

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*

铁永波，周洪福，倪化勇

(成都地质矿产研究所，四川 成都 610081)

摘 要：以四川省雅安市宝兴县城后山冷木沟为例，通过野外调查及降雨数据分析，对冷木沟2012年8月18日泥石流的特征、成因及可能发展趋势进行了评估。结果显示：冷木沟此次泥石流过程具有隐蔽性强、暴发突然及强输沙能力的特征；前期累计降雨量对该次冷木沟泥石流过程贡献较小，而短时强降雨尤其是泥石流发生前55.9 mm/h降雨量是诱发泥石流的最主要原因；2012年泥石流发生前，冷木沟流域内崩滑等不良地质现象轻微，泥石流的物源主要来自于流域沟道内堆积的松散崩坡积物与早期山洪泥石流堆积物，泥石流物源在高速沟道洪水的揭底和侧蚀作用下启动形成泥石流。此外，由于2012年冷木沟泥石流在中、下游沟道内形成的大量的松散堆积物，加之2013年“4.20”芦山7.0级地震的影响，流域内潜在崩滑体的发育数量增多，冷木沟泥石流极有可能会由低频转化成高频泥石流，需要提出针对性的防治对策。

关键词：低频泥石流；短时强降雨；成因机制；宝兴县冷木沟

中图分类号：P642.23；X43 **文献标志码：**A **文章编号：**1000-811X(2013)04-0110-05

0 引言

泥石流是全球山区常见的一类地质灾害。在我国地形地貌陡峻的西部地区，泥石流的发育数量及危害极为显著，并成为山区经济建设过程中的一个突出问题^[1-2]。对于每隔几年就会暴发一次的高频泥石流而言，其危险性极易引起人们的注意并对其加以防范。但对低频泥石流而言，因其暴发的间隔时间长(数十年甚至上百年)，其危害性往往容易被人们所忽视，常将地势平坦的沟口堆积扇作为修建城镇、村庄、学校及工厂等人口密集建筑区的最佳场所^[3]。故低频泥石流在发生时，往往伴随着成灾严重的特点。据统计，在众多泥石流灾害事件中，一次性造成灾害最为严重的绝大多数是低频泥石流，国内外因低频泥石流造成的严重灾害时间屡见不鲜^[4-6]。如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]；1999年12月中旬在南美洲委内瑞拉的Vag-

as地区暴发约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^[8]。

降雨是诱发低频泥石流的主要水动力，降雨过程又通常分为两类：一类是在前期累计降雨的基础上，某次降雨过程能达到使流域内松散固体物质启动的临界水动力条件，进而诱发泥石流；另一类是在泥石流发生前无前期有效累计降雨量或其对泥石流的形成贡献较小，主要通过短时强降雨过程满足流域内松散固体物质启动的临界水动力条件，并在短时间内诱发泥石流。通常情况下，对于泥石流发生前的前期累计降雨量参与的低频泥石流过程，往往会因为长时间的降雨而引起地方法政府部门和当地人们的注意，并提前做好预警预报及防范对策。但对于短时强降雨诱发的低频泥石流而言，其隐蔽性更为显著，且往往伴随着暴发突然的特点，在短时间内造成重大灾害，对其开展有效的防范极为困难。

在我国西部山区，除了为低频泥石流的孕灾提供极为有利的地形地貌条件外，还因为其特殊的气候环境和地形急剧变化的下垫面特征，导致

* 收稿日期：2013-04-21 修改日期：2013-05-15

基金项目：国家自然科学基金(41101086, 41102226)；中国地质调查局公益性研究项目(12120113010200)

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

E-mail: tyongbo@cgs.cn

山区气候条件复杂,暴雨、大暴雨等短时强降水过程在雨季极为常见,并常诱发低频泥石流灾害,严重影响山区群众的生命财产安全。但到目前为止,我们对短时强降雨诱发低频泥石流的早期识别及其形成机理的研究尚不够深入,故难以对其开展针对性的防灾减灾对策。为此,我们以四川省雅安市宝兴县城后山冷木沟泥石流为例,探索这类低频泥石流的特征及成因机制,为发育在西南山区的这类低频泥石流的防灾减灾提供参考。

1 研究区概况

冷木沟位于四川省雅安市宝兴县城后山,为宝兴河左岸之流。冷木沟流域面积 9.4 km^2 。主沟长 4.0 km ,主沟平均纵比降 212‰ 。沟域内最高点高程 $3\,044 \text{ m}$,沟口高程为 996 m ,相对高差 $2\,048 \text{ m}$ 。冷木沟流域内支沟发育,且主要分布在主沟的右岸。冷木沟泥石流流域位于龙门山构造带,地质构造复杂,褶皱断裂发育。流域内出露地层主要为元古界澄江-晋宁期第三期及第五期岩浆岩、古生界二迭系下统茅口组灰岩及第四系全新统崩坡积、滑坡堆积及泥石流堆积层。冷木沟沟谷形态整体呈“V”型。沟道内跌水和陡坎较发育,沟道两侧斜坡高陡,地形坡度一般 $30^\circ \sim 50^\circ$,局部可达 70° 以上甚至直立,以乔木、灌丛为主的植被发育茂密,覆盖率达 90% 以上。冷木沟所处亚热带季风气候区,四季分明。据宝兴气象站资料统计,多年平均降雨量 $1\,101.5 \text{ mm}$,最大年降雨量为 $1\,279.0 \text{ mm}$,最大日降雨量达 123.5 mm 。降雨量主要集中于 $5-9$ 月,降雨量占全年的 85% ,其中 $7、8$ 两月降雨量更为集中,占全年降雨量的 50% 。宝兴县水文站实测最大日降雨量 125.6 mm ,实测最大 3 h 降雨量 100.0 mm 以上;灵关雨量站实测最大日降雨量 158.1 mm ;盐井雨量站实测最大日降雨量 181.0 mm 。由此可见,丰富而集中的降水,较多的局地性暴雨,较大的暴雨强度,为山洪泥石流、滑坡的形成提供了充足的水源条件。

2 泥石流暴发特征

2012 年 8 月 18 日,冷木沟暴发泥石流,冲毁县城穆坪镇至冷木组乡村公路 4 km 、小桥 3 座、房屋 25 间、圈舍 14 间、耕地 0.53 hm^2 、林地 0.6 hm^2 ^[9]。沟口泥石流堵塞宝兴河道近 30 m ,致使宝

兴河上游水位上涨 3 m 之多。据统计,本次泥石流共造成 2 人死亡和失踪,直接经济损失约 $4\,000$ 万元。在此次泥石流过程中,除冷木沟主沟发生泥石流外,其左岸支沟黑沟、右岸支沟小沟均同时暴发泥石流,并进入冷木沟主沟冲出。通过现场调查,冷木沟泥石流具有隐蔽性强、暴发突然、高输沙能力与强埋性的特征。

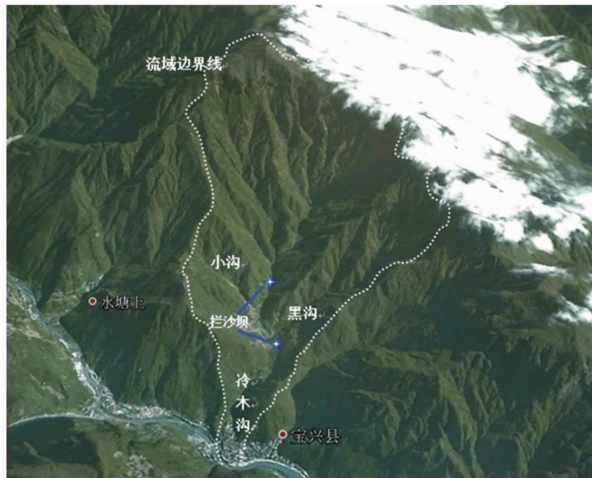


图 1 冷木沟泥石流流域特征

2.1 隐蔽性

通过对居住在冷木沟中游宝兴村冷木组 83 岁老人李潘朝(男)及 90 岁老人邹连胜(男)的调查访问,冷木沟历史上未发生过泥石流,曾于 1966 年发生过一次相对较大规模的洪水(非泥石流),但未造成灾害,偶尔在遇雨季的强降雨过程时,会有小规模洪水发生,但均未造成灾害。根据当地居民的调访结果和降雨数据判断,认为 2012 年冷木沟泥石流的暴发频率为 50 年一遇。同时,根据宝兴县城所在地穆坪镇气象站观测数据分析结果,2012 年 8 月 18 日泥石流过程的小时降雨量超过了 50 年一遇概率,为此,从诱发泥石流的降雨频率判断,冷木沟“8·18”泥石流的暴发频率至少大于 50 年一遇规模。

为此,综合当地居民的访问结果及对降雨数据的综合分析判断,2012 年 8 月 18 日冷木沟泥石流为 50~100 年一遇的暴发频率,属于低频泥石流。同时,冷木沟流域内植被覆盖较好,覆盖率可达 90% 以上,且多以乔木为主。较好的植被覆盖使得发育在流域内的浅表层崩滑体不易被人们察觉,故在一定程度上增加了泥石流的隐蔽性。冷木沟极低的暴发频率使居住在危险区内的居民忽略泥石流再次发生的风险,并在沟口平坦的泥石流堆积扇上修建县城,并开展未有针对性防治

措施的建设和工程活动,故在泥石流发生后,造成重大损失。

2.2 突发性

据冷木沟沟口居民描述,2012 年 8 月 18 日 01:00 点开始降雨,降雨量极大。在 01:40 左右,听到沟道内有巨大的轰鸣声和地面震动的现象,随即泥石流沿沟道冲出。泥石流过程总共持续到早上 06:00,其中泥石流洪峰的持续时间约 45 min 左右。根据宝兴县城雨量站的监测数据,18 日凌晨 1 时至 2 时之间的小时降雨量达到 55.9 mm,在此次短时强降雨尚未结束时,泥石流便发生(表 1)。从泥石流的发生及降雨数据结果显示,在不到 1 h 的时间内,冷木沟流域便完成了沟道径流的汇流、松散固体物质失稳及泥石流形成的过程。

表 1 2012 年“8.18”宝兴县冷木沟泥石流过程降雨特征表(穆坪站数据) mm

日期	时段									
	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-24
2012/08/15	0	0	5.9	5.7	1.1	0.3	0	0	0	0
2012/08/16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2012/08/17	0	0.2	2.1	0.6	0.6	0.1	1.1	5.4	0.1	0
2012/08/18	0.9	55.9	20	18.8	2.1	0.3	0	0	0	0

短时强降雨过程在上游汇流区陡峻的地形条件下极易快速形成沟道径流,故泥石流在短时间内便形成,暴发过程较为突然。

2.3 强输沙能力

根据调查,2012 年冷木沟泥石流暴发后,从海拔 995~1 490 m 处的沟道内,均形成大量的泥石流堆积物,根据估算,该次泥石流过程共携带的固体物质总规模约 19 万 m³,其输沙能力极强。

在下游冷木村组村庄处,泥石流在长约 600 m、平均宽度约 30 m、深约 3 m 的沟道填满,并高出地面约 1 m,其在此段沟道堆积的固体物质总量约 8 万 m³。同时,在最上游的谷坊坝处,泥石流受到 2011 年新建完工谷坊坝的拦截作用,将高 6 m、长 32 m 的谷坊坝全部填满,并形成坡度为 19°的堆积体,坝体拦截的固体物质质量估算约为 1 万 m³。此外,下游处的新建谷坊坝也被泥石流淤满,其淤积规模约为 0.6 万 m³。总体上看,两座新建谷坊坝对泥石流的拦截作用较为明显,总共拦截的固体物质总量约为 1.6×10⁴ m³。

在下游水厂处,泥石流在长约 700 m、宽约 33 m 的沟道内,形成平均厚约 2.6 m 的堆积区,固体物质总量约 6 万 m³。泥石流形成的堆积物以块

石和碎石为主,其中最大块石粒径在中游沟道内最大可达 2 m(图 2)。



图 2 冷木沟中游泥石流发生前后沟道淤积变化对比特征^[9]

在冷木沟下游沟口的宝兴县城区附近沟道内,泥石流搬运的大量固体质在长约 200 m、宽 25 m、高 5 m 的导流堤内淤积,淤积厚度可达 3.0 m,堆积的固体物质估算量约 1.5 万 m³(图 3)。此处泥石流搬运的块石粒径相对较小,多以 20 cm 粒径为主。同时,泥石流在进入宝兴河时,受到地形条件的约束,对宝兴河造成一定程度的堵塞,部分固体物质被宝兴河携带流走,其余在左岸形成堆积体,其规模估算约为 2 万 m³。



图 3 冷木沟下游泥石流发生前后沟道淤积变化对比特征^[9]

3 泥石流成因分析

3.1 短时强降雨

根据位于冷木沟附近的穆坪站提供的降雨数据显示,在 2012 年 8 月 15 日,24 h 累计降雨量仅为 13 mm。而 8 月 16 日,整个区域无降雨。8 月 17 日,24 h 累计降雨量也仅为 10.2 mm(图 4)。直到 2012 年 8 月 18 日 01:00,冷木沟流域才开始普降暴雨,到 02:00 时,小时雨量骤然增至 55.9 mm,暴雨强度极大。此后,2~3 时的小时雨量亦高达 20 mm;3~4 时的小时雨量相对前 1 h 有所减弱,但仍高达 18.8 mm,强降雨时间长达 3 h。直至凌晨 6 时,整个降雨过程结束,泥石流过程也趋于结束。通过与宝兴县历史降雨资料数据进行对比发现,该次泥石流发生时的小时降雨量为 57 mm,降雨量已超过 50 年一遇的降雨强度。

根据以上分析可以看出,在 2012 年 8 月 18 日冷木沟泥石流形成过程中,前期累计降雨量对泥

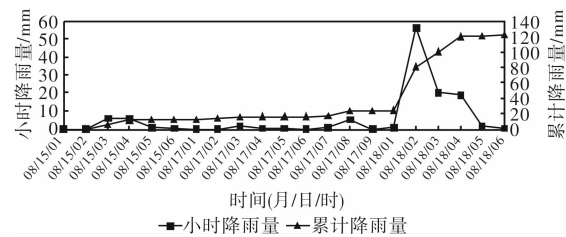


图4 冷木沟泥石流过程降雨过程特征统计
(注:图中未标注的时间表示无降雨)

石流的形成作用不太显著,而短时强降雨则是诱发该次泥石流的主要诱因,尤其是18日01:00-02:00时55.9 mm的小时降雨量对泥石流的贡献极为重要。虽然冷木沟流域内的植被覆盖较好,但在如此强度降雨的作用下,土壤很难在短时间内形成有效的下渗,导致地表径流迅速形成并汇入沟道,快速形成沟道洪水,对沟道内的松散固体物质冲刷,使其启动并形成泥石流。

3.2 揭底型物源补给

泥石流的物源补给主要有两类,一类是来自流域内的坡体在重力和降雨作用下产生破坏后进入沟道,与沟道径流一起冲出,形成泥石流;另一类是堆积在沟道内的松散固体物质在径流揭底和侧蚀等作用下启动,形成泥石流。前者称为土力类泥石流,后者为水力类型泥石流^[10]。根据调查,2012年8月18日冷木沟泥石流的主要物源来自于海拔1 550 m以上的沟道内松散堆积物,包括崩坡积物和早期洪水、泥石流堆积物,主要分布在海拔1 550~2 000 m的沟道段。由于此段沟道位于两级跌坎之间,故沟道相对较为平缓,有利于松散崩坡积物的积累。在8·18泥沙过程中,上游形成的沟道径流在此沟道段切出长约700 m、宽30 m、深5 m的冲沟,冲出固体物质规模约10.5万m³,约占该次泥石流冲出固体物质总量的1/2。为此,流域上游沟道内松散固体物质在沟道洪水作用下的揭底补给过程,为该次泥石流的形成提供了必要条件。

3.3 高陡地貌条件

陡峻的地形地貌部位不但有利于松散固体物质在沟道内汇集,也有利于坡体表面松散固体物质的启动,为泥石流的形成提供重要条件。在冷木沟流域内,泥石流的形成区地形较为陡峻,分布范围介于海拔1 500~3 000 m之间,相对高差达1 500 m,沟道平均纵比降约600‰。同时,加之流域上游平面形态呈扇形状,有利于沟道径流的迅速汇集,为泥石流的突然暴发提供必要条件。此外,巨大的相对高差使得从高地貌部位冲出的沟

道径流具有极大的流速和动能,对沟道内松散固体物质的冲刷侵蚀强度极大,故在短时间内席卷大量的固体物质冲出,形成泥石流。

4 结论

(1)冷木沟内2011年修建完成的两座谷坊坝对泥石流的拦截作用较为明显,一方面,谷坊坝的拦截减少了冲出沟口的固体物质总量;另一方面,大粒径块石被谷坊坝拦截后在坝体后停滞,减少了泥石流对沟口县城建筑物的冲击破坏力。为此,谷坊坝对2012年“8·18”冷木沟泥石流的成灾作用的减弱具有积极作用。

(2)冷木沟流域内由于植被覆盖较好,2008年汶川地震的松散固体物源汇集的积极作用虽然没有较为明显的影响,但地震会不可避免地会对坡体的稳定有一定的影响,故2012年冷木沟泥石流的形成与汶川地震有着一定的关系。作为2013年4月20日芦山7.0级地震的强震区,地震导致冷木沟流域内崩滑不良地质现象较为发育,物源将会进一步增加。

(3)通常认为,低频泥石流暴发后,下一次也需要较长时间才会再次发生。但对冷木沟泥石流而言,由于2012年泥石流在沟道内形成大量松散堆积体,在沟道径流的冲刷作用下,极易形成由沟道径流冲刷揭底过程的中-小规模泥石流,并体现为在低频泥石流发生后一段时间内转化成高频泥石流的可能性。

(4)由于冷木沟流域面积较大,且植被覆盖较好,难以对一些植被覆盖下潜在松散固体物质的汇集特征进行识别。为此,在“4·20”芦山地震后,应对冷木沟泥石流开展专业勘察,查明流域内地震后崩滑体的发育数量及规模,并对冷木沟泥石流的危险性及潜在风险进行评估,并开展相应的工程治理,以保证宝兴县城的安全。

参考文献:

[1] 田连权,吴积善,康志成,等. 泥石流侵蚀搬运与堆积[M]. 成都:成都地图出版社,1993:20-35.
[2] 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.
[3] 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.
[4] 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.