

# 九寨沟县勿角镇甲勿沟泥石流运动参数特征 与堵河分析

蒋清明<sup>1,2</sup>, 郝红兵<sup>1,2</sup>, 杨学之<sup>1,2</sup>, 蒙明辉<sup>1,2</sup>

(1. 四川省华地建设工程有限公司, 成都 610081; 2. 四川省地质灾害防治工程技术研究中心, 成都 610081)

**摘要:** 甲勿沟于2020年8月17日凌晨发生大规模泥石流过程, 泥石流对主河汤珠河造成严重堵塞, 主河河水以及甲勿沟泥石流形成漫流之势, 河水携带大量泥沙及碎石, 淤埋了沟口下游的阳山村安置点以及勿角场镇。经过现场实地调查, 测量多条泥石流过流断面, 通过计算分析“8.17”泥石流的运动参数特征, “8.17”泥石流强度接近降雨强度为10 a一遇的泥石流强度, 泥石流性质为稀性泥石流。甲勿沟泥石流松散固体物源丰富, 容易造成主河道汤珠河堵塞, 根据泥石流堵河判别公式计算, 泥石流堵塞汤珠河的可能性较大。

**关键词:** 甲勿沟; 泥石流; 运动参数特征; 堵河分析

**中图分类号:** P642.23 **文献标识码:** A

## ANALYSIS OF DEBRIS FLOW MOTION PARAMETERS CHARACTERISTICS AND RIVER BLOCKING OF JIAWU GULLY DEBRIS FLOW IN WUJIAO TOWN, JIUZHAIGOU COUNTY

JIANG Qing-ming<sup>1,2</sup>, HAO Hong-bing<sup>1,2</sup>, YANG Xue-zhi<sup>1,2</sup>, MENG Ming-hui<sup>1,2</sup>

(1. Sichuan Huadi Construction Engineering Co. Ltd, Chengdu 610081, China;

2. Sichuan Geological Disaster Prevention Engineering Technology Research Center, Chengdu 610081, China)

**Abstract:** In the early morning of August 17, 2020, a massive debris flow occurred in Jiawu gully. Mudslides have severely blocked the Tangzhu River. The main river water and Jiawu gully debris flow formed the potential of overflow. The river carries a large amount of mud sand and gravel, silt buried in the gully mouth downstream of Yangshan village resettlement site and Wujiao town. After field investigation and measurement of multiple debris flow cross sections. The motion characteristic parameters of “8.17” debris flow are calculated and analyzed, the intensity of debris flow on “8.17” was close to the intensity of debris flow with rainfall intensity of once in 10 years, the nature of debris flow is rare debris flow. Loose solids are abundant in Jiawu gully debris flow, easy to cause the main river Tangzhu blocked. Calculated according to the discriminant formula of debris flow blocking river, mudslides are likely to block the Tangzhu River.

**Key words:** Jiawu gully; debris flow; characteristics of motion parameters; analysis of river blocking

泥石流是一种分布广泛,具有突发性、偶然性且破坏力极强的地质灾害。泥石流的形成有三大条件,即地形条件、物源条件、水源条件,在西部山区,地形主要以高山峡谷为主,为泥石流的形成创造了良好的地形条件;“5.12”地震对震区内山体扰动较大,新增了大量的松散固体物源,临沟临坎处稳定性较差的第四系松散堆积体易启动参与泥石流过程;随着西部大开发的进一步加强加深,在西部山区具有较强的人类工程活动,人类工程活动也新增了部分泥石流固体物源,进一步增强了泥石流的形成规模;近年来极端天气增多,强降雨天气持续增加,为泥石流的形成提供了较好的降雨条件。

由于泥石流易发性逐渐增加、破坏性极强等特点,前人对泥石流开展了较为深入的研究。许多学者主要从地形地貌条件、松散固体物质条件、植被发育条件及降水情况等多方面深入分析了泥石流的形成条件<sup>[1-3]</sup>;也有部分学者从泥石流的运动特征方面进行了较为深入的研究<sup>[4]</sup>;丰富的理论研究成果为泥石流的防治提供了理论依据及经验。

2020年8月15~17日,九寨沟勿角镇甲勿沟流域经历持续强降雨过程,根据附近勿角镇甲勿气象观测站数据可知,8月15日降雨量为21.9 mm,8月16日降雨量为38.2 mm,8月17日降雨量为37.3 mm,3 d降雨量总和达到97.4 mm,单日降雨量接近5 a一遇降雨强度,在连续经历强降雨天气后,甲勿沟于8月17日凌晨发生大规模泥石流过程,泥石流持续时间近3 h,沿途冲毁旅游道路,淤埋村民房屋,泥石流沟口处绵九高速公路项目部几乎被完全淤埋,直接经济损失超过4 000万元,沟口处冲出的固体物质方量约 $20.0 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

受九寨沟“8.8”地震影响<sup>[5]</sup>,再加上甲勿沟本身有利的地形条件、物源条件等<sup>[6]</sup>,甲勿沟泥石流本身属于易发性较强的泥石流沟<sup>[7,8]</sup>,一旦甲勿沟再次发生大规模泥石流过程,将直接威胁沟域内的熊猫园、甲勿池景区及游客中心、旅游道路等旅游设施,除此之外还威胁沿沟的居民区、沟口的勿角场镇以及绵九高速公路等,其危害性较大<sup>[9]</sup>。因此,对泥石流的基本特征、运动参数特征及堵河可能性等进行研究,对泥石流的防治具有重要的参考意义。

## 1 流域概况

甲勿沟泥石流位于九寨沟县勿角镇甲勿村,属汤珠河左岸一级支流,流域面积 $43.9 \text{ km}^2$ ,主沟全长10.7 km,最高点位于流域西南侧山脊部位,高程3 335 m,最低点位于主沟与汤珠河交汇处,高程

1 780 m,相对高差1 555 m,沟道平均纵坡降145.9‰。流域属强烈切割区,总体地势西南高、东北低,河谷深切,地形起伏大。山坡坡度一般在 $20^\circ$ 以上,部分地区坡度在 $50^\circ$ 以上,总体上具有岸坡陡峻,切割深度大,呈现上陡下缓的空间特征。甲勿沟流域地形呈叶脉状,共发育有9条主要支沟,其中二道坪沟、6#支沟为泥石流沟,其余7条支沟均为清水沟(图1)。

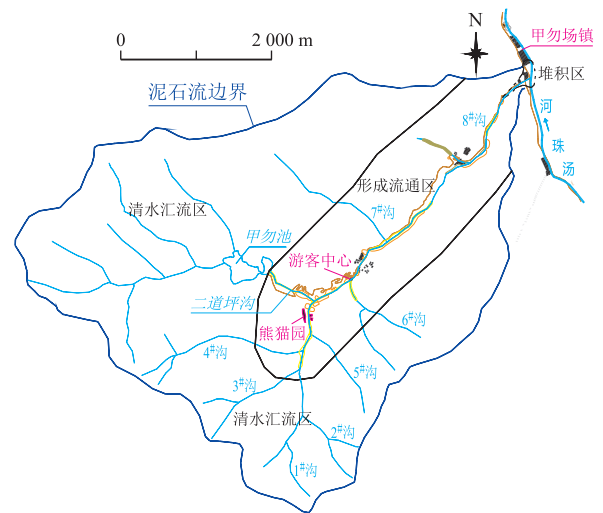


图1 甲勿沟流域概况图

## 2 泥石流分区特征

根据泥石流形成条件和松散固体物源的分布情况,将甲勿沟流域划分为清水区、形成流通区、堆积区等三大片区<sup>[10]</sup>。

### 2.1 清水区特征

清水区主要分布于主沟2 460 m高程以上至沟源头部位。面积约 $32.04 \text{ km}^2$ ,主沟2 460 m以上至沟源段长2.3 km,最大高程3 335 m,相对高差875 m,平均纵坡降380.4‰。区内沟谷形态多呈“V”型槽谷;沟道岸坡陡峻,岸坡坡角 $35^\circ \sim 60^\circ$ 。清水区森林植被发育较好,保水性好,不良地质现象较弱,主要为泥石流的形成汇集水源和提供水动力条件。

### 2.2 形成流通区特征

形成流通区主要分布于沟域中下游,流域面积约 $11.73 \text{ km}^2$ ,分布高程1 815~2 460 m,相对高差645 m,该段沟道长度约5.2 km,平均纵坡降为124.9‰。该区沟谷形态多呈“U”型槽谷,沟道上游局部地段呈“V”形峡谷(见图2);岸坡坡角在 $20^\circ \sim 60^\circ$ 之间,沟底为第四系冲洪积层及前期泥石流堆积层,岸坡局部基岩裸露,出露地层主要为生物碎屑灰

岩及石英岩状砂岩等。该区发育有较多崩塌和滑坡等不良地质现象,为泥石流提供了大量松散固体物源;形成流通区沟道较长,其冲淤特征视不同沟段的弯曲程度以及纵坡降差异而表现出不同的特点,纵坡较大处表现为以冲为主,局部稍缓部位以冲淤平衡为主<sup>[11]</sup>。



图2 形成流通区地形地貌

### 2.3 堆积区特征

堆积区主要分布于主沟高程 1 815 m 以下至主河汤珠河段,该段主沟沟长约 0.61 km,沟道高程 1 770~1 815 m,沟宽 50~100 m,平均纵坡降

73.8%,流通堆积区面积约 0.13 km<sup>2</sup>。该区段沟道平均纵坡比降变缓,沟床变宽,水动力条件减弱,沟道冲淤特征以淤积为主<sup>[11]</sup>。

## 3 泥石流运动特征参数计算

泥石流运动特征参数计算主要从形态调查法以及雨洪法两个方面入手,既可验证泥石流运动特征参数计算的准确性,也可为泥石流的堵河分析提供依据。形态调查法根据现场试验、现场实测泥痕、泥位及沟道断面等进行计算,雨洪法计算参数主要根据《四川省中小流域暴雨洪水计算手册》及相关规范<sup>[12]</sup>中阐述的方法进行计算得到。

### 3.1 泥石流容重

#### (1) 配浆法重度取值

甲勿沟泥石流近期发生过泥石流过程,根据泥石流流体性质,在沟道上中下不同部位共进行了 12 次重度实验,配浆法重度计算公式见泥石流勘查规范<sup>[12]</sup>,此处不再进行赘述,其结果见表 1。

表1 甲勿沟“8.17”泥石流流体重度配浆法计算表

试验位置	试验编号	体积/m <sup>3</sup>	配制泥浆重量/kg	泥石流重度/t·m <sup>-3</sup>	备注
主沟熊猫园以上 5# 支沟交汇部位上游	ZD-1	0.093	122.2	1.315	主沟
主沟熊猫园外侧沟道	ZD-2	0.08	108.5	1.356	主沟
支沟二道坪沟上游	ZD-3	0.076	106.0	1.393	二道坪沟
支沟二道坪沟下游	ZD-4	0.093	138.7	1.493	二道坪沟
主沟游客中心上游	ZD-5	0.097	146.6	1.508	主沟
主沟游客中心上游	ZD-6	0.088	142.1	1.609	主沟
6# 支沟下游	ZD-7	0.101	163.8	1.537	6# 支沟
游客中心	ZD-8	0.089	145.4	1.634	主沟
主沟中游	ZD-9	0.108	181.2	1.682	主沟
8# 支沟交汇下游	ZD-10	0.088	144.2	1.633	主沟
高速公路施工项目部	ZD-11	0.083	134.5	1.624	主沟
主沟沟口	ZD-12	0.104	167.8	1.613	主沟

#### (2) 雨洪法重度取值

雨洪法重度取值是结合配浆法以及查表法进行综合取值。查表法是在现状调查基础上,综合了流域内地质环境条件、沟道特征及物源发育分布等特性,带预测性,更能反映泥石流特征及实际情况。泥石流过后沟域内局部物源发生了启动,物源特征、启动条件及堵塞程度在一定程度上发生了变化,采用配浆法及查表法确定泥石流重度参数均存在误差。因此,雨洪法重度取值考虑不同断面现场实际及查表法等综合分析取值确定,结果见表 2。

### 3.2 泥石流流速

由配浆法及查表法结果可知,泥石流属于稀性泥石流,对流速的计算采用原铁道部第二勘察设计院推荐的西南地区经验公式(式 1)进行计算<sup>[12]</sup>。

$$V_c = \frac{1}{n \sqrt{\gamma_H \varphi + 1}} R^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中, $V_c$  为泥石流断面平均流速; $1/n$  为清水河床糙率系数,查水文手册; $R$  为水力半径,一般用平均泥深代替; $I$  为泥石流水力坡度,一般按沟床纵坡代替; $\varphi$  为泥沙修正系数; $\gamma_H$  为泥石流固体物质容重。

根据公式及各断面部位沟道特征,形态调查法及雨洪法 10 a 一遇降雨强度( $P=10\%$ )各断面部位泥石流流速计算结果见表 3。

通过形态调查法及雨洪法泥石流流速计算结果对比可知,甲勿沟“8.17”泥石流流速接近雨洪法 10 a 一遇降雨强度下的流速,说明甲勿沟“8.17”泥石流的强度接近 10 a 一遇降雨条件下的泥石流强度。

表 2 泥石流重度综合取值统计表

编号	计算位置	综合评分	雨洪法重度值/ $t \cdot m^{-3}$	备注
1	主沟熊猫园以上 4# 支沟交汇部位	76	1.502	主沟
2	主沟熊猫园以上 5# 支沟交汇部位		1.502	主沟
3	主沟熊猫园以上 5# 支沟交汇部位下游		1.523	主沟
4	主沟熊猫园以下与二道坪沟交汇处上游		1.523	主沟
5	主沟熊猫园与二道坪沟交汇处下游	97	1.628	主沟
6	主沟服务中心上游		1.647	主沟
7	主沟服务中心上游		1.662	主沟
8	主沟服务中心上游		1.666	主沟
9	主沟甲勿上寨	94	1.672	主沟
10	主沟中游		1.648	主沟
11	主沟中游		1.648	主沟
12	8# 支沟交汇下游		1.634	主沟
13	高速公路施工项目部	92	1.634	主沟
14	高速公路施工斜洞		1.634	主沟
15	主沟沟口		1.634	主沟
16	二道坪沟甲勿池	73	1.473	二道坪沟
17	二道坪沟下游		1.502	二道坪沟
18	6# 支沟沟口	80	1.551	6# 支沟
19	8# 支沟中下游	82	1.565	8# 支沟
20	8# 支沟沟口		1.565	8# 支沟

表 3 泥石流流速计算表(形态调查法及雨洪法)

计算断面位置	形态调查法 流速/ $m \cdot s^{-1}$	雨洪法 $P=10\%$ 流速/ $m \cdot s^{-1}$
主沟熊猫园以上 4# 支沟交汇部位	1.607	1.947
主沟熊猫园以上 5# 支沟交汇部位	1.637	1.987
二道坪沟下游	2.473	3.241
主沟熊猫园与二道坪沟交汇处下游	3.035	3.339
6# 支沟沟口	2.513	3.145
主沟服务中心上游	3.436	3.758
主沟甲勿上寨	3.696	3.935
主沟中游	3.408	3.729
8# 支沟交汇下游	3.798	4.042
主沟沟口	2.963	3.268

### 3.3 泥石流峰值流量

#### (1) 形态调查法

采用形态调查法对泥石流流量进行计算<sup>[12]</sup>,计算公式为:

$$Q_c = W_c V_c \quad (2)$$

式中, $Q_c$  为泥石流断面峰值流量( $m^3/s$ ); $W_c$  为泥石流流过流断面面积( $m^2$ ),采用调查测绘获取的沟道形态参数; $V_c$  为泥石流断面平均流速( $m/s$ )。

据此求得形态调查法各断面位置泥石流峰值流量,计算结果见表 4。

表 4 甲勿沟“8.17”泥石流流量计算统计表(形态调查法)

计算断面位置	沟道平均泥深/ $m$	泥石流过流断面面积/ $m^2$	泥石流断面平均流速/ $m \cdot s^{-1}$	泥石流断面峰值流量/ $m^{-3} \cdot s^{-1}$
主沟熊猫园以上 4# 支沟交汇部位	0.60	4.08	1.607	6.558
主沟熊猫园以上 5# 支沟交汇部位	0.60	4.20	1.607	6.751
二道坪沟下游	2.30	35.42	2.473	87.597
主沟熊猫园与二道坪沟交汇处下游	1.30	18.20	3.035	55.241
6# 支沟沟口	0.50	4.45	2.513	11.182
主沟服务中心上游	1.46	23.36	3.436	80.261
主沟甲勿上寨	1.52	22.80	3.696	84.260
主沟中游	1.45	26.10	3.408	88.937
8# 支沟交汇下游	1.94	28.52	3.798	108.318
主沟沟口	1.52	43.17	2.963	127.920

#### (2) 雨洪法

暴雨洪峰流量计算根据相关规范<sup>[12]</sup>及计算手册<sup>[13]</sup>公式计算地表水汇水流量,计算公式为:

$$Q = 0.278\psi_i F = 0.278\psi \frac{s}{\tau^n} F \quad (3)$$

式中, $Q$  为最大洪峰流量( $m^3/s$ ); $\psi$  为洪峰径流系数; $i$  为最大平均暴雨强度; $s$  为暴雨雨力; $n$  为暴雨公式指数; $F$  为集水面积( $km^2$ ); $\tau$  为流域汇流时间( $h$ )。

暴雨洪峰流量计算结果见表 5。

在计算求得暴雨洪峰流量的基础上,根据规范<sup>[12]</sup>,采用下式(式 4)进行泥石流峰值流量的计算:

$$Q_c = (1 + \varphi)Q_p D_c \quad (4)$$

式中, $Q_c$ 为泥石流断面峰值流量( $m^3/s$ ); $\varphi$ 为泥沙修正系数; $Q_p$ 为暴雨洪峰流量; $D_c$ 为堵塞系数,按规范查表确定。

各断面泥石流峰值流量计算结果详见表 5。

表 5 泥石流暴雨洪峰流量与峰值流量计算结果(雨洪法)

计算位置	暴雨洪峰流量	泥石流峰值流量
	$P=10\%Q_m$ / $m^3 \cdot s^{-1}$	$P=10\%$ / $m^3 \cdot s^{-1}$
主沟熊猫园以上 4# 支沟交汇部位	11.20	20.93
主沟熊猫园以上 5# 支沟交汇部位	12.96	24.21
二道坪沟下游	16.33	42.24
主沟熊猫园与二道坪沟交汇处下游	33.26	107.38
6# 支沟沟口	2.85	7.71
主沟服务中心上游	32.81	115.55
主沟甲勿上寨	35.64	126.27
主沟中游	43.50	128.95
8# 支沟交汇下游	48.04	156.54
主沟沟口	49.81	161.79

通过形态调查法及雨洪法泥石流峰值流量计算结果对比可知,甲勿沟“8.17”泥石流峰值流量比雨洪法 10 a 一遇降雨强度下的峰值流量偏小较多,如主沟服务中心上游形态调查法流量为 80.261  $m^3/s$ ,雨洪法流量为 115.55  $m^3/s$ ,又如主沟沟口形态调查法流量为 127.92  $m^3/s$ ,雨洪法流量为 161.79  $m^3/s$ ,所有计算断面形态调查法计算结果均比雨洪法计算结果小。推断主要原因是因为现场调查时能准确测量最高泥位线,但由于泥石流后期强度逐渐变弱,泥石流的携砂能力减弱,沟道内逐渐淤积有固体物质,导致现场测量的过流断面偏小,进而导致形态调查法计算得到的泥石流峰值结果偏小。

#### 4 泥石流堵河分析

甲勿沟沟口为汤珠河,“8.17”泥石流过程中,大量固体物源进入主河,造成主河的堵塞以及河床的抬升,主河河水以及甲勿沟洪流在交汇处形成漫流之势,大量河水越过河堤,河水携带大量泥沙及碎石,淤埋了阳山村安置点以及勿角场镇,淤埋深度平均达 0.5~1.0 m,最大深度处达到 2.0 m(图 3)。

针对泥石流堵塞主河问题,陈德明<sup>[14]</sup>、唐川<sup>[15]</sup>、张金山<sup>[16]</sup>等国内许多学者对其进行了相应研究,提出了泥石流堵河的经验判别式。

参照陈德明等提出的泥石流堵河可能性的经验判别式,对可能堵河阈值进行计算。

$$\frac{\gamma_{支} Q_{支} V_{支} \sin \alpha}{\gamma_{主} Q_{主} V_{主}} \geq C_{\gamma} \quad (5)$$

式中, $\gamma_{支}$ 为泥石流流体重度( $t/m^3$ ); $\gamma_{主}$ 为主河河水重度( $t/m^3$ ); $Q_{支}$ 为泥石流峰值流量( $m^3/s$ ); $Q_{主}$ 为泥石流发生时主河河水流量,取汤珠河洪期平均流量( $m^3/s$ ); $V_{支}$ 为泥石流入汇时的流速( $m/s$ ); $V_{主}$ 为泥石流入汇处主河河水流速( $m/s$ ); $\alpha$ 为泥石流沟入汇角( $^\circ$ ); $C_{\gamma}$ 为阈值,为 1.44。

前文第 3 节对泥石流运动特征参数进行了计算,根据泥石流流量、流速等计算结果,采用判别式进行堵河阈值计算,计算结果见表 6。

表 6 甲勿沟堵塞主河判断阈值计算表

降雨频率	泥石流流量 / $m^3 \cdot s^{-1}$	泥石流流速 / $m \cdot s^{-1}$	入汇角 / $^\circ$	堵河阈值	堵河判断
10%	161.79	3.268	80	1.52	>1.44,堵河
5%	192.04	3.463	80	1.57	>1.44,堵河
2%	234.94	3.792	80	1.59	>1.44,堵河
1%	266.27	3.996	80	1.50	>1.44,堵河

由表 6 可见,甲勿沟泥石流堵河阈值均大于 1.44,泥石流堵塞汤珠河的可能性较大,大规模的泥石流固体物质冲出后进入汤珠河,势必会将主河道河床抬高,减小主河道的过流断面面积,进而减弱主河道的过流能力。

通过对甲勿沟泥石流的发灾历史调查以及沟域特征的分析,泥石流堵塞主河道汤珠河的可能性基本与计算结果一致。



图 3 甲勿沟沟口淤积范围

#### 5 结论

(1) 甲勿沟具有较好的地形条件、物源条件等,在经历持续强降雨过程时,易发生泥石流过程,对沟域内的熊猫园、甲勿池景区及游客中心、旅游道路等旅游设施,沿沟的居民区、沟口的勿角场镇以及绵九高速公路等造成较大的危害。

(2) 通过现场配浆法及查表法,泥石流重度相对较小,泥石流性质属于稀性泥石流;通过形态调查法及雨洪法泥石流流速、流量等计算结果对比可知,甲勿沟“8.17”泥石流强度接近 10 a 一遇降雨强度

下的泥石流强度。

(3) 由于泥石流后期强度逐渐减弱,泥石流的携砂能力降低,沟道内逐渐淤积有固体物质,现场实际测量的过流断面比泥石流峰值过流时的过流断面偏小,进而导致形态调查法计算得到的泥石流峰值结果偏小。

(4) 甲勿沟泥石流松散固体物源丰富,堆积区沟道较短,大部分冲出固体物质堆积于沟口至主河道之间,容易造成主河道汤珠河堵塞,根据泥石流堵河判别公式计算,泥石流堵塞汤珠河的可能性较大。

#### 参考文献

- [1] 李睿祺,胡桂胜,陈宁生,等. 丹巴县半扇门乡“6.17”梅龙沟泥石流特征与成因研究[J]. 地质灾害与环境保护, 2021, 32(4): 8-13+18.
- [2] 史洪滨,胡卸文,文强,等. 拟建川藏铁路夏里2#沟泥石流发育特征及动力学过程数值模拟[J]. 地质灾害与环境保护, 2021, 32(3): 39-46.
- [3] 王邦阳,杨华舒,杨在月. 梓里沟泥石流形成及综合治理研究[J]. 地质灾害与环境保护, 2016, 27(3): 25-29.
- [4] 王邦阳,杨华舒,杨在月. 不同爆发频率下的泥石流动力特征参数计算[J]. 地质灾害与环境保护, 2016, 27(4): 26-30.
- [5] 房立华,吴建平,苏金蓉,等. 四川九寨沟 Ms7.0 地震主震及其余震序列精定位[J]. 科学通报, 2018, 63(7): 649-662.
- [6] 赵松江,赵峥,袁广. 九寨沟震区泥石流物源特征研究[J]. 四川地质学报, 2021, 41(1): 93-97.
- [7] 吴积善,田连权,康志成,等. 泥石流及其综合治理[M]. 北京: 科学出版社, 1993: 48-50.
- [8] 康志成,李焯芬,等. 中国泥石流研究[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [9] 蒋清明,蒙明辉,高精理,等. 九寨沟县勿角镇甲勿村甲勿沟泥石流治理工程勘查报告[R]. 2020.
- [10] 黎志恒,朱立峰,胡向德,等. 三眼峪特大泥石流沟流域分区特征[J]. 西北地质, 2011, 44(3): 38-43.
- [11] 亓星,余斌,王涛. 沟道坡度对泥石流起动模式影响的模拟试验研究[J]. 水电能源科学, 2014, 32(7): 116-119.
- [12] 中国地灾协会. 泥石流灾害防治工程勘查规范(试行)(T/CAGHP 006-2018)[S]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2018.
- [13] 四川省中小流域暴雨洪水计算手册[M]. 四川省水利电力厅, 1984.
- [14] 陈德明. 泥石流与主河水流交汇机理及其河床响应特征[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2006.
- [15] 唐川,黄润秋,黄达,等. 金沙江美姑河牛牛坝水电站库区泥石流对工程影响分析[J]. 工程地质学报, 2006, 14(2): 145-151.
- [16] 张金山,谢洪. 岷江上游泥石流堵河可能性的经验公式判别[J]. 长江流域资源与环境, 2008, 17(4): 651-655.

**作者简介:** 蒋清明(1990—),男,四川德阳人,硕士研究生,工程师,主要从事地质灾害防治、岩土工程勘察设计工作。

E-mail: 541475740@qq.com