

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. [Tie Yongbo and Hu Kaiheng. Formation of Typical Low-frequency Debris Flow Process Based on Remote Sensing Data——Take Aizi Debris Flow in Ningnan, Sichuan Province as An Example[J]. Journal of Catastrophology, 2014, 29(3): 77–80.]

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*

铁永波¹, 胡凯衡²

(1. 中国地质调查局成都地质调查中心(成都地质矿产研究所), 四川 成都 610081;
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: 2012年6月28日四川省宁南县矮子沟暴发泥石流, 造成重大的人员伤亡和财产损失。通过对比事件前后流域的高精度遥感影像, 并结合泥石流发生后野外调查情况进行综合分析。研究结果表明: 矮子沟泥石流具有典型水力类泥石流的启动机制, 其形成过程可分为四个阶段: ①强降雨使得地表径流快速汇集, 使得坡体表层土产生破坏并启动, 形成坡面泥石流并汇入主沟; ②具有极强侵蚀能力的坡面泥石流开始对沟床内的固体物质产生强烈的揭底侵蚀和侧蚀, 使得沟床堆积体的稳定性产生破坏并启动; ③沟床堆积物在受到揭底侵蚀后, 从上游依次往下, 形成连续性的破坏并为泥石流的形成持续提供固体物质, 以维持泥石流的运动并放大其规模; ④在达到海拔800 m沟口转弯处之后, 由于受到地形的限制及泥石流自身的动能衰减并产生堆积, 泥石流过程结束。通过对该次泥石流的物源补给过程进一步研究认为, 其物源补给可分为形成泥石流流体所需的启动型物源和维持泥石流持续运动的维持型物源两类。通过对比发现, 低频泥石流在启动过程中的物源补给过程具有明显的启动型物源和维持型物源两个相对微观物源补给类型及过程, 可为这类泥石流防治工程的类型选择及设计提供重要的理论依据。

关键词: 低频泥石流; 物源; 补给分类; 形成过程; 矮子沟; 四川宁南县

中图分类号: S423; X43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2014)03-0077-04

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2014.03.015

泥石流是山区常见的一种突发性地质灾害。在我国地形陡峭的西部地区, 泥石流数量多, 危害极为显著, 成为山区经济建设中的一个突出问题^[1]。对高频泥石流而言, 其危险性容易引起人们的注意并对其进行防范。但对低频泥石流而言, 因暴发的间隔时间长(数十年甚至上百年), 人们往往意识不到其危害性, 常将低频泥石流沟堆积扇选为修建城镇、村庄、学校及工厂等人口密集建筑区的场所^[2]。故低频泥石流发生时, 往往造成远比高频泥石流更严重的灾害。国内外低频泥石流造成严重灾害的事件屡见不鲜^[3-5]。如1999年12月中旬在委内瑞拉 Vagas 地区暴发的约300年一遇的群发性泥石流, 造成直接经济损失达200亿美元、3万余人死亡的举世罕见重大灾害^[6]; 2010年8月7日发生在甘南藏族自治州舟曲县城的400年一遇的低频泥石流导致舟曲县城几乎全部

被毁, 造成1463人遇难、302人失踪, 直接经济损失数亿元^[7]; 2012年6月27日在宁南县矮子沟发生的特大灾害性泥石流, 导致沟口建筑及民房被冲毁, 造成40人死亡和失踪, 产生了极大的社会影响。

国内外学者对一般泥石流的形成机制虽然已有较多的研究成果, 但对低频泥石流物源补给过程的微观机制研究, 尚未有太多的针对性成果^[8]。近年来, 受到强降雨过程的影响, 低频泥石流的发生数量也有增多的趋势, 不但造成重大的人员伤亡和财产损失, 还对生态环境造成破坏, 并造成负面的社会影响^[7]。为此, 本文通过对矮子沟泥石流的研究, 查明低频泥石流的物源补给特征, 探索其形成过程机制, 对更好认识这类泥石流的形成机理并开展针对性的防灾减灾措施具有重要的理论和实践意义。

* 收稿日期: 2013-12-17 修改日期: 2014-01-14

基金项目: 国家自然科学基金(41101086); 中国地质调查局地质调查项目(12120113010200)

作者简介: 铁永波(1979-), 男, 云南大关人, 博士, 副研究员, 硕士研究生导师, 主要从事环境地质和灾害地貌方向研究。

E-mail: tyongbo@cgs.cn

1 研究区概况

矮子沟位于四川省凉山州宁南县六城镇境内,为金沙江的一级支流(图 1)。矮子沟流域面积为 66 km^2 ,主沟长 20 km ,沟谷平均比降 155% ,上游冲沟较为发育^[9]。

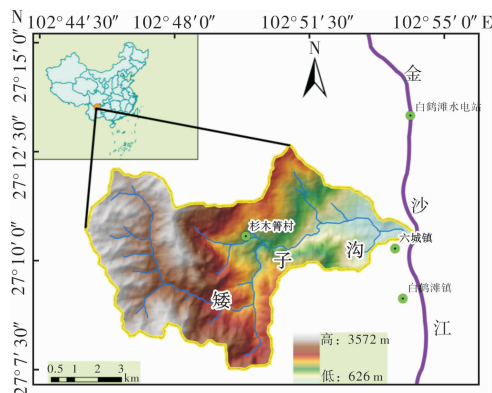


图 1 矮子沟泥石流流域特征图(据文献[9]改动)

矮子沟流域属于典型的西部山区地貌,地形起伏较大,第四纪侵蚀作用强烈。根据地形特征统计,矮子沟流域内最高海拔为 3572 m ,与金沙江交汇处沟口海拔为 626 m ,垂直高差 2946 m 。在大地构造上,矮子沟位于准扬子地块西部,紧邻川滇菱形块体。虽然矮子沟发育在骑骡沟背斜的东翼,地质构造简单,未发现大的第四纪活动构造断裂通过该区,构造相对稳定,构造变形相对简单^[9]。但矮子沟距离川滇菱形块体东部边界的小江断裂约 20 km ,小江断裂带在一定程度上对矮子沟流域的地质构造具有明显的影响。矮子沟流域内的主要出峨眉山组露玄武岩,下伏地层为三叠系飞仙关组,以泥岩和粉砂岩为主^[9]。由于出露的泥岩和粉砂岩的风化相对较为强烈,岩体破碎,在很大程度上为矮子沟泥石流的形成提供了充足的物源。矮子沟地处亚热带季风气候区,具有典型的干湿季节特征,属于干热河谷中的干暖河谷区,气候垂直变化显著。区内年平均气温 $15 \sim 21 \text{ }^{\circ}\text{C}$,年降水量介于 $600 \sim 1500 \text{ mm}$ 区间内。在降雨的年季分布上看,区内雨季主要集中在 $5 \sim 10$ 月,在时间上相对集中,且多短时强降雨过程,为泥石流的形成提供了必备的水动力条件,也是泥石流高发的季节;其余月份为少雨季节,降雨强度弱且少,对泥石流的形成贡献较小。

2 数据来源与研究方法

研究主要采用矮子沟泥石流发生后的现场野外调查和遥感解译相结合的方式。调查工作的重点是对泥石流的物源补给类型和方式、分布的地貌部位等进行针对性的调查。通过野外现象和遥感解译情况进行对比验证,综合分析泥石流的形成过程。

遥感解译采用分辨率为 0.5 m 的 4 波段 World View-02 卫星影像数据。数据获取时间分别为矮子沟泥石流发生前(2012 年 2 月 12 日)和发生后(2013 年 1 月 19 日),影像比例尺为 $1:10000$ 。目的是通过高精度遥感影像数据对泥石流发生前后流域内崩滑体的数量、面积和空间变化特征进行分析。分析的重点包括泥石流的物源补给区沟道长度和宽度、启动位置及堆积部位。同时,结合野外调查情况,确定沟床物源的侵蚀深度,并综合计算泥石流启动和堆积规模的大小。

3 物源补给机制及形成过程

3.1 物源补给特征

泥石流发生前后流域的遥感解译结果显示,2012 年矮子沟泥石流形成过程中的物源具有明显的两个补给过程,即启动型和维持型物源补给过程。

(1) 启动型物源

启动型物源主要来自矮子沟流域中游左岸支沟海拔 $1720 \sim 2250 \text{ m}$ 之间的区域,为坡体上堆积的第四纪残坡积物,为 2012 年矮子沟泥石流形成的最初启动区(图 2)。从遥感影像图上可以看出,在泥石流发生前,坡体表面仅发育有较小的冲沟(图 2a),在泥石流发生后,冲沟的宽度和深度均被增大,并产生大量的松散固体物质沿着坡面冲下(图 2b)。在坡脚处,因为公路修建在坡面上形成的松散土体(图 2c),也在降雨形成的地表径流作用下被冲刷进入沟道(图 2d)。而启动型物源对该次泥石流形成过程的贡献主要体现为:坡体上的松散残坡积物与坡面径流汇流,形成高浓度流体或准泥石流流体,使其具备有比洪水高出数倍的侵蚀能力,并沿坡面冲入主沟内,为对沟床内松散堆积物的冲刷提供必要条件。2012 年矮子沟泥石流的启动型物源补给过程并不是一次完成,而是首先从坡体上的坡面径流开始,径流通过对坡体冲沟的冲刷作用,使其规模沿途增加,故从坡顶到坡底一直进入主沟的过程均为启动型物源补给过程。

(2) 维持型物源

维持型物源主要为第四纪冲洪积松散堆积物,主要分布在海拔 $800 \sim 1720 \text{ m}$ 之间的沟床内,维持型物源对泥石流形成过程的贡献在于增大泥石流的规模、流量及破坏力。通常情况下,沟床内的堆积物在沟道径流作用下,细颗粒物质被带走,仅留下表层粒径相对较大块石,并对底层的细颗粒物质形成保护层,使其相对稳定(图 3a)。当沟道内的冲洪积物在进入沟道后的坡面泥石流的强烈侵蚀作用时,表层粗化层的大颗粒固体物质受到流体的冲刷,其稳定性受到破坏并产生启动,当表层大颗粒固体物质产生启动后,沟床内粒径相对较小或细颗粒物质的保护层便被剥开,并产

生启动, 加入到泥石流流体中(图 3b)。一方面, 维持型物源的加入使得流体的浓度得到增加, 并使其动能增大, 在很大程度上扩大泥石流的破坏力及冲出距离; 另一方面, 维持型物源还使得沟道中流体的流量和规模增加, 尤其是在矮子沟主沟弯道较多及沟道内狭窄通道的影响下, 其流量和规模会在很大程度上得到放大。



(a) 泥石流发生前坡面
泥石流形成区特征

(b) 泥石流发生后坡面
泥石流形成区特征



(c) 泥石流发生前形成
区坡面特征

(d) 泥石流发生后形成
区坡面侵蚀特征

图2 矮子沟泥石流发生前后形成区启动型物源补给特征



(a) 沟泥石流发生前的
沟道特征

(b) 泥石流发生后沟道
侵蚀及揭底特征

图3 矮子沟泥石流发生前后维持型物源(沟道揭底后)补给特征

根据矮子沟泥石流发生后现场调查结果, 2012 年矮子沟泥石流的容重为 1.8 kg/m^3 [10]。根据该次泥石流容重和规模, 对固体物质也水体所占的比例估算, 此次泥石流过程中泥石流冲出的固体物质约为 $35 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。通过矮子沟泥石流发生前后的遥感解译结果, 泥石流发生后通过沟道侵蚀补给的物源规模约为 $14 \times 10^4 \text{ m}^3$, 即 2012 年矮子沟泥石流过程的补给型物源规模占总固体物质的 40%; 该次泥石流过程的启动型物源规模约为 $21 \times 10^4 \text{ m}^3$, 占该次泥石流的启动型物源占总固体物质的 60%。

3.2 泥石流形成过程分析

结合遥感解译数据及野外调查结果, 矮子沟泥石流的形成过程可以分为 4 个过程通过根据以上分析, 可以将该次泥石流形成过程分析如下:

(1) 坡面泥石流阶段: 强降雨使得地表径流快速汇集并冲刷坡体表面, 使得坡体表层的残坡积

物产生破坏, 通过坡面侵蚀为泥石流的形成提供物源, 并与地表径流一起汇入沟道, 形成坡面泥石流(图 4), 这一过程发生在海拔 1 720 ~ 2 250 m 之间的沟道左岸的坡体上。



图4 矮子沟泥石流形成初期的坡面泥石流特征

(2) 沟床揭底阶段: 在泥石流流体极强的侵蚀能力下, 开始对海拔 1 720 m 处沟床内的固体物质产生强烈的揭底侵蚀和侧蚀, 使沟床表层粗颗粒固体物质的稳定性受到破坏并产生启动(图 5a)。在沟床堆积物表层的粗化层受到破坏后, 沟床内的固体物质随之被席卷而出, 伴随着对沟道两侧岸坡的侧蚀(图 5), 使其坍塌后进入沟道, 共同为泥石流的形成提供物源(图 5b)。



(a) 泥石流形成的沟床揭底特征 (b) 泥石流对沟道岸坡的侵蚀特征

图5 矮子沟泥石流发生后的揭底及侵蚀特征



(a) 泥石流发生前的沟口特征 (b) 泥石流发生后的沟口特征

图6 矮子沟泥石流发生前后堆积区变化特征

(3) 泥石流维持运动阶段: 泥石流沟床堆积物在受到揭底侵蚀后, 往下游方向形成长约 8 km 的连续性揭底破坏区, 并为泥石流的运动提供约 $14 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的固的体物质, 以维持泥石流的运动并使其流量放大。

(4) 泥石流堆积阶段: 在达到海拔 800 m 之后, 由于泥石流自身的动能衰减, 其对沟床的侵蚀能力减弱, 停止对沟床的侵蚀, 通过堆积对沟口造成破坏和淤埋(图 6a、6b), 并造成人员伤亡。在泥石流进入金沙江后, 整个过程结束。

4 结论与讨论

(1) 通过对 2012 年矮子沟泥石流的形成过程

分析可以看出, 该次泥石流过程主要经历了坡面泥石流(启动阶段)→沟谷泥石流的过程。从启动型物源和补给型物源的分类看, 维持型物源规模($14 \times 10^4 \text{ m}^3$)约为启动型物源规模($21 \times 10^4 \text{ m}^3$)的 67%。同样, 通过对四川省泸定县干沟 2005 年泥石流过程中的研究表明, 该次泥石流启动型物源规模($3.0 \times 10^4 \text{ m}^3$)约为启动型物源规模($6 \times 10^4 \text{ m}^3$)的 50%, 两者的研究结果极为相似^[11]。这表明, 低频泥石流在启动过程中的物源补给过程具有明显的启动型物源和维持型物源两个相对微观物源补给类型及过程, 对两者规模所占比例的量化研究, 可为这类泥石流防治工程的设计提供重要的理论依据。

(2)通过对矮子沟泥石流的物源补给分类及形成过程研究, 可对矮子沟泥石流启动型物源区开展针对性的坡面侵蚀防护工程控制, 如在坡体上修建排水渠, 使得地表雨水在汇集过程中被干扰而不会形成集中的径流, 从而不对坡面造成侵蚀而形成坡面泥石流, 以达到有效干扰或抑制泥石流形成的目的。同样, 对维持型物源区开展针对性的沟床冲刷防护工程控制, 如在沟道内修建能防治泥石流下蚀的潜坝, 以保护沟床不受沟道径流的冲刷, 还可以在维持型物源区修建多级谷坊坝, 可以有效削弱泥石流的洪峰流量等。

(3)在一次大规模的低频泥石流发生后, 该次泥石流过程搬运的大量松散固体物质在未来一段时期内, 极易在沟道径流的作用下启动形成高频率的小规模泥石流。如何来界定低频泥石流与高

频泥石流的差别? 根据目前的研究成果, 在对低频泥石流定义时, 需要限定特定的规模条件下的泥石流频率, 否则高频和低频泥石流的划分没有实际意义。

参考文献:

- [1] 崔鹏, 韦方强, 谢洪, 等. 中国西部泥石流及其减灾对策[J]. 第四纪研究, 2003, 23(2): 142-151.
- [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] 林明安, 王士革, 范晓岭, 等. 川西地区低频率泥石流的特征[J]. 水土保持通报, 2010, 30(1): 227-231.
- [4] 铁永波, 周洪福, 倪化勇. 西南山区短时强降雨诱发型低频泥石流成因机制分析——以四川省宝兴县冷木沟泥石流为例[J]. 灾害学, 2013, 28(3): 110-113.
- [5] 宗德孝, 高必春. 1997 年 5 月云南昭通两次大型泥石流灾害及防御对策[J]. 灾害学, 1998, 13(2): 67-70.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 铁永波. 冻融条件下冰碛补给型泥石流物源汇集过程与灾变初探[J]. 灾害学, 2012, 27(4): 12-16.
- [9] 胡凯衡, 崔鹏, 马超, 等. 宁南县矮子沟“6.28”特大灾害性泥石流成因和特征[J]. 山地学报, 2012, 30(6): 696-700.
- [10] 贺拿, 陈宁生, 朱云华, 等. 矮子沟泥石流影响因素及运动参数分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2013, 11(1): 12-16.
- [11] 铁永波, 徐如阁, 巴仁基. 典型冰碛补给型泥石流物源补给过程与机制研究[J]. 水土保持通报, 2013, 33(1): 77-80.

Formation of Typical Low-frequency Debris Flow Process Based on Remote Sensing Data

——Take Aizi Debris Flow in Ningnan, Sichuan Province as An Example

Tie Yongbo¹ and Hu Kaiheng²

(1. Chengdu Center of China Geological Survey, Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, Chengdu 610081, China; 2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences&Ministry of Water Conservancy, Chengdu 610041, China)

Abstract: Aizi gully in Ningnan country Sichuan province occurred debris flow on 28, June 2012 and caused serious casualties. Based on the field survey after the occurrence of debris flow and the interpretation of satellite image data with 0.5 meter resolution ratio before debris flow occurrence (February 2012) and after the event (January 2013), the difference characteristics of debris flow gully are analyzed and compared. Results show that the debris flow process in 2012 is typical hydraulic-driven type, the process can be divided into four process: ① The heavy rainfall generate the slope flow in short time, and the flow damage the stability of deposit on slope by erosion and initiates slope debris flow, then the slope debris flow run into channel of Aizi gully. ② The slope debris flow cuts and erodes the gully bed intensively and damages the stability of deposit, then initiates the loose soil in the bed. ③ After the cutting by flow in channel, the deposit in the channel bed continue damaged from upstream to downstream and provides enough loose source to debris flow movement and enlarge it's volume. ④ The kinetic energy of debris flow decreased at the limitation of landform and turn into deposit, which means the finish of debris flow process. The results from the loose source supply shows that the source for debris flow initiation can be divided into two types, one is initiating source which provide necessary loose source for the first step of debris flow initiation, the other one is the maintaining source which provide the loose source to maintain the continue movement and enlarge the volume of debris flow. Based on the comparison of the mechanism of source supply in Aizi debris flow to others debris flow events, it is found that there have the obviously two source supply phases for lower return period debris flow process, which can be useful for it's mitigation.

Key words: debris flow with low return period; source supply; supply classification; formation; Aizi gully; Ningnan in Sichuan province