642.23 文献标识码: A

Mayor(1997)通过他们的大型泥石流堆积实验[1], 几乎否定了堆积形态与动力学性质的确定性联系, 就是说, 不可能通过堆积的几何来推测泥石流的动力学特征参数。因为泥石流堆积不是整体性的, 而是局部叠加的。这是问题的一个方面。另一方面, 我们在云南东川蒋家沟发现, 泥石流堆积是无数"元堆积"的结果[2, 3], 是通过局部的具有整体性的小单元叠加起来的。每个单元都是一个分离的小阵流, 也都像阵流那样运动和停积。在多个阵流的堆积过程中, 我们还发现, 后来的阵流几乎是以原来的堆积为基底, 继续它本来的运动状态, 而较少与已经堆积的物质发生相互作用(如撞击和混合)。于是我们在野外看到, 多个堆积阵流堆积的距离比单个阵流大得多。而更重要的是, 堆积的厚度几乎可以认为是原来阵流高度的随机叠加——这就引出泥石流堆积厚度的空间分布问题。多数情况下, 泥石流正是通过堆积制造灾害的; 堆积厚度是比堆积规模和堆积范围更具体的物理量。它能在堆积范围内划分出不同的危害区。

根据流域背景可以粗略估计堆积量的大小和范围[4－8], 但这些经验性的计算公式都没有考虑泥石流本身的物理量和过程, 只能做区域比较, 不能做事件评估。本文根据蒋家沟泥石流的阵流观测数据来估计堆积的分布, 并以数值模拟来检验。

1 堆积厚度分布

1.1 阵流流深的分布

蒋家沟阵流流深有着普遍的分布形式, 图 1 是在对数坐标系画的分布曲线, 可以表达为幂函数

$$F(>h)\sim h^{-a} \qquad (1)$$

大致以 1 m 为界, 两个尺度的指数显然不同。以抽样的1 000个阵流为例, $h<1.0$ m, $a=0.736\ 5$; $h>1.0$ m, $a=6.019\ 7$。就是说, 深度较大的阵流, 不论在一场泥石流中还是在我们看到的所有泥石流中, 都是很少的。这种"规模－频率关系"是自然界的普遍现象。特别是, Rothman 等(1994)在浊流沉积(turbidite deposits)中发现[9], 堆积层的数量 N 与厚度 h 有如下关系:

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

浊流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[10]。泥石流堆积虽然不像浊流那样层次分明, 只是因为叠加方式不同, 其厚度在空间的分布应该具有相似性。

收稿日期(Received date): 2004－01－08; 改回日期(Accepted): 2004－03－05。
基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金项目(No. 40101001), 国家杰出青年科学基金项目(No. 40025103)。[This research is supported by National Natural Science Foundation, Grant No. 40101001, and by the National Science Fund for Distinguished Young Scholars (No. 40025103).]
作者简介(Biography): 李泳(1967－), 男, 副研, 重庆人。主要从事泥石流的系统性研究。[Li Yong, the author, majors in researches on the systematic behaviors of debris flows. E－mail: ylie@imde.ac.cn.]

1.2 堆积厚度与泥深和流速的关系

通常不可能获得特定场次的泥石流的堆积厚度, 因为野外留下的堆积总是不同场次的泥石流产生的。既然堆积作用的根源在于流体的本性, 我们可以用具有屈服应力的流体来模拟泥石流体的运动和堆积。模拟的泥石流运动方程采用二维浅水波方程。方程中的摩阻坡降项包括屈服应力、粘性应力、分散应力和紊流应力。计算方法采用流团模型的算法, 初始和边界条件为给定堆积扇入口处的流量条件。模拟的流深与堆积厚度的分布也画在图 1 中(simulation 代表流体深度, deposition 代表堆积厚度)。显然, 二者表现出相似的分布。这意味着堆积厚度 d 与流体深度之间存在幂函数关系, 我们可以假定

$$d \sim h^k \tag{3}$$

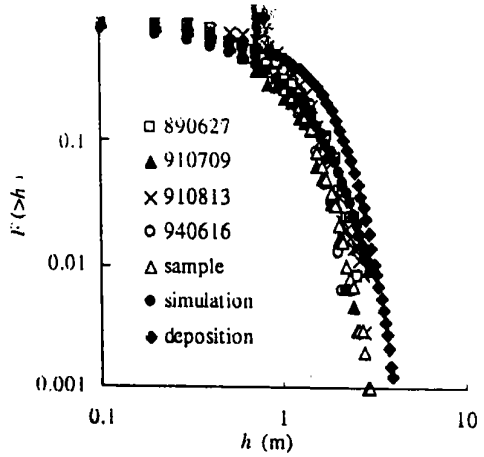

图 1　阵流流深分布(模拟阵流的流深和堆积厚度分布也画在其中)

Fig. 1　Exceedance probability of flow depth (with simulation of flow depth and deposition thickness included)

因为幂函数的意义在于指数, 我们没有把系数写出来, 也不必考虑它们。为了确定指数 k 的大小, 需要考虑它与速度分布的关系。

根据不同地区的泥石流观测的经验关系, 泥石流的速度与流深的关系可以表达为一般形式的 Manning 公式(吴积善等, 1990)

$$v \sim j^m h^n \tag{4}$$

我们有

$$d \sim j^{-mk} v^{k/n} \tag{5}$$

局部堆积厚度与坡度(比降 j)成反比, 即 $mk=1$, 因而可以忽略坡度的影响

$$d \sim v^{k/n} \tag{6}$$

在通常情形, 速度与流深的幂函数关系有着较大的波动, 但在统计意义上, $v \sim h^n$ 的幂指数却是相当稳定的。如表 1 的结果, n 的均值为0.397 1, 方差为 0.003 3。

1.3 阵流流速分布

根据我们对 5 000 多个阵流和不同场次的阵流的统计, 速度的概率分布曲线, 相对于正态分布来说是右偏的(即样本的偏度大于零; 图 2 是一场泥石流的阵流速度分布的例子), 可以用 Weibull 分布来表示, 其形式为

$$f(v) = \hat{a}\hat{a}v^{\hat{a}-1}\exp(-\hat{a}v^{\hat{a}}) \tag{7}$$

其中的指数函数可以认为是幂函数的一个衰减因子。当形态因子 $\hat{a}<1$ 时, 分布接近负幂函数曲线, 换句话说, 我们看到的负幂函数可以用 $\hat{a}<1$ 时 Weibull 分布来逼近, $\hat{a}$ 越小, 曲线越陡。这样我们可以通过它来估计泥深的分布指数。堆积厚度 d 作为速度 v 的函数, 应具有分布

$$f(d)=f(v(d))v'(d) \tag{8}$$

也就是

$$f(d) \sim d^{n\hat{a}/k-1}\exp(-\hat{a}\,d^{n\hat{a}/k}) \tag{9}$$

于是堆积厚度分布指数 $t \sim n\hat{a}/k$。为了使分布曲线具有负幂曲线的形态(特别是没有正态分布那样的峰), 必须有 $t<1$, 因此, $k>n\hat{a}$, 这就是我们确定的指数界限。

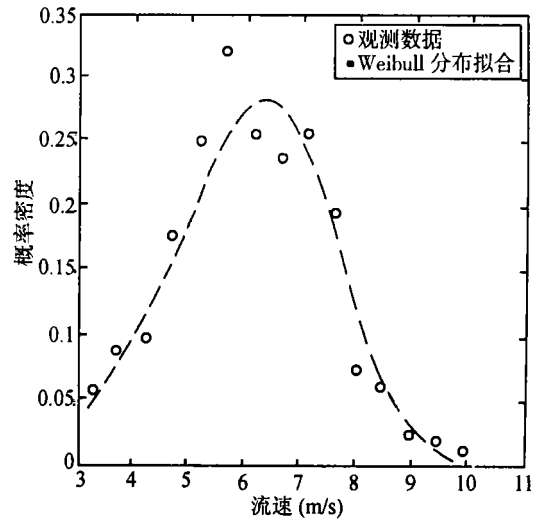

图 2　阵流速度分布

Fig. 2　Distribution of surge velocity

根据蒋家沟近 20 a 的阵流观测数据, 相关指数的统计结果如表 1。(表中样本列的数字代表泥石流发生时间; 样本"全部"包括我们观测的5 000余个

阵流数据。)

其中 n 为速度－流深指数，$\dot{a}$为 Weibull 分布指数。分布的尺度因子$\dot{a}$与我们的讨论无关，所以没有列出。表中列举了数据比较完整的泥石流事件，每个事件包含的阵流都在 100 以上。所有数据都说明 $k>1$。就是说，堆积厚度的分布曲线比流深分布曲线更加陡峻。直观地说，阵流越深(>1m)，堆积越厚；阵流越浅(<1m)，堆积越薄。这是速度－流深关系所决定的。由于 $n<1$，浅流的速度变化相对更大：例如当 $h=0.1$m 时，$\ddot{a}v/\ddot{a}h = nv/h \sim 3v$；而在 $h=1.0$m 时，$\ddot{a}v/\ddot{a}h < v$。因此，流深越厚，速度越容易发生改变，因而更容易堆积；反过来看，浅流更可能继续流动。这与屈服应力决定的堆积条件也是一致的。

表 1 速度分布参数

Table 1 Distributional parameters of surge velocity

样本	n	$\dot{a}$	$n\dot{a}$
870 627	0.373 8	3.713 3	1.388 0
870 823	0.168 4	6.348 5	1.069 0
890 627	0.372 0	3.713 3	1.381 3
890 802	0.457 1	4.206 5	1.922 8
890 803	0.538 4	4.407	2.372 7
910 813	0.342 6	4.978 6	1.705 6
910 709	0.368 7	4.152 5	1.531 0
910 715	0.412 4	3.849 2	1.587 4
910 717	0.345	3.410 9	1.176 8
940 616	0.376 9	3.793 1	1.429 6
940 702	0.410 7	3.759 5	1.544 0
全 部	0.370 4	3.603 5	1.344 7

1.4 堆积厚度分布

现在我们回到(3)和(1)，通过流深的分布来估计堆积厚度的分布。显然，堆积分布为

$$F(>d) \sim d^{-a/k} \qquad (10)$$

由于 $k>1$，说明堆积厚度的分布比流深的分布更“缓”，就是说，通过堆积叠加，原来的阵流厚度被重新调整了。

从表 1 还可以看到，尽管指数 n 与$\dot{a}$在多数情况下趋于一致，但也有差别较大的。例如事件 870823 和 890803 代表了两个很极端的例子。原因在于两个事件的过程差别很大，图 3 说明了几个不同事件的阵流流量序列在发生时间的分布情况。

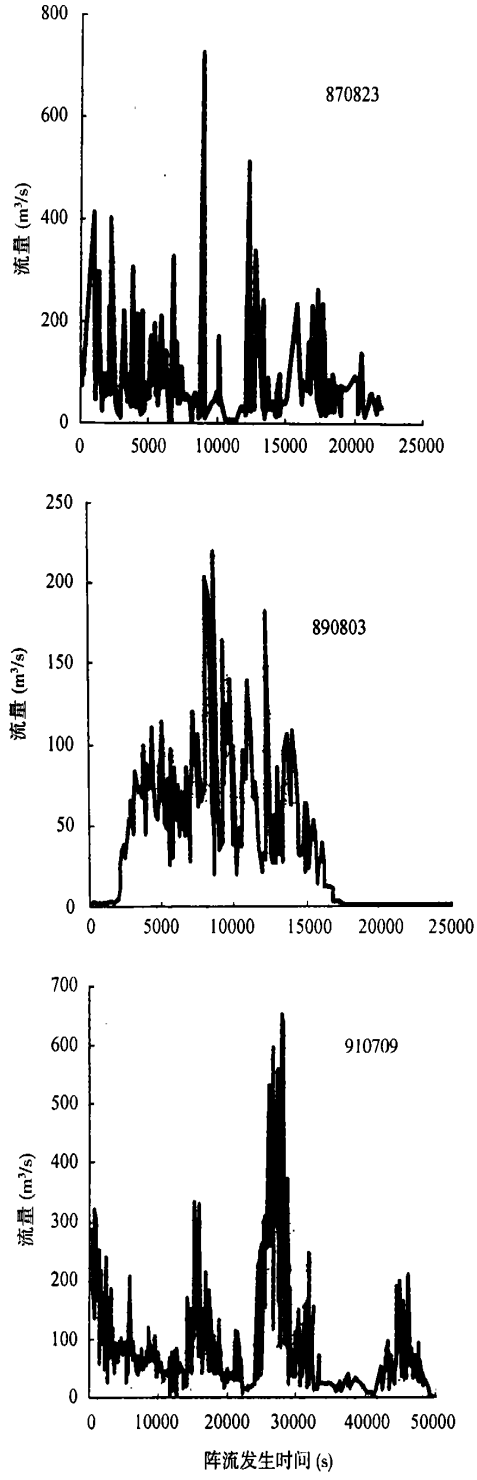

图 3 不同事件的阵流过程

Fig. 3 Graph for events of different surge series

对比几个事件，可以看到，910709 事件明显分为 4 个阵流群，890803 基本上是一个阵流群，而 870823 事件似乎由多个不明显的阵流群组成。实际上，蒋家沟多数泥石流事件都是由多个阵流群组

成的。单一阵流群的泥石流事件, 阵流相对集中在一个较短的时间间隔内, 因而其叠加堆积作用可以很充分, 而厚度的悬殊也就不可能太大, (否则堆积是不稳定的), 根据(10), 就意味着其分布指数应该较小, 也就是 k 较大, 而其 $k > n\alpha = 2.3727$ 正好说明了这一点。多个阵流群的事件, 先前的堆积实际上表现为不同事件的堆积, 分布的"平均"程度没有连续堆积那么好, 因而厚度的悬殊可能大一些, 因而分布指数较大(即 k 较小)。k 特别小的 870823 事件, 可能还与它那不分明的阵流群有关, 特别是中间出现的两个大流量阵流, 可能产生较大的堆积厚度。这只是定性的分析。阵流的流量分布显然也起着重要的作用。总的说来, 堆积平均了原来的阵流厚度的差别, 但具体的流量过程和速度分布也会带来影响, 不过这样的影响显然是第二位的。

2　结论

泥石流堆积是阵流叠加的结果, 堆积厚度保留了与阵流流深分布相同的幂函数形式, 不过指数较小, 即分布相对平缓。另外, 阵流的速度和流量对堆积分布的影响, 不如直观想象的那么大。就是说, 分布具有一定的内在特征。

堆积厚度大的最危险区域随指数陡降, 这个结论有助于对堆积区做进一步的灾害程度区分。一般说来, 最大堆积厚度的区域有可能根据堆积区的地形进行判断。

以上结论建立在蒋家沟大量观测数据的基础上, 但它涉及的动力学过程是粘性泥石流的普遍现象。例如, 我们分析的数据类型(不同的阵流序列)几乎代表了各种情形的泥石流活动, 都服从相同的规律。说明这些规律在其他流域也应该是成立的, 尽管没有这么多数据和这么显著的现象(没有进行系统观测)。

参考文献(Reference):

[1] Major J. J. Depositional processes in large-scale debris-flow experiments[J]. *The Journal of Geology*, 1997, Vol. 105: 345 ~ 366.

[2] Li Yong, Hu Kaiheng, He Yiping. Estimating depositional parameters in terms of debris-flow surges[J]. Journal of Natural Disasters. 2003, **12**(2): 71 ~ 77. [李泳, 胡凯衡, 何易平. 根据阵流估计泥石流堆积参数[J]. 自然灾害学报, 2003, **12**(2): 71 ~ 77.]

[3] Li Yong, Yao Fushou, Hu Kaiheng, *et al*. Deposition of debris-flow surges in JiangjiaGully[J]. Journal of Mountain Sciences, 2003, **21**(6): 712 ~ 715. [李泳, 姚福寿, 胡凯衡, 等. 从蒋家沟泥石流阵流看泥石流堆积[J]. 山地学报, 2003, **21**(6): 712 ~ 715.]

[4] Bathurst J. C., Burton A., Ward T. J. Debris flow run-out and landslide sediment delivery model test[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1997, 123, (5): 410 ~ 419.

[5] Harvey A. M. Debris flows and fluvial deposits in Spanish Quaternary Alluvial Fans: Implications for fan morphology[A]. In: Koster E. H., Steel R. J. Eds. Sedimentology of Gravels and Conglomerates[C]. Canadian Society of Petroleum Geologists. *Memoir* 10. 1984, 123 ~ 132.

[6] Mizuyama T., Uehara S. Experiment study of the depositional process of debris flows[J]. *Transaction, Japanese Geomorphological Union*, 1983, **4**(1): 49 ~ 64.

[7] Liu, X. L. Morphologic characteristics of debris flow fans in Xiaojiang valley of Southwestern China[J]. *Z. Geomorph. N. F., Suppl*. Bd. 1996, 106: 239 ~ 254.

[8] Schilling S. P., Iverson, R. M. Automated, reproducible delineation of zones at risk from inundation by large volcanic debris flows [A]. In C. C. Chen (Ed.). Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessmen, ASCE Publication[C], 1997. 176 ~ 186.

[9] Rothman D. H., Grotzinger J., Flemings, P. Scaling in turbidite deposition[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1994, A**64**: 59 ~ 67.

[10] Marr J. G., Harff P. A., Shanmugan, G., and Parker, 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.

Thickness Distribution of Debris-Flow Deposition

LI Yong, HU Kaiheng, CHEN Xiaoqing

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

Abstract: Assessment on debris flow involves parameters like discharge, velocity, extension, and sedimentary transportation, which are usually evaluated on basis on scars field and inferring from rainfall data, more empirically than quantitatively. In this paper, we'll do it through deposition of debris-flow surge observed in Jiangjia Gully (JJG), Yunnan, China. It is hard to see a real debris flow to form its deposition in field, and Major has, through their large-scaled experiments conducted in USGS, basically falsified the possibility of inferring dynamical properties from deposition features. Nevertheless, some properties in entirety do remain in surge motion as observed in JJG. In particular, deposition forms through accretion and superposition of surges and subsurges splitting from them. Such a depositional course allows a possible relationship between flow depth and deposited thickness.

Surges composing a debris flow have different depth, with exceedance probability roughly in power law $P(>h)\sim h^{-q}$. Similar distribution has been observed in deposition of turbidite. Actually, in common with turbidite flow, debris flow is also of gravity flow characterized by yield stress and therefore debris-flow surge must build its deposits in the same manner. The similarity between distribution of flow depth and depositing thickness thus suggests a relation linking these two variables, which might be in general supposed to take the form like $d\sim h_t$ with $t>1$. This also agrees with the observation that deposition is just like a contracted surge-when we ignore the extension over the slope. This suggestive relation is also associated with velocity (v) of the surge through the empirical relation $v\sim h^n$ as observed for debris flows in many areas. Thus, $d\sim v^{t/n}$. Then from distribution of velocity, being fitted by Weibull distribution, $f(v)\sim v^{\alpha-1}\exp(-av^{\alpha})$, results the distribution for depositional depth, $f(d)\sim d^{n\alpha/t-1}\exp(-ad^{n\alpha/t})$ with exponent $t>1$, as confirmed by observation data in JJG.

Different exponents seem to have reflected different hydrograph of debris-flow events, depending on the composition of surge group. Specifically, deposition resulted from an event of single-grouped surges has a bigger exponent than that from multi-grouped event. Event with surges in multi-group might have averaged the deposited thickness to some extent and therefore results in a relatively small exponent in exceedance probability. Although it is hard to see a living episode of deposition in the field, this sight might be as well useful for estimating the potentiality of the hazards. Especially, estimations are always required to be announced in advance.

Key words: debris flow; deposition; depositional thickness; probability distribution