

文章编号: 1008 - 2786 - (2012) 2 - 216 - 06

基于流速衰减特征的泥石流冲出距离预测方法

铁永波

(成都地质矿产研究所 四川 成都 610081)

摘 要: 泥石流冲出距离的确定是泥石流灾害评价及防治中的关键环节。基于泥石流在堆积区流速的变化特征,提出了泥石流流速“衰减系数”的概念。通过对泥石流流速衰减系数的定义和计算公式的推导,提出了一种基于泥石流流速衰减系数来确定泥石流冲出距离的新方法,并以四川省泸定县干沟泥石流为实例进行计算和验证。研究表明:当干沟泥石流在堆积区的流速大于初始(沟口)流速的 15% 时,流速的衰减程度极为显著;而当堆积区流速小于初始速度的 15% 时,流速的衰减极为缓慢。研究结果对泥石流灾害的危险性评价及防灾减灾具有一定的理论和实践意义。

关键词: 泥石流; 流速衰减系数; 冲出距离; 预测方法

中图分类号: P642. 23

文献标识码: A

泥石流是我国西南山区最为常见的地质灾害之一,受极端天气条件的影响,泥石流暴发的频率越来越高,因而而导致的潜在风险也急剧增大,严重影响山区社会经济的可持续发展^[1]。泥石流危险区的合理确定是开展泥石流灾害评价及防治的关键,也直接影响到泥石流威胁对象的安全保障及泥石流防治对策的制定,而在这过程中,泥石流的冲出距离是一个核心内容。采用定量的方法对泥石流的危险区进行界定一直以来都是泥石流危险性评价乃至风险评价中的难点,也备受国内外学者的关注,并在过去数十年中进行过许多尝试,但至今尚未找到一种合理或最优化的方法^[2-3]。一方面是由于我们至今对泥石流的诸多形成机理及认识尚不够深入,另一方面是由于定量评价中考虑的因子较为复杂,且人为因素的影响较大。为此,探索泥石流危险区范围的定量评价方法具有重要的理论和实践意义。

数值模型可以直观、定量地对泥石流的危险区进行界定,得到更为科学和严谨的结果,为防灾减灾

提供科学依据。如能解决对泥石流非线性流变特征认识不足的宾汉流体模型^[4]、基于非牛顿体扩散模型的多向流 FLO - 2D 模型等^[5]。目前,用以模拟泥石流的数值模型基本上都将泥石流分为连续流^[6-7]和非连续流^[8-9]。连续流模型具有更快的计算速度和更适合模拟粘性流及孔隙水特征,而不连续流模型能更好地模拟单个介质的压力特点。虽然这些模拟可以通过许多参数实现,但这些参数具有很大的不确定性,即使在同一区域内模拟不同的泥石流也会有很大的差异。同时,泥石流危险区范围的数值模拟同样也受到所使用的地形数据的限制,还受到与泥石流运动路径中沉积环境模拟有关的限制,而这往往会导致模拟结果的非唯一性,这也是目前泥石流数值模拟中所面临的一个难题^[7]。虽然采用数值模拟方法能很好地将泥石流的流变学特点、运动过程及运动特征进行量化评价,能够直观地将泥石流各个参数随时间变化和空间位移的变化差异表现出来。但由于目前对泥石流本身的物理特性

收稿日期(Received date): 2011 - 08 - 30; 改回日期(Accepted): 2011 - 12 - 29。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金(41101086、41102226)、地质灾害防治国家重点实验室开放基金(SKLGP2012K003) 及科技部基础研究专项(2011FY110101) 资助。[Supported by the Natural Science Foundation of China(41101086、41102226), Special Research Fund of State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection(Chengdu University of Technology) (SKLGP2012K003) and The Basic Research Project from Ministry of Science and Technology (2011FY110101).]

作者简介(Biography): 铁永波(1979 -), 男, 博士, 副研究员, 主要从事环境地质和灾害地貌方向研究。[Tie Yongbo (1979 -), male, Dr. Associate Researcher, majoring in environmental geology and geomorphologic disasters research.] E - mail: tyongbo@cgs. cn

和动力学特性的认识差异,导致难以对其运动过程及机制进行统一的界定。为此,探索通过其他一些参数获取相对简单、操作性较强的泥石流冲出距离的界定方法显得尤为必要。

1 泥石流堆积区流速“衰减系数”的界定

泥石流冲出沟口并到达堆积区后,由于地形变化相对较大,堆积区突然变得开阔,沟道的相对断面面积增大,在瞬时流量相对恒定不变的情况下,泥石流的直接表现为流速降低,并开始发生堆积。一般认为,在泥石流堆积扇的终点,其运动速度可以近似为零。泥石流在发生堆积时流速($V_{\text{合}}$)可分解成纵向(垂直方向)和横向(水平方向)两个分速度。其中控制泥石流冲出距离的纵向分速度以堆积扇顶点(沟口处)最大(V_1)、堆积扇终点(末端)最小($V_{\text{终}} \approx 0$);横向分速度则以堆积扇的纵向中心线(线上任意一点)为最大(V_0),水平线上堆积扇左右两端的的速度最小,即 $V_{\text{左}} = V_{\text{右}} = 0$ 。泥石流流速在堆积区的速度分解及变化特征示意图1。

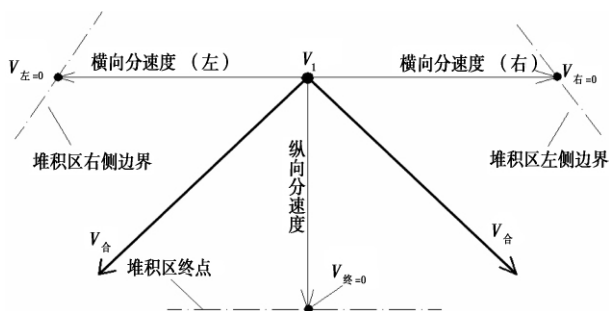


图1 泥石流堆积扇上流速分解及大小分布示意图

Fig. 1 The diagrammatic sketch of debris flow velocity separation in inundate area

由于泥石流的冲出距离与纵向(冲出方向)上的冲出速度有最为直接的关系,故文中重点讨论泥石流流速沿纵向(冲出方向)的衰减特征。为能更好地阐述泥石流“衰减系数”,这里将泥石流的堆积区看作是理想化的扇状堆积区(三角形状)。同时,根据泥石流具有直进性的特点,假设泥石流在堆积扇上流动时整体沿着一条主流线的方向流动(图2)。虽然在实际的泥石流堆积中,堆积扇会因为地形地貌特征及人类活动等条件的影响有多种形态,其主流线也会根据沟道的弯曲而异,但他仍能将我西南地区绝大多数泥石流的堆积特征表示出来。

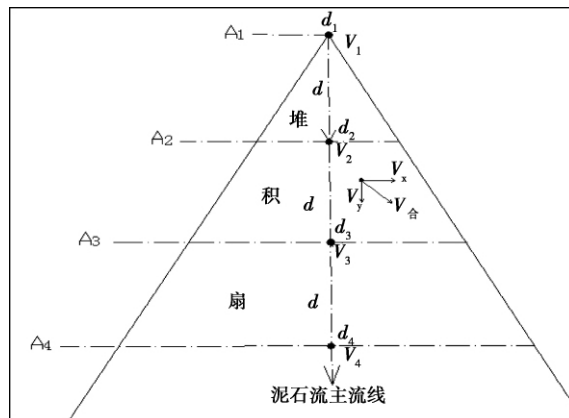


图2 理想化的泥石流堆积区流速衰减变化示意图

Fig. 2 The diagrammatic sketch of debris flow velocity attenuation coefficient in inundate area

假设泥石流危险区为理想的扇形或三角形,通过三角形顶点与底边中点的连线为泥石流冲出的主流线,或称之为泥石流堆积扇的中轴线(中轴线也可能是弯曲的,根据堆积区的地形而异),则泥石流的“流速衰减系数”可表达为:在纵向上,沿长度为 L 的堆积扇的中轴方向,按一定的断面测量距离 d (m)划分出 $\frac{L}{d}$ 个断面点($d_4 - d_3 = d_3 - d_2 = d_2 - d_1$),每个断面点所对应的断面面积为 A_i ($i=1; 2; 3; \dots; n$),设泥石流堆积扇顶端断面 A_1 (m^2)处的瞬时平均速度为 V_1 ,距离该断面点往下游距离为 d 处断面 A_2 (m^2)所对应的平均速度为 V_2 ,有 $V_1 > V_2 > V_3 > V_4 > \dots > V_n = 0$,则泥石流沿堆积扇纵向分速度的衰减系数(α_y)可表示为

$$\alpha_y = \frac{V_i - V_{i+1}}{V_i} = 1 - \frac{V_{i+1}}{V_i} \quad (1)$$

式中: α_y 表示泥石流流速沿流动方向的衰减系数; V_i 表示在堆积扇上任意一点所对应的瞬时流速; V_{i+1} 表示在距离流下游 d (m)处点对应的泥石流瞬时流速。

2 泥石流流速“衰减系数”的计算方法

根据泥石流流速在堆积扇上的分速度衰减特征及其计算公式,要确定泥石流衰减系数的大小,必须要确定两个关键参数,即泥石流冲出沟口后(在堆积扇顶端)的瞬时速度和泥石流在中轴线上任意一点的瞬时速度。相比之下,前者的确定相对要容易一些,因为目前已有一些经验公式可对泥石流的冲

出速度进行计算。但对泥石流冲出沟口后,在堆积扇主流线上任意一点的瞬时速度的确定相对较为困难。现有的确定方法是基于泥石流规模(冲出总量)、历时(根据目击者描述的持续时间)及断面面积的估算而获取,而这种估算往往具有较大的误差,因此,目前没有合适的经验公式用以计算泥石流在堆积扇上的瞬时速度。

根据流体力学中流体的质量守恒定理可将速度和断面面积进行转换,即在 dt 时段内流入的质量应与流出的质量相等,其连续性方程为^[10]

$$dQ = u_1 dA_1 = u_2 dA_2 \quad (2)$$

式中 Q 为流体在 t 时刻通过断面 A 的流量(m^3/s); u 为 t 时刻流体通过断面 A 时的流速(m/s)。对式(2)积分后得到恒定总流的连续性方程为

$$\int_Q dQ = \int_{A_1} u_1 dA_1 = \int_{A_2} u_2 dA_2 \Rightarrow Q = A_1 V_1 = A_2 V_2 \quad (3)$$

将公式变形后可得到流速与断面面积之间的关系式

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{A_1}{A_2} \text{ 或 } \frac{V_{i+1}}{V_i} = \frac{A_i}{A_{i+1}} \quad (4)$$

式中 A_i 表示在 V_i 时刻时对应的断面面积(m^2); A_{i+1} 表示流速 V_{i+1} 所对应的断面面积(m^2)。若根据两个断面处泥石流流速来确定衰减系数,则在流速计算过程中往往需要选取适合的流速公式化及其对应的经验系数,而这往往会因不同人选取的公式和系数的不同而使得流速计算结果有较大差异。为此,可尝试将堆积扇上泥石流的瞬时流速通过堆积扇断面这一参数进行确定。根据对泥石流流速衰减系数的定义,将式(4)代入式(1),可得到基于断面面积的计算泥石流流速衰减系数的推导公式

$$\alpha_y = 1 - \frac{A_i}{A_{i+1}} \quad (5)$$

由于在断面测量过程中,会不可避免地因人为因素产生测量误差,这也会导致计算结果的误差。为此,对于某一条泥石流沟而言,在泥石流发生后,可通过对整个堆积扇的断面测量数据求得衰减系数的平均值,这样计算得到的结果会更接近真实情况,即

$$\bar{\alpha}_y = \frac{1}{n} \alpha_y \quad (6)$$

式中: $\bar{\alpha}_y$ 表示泥石流流速沿流向的平均衰减系数; n 表示衰减次数; α_y 表示泥石流流速沿流向方向的衰减系数; A_{i+1} 与 A_i 的比值应介于 0~1 间,因为在泥石流堆积区,从堆积扇顶点到堆积扇终点,泥石流具有横向扩散堆积的特征,故泥石流的泥痕断面面积

是越来越大的。

通常情况下,在某一次泥石流发生过后,往往会在堆积区形成较为明显的泥痕断面,且断面是很容易通过野外调查所获取的,在操作上较为简便。从式(5)中可以看出,泥石流的衰减系数可通过简化后的泥石流堆积扇断面面积的变化来确定。在野外测量泥石流堆积扇断面面积的时候,确定各条断面面积之间的间距是关系到计算精度的重要环节。距离越长,数据量就会越少,精度也就会越低;而距离太短,则难以体现地形的变化特征,反而会在一定程度上增大误差。根据 Marcel 等(2006)的研究,测量泥石流泥痕断面面积的间距介于 10~20 m 是最能反应泥石流堆积特征的^[11]。

3 泥石流潜在冲出距离的确定

通过对泥石流流速衰减系数的定义和计算公式可以看出,通过某次泥石流发生后的堆积扇断面面积测量和计算,即可得到该次泥石流的流速衰减系数。由于在计算过程中 $V_{i\text{终}}$ 的值不可能等于 0,为了能求解得到 n 的具体值,结合泥石流流速的精度考虑,设定当 $V_{i\text{终}}$ 的值 ≤ 0.001 时,表示泥石流停止流动,即认为泥石流停止运动或流速无限接近于 0,即

$$\lim_{n \rightarrow \infty} V_1 \times (1 - \bar{\alpha}_y)^n \leq 0.001 \quad (7)$$

式中 V_1 表示泥石流在沟口时的初始速度; n 表示次方根,即表示泥石流从 V_1 衰减到接近 0 ($V_{i\text{终}} \leq 0.001$ m/s) 时的衰减次数; $\bar{\alpha}_y$ 表示泥石流流速的平均衰减系数。

流速的平均衰减系数根据公式(7)求解得到衰减系数 n 的值后,泥石流在堆积扇的上的纵向冲出距离(D_y)即可通过式(8)计算得到

$$D_y = n \times d \quad (8)$$

式中 d 表示野外测量断面之间的间距,最佳取值范围是 10 m $\leq d \leq$ 20 m; 式中其他符号的意义同上。

4 实例研究

以四川省泸定县杵坭乡金华村干沟泥石流为例,该沟在大渡河右岸,地理位置 $29^\circ 48' 12.3'' \sim 29^\circ 47' 20.8''$ N、 $102^\circ 10' 13.0'' \sim 102^\circ 12' 22.8''$ E,流域面积 2.0 km^2 ,主沟长 2.8 km,无支沟发育。流域最高点海拔 3 460 m,沟口海拔 1 260 m,相对高差 2 200 m,沟道平均纵坡 515‰。干沟流域呈上陡下缓的地形

特征, 上段(海拔 1 500 ~ 3 460 m)是清水区, 沟道两岸多为基岩出露。中段(海拔 1 320 ~ 1 500 m)为物源区, 左岸有基岩出露, 右岸多位冰碛物; 下段(海拔 1 260 ~ 1 320 m)主要为泥石流的堆积区, 呈扇形状, 扇顶角 35° , 扇体纵坡 9.8° , 纵轴长 285 m, 扇体末端长 280 m, 与大渡河相接。干沟在 2005 年暴发泥石流后, 对沟口公路和耕地造成破坏, 并对大渡河造成挤压(图 3)。

2011 年, 笔者对干沟泥石流开展了详细调查, 该沟为高频中易发的粘性泥石流。根据粘性泥流通用公式计算^[12], 得到干沟泥石流在沟口的速度为 10 m/s。同时, 在干沟泥石流堆积扇上以 10 m 的间距开展断面测量, 断面编号从沟口开始往下游以此为 1 ~ 19, 共获取 19 个野外剖面测量数据。通过野外剖面数据的室内分析和计算发现, 由于受到泥石流堆积区地形的影响, 泥石流在堆积扇上扩散时, 其断面面积并不是呈现均一的递增特征。由于这些剖面数据则会影响到计算结果。为此, 在计算过程中, 将与前后相比呈非递增的 4 个断面数据进行取舍, 共得到的实际有效数据为 15 个(表 1)。

将干沟泥石流在堆积扇顶的初始速度 $v_1 = 10$

m/s 和平均衰减系数 $\bar{\alpha}_y = 0.23$ 代入到公式(7)进行计算, 当衰减到 $n = 35$ 次时, 流速的值 < 0.001 。即看作流速无限接近于 0, 泥石流停止运动。再将 $n = 35$ 和干沟测量断面的间距 $d = 10$ m 代入公式(8)可计算得到干沟泥石流冲出距离为 $D_y = 35 \times 10 = 350$ m。根据实测, 干沟泥石流的现有堆积扇纵轴长为 285 m, 计算值比现有堆积扇实际长度长 65 m。这一说明干沟泥石流在冲出后, 进入大渡河并对河道造成一定程度挤压, 大渡河的存在无疑限制了泥石流的冲出距离。

从图 4 中可以看出, 干沟泥石流在流速 > 2 m/s 的区间值内, 流速的衰减极为显著, 这可能是流速在受到突然开阔的堆积区地形变化时的影响; 而当流速小于 1 m/s 时, 流速的衰减极为缓慢, 这可能与干沟泥石流的重度有关。

5 结论与讨论

1. 通过对干沟泥石流的实例计算和分析可以看出, 泥石流流速的衰减并不是沿程均一的, 在流速衰减图上是呈上陡下缓的特征(见图 4)。泥石流在



图 3 干沟泥石流堆积区特征

Fig. 3 The character of Gangou debris flow inundate area

表1 干沟泥石流堆积扇断面特征及衰减系数计算表

Table 1 The cross sections and velocity attenuation coefficient of Gangou debris flow

断面编号	断面面积 /m ²	相邻两断面面积 变化量/m ²	衰减系数 (α_y)	备 注
1	25	12	0.48	
2	37	17	0.46	
3	54	5	0.09	
4	59	7	0.12	
5	66	4	0.06	
6	70	39	0.56	
7	45	无效数据	-	受地形影响断面
8	34	无效数据	-	受地形影响断面
9	69	无效数据	-	受地形影响断面
10	109	11	0.10	
11	120	8	0.07	
12	84	无效数据	-	受地形影响断面
13	128	18	0.14	
14	146	11	0.08	
15	157	24	0.15	
16	181	166	0.92	
17	347	26	0.07	
18	373	85	0.23	
19	458			
平均衰减系数值($\bar{\alpha}_y$)			0.23	

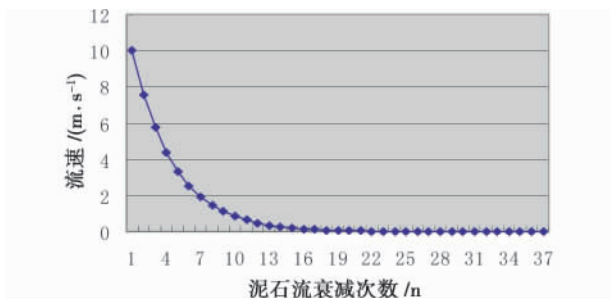


图4 干沟泥石流流速在堆积区的衰减特征

Fig.4 The attenuation character of Gangou debris flow velocity in inundate area

流速大于初始流速 15% 的区间值内 , 流速的衰减极为显著。而当流速小于初始速度的 15% 时 , 流速的衰减极为缓慢。这种特征主要受到堆积区地形变化 (沟口地势突然开阔) 的影响 , 这也是我国山区泥石流运动过程中普遍存在的一种客观现象。

2. 应用流速衰减系数方法所计算的干沟泥石

流冲出距离要比其现有的实际堆积区长度大约 1/5 , 这表明 , 干沟泥石流冲出后会 对大渡河造成一定程度的挤压。通过对 2005 年干沟泥石流的调查 , 该次泥石流发生后冲入大渡河 , 并对大渡河造成了一定程度的挤压 , 说明计算结果与实际的调查情况基本一致 , 这也从另一方面验证了基于流速衰减系数的计算方法的合理性。

3. 泥石流在沟道的束流作用下冲出沟口 , 受到地形突然开阔的影响 , 流速的衰减必然是客观存在的事实。以流速的衰减系数作为确定泥石流的冲出距离具有一定的理论和实践意义。文中将泥石流堆积扇的形态假设为理想的平坦扇形状 , 而事实上 , 泥石流的堆积扇并不是这么理想化的 , 这样估算得到的泥石流危险区范围会偏大。但从泥石流防治和风险分析的角度看 , 计算值偏大是合理的 , 因为这样可以在一定程度上使得安全区的范围减小 , 从而起到降低泥石流灾害风险的作用。

参考文献(References)

[1] Kang Zhicheng , Li Zhuofen , Ma Ainai , et al. Debris flow research in China[M]. Beijing: Science Press , 2004 [康志成 李焯芬 马蔼乃 等. 中国泥石流研究[M]. 北京: 科学出版社 , 2004]

[2] Wei Fangqiang , Hu Kaiheng , J L Lopez , et al. The method and application of momentum partitions in debris flow hazards [J]. Chinese Science Bulletin , 2003 48(3) : 298 - 301 [韦方强 , 胡凯衡 , J L Lopez 等. 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]

[3] Tang Chuan. Numerical simulation of debris flow inundation on the alluvial fans and its prediction model of the risk areas [J]. Journal of Soil and Water Conservation , 1994 8(1) : 11 - 15 [唐川. 泥石流堆积泛滥过程的数值模拟及其危险范围预测模型研究 [J]. 水土保持学报 , 1994 8(1) : 11 - 15]

[4] Carlos Pirmez , Jeffrey Marr , Craig Shipp , et al. Observations and Numerical Modeling of debris flows in the Na Kika Basin , Gulf of Mexico [C] // Offshore Technology Conference , Houston , Texas , U. S. A , 2004 , May 4 (3 - 6) : 1 - 13

[5] Sosio , M Pozzoni , C Ambrosi et al. Modeling the debris flow expansion on alluvial fan areas: A comparison of different modeling approaches [J]. Geophysical Research Abstracts 2006 8: 304 - 311

[6] O'Brien J S , Julien PY , Fullerton W T. Two-dimensional water flood and mudflow simulation [J]. Journal of Hydraulic Engineering , 1993 , 119: 244 - 261

[7] Mc Ardell B W , Cesca M , Huggel C , et al. Numerical modeling of debris flow runout in the Swiss Alps [J]. Geological Society of America Abstracts with Programs , 2007 39: 438 - 445

[8] González E , Herreros M I , Pastor M , et al. Discrete and continuum approaches for fast landslide modeling [R]. Numerical Modeling in Micromechanics via Particle Methods , Proceedings of the 1st Inter-

- national PFCSymposium ,Gelsenkirchen. Lisse , AA Balkema ,2003: 307 – 313
- [9] Miyazawa N , Tanishima T , Sunada , et al. Debris-flow capturing effect of grid type steel-made sabo dam using 3D distinct element method[C]// Proceedings of the Third International Conference on Debris Flow Hazard Mitigation , Netherlands 2003: 527 – 538
- [10]McArdell B W , Cesca M ,Huggel C , et al. Numerical modeling of debris flow runout in the Swiss Alps [J]. Geological Society of America Abstracts with Programs 2007 39: 438 – 445
- [11]Marcel Hürlimann , Ramon Copons , Joan Altimir . Detailed debris flow hazard assessment in Andorra: a multidisciplinary approach [J]. Geomorphology ,2006 78: 359 – 372
- [12]Wang Jikang , Huang Rongjian , Ding Xiuyan. Debris flow prevention technology[M]. Beijing: China Railway Press ,1996 [王继康 ,黄荣鉴 ,丁秀燕. 泥石流防治工程技术[M]. 北京: 中国铁道出版社 ,1996]

Debris Flow Run Out Distance Prediction Based on the Velocity Decreasing Coefficient

TIE Yongbo

(Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources ,Chengdu 610081 ,China)

Abstract: The prediction of debris-flow run out distance is crucial to it's hazards assessment and mitigation planning. Based on the phenomenon of debris flow velocity decreasing in inundate area ,this paper give the general idea of attenuation coefficient. After the definition interpreting and the formula constructing of attenuation coefficient , this paper put forward a method to debris flow run out distance prediction based on the definition of velocity attenuation coefficient. Finally ,take Gangou debris flow which locate in Luding country (Sichuan province) as an example to calculating it's run out distance. The result show that when the velocity of debris flow is higher than 15% of beginning velocity , the decreasing degree of debris flow velocity is obvious , and when the velocity of debris flow is lower than 15% of beginning velocity , the decreasing degree of debris flow velocity is slow. This research is significance to debris flow hazards assessment and mitigation.

Key words: debris flow; velocity attenuation coefficient; run out distance; prediction method