

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2015.03.11

雅鲁藏布江街需水电站坝址区九锥沟泥石流发育特征

贺 拿¹, 陈宁生², 谢万银², 李 俊²

(1. 河南理工大学土木工程学院, 河南 焦作 454003;

2. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所山地灾害与地表过程重点实验室, 四川 成都 610041)

摘要: 通过现场勘查结合遥感解译, 获取九锥沟流域的基础资料及松散固体物质的分布概况, 在此基础上采用不同的方法分别计算各类物源的体积。经计算, 九锥沟的松散固体物质总量为 $492.92 \times 10^4 \text{ m}^3$, 九锥沟流域面积 12.13 km^2 , 单位面积的松散固体物质的量为 $0.41 \text{ m}^3/\text{m}^2$, 满足泥石流发生的临界土源厚度 $0.1 \text{ m}^3/\text{m}^2$ 。结合流域的地形地貌特征、区域背景资料、地震活动情况及当地的气象条件分析九锥沟泥石流的发育特征, 并推算不同频率条件下泥石流的运动特征, 计算各频率下泥石流的运动特征参数, 为九锥沟泥石流防治工程的设计提供参考。

关键词: 九锥沟; 泥石流; 发育特征; 运动特征; 泥石流防治

中图分类号: P642.23

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2015)03-0057-08

Characteristics of debris flow in Jiuzhui gully in the Brahmaputra Jiexu hydropower station site

HE Na¹, CHEN Ningsheng², XIE Wanyin², LI Jun²

(1. School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454003, China;

2. Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface process, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract: Through field investigation combined with remote sensing interpretation obtain basic data and distribution rules of loose solid materials in Jiuzhui gully, on the basis of this information used different methods to calculate all kinds of source materials respectively, by means of calculations know that the total loose solid material in Jiuzhui gully is about $492.92 \times 10^4 \text{ m}^3$, the area of Jiuzhui gully is 12.13 km^2 , the quantity of loose solid material of per unit is $0.41 \text{ m}^3/\text{m}^2$, which could meet debris flow initiation conditions $0.1 \text{ m}^3/\text{m}^2$. Then based on morphology, geomorphology, regional background information, earthquake activities and the local meteorological condition analyze the development features of debris flow in Jiuzhui gully, at the same time calculate debris flow movement characteristics under the conditions of different frequency, and then put forward corresponding mitigation measures, which can provide valuable reference for prevention and control engineering designing.

Keywords: Jiuzhui gully; debris flow; development features; dynamic characteristics; debris flow mitigation

0 引言

近年来由于山区河谷大型水电工程的建设, 泥石

流对在建工程区造成的影响越来越引起人们的重视^[1]。泥石流暴发突然、历时短且成因复杂, 目前准确的预测预报仍然是世界性的难题^[2], 每年因泥石流

收稿日期: 2013-07-09; 修订日期: 2015-03-10

基金项目: 十二五国家科技支撑计划课题(2011BAK12B02); 国家自然科学基金青年科学基金项目(41201555); 中国科学院重点部署项目(KZZD-EW-05-01); 河南理工大学博士基金(B2015-58)

第一作者: 贺 拿(1984-), 男, 河南永城人, 博士研究生, 研究方向为山地灾害及其动力过程。E-mail: hn61886@163.com

通讯作者: 陈宁生(1965-), 男, 福建南安人, 研究员, 博士生导师, 研究方向为山地灾害形成机理与防治。E-mail: chennsh@imde.ac.cn

灾害造成的损失都较为严重^[3]。对在建工程而言,泥石流灾害不仅会影响工程的施工进度,增加工程的投资,也会在很大程度上威胁工程的安全性,因此对在建工程区泥石流沟的发育特征的研究是防灾减灾的前提及重要依据。

1 九锥沟流域概况

九锥沟位于拟建街需水电站上坝址下游 0.72 km,下坝址上游 0.54 km 处,沟口与雅鲁藏布江交汇点位于东经 92°26′53″,北纬 29°15′11″。九锥沟流域面积 12.13 km²,流域最高海拔 5766 m,于高程 3316 m 汇入雅鲁藏布江(图 1),高差约 2450 m,主沟长约 6.10 km,主沟总体纵坡降 346.48‰。

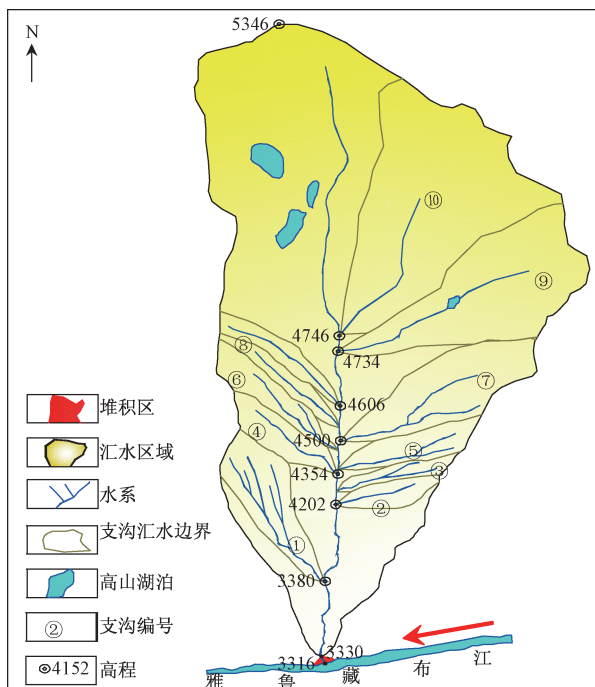


图 1 九锥沟流域水系图

Fig.1 Water system diagram of jiuzhui-gully

1.1 九锥沟地形地貌及地层岩性

九锥沟流域地势南高北低,主沟沟道呈南北向窄长型展布,在海拔 3316 m 处汇入雅鲁藏布江。从地貌上看,九锥沟沟谷总体比较狭长,沟道深切,纵坡降较小。高程 4752 m 以上地势开阔,岸坡坡度大多在 20°~30°,多数坡面基岩裸露,植被覆盖率为 20%,沟道及后缘分布由冻融作用形成的块碎石;高程介于 4100~4752 m,沟道顺直,沟床上分布较多的块石和巨石,两岸边坡坡度多在 30°~40°,流域内低海拔区处植被茂密,高海拔区处基岩裸露,该段沟谷整体上呈宽“V”字型;高程 4100 m 以下沟道深切狭窄,沟谷弯曲,沟道

内跌水坎发育,沟道两侧发育有老泥石流堆积物及崩塌堆积物,两岸边坡高陡,局部发育有“一线天”地貌,该段沟谷整体上呈瘦“U”字型。

流域的相对高差达 3000 m 以上,较大的地形高差使处于流域中上部的风化岩体具有较大势能,为坡面和沟床松散堆积物能量的释放和势能转化为动能提供了有利条件,为流域内洪水强烈冲刷坡面和沟床松散堆积物形成高速泥石流汇流形成了巨大的动能条件^[4]。

九锥沟出露基岩岩性为喜山期(E_2R)黑云母花岗岩闪长岩,局部穿插有黑云母角闪石英闪长岩脉,主要为雅鲁藏布江左岸冈底斯-念青唐古拉地层区南部岩浆岩,并主要发育于九锥沟山坡中高程处,脉体与围岩多呈裂隙接触,黑云母角闪石英闪长岩总体产状为 $N10^\circ \sim 20^\circ E \quad SE \angle 25^\circ \sim 35^\circ$,一般宽度 0.1~0.3 m,深灰色,地表出露的脉体基本上呈弱风化。

1.2 地质构造及地震活动

九锥沟流域内发育断层为 f_{12} ,断层走向近 EW~NE,倾角 55°~84°,宽度 2~5 m,性质为逆冲,通过钻孔资料可见带内充填碎粉岩、岩屑,呈全强风化状。

研究区内岩体总体较完整,结构面发育特征如下:节理①: $N70^\circ W/NE \angle 32^\circ$,延伸长度 0.5~0.8 m,间距 1~3 mm,面粗糙,闭合无充填,弱风化;节理②: $N35^\circ E/NW \angle 72^\circ$,延伸长度 1~3 m,间距 10~30 cm,面粗糙,张开 1~3 mm,无充填,弱风化。

九锥沟流域受地震的影响较为强烈,据资料记载,最早的地震是公元 642 年拉萨南 4³/4 级地震,到 2010 年 12 月共记录到 $M \geq 4.7$ (4³/4) 级地震 74 次,其中 $M \geq 6$ 级地震 14 次,最大地震是 1411 年当雄 8 级地震。九锥沟流域位于喜马拉雅地震带和藏中地震带交汇地区。喜马拉雅地震带地震活动水平高,对比 20 世纪地震活动水平,估计未来百年仍有发生 7 级及 8 级地震的可能。

历史上对九锥沟流域影响烈度达到 V 度的地震有 14 次。1915 年桑日 7 级地震对该流域的影响烈度最大为 VIII 度。1947 年西藏朗县东南 7.7 级地震,对流域的影响烈度为 VII 度,另外,有 4 次地震对流域的影响烈度为 VI 度,其余地震对坝址的影响烈度为 V 度。由地震活动直接或间接诱发泥石流灾害被国内外的诸多研究所证实^[5-6],地震活动与泥石流产生之间存在较为密切的关系^[7]。

地震活动影响流域的地貌格局,影响流域内坡面土体的内部结构,导致不稳定土体的厚度增加,为泥石流的发生提供了丰富的物质基础^[8-9]。此外,由于土

体的结构遭到扰动或破坏,土体的强度大幅降低,在自身重力的作用下局部土体已接近甚至达到极限平衡状态,在外部触发因素的作用下可能失稳下滑。

1.3 九锥沟流域物源条件

流域内的松散固体物质是泥石流形成的必备条件之一^[8,10]。物源总量不仅决定着泥石流运动的性质,也在一定程度上决定着泥石流的规模及成灾能力。因此在泥石流的形成及运动过程中起着至关重要的作用。九锥沟物源主要分布于主沟沟通区沟道两岸(其中左岸松散固体物质较多)。通过对九锥沟沟道堆积物取样(颗粒 < 60 mm)分析发现,堆积物中小于 0.005 mm 的粘粒含量 0.22%;0.005 ~ 0.075 mm 的粉粒含量占 1.55%;0.075 ~ 2 mm 的砂粒含量占 35.77%;大于 2 mm 的砾石含量占 62.46%,土样的颗粒组成见图 2。

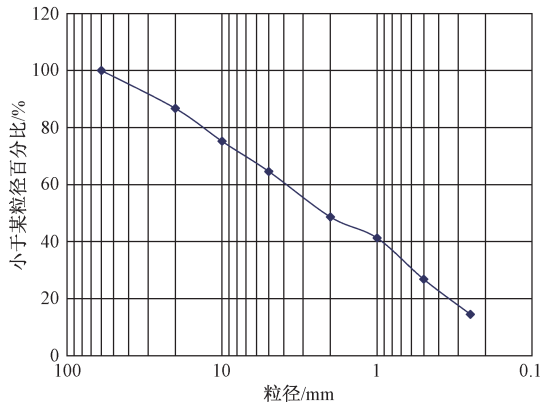


图 2 九锥沟沟道堆积颗粒分曲线图(测量断面处土样 2)
Fig.2 Gradation curves of channel deposits in Jiuzhui gully

通过现场调查发现九锥沟的物源主要包括沟道堆积物、滑坡堆积体、崩坡积物及冰碛物。沟道堆积物依据现场勘查及坑探确定其面积及厚度(表 1),经计算沟道堆积物的总量为 $10.37 \times 10^4 \text{ m}^3$,各沟段的编号见图 3,计算结果见表 1。

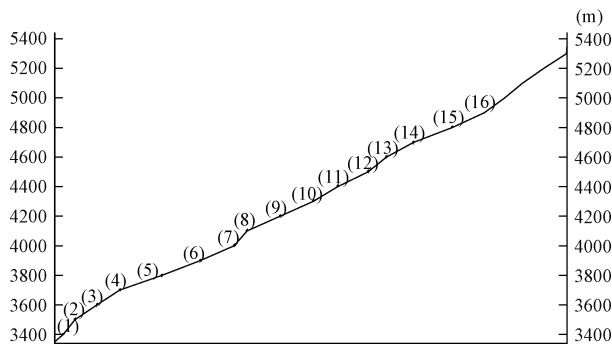


图 3 九锥沟沟道纵断面图
Fig.3 Profile diagram of Jiuzhui gully

表 1 九锥沟沟道堆积物方量统计表

Table 1 Statistical table of channel deposits in Jiuzhui gully

编号	沟道长度/m	沟道宽度/m	堆积物厚度/m	堆积物面积/m ²	堆积物体积/×10 ⁴ m ³
0	113.5	3.2	3.5	363.2	0.13
1	173	7.1	4.6	1228.3	0.57
2	282.5	6.8	2.1	1921.0	0.40
3	290.3	7	3.2	2032.1	0.65
4	512.7	7.4	1.6	3794.0	0.61
5	476.24	8.5	3.2	4048.0	1.30
6	416.7	8.2	2.7	3416.9	0.92
7	177.4	6.1	3.6	1082.1	0.39
8	410	5.8	0.7	2378.0	0.17
9	404.6	7.5	2.3	3034.5	0.70
10	314.4	6.7	2.9	2106.5	0.61
11	372.8	5.8	2.1	2162.2	0.45
12	238.8	5.7	1.6	1361.2	0.22
13	340.8	5.4	1.5	1840.3	0.28
14	479	6.2	3.2	2969.8	0.95
15	396.8	6.8	2.4	2698.2	0.65
16	262.8	5.7	2.5	1498.0	0.37
合计				37934.4	10.37

1.3.1 滑坡堆积体

通过现场调查,九锥沟流域内共有滑坡堆积体 4 处。经大量的野外调查发现坡地上的滑坡其底部大多数是一个比较规则的弧形滑动面,为了较为准确的计算滑坡堆积体的量,本文借助弧形均高法计算滑坡体的体积。如图 4 所示,A 为坡脚滑动面剪出口,B 为滑坡后壁顶点,C 为 B 在地形图上的投影并与 A 点等高,H 为滑坡的最大高差(m), L_p 为滑坡前缘与后壁间的水平距离(m), θ_s 为坡度角(°), h_1 为滑坡的平均厚度(m):

$$h_1 = \frac{L_p}{4\sin\theta_s} \left(\frac{0.0175\theta_s}{\sin\theta_s \cos\theta_s} - 1 \right) \quad (1)$$

现场调查 4 处滑坡堆积体长度 L_p 分别为 56 m、34 m、44 m 及 36 m,相应的坡度分别为 20°、22°、17°及 18°,经计算滑坡体相应体积分别为 $11.6 \times 10^4 \text{ m}^3$ 、 $4.89 \times 10^4 \text{ m}^3$ 、 $5.82 \times 10^4 \text{ m}^3$ 、 $3.44 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

1.3.2 崩坡积物

Fausto Guzzetti^[11]通过对分布在世界各地的较为典型的 677 个崩塌、滑坡进行统计分析,发现崩塌滑坡体的体积与其面积之间存在着较为密切的关系,通过线性拟合,得到崩塌滑坡体体积与其面积之间的关系式:

$$V_L = 0.074 \times A_L^{1.45} \quad (R^2 = 0.9707) \quad (2)$$

我国学者范建容^[12]通过对震后灾区的 107 个崩塌滑坡样本,利用遥感影像获取崩塌滑坡面积,通过对

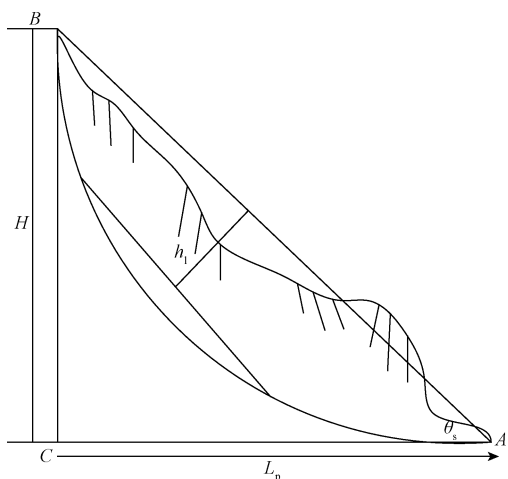


图4 求滑坡平均厚度的弧形均高法

Fig.4 Calculation method of landslide deposits

数据拟合发现崩塌滑坡体积与投影面积之间存在幂函数关系,其关系式为:

$$V_L = 3.4573 \times A^{1.2053} \quad (R^2 = 0.7977) \quad (3)$$

本文以公式(3)、(4)为基础分别计算崩坡积物的量,并结合现场调查情况确定出合理的值,通过计算,九锥沟流域内崩坡积物的总量为 $15.0 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

1.3.3 冰碛物

九锥沟流域上游分布有一定量的冰碛物,冰碛物是第四纪冰川活动残留的松散堆积体。九锥沟冰碛物集中分布于海拔 4500 ~ 5400m 范围内,特别集中于流域中部坡度相对较小的区域。冰碛物的厚度变化较大,厚度可达上百米,如海螺沟热水塘支沟冰碛物最厚达 120 m^[13]。依据雅鲁藏布江中游冰碛物厚度的研究,其平均厚度大多变化于 8 ~ 30 m,由于该流域的最高海拔仅 5766 m,结合街需电站所在区域的气象条件,取 10 m 作为九锥沟流域冰碛物的平均厚度,依据遥感解译获取九锥沟流域内冰碛物的面积,经计算冰碛物的总量为 $441.8 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

综上所述,九锥沟流域内的物源总量为 $492.92 \times 10^4 \text{ m}^3$,单位面积的松散固体物质的量为 $0.41 \text{ m}^3/\text{m}^2$,满足发生稀性泥石流的物源条件^[14]。

1.4 九锥沟流域气象及水源条件

九锥沟所在流域属高原温带季风半湿润气候区。坝址下游约 30 km 的加查县(测站高程 3260.0 m)有 1978 年以来的气象观测资料,据 1978 ~ 2009 年观测资料,该区域多年平均降水量 527.4 mm,历年最大日降水量为 51.3 mm。

九锥沟常年流水,主要接受大气降雨和冰雪融水补给,枯水季节主要靠冰雪融水补给,由于沟谷较长,

后缘海拔较高,坡面分布有较多的积雪,据现场估测,枯水季节水流量约 $0.5 \sim 1 \text{ m}^3/\text{s}$;沟谷岸坡较陡,基岩裸露,加之汇水面积较大,有利于地表降水的径流和汇集,雨季时,沟内水量急剧增大,为泥石流暴发提供丰富的水源。

2 九锥沟泥石流发育特征

九锥沟流域内单位面积松散固体物质的量为 $0.41 \text{ m}^3/\text{m}^2$,满足稀性泥石流发生的物源条件 $0.1 \text{ m}^3/\text{m}^2$;沟道平均坡降为 346.48‰ 远大于泥石流启动的临界坡降 26%,流域内相对高差较大,为泥石流的发生提供了较好的能量条件;九锥沟流域属高原温带季风半湿润气候区,其降雨可以满足泥石流启动所需的临界雨量。此外,九锥沟长期受地震活动的影响。九锥沟为一条老泥石流沟,历史上曾发生过泥石流。从能量、物源及降水条件分析九锥沟依然有发生稀性泥石流的可能,但由于该流域人迹罕至,几乎不受人类活动的影响,而且植被覆盖较好(图 5),发生泥石流的频率较低。但是在地震活动及强降雨的耦合作用下,泥石流发生的频率及规模均会增加。

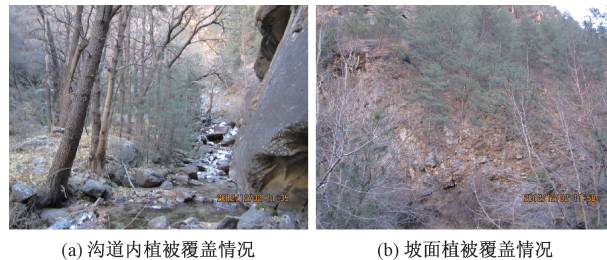


图5 流域内植被覆盖情况

Fig.5 Vegetation coverage of Jiuzhuigou gully

3 泥石流运动特征分析

3.1 泥石流容重

泥石流容重是确定泥石流性质的重要指标。由于泥石流暴发突然且历时较短,绝大部分泥石流均无法观测,九锥沟也是如此,所以其泥石流容重的确定需要一定方法。参照《泥石流灾害防治工程勘察规范》(DZ/T0220—2006),泥石流易发程度数量化评分与泥石流容重的关系见表 2,按照《泥石流灾害防治工程勘察规范》(DZ/T0220—2006)附录 G 进行泥石流易发程度评分,九锥沟泥石流易发程度数量化评分得分为 72 分,按照表 2 中的对应关系,九锥沟泥石流容重值为 $1.49 \text{ g}/\text{cm}^3$,以此数值作为该沟百年一遇泥石流容重。

表 2 数量化评分与容重的关系(单位: $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)

Table 2 The relationship between quantification score and bulk density

评分	容重	评分	容重	评分	容重	评分	容重
44	1.300	66	1.453	88	1.607	110	1.759
45	1.307	67	1.460	89	1.614	111	1.766
46	1.314	68	1.467	90	1.621	112	1.772
47	1.321	69	1.474	91	1.628	113	1.779
48	1.328	70	1.481	92	1.634	114	1.786
49	1.335	71	1.488	93	1.641	115	1.793
50	1.342	72	1.495	94	1.648	116	1.800
51	1.349	73	1.502	95	1.655	117	1.843
52	1.356	74	1.509	96	1.662	118	1.886
53	1.363	75	1.516	97	1.669	119	1.929
54	1.370	76	1.523	98	1.676	120	1.971
55	1.377	77	1.530	99	1.683	121	2.014
56	1.384	78	1.537	100	1.690	122	2.057
57	1.391	79	1.544	101	1.697	123	2.100
58	1.398	80	1.551	102	1.703	124	2.143
59	1.405	81	1.558	103	1.710	125	2.186
60	1.412	82	1.565	104	1.717	126	2.229
61	1.419	83	1.572	105	1.724	127	2.271
62	1.426	84	1.579	106	1.731	128	2.314
63	1.433	85	1.586	107	1.738	129	2.357
64	1.440	86	1.593	108	1.745	130	2.400
65	1.447	87	1.600	109	1.752		

3.2 不同频率泥石流容重推算

泥石流的容重通常随着其规模的变化而变化。泥石流容重与暴发频率的关系,目前研究较少,也没有相应的规范。查阅有关资料发现:据不完全统计,100 年一遇以内的泥石流的容重与频率有一定的关系,即:

$$\gamma'_c = \gamma_c + 0.122\ln P' \quad (4)$$

$$P' = 0.01P \quad (5)$$

式中: γ'_c ——不同频率泥石流的容重/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$);

γ_c ——百年一遇泥石流容重/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$);

P' ——暴发频率系数;

P ——泥石流暴发周期/年。

公式(4)适用于计算百年一遇以内不同频率的泥石流容重,对于大于百年一遇的泥石流,其容重参照百年一遇泥石流容重值。因此,九锥沟百年一遇泥石流容重值即为最大容重值,将其带入公式(4)即可计算出九锥沟不同频率泥石流的容重值,计算结果见表 3。由表 3 可知,该沟 20 年一遇以上的暴雨径流易引发一定规模的泥石流,而 20 年一遇以下的暴雨径流则多引发山洪。这与实际调查结果吻合,即近几十年来未发现泥石流暴发,但沟口堆积物为历史上堆积的泥石流流体。

表 3 九锥沟不同频率泥石流容重值($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)

Table 3 Debris flow density under different frequencies($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)

频率/%	1	2	5	10
九锥沟流域	1.49	1.41	1.29	1.21

通过分析泥石流堆积物样本发现,不同粘粒含

量的泥石流具有不同的容重,以 144 个不同地区的样品统计为基础,发现泥石流的容重和粘粒含量的关系用 6 次以上的多项式方程进行模拟,得到的关系式具有较好的相关性,并给出粘粒含量与容重的多项式关系:

$$\gamma_c = -1.32 \times 10^3 x^7 - 5.13 \times 10^2 x^6 + 8.91 \times 10^2 x^5$$

$$- 55x^4 + 34.6x^3 - 67x^2 + 12.5x + 1.55$$

式中: γ_c ——泥石流的容重($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$);

x ——泥石流中粘粒的含量。

通过马尔文激光粒度仪分析九锥沟泥石流堆积物的粘粒含量,测定后发现,九锥沟泥石流堆积物中的粘粒含量为 0.22%,带入公式计算得到泥石流的容重为 1.577 g/cm^3 ,由此公式计算的值比打分法计算的结果偏高,主要是泥石流发生的时间较久,堆积物中的粘粒除泥石流堆积物自身细颗粒含量外,还有沟道堆积物中被常年流水冲刷以及岩石风化形成的细小颗粒,因此,通过此方法计算的容重值偏高。考虑当地的物源及气候条件,流域中上游岩石完整性较好,长时间的风化后形成的细颗粒较少,据此断定九锥沟百年一遇的泥石流容重为 1.49 g/cm^3 ,九锥沟泥石流为稀性泥石流。

3.3 九锥沟泥石流流速

泥石流的流速是针对某一次具体的泥石流而言的,其在不同的比降和不同的糙率沟段是不同的,有时变化很大,对于非观测的泥石流只有采用一定的模式

进行模拟计算。由于九锥沟泥石流属于稀性泥石流,参照《中国泥石流》^[15]和《泥石流勘查技术》^[16],结合我国西南山区稀性泥石流的特征,采用下面泥石流流速计算公式计算泥石流流速:

$$V = \left(\frac{M_c}{a}\right) H^{2/3} I_c^{1/2} \quad (6)$$

$$a = (1 + \varphi_c \gamma_c)^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

$$\varphi_c = \frac{\gamma_c - \gamma_w}{\gamma_s - \gamma_c} \quad (8)$$

式中: M_c ——稀性泥石流沟床的糙率系数;

γ_c ——泥石流流体容重;

γ_w ——水的容重;

γ_s ——泥石流固体物质的容重。

由于九锥沟近年来未发生过较大的泥石流,泥石流洪痕断面较难确认,仅在沟道下游找到一处泥石流洪痕断面,根据沟道情况,取泥石流糙率值为 4.8,经计算,泥石流流速为 2.77 m/s(表 4)。

表 4 九锥沟泥石流流速

Table 4 Debris flow velocity in Jiuzhui gully

断面编号	断面位置	比降 /‰	泥深 /m	糙率值 / M_c	a	流速 /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
九锥沟 1 号断面	沟口上游 300 m 处	65	2.5	4.8	1.37	2.77

3.4 泥石流流量

泥石流流量对泥石流防治工程的规划设计和灾害评估都有重要的意义。本文将形态调查法和配方法相结合计算九锥沟泥石流的流量。

3.4.1 形态调查法

根据泥石流暴发时留下的痕迹(泥痕)确定该次泥石流的最高泥位、断面变化的情况,以调查时的断面为基础,恢复过流时的断面,获得断面面积,以计算其流量,其公式为:

$$Q_c = A_{sc} \times V_c \quad (9)$$

式中: A_{sc} ——断面的过流面积/ m^2 ;

V_c ——断面的流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)。

根据现场测量的断面,结合上节计算的流速,通过形态调查法计算九锥沟泥石流的流量为 70.34 m^3/s 。

3.4.2 配方法

配方法是在清水流量的基础上进行配方,清水流量用推理公式法计算,见公式(10)。

$$Q_w = 0.278 \psi \frac{s}{\tau^n} F \quad (10)$$

式中: $\psi = f(\mu, \tau^n)$; $\tau^n = f(m, s, J, L)$;

Q ——最大流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$);

ψ ——洪峰径流系数;

s ——暴雨雨力/($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$);

n ——暴雨指数;

F ——流域面积/ km^2 ;

L ——沟道长度/ km ;

τ ——流域汇流时间/ h ;

μ ——入渗强度;

m ——汇流参数,公式中参数 ψ 、 τ 均为函数关系,《四川省中小流域暴雨洪水计算手册》中提供试算法确定。

依照中华人民共和国国土资源部的行业标准《泥石流灾害防治工程勘查规范》^[17],泥石流流量的雨洪计算法的公式为:

$$Q_c = K_q Q_b D_u \quad (11)$$

式中: $K_q = 1 + \frac{\gamma_c - 1}{\gamma_s - \gamma_c}$ 为泥石流流量修正系数(γ_c 为泥石流容重, g/cm^3 ; γ_w 为水的容重, g/cm^3 ; γ_s 为固体颗粒容重, g/cm^3);

Q_b ——清水流量;

D_u ——堵塞系数,堵塞系数根据沟底堆积物情况,查表获得,泥石流流量计算结果见表 5。

表 5 九锥沟配方法计算泥石流流量结果表

Table 5 Debris flow discharge results (method of completing the square)

频率 P	流域集水面积 F/km^2	河流长度 L/km	河道平均坡度 $J/\%$	容重 $r/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	堵塞系数	清水流量 $Q/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	泥石流流量 $Q_p/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$
0.1	12.13	6.143	346.48	1.71	1.500	175.95	463.28
0.2	12.13	6.143	346.48	1.69	1.500	129.51	333.89
0.5	12.13	6.143	346.48	1.57	1.500	86.97	199.32
1	12.13	6.143	346.48	1.49	1.500	44.163	94.23
2	12.13	6.143	346.48	1.41	1.500	37.917	75.40
5	12.13	6.143	346.48	1.29	1.500	29.967	54.68
10	12.13	6.143	346.48	1.21	1.500	23.536	40.43

根据计算可知,采用形态调查法计算的泥石流流量为 $70.34 \text{ m}^3/\text{s}$,接近于配方法计算的50年一遇的泥石流流量($75.40 \text{ m}^3/\text{s}$),故可判断通过形态调查法计算的断面其泥石流频率接近50年一遇。

4 结语

九锥沟是一条老泥石流沟,历史上曾发生过泥石流;九锥沟流域物源丰富、流域坡降大,降雨充足,且经常受地震活动的影响,具备发生稀性泥石流的条件。但由于流域受人类活动的影响较弱,且流域内植被覆盖较好,发生泥石流的频率较低。但在地震及强降雨的耦合作用下依然可能发生大规模的泥石流,为了防止泥石流对坝址工程区的影响应加强相应的预警措施。

根据流域自身的条件,推算泥石流的运动特征参数,经计算可知:九锥沟百年一遇的泥石流容重为 1.49 g/cm^3 ,泥石流的流速为 2.77 m/s ,五十年一遇的泥石流流量为 $75.40 \text{ m}^3/\text{s}$,这些运动参数为九锥沟泥石流防治工程的设计提供了有价值的参考。

参考文献:

- [1] CUI P, CHEN X, LIU S, et al. Techniques of debris flow prevention in National Parks[J]. Earth Science Frontiers, 2007, 14(6): 172-177.
- [2] 陈晓清, 崔鹏, 韦方强. 泥石流起动原型试验及预报方法探索[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2006, 17(4): 73-78+96.
CHEN Xiaqing, CUI Peng, WEI Fangqiang. Experimental simulation of rainfall induced debris flow by in situ test and forecast method[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2006, 17(4): 73-78+96.
- [3] CHANG T C, CHAO R J. Application of back-propagation networks in debris flow prediction[J]. Engineering Geology, 2006, 85(3): 270-280.
- [4] 李德华, 许向宁, 郝红兵. 四川汶川县映秀镇红椿沟“8.14”特大泥石流形成条件与运动特征分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2012(3): 32-38.
LI Dehua, XU Xiangning, HAO Hongbing. Formation conditions and the movement characteristics of “8.14” giant debris flow in Yingxiu Town, Wenchuan County, Sichuan province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2012(3): 32-38.
- [5] 马东涛, 石玉成. 试论地震在泥石流形成中的作用[J]. 西北地震学报, 1996(4): 39-43.
MA Dongtao, SHI Yucheng. An approach on effects of earthquakes on formation of debris flow [J]. Northwestern Seismological Journal, 1996(4): 39-43.
- [6] 陈明珠, 阎长虹, 王玉英, 等. 土体渗透性影响因素——以普定陈旗堡为例[J]. 水文地质工程地质, 2008, 35(4): 66-70.
CHEN Mingzhu, YAN Changhong, WANG Yuying, et al. The influence factors of soil permeability in Chenqibao village of Puding county [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2008, 35(4): 66-70.
- [7] 陈宁生, 崔鹏, 王晓颖, 等. 地震作用下泥石流源区砾石土体强度的衰减实验[J]. 岩石力学与工程学报, 2004(16): 2743-2747.
CHEN Ningsheng, CUI Peng, WANG Xiaoying, et al. Testing study on strength reduction of gravelly soil in triggering area of debris flow under earthquake [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004(16): 2743-2747.
- [8] 崔鹏, 庄建琦, 陈兴长, 等. 汶川地震区震后泥石流活动特征与防治对策[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2010(5): 10-19.
CUI Peng, ZHUANG Jianqi, CHEN Xingchang, et al. Characteristics and countermeasures of debris flow in Wenchuan area after the earthquake [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2010(5): 10-19.
- [9] 伍艳, 王玮屏, 任海平, 等. 水-土作用对土体渗透系数的影响研究[J]. 水文地质工程地质, 2011, 38(6): 39-43.
WU Yan, WANG Weiping, REN Haiping, et al. Experimental studies of coefficient of permeability of soil affected by water-soil interactions [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2011, 38(6): 39-43.
- [10] 崔鹏. 泥石流起动条件及机理的实验研究[J]. 科学通报, 1991(21): 1650-1652.
CUI Peng. Research on the initiation condition and mechanism of debris flow [J]. Chinese Science Bulletin, 1991(21): 1650-1652.
- [11] Caine N. The rainfall intensity; duration control of shallow landslides and debris flows [J]. Geografiska Annaler Series A Physical Geography, 1980: 23-27.
- [12] 范建容, 李秀珍, 张怀珍, 等. 汶川地震灾区崩塌滑坡体几何特征信息遥感定量提取与分析[J]. 水土保持通报, 2012(2): 118-121.

- FAN Jianrong, LI Xiuzhen, ZHANG Huaizhen, et al. Extracting and analyzing geometric features of landslides induced by Wenchuan earthquake based on remote sensing [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012(2): 118-121.
- [13] 施雅风. 论李四光教授的庐山第四纪冰川是对泥石流的误读[J]. 地质论评, 2010(5): 683-692.
- SHI Yafeng. On Prof. Lee's having misread debris flow deposits as quaternary glaciations in the Lushan area, Jiangxi province [J]. Geological Review, 2010(5): 683-692.
- [14] 陈宁生, 黄蓉, 李欢, 等. 汶川 5·12 地震次生泥石流沟应急判识方法与指标[J]. 山地学报, 2009, 27(1): 108-114.
- CHEN Ningsheng, HUANG Rong, LI Huan, et al. Emergency judge method and index of debris-flow sites triggered by 5·12 Wenchuan earthquake [J]. Journal of Mountain Science, 2009, 27(1): 108-114.
- [15] 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所. 中国泥石流[M]. 北京: 商务印书馆, 2000.
- Institute of Mountain Hazards and Environment, The Chinese Academy of Sciences. China debris flow [M]. Beijing: The Commercial Press, 2000.
- [16] 陈宁生, 杨成林, 周伟, 等. 泥石流勘查技术[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- CHEN Ningsheng, YANG Chenglin, Zhouwei, et al. Debris flow exploration technology [M]. Beijing: Science Press, 2000.
- [17] 韦方强, 胡凯衡. 泥石流流速研究现状与发展方向[J]. 山地学报, 2009(5): 9.
- WEI Fangqiang, HU Kaiheng. Review and trends on debris flow velocity research [J]. Journal of Mountain Science, 2009(5): 9.

(上接第 35 页)

- HU Houtian, ZHAO Xiaoyan. Studies on rockmass structure in slope of red bed in china [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(6): 689-694.
- [10] 骆银辉, 朱春林, 李俊东. 云南红层边坡破坏机制及其危害防治研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(5): 837-839.
- LUO Yinhui, ZHU Chunlin, LI Jundong. Research for distortion-destruction mechanism of slopes of red strata in Yunnan province and their hazard control [J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(5): 837-839.
- [11] 卢海峰, 陈从新, 袁从华, 等. 巴东组红层软岩缓倾角顺层边坡破坏机制分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(S2): 3569-3577.
- LU Haifeng, CHEN Congxin, YUAN Conghua, et al. Analysis of failure mechanism of badong red bed soft rock gently inclined bedding slope [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(S2): 3569-3577.
- [12] 程强, 周德培, 封志军. 典型红层软岩软弱夹层剪切蠕变性质研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增1): 3176-3180.
- CHENG Qiang, ZHOU Depei, FENG Zhijun. Research on shear creep property of typical weak intercalation in red bed soft rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(S1): 3176-3180.
- [13] 吴洪刚, 马惠民, 侯殿英, 等. 青海高原龙穆尔沟红层滑坡变形机制的地质分析与模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(10): 2094-2102.
- WU Honggang, MA Huimin, HOU Dianying, et al. Geological analysis and model experimental study of deformation mechanism of ditch-moore red bed landslide at Qinghai plateau [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(10): 2094-2102.
- [14] 韩丽芳, 王运生, 王晓欣, 等. 龙泉山地区中生代红层水岩作用时效性实验研究[J]. 水文地质工程地质, 2009, 36(6): 59-61.
- HAN Lifang, WANG Yunsheng, WANG Xiaoxin, et al. Experimental research on the time effect of water-rock interaction of the Mesozoic red bed in Longquan mountain area [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2009, 36(6): 59-61.
- [15] 王恭先, 徐峻龄, 刘光代, 等. 滑坡学与滑坡防治技术[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2004.
- WANG Gongxian, XU Junling, LIU Guangdai, et al. Land slidology and technique of landslide control [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2004.