

# 黄河积石峡水电站库区泥石流特征研究

罗康军, 胡亚东

(成都理工大学环境与土木工程学院, 成都 610059)

**摘 要:** 根据工程地质分析的方法对黄河积石峡水电站库区泥石流的形成环境、基本特征、形成机制、发展趋势等进行了分析, 并对泥石流的危害做出了评价。对黄河上游工程建设中的泥石流分析有着积极的指导作用。

**关键词:** 积石峡水电站; 泥石流特征; 形成机制; 发展趋势; 危害评价

**中图分类号:** P642 23

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2004)02-0104-04

## Analysis of Debris Flows Characteristics of the Reservoir Area of Jishixia Power Station of the Yellow River

LUO Kang-jun, HU Ya-dong

(Institute of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

**Abstract:** The authors analyse the formation conditions, basic characteristics, the formation mechanism and evolution trend of debris flows in the Jishixia area by the engineering geology analysis. The authors also evaluate the danger of debris flows. This has an active guiding meaning in analyzing the debris flows in engineering constructions in the upper reaches of the Yellow River.

**Key words:** Jishixia power station; debris flows characteristics; formation mechanism; evolution trend; harmfulness appraisal

黄河积石峡水电站位于青海省循化县与民和县交界的积石峡谷出口段, 是黄河上游龙—青段规划的第五个大型梯级电站。电站设计正常蓄水位 1 856 m, 总库容 2 72 亿  $m^3$ , 装机 1 000 MW, 保证出力 332 MW, 年平均发电量 34 08 亿 kWh。库区长 37 km, 两岸为中山地貌, 相对切割深度约 300 m, 山坡陡峻, 沟床纵比降大, 能量集中程度高, 形成泥石流的位势条件十分优越。因此在水电站的建设中, 泥石流是与水库关系较密切的环境地质因素之一。

### 1 泥石流形成环境

#### 1.1 物源条件

本区主要出露前震旦系 (A<sub>n</sub>Z) 角闪片岩; 白垩系 (K) 河口群砂岩、砾岩; 第三系 (R) 上新统临夏组 (N<sub>2</sub>) 砂岩、砾岩和泥岩; 第四系 (Q) 冲积、湖积、洪积、坡积和风积等成因的砂岩、砂砾石层、含黏土质粉砂、粉质黏土及次生黏土层。这些地层岩性相对软弱, 易于破碎成为岸坡上的松散堆积物。在 NWW 向 (祁吕系) 和 NNW 向 (河西系) 构造, 尤其是河西系构造控制下, 如关门断裂、索通断裂、转堂断裂、古少浪子沟断裂、马儿坡断裂和循化断裂, 岩体结构破碎, 节理裂隙发育, 尤其在断层附近, 风化严重, 挤压破碎强烈, 破碎带宽度最大达百米以上, 常常是地质灾害相对集中的部位, 沟谷岸

坡变形破坏相对严重, 在坝区和库区, 沟谷岸坡堆积了大量坡洪积松散物质。沟岸小崩塌、局部存在的大型崩塌堆积体变形、松动、解体后也能成为泥石流的重要物源。小流域内广泛分布第三系泥岩及风成黄土, 由于风化作用强烈, 冲沟发育, 水土流失严重, 补给物质更是丰富。据《青海省水文手册》, 该地区的侵蚀模数为  $2 \times 10^6 \text{ kg}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ , 两岸的坡洪积物中小规模崩塌时有所见, 系洪流冲刷坡脚所致, 一般方量在数十立方米至百余立方米, 每次崩塌造成冲沟沟岸后退 20 cm 左右。由于该地区干旱季节固物质的重度按  $24 \text{ kN}/m^3$  计, 则侵蚀模数为  $833 \text{ m}^3/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。由于沟岸坡度较陡, 流水对岸坡的冲刷切蚀作用又导致坡积物垮塌, 松散固体构成了泥石流物源储备和补给的一般条件, 冲沟体物质流失极少。一些沟内的不合理防洪工程的修建, 淤积的大量泥石流物质; 当地群众修路时排入沟内的弃渣; 另外, 一些冲沟中及沟口的冲、洪积物被开采用作建材, 致使已处于半胶结状态的堆积物联结破坏, 为泥石流提供了部分物源。

#### 1.2 位势条件

黄河横穿当蕊五台山形成近 20 km 长的深大“V”型积石峡峡谷。坝区位于积石峡峡谷口, 库区河谷分峡谷和河谷平原两部分, 两岸沟谷发育, 多呈南北向展布。分水岭海拔高度在 4 100 m 左右, 相对切割深度约 2 100 m, 地形、地貌条

件比较复杂,为泥石流的孕育提供了条件。各沟平均纵坡多在 10% 以上,支沟的纵坡降更大,且流域面积大,流域相对高差多在 1 000 m 以上,具有很好的位势条件。区内植被极不发育,海拔 2 200 m 以下地区的植被覆盖率不足 10%,坡面洪流极易在较短时间内汇集到主沟,植物对泥石流的阻碍作用极弱。

1.3 气候及水力条件

本区气候属高原半干旱高寒型气候,常年干旱少雨,根据循化县气象站资料(表 1),库区多年平均降水量 266.1 mm,多年平均蒸发量 2 189.4 mm,多年平均气温 8.5℃,最高温度 34.1℃,最低温度-19.9℃(1 月),多年平均相对湿度 54%,多年平均日照时数 2 684 h。黄河干流在循化的多年平均流量为 717 m<sup>3</sup>/s,控制流域面积 145 459 km<sup>2</sup>,年水量为

226 1×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>,占全流域水量的 47%。本区日降雨量 25 mm 的天数 7 月份为 0.2 d,8 月份为 0.3 d(表 1)。由此可以算出 7 月份的平均雨强  $S=5.2$  mm/h;8 月份的平均雨强  $S=3.47$  mm/h;最大雨强为 15 mm/h(见图 1);20 年、50 年、100 年和 200 年一遇的 24 h 暴雨量均为 50 mm(见图 2),10 年一遇的 24 h 降雨量为 40 mm,多年平均 24 h 降雨量为 30 mm(据《青海省水文手册》)。库区洪水一般多发生在 7~9 月,10 月至翌年 4 月为枯水期。地形陡峻,降雨量少,对地下水形成不利。所以,小流域沟谷内基本无地下水,降雨是该区形成泥石流的主要水源。本地降雨量较小,山洪一般出现在暴雨以后,但持续时间不长,大多数为 0.5~1 h,并具有暴涨暴落的特点。

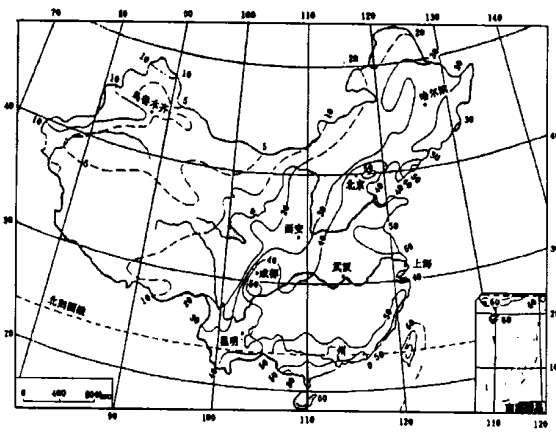


图 1 全国最大 1 h 点雨强(mm)等值线图

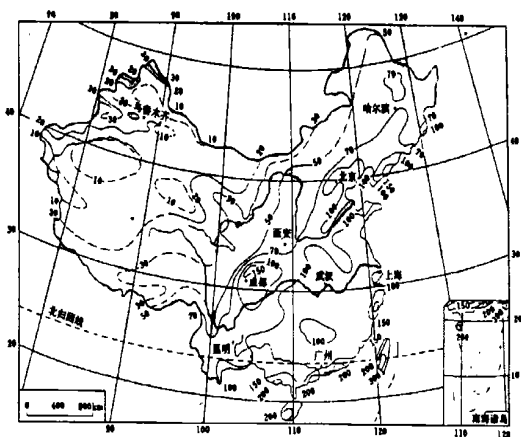


图 2 全国最大 24 h 点雨强(mm)等值线图

2 泥石流沟的基本特征

2.1 泥石流沟的类型和分布

按流域形态,本区泥石流沟中典型泥石流、坡面泥石流和河谷泥石流 3 种类型均有发育。根据目前沟内泥石流残留

物质特征及访问资料,按性质将该区内的泥石流分为稀性泥石流和稀性泥流两种类型,其成因应属水力类泥石流。根据泥石流沟的环境因素,可将本区泥石流沟谷分为稀性泥石流沟、泥流沟、山前洪积扇泥石流沟及“U”型宽谷泥石流沟。各沟位置见图 3。

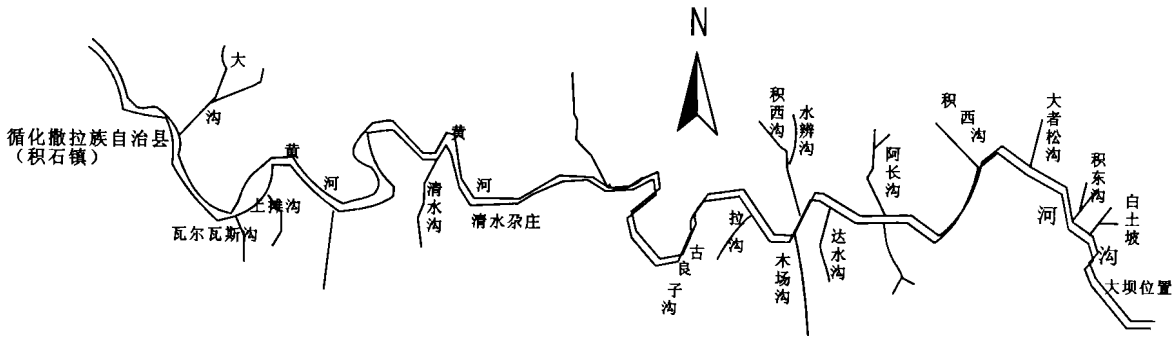


图 3 库区主要泥石流沟位置图

根据水力类泥石流受暴雨激发的这一特点,我们取上述暴雨资料中雨强的最大值即 15 mm/h 计算各沟的最大径流量(表 2)。从表中可以看出最大径流量小于 40 m<sup>3</sup>/s 时有 9 条沟,占稀性泥石流沟的 75%。阿依脑沟和大沟的流域面积较小,其最大径流量是小于 40 m<sup>3</sup>/s 的,但由于其它因素活

跃,据调查仍有泥石流活动;计算径流量大于 40 m<sup>3</sup>/s 的沟有 3 条(涝沟、阿玛叉沟、水磨沟),水磨沟汇流面积大,计算径流量也大,但固体颗粒物质补给少,不易形成泥石流。故对于稀性泥石流,用始发径流量作为泥石流的激发条件更为合适。

表 1 循化站气象资料统计表

项 目	年份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	全年
多年平均气温/	1959~ 1990	-5.2	-1.6	4.7	10.7	14.6	17.4	19.7	19.6	14.9	9.4	2.0	-3.8	8.5
多年各月绝对最高气温/	1958~ 1990	12.7	18.4	26.0	30.0	30.9	34.1	33.7	33.8	31.9	26.6	19.8	13.8	34.1
多年各月绝对最低气温/	1958~ 1990	-19.9	-18.8	-12.4	-9.4	-1.5	3.0	7.0	6.9	0.6	-8.3	-15.0	-18.1	-19.9
多年各月平均相对湿度/%	1959~ 1990	45	43	44	46	55	61	65	62	64	60	52	52	54
多年各月平均降水量/mm	1959~ 1990	0.3	0.6	2.2	11.1	32.5	37.5	65.2	63.4	36.8	14.9	1.3	0.2	266.1
多年各月日照时数/h	1959~ 1990	212.1	201.3	221.9	234.9	246.8	237.5	243.1	247.2	194.5	211.1	213.9	219.5	2683.6
多年各月平均蒸发量/mm	1959~ 1990	62.7	101.6	210.9	284.1	270.0	232.3	248.8	269.9	197.7	156.8	99.6	55.2	2189.4
日降水量 ≥ 0.5 mm 天数/d	1959~ 1990	0	0	0	0	0	0	0.2	0.3	0	0	0	0	0.5

2.2 典型泥石流沟的特征

库区沿岸共发育比较完整的沟谷 16 条,除木场沟、阿玛叉沟、水磨沟和清水沟为常年有水支流外其余均为季节性沟谷,其中木场沟的水流主要由孟达天池补给。平时有水沟谷的水流清澈透明,洪水季节水流浑浊,并携带有一定数量的固体物质。现以大沟、大沙沟为例,其特征描述如下:

(1)大沟。位于黄河左岸,距坝址 30 km。主沟呈 NE 向延伸,长约 4 km,沟床纵坡 11.7%,汇水面积 7.3 km<sup>2</sup>。该沟为老的坡面泥石流沟,目前冲沟主要发育在古老洪积扇上。

老洪积扇前缘厚度近 15 m,主要是由砂砾石、粉细砂组成的韵律层。近顶部发育次生黄土,单层最大厚度 0.6 m。扇面上切沟发育,主沟道切扇东侧,形成现代泥石流沟的流通区。据实地观测,该沟的物源少量来源于山坡集水区物理风化的岩石碎屑,大部分物源则来源于老洪积扇。由于冲沟切割,沟岸坍塌以及人工大量开采沙石料,沟底和沟岸人为破坏严重。因此,大沟的物源供给量较大,泥石流再次堆积成宽 500 m,长 300 m 的新洪积扇,致使黄河水流受到推挤向南偏移,这是积石峡库区少有的沟口具有大量堆积物的泥石流

沟。

(2)大沙沟。位于库区中上段,距坝址 26 km。主沟呈 NW 向展布,长约 10 km,纵坡 13.1%,支沟树枝状发育,沟域汇水面积 26.38 km<sup>2</sup>,沟岸坡度 30~ 50°。该沟的源头发育在新第三纪地层(N<sub>2k</sub>)内,为一套鲜红色泥岩、粉砂岩、砾岩组成;流通区经过河口组(W<sub>K<sub>1hk</sub></sub>),岩性以泥岩、粉砂岩为主;沟口段为黄河形成的阶地并有少量次生黄土分布。岩石风化强烈,水土流失严重,其中尤以临夏组最为典型,沟底除 1~ 3 cm 的泥浆干裂泥皮外基本无堆积物,沟岸坡脚有洪积物和坡积物断续分布,储量约 55 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>,局部有小规模垮塌。该沟的物源主要来自于新第三纪临夏组(N<sub>2k</sub>)的物理风化产物,雨季坡流冲刷坡面形成泥浆,顺沟道排入黄河,沿途并有少量坡、洪积物加入其中。由浆体恢复方法测定泥浆重度为 16 kN/m<sup>3</sup>,可见该沟泥石流已经达到过渡性泥石流的范畴。由于沟口处于黄河河曲的凹岸,流体性质为泥流,故该沟泥流汇入黄河后被河水迅速稀释,沟口虽有泥痕,但无堆积物存在。

表 2 泥石流危害程度评价表

沟 名	类 型	径流量 /m <sup>3</sup>	流域面积 /km <sup>2</sup>	激发径流 量/m <sup>3</sup>	多年一遇一次性泥石流堆积量/m <sup>3</sup>			易发程度	危害程度评价	损失情况
					50 年	10 年	几年			
白土坡沟	稀性 泥 石 流	2.06	0.62	40	当雨强为 0.5 mm/min 时可能会造成数百 千立方米的小规模堆 积			轻度易发	一般不会造 成重大灾害 和严重危害	无
积东沟		6.40	1.92							
大青松沟		15.43	4.63							
积西沟		25.4	7.62							
木场沟		40.0	12							
韩坪沟		32.34	9.7							
拉 沟		31.67	9.5							
瓦尔瓦斯沟	稀性	15.41	12.25	30	19	0.02				
上滩沟	泥流	3.77	3.0							
水磨沟		12.60	37.8							
阿依脑沟	稀性 泥 石 流	16.24	4.87	40	2.98	1.35	中等易发	无严重危害	公路、桥梁	淤库
大沟		24.34	7.3							
水涝沟		54.17	16.25							
阿玛叉沟		526.77	> 158							
清水沟		284.31	> 226							
大沙沟	泥流	33.18	26.38	30	90.0	56	中等易发	情况严重时淹 没公路、桥梁		学校、水文站淹没 面积 2500 m <sup>2</sup> 民房 12 间

\* 径流量泥石流沟以 15 mm/h 的雨量计;泥流沟以 5.66 mm/h 的雨量计。

3 泥石流激发条件分析

由于缺少降水资料,仅据清水沟水文站记录的 2001 年 7 月 17 日的一次洪水过程曲线(图 4)作分析。从图中可以看出,曲线呈现单峰尖瘦型,洪水历时 1 h 45 min,最大流量 412

m<sup>3</sup>/s,实测含砂量 578 kg/m<sup>3</sup>,换算成重度应为 1 240 kg/m<sup>3</sup>,已达稀性泥石流标准。而大沙沟的泥石流恢复试验,其重度已达 1.67 g/cm<sup>3</sup>,采用泥石流流量公式反求雨强值。泥石流流量计算公式为:

$$Q_c = (1 + \Phi_c) \cdot Q_p \cdot D_c \tag{1}$$

$$\Phi = (\gamma_c - \gamma_s) / (\gamma_H - \gamma_c) \quad (2)$$

式中:  $Q_P$ —频率为  $P$  的暴雨洪水设计流量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ );  $Q_c$ —频率为  $P$  的泥石流洪峰流量值 ( $\text{m}^3/\text{s}$ );  $\Phi$ —泥石流泥沙修正系数; ( $\gamma_c$ 、 $\gamma_s$ 、 $\gamma_H$ —分别为泥石流重度、清水比重、泥石流中固体物质比重 ( $10^3 \text{ kg}/\text{m}^3$ );  $D_c$ —泥石流堵塞系数。若取  $\gamma_c = 1.24 \times 10^3 \text{ kg}/\text{m}^3$ ;  $\gamma_s = 1 \times 10^3 \text{ kg}/\text{m}^3$ ;  $\gamma_H = 2.4 \times 10^3 \text{ kg}/\text{m}^3$ ;  $D_c = 1.2$ , 代入计算得清水流量  $Q_P = 284.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

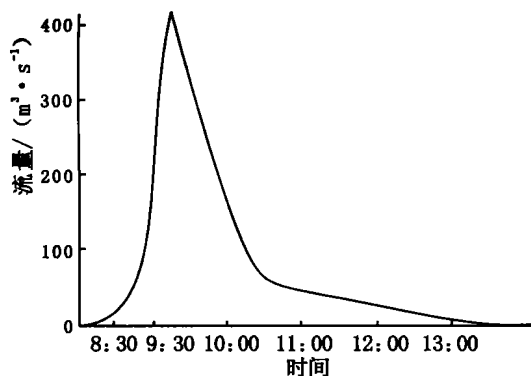


图4 清水沟洪水流量过程曲线

再根据小流域暴雨洪水设计推理公式:

$$Q_P = 16.67 \cdot \Psi \cdot S_P \cdot F \quad (3)$$

式中:  $S_P$ ——频率为  $P$  的雨强 ( $\text{mm}/\text{min}$ );  $\Psi$ ——径流系数, 本区取 0.8;  $F$ ——流域汇水面积 ( $\text{km}^2$ )。

经计算该次泥石流的激发暴雨量值  $S_P = 0.094 \text{ mm}/\text{min} = 5.663 \text{ mm}/\text{h}$ 。也就是说, 对于本区泥石流沟,  $5.663 \text{ mm}/\text{h}$  的雨强即可造成泥石流, 相应的始发径流量约为  $30 \text{ m}^3/\text{s}$  (以大沙沟的流域面积推算, 2001 年 7 月 17 日的暴雨同样引发了该沟的泥石流)。除清水沟外, 积石峡库区属于此类泥石流沟的还有大沙沟、上滩沟、瓦尔瓦斯沟。后两条沟由于汇水面积小, 始发径流量在这一雨强下还达不到激发程度。对于小流域沟谷, 由于集水面积小, 山洪将沟谷内的松散细小颗粒以悬移质的形式带走, 而粗大颗粒则以推移质的形式向沟口缓慢运动。待山洪退却, 粗颗粒物质就地堆积, 等待下一次洪水继续搬运。在部分沟谷中, 洪水还冲刷沟岸, 造成沟岸松散堆积体坍塌, 为泥石流提供新物源。显然, 降雨能否激发泥石流, 不仅仅取决于降雨量, 更重要的是雨强。在其它因素相同时, 泥石流爆发的条件还与流域的汇水面积有关。

#### 4 泥石流发展趋势及危害评价

从地质发展史上讲, 青藏高原属隆升地带, 区内风化作用强烈, 对形成泥石流的位势条件及松散堆积物积累是有利的; 从气象上讲, 随着全球气候变暖, 干旱地区降水量有进一步减少的趋势, 不利于泥石流形成的水源条件, 并且随着水库蓄水, 将逐渐改变库区周围的小气候条件, 降低灾害性气候的发生频率; 从人为因素讲, 过度放牧及不合理的开采沙石料, 又

将加剧水土流失程度。采用泥石流沟严重程度数量化评分的办法, 根据区域内反映泥石流活动条件的诸因素和积石峡研究区的具体条件和泥石流发育特征, 将库区的泥石流易发程度分为五级: 极易发、中等易发、轻度易发、极轻度易发和不易发。评判结果见表 2。在库区 16 条沟谷中, 属极轻度易发的沟谷有大清松沟 (左岸) 和水磨沟 (右岸) 两条, 需在数百年一遇的特大暴雨情况下, 才有可能突发泥石流。但由于沟谷中泥石流的物源供给少, 即使发生泥石流, 规模也很小, 不会造成重大灾难和严重危害; 属轻度易发的泥石流沟谷有 11 条, 包括左岸的白土坡沟、积东沟、积西沟、水涝沟、阿玛叉沟; 右岸的木场沟、韩坪沟、拉沟、清水沟、上滩沟和瓦尔瓦斯沟。这些沟在评判中个别因子的数值较大 (如汇水面积), 地质、地貌等条件的组合尚可, 只要水源条件适合, 能够发生低频小规模泥石流。但水涝沟、阿玛叉沟、清水沟的汇水面积较大, 沟内径流量也大, 定为轻度—中等易发更合理些; 属中等易发的泥石流沟谷有 3 条, 分别为左岸的阿依脑沟、大沟和右岸的大沙沟, 除沟口泥石流堆积活动程度和沟谷堵塞程度不高外, 其余因素均利于泥石流形成与活动, 各种条件的组合亦佳, 如果水源条件合适, 有暴发中等规模、中等频率泥石流的可能, 并造成一定程度的灾难和危害。综观全局, 泥石流沟在水库的设计使用年限内将处于目前的动态平衡中, 不会发生大规模的泥石流, 即使在极端情况下, 一次泥石流的固体物质总量约为  $185 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 各沟所造成的泥石流堆积总量也只有  $80 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 属中型规模泥石流, 可能造成毁坏公路、桥梁及部分房屋建筑灾害性后果, 估计总的经济损失达 80 万元。

#### 5 结论与建议

(1) 泥石流形成的基本条件是有利的地形, 丰富的松散固体物质和充足的水源。地质现象各要素及其组合在泥石流形成过程中起着提供位势能量、固体物质和发生场所三大主要作用。水不仅是泥石流物质的重要组成部分, 而且是泥石流能够发生的激发因素。

(2) 泥石流的危害程度与暴雨频率及雨强密切相关。

(3) 库区的泥石流总体规模不大, 大部分泥石流沟为轻度易发泥石流, 多年一遇暴雨条件下单个泥石流的固体物质堆积量在万方以下。清水沟、大沙沟的泥流, 悬移质为主, 中度易发。水库运行期间除减少库容外, 沟口淤积区升高对其附近设施及居民有一定影响。

(4) 积石峡库区和坝区总体上泥石流灾害的危害程度不高, 主要的潜在灾害点集中在清水沟和大沙沟, 可视具体情况分别处理。建议在清水沟、大沙沟沟口, 修筑排导沟, 加大桥洞的过水断面, 增加排洪能力。

(5) 对库区水土流失和泥石流的最终根本的治理措施还在于恢复库区植被, 实施牛羊圈养。

#### 参考文献:

- [1] 中科院水利部成都山地灾害与环境研究所. 第二届全国泥石流学术会议论文集[M]. 北京: 科学出版社, 1991.
- [2] 中科院兰州冰川冻土研究所. 泥石流学术讨论会兰州会议论文集[C]. 成都: 四川科技出版社, 1986.
- [3] 刘汉超, 陈明东, 等. 库区环境地质评价研究[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1993.
- [4] 刘传正. 地质灾害指南[M]. 北京: 地质出版社, 2000.
- [5] 王小群, 叶尚其, 王兰生. 大渡河官料河昔木岷沟泥石流特征研究[J]. 地质灾害与环境保护, 2002, 13(2): 26-29, 58.