

# 流团模型在泥石流危险度分区中的应用

胡凯衡, 韦方强, 何易平, 李泳, 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:** 应用王光谦等发展的流团模型, 在泥石流摩阻为速度的二次多项式的条件下, 根据一定的地形条件、流量过程线及泥石流流体的一些参数, 模拟了泥石流在堆积扇上的扩散堆积运动。由数值模拟结果, 以泥石流的最大动能为分区指标, 建立了泥石流危险度分区模型。最后将该方法应用到云南东川尼拉姑沟, 取得了该沟 50 a 一遇泥石流的泛滥范围和危险度分区。

**关键词:** 流团模型; 泥石流; 危险度分区; 数值模拟

**中图分类号:** P64

**文献标识码:** A

## 1 概述

泥石流危险度分区是泥石流减灾的重要内容之一, 在泥石流危险范围预测、堆积扇规划利用、灾情损失预估、防治工程效益评价等方面发挥着积极的作用。多数的危险度分区研究主要采用相关因子法, 即把泥石流的危险度看成诸如流域面积、相对高差、降雨强度、泥石流容重等因子的函数。如足立胜治( 1977) 从地貌条件、泥石流形态和降雨三个主要方面开展的泥石流发生危险度的判定研究<sup>[1]</sup>。近年来的进展有刘希林( 1993) 提出了泥石流危险度多因子综合定量判定模式及其计算公式<sup>[2]</sup>, Wm. J. Roberds 和 Ken Ho( 1997) 使用系统方法和统计分析评估泥石流的危险度<sup>[3]</sup>。但是这类危险度分区方法存在一些不足, 如危险因子的权重和分区的结果依赖于野外工作和专家的经验, 只能简单量化某条沟的危险程度, 泥石流的速度在危险度分区中没有得到反映, 对同一条泥石流沟不同时间暴发的泥石流得出相同的结果。因为泥石流的数值模拟能够给出明确的泥石流堆积泛滥范围和不同时刻的速度分布以及反映泥石流沟不同时期的变化而克服这些缺

陷。所以有些学者将数值模拟应用到泥石流的危险度分区中。如唐川、周钜乾等在云南芭蕉河的泥石流堆积扇危险度分区评价中采用了泥石流的有限差分数值模型<sup>[4]</sup>, 罗元华和陈崇希则利用类似的泥石流数值模型对泥石流灾害损失和泥石流防治工程效益进行评价<sup>[5]</sup>。但是有限差分计算算法在复杂的地形条件下计算结果不是很理想, 难于推广。本文采用了能适应复杂地形的流团模型来计算泥石流在堆积扇上的泥深和速度分布, 并在危险度分区中应用了新的分区指标和分区方法。

## 2 流团模型

流团模型是王光谦等( 1997) 基于 Lagrangian-Euler 数值方法提出的泥石流堆积扇形成模型<sup>[6,7]</sup>。他们把泥石流视为大量小颗粒的集合体, 根据离散的运动方程计算各个颗粒在每一时间步的速度和空间分布, 即运动方程和运动介质都被离散化了。该模型简便有效而且避免了传统的有限差分方法在计算运动方程时遇到的一些困难, 如非常小的泥深将导致非常大的运动速度, 随时间变动的流体边界等。

### 2.1 运动方程

收稿日期( Received date): 2002- 04- 20; 改回日期( Accepted): 2003- 08- 25。

基金项目( Foundation item): 中国科学院知识创新工程项目( KZCX2- 306) 和国家自然科学基金项目( 编号: 40201009) 资助。[This research is supported by the Knowledge Innovation Program( KZCX2- 306), CAS and the National Science Foundation( Grant No. 40201009) ]

作者简介( Biography): 胡凯衡( 1975- ), 男, 江西瑞金人, 助理研究员, 在职博士生, 主要从事地理过程的计算机模拟研究。[Hu Kaiheng ( 1975- ), M, Born in Jiangxi Province, Major in Computer simulation of geographic process. ]

运动方程采用 Lagrange 形式的二维 Saint-Venant 方程。该方程只包含 3 个变量——泥深、 $x$  方向的速度、 $y$  方向的速度,而没有直接出现密度和压力。虽然泥石流是包括水、细粒和粗颗粒的两相流,但是这里当作伪一相体处理

$$\begin{aligned}\frac{Du}{Dt} &= gS_{sx} - gS_{fx} \\ \frac{Dv}{Dt} &= gS_{sy} - gS_{fy}\end{aligned}\quad (1)$$

式中  $\frac{D}{Dt}$  为物质导数,  $u$ 、 $v$  是  $x$  和  $y$  方向的深度平均速度分量,  $g$  是重力加速度,  $S_{sx}$  和  $S_{sy}$  是  $x$  和  $y$  方向堆积区底面坡度,  $S_{fx}$  和  $S_{fy}$  分别是  $x$  和  $y$  方向泥石流的摩阻坡降。从形式上看方程(1)就是牛顿第一运动定律。王光谦等将  $S_{fx}$  和  $S_{fy}$  表示成流体内的摩阻坡降(包括屈服应力和粘性应力)和粗颗粒之间的摩阻坡降之和。但是泥石流除了屈服应力和粘性力外,在大应变率条件下还存在紊流和分散应力<sup>[8]</sup>。并且当泥石流流体含有大量漂砾和粗颗粒或堆积区具有较大的坡度和糙率时紊流和扰流比较常见。所以考虑紊流应力和分散应力后就得到本文采用的摩阻坡降公式<sup>[9]</sup>

$$\begin{aligned}S_{fx} &= \frac{\tau_b}{\gamma_m h} \operatorname{sgn}(u) + \frac{2\mu_B u}{\gamma_m h^2} + \frac{k_c u \sqrt{u^2 + v^2}}{gh} \\ S_{fy} &= \frac{\tau_b}{\gamma_m h} \operatorname{sgn}(v) + \frac{2\mu_B v}{\gamma_m h^2} + \frac{k_c v \sqrt{u^2 + v^2}}{gh}\end{aligned}\quad (2)$$

式中  $\tau_b$  为屈服应力,  $\gamma_m$  为泥石流的容重,  $h$  为泥深,  $\mu_B$  为泥石流流体的粘性系数,  $\rho_s$ ,  $\rho$  和  $\rho_m$  分别是固体、流质和泥石流的密度,  $\operatorname{sgn}(\cdot)$  是符号函数,  $k_c = g/C^2$  为摩擦系数( $C$  为 Chzy 系数)。

## 2.2 算法

首先将泥石流流体看作许多泥石流颗粒的集合体。每个颗粒的体积相同,并且与总体积相比非常小。这样泥石流在堆积扇上的运动就可看作大量颗粒群的运动。每一个颗粒都有一定的速度和位置,可以流入或流出选定的计算区域,其运动服从方程(1)。对方程(1)使用向前差分近似物质导数后有

$$\begin{aligned}\frac{u_k^{n+1} - u_k^n}{\Delta t} &= gS_{sx}^{n,k} - gS_{fx}^{n,k} \\ \frac{v_k^{n+1} - v_k^n}{\Delta t} &= gS_{sy}^{n,k} - gS_{fy}^{n,k}\end{aligned}\quad (3)$$

式中  $u_k^{n+1}$ ,  $v_k^{n+1}$  是第  $k$  个颗粒在  $n+1$  时的  $u$ 、 $v$  值,  $u_k^n$ ,  $v_k^n$ ,  $S_{sx}^{n,k}$ ,  $S_{sy}^{n,k}$ ,  $S_{fx}^{n,k}$ ,  $S_{fy}^{n,k}$  是第  $k$  个颗粒在  $n$  时的  $u$ 、 $v$ 、 $S_{sx}$ 、 $S_{sy}$ 、 $S_{fx}$ 、 $S_{fy}$  值。而第  $k$  个颗粒在  $n$  和  $n$

$+1$  时的位置有如下的关系

$$\begin{aligned}x_k^{n+1} &= x_k^n + \frac{u_k^{n+1} + u_k^n}{2} \Delta t \\ y_k^{n+1} &= y_k^n + \frac{v_k^{n+1} + v_k^n}{2} \Delta t\end{aligned}\quad (4)$$

式中  $x_k^n$ ,  $y_k^n$ ,  $x_k^{n+1}$ ,  $y_k^{n+1}$  是第  $k$  个颗粒在  $n$  和  $n+1$  时的  $x$  和  $y$  坐标。

然后将整个计算区域划分成正方形的网格,只计算每个交叉点(网格的角点)处的流深、速度值及高程值。网格是固定的,但是颗粒是运动的。每个交叉点的参量值取它所在网格内所有泥石流颗粒的平均值。每个颗粒的流深和高程值通过周围四个交叉点的插值来获得。颗粒在  $n+1$  时的速度由  $n$  时刻的流深和高程用方程(3)来计算,再通过方程(4)计算  $n+1$  时的位置。在颗粒移动到新的位置后,重新计算每个网格的颗粒数,然后取平均得到每个交叉点在  $n+1$  时的速度和流深。如果某个颗粒的速度小于设定的某个很小的值,那么认为其停止运动,同时该颗粒所在网格的高程增加  $\Delta V/A$  ( $\Delta V$  为单个颗粒的体积,  $A$  为网格的面积)。

## 2.3 初边值条件和收敛条件

每个交叉点的流深和速度在计算开始时除了堆积扇入口处都赋为 0。每点的初始高程可由数字地形图得到。堆积扇入口处的流深和速度根据曼宁公式可由被研究流域的流量过程线得到。入口处每个网格的颗粒数  $N$  等于  $Q_n/\Delta V$  ( $Q_n$  为通过该网格的流量,等于流速和网格的断面面积的乘积)。这  $N$  个颗粒平均布置在网格内,并且具有相同的初始速度。如果某个颗粒跑出了边界,那么从总数目中删除这个颗粒。这样就给定了流入颗粒的初始速度和位置,并且保证了质量守恒。收敛条件根据王光谦等<sup>[7]</sup>为

$$\max |X_k^{n+1} - X_k^n|, \max |Y_k^{n+1} - Y_k^n| < 0.5 \Delta y \quad (5)$$

式中  $\Delta x$  和  $\Delta y$  分别为  $x$  方向、 $y$  方向的步长。方程(5)意味着在一个时间步长内颗粒不会跨过网格,而不至于引起变量值的跳动和不连续。但是在实际的计算中发现时间步长比方程(5)所确定的要小。这有可能是因为采用了包括紊流应力和分散应力的摩阻坡降公式。

## 3 分区指标和方法

### 3.1 分区指标

已有的分区指标有些依据泥石流的泥深,有些

依据泥深和流速的简单组合<sup>[4]</sup>。最近也有学者提出以动量作为分区指标<sup>[10]</sup>。从能量的观点来看, 动能表征了运动物体从运动到静止的难易。在阻力相同的情况下, 动能大的物体比动能小的运动的位移长。而在位移相等的情况下, 相比动能小的物体需要更大的阻力才能使动能大的物体停止下来。所以不仅泥石流的爬高、冲刷作用和动能大小相关, 而且泥石流可波及的范围和防治工程承受的冲击力也由动能决定。当然, 动能还有一个优点就是它是个标量, 而且始终为正值, 不像速度或动量需要取绝对值。因而本文以泥石流的动能作为新的分区指标, 而且为了反映每个网格的最大危险性, 指标值取为每个网格在整个泥石流过程中的最大动能值。公式如下

$$R = \max_{t>0} [(u^2 + v^2) h] \tag{6}$$

式中  $R$  与动能只相差一个比例常数。

3.2 分区方法

分区的方法可以根据专家给出的阈值, 将整个泥石流的堆积区域划分成轻度危险、中度危险和极度危险三类, 也可以在分区指标的最大值和最小值之间进行等区间划分。本文则采用概率统计的方法, 对分区指标作等方差划分。用公式表示如下

$$S(R) + (i - 1) V(R) < R < S(R) + i V(R) \tag{7}$$

式中  $S(R)$ 、 $V(R)$  分别为  $R$  的均值和方差( $i$  取整数)。如网格的  $R$  值落在区间  $[S(R), S(R) + V(R)]$  内即为中度区( $i = 1$ ), 而  $> S(R) + V(R)$  和  $< S(R)$  的网格分别为重度区和轻度区。如果需要划分的更细些,  $i$  的值相应可以取多一些。采用这种

方法既可避免某些计算结果的异常值对分区结果的影响, 也可以消除专家确定阈值时的主观性。

4 应用实例

云南省昆明市东川区城市后山的尼拉姑沟是处于发育期的粘性泥石流沟, 流域面积  $4.06 \text{ km}^2$ , 主要由 3 条发育在海拔  $1400 \sim 1700 \text{ m}$  的老洪积台上的冲沟组成。泥石流堆积物属典型粘性泥石流堆积。沟口距东川城区仅  $1 \text{ km}$ , 与东川城区高差  $200 \sim 400 \text{ m}$ , 最高达  $600 \text{ m}$ , 对东川城区构成严重威胁。1961 年 6 月尼拉姑沟暴发泥石流, 冲进城区街道, 居民生命财产受到破坏。这里以尼拉姑沟作为流团模型应用的实例。

4.1 泥石流堆积的模拟及计算结果

根据粘性泥石流的运动特征: 1. 运动为阵性, 流量过程线有多个峰值; 2. 每一阵又分为龙头、龙身和龙尾, 而龙头的流量最大; 3. 不同阵次之间有一定的间歇时间, 而每一阵的持续时间比较短, 一般在十几秒钟到几分钟之间, 取尼拉姑沟五十年一遇的泥石流设计流量  $(349.0 \text{ m}^3/\text{s})^{[11]}$  为泥石流峰值流量, 并参照处于同一地区的蒋家沟泥石流典型流量过程线<sup>[12]</sup>, 模拟泥石流的流量过程线如图 1。然后采用曼宁公式计算入口处的流速和流深。其中水力坡度取入口处的沟底坡度, 糙率取  $0.1^{[13]}$ 。堆积区的底面高程经由 1:1 万的地形图数字化而来。其他参数值参照相同容重和颗粒级配的蒋家沟流域小于  $2 \text{ mm}$  的泥石流浆体的流变实验数据<sup>[13~15]</sup>。

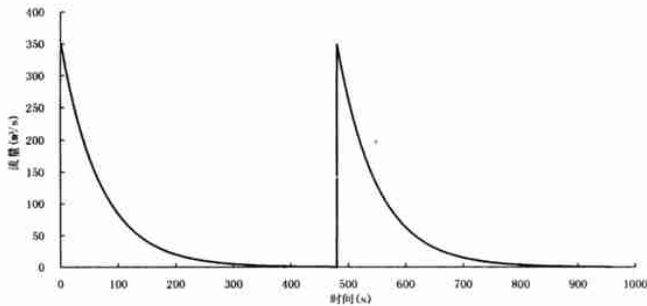


图 1 模拟的泥石流流量过程线(两阵)

Fig.1 Simulating hydrograph of debris flow including two surges

表 1 计算中采用的参数值

Table 1 The value of parameters used in the computation

参数名	$\gamma_m$	$\tau_B$	$\mu_B$	$k_c$	$\Delta V$	$\Delta t$	$\Delta y$	$\Delta x$
参数值	2.0(g/cm <sup>3</sup> )	75.2N/m <sup>2</sup>	0.129Ns/m <sup>2</sup>	0.06	2m3	0.1s	10m	10m

计算的结果包括不同时刻的速度分布和泥深分布其中速度分布如图 2。初步的分析可以知道在龙头经过出口后大约一分钟左右速度最大, 达到 7.5 m/s。结束时泥深最大为 3.72 m。而且从图上看坡降大的地方速度也大, 方向基本上与等高线正交。另外泥石流在下游开阔地和沟道底部堆积得较厚。

4.2 分区的结果

根据计算结果按照前面给出的指标和方法对尼拉姑沟山前扇形地作出分区结果图(图 3), 为了相互比较还给出了只依赖于泥深的分区结果(图 4)。从图 3 可以看出出口附近和沿主流线的区域危险等级较高, 而图 4 的结果显示高危险区集中在下游区域。另外两个结果都反映出坡度平缓的地方危险度相对低一些。

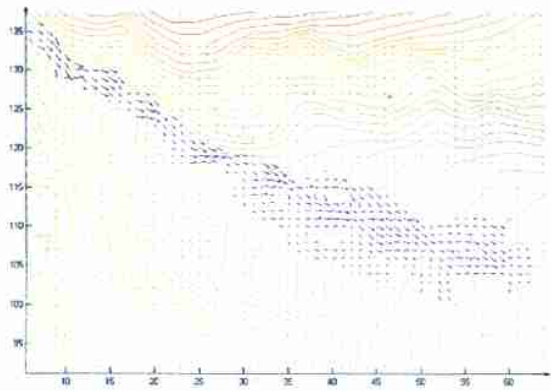


图 2  $t = 600\text{ s}$  时的速度分布  
Fig. 2 The velocity distribution at  $t = 600\text{ s}$

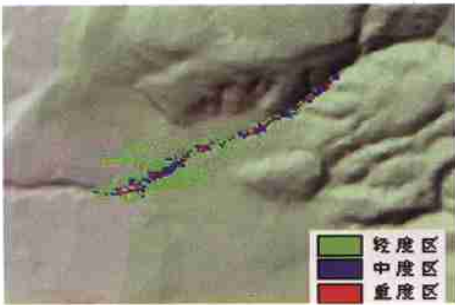


图 3 以  $R$  为指标的危险度分区图  
Fig. 3 Risk zoning map based on  $R$

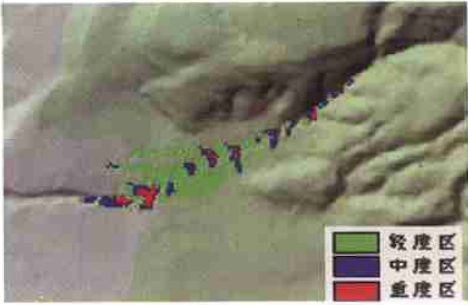


图 4 以  $h$  为指标的危险度分区图  
Fig. 4 Risk zoning map based on  $h$

5 结论与讨论

作为一种简便有效的数值计算方法, 流团模型在泥石流的数值模拟研究中有着很好的应用前景。本文应用该模型对泥石流在堆积扇上的堆积扩散过程进行了模拟, 并把模型的计算结果应用于泥石流的危险度分区。与传统的分区方法相比, 和数值模拟方法相结合的危险度分区方法使得单沟泥石流堆积扇的危险度分区切实可行, 结果更为可靠。但是模型计算还存在一些不足之处: 1、在地形发生突然变化的地方, 计算结果可靠性偏低; 2、限于计算条件网格的划分不可能取得很细; 3、泥石流的流量过程

线不易获得。进一步的研究必须注意这些问题的解决, 以期取得更好的结果。

参考文献(References):

[1] Katsuji Adachi, Kunio Tokuyama, Akito Nakasuji. Study on judgment of outbreakability of debris flow[J]. SHIN-SABO, 1977, 33(4): 7~16. [足立胜治. 土石流发生危险度の判定に就て[J]. 新砂防, 1977, 33(4): 7~16.]

[2] Liu X, Tang C, Zhang S. Quantitative Judgment on the Debris Flow Risk Degree[J]. Journal of Catastrophology, 1993, 8(2): 1~7. [刘希林, 唐川, 张松林. 中国山区沟谷泥石流危险度的定量判定法[J]. 灾害学, 1993, 8(2): 1~7.]

[3] Wm. J. Roberts and Ken Ho. "A Quantitative Risk Assessment and Risk Management Methodology For Natural Terrain In Hong Kong" Debris

*Flow Hazards Mitigation*, ASCE, 1997, 207~ 218

- [4] Tang Chuan, Zhou Juqian and Zhu Jing, etc. A Study on the Risk Zoning of Debris Flow on Alluvial Fan by Applying Technology of Numerical Simulation[J]. *Journal of Catastrophology*, 1994, 9(4), 7~ 12 [唐川, 周钜乾, 朱静, 黄楚兴. 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~ 12.]
- [5] Luo Y, Chen C. The Numerical Simulation of Debris Flow and the Method of Evaluating the Hazard Risk of Debris flow[M]. Beijing: Geology Press, 2000. 55~ 64. [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. 55~ 64.]
- [6] Wang Guangqian, Song Shaodong and Fei Xiangjun. Debris Flow Simulation: I—Model. *Journal of Sediment Research*, 1998, 43(3): 7~ 13. [王光谦, 邵颂东, 费祥俊. 泥石流模拟:I——模型[J]. 泥沙研究, 1998, 43(3): 7~ 13.]
- [7] Guangqian Wang, Songdong Shao and Xiangjun Fei. “Particle Model for Alluvial Fan Formation” *Debris Flow Hazards Mitigation*, ASCE, 1997, 143~ 152.
- [8] O’ Brien, J. S., and Julien, P. Y. “Laboratory Analysis of Mudflow Properties,” *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 1988, Vol. 114, No. 8, 877~ 887
- [9] J. S. O’ Brien, P. Y. Julien & W. T. Fullerton. “Two-Dimensional Water Flood And Mudflow Simulation”, *Journal of Hydraulic Engineering*, 1993, Vol. 119 No. 2, 244
- [10] Wei Fangqiang, Hu Kaiheng and Jose Luis Lopez, etc. Method and Its Application of the Momentum Model for Debris Flow Risk Zoning. *Chinese Science Bulletin*. 2003, 48(6), 594~ 598 [泥石流危险性动量分区方法与应用[J]. 科学通报, 2003, 48(3): 298~ 301.]
- [11] Du Ronghuan, Kang Zhicheng, Chen Xunqian. A Comprehensive Investigation and Control Planning for Debris Flow in Xiaojiang River basin of Yunnan Province[M]. Chongqing: Chongqing Branch Office of Scientific Document Press, 1987. 243. [杜榕桓, 康志成, 陈循谦, 朱平一. 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, 1987. 243]
- [12] Wu Jishan, Kang Zhicheng, Tian Lianquan. Observation and Research of Debris Flow in Jiangjiagou Valley in Yunnan Province[M]. Beijing: Science Press, 1990 127~ 131. [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. 127~ 131.]
- [13] Wuji Shan, Tian Lianquan, Kang Zhicheng. Debris flow and Its Comprehensive Control[M]. Beijing: Science Press, 1993. 170~ 181. [吴积善, 田连权, 康志成等. 泥石流及其综合治理[M]. 北京: 科学出版社, 1993. 170~ 181]
- [14] Wang Yuyi, Rheological Characteristic of Debris Flow Slurry[J]. *Journal of Sediment Research*, 1982, (2): 74~ 80. [王裕宜. 泥石流浆体的流变特征[J]. 泥沙研究, 1982, (2): 74~ 80.]
- [15] Fei X, Zhu P. The Stickiness of Debris Flow and Method of Distinguishing it[J]. *Journal of Railway Engineering*, 1986, 2(4): 9~ 16. [费祥俊, 朱平一. 泥石流的粘性及其确定方法[J]. 铁道工程学报, 1986, 2(4): 9~ 16]

## Application of Particle Model in Risk Zoning of Debris Flow

HU Kai-heng, WEI Fang-qiang, HE Yi-ping, LI Yong, CUI Peng

(Institute of Mountain Hazard and Environment, CAS, Chengdu, 610041, China)

**Abstract:** Traditional method of risk zoning applied to single gully of debris flow doesn't base on flow depth and velocity distribution of debris flow. At the same time numerical simulation can provide these distributions in the inundation region. So it is found that the zoning method combined with numeric simulation has wider application in the risk zoning of single gully than traditional method does. Here the particle model, a versatile numerical method presented by Wang et al, has been applied to simulating the process of debris flow deposition and diffusion. Different from Wang's model the friction slope is considered as second-order polynomial of velocity. A new index  $R$ , the kinetic energy of debris flow, was introduced to reflect the synthetic effect of velocity and flow depth on the hazard. In addition, equal-variance zoning was adapted in determining the quantitative range corresponding to different risk grade. Finally the new zoning method was implemented in the risk zoning of Nigula gully in Yunnan Province and some good results were obtained.

**Key words:** particle model; debris flow; risk zoning; numeric simulation