

泥石流对重大水电工程的影响评估 ——以金沙江下游白鹤滩电站库区黑水河泥石流为例

柳金峰^{1,2}, 游勇^{1,2}, 陈晓清^{1,2}

(1. 中国科学院 山地灾害与地表过程重点实验室, 四川 成都 610041;

2. 中国科学院 水利部 成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041)

摘要: 泥石流是金沙江下游主要山地灾害之一,它对重大水电工程施工和运行期间的工程安全可能构成一定程度的威胁和危害。通过评估该区泥石流对重大水电工程的影响,指出泥石流对水电工程的影响主要表现在对施工道路、水电工程附属设施及移民安置、库区泥沙、坝区工程设施等 4 个方面。以金沙江下游白鹤滩电站库区黑水河泥石流为例,具体分析了泥石流对水电工程的影响。结果表明,黑水河泥石流可能堵塞主河,其堵塞回水和溃决洪水对白鹤滩电站建设的施工道路、临时设施有一定危害。此外,泥石流会将大量的泥沙带入库区,从而减少电站的有效库容。

关键词: 金沙江下游; 泥石流; 白鹤滩电站; 黑水河

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2012)03-0285-05

中图分类号: P642.23

Evaluation of the Influences of Debris Flow on Large Hydropower Projects — A Case Study on Heishui Debris flow in the Reservoir Area of Baihetan Hydropower Station

LIU Jin-feng^{1,2}, YOU Yong^{1,2}, CHEN Xiao-qing^{1,2}

(1. Key Laboratory of Mountain Surface Process and Hazards, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China)

Abstract: The lower reaches of Jinsha River are the area that has the most serious problem of mountain hazards. Debris flow is one of the main mountain hazards in the area and it may cause damages to the construction and running safety of large hydropower projects. The evaluation method for the influences of debris flow on large hydropower projects was established firstly and then four ways (construction road, ancillary facility and resettlement, sand in reservoir area and engineering facilities in the dam area) of the influences were elaborated. Heishui gully, lying in the reservoir area of Baihetan hydropower station, was taken as a typical area to evaluate the influences of debris flow on the hydropower project. Results indicate that debris flow of Heishui gully may block the main river and thus its blocked backwater and outburst flood can cause damages to construction roads and some temporary facilities. In addition, a large quantity of debris flow materials can flow into the reservoir and the storage capacity of Baihetan hydropower station decreases consequently.

Keywords: lower reaches of Jinsha River; debris flow; Baihetan hydropower station; Heishui River

中国西南地区水电资源蕴藏量占全国总量的 70% 以上,是中国规划水电基地的重心,其中金沙江下游的溪洛渡、向家坝、白鹤滩、乌东德 4 个电站的装机容量分别为 1.26×10^7 , 6.00×10^6 , 1.20×10^7 和 7.40×10^6 kW,相当于 2 个三峡电站^[1]。

金沙江下游是整个长江流域水土流失最为严重,生态系统脆弱,山地灾害发育的区域^[2-3]。泥石流是金沙江下游主要山地灾害之一,对重大水电工程施工

和运行期间的工程安全可能构成一定程度的威胁和危害。如何定量、科学地评估泥石流对水电工程的影响,是重大水电工程开发不可回避的关键科学技术问题之一。

以前,这类问题多采用定性描述,远远不能满足工程规划设计的要求。科学评估泥石流对重大水电工程的影响问题,其关键在于泥石流的发生规模、泥石流沟与工程设施的空间组合关系。

收稿日期:2011-06-23

修回日期:2011-09-17

资助项目:国家科技支撑计划课题“堰塞湖风险评估与应急管理研究”(2009BAK56B05);国家重点基础研究发展计划专题“特大山泥石流防治工程设计原理与关键技术”(2011CB409903)

作者简介:柳金峰(1979—),男(汉族),安徽省泾县人,博士,助理研究员,主要从事山地灾害实验与防治工程研究。E-mail:liujf@imde.ac.cn。

1 金沙江下游重大水电工程区山地灾害的定性

金沙江下游地区为我国一、二级地貌阶梯的过渡地带,特殊的地理位置使得这一区域内地质构造复杂、地壳升降强烈、地震活动频繁、地势陡峻、山高谷深、岩体破碎、土层浅薄、生态环境脆弱;气候上同时受到东南季风和西南季风的影响,大部分地区多年平均降雨量在 1 000 mm 左右,年内降雨变差大,多局地暴雨,泥石流滑坡灾害广泛发育^[4]。

通过野外考察和遥感解译,金沙江下游重大水电工程区共有泥石流沟 522 条^[4]。乌东德库区沿河两岸共有泥石流 160 条,乌东德库区回水长度为 106 km,泥石流线密度为 1.51 条/km;白鹤滩库区沿河两岸共有泥石流 136 条,白鹤滩库区回水长度为 183 km,泥石流线密度为 0.74 条/km;溪洛渡库区沿河两岸共有泥石流 138 条,溪洛渡库区回水长度为 204 km,泥石流线密度为 0.65 条/km;向家坝库区沿河两岸共有泥石流 88 条,向家坝库区回水长度为 156.6 km,泥石流线密度为 0.56 条/km。金沙江下游重大水电工程区泥石流线密度如表 1 所示。

表 1 金沙江下游泥石流线密度统计

水电工程区	泥石流/条	库区回水长度/km	线密度/(条·km ⁻¹)
乌东德库区	160	106.0	1.51
白鹤滩库区	136	183.0	0.74
溪洛渡库区	138	204.0	0.65
向家坝库区	88	156.6	0.56

川藏公路南线是我国泥石流非常严重的区域,其西藏境内 1 286 km,有大中型泥石流沟 341 条^[5-6],线密度为 0.27 条/km。成昆铁路亦是我国泥石流非常严重的区域,长 1 083 km,有泥石流沟 509 条,北段 570 km,泥石流沟有 300 多条,线密度为 0.53 条/km^[7]。通过将金沙江下游与泥石流发育非常严重的川藏公路和成昆铁路泥石流线密度的比较分析,可以认定金沙江下游重大水电工程区属泥石流灾害危害严重区域。

2 泥石流对重大水电工程的影响评估

(1) 通过分析野外考察、访问、泥痕调查、泥石流堆积物取样分析、遥感图片等资料,确定了金沙江下游重大水电工程区的泥石流总数为 522 条,并估算了典型泥石流沟的容重值。

(2) 结合历史资料调查考证、访问当地知情人士

等方法,对金沙江下游重大水电工程区的典型泥石流沟的发生频率进行了探讨,判定了典型泥石流沟是属于高频泥石流沟(每年发生泥石流的沟道)还是低频泥石流沟(数年或数 10 a 发生一次泥石流的沟道)。

(3) 利用相关气象、水文、泥石流的性质及小流域的下垫面资料,分析计算了典型泥石流沟 500, 200, 100 年一遇条件下可能发生的泥石流的峰值流量和一次泥石流的总流出量。

(4) 进行泥石流堵河分析,计算堵河高度和回水范围。

(5) 根据泥石流沟和泥石流堵河回水区与重大水电工程的位置关系等,评估泥石流对金沙江下游重大水电工程施工和运行期间的安全可能造成的影响与危害。

2.1 泥石流沟清水洪峰流量计算

对于金沙江下游重大水电工程区,参照国内外的通行方法,泥石流小流域的清水洪峰流量可用式(1)进行计算^[8]:

$$Q_B = f \times R \times F / 3.6 \quad (1)$$

式中: Q_B ——清水洪峰流量(m^3/s); f ——流出系数(根据小流域下垫面条件取值 0~1); R ——年最大 1 小时暴雨量(mm); F ——小流域汇水面积(km^2)。其中年最大 1 小时暴雨量根据《四川省中小流域暴雨洪水计算手册》查图表分析求得。

2.2 泥石流峰值流量计算

泥石流峰值流量按配方法进行计算^[9]:

$$Q_C = (1 + \varphi_C) Q_B D_U \quad (2)$$

式中: Q_C ——泥石流峰值流量(m^3/s); Q_B ——清水洪峰流量(m^3/s); φ_C ——泥石流峰值流量增加系数,

$\varphi_C = \frac{\gamma_C - \gamma_w}{\gamma_s - \gamma_C}$; γ_C ——泥石流容重(t/m^3); γ_w ——清水容重(t/m^3); γ_s ——固体物质实体容重(t/m^3), $\gamma_s = 2.7(t/m^3)$; D_U ——堵塞系数。

黏性泥石流容重按 2.1, 2.2 t/m^3 , 稀性泥石流按 1.8 t/m^3 取值。堵塞系数是反映泥石流沟道条件是否造成泥石流堵塞及其程度的参数,可根据文献查表求得^[10]。

2.3 一次泥石流流出总量计算

泥石流峰值流量与一次泥石流流出总量之间存在良好的对应关系。根据野外调查、泥石流堆积物样品分析等,确定了泥石流的基本流体性质,各泥石流沟一次泥石流流出总量采用以下公式进行计算^[11]:

$$Q_C = 0.0188 Q_T^{0.790} \quad (3)$$

式中: Q_C ——泥石流峰值流量(m^3/s); Q_T ——一次泥石流流出总量(m^3)。

2.4 泥石流堵河分析预测

首先利用金沙江下游重大水电工程区及邻近地区水文站(龙街、巧家、屏山)的水文资料,分析各泥石流沟汇入主河处主河汛期各月的最大流量和最小流量,然后与泥石流的峰值流量进行比较,用主支流量比(支沟泥石流流量与主河流量之比)来判断在流域性降雨和局地暴雨两种情况下泥石流是否堵河,参照既往泥石流堵河资料,并结合地形条件分析判定可能发生堵河的泥石流沟。在此基础上设定泥石流堵河形成的天然坝的形状为三角形,根据一次泥石流流出总量中参与堵河的物质质量来计算堵河的高度^[10]。

堵河高度计算式^[12]:

$$Q_T = \left(\frac{1}{2\text{tg}14^\circ} + \frac{1}{2\text{tg}\varphi_s} \right) BH^2 \quad (4)$$

式中: Q_T ——一次泥石流流出总量(m^3); φ_s ——泥石流体内摩擦角($^\circ$); B ——主河宽度(m); H ——堵河高度(m)。

2.5 泥石流堵河对重大水电工程的影响评估

根据泥石流堵河高度、地形条件等,分析计算泥石流堵河形成天然坝后和该天然坝溃决之前,天然坝上游的回水范围,并且在数字地形图上将泥石流沟、堵河形成的天然坝、回水范围进行点绘,便可清楚地了解泥石流与重大水电工程的空间组合关系、泥石流堵河形成天然坝后的回水对金沙江下游重大水电工程区施工和运行期间的安全可能造成的影响与危害。

3 金沙江下游泥石流对水电工程的影响评估

3.1 泥石流对水电工程的影响

泥石流对水电工程区的影响主要表现在如下4个方面。

(1) 泥石流对施工道路的影响。金沙江下游重大水电工程区的进场及场区道路基本都沿河谷展布,一旦遭遇泥石流灾害,泥石流将冲毁、淤埋沟口堵断进场施工道路,严重威胁工程顺利进行。另外一方面,如果泥石流一旦堵塞金沙江形成堰塞湖,公路走线标高低的路段将受堵塞回水、溃决洪水的严重威胁。

(2) 对水电工程附属设施及移民安置的影响。金沙江下游地形崎岖,由于受到地形条件的限制,建筑受江河挟持,建设用地十分紧缺,水电工程附属设施(供电设施、供水设施、施工房屋、通讯设施等)及移民安置部分布置在高山峡谷中,一旦发生泥石流灾害,将受到严重的影响。

(3) 对库区泥沙的影响。泥石流输送大量泥沙进入河道或水库库区,导致河道淤积与洪水危害,同

时淤积水库,影响了水电工程的使用寿命和功能的正常发挥。

(4) 对坝区工程设施的影响。大坝建成正常运行后,由于坝体体积巨大,泥石流灾害一般不会对坝体本身有多大危害,但如果泥石流直击大坝,则有可能导致坝体局部损伤,对大坝安全带来不利影响。

泥石流对大坝及其他工程设施的影响主要表现在施工期间。泥石流对大坝及其他工程设施的影响主要从下面3个方面考虑:一是大坝及其他工程设施是否在泥石流的直接冲击、冲刷、淤埋危险范围内,如果在泥石流危险范围内,则一旦发生泥石流,会对施工期大坝及其他工程设施的安全造成严重危害;二是坝址上游是否有泥石流沟可能堵塞主河,如果有堵塞主河的情况,则堵塞坝一旦溃决,溃决洪水会对大坝及其他工程设施施工期的安全造成危害;三是坝址下游是否有泥石流堵塞主河后的回水达到大坝及其他工程设施及以上范围,若有堵塞回水达到坝址,则下游泥石流堵塞主河的回水也会对大坝的施工造成危害。

3.2 白鹤滩库区黑水河泥石流对水电工程的影响评估

3.2.1 概况 根据野外考察的结果,综合分析泥石流对水电工程的主要影响表现,选取白鹤滩水电工程区的黑水河泥石流沟,具体分析评估泥石流对水电工程的影响。

白鹤滩电站位于四川省宁南县和云南省巧家县交界的金沙江峡谷内,距巧家县城45 km,是金沙江下游梯级中的第二级。电站上接乌东德梯级,下邻溪洛渡梯级,距离溪洛渡水电站195 km,控制流域面积 $4.30 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。坝址多年平均流量 $4\ 110 \text{ m}^3/\text{s}$,多年平均年径流量 $1.30 \times 10^{11} \text{ m}^3$ 。白鹤滩水电站以发电为主,兼顾防洪,并有拦沙、改善通航条件等综合效益。电站总装机 $1.20 \times 10^7 \text{ kW}$,年发电量 $5.46 \times 10^{10} \text{ kW} \cdot \text{h}$,是西电东送骨干电源点之一。

黑水河位于四川省会东县鲁吉乡热水村,系金沙江左岸一级支流,距白鹤滩坝址上游约60 km处。该沟流域面积 30.2 km^2 ,主沟长度11.62 km,流域内最高点海拔为2 973 m,沟口海拔675 m,相对高差2 298 m,沟床平均比降129‰。该泥石流沟是白鹤滩库区内一条典型的灾害性泥石流沟,1987年6月初,该沟曾暴发一次大规模泥石流,泥石流冲毁沟口2间房屋,淤埋沟口段公路约1 km,并将金沙江逼向右岸。

3.2.2 黑水河泥石流的性质和类型 为确定黑水河泥石流的性质,在沟口采集了泥石流小样(最大颗粒粒径10 cm),样品分析结果见图1。由颗粒分析结果可见,黑水河泥石流堆积物中黏粒($<0.005 \text{ mm}$)含

量为 1.705%，说明流域内有黏粒含量高的土体补给泥石流。这样颗粒成分的松散碎屑物构成的泥石流流体，黏度是较高的。根据试验资料并结合现场调查分析，将黑水河泥石流流体定性为黏性，容重定为 $2.0 \sim 2.2 \text{ t/m}^3$ 。

此外，据现场调查，黑水河泥石流砾石含量较多，沟口可见最大颗粒粒径约为 5 m，堆积物中砾石含量 ($>2 \text{ mm}$) 占总量的 73%，表明泥石流固体物质的粒度特征是以粗大的砾石为主^[13]。

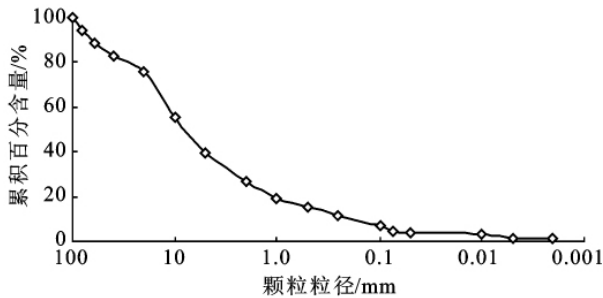


图 1 黑水河泥石流颗粒级配

3.2.3 黑水河泥石流的活动特征 据实地调查，该沟是一条老泥石流沟，同时又是一条现代泥石流活跃的沟，近百年内，该流域内曾暴发一场特大规模灾害性泥石流，并时常有中小规模山洪泥石流发生，沟口堆积扇上沟道内仍保有部分泥石流堆积物(图 2)，大规模泥石流活动周期平均约 80~100 a 一次，属低频率的泥石流，但中小规模泥石流暴发频率较高。



图 2 黑水河堆积扇沟道中的泥石流流体

该沟泥石流普遍暴发的时间是 5—10 月份，集中暴发的时间是 6—8 月份，主要集中在夏季，其活动具有明显的季节性特征。如 1987 年 6 月初，该沟暴发了一次大规模泥石流，泥石流漫过沟口桥梁，并将桥梁栏杆大部分冲断，冲毁沟口 2 间房屋，泥石流到达金沙江后部分堵塞主河并把主流逼向右岸，该次泥石流暴发后，该沟时常暴发小规模的山洪泥石流，目前该沟沟口堆积扇仍将金沙江逼向右岸(图 3)。



图 3 黑水河泥石流将金沙江逼向右岸

3.2.4 黑水河泥石流对溪洛渡电站的影响评估

(1) 黑水河泥石流规模预测。根据上述泥石流对水电工程的影响评估方法，计算黑水河 500, 200 及 100 年一遇频率下的清水流量、泥石流峰值流量、一次泥石流冲出总量等参数(表 2)。

表 2 黑水河泥石流规模计算结果

发生频率 $P/\%$	0.2	0.5	1
清水流量 $Q_B/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	421	378	347
泥石流峰值流量 $Q_C/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	2 573	2 316	2 125
一次泥石流冲出总量 $Q_T/10^4 \text{ m}^3$	183	165	151

在完成黑水河泥石流规模预测后，利用与黑水河最近的巧家(华弹)水文站的水文资料，分析黑水河泥石流汇入主河处主河汛期各月的最大流量和最小流量，然后与泥石流的峰值流量进行比较，用主支流量比(支沟泥石流流量与主河流量之比)来判断在流域性降雨和局地暴雨两种情况下泥石流是否堵河。由于金沙江下游泥石流暴发的时间在每年的 5—10 月，所以，对黑水河下游约 20 km 处的巧家(华弹)水文站 1961—1985 年 23 a 的水文资料中的各年 5—10 月的各月平均流量进行了统计(表 3)。

根据以上水文资料，金沙江在此段区域的流量平均值最小为 $1 872 \text{ m}^3/\text{s}$ ，最大为 $9 093 \text{ m}^3/\text{s}$ 。将此流量与黑水河泥石流 500, 200, 100 年一遇的峰值流量进行对比，以主支流量比(支沟泥石流流量与主河流量之比)大于 1 的情况下发生堵河为判断是否堵河的依据。通过比较后，黑水河在金沙江流域性降雨条件下是不会发生堵河的，而在局地暴雨下 3 种频率的泥石流都会发生堵河。在此基础上设定泥石流堵河形成的天然坝的形状为三角形，根据一次泥石流流出总量中参与堵河的物质质量来计算堵河的高度和回水的长度(表 4)。

(2) 黑水河泥石流对白鹤滩电站工程的影响评估。通过野外考察和计算分析，黑水河泥石流属于低

频泥石流沟,如果该沟暴发泥石流,在白鹤滩电站施工期间,泥石流将会直接冲毁、淤埋沟口长约 1.3 km 的进场公路,如果沟口将布置施工临时设施,泥石流将直接威胁到施工设施及人员的安全。

表 3 巧家(华弹)水文站 1961—1985 年 5—10 月平均流量统计 m^3/s

年份	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月
1961	2 040	3 940	8 470	8 480	6 390	4 620
1962	1 860	5 130	8 400	15 700	10 600	5 110
1963	1 380	3 510	8 850	9 710	8 090	6 450
1964	1 960	4 360	7 250	9 620	10 700	7 620
1965	1 590	6 210	12 300	12 400	12 100	7 670
1966	1 680	4 100	8 230	12 600	14 400	7 620
1967	1 890	3 200	5 500	6 640	6 170	5 170
1968	2 450	5 630	9 080	10 500	11 200	6 290
1969	997	2 180	6 760	6 700	9 160	4 320
1970	2 260	3 670	10 300	10 400	6 210	5 700
1971	1 870	4 650	6 960	8 620	6 710	5 160
1972	1 900	3 890	7 080	8 160	6 300	3 910
1974	2 060	6 170	11 800	12 100	13 000	5 780
1975	1 780	3 810	7 540	7 150	6 540	4 370
1977	1 830	3 840	5 540	8 150	7 070	5 470
1978	2 580	6 260	7 840	9 460	7 370	5 010
1979	1 650	2 340	4 950	7 620	9 150	7 070
1980	1 910	3 510	5 920	10 700	8 940	8 460
1981	2 260	6 060	10 100	6 840	8 390	4 070
1982	1 390	3 550	10 500	5 590	7 260	4 970
1983	2 230	3 190	5 580	6 990	6 830	4 030
1984	1 650	3 260	9 620	6 880	6 110	3 330
1985	1 840	5 510	11 400	8 120	9 810	6 220
平均	1 872	4 260	8 260	9 093	8 630	5 583

表 4 黑水河泥石流堵河高度及回水长度

发生频率 P/%	0.2	0.5	1
堵河高度/m	35	31	28
回水长度/km	32	28	26

如果黑水河沟暴发泥石流时(500,200,100 年一遇)遭遇主河洪水期较枯流量时,泥石流能较快运动,固体物质直接进入主河,可能堵塞主河,据初步估算 500,200,100 年一遇的泥石流堵塞高度分别约为 35,31,28 m,向上游回水长度分别约为 32,28,26 km,泥石流堵塞回水将会淹没该沟沟口以上走线较低的公路,泥石流堵塞坝一旦溃决,溃决洪水会严重冲刷该沟下游沿河公路路基,并淹没走线较低的路段。

白鹤滩电站建成以后,该沟沟口属于电站库区的回水淹没范围内,如果该沟暴发低频率的泥石流,通过计算,该沟暴发 500,200,100 年一遇的泥石流时,一次冲出的泥石流总量分别为 1.83×10^6 , 1.65×10^6 , $1.51 \times 10^6 m^3$,泥石流会将大量的泥砂带入库区,从而减少电站的有效库容。

4 结论

(1) 泥石流是金沙江下游主要山地灾害之一,其对重大水电工程施工和运行期间的工程安全可能构成一定程度的威胁和危害。如何定量、科学地评估泥石流对水电工程的影响,是重大水电工程开发不可回避的关键科学技术问题之一。

(2) 泥石流的发生规模(峰值流量、一次泥石流流出总量)、泥石流沟与工程设施的空间组合关系是科学评估泥石流对水电工程影响的关键因素。

(3) 泥石流对水电工程的影响主要表现在对施工道路、水电工程附属设施及移民安置、库区泥沙、坝区工程设施等 4 个方面。金沙江下游白鹤滩电站库区黑水河泥石流可能堵塞主河,其堵塞回水和溃决洪水对白鹤滩电站建设的施工道路、临时设施有一定危害,此外,泥石流会将大量的泥砂带入库区,从而减少电站的有效库容。

[参 考 文 献]

[1] 何耀华. 加快水电开发和生态建设,建立金沙江下游生态能源经济区[J]. 云南民族大学学报:哲学社会科学版,2005,22(2):17-21.

[2] 王治华. 金沙江下游的滑坡和泥石流[J]. 地理学报,1999,54(2):142-149.

[3] 陈循谦. 云南金沙江下游的泥石流及其防治[J]. 水土保持学报,1988,2(3):23-28.

[4] 刘洪江. 金沙江下游干流区泥石流滑坡时空变化及其对水电工程的影响[D]. 北京:中国科学院研究生院,2008.

[5] 罗德富,冯清华,朱平一,等. 川藏公路南线(西藏境内)山地灾害及防治对策[M]. 北京:科学出版社,1995:120-135.

[6] 朱平一,何子文,汪阳春,等. 川藏公路典型山地灾害研究[M]. 成都:成都科技大学出版社,1999:35-52.

[7] 康志成,李焯芬,罗锦添. 中国泥石流研究[M]. 北京:科学出版社,2004:33-34.

[8] 欧国强,游勇,吕娟. 南水北调西线一期工程区泥石流规模预测及其对调水工程的影响[J]. 山地学报,2006,24(5):580-583.

[9] 费祥俊,舒安平. 泥石流运动机理与灾害防治[M]. 北京:清华大学出版社,2004:114-125.

[10] 周必凡,李德基,罗德富,等. 泥石流防治指南[M]. 北京:科学出版社,1991:80-85.

[11] 欧国强. 关于泥石流发生规模的研究[D]. 日本京都:京都大学研究生院,1992.

[12] 吴积善,田连权,康志成,等. 泥石流及其综合防治[M]. 北京:科学出版社,1993:105-108.

[13] 柳金峰,游勇,吕娟,等. 金沙江白鹤滩库区黑水河泥石流及其防治对策[J]. 中国地质灾害与防治学报,2009,20(1):11-15.