

汉源县范家沟泥石流拟设工程治理效果研究

翟兆斌, 胡卸文, 刘波, 席传杰

(西南交通大学, 四川 成都 610031)

摘要:范家沟 1998 年至 2020 年间先后暴发 6 次规模不等的泥石流灾害, 对沟口工业园区造成严重威胁, 因此, 有必要对拟设拦砂坝工程治理效果进行研究。本文分析了范家沟的地质条件, 利用 FLO-2D 模拟不同降雨频率下泥石流的运动堆积过程, 比较了自然工况及治理工况下拟设拦砂坝防治效果。结果表明: 在自然工况下泥石流能冲至沟口工业园区内; 在治理工况下, 拟设拦砂坝能有效拦截泥石流并使泥石流停积在沟道内。本次模拟结果可对拦砂坝的设计提供一定参考。

关键词: FLO-2D; 范家沟; 泥石流; 数值模拟; 拦砂坝

中图分类号: P642.23, P642.3, P642.21

文献标识码: A

文章编号: 1001-2184(2022)05-0117-06

Study on Effect of the Planned Engineering for Debris Flow Control in Fanjia Gully, Hanyuan

ZHAI Zhaobin, HU Xiewen, LIU Bo, XI Chuanjie

(Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan 610031)

Abstract: From 1998 to 2020, 6 times of debris flow disasters occurred in Fanjia Gully, which posed a serious threat to the industrial park on gully mouth. Therefore, it is necessary to study the treatment effect of the proposed check dam project. This paper analyzes the geological conditions of Fanjia Gully, uses FLO-2D to simulate the moving accumulation process of debris flow under different rainfall frequencies, and compares the control effects of the proposed check dam under natural conditions and treatment conditions. The results show that debris flow can reach the industrial park on gully mouth under natural conditions. Under treatment condition, the proposed check dam can effectively intercept debris flow and retain debris flow in the gully. The simulation results can provide certain reference for the design of check dam.

Key words: FLO-2D; Fanjia Gully; Debris flow; Numerical simulation; Check dam

0 引言

泥石流是多发生在山区的含有大量固体物质(泥、砂、石)的特殊洪流, 为高浓度的液体、固体相混合流^[1]。其具有快流速、大流量、强破坏以及突发性等特点, 一旦发生将给人民生命财产安全带来巨大威胁^[2]。

随着计算机技术的发展, 目前数值模拟越来越多地被应用于泥石流动力学特征研究及工程治理效果的评价。如刘丁毅等^[3]运用 CFX 对桃花沟泥石流沟口漫淤范围进行了预测, 分析了泥石流对沟口场地的影响; 刘波等^[4]运用 RAMMS 对巴曲冰湖溃决型泥石流的演进过程进行了模拟研究并提出了相应的工程治理措施建议; 杜雪剑等^[5]运用 FLO-2D 对红椿沟进行了数值模拟,

对已建的工程措施治理效果进行了研究评判; 丛凯等^[6]运用 FLO-2D 对泥湾沟加设工程措施前后工况的泥石流运动效果进行了模拟比较, 这些研究均取得了一定的实际效果。

范家沟泥石流属于高频泥石流, 目前处于发展期。2020 年夏季因多日的连续强降雨, 于 2020 年 7 月 25 日及 8 月 17 日先后暴发两次泥石流灾害, 造成已建的两道拦砂坝淤满。将来若再次发生极端强降雨极易引发大规模泥石流, 对沟口工业园区构成严重威胁。采用 FLO-2D, 结合研究区地形数据、雨量数据针对雅安市汉源县范家沟泥石流模拟自然工况 20 a、50 a、100 a 一遇不同降雨频率下泥石流的运动过程, 对比拟设拦砂坝条件下的数值模拟结果, 对拟设工程的防治效果进行评价。

收稿日期: 2022-04-18

1 FLO-2D基本原理

FLO-2D是一种体积守恒模型,规定了东、南、西、北及东北、东南、西北、西南八个流动方向,流体运动特征和堆积特征主要由流体流动速度、流量、流深、流动范围四个指标表示^[7]。FLO-2D实现四个指标的原理为:将数字高程模型划分为若干方形小单元,运动方程(式1、2)和连续方程(式3)可计算出每个小单元的流深、流量,通过流深数值确定流动范围,流体动量方程可以确定相邻单元之间流体的流速^[8]。

$$s_{fx} = s_{ox} - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{\partial u}{g \partial t} - u \frac{\partial u}{g \partial x} - v \frac{\partial y}{g \partial x} \quad (1)$$

$$s_{fy} = s_{oy} - \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{\partial v}{g \partial t} - u \frac{\partial v}{g \partial x} - v \frac{\partial v}{g \partial y} \quad (2)$$

式中 g 为重力加速度; s_{fx} 、 s_{fy} 为 X、Y 方向摩擦坡降; s_{ox} 、 s_{oy} 为 X、Y 方向床底坡降。

$$i = \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} \quad (3)$$

式中 t 为流体运动时间; h 为流深; i 为有效雨

强; u 为 X 方向流速; v 为 Y 方向流速。

2 范家沟泥石流发育特征

2.1 流域概况

范家沟位于汉源县东北方向 28 km 万里乡建坪村,白岩河左岸,沟口地理坐标:东经 $102^{\circ}44'11.9''$,北纬 $29^{\circ}24'16.9''$,流域面积 9.15 km^2 ,最高点为东侧分水岭处,高程为 2 903 m,最低点为沟口与白岩河交界处,高程为 1 523 m,相对高差 1 380 m,主沟道长 4.56 km,平均纵比降 204‰,谷坡陡峻,两岸坡度一般为 $25^{\circ} \sim 60^{\circ}$,局部可达 70° ,岸坡基岩裸露较多,沟道两岸植被发育,以矮灌木丛为主,覆盖率达 80%。

流域内河谷地貌由“V”型峡谷逐渐向“U”型过渡,沟道宽 10~40 m。沟道流域中上部分叉为两条沟,呈“Y”字型展布,其中支沟名“阴沟”,沟道长 2.32 km,沟道平均纵比降 270‰,范家沟流域示意图见图 1。

流域内主要出露地层为震旦系、第四系,震旦

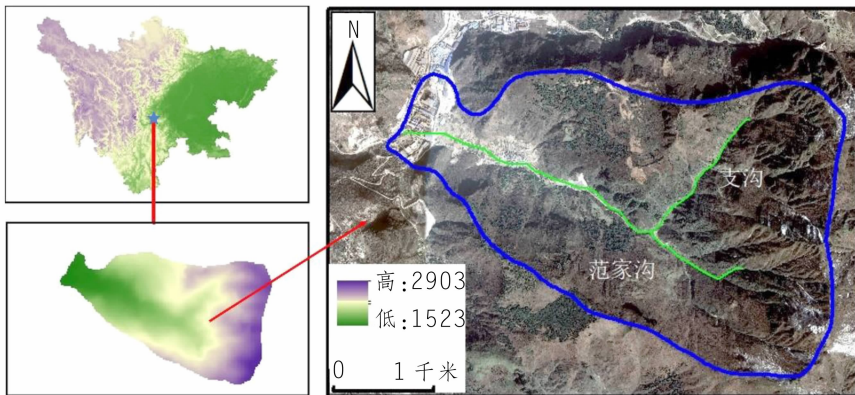


图1 范家沟流域示意图

系主要为陡山沱组灰岩,第四系主要为滑坡堆积层(Q_4^{del})、残坡层($Q_4^{\text{el+dl}}$)、泥石流堆积层(Q_4^{sef})。

2.2 物源及水源条件

根据现场调查,流域内物源来源主要为崩滑堆积、坡面侵蚀和沟道侵蚀堆积,结合现场调查及遥感影像解译分析,范家沟总静储量约为 432.43 万 m^3 ,总动储量约 27.91 万 m^3 。

范家沟泥石流的水源主要是大气降雨,短时间强降雨所形成的地表径流是引发泥石流灾害的主要水源。根据《四川省暴雨参数统计图集》2010 年版内的暴雨等值线图,范家沟流域的年平均降

雨量为 730.8 mm,10 min、1 h、6 h、24 h。多年最大暴雨量平均值分别为 12 mm、32 mm、47 mm、62 mm,在 50 a 一遇降雨条件下,10 min、1 h、6 h、24 h 雨量分别可达 25.8 mm、71.9 mm、116.8 mm、149.8 mm。据吴积善等^[9]对四川省西部山区泥石流沟的研究,四川山区泥石流激发雨量一般为一次 48~55 mm 左右或者 10 min 降雨量达到 8~12 mm。同时,由于沟谷陡峻的地形利于降水的汇集,强降雨下范家沟引发泥石流灾害的条件是完全具备的。

3 模拟条件设置

3.1 拟设拦砂坝位置及模拟参数选取

在 2020 年“8·17”泥石流暴发后,对范家沟原有工程进行了修缮治理。基于施工便利及经济原因,计划将原有的 2 号拦砂坝拆除,在其上游 30 m 处新修一道拦砂坝(新 2 号拦砂坝),让其与已存的 1 号拦砂坝共同拦截上游冲出的固体物质,表 1 与图 2 是范家沟拟设拦砂坝相关参数及范家沟位置示意图。

表 1 范家沟拟设拦砂坝相关参数

坝编号	有效坝高 /m	坝顶长 /m	坝顶宽 /m	基础埋深 /m	设计库容 /m ³
1 号坝	8	51	2.5	3.5	1.30×10 ⁴
2 号坝	10	68	2.0	2.0	4.63×10 ⁴

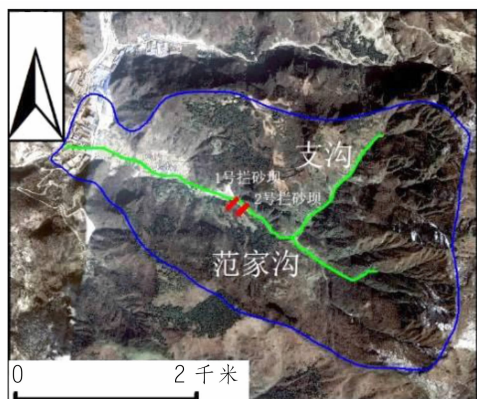


图 2 范家沟拦砂坝位置示意图

根据 FLO-2D 手册,结合范家沟泥石流基本地质条件,泥石流数据值模拟采用参数见表 2。

表 2 泥石流数值模拟采用参数

参 数	取值	
曼宁系数 n	0.12	
体积浓度 C_V	主沟	0.61
	支沟	0.58
宾汉屈服应力	α_1	0.811
	β_1	13.72
宾汉粘滞系数	α_2	0.004 62
	β_2	11.24
层流阻滞系数 K	2 100	

C_V 为体积浓度,取值参考 FLO-2D 手册^[10]; K 为层流阻滞系数,取值参考 FLO-2D 手册;宾汉屈服应力及宾汉黏滞系数参考 O'Brien 建议值及 FLO-2D 手册取值。

3.2 清水流量过程线的确定

FLO-2D 模拟时需选定集水点,即泥石流暴发的起萌点,一般选取在主沟道与支沟道坡度下

降快、利于汇水的地方,本次选取的集水点位置在清水动力区与形成区的交界,泥石流集水点示意图见图 3。

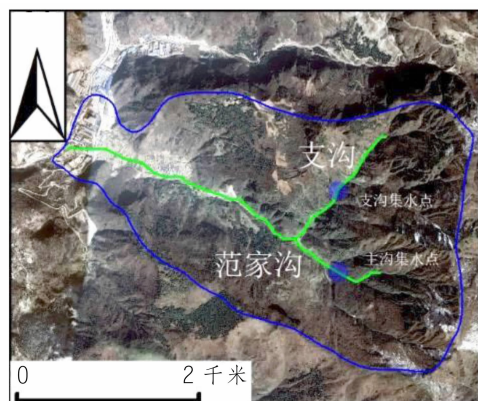


图 3 泥石流集水点示意图

在集水点处需输入清水洪峰流量过程线,该过程线需在清水流量的基础上加以处理。计算清水洪峰流量时一般采用雨洪修正法^[11],计算公式如下:

$$Q_p = 0.278\psi \frac{S}{\tau^n} F \quad (4)$$

式中 Q_p 为频率为 p 的暴雨洪水设计流量, m^3/s ; ψ 为洪峰径流系数; S 为暴雨雨力, mm/h ; n 为暴雨指数; F 为流域面积, km^2 ; τ 为流域汇流时间, h 。

求得不同降雨频率下主沟集水点暴雨洪峰流量见表 3,不同降雨频率下支沟集水点暴雨洪峰流量见表 4。

表 3 不同降雨频率下主沟集水点暴雨洪峰流量

设计频率 p / %	5	2	1
暴雨雨力 S / $mm \cdot h^{-1}$	71.90	80.58	89.17
暴雨洪峰流量 / $m^3 \cdot s^{-1}$	30.67	39.04	45.43

表 4 不同降雨频率下支沟集水点暴雨洪峰流量

设计频率 p / %	5	2	1
暴雨雨力 / $mm \cdot h^{-1}$	71.90	80.58	89.17
暴雨洪峰流量 / $m^3 \cdot s^{-1}$	24.55	31.39	36.63

在计算得到范家沟的清水洪峰流量后,根据泥石流历时,可以运用五边形概化法则求取清水流量过程线。五边形概化法是把一次泥石流暴雨洪峰流量的 1/4 赋予暴发时间的 1/3 处,把一次泥石流暴雨洪峰流量的 1/3 赋予暴发时间的 2/3 处^[12],进而整体绘制出泥石流暴发的清水流量过程线,五边形概化法的清水流量过程曲线见图 4。

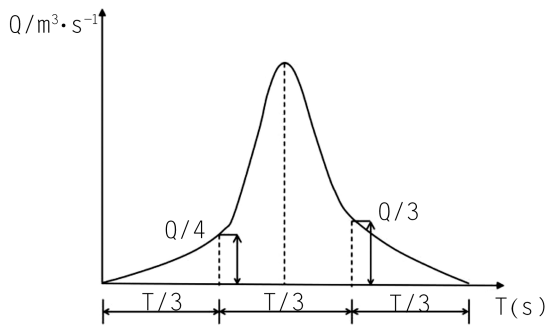


图4 五边形概化法的清水流量过程曲线

暴雨洪水在混合泥沙石块后在运动过程中会产生流量放大效应,因此泥石流的洪峰流量应为暴雨洪峰流量乘以膨胀系数BF,BF计算公式如下:

$$BF = \frac{1}{(1 - C_V)} \quad (5)$$

式中 C_V 为泥石流体积浓度,%。

计算得出主沟膨胀因子BF为2.57,支沟膨胀因子BF为2.42,不同降雨频率下主沟集水点泥石流流量见表5,不同降雨频率下支沟集水点泥石流流量见表6。

表5 不同降雨频率下主沟集水点泥石流流量

设计频率 p / %	5	2	1
暴雨洪峰流量 / $m^3 \cdot s^{-1}$	30.67	39.04	45.43
泥石流洪峰流量 / $m^3 \cdot s^{-1}$	78.82	100.33	116.76

表6 不同降雨频率下支沟集水点泥石流流量

设计频率 p / %	5	2	1
暴雨洪峰流量 / $m^3 \cdot s^{-1}$	24.55	31.39	36.63
泥石流洪峰流量 / $m^3 \cdot s^{-1}$	56.41	75.86	88.51

3.3 模拟过程

该次数值模拟的过程为:(1)将处理的地形数据在ArcGIS中转换为可供FLO-2D软件识别的ASCII文件;(2)在FLO-2D中将ASCII文件导入,然后将流域划分为 $15\text{ m} \times 15\text{ m}$ 的网格;(3)在集水点处输入清水流量过程线,再输入各项参数,模拟时间与当次降雨强度出现峰值的时间相当。

4 泥石流数值模拟结果

4.1 自然工况下模拟结果

由图5可知,在20 a一遇降雨条件下时,泥石流冲至沟口工业园区边缘,沟道内最大流速为4.7 m/s。在50 a一遇降雨条件下时,泥石流继

续向前流动,漫流进工业园区内泥石流的平均流速为0.85 m/s,沟道内最大流速为5.1 m/s。在100 a一遇降雨条件下,泥石流漫流在工业园区内的范围增大,最远冲至白岩河河岸,园区范围内泥石流平均流速为0.78 m/s,沟道内最大流速达5.5 m/s。

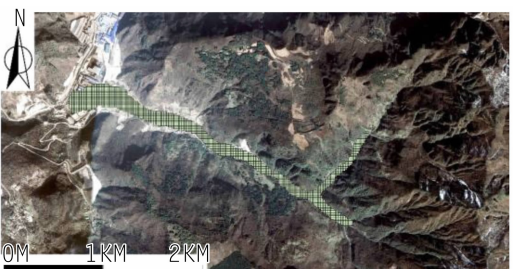
在20 a一遇降雨条件下时,沟道内最大厚度为3.3 m。在50 a一遇降雨条件下时,沟道内最大堆积厚度为3.6 m;淤积在工业园区内的最大厚度为0.9 m,平均厚度约0.42 m。在100 a一遇降雨条件下,沟道内最大堆积厚度为3.8 m,淤积在工业园区内的最大厚度为1.2 m,平均厚度约0.51 m。



(a)20年一遇频率(5%)



(b)50年一遇频率(2%)



(c)100年一遇频率(1%)

图5 自然工况下不同频率范家沟泥石流运动堆积范围

由图6可知,在20 a一遇降雨条件下,沟口堆积区的面积约 $6.03 \times 10^4\text{ m}^2$,堆积区平均厚度为0.53 m,最大厚度1.16 m,堆积区的冲出方量

约 $3.20 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。在 50 a 一遇降雨条件下时,沟口堆积区的面积约 $8.88 \times 10^4 \text{ m}^2$,堆积区平均厚度为 0.55 m,最大厚度 1.34 m,堆积区的冲出方量约 $4.88 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。在 100 a 一遇降雨条件下,沟口堆积区的面积约 $13.16 \times 10^4 \text{ m}^2$,平均厚度为 0.59 m,最大厚度 1.48 m,堆积区的冲出方量约 $7.76 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。可得出在 3 种降雨频率下范家沟泥石流的堆积区面积、冲出方量、平均厚度和最大厚度均随降雨频率的增大而增大,范家沟数值模拟堆积区特征见表 7。

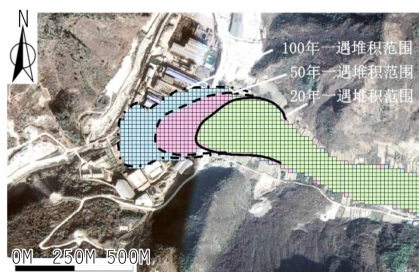


图 6 自然工况下不同频率范家沟泥石流堆积区情况

表 7 范家沟数值模拟堆积区特征

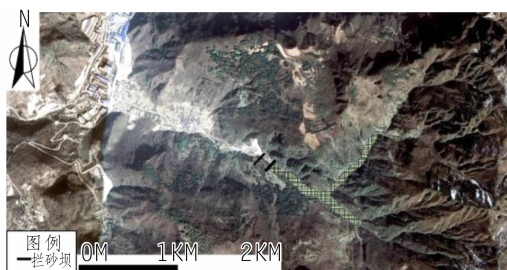
降雨频率 /%	堆积区面积 / m^2	冲出方量 / m^3	平均厚度 /m	最大厚度 /m
5	6.03×10^4	3.20×10^4	0.53	1.16
2	8.88×10^4	4.88×10^4	0.55	1.34
1	13.16×10^4	7.76×10^4	0.59	1.48

4.2 治理工况下泥石流模拟结果

由图 7 可知,泥石流在 20 a 及 50 a 一遇降雨条件下由于受到拦砂坝的阻挡作用,泥石流流速在接近拦砂坝时降低至坝前停止运动,在到达拦砂坝前流动过程中泥石流最大流速分别为 4.6 m/s 和 5.1 m/s。在 100 a 一遇降雨条件下泥石流在到达 2 号坝前流动过程中最大流速为 5.5 m/s,到达 2 号拦砂坝时由于受到阻挡,漫坝之后流速降低。同时又由于坝前泥石流的回淤效果致使沟道宽度增大,过水范围增加,同样的流量下,流速自然也会相应减小,在 2 号坝到 1 号坝间最大流速为 4.6 m/s,当漫过 1 号坝后流速则降至平均 1.8 m/s。

在 20 a 及 50 a 一遇降雨条件下,淤积在 2 号拦砂坝后的最大堆积厚度分别为 7.9 m 和 9.7 m,未超过拟设拦砂坝的有效高度。在 100 a 一遇降雨条件下在 2 号拦砂坝后的最大堆积厚度为 10.7 m,在 1 号坝后的最大堆积厚度为 8.0 m,泥

石流在漫过 1 号坝之后堆积厚度明显变薄,平均在 0.6 m 左右。



(a) 20 a 一遇频率(5%)



(b) 50 a 一遇频率(2%)



(c) 100 a 一遇频率(1%)

图 7 治理工况下不同频率范家沟泥石流运动堆积范围

4.3 拦挡工程治理效果分析

由于 FLO-2D 在模拟时无法考虑泥石流对拦砂坝体结构的损坏,因此对拦挡措施的评价主要基于拦砂坝后泥石流的淤积情况。

针对 20 a 及 50 a 一遇降雨条件下泥石流主要分析 2 号拦砂坝后的淤积数据,对 2 号坝后的平均堆积厚度和堆积物方量进行统计,20 a 与 50 a 一遇降雨频率下 2 号拦砂坝堆积特征见表 8。可以看出在 20 a 与 50 a 一遇降雨频率下 2 号坝后的堆积总量是符合设计库容的,说明拟设拦砂坝对于一次 20 a 或 50 a 一遇的泥石流暴发具有有效的拦挡作用,可使泥石流在 2 号坝后被全部拦截。针对 100 a 一遇降雨条件下泥石流主要分

析1、2号拦砂坝后淤积数据,同样对坝后的平均堆积厚度和堆积物方量进行统计,100 a一遇降雨频率下拦砂坝堆积特征见表9。在100 a一遇降雨条件下,泥石流在1号坝与2号坝后的堆积总量基本达到拟设计库容总量,共计拦蓄 $5.78 \times 10^4 \text{ m}^3$,在淤满2道拦砂坝之后,漫坝后的泥石流堆积深度及流动速度都明显降低,最终堆积在下游沟道中,并未流至沟口。因此,拟设的拦挡措施对100 a一遇的泥石流也具有良好的防治效果。

表8 20 a与50 a一遇降雨频率下2号拦砂坝堆积特征

拦砂坝	设计库容 /m ³	降雨频率 /%	平均厚度 /m	堆积总量 /m ³
2号坝	4.63×10 ⁴	5	5.1	2.26×10 ⁴
		2	5.5	3.23×10 ⁴

表9 100 a一遇降雨频率下拦砂坝堆积特征

拦砂坝	设计库容 /m ³	降雨频率 /%	平均厚度 /m	堆积总量 /m ³
1号坝	1.30×10 ⁴	1	4.6	1.39×10 ⁴
2号坝	4.63×10 ⁴		5.6	4.39×10 ⁴

5 结语

范家沟泥石流属于发展期泥石流,流域内物源丰富,降雨充足,通过数值模拟发现在自然工况下泥石流会冲至沟口工业园区内;在治理工况下拦砂坝对于不同降雨频率下的范家沟泥石流能够起到有效的防治效果。

自然工况下,在20 a一遇降雨条件下模拟,沟口堆积区未至工业园区内;在50 a一遇降雨条件下模拟,沟口堆积区范围扩大至工业园区内;在100 a一遇降雨条件下模拟,堆积范围明显扩大,泥石流最远冲至白岩河岸。

治理工况下,在20 a及50 a一遇降雨条件下模拟,泥石流均在2号拦砂坝后被拦截;在100 a一遇降雨条件下模拟,泥石流淤满1号及

2号拦砂坝,之后由于拦砂坝的拦挡作用,漫坝后泥石流流速降低,最终堆积下游沟道中,未流动至沟口。

参考文献:

- [1] 蒋爵光. 铁路工程地质学[M]. 1版. 北京: 中国铁道出版社, 1991:68-69.
- [2] 周必凡. 泥石流防治指南[M]. 科学出版社, 1991.
- [3] 刘丁毅, 胡卸文, 杨相斌, 等. 康定市桃花沟泥石流发育特征及防治对策[J]. 四川水力发电, 2021, 40(2): 130-136.
- [4] 刘波, 胡卸文, 何坤, 等. 西藏洛隆县巴曲冰湖溃决型泥石流演进过程模拟研究[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(5): 150-160.
- [5] 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.
- [6] 丛凯, 李瑞冬, 毕远宏, 等. 基于FLO-2D模型的泥石流治理工程效益评价[J]. 西北地质, 2019, 52(3): 209-216.
- [7] 陈安强. 北川县杨家沟泥石流发育特征及危险性评价[D]. 成都: 成都理工大学, 2019.
- [8] O'Brien J S, Julien P J, Fullerton W T. Two-dimensional water flood and mudflow simulation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1993, 119(2): 244-261.
- [9] 吴积善, 田连权, 康志成, 等. 泥石流及其综合治理[M]. 科学出版社, 1993.
- [10] O'Brien J S. FLO-2D Reference Manual[Z]. 2009.
- [11] 沈跃明, 陈天良, 肖公建, 等. 四川省中小流域暴雨洪水计算手册[M]. 1版. 成都: 四川省水利电力厅, 1984: 8-27.
- [12] 杨春阳. 武都区典型泥石流活动机理与启动判据研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2020.

作者简介:

- 翟兆斌(1997-), 男, 甘肃白银人, 硕士研究生, 从事地质灾害研究工作;
- 胡卸文(1963-), 男, 浙江金华人, 博士, 教授, 博士生导师, 从事工程地质、环境地质方面的教学研究工作;
- 刘波(1994-), 男, 四川广元人, 博士研究生, 从事地质灾害研究工作;
- 席传杰(1995-), 男, 河北邢台人, 博士研究生, 从事地质灾害研究工作.

(责任编辑: 吴永红)

上接第77页)

参考文献:

- [1] 水电工程砂石加工系统设计规范, DL/T5098-2010[S].
- [2] 水利电力部水利水电建设总局组织. 水利水电施工组织设计手册[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1990.
- [3] 水利水电工程施工组织设计规范, SL303-2017[S].

[4] 水工混凝土施工规范, SL677-2014[S].

[5] 混凝土结构工程施工质量验收规范, GB 50204-2015[S].

作者简介:

- 龙波(1970-), 男, 重庆秀山人, 高级工程师, 从事水利水电工程施工技术与管理工作.

(责任编辑: 李燕辉)