

# 四川省黑水县红水沟泥石流流动力特征及危险性评估研究

王维早<sup>1,2</sup>, 曹秀玲<sup>1</sup>, 罗会来<sup>1</sup>, 张文宗<sup>2</sup>, 赵志星<sup>3</sup>, 于开宁<sup>1,2</sup>

(1. 石家庄经济学院, 河北 石家庄 050031;

2. 河北省气象与生态环境实验室, 河北 石家庄 050031; 3. 中国化学工程第一岩土工程有限公司, 河北 沧州 061001)

**摘要:** 四川省黑水县红水沟泥石流位于色尔古水电站闸(坝)址上游右岸约 500 m 处,严重影响着该水电站的安全,因此必须对红水沟泥石流进行重点研究。在现场勘察调查的基础上,对红水沟泥石流的成因、动力特征和危险性进行了详细的分析评估,研究表明,红水沟泥石流形成的物源条件、降雨条件和地势条件均满足泥石流的形成条件,且形成条件充分。该泥石流的规模中等,危险程度高,有进一步发展趋势。

**关键词:** 红水沟; 泥石流; 形成条件; 动力特征; 危险性评估

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2008)05-0140-04

中图分类号: P642.2

## Dynamics Features and Hazard Assessment of Debris Flow in Hongshui Valley in Heishui County of Sichuan Province

WANG Wei zao<sup>1,2</sup>, CAO Xiur ling<sup>1</sup>, LUO Huir lai<sup>1</sup>, ZHANG Weir zong<sup>2</sup>, ZHAO Zhir xing<sup>3</sup>, YU Kai ning<sup>1,2</sup>

(1. College of Economics, Shijiazhuang University, Shijiazhuang, Hebei 050031, China;

2. Laboratory of Atmosphere and Environment of Hebei Province, Hebei 050031, China;

3. The First Geotechnical Engineering Co., Ltd., China Chemical Engineering, Cangzhou, Hebei 061001, China)

**Abstract:** Debris flow in Hongshui valley located in the upper area of Seregu hydropower station in Heishui County, Sichuan Province is studied. Based on the survey of the debris flow site, the formation conditions of debris flow and its dynamics features are analyzed and its hazard assessment is made. Results show that the material factor, rainfall factor, and physical feature satisfy the formation conditions of debris flow in the valley. The formation conditions are sufficient and the scale is medium. Its hazard degree is high and its development trend has been accelerated.

**Keywords:** Hongshui Valley; debris flow; formation condition; dynamics feature; hazard assessment

色尔古水电站位于四川省阿坝州黑水县境内,是岷江上游右岸的一级支流黑水河梯级开发的第 IV 级水电站工程,为低闸引水式电站。正常蓄水位 1 873 m,装机容量 150 MW。闸址上游右岸约 500 m 处有一条红水沟,沟口有规模巨大的古泥石流堆积体,古泥石流堆积体呈扇形,顶面较平坦,前缘和两侧成陡坎。历史上多次发生泥石流,最近一次泥石流发生在 2004 年。红水沟距闸址较近,潜在的泥石流灾害,对拟建的色尔古水电站的安全构成了严重威胁。本文对该泥石流灾害成因、动力特征及其危险性进行了评估研究。

## 1 泥石流形成条件

红水沟位于四川省黑水县县城西南约 25 km 的

黑水河右侧。红水沟泥石流的形成主要决定因素:地形地貌、地层岩性、地质构造、气象、植被及不合理的人类活动等。

### 1.1 地形条件

红水沟地处川西高原东北部的高山峡谷地带,属长江流域岷江水系上游隆起区。红水沟表现为强烈下切呈“V”型谷,沟谷深切,属于典型的高山峡谷地貌。

红水沟总体走向呈 NE40°,主沟长 2.6 km,流域汇水面积约 3.8 km<sup>2</sup>,流域内最高点海拔 3 640 m,沟口海拔 1 850 m,相对高差 1 790 m,从红水沟后缘山脊向下至 2 400 m 高程为漏斗状地形,沟谷呈“U”型,有利于地表水的汇集。2 400 m 高程以上沟床平均比降 754‰,1 975~2 400 m 高程由于后期人类生产活动,坡面有台阶状陡坎,但总体坡面连续,坡度 18°~22°。

收稿日期: 2007-11-01

修回日期: 2008-01-07

资助项目: 河北省气象与生态环境实验室重点资助项目(Z 0602); 河北省科学技术研究与发展指导计划项目(07276772); 石家庄经济学院重点资助项(200730)

作者简介: 王维早(1976—),男(汉族),山东省沂水县人,硕士,讲师,主要从事岩土工程与地质工程方面的教学和科研工作。E-mail: wv-zl9760302@sina.com。

从红水沟口至 1 975 m 高程为古泥石流堆积体, 存在明显的泥石流堆积扇, 坡度较缓, 平均坡度  $14^\circ$ , 2 400 m 高程以下沟床平均比降 324.5‰, 红水沟沟床总的平均比降 411.2‰。古泥石流堆积体无明显分层及多期活动特征, 古泥石流堆积物在后期流水的强烈侵蚀作用下形成长约 1.5 km 的冲沟, 从沟口向里约 600 m 沟深而窄, 沟深 15~20 m, 沟底宽 1.6~3 m, 沟顶宽 5~7 m, 沟壁近直立, 呈“V”型谷; 沟口以里约 600~2 400 m 高程, 沟切割较深, 可达 100~150 m, 沟顶宽 100~280 m, 两侧边坡  $40^\circ\sim 50^\circ$ , 呈“V”型谷。红水沟相对高差大, 形成区汇水面积大, 流通区狭窄且比降较大, 该地形条件对泥石流的形成非常有利。

### 1.2 物源条件

红水沟位于龙门山后山“茂汶断裂”以北, “若尔盖盆地”以南, 近南北向“岷江断裂带”以西的“黑水褶皱束”构造带内, 在大地构造部位上地处松潘—甘孜地槽褶皱系之三级构造单元马尔康地向斜东侧。构造型式主要表现为—群斜列的倒转褶皱群, 如俄瓜背斜、西尔背斜、红岩向斜、阔波沃背斜、塞作克向斜、罗坝街背斜、日嘎希—瓦布梁子复背斜等, 红水沟内断裂构造不发育, 无区域性活动断裂通过。但红水沟外围(东侧和北侧)断裂构造十分发育, 主要活动断裂有龙门山断裂带、岷江断裂带、虎牙断裂、松平沟断裂等。这些地质构造条件是造成红水沟两岸边坡不稳定的重要因素。红水沟两岸出露大量有利于形成泥石流松散固体物质的地层, 包括三叠系下统波茨沟组( $T_{1b}$ )的灰至浅灰绿色中厚层至薄层泥钙质胶结的长石砂岩、钙质粉砂岩夹千枚岩、含钙绢云母板岩及部分薄层板状灰岩、结晶灰岩及少量大理岩、三叠系中统杂谷脑组( $T_{2z}$ )的厚层—块状变质含钙长石石英砂岩, 夹少量灰黑色炭质千枚岩及砂质千枚岩、薄层砂岩, 以及第四系的崩坡积的块碎石土( $Q_4^{col+dl}$ ), 在沟区内分布较广, 沿河两岸均有分布, 但厚度变化大, 可见最大厚度达 30~60 m。

红水沟沟谷两岸坡表层覆盖层是第四系的崩坡积的块碎石土( $Q_4^{col+dl}$ ), 基岩为三叠系中统杂古脑组( $T_{2z}$ )的千枚岩夹变质砂岩。千枚岩岩性较软, 变质砂岩较硬, 整体上抗风化能力弱, 浅表岩体为强风化。由于千枚岩较软, 变质砂岩较硬, 千枚岩形成软弱夹层, 随着河谷的强烈下切, 沟谷两岸坡形成了临空面, 在暴雨的条件下, 强风化的千枚岩遇水软化, 其抗剪强度降低很多, 形成了滑动面, 可产生滑动。滑体为该泥石流提供了大量的物源。其方量的计算采用平均断面法计算, 计算时先绘出纵断面图(图 1), 便可利用式(1)计算方量<sup>[1]</sup>。

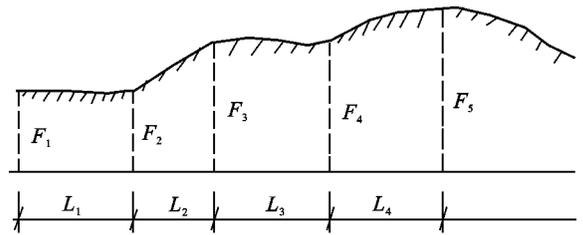


图 1 土方量计算纵断面图

在红水沟左边坡浅表层滑坡及坡面松散崩坡积物, 提供的物源估计约  $1.00 \times 10^6 \text{ m}^3$ , 在 2 400 m 高程以下, 红水沟右岸分布有大规模的浅表层滑坡及坡面松散崩坡积物, 提供的物源估计约  $3.0 \times 10^5 \text{ m}^3$ , 2 400 m 高程以上沟谷右侧的小规模崩积层滑坡、耕地及部分风化卸荷的基岩因坡面流水的侵蚀可形成松散固体物质, 提供的物源估计约  $2.0 \times 10^5 \text{ m}^3$ , 从沟口到 2 400 m 高程约 1 500 m 沟段内残留的古泥石流物堆积体, 提供的物源估计约  $1.0 \times 10^7 \text{ m}^3$ , 沟谷内存在的潜在可移动物源约  $1.5 \times 10^6 \text{ m}^3$ , 即总的可动物源量约  $1.3 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。

$$V = \left( \frac{F_1 + F_2}{2} \right) L_1 + \left( \frac{F_2 + F_3}{2} \right) L_2 + \left( \frac{F_3 + F_4}{2} \right) L_3 + \left( \frac{F_4 + F_5}{2} \right) L_4 + \dots \quad (1)$$

式中:  $V$ ——土方量( $\text{m}^3$ );  $F_1, F_2, F_3, F_4, F_5$ ——各横断面面积( $\text{m}^2$ );  $L_1, L_2, L_3, L_4$ ——各段的长度(m)。

### 1.3 降雨条件

根据黑水县气象站 1980—2004 年的降雨资料, 可以发现该地区的降雨具有如下特点。(1) 降雨丰富, 暴雨、大暴雨天气较多。红水沟多年平均降水量 835.8 mm, 其中雨季 699.5 mm, 旱季 136.3 mm, 历史上年降水量最大 969.3 mm, 最小 602.6 mm。(2) 降雨在年内分配不均匀, 雨量集中于汛期。5—10 月降雨量占年雨量的 80% 以上, 而 12—翌年 3 月枯水期只占年总雨量的 8%。受高山地貌影响, 降雨量日变化较大, 全年夜间降雨量 586.9 mm, 夜降雨率 60%~80%。(3) 暴雨量级较小。红水沟最大 24 h 雨量( $H_{24}$ ) 发生在 1999 年, 降雨量为 67.9 mm; 日最大降雨量一般在 30~55 mm 之间; 最大 1 h 雨量( $H_1$ ) 发生在 1994 年, 降雨量为 26.5 mm; 历史上平均 1 h 雨量( $H_1$ ) 约 16 mm; 最大 10 min 雨量( $H_{1/6}$ ) 是发生在 1994 年, 降雨量为 21.2 mm, 历史上平均 10 min 雨量( $H_{1/6}$ ) 约 10 mm。丰富的降雨为泥石流形成提供了水源和水动力条件。

## 2 泥石流运动和动力学特征

### 2.1 泥石流流速的计算方法

泥石流流速  $v_c$  是决定泥石流动力特性和防灾设

计中一个最重要的参数  $v_c$ , 目前所采用的各种计算式大多是经验性的, 使用时要结合地区特点综合考虑。红水沟泥石流试样所测容重为  $19.2 \sim 2.10 \text{ t/m}^3$ , 因此, 该泥石流的容重  $\gamma_c$  取  $2.01 \text{ t/m}^3$ , 红水沟泥石流为黏性泥石流, 采用适合黏性泥石流的计算公式计算<sup>[2]</sup>

$$v_c = \frac{1}{\alpha} m_c H^{2/3} I^{1/2}$$

$$\alpha = \left[ \frac{\gamma_s (\gamma_c - 1)}{\gamma_s - \gamma_c} + 1 \right]^{1/2} = [\gamma_s \phi + 1]^{1/2} \quad (2)$$

式中:  $v_c$  ——泥石流流速 ( $\text{m/s}$ );  $\gamma_s$  ——泥石流中固体容重 ( $\text{t/m}^3$ );  $\gamma_c$  ——泥石流容重 ( $\text{t/m}^3$ );  $m_c$  ——泥石流外阻力系数,  $m_c = 75H^{-0.425}$ ;  $H$  ——泥石流泥深 ( $\text{m}$ );  $I$  ——泥石流泥面比降, 一般用沟床纵比降近似表达;  $\alpha$  ——泥石流内阻力系数;  $\phi$  ——泥石流修正系数。

红水沟泥石流的土粒容重  $\gamma_s$  取  $2.7 \text{ t/m}^3$ , 经计算得该泥石流流速为  $6.9 \text{ m/s}$ 。

根据对沟内泥石流痕迹的现场调查, 采用最大粒径方法 ( $v_c = 5 \sqrt{d_{\max}}$ ,  $d_{\max}$  为砾石的最大直径), 求得  $v_c$  为  $7.15 \text{ m/s}$ , 这与采用式 (2) 计算的结果几乎相吻合, 因此该泥石流的流速  $v_c = 6.9 \text{ m/s}$ 。

## 2.2 泥石流流量的计算方法

本文采用泥痕调查法和雨洪修正法两种方法计算红水沟泥石流的流量。

2.2.1 泥痕调查法 在泥石流沟现场调查中, 选择沟道中较为顺直的沟段, 依据泥石流在沟槽两岸遗留的最高痕迹, 测得泥石流过流横断面面积, 然后乘以泥石流流速得到泥石流流量, 其计算公式为

$$Q_c = W_c \cdot v_c \quad (3)$$

式中:  $W_c$  ——泥石流过流断面面积 ( $\text{m}^2$ );  $v_c$  ——泥石流计算流速 ( $\text{m/s}$ )。

现场选取典型沟谷断面进行测量, 断面面积为  $7.31 \text{ m}^2$ , 该泥石流沟泥石流计算流速为  $6.9 \text{ m/s}$ , 利用公式 (3) 计算出泥石流流量为  $50.439 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

### 2.2.2 雨洪修正法

(1) 设计洪水流量计算。本文根据《四川省中小流域暴雨洪水计算手册》<sup>[3]</sup>, 假定暴雨和洪水同频率出现, 采用其推荐的推理公式由暴雨计算洪峰流量。

$$Q_p = 0.278 \phi A S / t^n \quad (4)$$

式中:  $\phi$  ——洪峰径流系数, 等于形成洪峰的净雨量与降雨量之比值;  $S$  ——单位历时的暴雨平均强度, 或称暴雨雨力 ( $\text{mm/h}$ );  $A$  ——汇水面积 ( $\text{km}^2$ );  $t$  ——汇流时间 ( $\text{h}$ );  $n$  ——暴雨递减指数, 随地区及历时长短而不同。

计算参数由设计泥石流流量计算手册中相关图表查得, 流域特征值从 1: 50 000 数字高程模型获

取。红水沟泥石流 10 年一遇 ( $P = 10\%$ ) 的洪峰流量为  $16.55 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

### (2) 设计泥石流流量计算。

该泥石流流量采用如下公式计算<sup>[4]</sup>:

$$Q_c = (1 + \phi) Q_p D_c \quad (5)$$

式中:  $Q_c$  ——设计泥石流流量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ );  $Q_p$  ——设计洪水峰值流量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ );  $\phi$  ——泥石流修正系数,  $\phi = (\gamma_c - \gamma_w) / (\gamma_s - \gamma_c)$ ;  $D_c$  ——泥石流堵塞系数 (微弱堵塞时为  $1.1 \sim 1.4$ , 一般堵塞为  $1.5 \sim 1.9$ , 较严重堵塞为  $2.0 \sim 2.5$ , 严重堵塞时为  $2.6 \sim 3.0$ )。

由表 1 可知该泥石流 10 年一遇 ( $P = 10\%$ ) 的流量为  $48.36 \text{ m}^3/\text{s}$ , 这与采用泥痕调查法测得的泥石流流量相接近, 这也与现场访问获得的该次泥石流是近年来规模较大的一次相一致。

通过上面对泥石流运动和动力学特征的分析, 可以判断该泥石流流速较大, 规模中等。

表 1 红水沟泥石流流量计算参数及结果

参数	取值				
设计频率 $P/\%$	0.2	1	2	5	10
暴雨参数 $n$	0.76	0.85	0.84	0.83	0.82
雨力 $S/(\text{mm} \cdot \text{h}^{-1})$	44.17	36.55	33.15	28.73	25.16
洪峰径流系数 $\phi$	0.93	0.82	0.80	0.77	0.74
汇流时间 $t/\text{h}$	0.97	1.07	1.11	1.18	1.24
洪水最大流量 $Q_p/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	44.55	29.79	25.66	20.51	16.55
泥石流堵塞系数 $D_c$	1.40	1.35	1.30	1.25	1.20
泥石流修正系数 $\phi$	1.52	1.48	1.46	1.44	1.44
泥石流流量 $Q_c$	157.17	99.81	82.19	62.66	48.36

注: 流域特征系数  $\theta$  为 2.466 0; 汇流参数  $m$  为 0.382 0; 产流参数  $\mu$  为 2.793 0。

## 3 危险性评估

红水沟泥石流的危险性评估采用多因子综合判定模式计算, 该计算方法不断改进, 修订后的单沟泥石流危险度计算公式为<sup>[5]</sup>。

$$H = 0.2857M + 0.2857F + 0.1429S_1 + 0.0857S_2 + 0.0571S_3 + 0.1143S_6 + 0.0286S_9 \quad (6)$$

式中包括有泥石流发生规模 ( $M$ ) 和泥石流发生概率 ( $F$ ) 两个主导因子以及流域面积 ( $S_1$ )、主沟长度 ( $S_2$ )、流域相对高差 ( $S_3$ )、流域切割密度 ( $S_6$ ) 和活动沟床比例 ( $S_9$ ) 5 个易于获取的辅助性次要因子。各因子均根据其不同的绝对数值转换成相应的替代数值。式 (6) 中危险度 ( $H$ ) 和各危险因子  $M, F, S_1, S_2, S_3, S_6, S_9$  的替代数值均介于  $0 \sim 1$ , 其转换函数见表 2, 其取值见表 3。

表 2 单沟泥石流流危险度评价因子的转换函数

评价因子及 转换值(0~1)	转换函数( $M, F, s_1, s_2, s_3, s_6, s_9$ 为相应评价因子实际值)
泥石流 规模 $M/10^3 \text{ m}^3$	$M=0$ , 当 $m \leq 1$ 时 $M = \lg m / 3$ , 当 $1 < m \leq 1\,000$ 时 $M=1$ , 当 $m > 1\,000$ 时
泥石流发生 频率 $F/\%$	$F=0$ , 当 $f \leq 1$ 时 $F = \lg f / 2$ , 当 $1 < f \leq 100$ 时 $F=1$ , 当 $f > 100$ 时
流域面积 $S_1/\text{km}^2$	$S_1 = 0.245\,8s_1^{0.3495}$ , 当 $0 \leq s_1 \leq 50$ 时 $S_1 = 1$ , 当 $s_1 > 50$ 时
主沟长度 $S_2/\text{km}$	$S_2 = 0.290\,3s_2^{0.5372}$ , 当 $0 \leq s_2 \leq 10$ 时 $S_2 = 1$ , 当 $s_2 > 10$ 时
流域相对 高差 $S_3/\text{km}$	$S_3 = 2s_3/3$ , 当 $0 \leq s_3 \leq 1.5$ 时 $S_3 = 1$ , 当 $s_3 > 1.5$ 时
流域切割 密度 $S_6/\text{km}$	$S_6 = 0.05\,s_6$ , 当 $0 \leq s_6 \leq 20$ 时 $S_6 = 1$ , 当 $s_6 > 20$ 时
不稳定沟床 比例 $S_9/\text{km}$	$S_9 = s_9/60$ , 当 $0 \leq s_9 \leq 60$ 时 $S_9 = 1$ , 当 $s_9 > 60$ 时

表 3 单沟泥石流流危险度评价因子实际值及其转换值

项目	泥石流规模 $M/10^3 \text{ m}^3$	泥石流发生 频率 $F/\%$	流域面积 $S_1/$ $\text{km}^2$	主沟长度 $S_2/$ $\text{km}$	流域相对高 差 $S_3/\text{km}$	流域切割密度 $S_6/\text{km}$	不稳定沟床 比例 $S_9/\%$
实际值	90.00	80.00	3.80	2.61	0.86	2.06	58.60
转换值	0.651	0.952	0.393	0.486	0.572	0.103	0.977

## 4 结论

红水沟泥石流形成发育的主要因素是具有丰富的松散固体物质, 陡峻的沟谷和充沛的降雨, 以及人类不合理活动。沟区的地形坡度较大, 切割密度大, 相对高差达 1 790 m, 从而构成了该泥石流形成的动力条件; 该泥石流沟两侧出露大面积有利于泥石流松散固体物质形成的“软弱”地层, 以及广泛分布的岸坡变形体和滑坡体, 为泥石流的形成提供了丰富而集中的松散固体物质; 沟区泥石流形成的动力条件是降雨, 表现在降水丰沛、集中, 具备泥石流发生的水动力诱发条件。

由于区内人口增加, 导致耕地扩大、森林采伐、能源开辟等的速度大增, 从而改变自然生态系统的结构和功能, 使环境质量普遍下降, 由此泥石流灾害得以发育。

红水沟泥石流流速较快, 泥石流的规模中等。危险度为 0.628, 属于高度危险的泥石流沟, 对色尔古

将各评价因子转换值代入式(6), 得到红水沟的泥石流危险度为 0.628。按照泥石流危险度 5 级分级标准<sup>[6]</sup>, 红水沟属于高度危险的泥石流沟。红水沟历史上多次发生泥石流, 发生频率高, 每次发生的规模中等, 但损失惨重, 尤其对拟建的水电站影响较大。结合评价结果和红水沟的实际情况分析, 红水沟属于高度危险的泥石流沟。

泥石流的发展趋势与其发育地区的自然环境条件演变密切相关。红水沟泥石流的形成区汇水面积较大, 而且沟床比降大, 有利于泥石流的起动。红水沟的两侧植被不发育, 存在很多浅表层滑坡及坡面松散崩坡积物, 物源很丰富, 即使在降雨量不大的情况下也很容易发生泥石流。再有当地居民在坡面上开垦耕地, 两岸森林砍伐, 从而改变自然生态系统的结构和功能, 使环境普遍下降, 由此泥石流灾害得以进一步发展。

水电站正常运行有较大的影响, 需要重点监测和工程治理。

### [ 参 考 文 献 ]

[ 1 ] 毛鹤琴. 土木工程施工 [ M ]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2007.

[ 2 ] 康志成. 云南东川蒋家沟泥石流运动流态特征 [ J ]. 中国科学院兰州冰川冻土研究所集刊, 北京: 科学出版社, 1985(4): 97—107.

[ 3 ] 四川省水利厅. 四川省中小流域暴雨洪水计算手册 [ M ]. 成都: 四川省水利厅, 1984.

[ 4 ] 沈寿长, 谢修齐. 暴雨泥石流流量计算方法研究 [ J ]. 中国铁道科学, 1993, 14(2): 80—89.

[ 5 ] Liu Xilin. Assessment on the severity of debris flows in mountainous creeks of southwest China [ C ] // Proceedings of International Symposium of Interpraevent 1996 ( Garmisch Partenkirchen, Germany, June 24—28, 1996 ), 1996: 145—154.

[ 6 ] 刘希林, 唐川. 泥石流危险性评价 [ M ]. 北京: 科学出版社, 1995.