

岷江上游大白杨沟泥石流特征及成因

吴雨夫, 余斌, 亓星, 褚胜名, 李丽

(成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059)

摘要: 大白杨沟流域位于岷江上游四川省茂县境内, 处于叠溪镇较场山字型构造北端。该沟曾于1935年和1991年暴发过两次较大规模泥石流灾害, 其中1935年暴发的泥石流受1933年叠溪7.5级地震影响, 规模很大, 其泥石流峰值流量达到 $557 \text{ m}^3/\text{s}$ 。通过对大白杨沟流域两条支沟(小沟、大沟)的地形条件、水源条件及物源条件的特征分析, 得出两条支沟具有形成泥石流的充分条件: (1)大沟沟道平均纵比降275‰, 小沟为398‰, 相对高差达2 023 m; (2)大沟拥有的物源总量为29.21万 m^3 , 小沟达到42.01万 m^3 , 物源丰富。这些条件很好地解释了小沟泥石流的强活动性。对后期泥石流的形成机制进行分析, 大沟以“消防水管效应”形成泥石流为主, 小沟则以“消防水管效应”和堰塞体溃决两种方式形成泥石流。最后, 通过泥痕法还原了历史泥石流流量, 并对后期泥石流流量做了较合理的预测, 为大白杨沟泥石流灾害防治提供可靠的数据。

关键词: 大白杨沟; 泥石流; 地震; 特征; 成因机制; 岷江上游

中图分类号: P642.23

文献标志码: A

文章编号: 1000-8527(2012)01-0107-07

Features and Formation Mechanism of Debris Flow in Dabaiyang Gully in Upper Reaches of Minjiang River

WU Yu-fu, YU Bin, QI Xing, CHU Sheng-ming, LI Li

(State Key Laboratory of Geohazards Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: The Dabaiyang gully is located at the Jiaochang epsilon-type structure in the north of Diexi town, Maoxian County, Sichuan Province, which is in upper reaches of Minjiang River. Two large-scale flow debris events occurred in the gully in 1935 and 1991, and the flow debris in 1935 was caused by the 1933 Diexi Earthquake ($M_s = 7.5$) which is huge with peak flow of $557 \text{ m}^3/\text{s}$. After the analysis of the landform, available loose materials and water conditions of two tributaries (Dagou and Xiaogou gullies) in Dabaiyang gully, it was obtained that there are sufficient conditions for the formation of tributary debris flow, which explains the intense activity of debris flow in the Xiaogou gully: (1) the average longitudinal gradient is 275‰ in the Dagou gully and 398‰ in the Xiaogou gully, and the relative altitude is 2,023 m; (2) the total amount of loose materials is 292,100 m^3 in the Dagou gully and 420,100 m^3 in the Xiaogou gully, and the source of materials is abundant. The formation mechanism of debris flow was also analyzed. It reveals that the formation of debris flow caused by the fire hose effect in the Dagou gully, and by the fire hose effect and the burst of barrage body in the Xiaogou gully. The flux of historical debris flow was calculated by mud trace investigation method, and the flux of future debris flow was appropriately forecasted, which provides valuable data for preventing debris flow disaster in Dabaiyang gully.

Key words: Dabaiyang gully; debris flow; earthquake; feature; formation mechanism; upper reaches of Minjiang River

收稿日期: 2011-07-29; 改回日期: 2011-11-22; 责任编辑: 潘令枝。

基金项目: 国家自然科学基金项目(40871054)。

作者简介: 吴雨夫, 男, 硕士研究生, 助理工程师, 1985年出生, 地质工程专业, 主要从事地质灾害防治工程和工程物探的研究工作。Email: thriu@qq.com。

大白杨沟流域位于岷江上游茂县太平乡木耳寨村,是条老泥石流沟,曾发生过两次致灾的较大规模泥石流。在“5·12”汶川地震中,木耳寨村原居民区遭受地震的严重破坏,已不适于居住,现迁徙于该村大白杨沟沟口的泥石流堆积扇上。笔者通过对大白杨沟泥石流灾害现场的两次调查,分析泥石流形成的3个必要条件^[1],针对不同的地形和物源条件,研究了大白杨沟两条支沟大沟、小沟的形成机制,并计算了泥石流的静动力学参数,探讨了泥石流的发展趋势,以期为大白杨沟泥石流灾害的防治提供科学数据。

1 大白杨沟流域自然环境概况

1.1 流域概况

大白杨沟位于四川省茂县太平乡木耳寨,沟口地理坐标为东经 103°42′32.4″、北纬 32°04′59.5″,为岷江一级支流。大白杨沟分大沟和小沟两条支沟(左支为大沟),大、小沟汇合后经主沟流入岷江,如图1所示。大白杨沟流域形态近似梨形,流域面积 8.42 km²,主沟纵向长度 0.98 km,沟道平均宽度约 8.5 m,纵比降 146‰。大沟流域纵向长度 3.52 km,流域面积 5.38 km²,沟道平均纵比降 275‰。小沟流域纵向长度 2.17 km,流域面积 2.26 km²,沟道平均纵比降 398‰。流域最

高点位于北东侧分水岭处,高程 4 283 m,最低点位于主沟沟口,高程 2 260 m,相对高差 2 023 m。

1.2 自然环境概况

大白杨沟流域属高原型季风气候,气候垂直分带显著。该流域所在茂县区域昼夜温差大,多年极端最高气温为 32℃,极端最低气温为 -11.6℃,主要接受大气降水补给,流量受降水量影响较大。

大白杨沟流域属邛崃山系岷山山脉,分布有高山地貌和第四系堆积地貌,流域总体上为深切“V”型谷,具有岸坡陡峻、切割深度较大的特点。流域内出露地层主要有第四系全新统崩坡积(Q_4^{el+dl})^[2]、残坡积(Q_4^{dl+el})、泥石流堆积(Q_4^{scf})和三叠系西康群杂谷脑组灰色变质砂岩、板岩夹结晶灰岩(T_2z),岩性较为单一。

大白杨沟流域位于较场山字型构造带北侧,区内岩层产状倒转,新构造运动强烈,自 1900 年以来,对流域影响较大的地震有 2 次:(1)1933 年 8 月 25 日发生的叠溪地震,震级为 7.5 级,震中位于较场山字型构造的前弧弧顶部位,流域内山体滑塌现象严重^[3],地震烈度为 X。(2)2008 年 5 月 12 日汶川特大地震,震级 8.0 级,震中位于汶川映秀,流域的地震烈度为 VIII,汶川地震中 VIII 烈度区多见崩塌和小型滑坡^[4]。

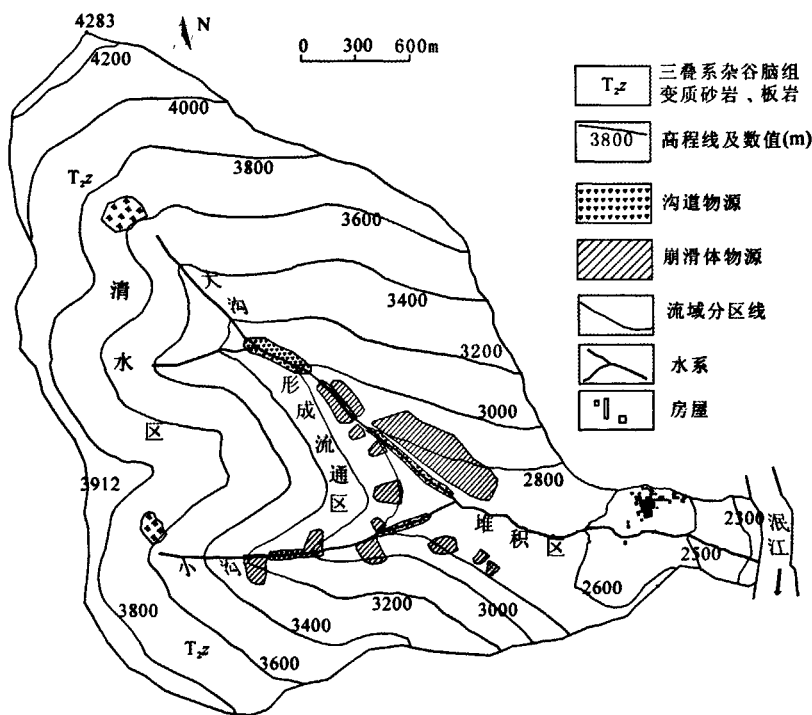


图1 大白杨沟流域图

Fig.1 Drainage basin of Dabaiyang gully

2 大白杨沟泥石流形成特征

2.1 地形特征

大白杨沟总体上为“V”型谷地貌,两条支沟大沟、小沟的沟道较窄,纵坡较陡,跌水坎较多。沟内水流湍急,且动态变化较大,具陡涨陡落的山溪沟谷特征(图2)。流域可分为清水区、形成流通区和堆积区。其中,清水区位于各支沟上游段(流域高程3 400 m以上),该区森林植被覆盖率较高,汇流面积大,达4.35 km²,山坡坡度大于25°,汇流条件好。形成流通区海拔为2 800~3 400 m,该区物源丰富,局部岸坡变形破坏强烈,该区大沟沟道平均纵比降为275‰,小沟沟道平均纵比降为398‰。堆积区从大沟沟口及小沟沟口(海拔2 800 m)开始,一直延伸到主沟口,堆积区长约1.5 km,宽约0.29 km,面积约0.62 km²。其中小沟山坡坡度大于30°的地表面积占小沟流域的49%,地势上小沟显得更陡峭些。据研究,成昆铁路沿线97%的泥石流发育处上坡坡度在28.8°~45.6°之间^[5]。综上,大白杨沟流域各支沟陡峭的山坡坡度、陡急的沟床和良好的流域汇流条件为泥石流的形成提供了较好的地形地貌条件。

2.2 水源特征

茂县境内多年平均降水量490.7 mm,降雨多



图2 大白杨沟流域地形特征图(镜像NW向)

Fig. 2 Topography map of Dabaiyang gully

集中在5至10月份,占全年降水量的80%以上,最大日降水量75.2 mm,同时随海拔的增加降雨量增大。根据《四川省中小流域暴雨洪水计算手册》所附的暴雨量等值线图,大白杨流域的1/6 h、1 h、24 h多年最大暴雨量平均值分别为10 mm、35 mm、30 mm;在频率 $P=5\%$ 的条件下,1/6 h、1 h、24 h暴雨强度可分别达到19.9 mm、26.7 mm、53.4 mm。据吴积善等^[6]研究,四川山区泥石流激发雨量一般为一次雨量48~50 mm或10 min雨量8~12.2 mm、1 min雨量0.8~1.2 mm。大白杨流域海拔高,降雨量集中,其暴雨强度完全满足激发泥石流的条件。

2.3 物源特征

大白杨沟泥石流松散固体物源较丰富,且物源分布较为集中,主要分布于小沟与大沟的中下游沟段。大白杨沟泥石流主要物源包括崩滑堆积物源、坡面侵蚀物源和沟道堆积物源等3类,共21处。崩滑堆积体物源13处,此类物源量大,均一性差,粒径从3~500 cm都有分布,其中小沟有2处崩滑堆积体堵塞沟道,现地表径流从堆积体中渗流通过。沟道堆积固体物源6处,主要为原沟道的泥石流堆积物及山洪搬运的碎石块。坡面侵蚀固体物源2处,可见坍滑现象,植被遭到严重破坏,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。松散固体物源量共计 $74.08 \times 10^4 \text{ m}^3$,大白杨沟主、支沟泥石流物源基本情况汇总见表2。其中,“5·12”汶川地震后新增4处物源皆为崩塌堆积体,据此统计,震后新增物源总量 $6.25 \times 10^4 \text{ m}^3$,占物源总量的8.5%。

由表2可见,小沟物源总量占大白杨流域物源总量的55.8%,然而小沟流域面积只占总流域的26.8%,每平方公里所拥有的物源量达 $18.1 \times 10^4 \text{ m}^3$,远大于大沟的每平方公里所拥有的物源。各类物源间也有密切的转化关系,崩滑堆积物源和坡面侵蚀物源在一般降雨条件下转化为沟道堆

表1 大白杨流域山坡坡度及地表高程分级统计

Table 1 Classification and statistics of slope and elevation of Dabaiyang gully

沟名	项目	山坡坡度/(°)				高程/m			
		<20	20~30	30~40	>40	<3 000	3 000~3 500	3 500~4 000	>4 000
大沟	地表面积/km ²	0.32	3.42	1.1	0.54	0.49	1.87	2.64	0.38
	所占比例/%	6	64	20	10	9	35	49	7
小沟	地表面积/km ²	0.17	0.96	0.91	0.21	0.15	0.87	1.24	—
	所占比例/%	8	43	40	9	7	38	55	—

表 2 大白杨沟泥石流物源统计

Table 2 Statistical data of debris flow material sources of Dabaiyang gully

沟名	崩滑堆积物源/万 m ³	沟道堆积物源/万 m ³	坡面侵蚀物源/万 m ³	合计/万 m ³
主沟	2.30	0.56		2.86
大沟	21.79	2.42	5	29.21
小沟	37.39	1.62	3	42.01
合计	61.48	4.60	8	74.08

积物源,而沟道堆积物源在强降雨作用下启动,也将沟蚀岸坡坡脚,加速沟谷岸坡上不稳定斜坡局部或整体失稳,为泥石流运动提供更多松散物源,甚至引起沟道堵塞,形成堰塞体。这些都为泥石流的形成提供了充足的物源条件。

3 泥石流历史调查及成因分析

3.1 泥石流历史调查

大白杨沟平均 4 至 6 年发生一次小规模泥石流,此类泥石流仅仅为两条支沟中的一条暴发,其中小沟暴发的次数占大多数。这些泥石流大部分顺着主沟流入岷江,偶尔有少量泥石流冲入耕地。除了这些小规模的泥石流,近百年来大白杨沟还暴发了两次规模较大的泥石流。1935 年,大、小沟同时暴发泥石流,规模很大,此次泥石流淤埋了木耳寨村平坝头原居民区十几户房屋,十几户居民无一生还;1991 年 6 月,小沟暴发泥石流,大约持续了 30 min,此次泥石流造成了堆积区上缘 70 余亩(1 亩 \approx 667 m²)耕地和林地被毁,未造成人员伤亡。最近一次暴发泥石流的时间在 2010 年 8 月,仅大沟暴发,少量泥石流被冲入耕地,也未造成人员伤亡,前面所述平均 4 至 6 年发生

一次的小规模泥石流类似于这次泥石流。

1935 年与 1991 年泥石流的堆积物呈混杂堆积,在断面上有反粒径分布,且粒径在 0.2 m 以上的块石仍然可以沉积在上部,如图 3 中左图。泥石流主要以块石为主,占总质量的 74%,岩性为三叠系西康群变质砂岩和板岩,块石粒径多在 8~30 cm 之间,最大块石粒径可达 1.5 m。由此可知两次泥石流均为粘性泥石流。两次泥石流淤埋范围都比较大,1935 年泥石流堆积区从大、小沟出口一直延伸到木耳寨居民区后缘,约 15×10^4 m²,平均淤积厚度约 2 m,泥石流堆积总量约 30 万 m³。1991 年泥石流受小沟沟道纵坡影响,该泥石流流速快,直进性较强,搬运块石粒径较大,泥石流先是淤埋了小沟沟口的大量梯田,由于梯田的减能作用,加上下游树林的阻挡作用,迫使泥石流在冲毁一部分林地之后淤积下来。通过现场勘测,1991 年淤埋面积大约 5.1×10^4 m²,平均淤积厚度约 1.5 m,泥石流堆积总量约 7.6 万 m³。

大白杨沟平均 4 至 6 年发生一次的小规模泥石流,都不是小沟和大沟同时暴发。当只是大沟暴发时,大沟冲出来的泥石流体在小沟洪水的稀释作用下演变成稀性泥石流;同样,当只有小沟暴发时,小沟流出来的泥石流体会被大沟的洪水稀释也会演变成稀性泥石流。这与泥石流历史访问中村民描述的主沟泥石流体一致。稀性泥石流的下切和冲刷作用强烈,大白杨沟主沟沟道的下切、侧蚀现象也非常严重。

根据访问调查得知,大白杨沟在 2010 年之前,平均 4 至 6 年发生一次小规模泥石流,属高频泥石流。1935 年和 1991 年泥石流是近百年来大白杨沟可知规模最大的两次,其中 1935 年次比



图 3 大白杨沟松散物源特征(左图小沟沟道堰塞体,镜像 NW 向;右图大沟沟道,镜像 NW 向)

Fig. 3 Features of loose materials in Dabaiyang gully (the left showing the barrage of the Xiaogou gully, NW direction; the right showing the channel of the Dagou gully, NW direction)



图4 小沟1991年泥石流淤积及沟道特征

Fig. 4 Deposition and channel characteristics of 1991's debris flow in Xiaogou gully

1991年次泥石流规模大得多。因此,推断大白杨沟泥石流历史重现期,1935年泥石流发生频率为100年一遇,1991年泥石流为50年一遇。

3.2 泥石流的成因分析

在泥石流形成过程中,流域内地形陡峻,沟谷纵坡大,为水源和泥沙的汇聚提供了有利的地形条件,大量的山坡崩滑体堆积物和沟道堆积物都为泥石流的发生提供丰富的物源条件。比较大、小沟的地形与物源特征,可以发现,小沟地形比大沟要更陡,其形成流通区的沟道纵比降明显比大沟大;山坡坡度在 $30^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 段,小沟所占比例明显更大,从地形条件上来说小沟比大沟更容易启动形成泥石流。在物源分布上,小沟流域物源占整个大白杨流域总物源的55.8%,然而其面积只占总流域的26.8%,从物源条件上来说小沟比大沟更容易形成泥石流。这与调查访问中大白杨沟主要是小沟发生泥石流的结果一致。

从成因上分析,泥石流可分为水力类与土力类^[5]两种类型。在水力类泥石流研究中,唐川等引入美国学者Griffiths的“消防水管效应”^[7-8]来描述泥石流启动情况。“消防水管效应”指快速汇流的山洪如同消防水管一样使沟槽内的松散堆积物被掀动或遭受揭底形成泥石流。通过对大白杨流域各支沟的地形、物源条件分析,大白杨沟泥石流形成机制可分为如下2种:

(1)大白杨流域在强降雨条件下,位于流域顶部的坡面侵蚀物源出现面蚀或沟蚀,由于流域上端地形坡度大,植被较差,面蚀及沟蚀较容易形成坡面泥石流并进入沟道内,雨水汇流过程中也会将其他各类松散堆积物源携带进入沟道。同时,流域上游水流快速汇流集中,随着流域内沟道水量不断增加,并快速顺沟而下,形成“消防水管效

应”,然后强烈冲刷沟床,揭底沟道内的松散堆积物源,并将两侧沟岸松散固体物质带走,以滚雪球的方式向下游运动,最终形成泥石流灾害。

(2)现场调查物源得知,大白杨沟内分布有3处较大堵塞沟道的堰塞体,其中小沟2处,大沟1处,由于堰塞体高度和颗粒粒径都较大,现流域内地表径流都是从堰塞体中渗流而过。因此,在强降雨条件下,当流域汇流的流量大于堰塞体渗流流量时将可能出现堰塞湖情况,一旦堰塞湖溃决,就很容易形成泥石流灾害。大沟的沟道物源占大沟流域总物源的8.3%,相对于小沟沟道物源,其所占比例更大,因此大沟泥石流主要以第一种形成机制为主。小沟由于地形陡峭,物源量大,沟道堰塞体较多,两种形成机制都有可能。

4 大白杨沟泥石流静动力学特征

4.1 泥石流容重及屈服应力

从现场泥石流的堆积特征可知,1991年暴发的泥石流为粘性泥石流。根据现场取样(小样)试验,可以计算粘性泥石流的容重^[9]:

$$\gamma_{10} = \gamma_0 + P_2 P_{05}^{0.35} \gamma_v \quad (1)$$

式中: γ_{10} 为粘性泥石流容重, g/cm^3 ; γ_v 为粘性泥石流最小容重,取 $2.0 \text{ g}/\text{cm}^3$; γ_0 为泥石流最小容重,取 $1.5 \text{ g}/\text{cm}^3$; P_2 为粒径 $>2 \text{ mm}$ 的粗颗粒百分含量; P_{05} 为粒径 $<0.05 \text{ mm}$ 的粗颗粒百分含量。经过计算得出,小沟1991年暴发的泥石流容重为 $2.2 \text{ g}/\text{cm}^3$ (表3)。

表3 泥石流容重计算参数

Table 3 Calculation parameters of debris flow density

$P_2/\%$	$P_{05}/\%$	$\gamma_0/(\text{g}/\text{cm}^3)$
59.7	22.2	2.2

但是在不同频率降雨条件下,暴发的泥石流所含大石块的量也会不一样,其容重也是不一样的^[10]。20 年一遇泥石流所能夹带的石块要更小些,以此推断 20 年一遇的容重比 50 年一遇的小,取值 2.1 g/cm^3 。而 100 年一遇泥石流所能夹带的大石块要更多,以此推断 100 年一遇的容重比 50 年一遇的大,取值 2.3 g/cm^3 。

泥石流屈服应力是描述泥石流淤积特征的重要参数,其计算方法为^[11]:

$$\tau_B = \gamma' g h \sin \theta \quad (2)$$

式中: τ_B 为泥石流屈服应力, Pa; $\gamma' = \gamma_c - \gamma_o$, 泥石流相对容重, kg/m^3 ; γ_c 为泥石流容重, kg/m^3 ; γ_o 为环境容重, 在空气中 $\gamma_o \approx 0 \text{ kg/m}^3$, 在水中 $\gamma_o = 1\,000 \text{ kg/m}^3$; g 为重力加速度, m/s^2 ; θ 为泥石流堆积体纵向坡度, ($^\circ$); h 为泥石流的堆积厚度, m。据调查, 1991 年泥石流容重为 2.2 g/cm^3 , 调查点泥石流的堆积厚度 1.4 m , 纵向坡度 8° 。1935 年泥石流容重为 2.3 g/cm^3 , 调查点泥石流的堆积厚度 4 m , 纵向坡度 4° 。故 50 年一遇泥石流的屈服应力为 $4\,199 \text{ Pa}$, 100 年一遇泥石流的屈服应力是 $6\,295 \text{ Pa}$ 。

4.2 泥痕法计算泥石流流速、流量及冲出总量

大白杨沟泥石流的流量和规模可以通过泥痕法计算得出。选用粘性泥石流平均速度公式^[12]计算流速, 一次泥石流过程总量的计算方法采用水量平衡原理分析出的概化过程线:

$$V = 1.1 (gR)^{1/2} I^{1/3} \left[\frac{D_{50}}{D_{10}} \right]^{1/4} \quad (3)$$

$$Q = VA \quad (4)$$

$$W = 0.264 TQ \quad (5)$$

式中: V 为泥石流断面平均流速, m/s ; g 为重力加速度, 取 9.81 m/s^2 ; R 为水力半径, m ; I 为泥石流表面(或沟床)纵比降; D_{50} 为泥石流泥沙颗粒中比例小于 50% 的颗粒粒径, 取 7.3 mm ; D_{10} 为泥石流泥沙颗粒中比例小于 10% 的颗粒粒径, 取 0.015 mm ; A 为泥石流过流断面面积, m^2 ; Q 为泥石流的流量, m^3/s ; T 为泥石流持续时间, 取 $1\,800 \text{ s}$; W 为泥石流总量, m^3 。

表 4 为大白杨沟泥石流流速、流量及总量的计算结果。小沟 1991 年泥石流流量为 $132 \text{ m}^3/\text{s}$, 大白杨沟 1935 年泥石流流量为 $557 \text{ m}^3/\text{s}$ 。形态调查法计算出 1991 年泥石流总量 $63\,011 \text{ m}^3$, 1935 年泥石流总量 $264\,829 \text{ m}^3$; 实地测量 1991 年泥石流堆积总量约 7.6 万 m^3 , 推测 1935 年泥石流堆积总量约 30 万 m^3 。形态调查法计算的结果与现场调查所取得的泥石流堆积总量较一致, 说明形态调查法计算结果是可靠的。1935 年的泥石流堆积总量要比 1991 年泥石流大很多, 其原因如下: (1) 1935 年泥石流是大沟和小沟同时暴发, 而 1991 年泥石流仅为小沟暴发; (2) 1935 年泥石流发生在 1933 年叠溪 7.5 级地震后的两年时间内, 大白杨流域在 1933 年叠溪地震中处于高烈度区(烈度达到 X 度), 在高烈度区, 地震后短期内发生的泥石流有流量放大的现象^[13-15]。因此, 受地震强烈影响暴发的泥石流比未受地震影响或影响较轻的泥石流流量要大得多, 其堆积总量也会大很多。

4.3 设计泥石流流量计算

为了泥石流沟的防治, 需设计不同频率条件下的泥石流流量, 雨洪法为根据现有沟域面积、沟域植被发育分布情况和径流系数进行流量计算, 具有较好的预测性质。先根据《四川省中小流域暴雨洪水计算手册》计算出断面不同频率下的小流域暴雨洪峰流量, 然后选用堵塞系数, 按下式进行计算:

$$Q_c = (1 + \phi) Q_p D_c \quad (6)$$

式中: Q_c 为泥石流断面峰值流量, m^3/s ; ϕ 为泥沙修正系数, $\phi = (\gamma_c - \gamma_w) / (\gamma_D - \gamma_c)$; γ_c 为泥石流容重, γ_w 为清水容重, γ_D 为泥石流中固体物质密度, 取 2.7 g/cm^3 ; Q_p 为暴雨洪峰流量; D_c 为堵塞系数。由于小沟堵塞情况要比大沟严重, 所取堵塞系数要比大沟更大。据此, 采用雨洪法求得泥石流峰值流量, 如表 5 所示。

从表 5 可以看出, 小沟在 $P=2\%$ 的设计泥石流峰值流量为 $110 \text{ m}^3/\text{s}$, 与调查的 1991 年泥石流流量 $132 \text{ m}^3/\text{s}$ 很接近; 大沟和小沟沟口在 $P=1\%$

表 4 大白杨沟 1991 年和 1935 年泥石流流速、流量和冲出总量

Table 4 Velocity, discharge and volume of debris flows in Dabaiyang gully in the years of 1991 and 1935

断面泥痕时间	断面位置	R/m	I	A/m^2	D_{50}/mm	D_{10}/mm	$V/(\text{m/s})$	$Q/(\text{m}^3/\text{s})$	W/m^3
1991 年	小沟沟口	1.06	0.123	16	7.3	0.015	8.3	132	63 011
1935 年	堆积区上部	1.90	0.141	48	7.3	0.015	11.6	557	264 829

表5 大白杨沟泥石流峰值流量计算数据

Table 5 Computation data of debris flow peak flow in Dabaiyang gully

沟道	频率/ %	容重/ (g/cm ³)	D_c	$1+\phi$	Q_p / (m ³ /s)	Q_c / (m ³ /s)
大沟 沟口	5	2.1	1.5	2.83	17.6	75
	2	2.2	1.8	3.40	22.1	135
	1	2.3	2.0	4.25	25.7	218
小沟 沟口	5	2.1	2.0	2.83	10.2	57
	2	2.2	2.5	3.40	12.8	110
	1	2.3	2.8	4.25	14.9	178

的设计峰值流量叠加值为 396 m³/s, 比 1935 年的泥石流流量 557 m³/s 要小一些, 这是由于 1935 年泥石流受 1933 年叠溪地震的影响有流量放大的效果, 但两者仍然比较接近, 因此大、小沟在 $P=1\%$ 的设计峰值流量叠加值在目前情况下是合适的。所以, 用雨洪法计算的设计泥石流峰值流量较可靠, 设计的 20 年一遇、50 年一遇和 100 年一遇的大白杨沟泥石流峰值流量分别为 132 m³/s、245 m³/s、396 m³/s。

5 结 论

(1) 大白杨沟是条老泥石流沟, 为暴雨-沟谷型高频泥石流沟, 曾于 1935 年、1991 年发生过两次较大规模泥石流, 其中 1935 年泥石流受 1933 年叠溪地震影响, 规模很大, 泥石流流量达 557 m³/s, 为 100 年一遇, 1991 年泥石流流量 132 m³/s, 为 50 年一遇。

(2) 大白杨沟流域各支沟发生的泥石流为粘性泥石流, 但是汇入主沟后由于受到洪水的稀释逐渐演变成稀性泥石流。

(3) 大白杨沟流域地形陡峭, 沟道纵坡降大, 其中大沟沟道平均纵比降 275‰, 小沟为 398‰, 流域相对高差达 2 023 m。流域内物源丰富, 现有物源达 74.08 万 m³, 为大白杨沟下次泥石流的暴发提供了良好的地形和物源条件。

(4) 因地形与物源条件的差异, 大白杨沟各支沟泥石流的形成机制也具有差异, 大沟泥石流暴

发主要以“消防水管效应”启动为主, 小沟泥石流暴发则是“消防水管效应”启动和堰塞湖溃决启动两种形成机制都有可能。

(5) 通过实际泥石流堆积方量和泥痕法计算得到的泥石流总量对比, 还原了历史泥石流流量, 并对后期泥石流流量做了较合理的设计。设计的大白杨沟泥石流峰值流量在 $P=5\%$ 、 2% 、 1% 时分别为 132 m³/s、245 m³/s、396 m³/s。

参考文献:

- [1] Takahashi T. Estimation of potential debris flows and their hazardous zones [J]. Journal of Nature Disaster, 1981, 3: 57-89.
- [2] 四川省地质局. 中华人民共和国区域地质调查报告松潘幅 [R]. 成都: 四川省地质局, 1975: 24-45.
- [3] 四川省地质局. 一九三三年叠溪地震 [M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1983: 4-13.
- [4] 李志强, 袁一凡, 李晓丽, 等. 汶川 M_s 8.0 特大地震破坏特征初步研究 [J]. 地震地质, 2008, 30(4): 861-865.
- [5] 中国科学院成都山地灾害与环境研究所. 泥石流研究与防治 [M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1989: 60-61.
- [6] 吴积善, 田连权, 康志成, 等. 泥石流及其综合治理 [M]. 北京: 科学出版社, 1993: 56-81.
- [7] Griffiths P C, Webb R H, Melis T S. Frequency and initiation of debris flows in Grand Canyon, Arizona [J]. Journal of Geophysical Research, 2004, 109: 321-336.
- [8] 唐川, 梁京涛. 汶川震区北川“9·24”暴雨泥石流特征研究 [J]. 工程地质学报, 2008, 16(6): 751-758.
- [9] 余斌. 根据泥石流沉积物计算泥石流容重的方法研究 [J]. 沉积学报, 2008, 26(5): 789-796.
- [10] 康志成, 李焯芬, 马嵩乃, 等. 中国泥石流研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2004: 103-122.
- [11] 余斌. 不同容重的泥石流淤积厚度计算方法研究 [J]. 防灾减灾工程学报, 2010, 30(2): 207-211.
- [12] 余斌. 粘性泥石流的平均运动速度研究 [J]. 地球科学进展, 2008, 23(5): 524-532.
- [13] 谢洪, 钟敦伦, 矫震, 等. 2008 年汶川地震重灾区的泥石流 [J]. 山地学报, 2009, 27(4): 501-509.
- [14] 游勇, 柳金峰, 陈兴长. “5·12”汶川地震后北川苏保河流域泥石流危害及特征 [J]. 山地学报, 2010, 28(3): 358-366.
- [15] 胡凯衡, 崔鹏, 游勇, 等. 汶川灾区泥石流峰值流量的非线性雨洪修正法 [J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2010, 42(5): 52-57.