

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2017.01.11

## 四川美姑洛高依达流域泥石流灾害分析

胡云鹏<sup>1</sup>, 邵海<sup>2</sup>, 冯文凯<sup>1</sup>, 魏昌利<sup>3</sup>, 殷志强<sup>2</sup>, 张瑛<sup>3</sup>

(1. 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室(成都理工大学), 四川 成都 610059;  
2. 中国地质环境监测院, 北京 100081; 3. 四川省地质调查院, 四川 成都 610081)

**摘要:** 位于川西南美姑河流域的洛高依达沟谷两岸支沟发育, 沟谷下切作用强烈、物源丰富以及汇水条件优越的区域地质环境蕴含着暴发泥石流灾害的潜在威胁。笔者在野外调查和室内数值计算的基础上将洛高依达沟谷泥石流分为“持久型”和“暴发型”两种, 在泥石流机理研究的基础上, 结合当地的降雨条件通过对群发泥石流的致灾过程认识与量化推算认为50年一遇暴雨条件下主沟道一次泥石流过流总量可达 $4.65 \times 10^4 \text{ m}^3$ ; 100年一遇暴雨条件下可达 $5.17 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 最大固体物质冲出总量预计为 $2.24 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。据此提出了“点-线-面”致灾机理与危害性推测的新思路, 其结论将为该地区泥石流防治提供基础地质依据。

**关键词:** 洛高依达; 泥石流; 致灾机理

中图分类号: P642.23

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2017)01-0067-08

## Analysis on the debris flow hazard of Luogaoyida gully in Meigu county of Sichuan province

HU Yunpeng<sup>1</sup>, SHAO Hai<sup>2</sup>, FENG Wenkai<sup>1</sup>, WEI Changli<sup>3</sup>, YIN Zhiqiang<sup>2</sup>, ZHANG Ying<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 2. China Institute of Geological Environmental Monitoring, Beijing 100081, China; 3. Sichuan Institute of Geological Survey, Chengdu, Sichuan 610081, China)

**Abstract:** There are many tributaries on both sides of Luogaoyida valley in Meigu River Watershe, southwest China. The downward erosion effect, excellent catchment conditions and rich materials for the debris flows. In this regional geological environment contains a potential threat to the outbreak of debris flows. Author divide the tributary into lasting tributary and fulminant tributary based on field investigation and indoor numerical calculation. On the basis of the mass of debris flow mechanism, combined with local rainfall conditions through the awareness of mass of debris flow hazard and quantized calculation. . we can find that on the condition of encountering maximum rainfall in 50 years, Mudslides' flow can be  $4.65 \times 10^4 \text{ m}^3$ ; On the condition of encountering maximum rainfall in 100 years, Mudslides' flow can be  $5.17 \times 10^4 \text{ m}^3$ . Accordingly, the new idea of “point-line-area” to speculated the mechanism of the hazards and dangers can provide a reference for future cases of prevention design about debris flow disaster.

**Keywords:** Luogaoyida; debris flow; formation mechanism

收稿日期: 2016-03-25; 修订日期: 2016-06-22

基金项目: 国家自然科学基金(41572291); 中国地质调查局地质调查项目(12120115045201)

第一作者: 胡云鹏(1992-), 男, 硕士, 主要从事地质灾害研究与岩土工程。E-mail: 376483711@qq.com

通讯作者: 邵海(1986-), 男, 硕士, 主要从事工程地质与地质灾害研究。E-mail: shaoh@mail.cigem.gov.cn

## 0 引言

泥石流是一种在国内外山区常见的地质灾害,其触发的时空条件往往是在极端天气下,特定区域范围内(以小流域居多)暴发多处泥石流的地貌过程<sup>[1]</sup>。泥石流存在着一定的链式灾害效应,即泥石流→堵塞主河→溃决洪水(或回淤淹没)过程是一个较为普遍的现象。在时间尺度上,泥石流具有典型的随机性和不确定性,且在致灾性上表现为危害程度上的“叠加-放大”、空间分散与数量集中等特点<sup>[2-3]</sup>。

本文研究区洛高依达流域自2000年至今已暴发过数次规模大小不一的泥石流,例如尔合村泥石流由暴雨诱发启动,总冲出量达 $5 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,堆积面积为 $1.5 \times 10^4 \text{ m}^2$ ,造成了大量的人员伤亡和经济损失。经本次现场调查发现,丰富的物源以及条条沟口吹喇叭的特征,显示出泥石流活动的频繁性<sup>[4]</sup>。笔者结合前人在泥石流灾害方面的研究成果与本次对洛高依达流域进行的详细地质灾害调查,提出“点-线-面”揭露该区域地质灾害发育机理的新思路,将流域内泥石流归纳为持久型和爆发型两种,据雨洪法初步估算量化洛高依达流域群发泥石流的物源冲出量。综合评价该区域泥石流爆发特征,为以后对于该区域或相近类型的灾害防治设计提供参考。在雨季来临时需要提高警惕,提防不易被发现的小流域泥石流灾害,做好预警预报工作,最大程度地减轻泥石流灾害<sup>[5]</sup>。

## 1 地貌与地质环境

洛高依达小流域位于四川省凉山州美姑县南西侧约8 km处,美姑河左岸,其主沟发源于子威乡南部沙洛一带北东侧,沟口处于新桥乡镇所在地,沟口坐标:东经 $103^\circ 3' 15.49''$ ,北纬 $28^\circ 18' 4.4''$ 。该流域主要涵盖上游的子威乡、中游的依洛拉达乡及沟口的佐戈依达乡斯干千聚居区等,共计3个乡镇,23个村落。区内地表水系属金沙江流域,美姑河为县域内主要河流(图1)。

研究区属深切构造侵蚀中山地形。流域内库莫和尼普莫断层分别位于主沟右岸和左岸近平行于主沟穿过,断裂倾角较陡,具有一定的韧性剪切性质。流域中下游主要出露侏罗系新村组,益门组砂岩粉砂岩。上游则以三叠系百果湾群的砾砂岩以及石英砂岩为主。第四系地层则以全新统冲积层,残坡积,崩坡积等分布于沟道两岸斜坡。

## 2 泥石流形成条件

### 2.1 地形条件

洛高依达沟流域整体似树叶型,内部水系呈叶脉状不均匀分布,沟口最低点高程为1 880 m,沟源最高点高程为2 952 m,高差1 072 m。主沟长9.8 km,流域面积 $33.5 \text{ km}^2$ ,在沟口处汇于美姑河主河。主沟平均纵坡降110‰,跌水发育不明显,坡降突变处较少。沟道断面多呈上“V”,下“U”型。中下游段两侧地形较陡,坡度在 $30^\circ \sim 50^\circ$ ,局部地段近垂直。主沟道两岸分布大量活动性冲沟,平均纵坡降约240‰。两岸坡度在 $25^\circ \sim 50^\circ$ 。流域内沟道流通条件较好,水动力作用下易于实现沟道内堆积块碎石以及其他松散物源势能~动能的释放与转化,使得多条支沟在汇入主沟道时形成洪峰。

### 2.2 物源条件

本次调查采用遥感解译与实地调查相结合,进一步确定流域内物源的分布情况。经大量统计分析发现,流域内物源以支沟发育的崩滑体为主,沟道内堆积以及岸坡松散物源为辅,流域内物源详细分布见图2。

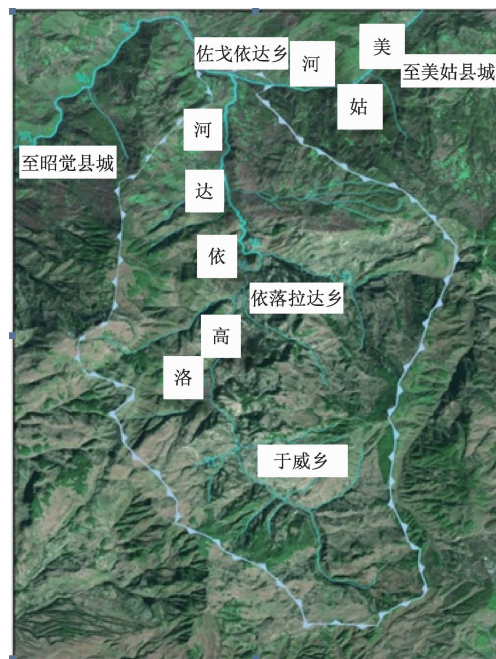


图1 洛高依达小流域水系遥感影像图

Fig. 1 Remote sensing image of Luogaoyida Watershed

#### 2.2.1 崩滑物源

洛高依达沟域内崩滑物源主要分布于两岸支沟内,据本次调查发现,流域内发育有崩滑灾害物源点46处,

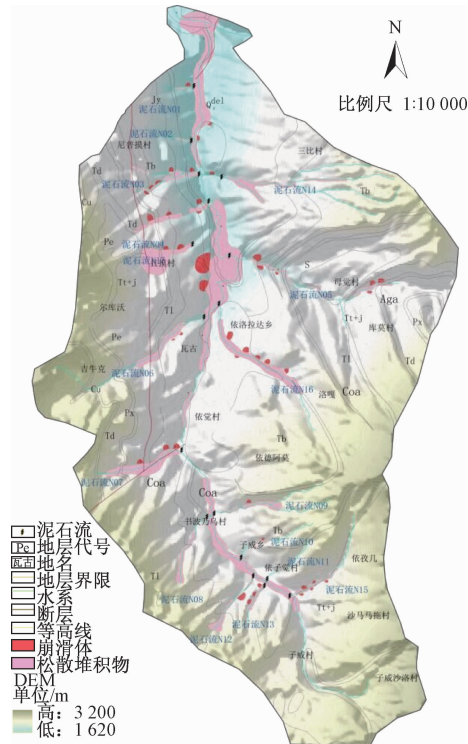


图 2 洛高依达流域物源灾害分布

Fig. 2 Distribution of hazards and materials for calamity in Luogaoyida watershed

其中滑坡 38 处,崩塌 8 处,按规模划分崩塌与滑坡均为小型。这些崩塌和滑坡可为泥石流提供物源总量  $36.22 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,其中可参与泥石流流动储量为  $25.35 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,是洛高依达沟的主要物源类型(图 3、图 4)。



图 3 泥石流沟道两岸滑坡物源

Fig. 3 Materials for landslide on both sides of the channel

2.2.2 沟道堆积物

流域内物源主要为沟道堆积物及暴雨或泥石流将坡面物源或崩滑堆积体搬运至沟道中堆积形成的松散堆积物源。本次调查沟道物源总量约为  $3.67 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,其中可能参与泥石流的物源量为  $1.47 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,为流域内群发性泥石流的又一重要物源(图 5)。

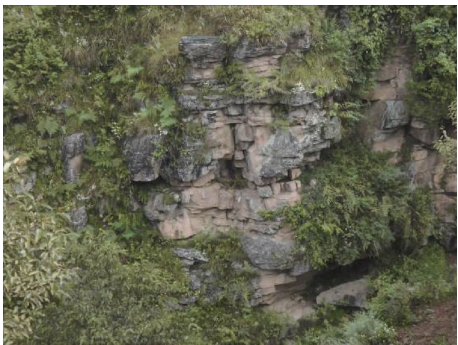


图 4 泥石流沟道两岸崩塌物源

Fig. 4 Materials for collapse on both sides of the channel



图 5 支沟沟道内堆积物

Fig. 5 Accumulations in tributary channel

2.2.3 坡面侵蚀物源

洛高依达流域整体上植被发育情况较好,多以灌木、草丛以及区域性森林为主。局部地段成片的坍塌现象严重,植被遭到一定程度的破坏,这些地段水土流失在植被恢复前这段时间内可能加剧,将为泥石流的形成提供一定的松散物源(图 6)。经本次调查统计,沟域内坡面侵蚀潜在物源量约  $2.88 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,可能参与泥石流活动的动储量为  $0.58 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。



图 6 沟道两岸岸坡松散堆积物

Fig. 6 Loose deposits on both sides of the channel

2.3 降雨条件

流域内降雨在时空分布上并非十分集中,历年月

平均降水量以 6 月为最多达 167.5 mm,1 月为最少仅 4.9 mm。整年平均降水量为 814.6 mm,最多年份 1968 年为 1 121.2 mm,最少年份 1962 年仅 590 mm。空气较为干燥,6~10 月份为降雨高峰期,常出现暴雨,持续性降雨的灾害天气。而空间上由于主沟纵坡降突变较小,区域性降雨差异则多表现在流域内地形、地势相差较大的支沟群,整体表现为局部小气候特征

复杂的特点。

根据《四川省中小流域暴雨洪水计算手册》所附暴雨量等值线图,洛高依达流域的 1/6 h、1 h、6 h、24 h 多年最大暴雨量平均值分别为 12.5 mm、35 mm、65 mm、75 mm,变异系数分别为 0.35、0.40、0.40、0.35,根据变异系数,查皮尔逊 III 型曲线得到不同频率下模比系数并求得不同频率下的雨强值统计见表 1。

表 1 洛高依达流域不同频率下雨强值计算表

Table 1 value fo rainfall intensity in Luogaoyida watershed

| 频率 P | 10 min 雨强 |      |         | 1h 雨强 |      |         | 6h 雨强 |      |         | 24h 雨强 |      |         |
|------|-----------|------|---------|-------|------|---------|-------|------|---------|--------|------|---------|
|      | 变异系数      | 模比系数 | 设计雨强/mm | 变异系数  | 模比系数 | 设计雨强/mm | 变异系数  | 模比系数 | 设计雨强/mm | 变异系数   | 模比系数 | 设计雨强/mm |
| 1%   | 0.35      | 2.11 | 26.4    | 0.40  | 2.31 | 80.9    | 0.40  | 2.31 | 150.2   | 0.35   | 2.11 | 158.3   |
| 2%   |           | 1.92 | 24.0    |       | 2.08 | 72.8    |       | 2.08 | 135.2   |        | 1.92 | 144.0   |
| 5%   |           | 1.67 | 20.9    |       | 1.78 | 62.3    |       | 1.78 | 115.7   |        | 1.67 | 125.3   |
| 10%  |           | 1.47 | 18.4    |       | 1.53 | 53.6    |       | 1.53 | 99.5    |        | 1.47 | 110.3   |

### 3 流域泥石流“点-线-面”致灾机理

泥石流的爆发有着时空上的差异,受到小范围地质环境,气象水文,人类活动等因素的影响,有较为典型的

随机性特征。因此,为了更加全面的分析与预测流域内可能发生的灾害,采用点-线-面的成灾思路,将普通的物源点与流域的大型灾害有效紧密的联接起来,更加全面的评价洛高依达小流域的整体稳定性见图 7。

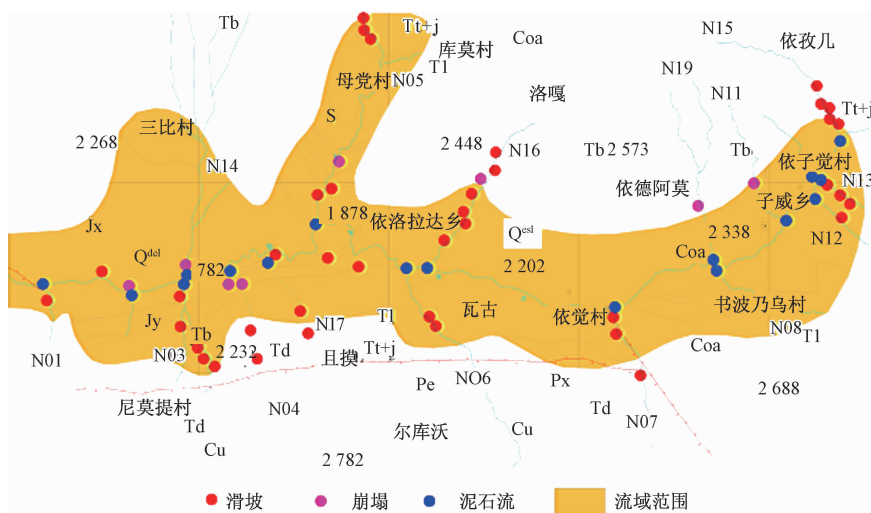


图 7 洛高依达流域地质灾害分布图

Fig.7 Distribution of hazards in this region

#### 3.1 泥石流“点”分析

从灾害分布点来讲,流域内主要启动物源来源于上游,下游左岸以及中游右岸,主沟道两岸物源受地形以及岩性等因素控制而相对匮乏。整体分布较为集中,依洛拉达乡至子威乡段灾害不发育。物源种类多以崩滑物以及沟道物源为主,其中 N03, N04, N05, N17 沟道内滑坡,崩塌灾害均有发育,而 N05, N13, N16 沟道内灾害则以小型土质滑坡为主。崩滑物距离沟道约 2~5 m,在降雨或水流的侧蚀作用下较易直接滑入沟

内堵塞径流系统,使得单个沟道出现局部堰塞湖效应,若蓄水量足够大,将会在水位抬升至一定高度时溃决而引发山洪流;若水动力较为强劲,会将两岸以及沟底物质揭岸冲刷,大量汇集沟道内可移动物源进而爆发泥石流。而且经实际调查发现,部分居民房建在崩滑物源的顶部,(如 N03, N04 下游平缓段)临近岩土体的拉裂滑动势必影响构筑物基础的稳定性,甚至可能在泥石流爆发前由于地基的拉裂引发建筑物的不均匀沉降,直接危害到居民的生命安全。

3.2 泥石流“线”分析

整个流域内发育支沟 20 有余,但经过现场实际调查判断约有 17 条沟道具备暴发泥石流的潜在条件。流域内的泥石流沟道大体上可以分为两类,一类是持久型,即在常规降雨天气下,沟道内都会有少量的物源冲出沟口堆积,其搬运频率高或呈多段式由中上游至下游搬运,沟口搬运距离较近,整体动能较小,物质多以较小的块碎石为主;另一类是暴发型,即仅在集中暴雨等极端天气下,沟道内物源大量涌出至开阔段堆积或汇入主沟,这类泥石流具有隐蔽性强,发生频率低,但暴发突然,破坏力大等特点<sup>[6]</sup>。

泥石流的暴发是大地物质本身能量的释放与再平衡的变化过程,细观上表现为崩塌,滑坡等自然灾害的产生与发展,宏观上则对应区域地貌的演化进程。对于持久型泥石流来讲,由于其诱发条件相对较低,外界轻微的扰动便可导致内部能量的部分释放,使其整体与周边的区域环境保持动态平衡。即使在极端条件下,可用于释放并弥补再平衡所需要的能量也相对较小,表现在极端诱发条件下,沟道的搬运冲蚀能力较往常有所提升,但幅度不大;对于暴发型泥石流来讲,短期内的地质构造运动与自然因素对其外观的改造较小,相反内部本身便会在这些内外营力作用下产生较多的应力集中区(即滋生大型崩滑灾害的温床),长期蓄积能量无法释放,在地震或集中暴雨的情况下产生上述灾害链效应,短期内加速了区域地貌的演化进程,直至与周边环境恢复再平衡的状态。

对于主沟道来讲,洛高依达沟沟域不是由典型的

形成区、流通区和堆积区组成,特别是没有典型的流通区。根据泥石流形成条件和运动机制及松散物源的分布,将沟域划分为三个片区。子威乡南侧支沟植被较为发育,物源分布较少,地质灾害不发育,因此划为泥石流形成区(清水区);子威乡至沟口斯干千聚集区两岸崩滑现象发育,沟床堆积物丰富,为沟域内泥石流松散固体物源的主要分布区域,划为泥石流形成区(物源区),沟口至 103 省道交汇处为泥石流流通堆积区,各支沟以及主沟道详细信息见表 2。

山区沟谷型泥石流往往以侵蚀揭底补给与侧蚀崩塌、堵塞、溃决等共同参与泥石流的起动过程<sup>[7]</sup>。结合以上信息及表格可以发现,支沟中沟道 N04,N13,N16,N17 中下游两岸以及 N15 沟口处均分布有大小不一的居民聚集区,且这几条支沟物源相对丰富,部分纵坡降高达 350‰以上,多数正处于发展期,沟道较为顺直,N03 和 N04 跌水尤其发育,在极端天气下可以提供较优的流通过径以及强大的水动力,强力冲刷侧蚀,致使沟口及两岸居民成为直接受灾对象。沟道 N08,N09,N10,N11,N12 等沟域范围内仅零星分布少数居民,多数正处于泥石流形成期,两岸坡面松散物源虽多但较难启动。下游支沟如 N01,N02,等,沟道下切较深,基岩出露明显,沟道内动储量物源较少,但沟口堆积扇仍较为完整,表明沟道历史上曾爆发过小型泥石流,目前处于衰退期。主沟道近期末发生过大规模泥石流,但沟口堆积体依然存在,且呈缓慢淤高趋势,推断历史上曾发生过泥石流灾害,但目前处于向沟口缓慢输砂阶段。

表 2 泥石流特征信息统计

Table 2 Statistics of debris flow's characteristics

| 泥石流编号 | 规模 | 植被覆盖率% | 主沟纵坡降 | 沟槽断面 | 易发程度 | 相对高差/m | 两岸坡度/(°) | 流域面积/km <sup>2</sup> | 泥石流发展阶段 |
|-------|----|--------|-------|------|------|--------|----------|----------------------|---------|
| N01   | 中型 | 30     | 367‰  | V    | 中易发  | 191    | 35       | 0.303                | 衰退期     |
| N02   | 小型 | 70     | 349‰  | V    | 低易发  | 166    | 24       | 0.143                | 衰退期     |
| N03   | 中型 | 65     | 356‰  | V    | 中易发  | 835    | 26       | 1.466                | 发展期     |
| N04   | 中型 | 85     | 361‰  | V    | 低易发  | 702    | 20       | 0.785                | 发展期     |
| N05   | 中型 | 60     | 102‰  | U    | 低易发  | 212    | 24       | 9.600                | 发展期     |
| N06   | 小型 | 75     | 238‰  | V    | 低易发  | 417    | 24       | 0.527                | 发展期     |
| N07   | 小型 | 50     | 218‰  | V    | 中易发  | 367    | 36       | 0.076                | 发展期     |
| N08   | 小型 | 45     | 230‰  | V    | 低易发  | 219    | 22       | 0.134                | 形成期     |
| N09   | 小型 | 70     | 192‰  | V    | 低易发  | 345    | 26       | 4.500                | 形成期     |
| N10   | 小型 | 45     | 207‰  | V    | 低易发  | 300    | 36       | 0.150                | 形成期     |
| N11   | 小型 | 80     | 215‰  | V    | 低易发  | 260    | 19       | 0.247                | 形成期     |
| N12   | 小型 | 70     | 201‰  | V    | 低易发  | 213    | 31       | 0.240                | 发展期     |
| N13   | 小型 | 60     | 199‰  | V    | 低易发  | 165    | 32       | 0.064                | 发展期     |
| N14   | 小型 | 75     | 235‰  | V    | 低易发  | 731    | 22       | 1.200                | 形成期     |
| N15   | 小型 | 70     | 147‰  | U    | 中易发  | 289    | 20       | 0.982                | 发展期     |
| N16   | 中型 | 45     | 180‰  | V    | 严重   | 940    | 35       | 3.500                | 衰退期     |
| N17   | 小型 | 35     | 387‰  | V    | 中易发  | 846    | 36       | 0.680                | 衰退期     |

### 3.3 泥石流“面”分析

流域内崩滑物的垮塌或者物源的再启动将会触发单沟泥石流灾害,再加上暴雨、地震等极端条件将会使得数条单沟泥石流在某一时间点范围内同时暴发,进而促使主沟、支沟并存的区域性泥石流复活。

流域内泥石流的群体暴发对于调查区整体稳定性存在着两种潜在威胁影响。一方面,如果主沟道的冲刷能力不足,整体表现为淤积大于冲刷时,泥石流的暴发可能会在中游堵塞洛高依达主沟,尤其是沟域内几条致灾性严重,物源极其丰富,地域条件较好的泥石流沟道,使得上游水流阻隔蓄积,形成小型堰塞湖。尤其是主沟与支沟 N05 交汇处,河道有较大拐弯,若上游携带的大量物源以较高动能迅速运移至此将会漫出主沟道并在此扼口段大量堆积。

另一方面,主沟道水动力强劲,搬运条件较好,能将大多数支沟以及主沟物源汇聚冲刷至下游,若赶上群体性泥石流暴发,各支沟内的物源将会源源不断的汇聚于主沟道内,加上极端条件下提供的大量水源势必使得主沟道内水位迅速上升,在有利的地形以及动力条件下迅速将物源搬移至主沟沟口,给沟口堆积扇区范围内的居民区带来毁灭性破坏,甚至出现泥石流堵断美姑河主河道,对美姑河下游大量人类聚集区产生严重影响,整个流域的生态平衡系统可能将面临崩溃。

点灾害、线灾害、面灾害并非在某个时间点单独出

现,而是在某一特定时空效应的进尺下一进而发,更加值得注意的是,整个灾害的暴发过程,不只遵循“点-线-面”的时间连续性,同时也具备局部空间致灾过程的重复特征,例如某个沟道的多段堵塞,改道等,都是上述灾害重复致灾的宏观表征。

## 4 流域泥石流冲出物源量

由于流域内群发性泥石流的触发条件最可能是降雨和地震,而地震触发的灾害效应难以预计,故此处根据流域近几十年的气象水文资料采用雨洪法推算可能暴发的泥石流物源冲出量<sup>[8]</sup>。

### 4.1 清水流量

按中国公路科学研究所提出的经验公式计算地表水汇水流量,计算工况分别按 100 年一遇暴雨,50 年一遇暴雨,20 年一遇暴雨,10 年一遇暴雨。

当汇水面积  $F \geq 3 \text{ km}^2$  时计算公式为:

$$Q_p = \psi F^{\frac{2}{3}} s$$

当汇水面积  $F < 3 \text{ km}^2$  时计算公式为:

$$Q_p = \psi F s$$

式中:  $Q_p$  ——暴雨洪峰流量/( $\text{m}^3/\text{s}$ );

$\psi$  ——暴雨径流系数;

$F$  ——汇水面积/ $\text{km}^2$ ;

$s$  ——小时雨强/( $\text{mm}/\text{h}$ )。

据此,求得的各沟道暴雨洪峰流量值详见表 3。

表 3 洛高依达沟及其主要支沟洪峰流量计算表

Table 3 Strom peak flow of all main channels in Luogaoyida watershed

| 泥石流位置  | 汇水面积/ $\text{km}^2$ | 小时雨强/( $\text{mm}/\text{h}$ ) |        |        |         | 径流系数 | 暴雨洪峰流量/( $\text{m}^3/\text{s}$ ) |        |        |         |
|--------|---------------------|-------------------------------|--------|--------|---------|------|----------------------------------|--------|--------|---------|
|        |                     | P = 1%                        | P = 2% | P = 5% | P = 10% |      | P = 1%                           | P = 2% | P = 5% | P = 10% |
| N01    | 0.303               | 80.85                         | 72.8   | 62.3   | 53.55   | 0.1  | 2.4                              | 2.2    | 1.9    | 1.6     |
| N02    | 0.143               | 80.85                         | 72.8   | 62.3   | 53.55   | 0.1  | 1.2                              | 1.0    | 0.9    | 0.8     |
| N03    | 1.466               | 80.85                         | 72.8   | 62.3   | 53.55   | 0.1  | 11.9                             | 10.7   | 9.1    | 7.9     |
| N04    | 0.785               | 80.85                         | 72.8   | 62.3   | 53.55   | 0.1  | 6.3                              | 5.7    | 4.9    | 4.2     |
| N05    | 9.600               | 80.85                         | 72.8   | 62.3   | 53.55   | 0.1  | 17.2                             | 15.5   | 13.2   | 11.4    |
| N06    | 0.527               | 80.85                         | 72.8   | 62.3   | 53.55   | 0.1  | 4.3                              | 3.8    | 3.3    | 2.8     |
| N07    | 0.076               | 80.85                         | 72.8   | 62.3   | 53.55   | 0.1  | 0.6                              | 0.6    | 0.5    | 0.4     |
| N08    | 0.134               | 80.85                         | 72.8   | 62.3   | 53.55   | 0.1  | 1.1                              | 1.0    | 0.8    | 0.7     |
| N09    | 4.500               | 80.85                         | 72.8   | 62.3   | 53.55   | 0.1  | 13.3                             | 12.0   | 10.3   | 8.8     |
| N10    | 0.150               | 80.85                         | 72.8   | 62.3   | 53.55   | 0.1  | 1.2                              | 1.1    | 0.9    | 0.8     |
| N11    | 0.247               | 80.85                         | 72.8   | 62.3   | 53.55   | 0.1  | 2.0                              | 1.8    | 1.5    | 1.3     |
| N12    | 0.240               | 80.85                         | 72.8   | 62.3   | 53.55   | 0.1  | 1.9                              | 1.7    | 1.5    | 1.3     |
| N13    | 0.064               | 80.85                         | 72.8   | 62.3   | 53.55   | 0.1  | 0.5                              | 0.5    | 0.4    | 0.3     |
| N14    | 1.200               | 80.85                         | 72.8   | 62.3   | 53.55   | 0.1  | 9.7                              | 8.7    | 7.5    | 6.4     |
| N15    | 0.982               | 80.85                         | 72.8   | 62.3   | 53.55   | 0.1  | 7.9                              | 7.1    | 6.1    | 5.3     |
| N16    | 3.500               | 80.85                         | 72.8   | 62.3   | 53.55   | 0.15 | 18.4                             | 16.6   | 14.2   | 12.2    |
| N17    | 0.680               | 80.85                         | 72.8   | 62.3   | 53.55   | 0.15 | 8.2                              | 7.4    | 6.4    | 5.5     |
| 洛高依达主沟 | 33.5                | 80.85                         | 72.8   | 62.3   | 53.55   | 0.1  | 84.02                            | 75.65  | 64.74  | 55.65   |

4.2 泥石流峰值流量

$$Q_c = (1 + \psi) Q_p D_c$$

式中： $D_c$ ——泥石流断面峰值流量/( $m^3/s$ )；

$\psi$ ——泥沙修正系数，采用查表法得到的结果；

$Q_p$ ——暴雨洪峰流量；  
 $D_c$ ——堵塞系数，按勘查规范表 I.1 查表确定。  
据此，采用雨洪法求得泥石流峰值流量见表 4。

表 4 洛高依达沟及其主要支沟泥石流峰值流量计算表

Table 4 Mudslides peak flow of all main channels in Luogaoyida watershed

| 泥石流位置  | 清水流量( $m^3/s$ ) |         |         |          | 泥沙修正系数 | 泥石流堵塞系数 | 泥石流峰值流量( $m^3/s$ ) |         |         |          |
|--------|-----------------|---------|---------|----------|--------|---------|--------------------|---------|---------|----------|
|        | P = 1 %         | P = 2 % | P = 5 % | P = 10 % |        |         | P = 1 %            | P = 2 % | P = 5 % | P = 10 % |
| N01    | 2.4             | 2.2     | 1.9     | 1.6      | 1.557  | 1.2     | 4.48               | 4.11    | 3.55    | 2.99     |
| N02    | 1.2             | 1.0     | 0.9     | 0.8      | 1.345  | 1.2     | 1.94               | 1.61    | 1.45    | 1.29     |
| N03    | 11.9            | 10.7    | 9.1     | 7.9      | 1.577  | 1.3     | 24.40              | 21.94   | 18.66   | 16.20    |
| N04    | 6.3             | 5.7     | 4.9     | 4.2      | 1.500  | 1.3     | 12.29              | 11.12   | 9.56    | 8.19     |
| N05    | 17.2            | 15.5    | 13.2    | 11.4     | 1.532  | 1.5     | 39.53              | 35.62   | 30.33   | 26.20    |
| N06    | 4.3             | 3.8     | 3.3     | 2.8      | 1.483  | 1.1     | 7.01               | 6.20    | 5.38    | 4.57     |
| N07    | 0.6             | 0.6     | 0.5     | 0.4      | 1.557  | 1.3     | 1.21               | 1.21    | 1.01    | 0.81     |
| N08    | 1.1             | 1.0     | 0.8     | 0.7      | 1.402  | 1.0     | 1.54               | 1.40    | 1.12    | 0.98     |
| N09    | 13.3            | 12.0    | 10.3    | 8.8      | 1.402  | 1.1     | 20.51              | 18.51   | 15.88   | 13.57    |
| N10    | 1.2             | 1.1     | 0.9     | 0.8      | 1.426  | 1.0     | 1.71               | 1.57    | 1.28    | 1.14     |
| N11    | 2.0             | 1.8     | 1.5     | 1.3      | 1.402  | 1.0     | 2.80               | 2.52    | 2.10    | 1.82     |
| N12    | 1.9             | 1.7     | 1.5     | 1.3      | 1.426  | 1.2     | 3.25               | 2.91    | 2.57    | 2.22     |
| N13    | 0.5             | 0.5     | 0.4     | 0.3      | 1.483  | 1.3     | 0.96               | 0.96    | 0.77    | 0.58     |
| N14    | 9.7             | 8.7     | 7.5     | 6.4      | 1.492  | 1.1     | 15.92              | 14.28   | 12.31   | 10.50    |
| N15    | 7.9             | 7.1     | 6.1     | 5.3      | 1.557  | 1.4     | 17.22              | 15.48   | 13.30   | 11.55    |
| N16    | 18.4            | 16.6    | 14.2    | 12.2     | 1.932  | 2.0     | 71.10              | 64.14   | 54.87   | 47.14    |
| N17    | 8.2             | 7.4     | 6.4     | 5.5      | 1.663  | 1.7     | 23.18              | 20.92   | 18.09   | 15.55    |
| 洛高依达主沟 | 84.02           | 75.65   | 64.74   | 55.65    | 1.765  | 1.1     | 163.12             | 146.87  | 125.69  | 108.04   |

4.3 一次泥石流过流总量

一次泥石流过流总量按照《泥石流灾害防治工程勘查规范》(DT/T0220-2006)附录 I 提供的计算公式进行计算：

$$Q = 0.264 T Q_c$$

式中： $Q$ ——一次泥石流过程总量/ $m^3$ ；

$T$ ——泥石流历时/s；

$Q_c$ ——泥石流最大流量/( $m^3/s$ )。

根据调查分析可知，2010 年依洛拉达沟泥石流为近期发生的最大规模泥石流，历时约为 20 分钟，即  $T = 1200\text{ s}$ ，考虑整个流域内主沟道在 100 年一遇暴雨和 50 年一遇暴雨情况下泥石流过流总量，其中  $P = 1\%$  根据雨洪法确定泥石流峰值流量为  $71.10\text{ m}^3/\text{s}$ ，代入上式计算可得遭遇百年一遇暴雨时主沟道一次泥石流过流总量约为  $5.17 \times 10^4\text{ m}^3$ ；而当  $P = 2\%$  时，泥石流峰值流量为  $64.14\text{ m}^3/\text{s}$ ，代入计算可得遭遇五十年一遇暴雨时主沟道一次泥石流过流总量约为  $4.65 \times 10^4\text{ m}^3$ 。

4.4 一次泥石流固体冲出物

一次泥石流固体冲出物按照《泥石流灾害防治工程勘查规范》(DT/T0220-2006)附录 I 提供的计算公式进行计算：

$$Q_H = Q(\gamma_c - \gamma_w) / (\gamma_H - \gamma_w)$$

式中： $Q_H$ ——一次泥石流冲出固体物质总量/ $m^3$ ；

$Q$ ——一次泥石流过程总量/ $m^3$ ；

$\gamma_c$ ——泥石流重度/( $t/m^3$ )；

$\gamma_w$ ——水的重度/( $t/m^3$ )；

$\gamma_H$ ——泥石流固体物质的重度/( $t/m^3$ )。

据前面的计算结果和分析测试结果，预测洛高依达沟主沟泥石流暴发时泥石流冲出量为  $Q = 5.17 \times 10^4\text{ m}^3$ ，泥石流重度  $\gamma_c = 1.703\text{ t/m}^3$ ，水的重度  $\gamma_w = 1\text{ t/m}^3$ ，泥石流固体物质重度  $\gamma_H = 2.62\text{ t/m}^3$ ，据此计算出固体物质冲出总量为  $Q_H = 2.24 \times 10^4\text{ m}^3$ 。

5 结论

(1)洛高依达流域内支沟较多且支沟不良地质现象较发育，沿程补给充分，纵坡降大等均有利于物源、水源的汇聚，提供强大的水动力条件；坡面结构松散、植被破坏严重而导致的水土流失加剧，以及沟谷强烈的下切和侧蚀作用为泥石流爆发提供了有利的自然条件。

(2)结合流域内泥石流沟的现状调查及暴发历史的综合分析，“持久型”泥石流的大量出现表明了该流域部分支沟已经具备良好流通路径与物源储备，“暴

发型”泥石流沟的灾害史证明洛高依达流域存在孕育严重致灾泥石流的地质环境条件。综合两种沟道的典型特征也揭示了该流域泥石流的活动性在不断加强,在某个时间点的极端外界条件激发下,极有可能引发群发性泥石流灾害。

(3)流域内泥石流灾害隐蔽性强,随机性大,难以探寻其明显的暴发规律。但其个体暴发特征较为明显,因此采用“点、线、面”的成灾思路,在实地详细调查的基础上,深入分析灾害点,灾害线,灾害面各自的特征,推测并总结其暴发的特点与危害。

(4)经调查统计洛高依达流域松散固体物源量约为  $42.77 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,可能参与泥石流活动的动储量为  $27.40 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。推测主沟道在 50 年一遇暴雨工况下,一次泥石流过流总量为  $4.65 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,100 年一遇暴雨工况下,一次泥石流过流总量为  $5.17 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,而一次冲出的固体物质总量为约为  $2.24 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

(5)结合“点-线-面”致灾机理分析,对区域地质灾害防治打出组合拳。通过对部分点灾害进行治理,从而有效限制部分支沟暴发时的输出能力,根据主沟道的走向形态,合理设计对支沟的防护措施,充分利用主沟的冲蚀输砂性能,避免在同一时间多沟暴发导致超出主沟的自我调节能力从而淤积溃坝等,形成多米诺骨牌型灾害群。

#### 参考文献:

- [ 1 ] 铁永波,唐川,倪化勇. 群发性泥石流的危害效应及防范探讨[J]. 山地学报,2010(6):753-757.  
TIE Yongbo,TANG Chuan,NI Huayong. Group debris flow hazards effect and its prevention[J]. Journal of Mountain Science, 2010(6):753-757.
- [ 2 ] 苏鹏程,韦方强,顾林康,等. 四川省德昌县群发性泥石流的特征和成因[J]. 山地学报,2010,05:593-606.  
SU Pengcheng, WEI Fangqiang, GU Linkang, et al. Characteristic and cause of group occurring debris flow in Dechang county Sichuan province [J]. Journal of Mountain Science, 2010(5):593-606.
- [ 3 ] 王家柱,任光明,余天斌,等. 四川芦山震区大叶龙沟泥石流发育特征及危险度评价[J]. 中国地质灾害与防治学报,2015,26(4):1-6.  
WANG Jiazhu, REN Guangming, YU Tianbin, et al. Development characteristics and risk assessment of Dayelong ditch's debris flow in Sichuan Lushan meizoseismal area [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2015,26(4):1-6.
- [ 4 ] 倪化勇,郑万模,唐业旗,等. 绵竹清平 8·13 群发泥石流成因、特征与发展趋势[J]. 水文地质工程地质,2011,38(3):129-133+138.  
NI Huayong, ZHENG Wanmo, TANG Yeqi, et al. Formation characteristics and trend of the group debris flows occurred on August 13 in QingPing, Mianzhu county [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2011,38(3):129-133+138.
- [ 5 ] 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(6):738-746.  
YU Bin, MA Yu, ZHANG Jiannan, et al. The group debris flow hazards after the Wenchuan earthquake in Longchi, Dujiangyan, Sichuan province [J]. Journal of Mountain Science, 2011(6):738-746.
- [ 6 ] 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(8):787-793.  
TANG Chuan, ZHANG Shucheng. Study progress and expectation for initiation mechanism and prediction of hydraulic driven debris flows [J]. Advances in Earth and Science, 2008(8):787-793.
- [ 7 ] 倪化勇,宋志,徐伟. 沟床侵蚀主导型泥石流形成机理与成灾特征——以石棉县 2013-07-04 群发泥石流为例[J]. 自然灾害学报,2015(2):97-106.  
NI Huayong, SONG Zhi, XU Wei. Formation mechanism and disaster characteristics of debris flows originated predominately from gully erosion: taking the 2013-07-04 clustered debris flows in Shimian county as an example [J]. Journal of Natural Disasters, 2015(2):97-106.
- [ 8 ] 蒋树,文宝萍. 国内外泥石流活动关键指标估算方法之比较[J]. 水文地质工程地质,2012,39(3):86-96.  
JIANG Shu, WEN Baoping. Comparison of methods used at home and abroad to estimate the key parameters of a debris flow [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2012,39(3):86-96.
- [ 9 ] 袁颖,王帅伟,满兵,等. 四川都江堰椿芽树沟泥石流特征参数计算及防治工程设计[J]. 中国地质灾害与防治学报,2015,26(2):51-56.  
YUAN Ying, WANG Shuaiwei, MAN Bing, et al. Calculation of characteristic parameters and design of control work against of debris flow in Chunyashu gully, Sichuan province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2015,26(2):51-56.