

金沙江白鹤滩水电站坝址近场区泥石流 运动特征与发展趋势分析

胡桂胜¹, 陈宁生¹, 李俊¹, 贺拿^{1,2}, 朱云华³

(1. 中国科学院 山地灾害与地表过程重点实验室, 中国科学院 水利部 成都山地灾害
与环境研究所, 成都 610041; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 西南石油大学, 成都 610041)

摘 要: 2012 年 6 月 28 日, 金沙江白鹤滩水电站坝址近场区 9 条沟暴发了泥石流, 通过对近场区泥石流灾害的现场调查, 获取了这些泥石流沟的相关数据, 据此进一步对其泥石流运动特征参数: 泥石流容重、流速、流量、一次总量及冲击力进行了计算与分析; 结合泥石流影响因素对其发展趋势进行了研究, 得出在强地震、干湿循环变化气候的耦合作用下, 该区仍可能会发生超过百年一遇规模的泥石流。上述计算与分析结果对白鹤滩水电站坝址近场区泥石流沟防治工程参数设计具有一定的参考作用, 也为合理选择泥石流治理方案提供科学依据。

关键词: 金沙江; 泥石流; 运动特征; 发展趋势

中图分类号: P642.23

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2014)02-0238-08

Research on Dynamic Characteristics and Development Tendency of Debris Flow Near Field Region in Baihetan Hydropower Station, Jinshajiang River

HU Gui-sheng¹, CHEN Ning-sheng¹, LI Jun¹, HE Na^{1,2}, ZHU Yun-hua³

(1. Key Lab of Mountain Hazards and Surface Processes, Institute of Mountain Hazards and
Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 2. University of Chinese

Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Southwest Petroleum University, Chengdu 610041, China)

Abstract: There were 9 debris flow gullies outbreaking on 28 June, 2012. After the field survey in Baihetan hydropower station debris flow gullies and relevant data collection, we calculated and analyzed dynamic characteristic parameters of debris flow including density, velocity of debris flow, flow of debris flow, total volume and impact. The development tendency of debris flow was studied by combined with debris flow influence factors. The areas still will outbreak debris flow over a once-in-a-century scale if strong earthquake and the dry-wet circulation couple. All these dynamic parameters and analysis of development tendency could play an important role in the selection of prevention measures and the design of prevention projects for the debris flow of Baihetan hydropower station.

Key words: Jinshajiang river; debris flows; dynamic characteristics; development tendency

2012 年 6 月 28 日, 受连续降雨影响, 金沙江白鹤滩水电站坝址近场区 9 条沟暴发了泥石流, 其中矮子沟发生了特大型泥石流, 导致 41 人死亡和失踪、1 276 人受灾, 冲毁了民房 17 户 80 余间、乡村公路 30 km、便桥 5 座、大堰 20 km、农田 133 hm²、汽车 1 辆^[1]。水电站坝址近场区地质条件复杂, 极端气候突出, 河流水系发达, 大多数沟道在地质历史上都曾发生过泥石流, 部分沟道在近期泥石流活动依旧十分活

跃, 频繁的泥石流灾害对当地居民的生命财产构成严重威胁, 并制约着社会经济的发展。调查发现水电站坝址近场区主要灾害性泥石流沟共有 9 条, 分别是左岸的矮子沟、大凉水沟、延吉沟、牛路沟、大石埡沟、蔡家坪沟, 右岸的海子沟、大寨沟和白鹤滩沟。这些沟道在历史上都曾发生过泥石流, 在 2012 年 6 月 28 日前后均暴发过规模不等的泥石流。笔者于 2012 年 7 月 22 日赶到灾害现场, 历经 20 余天对 9 条泥石流沟

进行了勘查与分析,据此进一步对其泥石流运动特征与发展趋势进行研究。

1 研究区概况

1.1 自然条件

(1) 地理位置。白鹤滩水电站位于云南省巧家县大寨乡与四川省凉山彝族自治州宁南县白鹤滩交界的白鹤滩,上游与乌东德梯级电站相接,下游尾水与溪洛渡梯级电站相连,是金沙江下游(雅砻江口—宜宾)河段乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝4个梯级开发的第二级,建成后将仅次于三峡水电站,成为中国第二大水电站。坝址左岸属四川省凉山彝族自治州宁南县,右岸属云南省昭通市巧家县,距宁南县城75 km,距巧家县城45 km。白鹤滩水电站坝址近场区共分布有9条主要的灾害性泥石流沟(图1),分别为左岸的矮子沟、大凉水沟、延吉沟和荒田区泥石流沟(牛路沟、大石埡沟、蔡家坪沟),右岸的海子沟、大寨沟和白鹤滩沟。

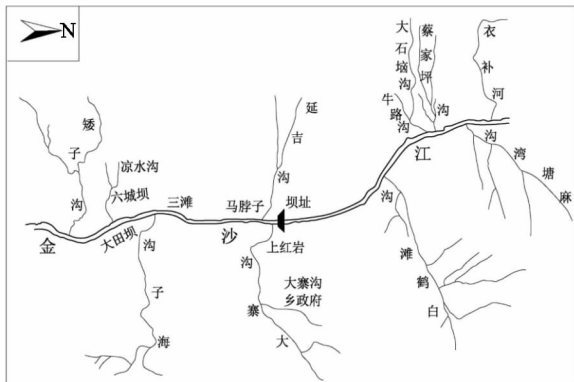


图1 研究区泥石流沟地理位置示意图

(2) 地形地貌。研究区属高山峡谷地貌,地势北高南低,向东侧倾斜,左岸为鲁南山脉,山峰高程在2 000 m以上,900~1 100 m高程以下为陡崖区,以上呈缓坡地形;右岸为药山山脉,山峰高程在3 000 m以上,高程1 000~1 400 m以下为陡崖区,以上呈台地缓坡。

白鹤滩水电站近场区从上游矮子沟至下游衣补河沟口,全长约12 km,两岸为单斜山。左岸有石门坎—新建村、华东院基地一带(高程650~1 100 m)及人民湾共三级缓坡,呈北西向斜列;右岸三滩村至大寨沟一带,高程700~900 m以上山坡较缓,沿江一带为陡壁地形,大寨沟下游沿江两岸岸坡由一系列北西向陡崖、缓坡平台构成,呈台阶状,左岸台阶较宽缓,主要有三级阶面,右岸较狭窄,主要有五级。

白鹤滩水电站近场区冲沟受构造控制,多呈北西—北西西向,少量呈北东向。左岸冲沟相对短浅,

多发育于覆盖层中;右岸冲沟切割深,溯源侵蚀强,坡降大,较大的有大寨沟及白鹤滩沟,区域阶地不太发育,下游右岸的白鹤滩村分布为Ⅰ级阶地。由于河流剧烈下切,截弯取直,在上游右岸三滩形成由玄武岩滚(块)石构成的崩积台地。

(3) 气象水文。研究区地处中亚热带,属西南季风气候区,干湿季节分明。多年平均降水量为715.9 mm,最大一日降水量为95.9 mm,最大1 h降雨量为30.5 mm;多年平均蒸发量2 306.7 mm;多年平均气温21.7℃,历年最高气温42.2℃,历年最低气温2.1℃;多年平均风速2.1 m/s,最大风速13 m/s。区域内降水年内分配不均,5—10月为雨季,降雨充沛,降雨量占全年的85%以上;11月—次年4月为旱季,降水稀少,气候温暖干燥。

白鹤滩水电站坝址处控制流域面积430 308 km²,多年平均来水量4 140 m³/s。水库正常蓄水位825 m,总库容206亿m³,调节库容104.36亿m³,防洪库容58.38亿m³。据巧家站62 a实测资料统计,金沙江多年平均流量4 110 m³/s,一年中11月至翌年5月为枯水期,6—10月为洪水期,年最大洪峰最早出现在6月28日,最迟出现在10月8日,主要发生在7—9月份,占总数的95%以上,其中又以8月份洪水发生次数最多。实测历年最大洪峰流量为25 800 m³/s(1966年),历年最小洪峰流量为8 570 m³/s(1967年)。

1.2 地质环境

(1) 地质构造。研究区地质构造十分发育,由背斜、向斜、断裂和断层组成,区内地质构造的发育不但对流域内地貌格局的形成,不良地质现象的产生(滑坡、崩塌)起控制作用,而且对区内泥石流的形成和发展提供了大量的物源。区域内主要地质构造有六铁乡向斜、骑骡沟背斜、跑马断裂、回龙湾断裂、东坪断层、小田坝断层。

(2) 地层岩性。研究区出露地层较为齐全,除缺失古生界的石炭和中生界的侏罗系外,古生界至新生界地层均有出露。从老到新出露为:震旦系、寒武系、奥陶系、志留系、泥盆系、二叠系、三叠系、白垩系及第四系地层。不同年代地层的岩性主要有玄武岩、白云岩、灰岩、砂岩、泥岩及第四系崩坡积碎石土、残坡积砾石土和冲洪积砾石土及粉质黏土。

(3) 地震活动。区域内主要的地震构造带主要包括鲜水河断裂带、安宁河断裂带、则木河断裂带、小江断裂带等,有历史记载以来,在这些主要强烈活动的断裂带上发生了多次7级及以上地震。近场区范围内主要断裂活动水平不高,除四开—交际河断裂带

可能引发 6 级左右地震外,总体地震潜能不大,未来白鹤滩水电站工程所遭受的地震影响,仍将主要来自近场区西侧区域主要发震构造带,尤其是则木河断裂带和小江断裂带等活动的控制。

1.3 人类活动

研究区范围内主要的人类活动表现为村民房屋修建、道路开挖、农作物种植等。公路边坡因开挖多形成崩塌、滑坡等地质灾害,破坏了原始地质环境状况,同时还形成了大量的人工弃渣,部分弃渣进入沟道,为泥石流的形成提供了一定的物源。此外,由于不合理的毁林开荒,大量的坡耕地造成区域植被覆盖率低,水土流失严重,从而也加剧了崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害的形成。

2 泥石流运动参数计算与分析

2.1 泥石流容重

泥石流容重确定方法主要有实测法、配样法和统计分析方法。在所有泥石流沟中只有矮子沟有现场目击者,根据现场目击者的描述和判识,采用配样法确定泥石流容重。通过现场所取得泥石流原样进行配置,用半径为 11.5 cm,高度为 25.3 cm 的铁桶装置并现场称取配置浆体的重量,测量浆体的体积,获得泥石流容重。配置泥石流体的体积为 6 931.82 cm³,相应的浆体重量为 12.7 kg,测得矮子沟泥石流容重为 18.3 kN/m³。



图 2 矮子沟泥石流容重现场配样法

由于泥石流沟暴发时目击者较少,采用实测法和配样法条件也不成熟,因此本研究主要是通过统计分析确定泥石流容重。陈宁生等^[2]通过对我国西南地区大量泥石流沟的统计资料,泥石流黏土颗粒(<0.005 mm)含量与泥石流容重存在以下关系:

$$\gamma_c = -1.32 \times 10^3 x^7 - 5.13 \times 10^2 x^6 + 8.91 \times 10^2 x^5 - 55x^4 + 34.6x^3 - 67x^2 + 12.5x + 1.55 \quad (1)$$

式中: γ_c ——泥石流容重(kN/m³); g ——9.8 m/s²; x ——泥石流堆积物中黏粒占粒径小于 60 mm 的含量。

通过对研究区典型泥石流原状堆积物进行样品采集并进行室内颗粒分析试验,依据式(1),各沟黏粒含量及泥石流容重计算结果见表 1。

表 1 泥石流容重计算结果

序号	取样 沟道	黏粒 含量/%	泥石流容重/ (kN·m ⁻³)	泥石流 发生时间	备注
1	矮子沟	2.14	18.0	2012-06-28	黏性泥石流
2	大寨沟	4.60	19.0	1999-07-05	黏性泥石流
3	海子沟	0.43	16.0	1988-08-06	稀性泥石流
4	白鹤滩沟	0.62	16.2	1999-07-05	稀性泥石流
5	延吉沟	0.19	13.7	2012-06-28	稀性泥石流
6	大凉水沟	0.38	16.0	2012-06-28	稀性泥石流
7	牛路沟	0.50	16.0	2012-06-28	稀性泥石流
8	大石埡沟	0.91	16.5	2012-06-28	稀性泥石流
9	蔡家坪沟	2.33	17.5	2012-06-28	稀性泥石流

泥石流的容重通常随着其规模的变化而变化,因而泥石流的性质也会随着规模的变化而变化,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^[3-4],据不完全统计,100 年一遇以内的泥石流容重与频率有一定的关系^[5],即:

$$r_c' = r_c + 0.122 \ln p'; \quad p' = 0.01p \quad (2)$$

式中: r_c' ——不同频率泥石流的容重(g/cm³); r_c ——百年一遇泥石流容重(kN/m³); p' ——暴发频率系数; p ——泥石流暴发周期(年)。依据公式(2)推算出各沟不同频率泥石流的容重值见表 2。

表 2 不同频率泥石流容重值

沟名	频率/%				
	<1	1	2	5	10
矮子沟	18.0	18.0	17.7	17.1	16.2
大寨沟	19.0	19.0	18.1	17.3	16.1
海子沟	16.0	16.0	15.2	14.1	13.2
白鹤滩沟	16.2	16.2	15.4	14.3	13.4
延吉沟	13.7	13.7	14.5	13.7	1.25
大凉水沟	16.0	16.0	15.2	14.0	13.2
牛路沟	16.0	16.0	15.2	14.0	13.2
大石埡沟	16.5	16.5	15.7	14.5	13.7
蔡家坪沟	17.5	17.5	16.7	15.5	14.7

2.2 泥石流流速

结合我国西南山区泥石流的特征,采用下面泥石流流速计算公式计算泥石流流速:

(1) 稀性泥石流^[6-7]。

$$V_c = (M_c/a) H_c^{2/3} I_c^{1/2}$$

$$\text{其中: } a = (1 + \varphi_c \gamma_s)^{1/2}, \quad \varphi_c = \frac{\gamma_c - \gamma_w}{\gamma_s - \gamma_c} \quad (3)$$

式中: M_c ——稀性泥石流沟床的糙率系数; a ——阻力系数; H_c ——泥流水力半径(m),通常用泥深来代替; I_c ——泥流水力坡度; γ_c ——泥石流流体容重(kN/m³); γ_w ——水的容重,取 10 kN/m³; γ_s ——泥石流固体物质的容重,取 26.5~27.0 kN/m³。

(2) 黏性泥石流^[6-7]

$$V_c=(1/n_c)H_c^{2/3}I_c^{1/2} \tag{4}$$

式中： n_c ——泥石流沟糙率； H_c ——泥石流水力半径

(m)，通常用泥深来代替； I_c ——泥石流水力坡度；
根据各沟勘测的泥石流洪痕断面，选取相关参数，计算出各沟不同断面流速，结果见表 3。

表 3 泥石流流速计算结果

沟名	断面编号	断面位置	比降 I_c / ‰	泥深 H_c / m	糙率值 M_c / $1/n_c$	流速 V_c / ($m \cdot s^{-1}$)	备注
矮子沟	断面 1	距离沟口 500 m 处	87	5.4	8.3	7.5	2012-06-28 泥石流
	断面 2	排水洞进水口上游 500 m 处	105	5.0	7.5	7.1	
	断面 3	和平村上方 700 m 处	123	7.6	3.5	4.8	
大寨沟	断面 1	沟口	70	7.8	5.4	5.6	1999-07-05 泥石流
	断面 2	龙洞沟口下 15 m	87	4.9	9.6	8.2	
	断面 3	大寨沟上游公路上 150 m	105	2.4	10.4	5.1	
海子沟	断面 1	营盘桥	176	4.0	10	6.6	1998-08-06 泥石流
	断面 2	毛店子桥上游 20 m	141	4.5	10	6.4	
白鹤滩沟	断面 1	汇口下方 100 m 处	176	3.0	10	5.9	1999-07-05 泥石流
	断面 2	核桃坪沟中段	268	1.8	10	4.2	
	断面 3	刘家大沟中游	212	2.5	10	5.1	
延吉沟	断面 1	1# 冲沟 1 220 m 处	140	1.5	10	3.5	2012-06-28 泥石流
	断面 2	1# 冲沟 840 m 处	140	1.4	12	3.9	
	断面 3	3# 冲沟 979 m 处	140	1.2	10	3.0	
	断面 4	3# 冲沟 790 m 处	158	1.5	10	3.7	
大凉水沟	断面 1	主沟沟口	190	1.2	10	3.1	2012-06-28 泥石流
	断面 2	新建镇上游 100 m 处	170	1.2	10	3.0	
	断面 3	滑石板沟沟口	180	1.4	11	3.7	
牛路沟	断面 1	汇口上游 50 m	176	2	9	3.8	2012-06-28 泥石流
	断面 2	中游跌坎处	176	2	11	4.6	
大石埡沟	断面 1	汇口上游 50 m	176	2	8	3.2	2012-06-28 泥石流
	断面 2	中上游跌坎处	364	2	4	3.7	
蔡家坪沟	断面 1	八一桥处	176	2	10	3.7	2012-06-28 泥石流
	断面 2	公路冲毁处	212	2	10	4.1	

2.3 泥石流流量

泥石流流量是泥石流工程治理最为重要的参数之一^[8]。对于非观测泥石流，其计算方法主要有形态调查法和模拟计算法。

(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，并通过调访了解在最高泥位的泥石流通过后断面变化的情况，尽可能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(式 5)，其计算结果见表 4。

$$Q_C=A_{sc} \times V_C \tag{5}$$

式中： A_{sc} ——调查断面的过流面积(m^2)； V_C ——通过调查断面的泥石流平均流速(m/s)。

(2) 配方法。配方法是目前泥石流流量计算的基本方法，其计算步骤是先按水文方法计算出不同频率下小流域暴雨洪峰流量，然后考虑沟道堵塞情况，

按式(6)，(7)^[9]计算泥石流流量，其结果见表 5。

$$Q_C=(1+\varphi)Q_p \cdot D_C \tag{6}$$

$$\varphi=(\gamma_c-\gamma_w)/(\gamma_s-\gamma_c) \tag{7}$$

式中： Q_C ——频率为 P 的泥石流峰值流量(m^3/s)； Q_p ——频率为 P 的暴雨洪水设计流量(m^3/s)； φ ——泥石流泥沙修正系数； γ_c ——泥石流重度(kN/m^3)； γ_w ——清水的重度(kN/m^3)； γ_s ——泥石流中固体物质比重(kN/m^3)； D_C ——泥石流堵塞系数，取值见表 6。

暴雨洪峰流量以目前公用的小流域设计洪水的推理公式来进行计算，其计算公式为：

$$Q_P=0.278\psi \frac{s}{\tau^n}F \tag{8}$$

$$\text{其中:}\psi=f(\mu,\tau^n); \quad \tau^n=f(m,s,J,L)$$

式中： Q_P ——频率为 P 的暴雨洪水设计流量(m^3/s)；

ϕ ——洪峰径流系数; s ——暴雨雨力 (mm/h); n ——(h); μ ——入渗强度 (mm/h); m ——汇流参数。
暴雨指数; F ——流域面积 (km²); J ——河道平均坡度式(8)中参数 ϕ, τ 均为互为函数关系,由《四川省
度(‰); L ——沟道长度 (km); τ ——流域汇流时间中小流域暴雨洪水计算手册》中提供试算法确定。

表 4 形态调查法泥石流流量计算结果

沟名	断面编号	断面位置	面积 $A_{AC}/$ m ²	流速 $V_c/$ (m · s ⁻¹)	流量 $Q_c/$ (m · s ⁻¹)
矮子沟	断面 1	距离沟口 500 m 处	122.8	7.5	925.91
	断面 2	排水洞进水口上游 500 m 处	125.5	7.1	886.03
	断面 3	和平村上方 700 m 处	180.3	4.8	858.22
大寨沟	断面 1	沟口	148.0	5.6	831.82
	断面 2	龙洞沟口下 15 m	76.3	8.2	625.06
	断面 3	大寨沟上游公路上 150 m	45.2	5.1	231.82
海子沟	断面 1	营盘桥	36.3	6.6	240.01
	断面 2	毛店子桥上游 20 m	83.2	6.4	532.35
白鹤滩沟	断面 1	汇口下方 100 m 处	50.5	5.9	276.52
	断面 2	核桃坪沟中段	6.5	4.2	27.41
	断面 3	刘家大沟中游	18.8	5.1	95.98
延吉沟	断面 1	1# 冲沟 1 220 m 处	5.5	3.5	19.25
	断面 2	1# 冲沟 840 m 处	6.2	3.9	24.10
	断面 3	3# 冲沟 979 m 处	3.5	3.0	10.50
	断面 4	3# 冲沟 790 m 处	3.8	3.7	14.20
大凉水沟	断面 1	主沟沟口	5.6	3.1	17.51
	断面 2	新建镇上游 100 m 处	7.2	3.0	21.39
	断面 3	滑石板沟沟口	20.0	3.7	73.70
牛路沟	断面 1	汇口上游 50 m	22.0	3.8	82.94
大石埡沟	断面 1	汇口上游 50 m	12.0	3.2	38.64
蔡家坪沟	断面 1	八一桥处	14.0	3.7	52.08

表 5 配方法泥石流流量计算结果

沟名	流域面 积/km ²	主沟长 度/km	沟床平均 比降/‰	暴雨洪峰流量 $Q_P/(m^3 \cdot s^{-1})$				泥石流峰值流量 $Q_C/(m^3 \cdot s^{-1})$			
				$P=1\%$	$P=2\%$	$P=5\%$	$P=10\%$	$P=1\%$	$P=2\%$	$P=5\%$	$P=10\%$
矮子沟	65.50	21.96	130	321.22	299.28	240.80	193.71	971.36	875.31	661.59	487.86
大寨沟	28.73	12.31	209	168.76	154.93	142.17	118.62	827.14	759.32	498.76	370.25
海子沟	96.20	17.30	87	500.78	439.72	356.53	296.09	1183.80	961.41	709.91	551.82
白鹤滩沟	15.36	7.63	298	87.33	76.38	61.48	50.65	281.16	227.09	166.15	127.98
延吉 1# 沟	3.50	4.20	338	18.47	16.05	12.75	10.36	30.6	24.7	18.10	13.80
延吉 3# 沟	1.90	2.85	305	11.23	9.77	7.77	6.32	18.6	15.04	11.02	8.40
大凉水沟	6.50	4.76	174	36.43	31.76	25.40	20.78	74.41	60.04	43.71	33.49
牛路沟	6.59	4.47	260	39.97	34.90	28.00	22.99	94.22	76.45	55.4	42.78
大石埡沟	1.47	4.19	348	6.74	5.80	4.53	3.61	16.68	13.3	9.35	6.98
蔡家坪沟	3.25	3.97	345	19.87	17.31	13.82	11.28	54.64	43.7	31.1	23.66

注:(1) 海子沟总流域面积为 103.6 km²,沟长 21.1 km,但泥石流只发生于海子以上区域,故计算泥石流峰值流量时未按整个流域进行计算;
(2) 延吉沟实际上是延吉区多条冲沟的统称,主要包含 1#、3#、11# 沟三支独立水系,其中 1# 和 3# 沟为泥石流沟,对工程建设构成直接威胁。

表 6 泥石流堵塞系数取值

沟名	矮子沟	大寨沟	海子沟	白鹤滩沟	延吉沟	大凉水沟	牛路沟	大石埡沟	蔡家坪沟
堵塞系数	1.6	2.3	1.5	2.0	1.2	1.3	1.5	1.5	1.5

2.4 泥石流总量

根据泥石流历时 T 和最大流量 Q_c ,通过断面的一次泥石流浆体总量 W_c 由下式计算^[6-7]:
式中: W_c ——一次泥石流浆体总量 (m³); Q_c ——泥

$$W_c = \frac{19T_cQ_c}{72} = 0.264T_cQ_c \tag{9}$$

石流峰值流量(m^3/s); T_c ——泥石流持续时间(s)。

研究发现^[9],一次泥石流浆体总量与一次泥石流固体物质的总量存在一定的关系。对于连续性的泥石流,一次泥石流固体物质总量(W_s)与浆体总量(W_c)的关系如下:

表 7 泥石流总量与一次固体物质总量计算结果

沟名	一次浆体总量/万 m^3				一次固体物质总量/万 m^3				时间/s
	$P=1\%$	$P=2\%$	$P=5\%$	$P=10\%$	$P=1\%$	$P=2\%$	$P=5\%$	$P=10\%$	
矮子沟	57.41	51.68	39.14	28.82	27.43	23.39	16.41	10.48	2400
大寨沟	29.96	28.42	18.19	13.07	16.34	13.27	7.95	4.94	6300
海子沟	112.46	91.33	67.44	52.42	41.10	27.83	16.15	9.93	3600
白鹤滩沟	13.35	10.79	7.89	6.08	5.06	3.43	1.99	1.23	1800
延吉 1# 沟	0.48	0.39	0.29	0.22	0.13	0.08	0.04	0.02	600
延吉 3# 沟	0.29	0.24	0.17	0.13	0.08	0.05	0.03	0.01	600
大凉水沟	2.36	1.9	1.38	1.06	0.86	0.6	0.34	0.21	1200
牛路沟	2.98	2.42	1.76	1.35	1.08	0.76	0.43	0.26	1200
大石埡沟	0.53	0.42	0.3	0.22	0.21	0.15	0.08	0.05	1200
蔡家坪沟	1.73	1.38	0.98	0.75	0.79	0.56	0.33	0.21	1200

2.5 泥石流冲击力

泥石流冲击力是泥石流治理工程设计的重要参数,包括泥石流流体动压力和泥石流最大颗粒的冲击力。

(1) 泥石流流体动压力计算。泥石流流体是非均匀流体,其内部结构和冲击过程十分复杂,这里从理论公式出发,选取根据实测资料而进行修正的理论公式^[10]:

$$\sigma=\frac{K\gamma_cV^2}{g}\tag{11}$$

式中: σ ——泥石流流体动压力(pa); g ——重力加速度(m/s^2),取 $g=9.8\text{ m}/\text{s}^2$; γ_c ——泥石流流体容重(kN/m^3); V ——泥石流平均流速(m/s); K ——泥石流流体不均匀系数, $K=2.4\sim 4$ 。

(2) 泥石流最大颗粒的冲击力计算。目前泥石流大颗粒冲击力的确定还没有形成系统的计算方法,

$W_s=C_vW_c=(\gamma_c-S\gamma_w)W_c/(\gamma_s-\gamma_w)$ (10)
式中: W_s ——泥石流固体物质总量(m^3); γ_w ——水的容重(kN/m^3); γ_c ——泥石流的容重(kN/m^3); γ_s ——固体物质的容重(kN/m^3); C_v ——泥石流中土体的体积浓度,计算结果见表 7。

这里选取应用较广泛的弹性碰撞法来计算大石块的冲击力^[11]。

$$F=K_cna^{2/3}\tag{12}$$

其中: $n=\left[\frac{16R_{s2}}{9\pi^2(k_1+k_2)^2}\right]^{1/2}$, $a=(\frac{5V^2}{4nm_1})^{2/5}$
 $k_1=(1-v_1^2)/(\pi E_1)$, $k_2=(1-v_2^2)/(\pi E_2)$,
 $n_1=1/m_2$

式中: K ——修正系数,一般取 0.1; R_{s2} ——大颗粒半径(m); v_1,v_2 ——材料和球体(石块)的泊松比; m_2 ——石块的质量(kg); E_1,E_2 ——材料和石块的杨氏模数(kg/m^2); V ——石块的相对速度(m/s)。

通过对各泥石流沟进行全面调查,测量沟床中泥石流搬运最大石块的平均直径,石块相对流速取泥石流浆体流速的 70%,采用弹性撞击法进行泥石流流体中最大石块的冲击力计算。泥石流冲击力计算结果如表 8 所示。

表 8 泥石流冲击力计算结果

沟名	容重 $\gamma_c/$ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	最大流速 $V_c/$ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	不均匀系 数 K	石块半径 $R_{s2}/$ m	石块相对速度 $V/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	流体最大动 压力 σ/Pa	最大颗粒冲 击力 F/kN
矮子沟	18.0	6.12	3.0	3.6	4.28	2.06×10^5	4665
大寨沟	19.0	5.62	3.0	3.0	3.93	1.84×10^5	3603
海子沟	16.0	6.61	4.0	3.0	4.63	2.86×10^5	3932
白鹤滩沟	16.3	5.48	4.0	2.0	3.84	1.99×10^5	2217
延吉 1# 沟	14.5	3.9	4.0	0.8	2.73	0.90×10^5	635
延吉 3# 沟	14.5	3.7	4.0	0.6	2.59	0.81×10^5	441
大凉水沟	16.0	3.68	3.5	1.4	2.58	0.77×10^5	1183
牛路沟	16.0	4.62	4.0	1.6	3.23	1.39×10^5	1559
大石埡沟	16.5	3.72	4.0	1.5	2.60	0.93×10^5	1288
蔡家坪沟	16.5	4.08	3.5	2.5	2.86	1.04×10^5	2459

3 泥石流发展趋势分析

3.1 泥石流形成的基本条件分析

泥石流的发展趋势是多个因素综合影响的结果^[5],其中影响泥石流发展最基本的因素就是地形地貌、松散固体物源条件和水源条件。(1)白鹤滩水电站位于金沙江干旱河谷地带,属高山峡谷区。区域内水系发达,各流域内冲切沟发育,沟道坡降大,岭谷高差大,山体陡峭,植被覆盖率低,山洪泥石流的产流、汇流条件好,地形地貌因素十分利于泥石流的发展;(2)经过实地调查,区域松散固体物质储量十分丰富,其种类有坡积物、沟道堆积物、沟岸崩滑物、老泥石流堆积物等,在各泥石流流域内分布面积达60%以上,数量巨大,远远超出各泥石流流域一次泥石流物质总量;(3)研究区地处中亚热带,属西南季风气候区,降雨充沛且集中,多年平均降水量为715.9 mm,最大一日降水量为95.9 mm,最大1 h降雨量为30.5 mm。同时,受地形高差影响,区域降雨随着海拔增高而增大,在流域源区,年降雨量可达1 600 mm以上。此外,区域点暴雨集中,极端气候时有发生,泥石流发生的水源条件十分有利。根据上述分析可知,研究区内不论是地形地貌、土源条件还是水源条件,均能满足泥石流的形成条件,但由于各流域自身条件的差异,泥石流在活跃程度、暴发规模等方面都不尽相同。

表 9 地震次生泥石流流量变化统计

沟名	地点	地震时间 (年-月-日)	泥石流暴发 时间(年-月-日)	泥石流流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)		增加倍数
				震前	震后	
通戈顶沟	巴塘县	1989-04	1998	21.0(洪水)	128.3(泥石流)	6.0
满天星沟	彭州市	2008-05-12	2008-07-26	96.5(泥石流)	355.9(泥石流)	3.7
化石板沟	北川县	2008-05-12	2008-09-24	23.2(泥石流)	348.0(泥石流)	15.0
深溪沟	都江堰市	2008-05-12	2009-07-17	392.7(洪水)	875.5(泥石流)	2.2
八一沟 ^[3]	都江堰市	2008-05-12	2010-08-13	256.3(洪水)	1274.2(泥石流)	5.0

根据表 9 可知,地震次生泥石流其流量可以达到非地震条件下的 2.2~15 倍,同时综合泥石流与地震活动的关系分析发现,地震对次生泥石流活动的影响期可长达 20 a 之久,而活动最为频繁、规模最大多出现在震后 5~6 a 内。

在地震活动的影响下,促进了区域基岩裂隙的张开,加速了岩体的风化速度,降低了流域内土体的强度,促进崩塌、滑坡等地质灾害的发展,因此,地震作用是区域泥石流产生和起动的重要外因之一,尤其是在地震和暴雨同时发生时,暴发泥石流的概率将大大增加。

(2)干湿交替气候对泥石流的影响。干湿交替气候对泥石流的影响也较为明显:干旱使得土体更容易被侵蚀、开裂,产生较多的细颗粒物,并改变坡面的径流条件和流域汇流条件;干旱能造成土体长期处

3.2 泥石流主控因素分析

通过对我国西南山区大量泥石流的统计研究发现,泥石流与地震活动、气候变化及人类活动关系最为密切,也正是这些因素,控制着区内泥石流的活动规律,并对泥石流的性质和规模起着决定性作用。

(1)地震活动对泥石流的影响。据记载,区域无 6 级以上地震发生,但中小地震频繁,场地地震危险性主要来自周边强震的影响。据统计,自 1905 年以来,区域范围内有感地震 74 次,其中 6 级以上地震 33 次,区域地震有效峰值加速度(EPA)序列图见图 3。

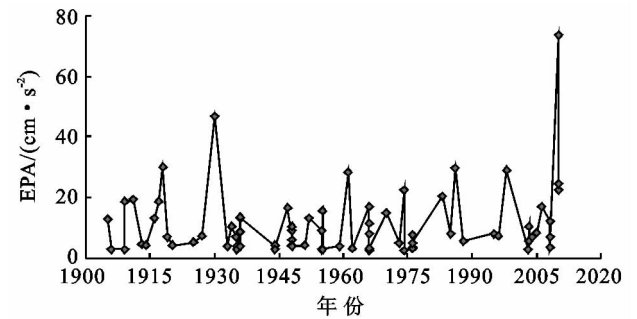


图 3 区域地震有效峰值加速度(EPA)序列

统计发现,一般地震过后,地震区泥石流沟进入活动期,其规模和频率都得到增强,且泥石流暴发所需的临界雨量条件降低。地震以后引发的泥石流规模通常超大,具体见表 9。

于失水状态,并出现明显的干燥收缩现象,常伴随表层裂缝的生成和增长,土体会出现崩解现象;土体存在最佳含水量,当土体含水量小于最佳含水量时,其强度随着含水量的增加而增大;当土体含水量大于最佳含水量时,其强度随着土体含水量的增加而减少。因此,干旱使得土体崩解加强,风化作用加剧,强度降低,较小强度的降雨就可能引发泥石流。

(3)人类活动对泥石流的影响。人为因素是使山地灾害损失加重的不可忽视的因素。人为的不合理经济活动,如过度放牧、陡坡耕作、毁林开荒等,都将导致环境恶化,水土流失加剧。此外,大量的工程建设如房屋修建、道路开挖等,形成大量的废土废渣,也是引发灾害的不可忽视的重要因素。目前,区域大多数泥石流流域内都规划了渣场,大量的弃渣将直接

为泥石流的形成提供固体物质来源,因此,确保渣场的安全是减少泥石流危害不容忽视的工作。

综合上述分析可知,白鹤滩水电站坝址近场区泥石流活动历史长,目前,各流域地形地貌、土源条件及水源条件依然满足泥石流的形成,在今后较长一段时间内,区域仍会发生泥石流,但是随着松散固物质的不断消减,部分沟道泥石流的暴发频率和规模将逐渐降低和减小,然而,在强地震、干湿循环变化气候的偶然联合作用下,仍可能会发生超过百年一遇规模的泥石流。

4 结语

金沙江白鹤滩水电站坝址近场区共有 9 条灾害性泥石流沟,这些泥石流沟在历史上都曾发生过不同规模的泥石流,在近代也不同程度地出现过泥石流活动。各流域松散固体物质储量丰富,区域降水充沛,极端气候突出,加之有利的地形地貌,泥石流暴发的基本条件依然十分充足,具有再次发生泥石流的可能。特别在强震、干湿循环的气候变化环境、不合理的人类活动等因素耦合作用下,仍可能会发生超过百年一遇的泥石流。泥石流活动直接对电站大坝、进水口、营地、居民安置点、排水隧洞、渣场、料场、缆机平台、出场线、施工道路、加油站等基础建设或设施构成威胁,严重影响电站的建设和运行,因此进行泥石流预测预警工作十分必要,其中以矮子沟和大寨沟泥石流最为严重,应进行重点监测。

(上转第 237 页)

- [2] 米文宝. 西北地区国土主体功能区划研究[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2010.
- [3] 樊杰. 我国主体功能区划的科学基础[J]. 地理学报, 2007, 62(4): 339-350.
- [4] 牛海鹏. 耕地生态位及其数学测度模型构建研究[J]. 水土保持研究, 2006, 13(3): 11-14.
- [5] 马超群, 曹明明, 何艳芬. 关中地区城市生态位研究[J]. 西北大学学报: 自然科学版, 2010, 40(5): 876-879.
- [6] 戈峰. 现代生态学[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [7] 王如松. 高效与和谐: 城市生态学的原理与方法[M]. 长沙: 湖南教育出版社, 1988.
- [8] 欧阳志云, 王如松, 符寅南. 生态位适宜度模型及其在土地利用适宜性评价中的应用[J]. 生态学报, 1996, 16(2): 113-120.
- [9] 韩秀娣. 城市生态位的内涵及其调控[J]. 现代城市研究, 2002(2): 42-43.
- [10] 陈绍愿, 林建平, 杨丽娟, 等. 基于生态位理论的城市竞争策略研究[J]. 人文地理, 2006(2): 72-76.
- [11] 丁圣彦, 李志恒. 开封市的生态位变化分析[J]. 地理学报, 2006, 61(7): 752-762.
- [12] 罗小龙, 甄峰. 生态位态势理论在城乡结合部应用的初步研究: 以南京市为例[J]. 经济地理, 2000, 20(5): 55-58.

参考文献:

- [1] 高寒. 四川宁南泥石流冲毁民房 80 间失踪 40 余人[N/OL]. 中国新闻网, [2012-06-28]. <http://news.eastday.com/c/20120628/u1a6661292.html>.
- [2] 陈宁生, 崔鹏, 刘中港, 等. 基于黏土颗粒含量的泥石流容重计算[J]. 中国科学(E 辑): 技术科学, 2003, 33(增刊): 164-174.
- [3] 吴积善, 田连权, 康志成. 泥石流及其综合治理[M]. 北京: 科学出版社, 1993.
- [4] 国家防汛抗旱总指挥部办公室, 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所. 山洪泥石流滑坡灾害与防治[M]. 北京: 科学出版社, 1994.
- [5] 周必凡. 泥石流防治设计指南[M]. 北京: 科学出版社, 1991.
- [6] 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所. 中国山地灾害防治工程[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1997.
- [7] 中国科学院水利部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.
- [8] 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.
- [9] 四川省水利电力厅四川省中小流域暴雨洪水计算手册[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1984.
- [10] 章书成, 袁建模. 泥石流冲击力及其测试[R]. 见: 中国科学院兰州冰川冻土研究所集刊第 4 号(中国泥石流研究专集)[C]. 北京: 科学出版社, 1985.
- [11] 水山. 砂防ダムレニ対わゐる土石流衝擊力算定この問題点[M]. 日本: 新砂防, 昭和 54 年: 112-114.
- [13] 张俊峰, 张安录, 程龙, 等. 基于生态位适宜度的农村居民点布局研究: 以武汉市新洲区为例[J]. 水土保持研究, 2013, 20(3): 71-77.
- [14] 杨国贤, 李功. 银川市城市化进程中生态位的初步研究[J]. 宁夏工程技术, 2004, 3(3): 271-274.
- [15] 李艳萍, 葛幼松. 基于生态位理论探析江苏省沿江城市发展[J]. 河北师范大学学报: 自然科学版, 2005, 29(6): 631-636.
- [16] 白洁, 王学恭. 基于生态位理论的甘肃省城市竞争力研究[J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23(3): 30-34.
- [17] 孟德友, 陆玉麒. 基于生态位理论的城市生态位研究: 以河南各省市为例[J]. 地域研究与开发, 2008, 27(2): 56-59.
- [18] 李奇睿, 王继军. 基于退耕背景下安塞县商品型生态农业系统演变过程分析[J]. 水土保持研究, 2011, 18(3): 97-101.
- [19] 王永锋, 高建华, 张智先. 生态位理论及其在城市竞争研究中的作用[J]. 城市环境与城市生态, 2007, 20(2): 5-8.
- [20] 马超群, 何艳芬. 关中地区城市生态位及动态变化研究[J]. 西北农林科技大学学报: 社会科学版, 2009, 9(6): 49-53.
- [21] 徐厚琴, 方一平. 西部干旱区省会城市生态经济位比较研究[J]. 干旱区地理, 2007, 30(3): 426-430.