

江金涛, 铁永波. 四川安宁河流域姑巴沟泥石流动力学特征与减灾对策[J]. 灾害学, 2015, 30(4): 216–219. [Jiang Jintao and Tie Yongbo. Dynamic characteristics and mitigation of Guba debris flow in Anning Valley, Sichuan Province [J]. Journal of Catastrophology, 2015, 30(4): 216–219.]

四川安宁河流域姑巴沟泥石流动力学特征与减灾对策^{*}

江金涛^{1,2,3}, 铁永波³

(1. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 2. 中国地质科学院, 北京 100037;

3. 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610081)

摘 要: 姑巴沟是四川安宁河流域内最具代表性的典型低频泥石流之一。基于野外调查的基础上, 对姑巴沟泥石流的动力学特征进行了计算, 并对 2011 年泥石流的成因机制进行了分析。研究认为, 姑巴沟泥石流的触发原因是由持续强降雨引发的沟道径流与上游冰湖溢水的综合作用, 水动力补给过程具有复合特征。针对姑巴沟泥石流爆发突然、流体流量大流速高及其威胁对象的分布特征, 提出了针对性的防灾减灾建议, 对揭示姑巴沟泥石流的形成过程及动力学特征具有实际意义, 并可为安宁河流域内其它具有相似孕灾背景的低频泥石流形成机理的认识提供参考。

关键词: 安宁河流域; 低频泥石流; 动力学特征; 冕宁县; 姑巴沟

中图分类号: X43; P642. 23 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000–811X(2015)04–0216–04

doi: 10. 3969/j. issn. 1000–811X. 2015. 04. 037

泥石流是山区常见的一种突发性地质灾害, 按照暴发频率可分为高频、中频和低频泥石流。低频泥石流暴发周期长(30 年以上), 规模大, 危害重, 具有强隐蔽性^[1]。沟口附近居民往往将此类泥石流平缓的堆积扇作为安全地带, 修建人口密集的村舍、工厂和学校等^[2]。较高频泥石流而言, 低频泥石流致灾性更强。1999 年 12 月在委内瑞拉北部阿维拉山区加勒比海沿岸的 8 个州暴发的约 300 年一遇的群发性泥石流, 造成 3 万余人死亡, 直接经济损失达 100 亿美元^[3]; 2010 年 8 月在甘南藏族自治州舟曲县城发生的 400 年一遇的低频泥石流导致该县一半被淹, 造成 1 744 人死亡和失踪, 直接经济损失数亿元^[4]; 2012 年 6 月在四川省宁南县矮子沟发生的特大泥石流, 导致下游基础设施损失惨重, 造成 40 人死亡和失踪, 产生了极大的社会影响^[5]。

研究表明, 四川安宁河流域 5 个县市(喜德、冕宁、西昌、会理、德昌)均有大量泥石流沟分布, 仅冕宁县内就有泥石流沟 143 条, 泥石流沟密度高达 32.1 条/10³ km²^[6–7]。泥石流活动成为该区最常见的地质灾害之一, 常常造成家毁人亡等重大生命和财产损失, 极其不利于当地的稳定与发展。本次研究以具有典型代表性的姑巴沟低频泥石流为例, 通过查明其动力学特征及分析形成机制, 对认识安宁河流域内其他泥石流灾害的成因

及防灾减灾提供科学依据。

1 流域基本概况

姑巴沟位于四川省凉山彝族自治州北部的冕宁县彝海乡境内, 安宁河东, 距冕宁县城城区 NNE 方向约 16 km。流域面积约 66.7 km², 主沟长 10.5 km, 纵比降 202‰。主沟北侧发育有一条较大的支沟(小沟), 其余支沟的流域面积均相对较小。流域内最高海拔 4 630 m, 为安宁河东侧分水岭一小相岭, 常年积雪; 沟口最低海拔 2 102 m, 相对高差 2 528 m。根据其地貌及泥石流物源补给特征, 将姑巴沟划分为清水区、形成区、流通区和堆积区四个部分。清水区海拔 3 249~4 630 m, 呈喇叭状, 利于汇水形成表面径流; 形成区海拔 2 533~3 249 m, V 型谷, 沟岸坡度约 40°, 坡面泥石流广泛发育; 流通区海拔 2 288~2 533 m, 呈 V 型谷, 沟岸坡度 35°, 沟道平直, 利于流泥石流快速冲出; 堆积区海拔 2 102~2 288 m, 纵比降 46‰, 呈 U 型谷, 沟床宽数百米, 泥石流流体物质到达堆积区流速逐减, 开始堆积。如图 1 所示。

2011 年 6 月 16 日 20 时左右, 四川省冕宁县彝海乡遭受 3 h 强降雨袭击, 总降雨量 101 mm,

^{*} 收稿日期: 2015–03–27

修回日期: 2015–05–22

基金项目: 科技部基础性工作专项(2011FY110100–5); 中国地质调查局公益性地调项目(12120113010200)

作者简介: 江金涛(1991–), 男, 湖北新洲人, 硕士研究生, 主要从事环境地质和灾害地貌方向研究。

E-mail: jjang564487079@126.com

并引发泥石流^[8]。暴发泥石流之前,小沟先涨水,大沟紧随其后。主沟两岸受灾情况迥异:左岸布落2人死亡,15人失踪;右岸布里仅受洪水淹没,漫水高出地面1 m。此次泥石流造成当地交通和通信中断,共1 890人受灾。泥石流发生后,当地政府相关部门开展了沟道清淤及简易的河道治理工程,但这些工程难以对其潜在风险进行有效控制,为此,查明该沟泥石流的形成过程及机制,并提出有针对性的防灾减灾措施,最大程度降低泥石流带来的潜在风险极为迫切。

2 泥石流成因及流动力学特征

2.1 姑巴沟泥石流成因分析

以2011年姑巴沟泥石流过程为例,主要从泥石流形成的三个条件:地形、水动力及物源,对该沟泥石流的成因进行分析。

2.1.1 地形特征

姑巴沟支沟发育,相对高差大,平面上呈圈椅状,清水区和形成区纵宽达8 km,沟口仅数百米,这一形态极利于地表径流汇集。沟道较平直,上游呈“V”型谷,跌水和陡坎发育,下游呈“U”型谷。在流域的顶端,位于主沟和小沟的源头各有面积约0.1 km²的冰碛湖。

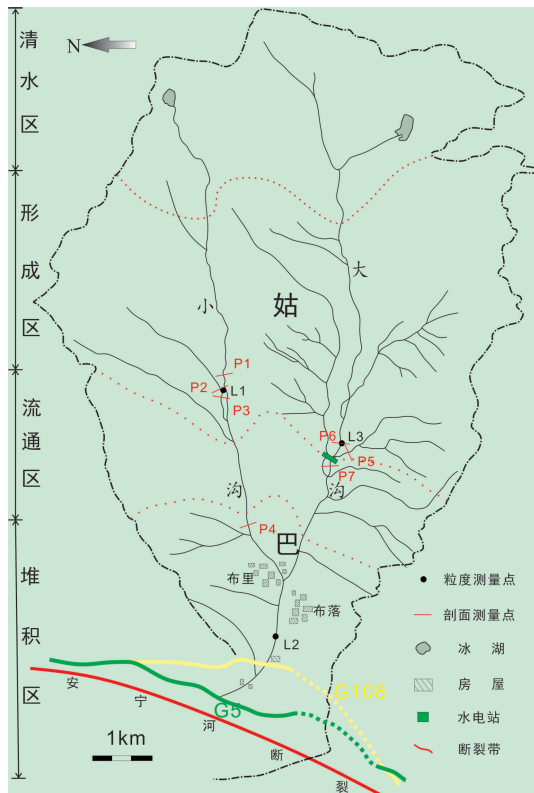


图1 姑巴沟流域形态图

2.1.2 水动力补给特征

流域内具有冕宁县所处区域上的典型亚热带季风气候,降雨集中在6-9月份,常年平均降雨量1 094 mm。16日20时冕宁县突发强降雨,3 h降雨量达101 mm。降雨过程中上游冰碛湖水体溢

出,具有相对较大的势能,对沟道内松散土体的冲刷作用较强。降雨形成的表面径流填充土体孔隙,使之浸润、饱和,并逐渐加大饱和土厚度,土体随后启动奔流。强降雨是激发此次泥石流的主要因素,冰湖溢水在泥石流的形成中有重要作用。

2.1.3 物源补给特征

姑巴沟以及整个安宁河流域受安宁河深断裂带影响明显。断裂带两侧节理裂隙密度达30~60条/m²,岩体破碎,极易风化。姑巴沟内岩性复杂,涵盖了从震旦纪以来的3大岩类和第四纪冰碛物,强风化带厚2~25 m^[7,9]。调查发现海拔范围2 533~3 249 m沟道坡面第四纪残坡积物较厚,是本次泥石流灾害的启动物源;2 288~2 533 m之间的沟床内第四纪冲洪积物和冰碛物受到了沟道径流揭底侵蚀后,沟谷中堆积物在极短的时间内被席卷。流体携带的固体物质如同“滚雪球”一般快速增大,形成这次大规模泥石流。

按动力条件划分,2011年姑巴沟泥石流属于水力类泥石流^[10]。

2.2 动力学参数特征

2.2.1 流体流速

泥石流流速是泥石流的重要属性,在评价泥石流危险性过程中以及防治工程中有重大意义。姑巴沟泥石流土体粘粒含量约5%,产流过程中,与入渗为主的水结合,属粘性泥石流。按照王继康等在1982年提出的粘性泥石流流速经验公式,推导姑巴沟泥石流的流速^[11]:

$$V_c = K_c \cdot H_c^{\frac{2}{3}} \cdot I_c^{0.5} \quad (1)$$

式中: V_c 为粘性泥石流流速,m/s; H_c 为泥石流泥深(或泥石流水力半径 R_c),m; I_c 为泥石流流面(或沟底)坡度,%; K_c 为粘性泥石流流速系数。

本次调查中,一共实测姑巴沟中下游不同部位的7个剖面(P1-P7)。在这些剖面的沟岸,能够清楚地分辨出泥石流发生时留下的泥位。通过实测剖面数据,可以获得泥石流泥深 H_c 和剖面处泥石流流面坡度 I_c 。

各剖面处泥石流流速见表1。剖面P1~P3、P5~P6位于形成区末端,P7位于流通区顶端,P4位于堆积区顶端。各剖面流体流速差异较大,堆积区流体流速降低明显,此时固体物质以淤积为主。受水电站的影响,位于剖面P5下游约500 m的剖面P7,流速相对降低3.85 m/s。

表1 剖面流速

剖面	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
流速/(m/s)	7.70	6.50	8.18	5.68	11.43	8.57	7.58

2.2.2 流量

泥石流流量计算方法:可分为雨洪修正法与形态调查法两种。

(1) 雨洪修正法

雨洪修正法认为泥石流流量为雨洪流量(Q_p)和固体流量(Q_h)之和,自1959年以来,在验证各家泥石流流量计算公式的基础上,考虑粘性泥石流有堵塞因素的实际,将公式改为^[11]:

$$Q_c = Q_p(1 + \phi)D_c \quad (2)$$

式中: Q_c 为泥石流流量, m^3/s ; Q_p 为清水流量, m^3/s 。用泥石流沟所在地区的小径流公式计算清水流量; D_c 为泥石流堵塞系数。粘性泥石流有阵流堵塞, 而稀性泥石流没有; ϕ 为泥石流修正系数。计算法 $\phi = (\rho_c - 1)/(\rho_H - \rho_c)$ (ρ_H 由查表获得^[11])。雨洪法计算泥石流流量见表 2。

表 2 雨洪法计算泥石流流量

项目	姑巴沟		
流域面积 F/km^2	66.7		
沟长 L/km	10.5		
平均坡降 $J/\%$	202		
泥沙修正系数 ϕ	0.52		
泥石流堵塞系数 D_c	2		
设计频率 $p/\%$	5	2	1
暴雨洪峰流量 Q_p	619.15	778.07	900.05
泥石流峰值流量 Q_c	1882.23	2365.32	2736.16

(2) 形态调查法

调查泥石流泥痕和沟槽形态断面特征, 根据流速 (v_c) 的计算结果, 与泥石流通过断面面积 (W_c) 相乘。按下式计算泥石流流量 Q_c :

$$Q_c = W_c \times v_c \quad (3)$$

在计算过程中, 分别选取了小沟和主沟上的泥石流剖面 P1、P7(表 3)。

表 3 形态调查法计算泥石流流量

剖面	流速 $v_c/(\text{m}/\text{s})$	面积 W_c/m^2	流量 $Q_c/(\text{m}^3/\text{s})$
P1(小沟)	7.70	180.12	1 386.92
P7(主沟)	7.58	203.54	1 542.83

流域内泥石流峰值流量 Q_c 应 P1 和 P7 剖面流量之和, 最后计算出泥石流流量 $Q_c = 2 929.75 \text{ m}^3/\text{s}$ 。计算结果与雨洪法在频率 $p = 1\%$ 时得出的计算结果 $2 736.16 \text{ m}^3/\text{s}$ 基本吻合。暴雨发生频率与对当地村民采访结果相仿。故认为 2011 年 6 月姑巴沟发生流量 $2 929.75 \text{ m}^3/\text{s}$ 的特大型泥石流为 100 年一遇。

2.2.3 泥石流冲击力

泥石流冲击力是泥石流防治工程设计的重要参数。

(1) 泥石流整体冲击力

采用推荐的泥石流流体整体冲击力计算公式^[12]:

$$\delta = \lambda * \gamma_c * V_c^2 * \frac{\sin \alpha}{g} \quad (4)$$

式中: δ 为泥石流整体冲击力, kPa ; γ_c 为泥石流重度, 姑巴沟泥石流取 $1.544 (\text{kN}/\text{m}^3)$; V_c 为泥石流流速, 取舍去剖面 P5 数据的平均值 $7.368 \text{ m}/\text{s}$; α 为建筑物受力面与泥石流冲击压力方向的夹角, 取 90° ; g 为重力加速度, 取 $9.8 \text{ m}/\text{s}^2$; λ 为建筑物形状系数, 圆形建筑物取 1.0, 矩形建筑物取 1.33, 方形建筑物取 1.47。本次布落、布里建筑物主要以矩形为主, λ 取 1.33。

通过计算, 姑巴沟泥石流整体冲击力为 111.48 kPa 。

(2) 泥石流中大石块冲击力

泥石流中石块冲击力的计算参照以下公式^[13]:

$$P_d = r * V_c \sin \alpha \sqrt{\frac{Q}{C_1 + C_2}} \quad (5)$$

式中: P_d 为泥石流中石块的冲击力, Pa ; γ 为动

能折减系数, 对于圆端正面撞击, 采用 $\gamma = 0.3$; V_c 为泥石流大石块流速, 为 $4.56 \text{ m}/\text{s}$; Q 为石块质量, kg , 按离沟口最大粒径 1.3 m 来算; α 为受力面与泥石流冲击力方向的夹角, 取 90° ; C_1 、 C_2 为巨石及拦挡圪工的弹性变形系数, $C_1 + C_2 = 0.005$ 。

姑巴沟泥石流石块比重为 $2.59 \text{ t}/\text{m}^3$, 近似认为石块与被撞击物之间的接触面积为圆面, 最后得到姑巴沟泥石流受灾体附近大石块的冲击力为 1.13 kPa 。

2.2.4 泥石流爬高

泥石流在运动过程中, 若突然受阻会产生冲起爬高, 如桥墩、挡坝、陡壁等。由以下公式可以求得冲起爬高^[12]:

$$\Delta Z = \alpha \frac{v_c^2}{2g} \quad (6)$$

式中: ΔZ 为泥石流冲起爬高值, m ; V_c 为泥石流流速, m/s ; g 为自由落体加速度, m/s^2 ; α 为动能修正系数, 为迎面坡度的函数(迎面坡度 90° , α 取 1.0)。 α 取 1.0 作为近似计算。

小沟在布里村东并流进主沟, 流向迅速南偏约 30° 。位于凹岸的布里村受泥石流固体物质冲击较大, 村民的生命财产安全受到严重威胁。选择距布里村最近的 P4 剖面流速 $5.68 \text{ m}/\text{s}$, 计算出泥石流最大冲爬高为 2.63 m , 高于布里村地面线约 1 m 。

3 泥石流的防灾减灾建议

针对姑巴沟泥石流爆发突然、流体流量大流速高和基础设施分布特殊的特点, 对该沟提出可行性防灾减灾建议。可以作为流域内其他具有相似特征的泥石流的防灾参考。

3.1 排导工程措施建议

小沟在汇流进主沟之前, 沟口段 1 km 向左偏转约 30° 形成弯曲沟道, 布里村临近被侵蚀的凹岸。如果再暴发同等规模泥石流, 必定会危及布里村。因此建议在弯道处布置长 1 km 、高 1.7 m 的 V 型全衬砌槽, 使进入排导槽流体保持密度保持不变, 利用水动力增大水深, 重组动力束流, 减小阻力, 加大流速, 防止漫流改道。并在布里村沟岸一侧辅以挡墙, 以抵挡流体对凹岸的侵蚀。依照泥石流最大冲爬高计算结果, 挡墙应该高出地面至少 2 m 。

3.2 导流工程措施建议

布落村地势较低, 正好处于小沟沟口轴线上, 是本次泥石流灾害的重灾区。该村靠近沟槽一侧有前后两次修葺的导流堤, 所用材料均为沟道内泥石流椭圆形漂石。旧导流堤高约 0.6 m , 堤角近 70° , 与沟床流向平行, 绝大部分在这次特大型泥石流中被冲毁或掩埋, 本次受灾惨重与旧导流堤高度不够有关。现有导流堤于泥石流发生之后修建, 高约 1.5 m , 堤边坡坡度 50° , 轴线基本与主沟沟槽走向一致, 距布落村直线距离 10 m 。经计算, 在保持导流堤边坡坡度 50° 情况下, 为了有效

防治同等规模的泥石流灾害,导流堤坡高应达到 2.48 m。现有导流堤的高度和走向对于防灾减灾均不理想。而在增加导流堤边坡坡度到 70°情况下,2 m 高导流堤能防止流体爬越。因此应该在现有导流堤外围,沿布落村修建一条向沟口发散长 1.8 km 的导流堤,迎水面边坡坡度 70°,堤高 2 m。

3.3 监测预警措施建议

建议姑巴沟建立高程控制的雨量计监测预报和专业泥位监测预警系统。在海拔 2 500 m 和 3 500 m 沟谷处建立雨量计,用确定的降雨临界值指标,预报未来一段时间可能发生泥石流灾害;在海拔 2 800 m 处安装超声波探头实时监控泥位高度,当超过危险值时,就可以进行警报。

4 结论

姑巴沟是安宁河流域内典型的低频泥石流沟,其致灾性极强。2011 年 6 月暴发的泥石流为 100 年一遇,粘性泥石流,泥石流的水动力来自 3 h 强降雨形成的地表径流与流域上游冰碛湖水体混合形成沟道径流。泥石流的物源主要来自沟床内堆积的冰碛物,在被径流冲刷后启动形成泥石流。

姑巴沟泥石流严重威胁到下游及沟口的小型电站、数十户房屋和高速公路等基础设施,对当地人民群众生命财产及基础设施构成极大威胁,其潜在风险较高,需要对该沟泥石流开展工程治理,并辅以监测预警设施,最大程度降低泥石流的潜在风险。

四川省安宁河流域地质构造活动强烈,岩体破碎,加之该地区早期冰川活动遗留的大量松散冰碛物在流域上游广泛分布,在河流侵蚀作用下稳定性较差,为这一地区泥石流的形成提供了必

要的地形和物源条件,使得这一区域内泥石流极为发育。探索这一区域内泥石流的成因及动力学特征,对该地区泥石流的防灾减灾具有防灾减灾意义。

参考文献:

- [1] 唐邦兴,周必凡,吴积善,等. 中国泥石流[M]. 北京:商务印书馆,2000: 60-71.
- [2] 陈晓清,崔鹏,韦方强. 良好植被区泥石流防治初探[J]. 山地学报,2006, 24(3): 333-339.
- [3] 韦方强,谢洪,Jose L Lopez,等. 委内瑞拉 1999 年特大泥石流灾害[J]. 山地学报,2000, 18(6): 580-582.
- [4] 余斌,杨永红,苏永超,等. 甘肃省舟曲“8·7”特大泥石流调查研究[J]. 工程地质学报,2010, 18(4): 437-444.
- [5] 铁永波,胡凯衡. 基于遥感解译的典型低频泥石流形成机制研究—以四川省宁南县矮子沟泥石流为例[J]. 灾害学,2014, 29(3): 77-80.
- [6] 李秀珍,刘希林,苏鹏程. 四川凉山州安宁河流域泥石流危险性评价[J]. 防灾减灾工程学报,2005, 25(4): 426-430.
- [7] 严光辉,李健生,罗世清. 四川省冕宁县安宁河流域泥石流[J]. 山地研究,1991, 9(2): 123-130.
- [8] 李志杰,苏冠群,朱光荣,等. 四川山洪灾害防治非工程措施建设显作用[EB/OL]. [2015-03-27]. http://www.chinawater.com.cn/newscenter/slyw/201106/t20110623_152680.html.
- [9] 赵良政. 川西—冕宁泸沽地区早更新世双桥冰期之证据[J]. 地球科学—中国地质大学学报,1990, 15(5): 495-500.
- [10] 唐川,章书成. 水力类泥石流起动机理与预报研究进展与方向[J]. 地球科学进展,2008, 23(8): 787-793.
- [11] 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: 37-84.
- [12] 国土资源部. DZ/T0239-2004 泥石流灾害防治工程勘察规范[S]. 北京:中国标准出版社,2006.
- [13] 吴积善. 泥石流及其综合治理[M]. 北京:科学出版社,1993: 164-191.

Dynamic Characteristics and Mitigation of Guba Debris Flow in Anning Valley in Sichuan Province

Jiang Jintao^{1, 2, 3} and Tie Yongbo³

(1. China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3. Chengdu Center of China Geological Survey, Chengdu 610081, China)

Abstract: Guba debris flow is one of the most typical debris flows with low return period in Anning Valley, Sichuan Province. Based on the field survey, we calculate the dynamic properties and analyze the genetic mechanism of Guba debris flow occurred in 2011. Results show that, combined effect of gully runoff from sustained heavy rainfall and overflow from glacial lakes upstream triggered the disaster. The water power supply processes show complex features. According to the characteristics of sudden outbreak, heavy flow, high speed and particular position of the affected targets in Guba debris flow, proposals are put forward for prevention and reduction. It has practical significance to reveal forming process and dynamic properties of Guba debris flow, which could also be a reference to understanding the formation mechanism of low frequency debris flow with similar backgrounds in Anning Valley.

Key words: Anning Valley; debris flow with low return period; dynamic properties; Mianing County; Guba gully