

# 基于三参数 Weibull 分布的粘性泥石流一次总量 计算模型

李俊<sup>1</sup>, 陈宁生<sup>2</sup>, 赵苑迪<sup>1</sup>

(1. 四川理工学院土木工程学院, 四川 自贡 643000; 2. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041)

**摘要:**一次泥石流总量是粘性泥石流稳、拦、排防治工程的重要设计参数,如何提高一次泥石流总量的计算精度,是急需解决的问题。以云南省东川县蒋家沟 1987~1996 年 73 场粘性泥石流数据为统计基础,发现三参数 Weibull 分布适用于描述粘性泥石流阵性流量的分布特征。其次,基于粒子群算法和三参数 Weibull 分布建立新的粘性泥石流一次总量计算模型,其模型输入参数为泥石流实际调查中较易获取的最大洪峰流量  $Q_{\max}$  和泥石流运动时间  $T_s$ 。最后,采用蒋家沟 1997~2004 年 53 场粘性泥石流数据验证该模型的适用性,并与已有方法进行比较。结果表明:基于三参数 Weibull 分布的粘性泥石流一次总量统计模型的相对误差、最大误差、均方根误差,分别为 44.24%、89.08%、 $21.21 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,该模型相对误差比陈宁生模型的相对误差低 29.62%,比泥石流规范方法的相对误差低 105.91%,表明模型可用于确定蒋家沟粘性泥石流一次总量。

**关键词:**蒋家沟;粘性泥石流;一次泥石流总量;粒子群算法;三参数 Weibull 分布

**中图分类号:**TB16

**文献标志码:**A

## 引言

粘性泥石流是由宽级配土体构成的固液气三相流体,其运动过程多呈阵性流态,对具有阵性流态的粘性泥石流也称阵性泥石流<sup>[1-5]</sup>。这种高流速(4 m/s ~ 8 m/s)、冲击力大和搬运固体物质能力强的泥石流对世界各地山区城镇、交通和矿山等极具威胁。例如 1999 年 11 月 15~16 日委内瑞拉 Nianguaa 城暴发了世界上规模最大的粘性泥石流,造成 30000 人死亡和严重的经济损失<sup>[6]</sup>。在中国西南山区,尤其是汶川地震、芦山地震和鲁甸地震后,多处暴发的粘性泥石流均对城镇、公路和

矿山造成了严重的经济损失和人员伤亡<sup>[7-13]</sup>。为了减轻粘性泥石流危害,世界各地广泛采用了拦挡坝和排导槽等泥石流稳、拦、排防治工程。

粘性泥石流的一次总量是粘性泥石流稳、拦、排防治工程的重要设计参数,但该类泥石流一次总量的准确评估较为困难,尤其是具有阵性流态的粘性泥石流。有关粘性泥石流一次总量计算方法主要有三类,分别为直接观测测量法、经验公式和统计模型。这三类计算方法分别存在如下问题:(1)通过直接测量泥石流堆积区的固体物质得出一次泥石流总量的计算方法只适用于小规模、短历时和高阻力的泥石流沟,其最大缺陷是要求

收稿日期:2018-01-02

基金项目:国家自然科学基金(41671112,41661134012)

作者简介:李俊(1989-),男,四川乐山人,讲师,博士,主要从事山地灾害形成机理及防治技术方面的研究,(E-mail)lijunxiaoyouxiang@163.com

粘性泥石流搬运的固体物质全部堆积于堆积扇上。(2) 一次泥石流总量经验公式主要有五边形法、泥石流防治工程勘查规范提供的方法和 Crosta 方法(表 1)。五边形法和泥石流规范方法在计算粘性泥石流一次总量的过程中存在泥石流运动时间难以估计的问题,而 Crosta 方法只适用国外于局部山区。(3)根据蒋家沟粘性泥石流多年观测数据,陈宁生提出的基于峰值流量和运动时间的一次总量统计模型能够较好地计算粘性泥石流一次总量(表 1),但这种方法仍然存在 2 个问题<sup>[14]</sup>。第一,泥石流间断流历时大于 3 min 的流体视为两场泥石流,这使得某一场完整的粘性泥石流被人为分割,而且在实际应用中泥石流间断历时的调查十分困难。第二,该统计模型中稳定分位点流量与最大峰值流量的回归模型

相关系数存在相关度不高的问题。(4) Donovan 统计了美国西部的 33 次泥石流资料,提出了一种基于概率模型的泥石流总量计算方法,但该模型要求较多的计算参数,需要详细的泥石流基础资料才能计算一次泥石流总量<sup>[15]</sup>。大多数粘性泥石流都以阵性流的形式出现,由于阵性流存在较长时间的断流,因此粘性泥石流一次总量的直接观测测量法和经验公式法的应用受到限制,而且目前的统计模型尚有一定的不足。所以本文结合中国云南省东川县蒋家沟泥石流的阵性泥石流观测资料<sup>[16-17]</sup>,采用粒子群算法和三参数 Weibull 分布建立粘性泥石流一次总量的统计模型,以期能为计算粘性泥石流一次总量提供精度更高的方法。

表 1 粘性泥石流一次总量的计算模型

序号	方法	来源
1988	$Q_c = 0.293 W_c^{0.56}$	Crosta 模型(I) <sup>[18]</sup>
1988	$Q_c = 0.0163 W_c^{0.64}$	Crosta 模型(II) <sup>[18]</sup>
1991	$W_c = 0.246 T Q_c$	周必凡、李德基模型 <sup>[19]</sup>
2006	$M_c = 0.264 T Q_c = K T Q_c$	泥石流防治工程勘查规范 DZ/T0200 - 2006 <sup>[20]</sup>
2011	$W_c = \frac{1}{2} \bar{Q} T_L \bar{Q} = \frac{\Gamma(1 + \frac{1}{r})}{c^{\frac{1}{r}}} r = \frac{\ln 0.5}{\ln(\frac{Q_{0.5}}{Q_{0.75}})} c = \frac{-\ln 0.5}{Q_{0.5}^{0.5}}$ $T_L = 0.1088 \times T_S^{1.1502}$ $Q_{0.5} = 0.3 Q_{max} - 6, R^2 = 0.542$ $Q_{0.75} = 0.5 Q_{max} - 16, R^2 = 0.65$	陈宁生模型 <sup>[21]</sup>

注:  $W_c$  为一次总量,  $m^3$ ;  $Q_c$  为泥石流峰值流量,  $m^3/s$ ;  $Q$  为粘性泥石流各阵峰值流量的平均值,  $m^3/s$ ;  $T_L$  为阵性泥石流各阵行流时间之和,  $s$ ;  $T_S$  为一场阵性泥石流的总时间(包括阵性泥石流行流时间和阵间断流时间,不包括连续流的时间),  $s$ ;  $K$  为修正系数;  $c, r$  为关于阵性泥石流流量 Weibull 分布的两参数;  $Q_{0.5}$  和  $Q_{0.75}$  分别为 50% 和 75% 分位点对应的阵流流量,  $m^3/s$ ;  $Q_{max}$  为最大阵性流量,  $m^3/s$ ;  $R^2$  为线性回归方程的相关度。

## 1 粘性泥石流特征及蒋家沟粘性泥石流数据处理

### 1.1 粘性泥石流的阵性特征

阵性流体最重要的特征是存在断流现象。设阵性流体的运动时间为  $T_s$ , 各阵性流体行流时间之和为  $T_L$  (各阵性流体行流时间为  $T_M$ ), 总断流时间为  $T_D$  (各阵性流体断流时间为  $T_B$ ),  $n$  为一场粘性泥石流的阵次。则  $T_s = T_L + T_D = \sum_{i=1}^n (T_M + T_D)$ 。粘性泥石流具有明显的龙头和龙尾, 流体流动中形态一般都是下游面极陡, 而泥深由启动点急速增加, 短距离内达到峰值再向上游逐

渐降低, 最后为零, 呈三角形(图 1)。

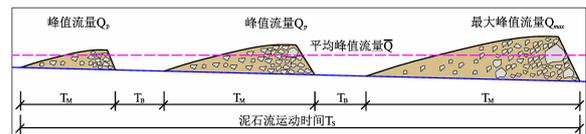


图 1 粘性泥石流运动过程图

### 1.2 数据处理

蒋家沟位于中国云南省东川县, 其流域面积  $48.6 \text{ km}^2$ 。该沟粘性泥石流具有阵性特征, 阵性流体过程完整。本文粘性泥石流中阵性流体的峰值流量和运动时间来源于 1987 ~ 2004 年蒋家沟 126 场现场观测的粘性泥石流数据。泥石流数据观测点设置在蒋家沟泥

石流的顺直稳定沟段,设置上下两个断面,间距 200 m (图 2,改绘于文献[16])。泥石流运动时间为在观测点观测的阵性泥石流全部通过时间。泥石流峰值流量的计算参数为泥石流最大泥深、断面宽度和平均流速。泥石流的最大泥深根据 UL-2 型超声波泥位计自动测量。断面宽度为每次泥石流暴发前后测量的断面宽度平均值。泥石流流速根据粘性泥石流龙头通过间距为 200 m 的观测断面的时间确定。

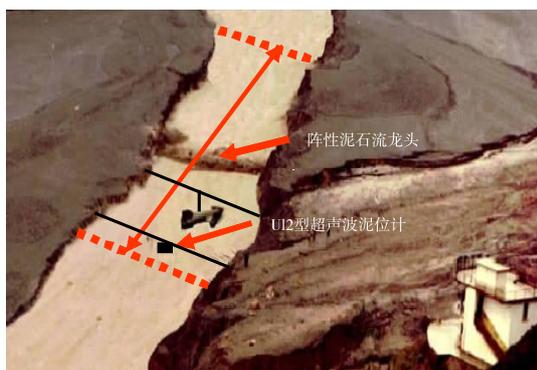


图 2 蒋家沟泥石流数据观测方法

在建立基于三参数 Weibull 分布的粘性泥石流一次总量计算模型前,根据下列原则整理了 1987 ~ 2004 年蒋家沟 126 场粘性泥石流数据:(1) 只计阵性流体,扣除连续流体;(2) 将符合条件(1)的阵性流体持续阵数大于或等于 15 次的一场泥石流数据全部选用,小于 15 次阵数的一场泥石流数据不采用,因为阵次数目较少的粘性泥石流不能反映流体总体特征。按以上原则,这 126 场粘性泥石流中的阵性流体数据都可以用于模型建立和模型验证。

## 2 方法

本文以云南省东川县蒋家沟 1987 ~ 1996 年 73 场粘性泥石流数据为统计基础,引入三参数 Weibull 分布描述阵性流量的分布特征,并采用粒子群算法计算阵性流量的 Weibull 分布参数。三参数 Weibull 分布是一种比两参数 Weibull 分布更为完善的概率分布,且三参数模式比两参数模式有更高的拟合精度。在拟合随机数据时三参数 Weibull 分布有很大的灵活性,对不同形状的频率分布有很强的适应性,当形状参数取不同值时,它可以等效或接近于正态分布或对数分布。在 73 场 Weibull 分布函数的基础上,采用指数回归模型确定最

稳定分位点,即分位点流量与最大峰值流量回归方程相关度最高的分位点。基于最稳定分位点流量和三参数 Weibull 分布建立了基于三参数 Weibull 分布的粘性泥石流一次总量统计模型,其模型输入参数为最大峰值流量  $Q_{max}$  和泥石流运动时间  $T_s$ ,这两个参数在泥石流实际调查容易获取。最后根据蒋家沟 1997 ~ 2004 年 53 场粘性泥石流数据验证该模型的正确性,并比较该模型与目前已有模型的相对误差等。本文的技术路线如图 3 所示。

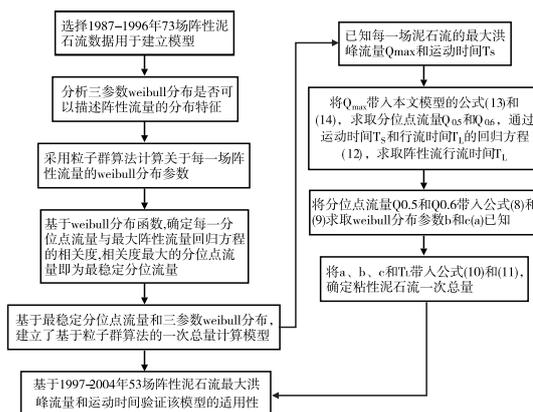


图 3 基于三参数 Weibull 分布的一次总量统计模型

### 建立流程图

#### 2.1 最稳定 Weibull 分位点流量的粒子群算法

将 1987 ~ 1996 年每一场的阵性流量按数值大小进行分组,每一阵为一个频次,频数与每一场统计总次数的比值为频率。本文共统计了 73 场粘性泥石流的频率,并绘制了每一场不同规模的泥石流流量与频率的曲线,如图 4 所示。这 73 场的流量和频率曲线共有两种分布,一种呈负偏,共 65 场次,一种呈正偏态或对称分布,共 8 场次。各种分布和泥石流流量与频率曲线吻合度的分析结果显示 Weibull 分布更能反映泥石流流量的分布特征,三参数 Weibull 分布比二参数 Weibull 分布在描述正偏态、负偏态和对称分布等方面更加具有自由度高和可塑性大的优点<sup>[22-24]</sup>,所以引入三参数 Weibull 分布描述这 73 场阵性泥石流流量分布,三参数 Weibull 分布的概率密度函数为:

$$f(x) = \frac{c(x-a)}{b^c} \exp\left[-\left(\frac{x-a}{b}\right)^c\right] \quad (1)$$

式中,  $x$  为阵性泥石流流量,  $m^3/s$ ;  $a$  为位置参数;  $b$  为尺度参数;  $c$  为形状参数; 且  $b > 0, c > 0$ 。

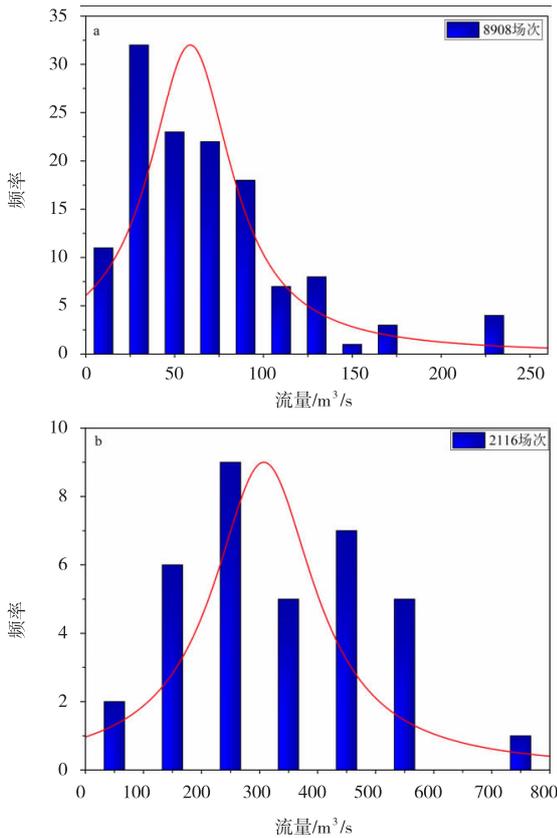


图 4 阵性泥石流流量 - 频数曲线图

Weibull 分布的三参数可通过粒子群算法准确求解。该算法是一类基于群体智能的算法。Weibull 分布三参数计算:

$$\begin{cases} X_j^{k+1} = X_j^k + V_j^{k+1} \\ V_j^{k+1} = \omega V_j^k + c_1 r_1 (pbest_j^k) + c_2 r_2 (gbest_j^k - X_j^k) \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $x_j^{k+1}$  为第  $j$  个粒子的第  $k+1$  次迭代位置;  $V_j^{k+1}$  为第  $j$  个粒子的第  $k+1$  次迭代速度;  $pbest_j^k$  为第  $j$  个局部最优解的第  $k$  次迭代位置;  $gbest_j^k$  为第  $j$  个全局最优解的第  $k$  次迭代位置;  $r_1$  和  $r_2$  取值介于  $0 \sim 1$ ;  $c_1$  和  $c_2$  为学习因子,  $\omega$  为惯性权重系数。

$$\begin{cases} \min f(a', b', c') = \min \sum_i^n \left[ F(x_i, a', b', c') - \frac{i}{n+1} \right]^2 \\ \text{s.t. } b > 0, c > 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $i = 1, 2, \dots, n$ 。令初始粒子的位置为:

$$X^1 = \begin{bmatrix} a_1^1 & b_1^1 & c_1^1 \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ a_N^1 & b_N^1 & c_N^1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中,  $N$  为粒子个数。将  $X^1$  带入公式(4)得:

$$Z^1 = \begin{bmatrix} z_1^1 \\ \cdot \\ z_N^1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

当  $\sum_{i=1}^n (z_i^{k+1} - z_i^k) < \eta$  或者  $k \geq N_{\max}$  ( $\eta$  为最小分布函数值误差,  $N_{\max}$  为迭代次数), 则得出每一场阵性泥石流的最优 Weibull 三参数  $a'$ 、 $b'$  和  $c'$ 。在获取 73 场泥石流的  $a'$ 、 $b'$ 、 $c'$  的基础上, 三参数 Weibull 分布函数的数值表达式为:

$$F(x) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{x - a'}{b'} \right)^{c'} \right] \quad (6)$$

令  $Q_m$ 、 $Q_n$  是一次泥石流流量过程线上的最稳定  $m$ 、 $n$  分位点流量, 且这两个分位点流量和阵性流体的最大值峰值流量具有最高的指数回归模型相关度。在获取每一场泥石流的  $a'$ 、 $b'$ 、 $c'$  值后, 可求出  $0 \sim 1$  分位点对应的分位点流量, 并拟合各分位点流量与每一场阵性流体的峰值流量最大值的回归方程, 寻找这 73 个回归方程的最大相关度, 相关度最大的两个分位点即为最稳定的两个分位点。指数回归方程的表达式:

$$Q_f = D \times e^{-\frac{Q_{\max}}{E}} + F \quad (7)$$

式中,  $Q_f$  为某分位点对应的分位点流量,  $m^3/s$ ;  $Q_{\max}$  为每一场阵性流体的峰值流量最大值;  $D$ 、 $E$ 、 $F$  为回归模型参数。

## 2.2 基于三参数 Weibull 分布的一次总量计算模型

将 1987 ~ 1996 年每一场阵性泥石流的最大流量带入公式(7), 得出两个最稳定分位点流量, 将这两个分位点流量带入式(8)和式(9), 得出 Weibull 分布的  $b$  值和  $c$  值, 粒子群算法的计算结果显示 75 场的  $a$  值均为  $-2500$ 。

$$\ln b = \frac{\ln(-\ln(m)) \ln(x_m - a) - n \ln(x_n - b)}{\ln(-\ln(m)) - \ln(-\ln(n))} \quad (8)$$

$$c = \frac{\ln(-\ln(m))}{\ln\left(\frac{x_m - a}{b}\right)} \quad (9)$$

采用三参数 Weibull 分布的数学期望表示式(1)中的平均峰值流量  $\bar{Q}$  计算:

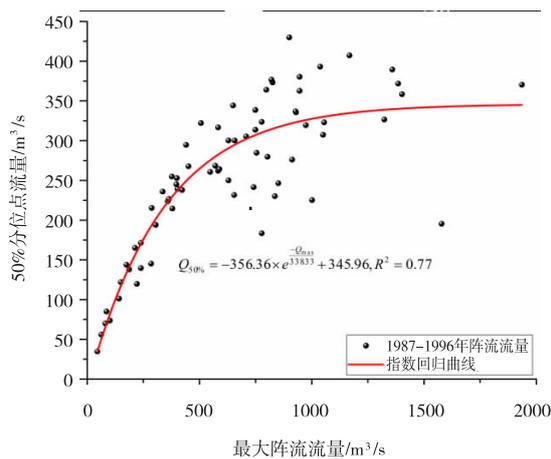
$$\bar{Q} = a + b \Gamma \left( 1 + \frac{1}{c} \right) \quad (10)$$

一场粘性泥石流的一次总量计算公式:

$$W_c = \frac{1}{2} \bar{Q} T_L \quad (11)$$

式中,  $W_c$  为一次泥石流总量,  $m^3$ ;  $\bar{Q}$  为各阵阵性泥石流峰值流量的平均值,  $m^3/s$ ;  $T_L$  为泥石流行流时间, 其值等于各阵次的行流时间之和,  $s$ 。通过统计 1987 ~ 1996 年 71 场粘性泥石流获取了阵性流体行流时间  $T_L$  和泥石流运动时间  $T_s$  的数据, 通过二元回归分析,  $T_L$  与  $T_s$  的二次回归方程为:

$$T_L = 1199.55 - 0.21 \times T_s + 1.25 \times 10^{-5} \times T_s^2,$$



$$R^2 = 0.56 \quad (12)$$

### 3 最稳定分位点计算结果与模型验证

#### 3.1 最稳定分位点

基于粒子群算法计算结果, 一次总量模型的最稳定三参数 Weibull 分位点为 50% 和 60%, 这两个分位点的阵性流量和最大阵流流量的回归曲线如图 5 所示, 其回归方程分别如公式 (13) 和公式 (14) 所示。

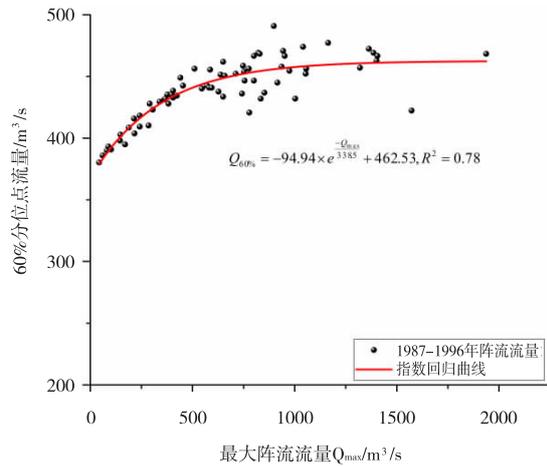


图 5 最稳定分位点流量和最大阵流流量的指数回归方程

$$Q_{50\%} = -356.36 \times e^{-\frac{Q_{\max}}{338.33}} + 345.96, R^2 = 0.77 \quad (13)$$

$$Q_{60\%} = -94.94 \times e^{-\frac{Q_{\max}}{338.33}} + 462.53, R^2 = 0.78 \quad (14)$$

由图 5 可知, 50% 和 60% 分位点流量与最大阵流流量的相关度均大于 0.77, 这说明 50% 和 60% 分位点流量与最大洪峰流量  $Q_{\max}$  具有良好的相关性。

#### 3.2 模型验证

模型验证的数据来源于蒋家沟 1997 ~ 2004 年 53 场粘性泥石流的洪峰流量、泥石流运动时间和实际泥石流总量 (表 2)。根据本文模型 (式 11)、陈宁生模型、泥

石流规范方法、Crosta 模型计算得出粘性泥石流的一次总量, 并比较各种方法的相对误差、最大误差和均方根误差 (表 3), 相对误差  $E_r$  和均方根误差  $RMSE$  公式为:

$$E_r = \frac{|W_c - W|}{W} \times 100\% \quad (15)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{(W_c - W)^2}{N}} \quad (16)$$

式中,  $W_c$  为模型计算的一次总量,  $m^3$ ;  $W$  为实际粘性泥石流总量,  $m^3$ ;  $N$  为粘性泥石流场次总数。

表 2 模型验证数据

场次	运动时间 $T_s/s$	最大峰值流量 $Q_{\max}/(m^3/s)$	实际泥石流总量 $W/m^3$	本文模型	陈宁生 模型	规范方法	Crosta 模型
9703	8055	818.8	125157	117633	29137.4	1741195	1426019
9705	32531	1332.8	763347	1337956	475944.9	11446332	3403765
9706	8721	856.8	267941	135738.1	34723.1	1972648	1546347
9708	9339	899.9	469833	153733.3	40736.3	2218700	1687987
9709	14438	1341.6	305517	336415.3	120283.1	5113685	3444001
9710	6915	971.0	398618	93276.02	26121.9	1772619	1933491
9711	20759	1282.5	578531	621838.5	214727.4	7028582	3177785

9713	5020	699.9	246121	50956.62	11317.5	927563	1077565
9714	6557	699.7	318747	80236.93	17817.1	1211214	1077015
9715	9363	743.8	411911	149038	34516.8	1838549	1201220
9716	5544	622.2	79688	58583.2	12015.2	910662	873339
9717	9517	770.0	342464	154340.1	36615.2	1934616	1277820
9803	5678	740.9	145246	63629.71	14696.7	1110603	1192869
9805	4740	548.1	57909	43296.84	8162.6	685870	696375
9808	4156	1026.6	87141	39536.6	11536.3	1126369	2135622
9809	8436	1680.0	318998	136265.3	58112.6	3741535	5146393
9901	17715	1158.6	464936	471017.9	150491.4	5418494	2650525
9903	11865	954.0	207641	232975.6	64406.7	2988271	1873459
9905	8119	757.1	156099	117400.8	27526.1	1622780	1239844
9906	16223	924.1	485652	394691.8	106613.0	3957802	1769900
9907	7529	1060.0	151491	108978.9	32565.2	2106915	2261278
9908	11203	1350.0	276638	218648.9	78555.7	3992749	3482602
9909	17576	1119.2	780113	463208.6	144175.0	5193160	2491725
2002	10297	695.7	147185	172585.4	38173.8	1891196	1066045
2003	7916	441.9	98011	96458.06	15789.0	923493	474040
2004	5786	554.6	53244	60983.41	11586.8	847154	711191
2007	7339	1137.8	128671	105123.3	33129.6	2204483	2566154
2103	4903	454.9	56279	43160.49	7200.4	588819	499230
2104	4873	1037.4	94564	51886.32	15257.9	1334586	2175907
2105	5202	378.5	28847	44611.31	6592.2	519805	359510
2106	9917	497.7	99841	147340.3	26071.6	1303022	586186
2107	7021	1394.4	59182	98983.82	36468.3	2584582	3689772
2108	8517	649.3	69301	122906.7	25940.8	1459943	942423
2110	3134	277.8	47389	16611.61	1979.3	229845	206933
2113	5586	747.0	152534	61995.55	14400.8	1101604	1210464
2114	2133	180.9	11332	7157.978	597.6	101867	96197
2115	25846	1311.3	629531	903963.9	317542.9	8947451	3306338
2116	2489	780.6	115768	15829.51	3791.4	512929	1309402
2117	49877	1278.9	1851199	2759124	950693.9	16839952	3161874
2203	7246	856.8	121786	99061.83	25341.0	1639010	1546347
2204	15154	629.8	235737	324761.3	67151.9	2519613	892480
2207	9038	863.2	280330	144415.9	37139.9	2059623	1567033
2209	3101	704.2	66438	22499.43	5018.1	576503	1089416
2301	7892	715.2	125669	110501.9	24909.0	1490111	1119990
2302	7908	1425.1	272247	121310.3	45459.1	2975198	3836090
2304	8057	1393.6	73698	125074	46060.0	2964254	3685993
2305	8375	1240.6	117128	132568.3	44623.4	2742967	2994778
2306	5425	1103.8	118693	50436.46	15535.6	1580862	2430832
2307	6691	1250.2	77738	90563.92	30665.2	2208383	3036286
2403	1200	461.5	15486	3963.47	667.5	146203	512238
2404	6052	684.0	52008	69644.17	15227.2	1092846	1034242
2405	6737	279.8	44680	61202.14	7330.9	497643	209601
2407	4491	840.0	109215	43774.11	11041.0	995924	1492621

表3 各方法一次总量计算模型的相对误差、最大误差和

名称	均方根误差			
	本文模型	陈宁生模型	规范方法	Crosta模型(I)
相对误差/%	44.24	73.86	150.15	1231.45
最大误差/%	89.08	96.23	525.30	6134.60
均方根误差/ $\times 10^4 \text{m}^3$	21.21	21.56	23.2	187.5

由表3可知,基于三参数 Weibull 分布的一次总量模型相对误差、最大误差最小,分别为 44.24%、89.08%。该模型的相对误差比陈宁生模型的相对误差降低 29.62%,比泥石流规范方法的相对误差降低 105.91%,这表明基于三参数 Weibull 分布的粘性泥石流一次总量模型具有更好地适用性。另外该模型的均方根误差比其他方法的均方根误差更小,这说明该模型计算的一次总量的离散度更低。

#### 4 结论

根据以上研究,得出以下三方面的结论:

(1)在蒋家沟粘性泥石流观测数据中,基于三参数 Weibull 分布的粘性泥石流一次总量统计模型的相对误差、最大误差、均方根误差,分别为 44.24%、89.08%、 $21.21 \times 10^4 \text{m}^3$ ,该模型比陈宁生模型的相对误差低 29.62%,比泥石流规范方法的相对误差低 105.91%。说明基于三参数 Weibull 分布的一次总量计算方法适用于计算蒋家沟粘性泥石流一次总量。

(2)蒋家沟粘性泥石流的阵性流量较好地服从三参数 Weibull 分布,因而本文采用该法描述阵性流量的分布特征,这为建立基于三参数 Weibull 分布的一次总量模型奠定了基础。

(3)通过粒子群算法,求取了每一场泥石流 Weibull 分布的三参数,并寻求了最相关的分位点流量和最大峰值流量  $Q_{\max}$  的回归方程。另外基于 1987~1996 年粘性泥石流数据,建立泥石流运动时间  $T_s$  和阵性流体行流时间  $T_L$  的幂函数回归方程。

#### 参考文献:

[1] 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] 王兆印.泥石流龙头运动的实验研究及能量理论[C]//

中国水利学会 2001 学术年会论文集.2001:18-26.

- [3] 陈宁生,刘美,刘丽红,等.小流域中-低频泥石流与山洪输沙比例的讨论:以金沙江支流海子沟为例[J].成都理工大学学报:自然科学版,2017,44(2):225-231.  
[4] 李俊,陈宁生,欧阳朝军,等.扎木弄沟滑坡型泥石流物源及堵河溃坝可能性分析[J].灾害学,2017,32(1):80-84.  
[5] 许强,李骅锦,何雨森,等.文家沟泥石流治理工程效果的定量分析评价[J].工程地质学报,2017(4):1046-1056.  
[6] REINALDO G M, JOSÉ L L. Debris flows of December 1999 in Venezuela[M]. Heidelberg: Springer, 2005.  
[7] 崔鹏,陈晓清,张建强,等.“4·20”芦山 7.0 级地震次生山地灾害活动特征与趋势[J].山地学报,2013,31(3):257-265.  
[8] 崔鹏,庄建琦,陈兴长,等.汶川地震区震后泥石流活动特征与防治对策[J].四川大学学报:工程科学版,2010,42(5):10-19.  
[9] 郭晓军,苏鹏程,崔鹏,等.7月3日茂县棉簇沟特大泥石流成因和特征分析[J].水利学报,2012(S2):140-146.  
[10] 屈永平,唐川,卜祥航,等.石棉县熊家沟“7·04”泥石流堵江调查与分析[J].水利学报,2016,47(1):44-53.  
[11] 屈永平,唐川,刘洋,等.四川省都江堰市龙池地区“8·13”泥石流堆积扇调查和分析[J].水利学报,2015,46(2):197-207.  
[12] 余斌,马煜,张健楠,等.汶川地震后四川省都江堰市龙池镇群发泥石流灾害[J].山地学报,2011,29(6):738-746.  
[13] 舒志乐,史宝宁,张德宇.色多沟泥石流动力特征及危险性评估研究[J].四川理工学院学报:自然科学版,2016,29(6):70-74.  
[14] LI J, CHEN N, WANG T, et al. A model for total volume of debris flow with intermittent surges based on maximum peak discharge and movement time[J]. Geosystem Engineering, 2016, 20(4):1-14.  
[15] DONOVAN I P, SANTI P M. A probabilistic approach to post-wildfire debris-flow volume modeling[J]. Landslides, 2017, 14(4):1-16.  
[16] 康志成,崔鹏,韦方强,等.中国科学院东川泥石流观

- 测研究站观测实验资料集[M].北京:科学出版社,2006.
- [17] 张军,熊刚.云南蒋家沟泥石流观测资料集(1987-1994)[M].北京:科学出版社,1997.
- [18] JOHN E C,ROBERT L S.The formation and failure of natural dams[J].Geological Society of America Bulletin,1988,100(7):1054-1068.
- [19] 周必凡.泥石流防治指南[M].北京:科学出版社,1991.
- [20] DZ/T0239,泥石流灾害防治工程勘查规范[S].
- [21] Chen NS,Yang CL,Zhou W,et al.A new total volume model of debris flows with intermittent surges:based on the observations at Jiangjia Valley,southwest China[J].Natural Hazards,2011,56(1):37-57.
- [22] 张文明,董增川,朱成涛,等.基于粒子群算法的水文模型参数多目标优化研究[J].水利学报,2008,39(5):528-534.
- [23] 金良琼.两参数 Weibull 分布的参数估计[D].昆明:云南大学,2010.
- [24] 董胜,韩意,陶山山,等.Weibull 分布参数的粒子群算法估计[J].中国海洋大学学报:自然科学版,2012,42(6):120-125.

## A Model of Total Volume of Debris Flow with Intermittent Surges Based on the Weibull Distribution of Three Parameters

LI Jun<sup>1</sup>, CHEN Ningsheng<sup>2</sup>, ZHAO Yuandi<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Sichuan University of Science & Engineering, Zigong 643000, China; 2. Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** total volume of debris flow with intermittent surges is an important design parameter for the prevention and control of debris flow. The accurate determination of the total volume of debris flow with intermittent surges is an urgent problem to be solved. First, the distribution of debris flow with intermittent surges was described by the Weibull distribution of three parameters based on the statistical data of 73 debris flows with intermittent surges during 1987-1996 at Jiangjia gully in Dongchuan County, Yunnan Province. Secondly, a statistical model of the total volume of debris flow with intermittent surges is established by the particle swarm optimization algorithm (PSO) and the Weibull distribution of three parameters. Lastly, the correctness of the new model is verified according to the data of 53 debris flow with intermittent surges in the Jiangjia gully during 1997-2004, and the accuracy of the new model is compared with that of the existing models. The research results are shown as follows. In the new total volume model of debris flow with intermittent surges based on the Weibull distribution of three parameters, the relative error and maximum error and root mean square error are 44.24% and 89.08% and  $21.21 \times 10^4 \text{ m}^3$ , respectively. The relative error of new model is 29.62% lower than that of a statistical model proposed by Chen Ningsheng. Besides, the relative error of new model is 105.91% lower than that of a standard method of debris flow. Those indicate that new model can be used to determine the total volume of debris flow with intermittent surges in Jiangjia gully.

**Key words:** Jiangjia gully; debris flow with intermittent surges; total volume of debris flow; Particle Swarm Optimization (PSO); Weibull distribution of three parameters