

阵性泥石流泥位过程线的 Euler-Lagrange 分析

胡凯衡^{1,2}, 康志成^{1,2}, 李泳^{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:自然界中的泥石流往往表现为多阵次的间歇来流。云南蒋家沟实测的阵性流泥位过程线接近于幂函数,与通常认为的线性函数存在较大误差。本文基于阵性流泥位过程线在 Euler 坐标和 Lagrange 坐标下两种形状的转换关系,得到充分发展阵性流的泥位与历时、断面平均流速与泥位之间呈幂律关系,而且两者的幂律指数相关。从实测数据的拟合结果得到前者的幂律指数 n 约为 -0.6417 ,由此推出后者的指数接近于 2.56 。最后根据幂律流体的断面流速公式,讨论了泥石流流变指数与 n 的关系。这为泥石流的流速计算和流变性质等的研究提供了一种全新的方法。

关键词:泥石流;阵性流;流量过程线;流变指数

中图分类号:TV144

文献标识码:A

文章编号:0468-155X(2010)04-0006-05

1 引言

多阵次的间歇性来流是泥石流在山区沟道运动时的一种常见现象,也是泥石流与洪水、含沙水流的一个非常明显的区别。国内外有许多文献对泥石流的这种阵性运动方式做了详细的描述^[1-4]。张军根据泥石流的流量过程线,将其直观分成阵流型、连续流型和复合流型三种运动流型^[5]。吴积善等对云南东川蒋家沟、甘肃武都火烧沟和四川凉山黑沙河的马颈沟的阵性流进行对比分析,对阵性流的运动方式、运动形态、阵性流流量、流速的特征等进行了深入的探讨^[6]。一般认为,出现这种现象的是粘性泥石流。每一阵泥石流从形态上可以分为高陡的头部、顺滑的中部和平缓的尾部,也就是所谓的龙头、龙身和龙尾^[7]。有些学者认为这是一种波状流,并从波沿特征线传播以及流体运动不稳定性的角度对这种现象进行了分析研究^[8,9]。

泥石流的这种阵性运动使得泥石流携带的物质在短时间内经过过流断面,导致峰值流量是正常清水流量几倍,甚至几十倍^[6,7,10]。在实际设计泥石流防治工程时,常常以堵塞系数来反映阵性泥石流这种短时间积聚过流的效应^[11]。蒋家沟现场观察的结果认为粘性泥石流阵流在通过观测断面时,其整体为一楔形体,形状基本保持不变^[4]。因此,康志成等在计算蒋家沟泥石流的一阵径流总量时把阵性流的流量过程线概化成三角形,认为泥石流泥位随时间是一种线性的变化,因而等于流量与历时乘积的一半^[12]。而周必凡等在计算断面的一次泥石流总量时,根据泥石流历时和最大流量,按泥石流暴涨暴落的特点,将其过程线概化为五边形,将总历时平均分为三段,每段按三角形来计算^[13]。

然而,最近的一些测量结果表明阵流的过程线不是简单的三角形^[14,15]。作者在整理中国科学院东川泥石流观测研究站的超声波泥石流泥位历史资料时,也发现阵性流流量过程曲线的特征是高陡的头部之后急剧的下降,接近于指数或幂函数的形式,与三角形差别很大。本文分别从 Lagrange(空间过程

收稿日期:2008-08-06

基金项目:中科院知识创新重要方向项目(KZCX2-YW-302);国家自然科学基金青年科学基金项目(40701014);中科院成都山地灾害与环境研究所创新工程项目资助

作者简介:胡凯衡(1975-),男,副研究员,硕士生导师,主要从事泥石流研究。E-mail: khhu@imde.ac.cn

线)和 Euler(时间过程线)这两种坐标系下观察到的泥位过程线的形态差异,解释了导致用三角法来计算泥石流一次径流总量的原因。然后,在充分发展阵性流的假设下,基于云南蒋家沟的超声波泥位数据,具体分析了阵性流的泥位与历时、断面平均流速与泥位的关系。

2 数据

本文使用的泥石流泥位数据是康志成和杨仁文于 1985 年 8 月 2 日用 UL-1 型超声波泥位计在蒋家沟测量得到的。该场泥石流从 20:59 开始 23:40 结束,共 113 阵。超声波数据从 21:31:24 开始 22:28:41 结束。

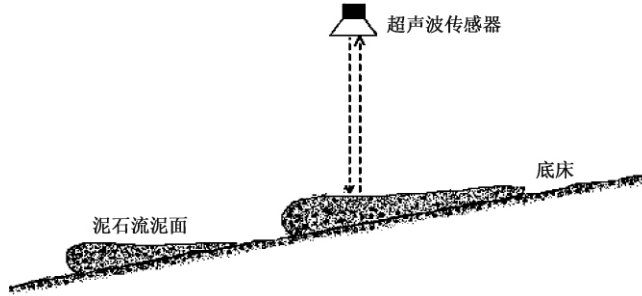


图 1 超声波测量泥石流泥位示意图

Fig.1 Schematics of measuring debris-flow depth by ultrasonic sensor

具体的测量方法描述见吴积善等^[4]。这里,简单介绍一下使用超声波测量泥石流泥位的原理(图 1)。在某一观测断面的上空悬挂超声波传感器。传感器向下发射超声波,并接收底床反射回来的超声波,通过两者的时间差可以得到传感器与底床的垂直距离。在泥石流经过测量断面时,发射的超声波遇到泥石流泥面就被反射,测量的垂直距离就变小。通过垂直距离的变化就可以得到泥石流运动经过时泥位的变化。

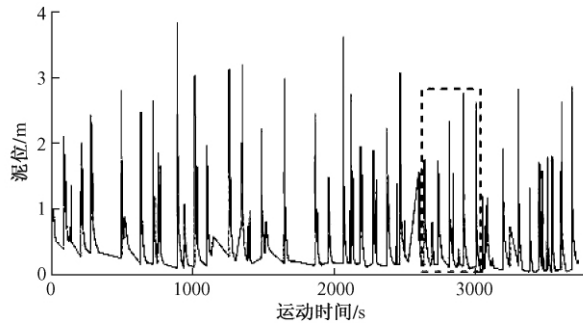


图 2 阵性泥石流的泥位过程线(以 21:31:24 为时间原点)

Fig.2 Hydrograph of flow depth during the whole event

超声波的数据见图 2,测量的频率是 3Hz。为了分析方便,对每秒钟的测量数据做了平均,换成 1 秒钟 1 个数据。整个过程中,底床有个非零的泥位值是因为泥石流事先的铺床作用导致沟床存在部分残留层^[5]。相对泥石流发生前的底床高程,该场泥石流的最大泥位值出现在第 891s,为 3.85m。为了更清楚地看出泥位随时间的变化,将第 27 到 31 阵的数据(图 2 中的虚框部分)放大(图 3)。从图中可以看出,每阵泥石流的形状,先是高耸的龙头,然后是急剧减少的龙尾。每一阵过程线的形状都很类似,但与三角形相去甚远。因此,采用三角形法概算泥石流的径流量存在较大的误差。下面我们将从等时间和等距离的两种不同观点来分析阵性流的过程线。

3 分析

3.1 Euler 和 Lagrange 过程线

既然超声波的数据表明阵性流随时间的变化并不是线性的,那么为什么有些现场观察的结果认为

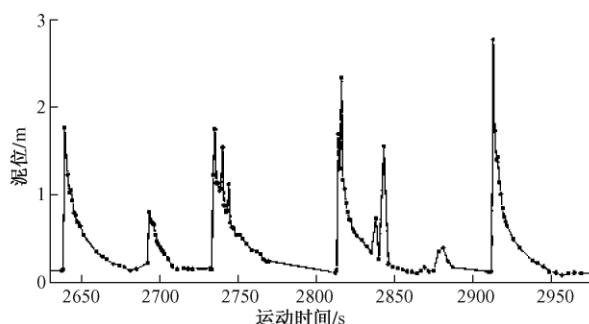


图3 第27到31阵泥石流的过程线(图2中虚线方框部分。由于超声波传感器悬挂在空中,所以在受到风等外界因素的干扰时,有些泥位数据出现异常的跳动。)

Fig.3 Hydrograph of flow depth from 27th to 31st surges

过程线是线性的呢?实际上,这涉及到等时间和等距离观察泥石流过程线的两种观点。假设一个人站在岸边观察泥石流,这时他观察到的泥石流过程线是同一时刻不同空间位置的泥位。而超声波传感器记录的是同一空间位置不同时刻的泥位数据。后一种是记录运动的 Euler 方法,以时间为横轴,泥位为纵轴;前一种是记录运动的 Lagrange 方法,以空间为横轴,泥位为纵轴。由于龙头位置泥石流速度快,龙身和龙尾速度慢。因此,时间轴上阵性流高陡的前部在空间轴上变平缓了。对于在岸边的观察者来说,整阵泥石流在空间上就类似于一个楔形体,流量过程线就类似于三角形。但是,我们不能因为等距离过程线接近于三角形就认为等时间过程线也接近于三角形,因而简单用三角形来概算泥石流的径流量。

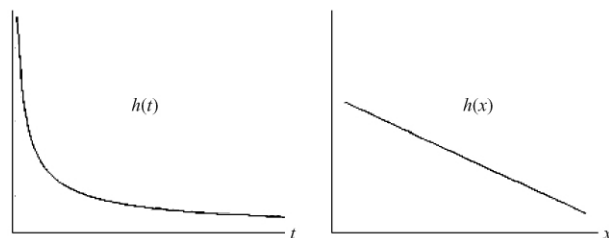


图4 Euler 和 Lagrange 观察坐标示意图

Fig.4 Schematics of Euler and Lagrange reference frame

3.2 泥位和断面平均速度

下面我们不考虑泥石流展宽的变化,并且认为在中下游沟道运动的阵性泥石流是一种充分发展的阵性流动^[16]。其立面二维波形和断面平均速度分布在运动传播过程中不发生变化。沟道的坡降等边界条件都不发生变化。设这样一阵性流的总历时为 T (即龙尾与龙头到达观测断面的时间差),阵流长度为 X ,并分别以 $h(t)$ 和 $h(x)$ 表示阵性流的等时间和等距离过程线。因为泥石流的等距离过程线接近于三角形,所以可以假设 h 是 x 的线性函数,即

$$h(x) = kx + a \quad 0 \leq x \leq X \quad (1)$$

其中 k 和 a 为常数。更进一步,由 h 分别对时间和空间的微分我们就可以得到断面平均速度

$$u = \frac{dx}{dt} = \frac{h_t}{h_x} \quad 0 \leq x \leq X \quad 0 \leq t \leq T \quad (2)$$

将(1)代入(2)就可以得到断面平均速度 $u = \frac{h_t}{k}$ 是时间的函数。因为 h 与 t 互为逆函数,所以就得到 u 是 h 的函数,记为 $u(h)$ 。

理论和实际上都认为 $u(h)$ 是幂函数的形式。为了保证 $u(h)$ 是幂函数, $h(t)$ 也必须是幂函数的形式。因此,设

$$h(t) = bH\left(\frac{t+1}{T+1}\right)^n \quad (3)$$

其中, H 为龙头高度, b 为常系数。为了避免当 $t = 0$ 时, (3) 式没有意义, 我们设定阵性流的初始时刻, 即龙头最高点的时刻为第 1 秒, 也就是将历时平移了 1 秒。这样, 结合 (1) (2) (3) 就有

$$u = \frac{h_t}{k} = \frac{bHn\left(\frac{t+1}{T+1}\right)^{n-1}}{k(T+1)} = \frac{n\sqrt[n]{bH}}{k(T+1)}h^{\frac{n-1}{n}} \quad (4)$$

为了确定幂指数 n , 我们选取了受干扰比较小的第 15、16、19、27 和 31 阵的超声波泥位数据, 用每一阵的龙头高度和总历时归一化后, 如图 5 所示。

实测数据拟合的结果得到 $b = 0.08917$, $n = -0.6417$ 。95% 的置信区间分别为 $[0.07369, 0.1046]$ 和 $[-0.6996, -0.5839]$, 均方根误差为 0.1068。由此, 我们得到断面平均流速与泥位的关系为

$$u \propto h^{2.5584} \quad (5)$$

在蒋家沟泥石流流速经验公式中, 幂律指数一般取为 $\frac{2}{3}$ 。

但是, 蒋家沟的流速经验公式中的流速是指阵性流整体的平均流速, 泥深也是整体的平均泥深。而公式 (5) 中的平均流速是指阵性流内部不同断面的平均流速, h 也是指阵性流不同部位的泥深。如果阵性流是一种整体性结构流动, 那么两者的指数应该一致。实际上, 吴积善根据四川西昌马颈沟 15 次小型泥石流的观测数据, 得到结构性蠕动的平均流速为平均泥深的 2.6 次方^[17]。这与公式 (5) 的结果是吻合的。

此外, Chiu-on Ng 和 Chiang C. Mei 从理论上分析了幂律流体在定常均匀流动时, 其断面平均流速 $u \propto h^{\frac{m+1}{m}}$ (m 为幂律体的流变指数)^[18]。假如自然界中的泥石流是一种幂律体, 那么根据本文的分析结果, 从公式 (4) 我们就可以推导出泥石流的流变指数 m 就等于 $-n$, 即 0.6417。这说明自然界中的原型泥石流可能是一种剪切变稀的伪塑性流体。

4 结论与讨论

本文基于云南蒋家沟实测的泥石流泥位过程线, 从 Euler 和 Lagrange 的观点解释了泥石流泥位过程线所表现出的两种不同形状。然后, 根据这两种过程线形状之间的转换关系, 得到泥石流的泥位与历时呈负幂律的关系, 幂律指数等于 -0.6417 。而由泥位和历时的关系式我们得到断面平均流速与泥位大约为 2.56 次方的关系。最后我们还讨论了指数 n 与泥石流流变指数的关系, 得到泥石流流变指数等于 $-n$ 。

从关系式 (5) 中可以看出, 泥石流龙头的速度远远大于龙身和龙尾。如果阵性泥石流在运动过程中没有与底床进行物质交换, 那么整阵泥石流会被拉伸得越来越长, 最后铺积在底床。这就是所谓的阵性流铺床运动。而当后续的阵性流在已经铺了一层泥石流物质的沟床上运动时, 龙头从前阵铺床的残留层中裹挟物质, 龙尾则在沟床留下物质^[7]。这种与底床的物质交换方式, 保证了阵性流在运动过程中保持整个形态基本不变, 也就是所谓的充分发展状态的阵性流。

致谢: 感谢中国科学院东川泥石流观测研究站为本研究提供了良好的工作条件和相关观测数据!

参考文献:

- [1] Thomas C. Pierson. Erosion and Deposition by Debris Flows at Mt Thomas, North Canterbury, New Zealand [J]. Earth Surface Processes, 1980, 5: 227 - 247.
- [2] Okuda, S., Suma, H., Okunishi, K., Yokoyama, K., and Nakano, M. Observations on the motion of a debris flow and its geomorphological effects [J]. Zeit. Geomorph. Suppl. - Bd., 1980, 35: 142 - 163.

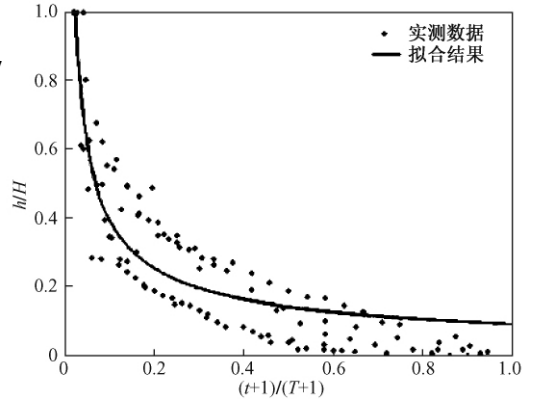


图 5 归一化后的泥位数据和拟合结果
Fig. 5 Normalized depth data and fitted curve

- [3] Jian , L. , Jianmo , Y. , Cheng , B. , and Defu , L. The main features of the mudflow in Jiang-Jia Ravine [J]. *Zeit. Geomorph.* , 1983 , 27(3) :325 – 341.
- [4] 吴积善 , 康志成 , 田连权 , 章书成. 云南蒋家沟泥石流观测研究 [M]. 北京 : 科学出版社 , 1990. 99 – 140.
- [5] 张军. 泥石流运动流型与流态特征 [J]. *山地研究* , 1991 , 9(3) :197 – 203.
- [6] 吴积善 , 康志成 , 张有富 , 刘江. 泥石流及其综合治理 [M]. 北京 : 科学出版社 , 1993. 17 – 191.
- [7] 胡凯衡 , 韦方强 , 李泳 , 崔鹏. 泥石流的阵性波状运动 [J]. *山地学报* , 2004 , 22(6) :707 – 712.
- [8] 王兆印 , 林秉南 , 张新玉. 非牛顿体不稳定流的研究 [J]. *力学学报* , 1990 , 22(3) :266 – 275.
- [9] 王光谦 , 倪晋仁. 波状泥石流运动特征分析 [J]. *泥沙研究* , 1994 , (4) :1 – 9.
- [10] 上原信司 , 水山高久. 通过动态观测研究泥石流的流量 [J]. *水土保持科技情报* , 1983 , (3) : 13 – 15.
- [11] 康志成 , 张军. 泥石流洪峰流量的研究与计算 [J]. *中国水土保持* , 1991 , (2) :15 – 18.
- [12] 康志成 , 崔鹏 , 韦方强 , 何淑芬. 东川泥石流观测研究站观测实验资料集 (1961 – 1984) [M]. 北京 : 科学出版社 , 2006.
- [13] 周必凡 , 李德基 , 罗德富 , 吕儒仁 , 杨庆溪. 泥石流防治指南 [M]. 北京 : 科学出版社 , 1991.
- [14] Massimo A. On debris flow front evolution along a torrent [J]. *Phys. Chem. Earth (B)* , 2000 , 25(9) :733 – 740.
- [15] Lorenzo Marchi , Massimo Arattano , Andrea M. Deganutti. Ten years of debris – flow monitoring in the Moscardo Torrent (Italian Alps) [J]. *Geomorphology* , 2002 , 46:1 – 17.
- [16] 刘大有 , 徐胜利 , 章书成 , 等. Bingham 流体阵性流动立面二维计算及分析 : 阵流速度、形态和床面阻力 [J]. *科学通报* , 2003 , 48(9) : 981 – 987.
- [17] 吴积善. 泥石流流态及流速计算 [A] , 泥石流论文集 (1) [C]. 重庆 : 科学技术文献出版社重庆分社 , 1981. 79 – 86.
- [18] NG , Chiu-on and C. Mei , Chiang . Roll waves on a shallow layer of mud modelled as a power-law fluid [J]. *Journal of Fluid Mechanics* , 1994 , 263: 151 – 183.

Analyses on flow depth hydrograph of debris-flow surges in Euler and Lagrange coordinate systems

HU Kai-heng^{1 2} , KANG Zhi-cheng^{1 2} , LI Yong^{1 2}

(1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Processes , Chinese Academy of Sciences , Chengdu , 610041 , P. R. China ;

2. Institute of Mountain Hazards and Environment , Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Resources ,
Chengdu , 610041 , P. R. China)

Abstract: A debris-flow event consists of many intermittent surges , which distinguishes debris flow from flood and sediment-laden flow. The surge's hydrograph has been described traditionally as linear graph , so triangle method is used to calculate one surge's bulk volume. After investigating witness by sight and measured data by ultrasonic sensor in Jiangjia Ravine , Yunnan Province , we propose that linear and non-linear hydrographs are just two different forms of a debris-flow surge in Lagrange and Euler reference frames , and the triangle method will cause a big error. Then , on the condition of fully developed surge , the dependences of flow depth on time , and of transverse-averaged velocity on flow depth are modeled as power functions. The power index n of the flow-depth and time function is equal to -0.6417 according to the result fitted from the measured data. Because the power index of the velocity and flow-depth function is equal to $\frac{n-1}{n}$, the velocity is approximately proportional to 2.56 power of the depth. Finally , we discuss the relationship between the index n and the flow index of debris flow.

Key words: Debris flow ; surges ; hydrograph ; flow index