

九寨沟熊猫海左岸泥石流震后发育特征研究

刘铁骥¹, 孙书勤¹, 赵铮², 郭德庆²

(1. 成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059;

2. 四川省华地建设工程有限公司, 四川 成都 610085)

摘要: 泥石流是山区高频率发生的地质灾害, 九寨沟熊猫海左岸泥石流的发生给景区造成巨大的损失。在现场调查的基础上, 通过现场实验及理论公式计算了泥石流的容重、峰值流量、平均流速, 并对九寨沟熊猫海左岸泥石流的形成机理进行了分析研究。通过 Massflow 软件对九寨沟熊猫海左岸泥石流的运动特征进行了模拟计算, 结合目前沟道物源、水源、地形地貌等条件进行分析, 根据分析结果判断出: 该沟道再次发生更大规模泥石流的可能性极大, 并提出针对该沟道泥石流的两种治理措施。

关键词: 泥石流; 现场实验; 形成机理; 治理措施; 九寨沟熊猫海

中图分类号: P642.23

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2020)05-0171-05

Development characteristics of debris flow on the left bank of Panda Sea in Jiuzhai Gully after earthquakes

LIU Tieji¹, SUN Shuqin¹, ZHAO Zheng², GUO Deqing²

(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology,

Chengdu 610059, China; 2. Sichuan Huadi Construction Engineering Co., Ltd., Chengdu 610085, China)

Abstract: Debris flow is a high frequency geological disaster in mountainous areas. The occurrence of debris flow on the left bank of the Panda Sea in Jiuzhaigou Gully caused huge losses to the scenic area. Based on the field investigation, the bulk density, peak flow, and average velocity of the debris flow were calculated with field experiments and theoretical formulas. The formation mechanism of the debris flow on the left bank of the Panda Sea in Jiuzhaigou Gully was analyzed. Massflow was used to simulate the movement characteristics of the debris flow. Based on the status of current material source, water source, and topography of the gully, the analysis results show that the gully is likely to have a larger debris flow again, so two control measures for the impending debris flow in this gully are proposed.

Key words: debris flow; field experiment; cause and formation mechanism; control measure; Panda Sea in Jiuzhaigou Gully

1 研究背景

位于四川省九寨沟的熊猫海平面上大致呈矩形分布, 总长约 670 m, 宽 109 ~ 237 m, 平均宽度 201 m, 北段(出口段)深 10 ~ 24 m, 平均深度 15.6 m, 尾部相对较浅, 深度 8 ~ 9 m, 钙华堤埂将熊猫海的水深区域一分为二, 总水容量约 $180 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。2017 年 8 月 8 日, 四川省阿坝州九寨沟县发生 M7.0 级地震, 共造成四川省及邻省 8 个县不同程度受灾。

受“8.8”九寨沟地震影响, 熊猫海左岸沟道流域内新松散固体物源增加, 坡面及沟道内产生大量不稳定物源, 在强降雨作用下, 引发泥石流灾害。据调查, 泥石流灾害直接造成的沟道出口处游客栈道和景区的经济损失约 400×10^4 元。

由于泥石流灾害的特殊性, 泥石流专家和学者对泥石流的研究从未停止。杜雪剑等^[1]使用 FLO-2D 软件模拟了工程治理条件下的红椿沟泥石流运动过程, 并根据模拟结果对泥石流工程治理效果

收稿日期: 2019-12-25; 修回日期: 2020-02-28

基金项目: 国家重点研究发展计划项目(2018YFC1505406)

作者简介: 刘铁骥(1991-), 男, 四川雅安人, 硕士研究生, 主要从事地质灾害评估与预测研究。

通讯作者: 孙书勤(1961-), 女, 四川成都人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为地质工程及微量元素地球化学。

进行了探讨;唐川等^[2]研究北川“9.24”暴雨泥石流的特征;余斌^[3]通过泥石流沉积物的不同分类,研究泥石流的容重特征等。随着专家学者研究的深入,泥石流展现出更多的发育特征。

在前人研究的基础上,通过室内资料整理与现场勘察,详查了熊猫海沟道泥石流的地形、水源与物源条件,经现场物理实验计算出泥石流容重并测量了物源动、静储量和堆积区洪痕断面相关数据。通过计算泥石流力学特征及数值模拟的相关参数,模拟了泥石流的运动状态,分析了目前该沟道泥石流的发育情况,为泥石流的治理提供建议。本文对泥石流的研究方法,可为其他相同背景泥石流的研究提供整体性研究思路。

2 熊猫海左岸泥石流基本特征

熊猫海左岸沟道流域形态呈栎叶状,沟口坐标为 $103^{\circ}52'18.25''\text{E}$, $33^{\circ}08'55.3''\text{N}$,整个流域纵向长度 2.9 km,平均宽度 1.36 km,流域面积 3.9 km^2 ,相对高差 1 453 m,纵坡比 501‰。由于地质构造和地层岩性的作用,海子左岸冲沟较顺直,支沟不发育,坡面有微地貌发育。

该泥石流沟为季节性流水溪沟,流量受降雨量控制。泥石流沟沟源处和两岸陡峭出露的地层主要有石炭系下统岷河组(C_m^1)、泥石流沟沟口冰川堆积(Q_{gl}^{gl})、泥石流沟内崩塌滑坡堆积(Q_{del}^{del})、泥石流沟内斜坡顶部及中下部洪积层(Q_{pl+dl}^{pl+dl})、沟口泥石流堆积(Q_{sef}^{sef})及钙华堆积(Q_{ch}^{ch})等。

3 泥石流形成条件分析

潘懋等^[4]研究表明,泥石流的形成主要有物源、水源和特定的地形地貌 3 个方面的因素。结合对熊猫海左岸泥石流的调查发现,该泥石流同样具备这 3 种形成条件。

3.1 物源总量及相应动储量

地震前,由于流域内植被覆盖率较高,人类工程活动弱等特点,两侧斜坡基本能保持稳定。震前沟内松散物源主要为沟道堆积物源和零星崩塌物源,能参与泥石流的动储量很小。据调查显示,震后频发的崩塌等地质灾害,使得坡面和沟道内的泥石流物源量剧增。流域内崩塌、滑坡、水土流失等现象的发育程度,是形成泥石流的主要物源^[5]。

图 1 展示了熊猫海沟道左岸的崩塌特征。通过现场调查,沟域内物源主要有崩塌体和崩塌堆积体物源、沟道堆积型物源以及坡面物源。其中,崩塌体物

源 8 处,崩塌堆积体物源 17 处,沟道堆积物源 2 处,坡面侵蚀物源 3 处。崩塌堆积物主要是由于地震引起的高位崩塌及前期崩塌产生的崩塌堆积物,主要分布在斜坡坡脚以及零星洒落在沟道内,在雨水冲刷下,汇入沟道,成为物源。物源总储量与动储量分别采用弓形均高法、沟谷下切侵蚀堵溃型模式^[6]进行计算,物源类型及物源统计结果如表 1 所示。

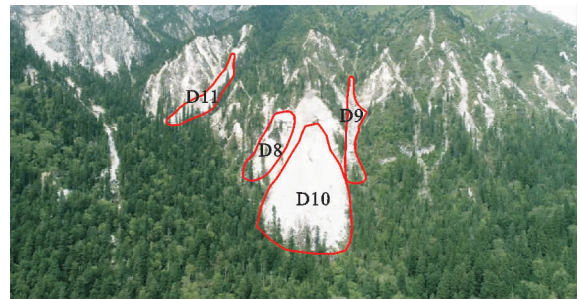


图 1 熊猫海沟道左岸崩塌特征

表 1 熊猫海左岸沟道泥石流物源类型及物量统计

物源类型	物源总量/ 10^4 m^3	可参与动储量/ 10^4 m^3	启动条件
崩塌体	9.26	1.96	降雨冲刷
崩塌堆积	5.00	1.54	降雨冲刷
沟道堆积	73.50	7.50	降雨冲刷
坡面侵蚀	6.05	0.73	降雨冲刷

由表 1 可知,熊猫海左岸泥石流沟域内可参与泥石流活动的松散固体物源动储量为 $11.73 \times 10^4\text{ m}^3$,物源主要分布于沟域中下游处,部分物质在雨水作用下堆积于沟道中,参与泥石流活动,且泥石流冲出物沿着沟道出口至熊猫海沿岸堆积,并非全部冲入熊猫海内。

3.2 降雨条件

水是泥石流的主要组成,也是形成泥石流的决定性因素^[7]。熊猫海左岸泥石流沟的水源主要为大气降水,流域内雨量集中,多以大雨、暴雨或连续阴雨的形式出现。暴雨能促使地表径流的产生,而地表径流能成为泥石流的主要水源,暴雨也能激发泥石流^[8]。

通过查阅研究区气象资料,绘制全年灾害发生量与降雨量关系统计图,如图 2 所示。分析图 2 可知,流域内年降雨量为 552.3 mm,降水集中在雨季(5-9 月),约占全年降雨量的 75%。研究区的 1/6、1/6、24 h 的多年最大暴雨量平均值分别为 8.5、13.5、26、37 mm。吴积善等^[9]以及亓星等^[10]研究发现,四川山区泥石流 1 次降雨量达到 48~50 mm,

或 10 min 降雨量 8 ~ 12.2 mm、1 min 降雨量 0.8 ~ 1.2 mm 为泥石流的激发雨量。熊猫海左岸泥石流发生时的降雨量满足此激发降雨量。

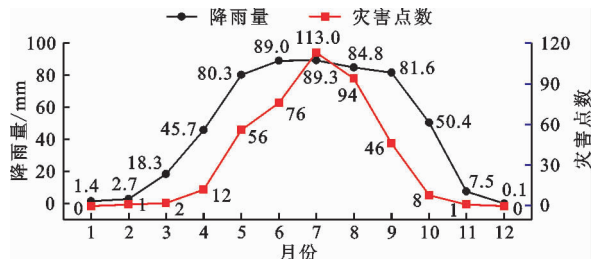


图 2 研究区全年灾害发生量与降雨量关系统计

3.3 地形条件

沟道流域内地形地貌主要为高山河谷地貌,流域最高点高程约 4 025 m,最低点 2 572 m,相对高差较大。上游沟道呈“V”型,宽度 20 ~ 45 m,沟心及两侧岸坡出露灰岩,两侧陡岩局部区段坡面发育有微型小冲沟。熊猫海左岸沟道纵坡较大,据现场调查发现,中上游坡度 45 ~ 70°,局部呈陡崖状,有利于降雨的汇集以及为泥石流流动提供强大的势能空间。形成物源区的冲沟坡度相对较缓,坡度为 23 ~ 50°,余斌等^[11]研究发现,坡度为 25 ~ 45°最有利于泥石流形成。流域内中下游植被较发育,植被对地表水流有一定的调节作用,大气降雨后不会同时汇集到沟心,表层植被会减少暴雨时段的洪水量。根据研究结果,将熊猫海左岸泥石流区域划分为 3 个区:清水区,位于沟道流域中上部的岸坡坡顶,主要为原始森林,植被发育好,物源分布较少;形成物源区,位于沟道流域中下游段及中下游两侧岸坡,该段崩塌发育,坡面松散物堆积,沟床堆积物丰富,是泥石流松散固体物源的主要分布区;沟口至熊猫海为泥石流堆积区,沟床较缓,局部可见深度为 0.3 ~ 0.5 m 的冲沟,坡面上植被覆盖率高,灌木、草地、乔木交错生长。

熊猫海左岸沟道的物源储量、降雨和地形 3 个因素相互作用,为泥石流的发生提供了有利条件。

4 结果与分析

4.1 泥石流容重

泥石流容重的确定通常有配浆法和查表法,熊猫海左岸泥石流的容重根据公式(1)由现场配浆来确定。

$$\gamma_c = \frac{G_c}{V}$$
(1)

式中: γ_c 为泥石流容重, t/m^3 ; G_c 为配制泥浆重量,

t ; V 为配制泥浆体积, m^3 。

表 2 泥石流容重配浆法参数取值

实验位置	重量 G_c /kg	体积 V /L	容重 γ_c / ($t \cdot m^{-3}$)
主沟中上游堆积区	11.04	6.65	1.66
主沟下游沟心	9.37	5.68	1.65
主沟下游堆积区	8.63	5.36	1.61
沟口堆积区	8.65	5.28	1.64

如表 2 泥石流容重配浆法参数取值表所示,通过现场对沟道中上游堆积区、下游沟心、下游堆积区及沟口堆积区等不同位置的现场配浆,确定熊猫海左岸泥石流为稀性泥石流(1.5 ~ 1.8 t/m^3)。根据现场观察,熊猫海左岸泥石流沉积物呈松散状,有分选性,与稀性泥石流特征相符,表明计算结果准确。

4.2 泥石流流速

在堆积区选取典型洪痕断面,通过测量与分析,选取具体计算参数,沟道流速采用稀性泥石流流速公式^[12],如公式(2)所示。

$$U = 1.8(gR)^{\frac{1}{2}}S^{\frac{1}{10}}$$
(2)

式中: U 为泥石流平均流速, m/s ; R 为水力半径, m ; S 为断面坡度的正切值; g 为重力加速度, m/s^2 ; 具体计算取值如表 3 泥石流流速计算表所示。

表 3 泥石流平均流速计算表

水力半径 R /m	断面坡度/ ($^{\circ}$)	重力加速度 $g/(m \cdot s^{-2})$	平均流速 $U/(m \cdot s^{-1})$
0.4	5	9.80	2.79

通过表 3 泥石流流速计算表可得,熊猫海左岸泥石流平均流速为 2.79 m/s 。

4.3 清水流量与峰值流量

清水流量计算公式为:

$$Q_B = 0.278r \cdot i \cdot F$$
(3)

式中: Q_B 为清水流量, m^3/s ; r 为小时平均降雨强度, mm/h ; i 为产流系数,本文取 $i = 0.8$; F 为流域面积, km^2 。

根据现场对泥石流特征研究,对比灾民的调查并结合该沟道曾经的灾害史,判定该泥石流为 50 年一遇且泥石流历时约为 20 min,即 $T = 1\,200\,s$ 。

泥石流峰值流量计算公式为:

$$Q_c = (1 + \varphi)Q_BD_c$$
(4)

式中: Q_c 为泥石流峰值流量, m^3/s ; φ 为泥沙修正系

数,计算取 $\varphi = 0.32$; D_c 为堵塞系数,查表取值为 1.6。具体泥石流流量计算参数如表 4 所示。

表 4 泥石流流量计算表

降雨 频率	流域面积 $F /$ km^2	降雨强度 $r /$ $(\text{mm} \cdot \text{h}^{-1})$	清水流量 $Q_B /$ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	泥石流流量 $Q_c /$ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$
$P = 2\%$	3.9	13.5	11.71	24.73

由表 4 可知,熊猫海左岸泥石流清水流量为 $11.71 \text{ m}^3/\text{s}$,峰值流量为 $24.73 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

4.4 Massflow 运动状态的数值模拟

4.4.1 基础数据处理 利用 ArcGis 软件对室内收集的熊猫海的地形数据进行处理,生成软件需要的 DEM,然后利用转换工具,转换成 Massflow 软件识别的 ASCII 码,建立计算模型。

4.4.2 参数取值

(1)容重:取熊猫海左岸沟道的中上游堆积区、下游沟心、下游堆积区及沟口堆积区容重的平均值作为模拟值,即 $\gamma_c = 1.64 \text{ t/m}^3$;

(2)流量过程线:参考金文祥^[13]用 Massflow 模拟达仓沟泥石流运动特征的流量过程线,采用概化五边形控制流量,进行流量模拟。

(3)摩擦模型:本次模拟选用 Voellmy 模型,Voellmy 模型主要用于泥石流等流体的模拟,在考虑紊动系数前提下,能限制颗粒流的较高运动速度。

(4)其他参数的选取:结合熊猫海左岸沟道泥石流的特征及 Massflow 软件类型,通过查找模型参数计算手册表,模型的摩擦系数 μ 取 0.2,湍流系数 ξ 取 300 m/s^2 。

4.4.3 模拟结果 通过对九寨沟熊猫海左岸泥石流的多次反演,计算模拟了降水频率 $P = 2\%$ (50 年一遇)的泥石流泥深与流速分布,结果见图 3。

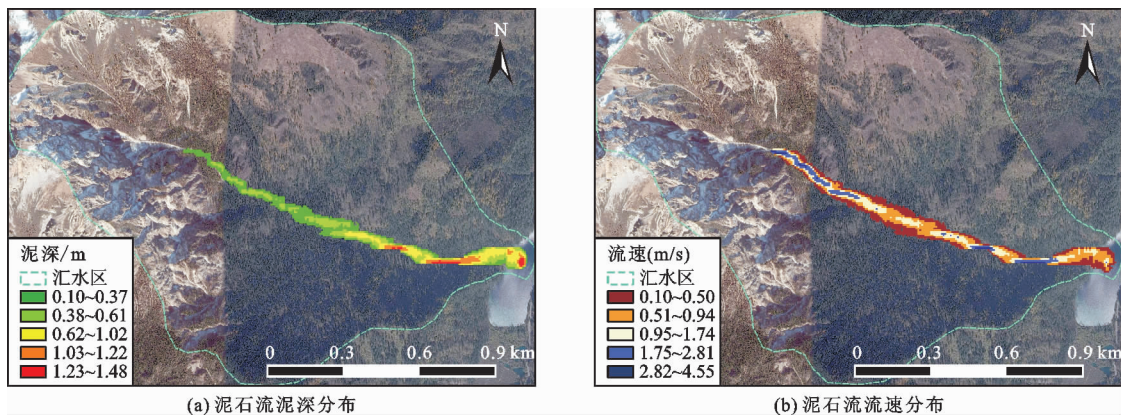


图 3 九寨沟熊猫海左岸泥石流泥深与流速分布模拟计算结果(降水频率 $P = 2\%$)

由图 3(a)可以看出,熊猫海左岸泥石流最大泥深为 1.48 m,泥石流堆积物主要分布于沟道下游出口及熊猫海内,泥深最大值的沟口处地形较为平缓,便于泥石流物质堆积。沟道上游至中游由于泥石流刚发生时速度较大,加之地形较陡,故泥石流堆积物厚度较浅,这与现场实际调查情况较为吻合。

由图 3(b)可以看出,熊猫海左岸泥石流最大流速为 4.55 m/s ,主要分布于沟道上游及下游处,这些地方地形相对陡峭,植被较为稀疏。通过调查,熊猫海左岸沟道地质环境较好地印证了泥石流流速分布,表明模拟结果较为准确。

4.4.4 模拟结果验证 本文参考王纳纳等^[14]采用的相对误差方法,即用残差值(数值模拟值与实际调查值的差)除以实际调查值验证熊猫海左岸泥石流的数值模拟情况,具体计算结果如表 5 所示。

由表 5 可以看出,由于模拟过程中没有考虑熊

猫海左岸泥石流对沟道产生的侵蚀和下切作用,故堆积面积和冲出规模的模拟值均小于实际值,堆积面积和冲出规模的相对误差分别为 -13.2% 和 -15.0% 。总体而言,模拟仿真值的准确率大于 85% (相对误差不大于 15.0%),说明熊猫海左岸泥石流的模拟结果较为准确。

表 5 熊猫海左岸泥石流模拟结果验证计算表

对比项	实际值	模拟值	残差(相对误差)
堆积面积/ m^2	29500	25600	-3900(13.2%)
冲出规模/ m^3	32600	27700	-4900(15.0%)

5 熊猫海左岸泥石流发展趋势与治理方案

5.1 发展趋势分析

从目前熊猫海左岸沟道的物源和水动力条件等

方面分析:

(1)受“8.8”地震的影响,不良地质现象较发育,松散物剧增,松散物源补给长度比约为70%,泥石流活动强度高,且沟谷上游段汇水区纵坡达552‰,为泥石流的形成提供良好的水动力条件;

(2)流域内虽总体上植被覆盖率较高,但“8.8”地震后,坡体及植被遭到一定程度的破坏,斜坡表面物质结构较为松散,在雨水作用下,水土流失加剧,利于水体的汇集;

(3)松散物源丰富,水流冲刷、下切、侧蚀作用强烈,有利于泥石流的形成。

综上所述,熊猫海左岸沟道具备了再次发生泥石流灾害的内在条件,在强降雨条件下,极可能再次暴发泥石流,且泥石流规模可能随着降雨量增大而增大。一旦该泥石流再次发生,大量的松散物在流水携带下冲出,沿沟道汇入熊猫海内,对景区造成的影响和危害极大,损失不可估量。

5.2 相应的治理措施

根据熊猫海左岸泥石流威胁的对象、方式、程度,宜采取50年一遇以上设防措施。考虑地形地貌、泥石流运动特征、景观协调性以及施工条件等,推荐两种治理方案。

方案1:采用“以拦为主,辅以稳固、生物滤水工程”的治理思路,实施“谷坊坝+拦砂坝+拦水堤”的工程措施,即在熊猫海左岸泥石流形成物源区陡坡段修建谷坊坝,防止泥石流下蚀沟道;在冲沟沟口处设置两道拦砂坝,拦截泥石流冲出物质;在沟口设置拦水堤,起到散流的作用,降低泥石流暴发时流速,使其下渗至土地内净水,防止对景区水质造成影响。

方案2:采用“以拦为主,辅以稳固工程”的治理思路,在物源区陡坡段施工“柔性网格坝+拦砂坝+拦水堤”,即在熊猫海左岸泥石流形成物源区陡坡段修建柔性网格坝,防止泥石流下蚀沟道;在冲沟沟口设置两道拦砂坝,拦截泥石流冲出物质;在沟口设置拦水堤,起到散流的作用,降低泥石流暴发时流速,使其下渗至土地内净水,防止对景区水质造成影响。

6 结 论

(1)熊猫海左岸泥石流为低频型泥石流,受地震影响,流域内崩塌等次生灾害的频发,使得能参与泥石流的物源剧增。据调查发现,沟内17处崩塌堆

积体、8处崩塌、3处坡面物源、2处沟谷物源,且松散物质丰富、集中。全沟内泥石流固体物质静储量为 $93.81 \times 10^4 \text{ m}^3$,其中可参与泥石流活动的动储量为 $11.73 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

(2)熊猫海左岸泥石流为稀性泥石流,容重为 1.64 t/m^3 。理论计算泥石流峰值流量为 $24.73 \text{ m}^3/\text{s}$,平均流速 2.79 m/s 。通过数值模拟,泥石流最大泥深为 1.48 m ,最大流速为 4.55 m/s 。

(3)通过研究熊猫海左岸泥石流的水源、物源、地形地貌等条件,分析可得:该沟道再次发生规模更大泥石流的可能性极高。

参考文献:

- [1] 杜雪剑,孙书勤,赵 峥,等.基于FLO-2D模型的红椿沟泥石流工程治理效果研究[J].地球与环境,2016,44(3):376-381.
- [2] 唐 川,梁京涛.汶川震区北川9.24暴雨泥石流特征研究[J].工程地质学报,2008,16(6):751-758.
- [3] 余 斌.根据泥石流沉积物计算泥石流容重的方法研究[J].沉积学报,2008,26(5):789-796.
- [4] 潘 懋,李铁锋.灾害地质学[M].北京:地质出版社,2000.
- [5] 罗 健,黄惠芬,秦国强.天水市龙王沟泥石流成因和运动特征及危害性[J].人民长江,2018,49(S1):75-80.
- [6] 乔建平,黄 栋,杨宗信,等.汶川地震极震区泥石流物源动储量统计方法讨论[J].中国地质灾害与防治学报,2012,23(2):1-6.
- [7] 曹 晨,余 斌,马二龙,等.四川汶川县佛堂坝沟“7·10”泥石流调查研究[J].泥沙研究,2019,44(1):38-43.
- [8] 李少达.强震区斜坡地质灾害遥感信息提取与评价关键技术研究[D].成都:成都理工大学,2011.
- [9] 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.
- [10] 亓 星,余 斌,吴雨夫,等.苦水沟泥石流堵塞小沟河可能性分析与防治对策[J].水电能源科学,2013,31(5):145-148.
- [11] 余 斌,王 涛,朱 渊.浅层滑坡诱发沟谷泥石流的地形和降雨条件[J].水科学进展,2016,27(4):542-550.
- [12] 余 斌.稀性泥石流的平均运动速度研究[J].防灾减灾工程学报,2009,29(5):541-548.
- [13] 金文祥.西藏定日县达仓沟泥石流危险性评价[D].成都:成都理工大学,2019.
- [14] 王纳纳,唐 川.基于FLO-2D的都江堰市龙池镇黄夹沟泥石流数值模拟[J].地质灾害与环境保护,2014,25(1):107-111.