

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2018.06.02

滑坡类泥石流稀化判别模型 ——以西昌市官坝河为例

李俊¹, 陈宁生², 赵苑迪¹

(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, 四川 成都 610041)

摘要: 滑坡类泥石流稀化判别模型是流域内黏性泥石流、稀性泥石流、高含沙水流和洪水分段防治的理论依据。本文以具有代表性的青藏高原东南缘官坝河 1998 年 7 月 6 日滑坡类泥石流为例, 采用相关模型计算该次泥石流从上游到下游共 11 处断面的容重、清水流量、平均松散固体物质厚度和沟道比降。基于上述参数的动态变化过程, 分析泥石流的稀化特征和稀化过程。在此基础上, 建立可预测滑坡类泥石流稀化过程的判别模型。研究结果包括以下三方面: (1) 1998 年官坝河泥石流稀化特征有三点, 分别为泥石流稀化过程发生于水土比大量增加之后、泥石流稀化以后细颗粒比例增加和颗粒级配“窄化”; (2) 官坝河泥石流稀化过程可分为上游的黏性泥石流段, 中下游的过渡性泥石流段, 下游的稀性泥石流段; (3) 泥石流稀化判别模型可以采用三维 Lorentz 公式表示, 该模型能够反映泥石流容重随着水土比增加以及沟道比降减小而逐渐减小的泥石流稀化过程。泥石流稀化判别模型由 2010 年 8 月 13 日汶川震后地区高桥沟、1996 年 8 月 11 日金沙江白鹤滩水电站海子沟滑坡类泥石流案例所检验。

关键词: 滑坡类泥石流; 稀化特征及其过程; 稀化判别模型

中图分类号: P642.23

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2018)06-0008-07

The model of dilution process for landslides triggered debris flows: a case study in Guanba River around Xichang City

LI Jun¹, CHEN Ningsheng², ZHAO Yuandi¹

(1. Sichuan University of Science & Engineering, School of Civil Engineering, Zigong, Sichuan 643000, China;

2. Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract: The theoretical basis for the prevention of debris flow, hyper-concentrated flow and flash flood is the dilution process model of landslides triggered debris flow. This paper takes the July 6, 1998 typical debris flow as an example of Guanba River in Xichang City. We use the experience equations to calculate the density, channel gradient, average depth of loose materials and discharge of water from upstream to downstream of 11 cross sections. This paper analyzes the dilution characteristics and dilution process of debris flow, and establishes an evaluation model for predicting the dilution process of landslide triggered debris flows. The study results are shown as follows. Firstly, the debris flow dilution characteristics in Guanba River in 1998 include three points: the dilution process of debris flow occurs after significant increase of water/soil ratio; the proportion of fine particle is increased after dilution of debris flow; and the size distribution of grain is “narrowed”. Secondly, the dilution process of debris flow can be divided into the upstream viscous debris flow

收稿日期: 2018-02-16; 修订日期: 2018-04-25

基金项目: 国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目(41661134012); 国家自然科学基金面上项目(41671112)

第一作者: 李俊(1989-), 男, 四川乐山人, 岩土工程专业, 博士研究生, 讲师, 研究方向为泥石流防治技术。E-mail: lijunxiaoyouxiang@163.com

section, midstream and downstream transitional debris flow section and downstream diluted debris flow section in Guanba River. Thirdly, the evaluation model for dilution process of landslide triggered debris flow is expressed by the Lorentz equation, and this model reflect the dilution process of landslide triggered debris flows that the density of debris flow will decrease gradually with the increase of water-soil ratio and decrease of channel gradient. The evaluation model for the landslide triggered debris flow has been verified in the debris flow of Gaoqiao gully on August 13, 2010, debris flow of Haizi gully on August 11, 1996 in Baihetan hydropower station.

Keywords: landslide triggered debris flows; dilution characteristic and its process; the evaluation model of the dilution process

0 引言

滑坡类泥石流是滑坡在运动过程中转化形成的泥石流,其性质通常为容重较高的黏性泥石流^[1],也称为滑坡型泥石流。滑坡类泥石流三大主控因素为水源、松散物源和坡度。当沟道两岸坡体提供的水土比增大和沟道比降减小时,滑坡类泥石流将逐渐稀化为高含沙水流或稀性泥石流或洪水,我们把这种过程叫做滑坡类泥石流稀化过程^[2],水土比等于清水流量除以平均松散物源厚度。在中国西南山区,流域面积为30~200 km²的流域滑坡类泥石流稀化现象较为普遍。例如2013年8月13日流域面积为78.79 km²的都江堰龙溪河发生滑坡类泥石流稀化现象^[3]、金沙江上游流域面积为103.6 km²的海子沟近些年经常发生滑坡类泥石流稀化现象^[4]。川藏公路流域面积为86.1 km²的培龙沟发生过滑坡类泥石流稀化现象^[5]。

目前有关泥石流稀化过程和机理虽然做了一些研究,但依然存在以下三方面的问题:(1)学者们明确地定义泥石流稀化指标及其影响因素^[2, 6-8],稀化指标包括容重和含沙量,影响因素有泥深,物源补给量,沟道比降和流速。学者们进一步研究火山泥石流稀化过程和特征^[8-10],还研究滑坡类泥石流的容重和流量及流速变化规律^[11-13],但基于水源、松散物源和坡度等因素动态地揭示泥石流稀化特征和稀化过程的研究依然较少;(2)虽然宏观上我们知道滑坡类泥石流沟道存在稀化过程^[14],但由于缺少相应的调查研究方法,也缺少典型的案例,泥石流稀化的详细物理过程模型依然缺少认识。(3)泥石流稀化过程的预测模型的缺少阻碍了泥石流稀化过程的量化研究和机理的进一步认识,也使得黏性泥石流、稀性泥石流、高含沙水流和洪水的防治工程难以因地制宜地分类实施^[15]。

我们研究水源、松散物源和坡度动态变化下的滑

坡类泥石流稀化过程的模型有助于区分黏性泥石流、稀性泥石流、高含沙水流和洪水的运动范围,从而更好地采取具有针对性的工程防治措施。例如,黏性泥石流的防治以固拦排为主,而高含沙水流、稀性泥石流和洪水的防治以排+清淤为主;又如黏性泥石流的排导比降一般为5%~18%,排导槽多采用梯形或矩形等形式;而高含沙水流、稀性泥石流和洪水的排导比降一般为3%~10%,排导槽以窄深形式为佳^[16]。

作者选择流域面积为137.24 km²的1998年7月6日官坝河泥石流稀化过程为典型案例,分析该次泥石流的稀化特征及其过程,在此基础上,建立泥石流稀化过程的判别模型。

1 方法

官坝河是邛海的一级支流,位于西昌市川兴镇东北方,属青藏高原东南部螺髻山系,东连昭觉县,北接喜德县,西与著名的泸山风景区遥相对应。流域中上游为昭觉县普诗乡、玛增依乌乡,中下游为西昌市大兴乡,下游为西昌市川兴镇。官坝河流域面积137.24 km²,主沟平均纵比降64.4‰,主沟长24.12 km,流域最高海拔3 264 m,在汇入邛海处海拔1 510 m,相对高差达1 754 m。

基于典型的1998年官坝河泥石流案例,采用相关模型计算泥石流11个断面位置的容重、清水流量、泥石流流量、平均松散固体物质厚度和沟道比降,依据容重划分官坝河泥石流稀化过程,通过Lorentz数值模拟建立基于水土比和沟道比降的泥石流稀化判别模型,最后采用典型的2010年8月13日高桥沟泥石流案例检验泥石流稀化判别模型的正确性。本文的技术路线主要包括以下6方面:(1)在1~11断面位置(图1),分别采集了11个1998年泥石流土样,通过筛分试验获取了这11个土样的颗粒级配曲线,以颗粒级配曲线为基础,据泥石流容重计算公式^[17]计算得出1~11断

面的泥石流容重。容重大于 1.70 t/m^3 小于 2.30 t/m^3 的流体是黏性泥石流,容重介于 $1.40 \sim 1.70 \text{ t/m}^3$ 的流体是稀性泥石流。(2)据 1:50 000 官坝河地形图确定 1~11 断面的沟道比降 J 、流域面积 F 、沟道长度 L ,采用推理公式法确定了 I~XI 断面以上的清水流量。(3)基于遥感影像判识和物源体积计算模型^[18],获取 2010 年滑坡松散堆积物、沟道堆积物和坡面侵蚀物的体积,并根据野外调查验证物源体积估算结果。基于以上计算的物源体积,笔者分别统计了 1~11 断面以上的物源总体积,将 11 个断面以上的物源总体积除以汇水面积得出了 1~11 断面以上平均松散固体物质厚度。由文献[19]和文献[20]知,1998 年官坝河泥石流发生前的松散物源量可以采用 2010 年松散物源量近似代替,将各断面以上的清水流量除以平均松散物源厚度得出 1~11 断面以上各位置处的水土比。(4)根据容重划分官坝河泥石流稀化过程。(5)根据 Lorentz 三维数值模型,建立基于水土比和沟道比降的泥石流稀化判别模型。(6)采用 2010 年 8 月 13 日汶川震后地区高桥沟、1996 年 8 月 11 日金沙江白鹤滩水电站海子沟滑坡类泥石流案例检验泥石流稀化判别模型的正确性。

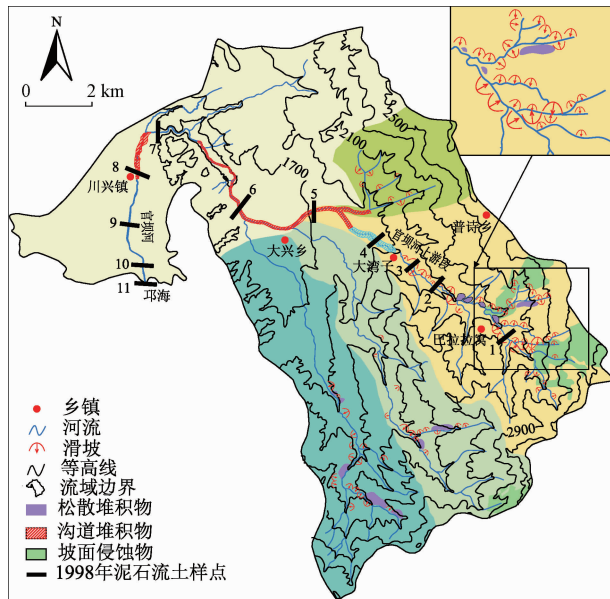


图1 官坝河 11 个断面位置

Fig.1 11 positions of cross sections in the Guanba River

2 泥石流稀化特征及其过程

通过以下分析,得出三点稀化特征,分别为泥石流稀化过程发生于水土比大量增加之后、泥石流稀化以后细颗粒比例增加和颗粒级配“窄化”。基于泥石流

稀化特征和容重值,划分泥石流稀化过程为上游的黏性泥石流段(1~5 段),中下游的过渡性泥石流段(5~6 段),下游的稀性泥石流段(6~11 段)。

2.1 稀化特征

2.1.1 泥石流稀化过程发生于水土比大量增加之后

当松散固体物质补给量突然减少、清水流量突然增加和沟道比降变小时,黏性泥石流不会立即转化为稀性泥石流,而是在继续运动很长的一段距离后才转化为稀性泥石流,也就是说黏性泥石流稀化过程发生于水土比大量增加之后。据图 2 知,清水流量、泥石流流量、平均松散固体物质厚度和沟道比降在 4~5 段内变化幅度均较大,其中清水流量和泥石流流量增幅达 50%、48%,平均松散固体物质厚度减幅达 51%,比降减幅达 13%。然而 4~5 段流体的性质依然为黏性泥石流,究其原因是水土比和沟道比降没有超过黏性泥石流转化为稀性泥石流所需的临界值。在 5~6 段,随着清水流量的继续增加,平均松散固体物质厚度和沟道比降的继续减少,黏性泥石流在运动 4.93 km 后才转化为稀性泥石流。这表明泥石流稀化过程发生于水土比大量增加之后。

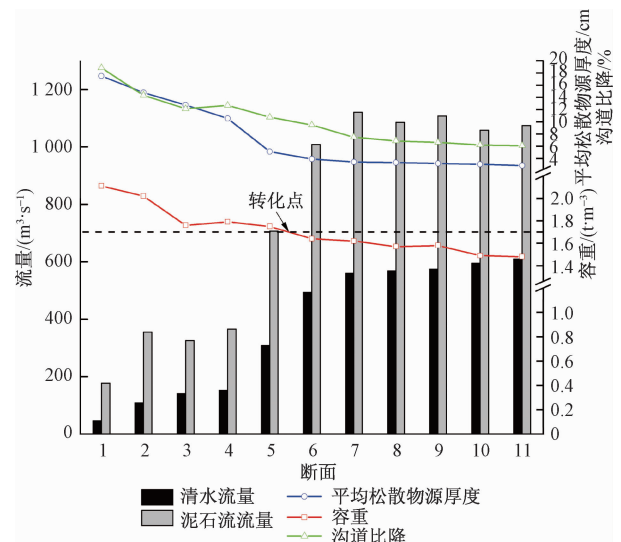


图2 官坝河泥石流稀化过程

Fig.2 Dilution process of debris flows in the Guanba River

2.1.2 泥石流稀化以后细颗粒比例增加并且颗粒级配“窄化”

据图 3 知,泥石流稀化以后出现了细颗粒比例增加的现象。泥石流从断面 1 运动至断面 11 的过程中,砾石含量由 75.5% 逐渐降低为 0,砂粒含量由 15.7% 增加至 48.9%,粉土由 2.5% 逐渐增加为 51.1%,黏土

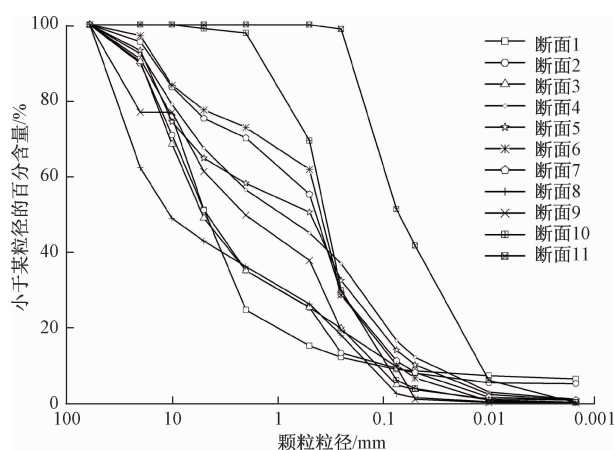


图3 官坝河泥石流颗粒级配曲线

Fig. 3 Particles size distribution of debris flows in the Guanba River

由6.3%逐渐降低为0。泥石流流体砾石和黏土含量逐渐减小,而砂粒和粉土含量逐渐增多的现象说明了泥石流在稀化以后细颗粒比例增加。受泥石流细颗粒比例增加的影响,泥石流颗粒级配逐渐“窄化”。断面1颗粒级配范围包括砾石、砂粒、粉土、黏土,断面5为颗粒级配范围包括细砾石、砂粒、粉土和黏土,断面11颗粒级配范围包括粉土和细砂,无砾石和黏土。断面1~11的土样颗粒级配范围说明泥石流流体的颗粒级

配逐渐“窄化”。泥石流稀化以后细颗粒比例增加及颗粒级配“窄化”的原因有可能是:随着水土比的增加和沟道比降的减小和流体内部黏土颗粒的减少,泥石流流体浓度逐渐降低,固体物质开始有分选地被搬运,粗颗粒因沉积作用而逐渐减少,细颗粒(细砂和粉土)仍能保持悬移,随着泥石流紊动性的增强,更多的细颗粒进入泥石流中。

2.2 稀化过程

根据11个断面的泥石流容重值和稀化特征,划分1998年官坝河泥石流稀化过程(图4)。1~5段为黏性泥石流段,5~6段为黏性泥石流转化为稀性泥石流段,6~11段为稀性泥石流段。在水土比大量增加和沟道比降继续减小的影响下,中下游黏性泥石流逐渐转化为稀性泥石流,其容重急剧减小的主要原因为:在5~6段内泥石流泥深受沟道展宽(官坝河中下游沟道宽度范围为20~80 m)的影响逐渐减小,泥深和沟道比降的共同减小使得黏性泥石流的拖曳力减小,泥石流拖曳力的减小导致了泥石流侵蚀作用变弱,在泥石流不能通过侵蚀作用获得更多固体物质的情况下,麻鸡窝河和新仁寺河大量的低密度水流稀释泥石流体,导致泥石流的容重急剧减小,黏性泥石流转化为稀性泥石流。

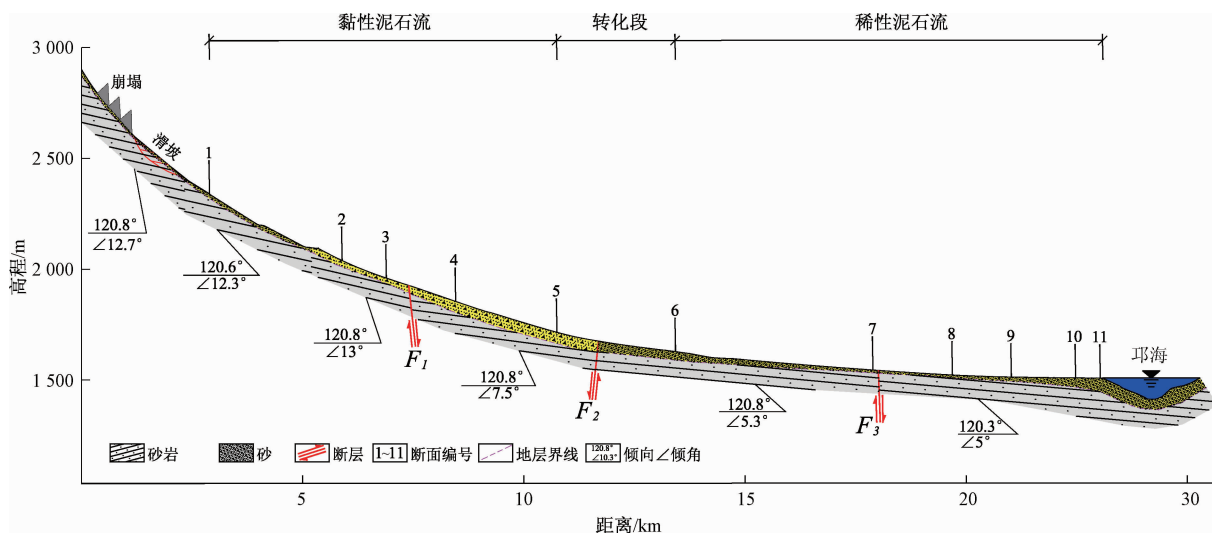


图4 1998年官坝河泥石流稀化过程

Fig. 4 Dilution process of debris flows in the Guanba River in 1998

3 泥石流稀化判别模型

依据泥石流细颗粒含量计算的容重值,我们可以非常容易划分泥石流稀化过程。然而,自汶川地震、芦山地震和鲁甸地震发生后,中国西南山区有非常多的

泥石流流域,这些流域容易发生泥石流稀化现象^[15, 21]。因泥石流细颗粒含量计算容重的方法需要花费大量的人力和物力去搜集中国西南山区泥石流或山洪的土样,所以该方法不适合快速判别泥石流稀化过程。因而目前急需一种快速而稳定的泥石流稀化判

别模型,以便于分段防治黏性泥石流灾害或稀性泥石流灾害。为达到此目的,本文建立了一种基于水土比和沟道比降的泥石流稀化判别模型,其中水土比和沟道比降通过遥感影像和 1:50 000 地形图快速获取,泥石流稀化判别模型的建立过程如下所述。

由第 2 小节知,泥石流稀化的过程与水土比和沟道比降关系密切。基于 Pearson 相关系数法,笔者计算了泥石流容重与水土比和沟道比降的相关系数。拟合结果表明,容重与比降呈正相关性,相关系数为 0.97。容重与水土比呈负相关性,相关系数 -0.89(表 1)。这表明,容重与水土比和比降的相关性较好。通过拟合,可建立基于水土比和比降的泥石流稀化判别模型。

表 1 1998 年官坝河泥石流容重、水土比和比降
Table 1 The density, water soil ratio and channel gradient in the Guanba River in 1998

编号	水土比/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$)	沟道比降/%	容重/($\text{t} \cdot \text{m}^{-3}$)
1	2.65	18.83	2.11
2	7.33	14.33	2.02
3	11.03	12.12	1.76
4	14.46	12.67	1.79
5	60.09	10.74	1.75
6	126.54	9.48	1.64
7	162.65	7.47	1.62
8	171.61	6.88	1.57
9	179.47	6.61	1.58
10	195.70	6.2	1.49
11	213.07	6.09	1.48
相关系数	-0.89	0.97	1.00

泥石流稀化判别模型采用已有的 Lorentz 三维模型,该模型的数学方程为:

$$\gamma'_c = \gamma_0 + \frac{A}{\left[1 + \left(\frac{C_v - C}{\omega_1}\right)^2\right] \left[1 + \left(\frac{J - J_c}{\omega_2}\right)^2\right]} \quad (1)$$

其中, γ'_c ——容重,单位为 $\text{t} \cdot \text{m}^{-3}$;

γ_0 ——最小容重值,取 $1.4 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$;

A ——泥石流最大容重值与最小容重值的差值,单位为 $\text{t} \cdot \text{m}^{-3}$;

C_v ——水土比, $C_v > 0$, 单位为 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$;

C ——泥石流最大容重值对应的水土比;

ω_1 ——0.5 A 对应的水土比最大值;

J ——沟道比降, $J > 0$, 单位为 %;

J_c ——泥石流最大容重值对应的比降;

ω_2 ——0.5 A 对应的比降最大值。

公式(2)是泥石流稀化判别模型的具体表达式。泥石流稀化判别模型的拟合均方差 R^2 为 0.94。这说明该模型的拟合精度较高。泥石流稀化判别模型的适用条件包括 Lorentz 模型的水土比取值范围为 0 ~ 632.62 $\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{cm}$ 和沟道比降取值范围为 0 ~ 21.14%。

$$\gamma'_c = 1.4 + \frac{0.85}{\left[1 + \left(\frac{C_v + 117.46}{316.31}\right)^2\right] \left[1 + \left(\frac{J - 20.49}{10.57}\right)^2\right]} \quad R^2 = 0.94 \quad (2)$$

由图 5 可知,该模型中官坝河泥石流容重随着水土比增加以及沟道比降减小而逐渐减小,基于水土比和沟道比降的泥石流稀化判别模型能够较好地反映 1998 年官坝河泥石流稀化过程。在一定条件下,泥石流稀化判别模型可用于预测中国西南山区滑坡类沟道泥石流的稀化过程。

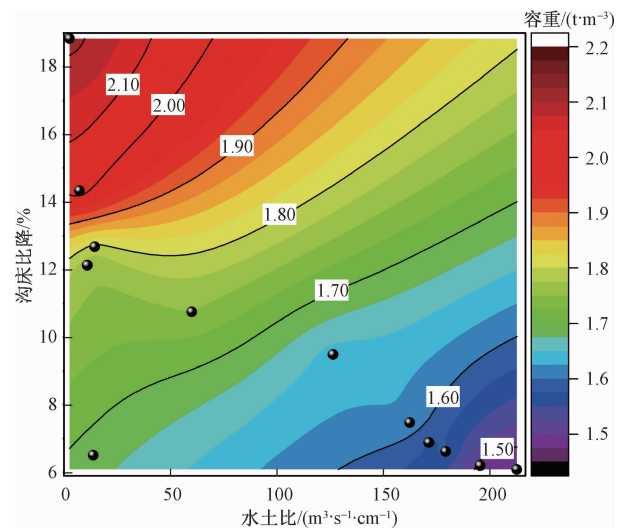


图 5 容重,比降和水土比拟合曲线

Fig. 5 The fitting curve of the density, water soil ratio and channel gradient

4 模型验证

本文选取了龙门山地震山区高桥沟 2010 年 8 月 13 日泥石流、金沙江白鹤滩水电站海子沟 1996 年 8 月 11 日泥石流作为评价泥石流稀化判别模型适用性的案例。高桥沟属绵远河一级支沟,该沟流域面积为 40 km^2 ,主沟道长度为 12.5 km,沟道平均纵比降为 7.4%。2010 年 8 月 13 日高桥沟在强降雨(最大 1 h 降雨量为 70 mm)作用下发生了 50 年一遇的泥石流稀化现象。海子沟位于云南省东北部,流域面积 103.6 km^2 ,主沟长 21.1 km,沟床

平均纵比降为110‰。1996 年 8 月 11 日海子沟在强降雨作用下发生了超 100 年一遇的泥石流稀化现象。

依据文献^[22]提供的高桥沟资料和《金沙江白

鹤滩水电站海子沟泥石流流特性研究报告》提供的海子沟泥石流资料,采用官坝河泥石流稀化判别模型计算高桥沟和海子沟泥石流稀化过程,其计算结果见表 2。

表 2 高桥沟和海子沟泥石流稀化过程计算表

Table 2 The calculation results of dilution processes of debris flows in Gaoqiao Gully and Haizi Valley

沟名	泥石流稀化位置	经纬度	水土比/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$)	沟道比降/ %	计算容重/ ($\text{t} \cdot \text{m}^{-3}$)	实际容重/ ($\text{t} \cdot \text{m}^{-3}$)
高桥沟	中游	N31°29'16.18" E104°05'46.82"	5.72	14.5	1.96	1.91
	中下游	N31°29'21.85" E104°07'3.80"	12.39	9.8	1.76	1.73
	沟口	N31°29'26.98" E104°08'9.20"	16.84	7.4	1.68	1.61
海子沟	毛店子段毛店子桥上游 20m	N27°13'46.16" E102°59'9.21"	12.50	14.1	1.93	1.86
	康家沟与主沟交汇处	N27°13'0.20" E102°58'27.26"	13.49	11.2	1.81	1.75
	海子口	N27°11'38.11" E102°56'9.52"	14.61	6.5	1.66	1.6

由计算结果可知,随着两岸提供的水土比增加和沟道比降的逐渐减小,黏性泥石流在运动过程中逐渐转化为稀性泥石流。泥石流稀化判别模型预测的高桥沟和海子沟泥石流稀化过程与实际稀化过程一致。在这两条泥石流稀化过程案例中,官坝河泥石流稀化判别模型中容重的平均计算误差为 3.2%,这表明泥石流稀化判别模型具有一定的适用性。

此处需要指出的是:由官坝河泥石流典型案例建立的泥石流稀化过程的判别模型只是一个初始性工作,在今后的研究中研究更多的泥石流稀化案例,以期进一步完善可预测泥石流稀化过程的判别模型。

5 结论

(1)1998 年官坝河泥石流稀化特征有三点,包括泥石流稀化过程发生于水土比大量增加之后和泥石流稀化以后细颗粒比例增加和颗粒级配“窄化”。

(2)官坝河稀化过程可分为上游的黏性泥石流段,中下游的过渡性泥石流段,下游的稀性泥石流段。在泥石流不能通过侵蚀作用获取更多的固体物质的情况下,麻鸡窝河和新仁寺河大量的低密度水流稀释泥石流体是黏性泥石流转化为稀性泥石流的主要原因。

(3)Pearson 相关系数法计算结果显示,1998 年官坝河容重与水土比成较好的负相关性,相关系数为 0.89,容重与沟道比降成较好的正相关性,相关系数为 0.97。基于水土比和沟道比降建立了泥石流稀化判别模型,该模型可用三维 Lorentz 方程表示,具体表达式为

$$\gamma'_c = 1.4 + \frac{0.85}{\left[1 + \left(\frac{C_v + 117.46}{316.31}\right)^2\right] \left[1 + \left(\frac{J - 20.49}{10.57}\right)^2\right]}$$
, 拟

合均方差为 0.94。泥石流稀化判别模型能够反映泥石流容重随着水土比增加以及沟道比降减小而逐渐减小的泥石流稀化过程。

参考文献:

[1] R M IVERSON, M E REID, R G LAHUSEN. Debris-flow mobilization from landslides [J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 1997, 25: 85 - 138.

[2] 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.

KANG Zhicheng, LI Zhuofen, MA Ainai, et al. Research on debris flow in China [M]. Beijing: Science Press, 2004.

[3] 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.

QU Yongping, TANG Chuan, LIU Yang, et al. Survey and analysis of the “8.13” debris flows fan in Longchi Town of Dujiangyan City, Sichuan Province [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(2): 197 - 207.

[4] 陈宁生, 胡桂胜, 齐宪阳, 等. 小流域堰塞湖对山洪泥石流的调控模式探讨 [J]. 人民长江, 2015, 46(10): 34 - 37.

CHEN Ningsheng, HU Guisheng, QI Xianyang, et al. Discussion of regulation mode of torrent - debris

- flow by dammed lake in small river basin[J]. Yangtze River, 2015, 46(10): 34–37.
- [5] CHEN N S, CHEN R. Glacial and rainstorm debris-flow in Peilong gully and possibility in its blocking main river [J]. Journal of Mountain Science, 2002, 20(6): 738–742.
- [6] P DASGUPTA. Sediment gravity flow—the conceptual problems[J]. Earth-Science Reviews, 2003, 62(3): 265–281.
- [7] T C PIERSON, J E COSTA. A rheologic classification of subaerial sediment-water flows [J]. Reviews in Engineering Geology, 1987(7): 1–12.
- [8] T C PIERSON. Hyperconcentrated flow—transitional process between water flow and debris flow [M]. Debris-flow Hazards and Related Phenomena. Springer, 2005: 159–202.
- [9] F LAVIGNE. Rate of sediment yield following small-scale volcanic eruptions: a quantitative assessment at the Merapi and Semeru stratovolcanoes, Java, Indonesia [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2004, 29(8): 1045–1058.
- [10] LAVIGNE T C, K M SCOTT. Downstream dilution of a lahar: transition from debris flow to hyperconcentrated streamflow [J]. Water Resources Research, 1985, 21(10): 1511–1524.
- [11] CHEN N S, YUE Z Q, CUI P, et al. A rational method for estimating maximum discharge of a landslide-induced debris flow: A case study from southwestern China [J]. Geomorphology, 2007, 84(1): 44–58.
- [12] PENG J B, FAN Z J, WU D, et al. Heavy rainfall triggered loess – mudstone landslide and subsequent debris flow in Tianshui, China [J]. Engineering Geology, 2015, 186(24): 79–90.
- [13] GUO X J, CUI P, LI Y, et al. The formation and development of debris flows in large watersheds after the 2008 Wenchuan Earthquake [J]. Landslides, 2015, 13(1): 1–13.
- [14] PEDERSON C A, SANTI P M, PYLES D R. Relating the compensational stacking of debris-flow fans to characteristics of their underlying stratigraphy: Implications for geologic hazard assessment and mitigation[J]. Geomorphology, 2015, 248: 47–56.
- [15] 陈宁生, 刘美, 刘丽红. 关于山洪与泥石流灾害及其流域性质判别的讨论[J]. 灾害学, 2018, 33(1): 39–43.
- CHEN Ningsheng, LIU Mei, LIU Lihong. A discussion on how to discriminate the hazard and watershed properties of mountain torrent and debris flow[J]. Journal of Catastrophology, 2018, 33(1): 39–43.
- [16] CHEN J, CHEN X, LI Y, et al. An experimental study of dilute debris flow characteristics in a drainage channel with an energy dissipation structure [J]. Engineering Geology, 2015, 193(2): 224–230.
- [17] 余斌. 稀性泥石流流容重计算的改进方法[J]. 山地学报, 2009, 27(1): 70–75.
- YU Bin. Research on the improved calculating density of less viscosity debris flows[J]. Journal of Mountain Science, 2009, 27(1): 70–75.
- [18] GUZZETTI F, ARDIZZONE F, M CARDINALI, et al. Landslide volumes and landslide mobilization rates in Umbria, central Italy [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2009, 279(3): 222–229.
- [19] WEI X L, CHEN N S, CHENG Q G, et al. Long-term Activity of Earthquake-induced Landslides: A Case Study from Qionghai Lake basin, Southwest of China[J]. Journal of Mountain Science, 2014, 11(3): 607–624.
- [20] CHEN N S, CHEN M L, LI J, et al. Effects of human activity on erosion, sedimentation and debris flow activity-A case study of the Qionghai Lake watershed, southeastern Tibetan Plateau, China[J]. The Holocene, 2015, 25(6): 973–988.
- [21] TANG C, ZHU J, LI W L, et al. Rainfall-triggered debris flows following the Wenchuan earthquake[J]. Bulletin of Engineering Geology & the Environment, 2009, 68(2): 187–194.
- [22] 张书珩. 四川省绵茂路汉清段高桥沟泥石流发育特征及危害性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
- ZHANG Shuheng. Study on development characteristics and perniciousness of Gaoqiao gully debris flow in Hanqing section of Mianmao Highway from Sichuan [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.