

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2019.03.019

基于 FLO-2D 模型的泥石流治理工程效益评价

丛凯,李瑞冬,毕远宏

(甘肃省地下水工程及地热资源重点实验室,甘肃省地质环境监测院,甘肃 兰州 730050)

摘要:泥湾沟为白龙江一级支沟,沟内地质构造发育,固体松散物质丰富,历史上曾爆发多次大规模泥石流灾害,属典型暴雨型黏性泥石流。为更好的对该工程效益进行评价,本次采用 FLO-2D 模型对其治理前后不同频率的泥石流运动、堆积情况及危险性进行模拟对比。研究表明,防治工程的布设能有效拦截流域内松散物质,拦截方量约为 $3.97 \times 10^4 \text{ m}^3$,回淤反压稳固坡体效果更加明显;泥石流流速控制作用明显,1%降雨频率下到达沟口处流速为 2.7m/s,且呈沿拦挡工程逐级减小的趋势。在松散物质及流速得到有效控制的情况下,泥石流冲出方量减少,堆积范围缩小,缩小比例最大达 84%。该方法不仅有利于评价泥石流治理效益,也对泥石流治理方案的提出提供有效的数据支持,是值得借鉴与参考的一种评价方法。

关键词:泥湾沟;FLO-2D;数值模拟;工程效益评价

中图分类号:P642

文献标志码:A

文章编号:1009-6248(2019)03-0209-08

Benefit Evaluation of Debris Flow Control Engineering Based on the FLO-2D Model

CONG Kai, LI Ruidong, BI Yuanhong

(Key Laboratory of Groundwater Engineering and Geothermal Resources, Gansu Province,
Geological Environment Monitoring Institute of Gansu Province, Lanzhou 730050, Gansu, China)

Abstract: The Niwangou ditch is the first tributary of Bailong River, where the geological structures are very developed and the loose materials are abundant. In history, there happened several large-scale debris flow disasters, which belong to typical rainstorm viscous debris flow. For the better benefit evaluation of debris flow control engineering, the FLO-2D model has been applied to simulate and compare the debris flow movement, accumulation, and risk under different frequency before and after the treatment. The results show that the loose material originally accumulated at the exit of gully will be intercepted in the dam body with the volume of $3.97 \times 10^4 \text{ m}^3$ by the control engineering. Moreover, the flow velocity of debris flow can be effectively controlled, and the maximum flow velocity at the exit of gully is 2.7m/s when the rainfall frequency is 1%. And this engineering will limit the accumulation range of debris flow, the reduction ratio can be greater than 84%. The method is not only to the benefit of evaluation of debris flow control engineering, it also provides the effective data support to the treatment scheme. Overall, the

收稿日期:2019-02-05;修回日期:2019-05-30

基金项目:国土资源部公益性行业科研专项“建设生态安全屏障多地貌典型区地质灾害防治示范”(201511053),甘肃省地质灾害应急能力建设科研专项、甘肃省地质灾害监测与气象风险预警关键技术研究(2017121003)

作者简介:丛凯(1986-),工程师,主要从事地质灾害防治方面的工作。E-mail:254690133@qq.com

evaluation method is a worth reference by researchers.

Keywords: Niwangou ditch; FLO-2D; numerical simulation; the benefit evaluation of control engineering

泥石流主要是由强降雨或冰雪消融形成的高浓度、宽级配的多相非均质流体,是地形地貌、气候、土壤等自然条件和人类破坏山区自然环境等因素综合作用的结果(唐兴邦等,2000)。由于其具有强大的破坏力,往往在很短暂的时间内造成工程设施、农田和生命财产的严重损失,所以是威胁山区居民生存和工农业建设的一种地质灾害(李志毅等,2012)。

FLO-2D模型是二维洪水演算模型,该模型可以模拟流体在复杂的地形和城镇中的运动堆积情况。该模型可以对多种复杂的流体进行较好的模拟,包括泥石流、水流和泥石流。目前,该软件已广泛应用于单沟泥石流模拟,台湾学者 Lin 运用 FLO-2D 对 Songhe Stream 进行了风险性评价(LIN J Y et al., 2011);唐得胜运用 FLO-2D 模型对龙溪河流域进行不同降雨频率下泥石流数值模拟研究(唐得胜,2014);夏添利用 FLO-2D 对红椿沟泥石流进行数值模拟,并进行泥石流危险性分析,进而绘制出红椿沟泥石流危险性分区图(夏添,2013)。这些研究虽然得到了很好的实际效果,但只是对自然条件下流域本身的性质做好评价及预测,对存在治理工程的流域并不适用。

本研究对陇南市武都区两水镇后坝村泥湾沟自然条件下 1%、2%、5% 频率下的暴雨泥石流情况进行模拟,也对已修建工程措施条件下的泥石流情况进行对比分析。计算结果对泥石流工程效益进行了评价,其为泥石流治理方案的比选提供有益参考与借鉴。

1 研究区概况

泥湾沟位于陇南市武都区两水镇后坝村,流域相对高差 1 479 m,流域面积约为 11.53 km²,沟道两岸地形陡峻,主沟长为 7.66 km,平均纵比降 193.2%。轮廓度为 0.66 km/km²,流域完整系数为 0.2,主沟床弯曲系数为 1.35,流域发育程度为 0.07,流域切割密度为 4.42 km/km²,泥沙补给段长度比为 5.15。

流域表层多为黄土覆盖,下伏强风化软硬相间

岩组,中下游流域分水岭平台及缓坡区多老滑坡堆积体及类黄土覆盖,基岩岩性成分主要为板岩、千枚岩、灰岩,褶曲、揉皱现象明显,岩体风化破碎,节理裂隙发育,风化卸荷作用强烈,使沟道两岸滑坡、崩塌等不良地质现象极为发育,水土流失严重。

泥湾沟沟道弯曲、狭窄,沟底宽为 8~20 m,向下游逐渐变宽,后坝村一带形成扇形泥石流固体物质堆积区,自上而下可分为泥石流形成区(面积为 8.84 km²、纵比降为 298.2%)、流通区(面积为 1.56 km²、纵比降为 51.8%)和堆积区(面积为 1.13 km²、纵比降为 36.8%)。

形成区(物源区):流域周边断裂构造发育,新构造活动强烈,走向为 NWW 转 EW 向的尹家殿沟逆断层从流域源头穿行而过。经实地调查结合遥感解译物源区共发育 34 处滑坡,体积为 $4\,512.8 \times 10^4 \text{ m}^3$,坡面松散物源体积达 $15.69 \times 10^4 \text{ m}^3$,沟道物源体积达 $3.65 \times 10^4 \text{ m}^3$,泥石流沟松散物源量共计 $20.6 \times 10^4 \text{ m}^3$,人类活动扰动形成的弃渣碎石土体积达 $15.61 \times 10^4 \text{ m}^3$,泥湾沟流域松散固体物源总量为 $4\,564.72 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

流通区:流通区沟谷以“V”型为主,沟谷狭窄,流通区中上游谷宽为 6~20 m,下游谷宽为 3~7 m,沟道曲折多湾,沟道冲刷深度为 0.3~1.3 m。

堆积区:堆积区整体呈扇形状,长约为 739.1 m,宽约为 1 732.2 m,面积约为 1.13 km²。地势较为平坦,从扇腰向扇边缘坡度逐渐变缓,后坝村及两水镇部分政府办公场所 520 多户 2 600 人坐落在沟口堆积扇上,村民多居住在原始沟道左侧,从出口到扇体中前部多居民,前部至白龙江及扇体右侧多耕地。现在修建排导槽从出口垂直原始沟道向 NW 向通入白龙江。在堆积扇后缘有甘川公路 212 国道穿过,在堆积扇前缘有武罐高速和兰渝铁路近垂直于堆积扇而过。

据调查,历史上该沟曾先后于 1956 年、1967 年、1984 年、1998 年、2005 年、2013 年发生过 6 次较大规模的泥石流,泥石流灾害共造成毁房 50 余间,淤埋农田 10 余公顷,损失牲畜 15 头,冲毁 212 国道 200 余米,直接经济损失达 420 余万元。

2 材料与方法

2.1 基本原理

FLO-2D 软件采用的是非牛顿体与中央有限差分的数值方法,利用软件把数字高程模型(DEM)划分为相同大小和规则的网格,每个网格只有一个单一的高程值、粗糙系数、流动面积和宽度折减因子,这是数值模拟的地形基础因子。以每个网格为单位来计算流动深度,进而获取流体流量;为了保持泥石流中水和土石的体积比例,该模型的每一个网格均考虑了质量守恒守则,即在每个计算步长之内,模型根据各个网格中泥石流流体的体积浓度的改变,计算每个网格内流体中的水和土石体积的变化,但其总量保持不变。经过以上的计算过程,在高体积分浓度的流体速度减缓甚至停滞,当随后低体积分浓度的流体通过时,2种流体会发生混合并继续发生流动。

2.2 假设条件

软件操作需在以下假设条件下进行:①假设流体中水压分布状态为静水压力分布。②在流体每个计算步长之间,假设流体是属于稳定均匀的流动。③假设模拟中的流体满足其粘滞系数方程式。④假设每一个网格的高程及参数是唯一的。⑤假设同一网格内的粗糙度等参数保持一致。

2.3 限制条件

①FLO-2D 模型中泥石流沟谷的沟道底部是固定的,无法模拟泥石流下切侵蚀和侧蚀对地形的影响。②正常情况下无法模拟泥石流的涌浪现象。③需要设计流量过程线,模拟过程中无法加入新的物源。

2.4 基础材料准备

本研究收集了泥湾沟 1:10 000 比例尺 DEM 数据和高精度遥感影像图。之后需要将 DEM 转化为 FLO-2D 数值模拟软件能够识别的 ASCII 文件,这部分工作需要运用 ArcGIS 中的工具箱的转换功能进行文件格式的转换。在 FLO-2D 中新建项目,将带有高程数据的 ASCII 文件加载进去作为基础地形,然后对整体地形进行计算网格划分,本次研究选取长宽均为 5 m 的正方形网格。在划分计算网格完毕后,可以加载流域边界的 shape 文件对每条泥石流沟的流域面积进行划分,以便确定模拟的计

算区域。最后对选定的计算区域进行高程赋值,从而让 FLO-2D 的基础地形上每一个计算网格都获得各自的高程。

3 结果与分析

3.1 自然条件下泥石流灾害模拟

本次降雨过程模拟主要采用暴雨洪峰流量计算方法进行,在收集以往 100 年一遇(1%)、50 年一遇(2%)、20 年一遇(5%)降雨资料的基础上,对流域内降雨过程的清水流量过程进行模拟,采用配方法计算泥石流流量。通过 Matlab 软件编程,确定流域清水流量过程曲线(图 1)。

泥石流流量按配方法计算,计算公式为如下。

$$Q_C = Q_B(1 + \varphi)D$$

式中: Q_B ——一定重现期的清水流量(m^3/s);
 Q_C ——与 Q_B 相同重现期的泥石流流量(m^3/s);
 D ——堵塞系数,取 1.2;

φ ——泥石流流量增加系数, $\varphi = \frac{\gamma_c - 10}{\gamma_H - \gamma_c}$;

γ_c ——泥石流重度(KN/m^3),取 25;

γ_H ——泥石流颗粒重度,取 26 KN/m^3 。

泥湾沟流域内地质灾害发育,存在大量的松散堆积物,通过现场调查,参考《泥湾沟泥石流防治工程勘查报告》(马富存等,2008),本研究选用泥石流重度为 25 kN/m^3 ,固体堆积物平均重度为 2.6 kN/m^3 。结合 FLO-2D 使用手册和野外勘查中泥石流流体的特征,最终确定体积浓度 C_v 为 62%。根据查阅勘察资料和现场实地调查类比,最终判断流域曼宁系数取值在 0.2~0.35。

宾汉屈服应力以及宾汉黏滞系数(τ, η)的取值参考 OBRIEN(1988)建议值。层流阻滞系数(K)结合实地调查,并参考 WOOLHISER(1795)建议值进行赋值(表 1)。

针对泥湾沟泥石流灾害的暴发过程,得到在 3 种重现周期的流通、堆积情况($P=5\%, P=2\%, P=1\%$)。获得泥石流发生过程中泥石流堆积范围和堆积厚度、流体流动速度等数据,模拟结果见图 2、图 3。可以看出,泥石流堆积范围随着重现周期的增大而增大。堆积深度从堆积扇顶部到前缘逐渐增加,堆积形状呈黏性泥石流的特征,堆积扇中前端

区域一般为最深堆积区域。泥石流堆积区两翼的深度一般小于泥石流堆积区的中部。在地形上,堆积

扇偏向下游的部分堆积深度较高,偏向上游的部分堆积深度较低(表 2)。

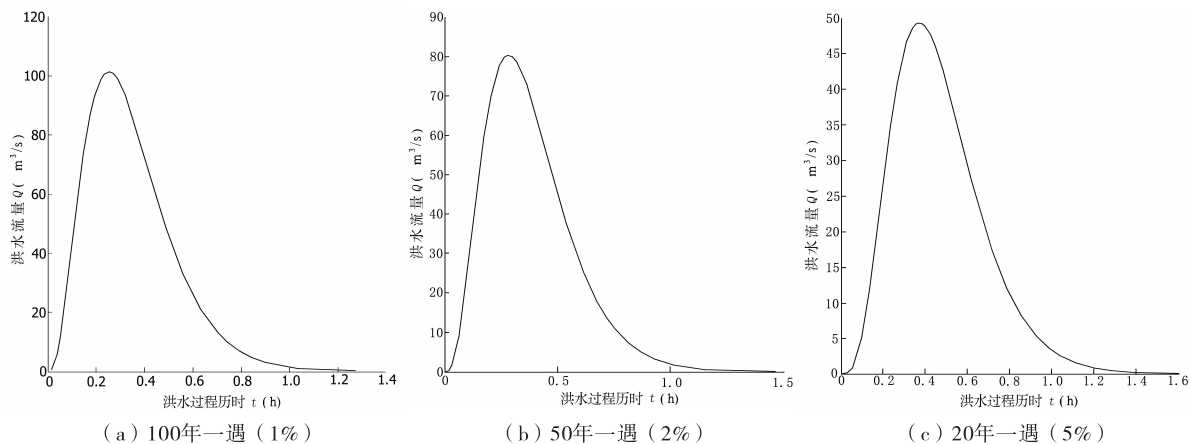


图 1 泥湾沟不同频率洪水过程曲线图

Fig. 1 The flood process curve of Niwangou Ditch with different frequencies

表 1 泥石流参数取值表

Tab. 1 Values of parameters for debris flow

曼宁系数 n	体积浓度 C_v	重度 G_s	宾汉降服应力		宾汉粘滞系数		层流阻值系数 K
			α_1	β_1	α_2	β_2	
0.2	0.62	2.6	0.03	14.42	0.000 3	25	3 500

表 2 自然条件下不同频率泥石流模拟结果一览表

Tab. 2 Simulation results of debris flow with different frequencies under natural conditions

频率(%)	堆积区最大泥深(m)	最大流速(m/s)	最大冲出距离(m)	堆积扇最大宽度(m)
1	6.29	6.65	970	1 273
2	6.13	6.51	910	1 115
5	6.23	5.67	738	849

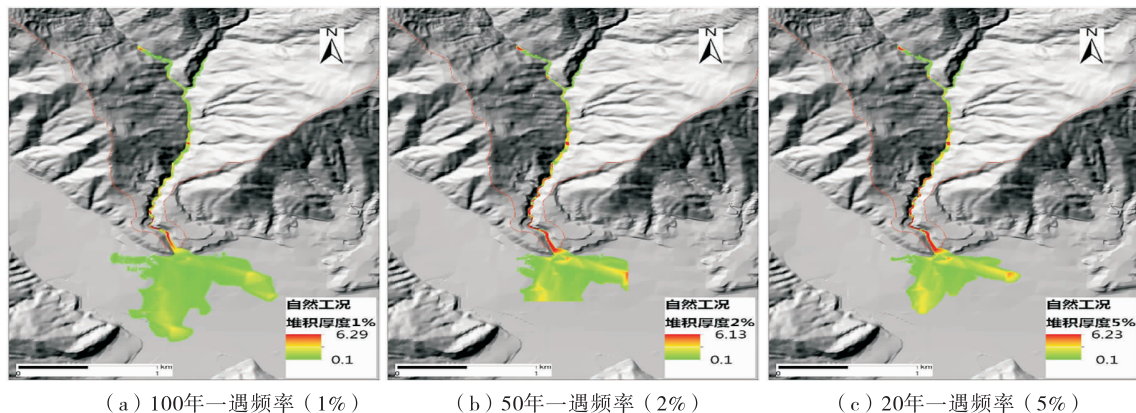


图 2 自然工况下不同频率泥石流堆积厚度图

Fig. 2 The accumulation thickness of debris flow at different frequencies under natural conditions

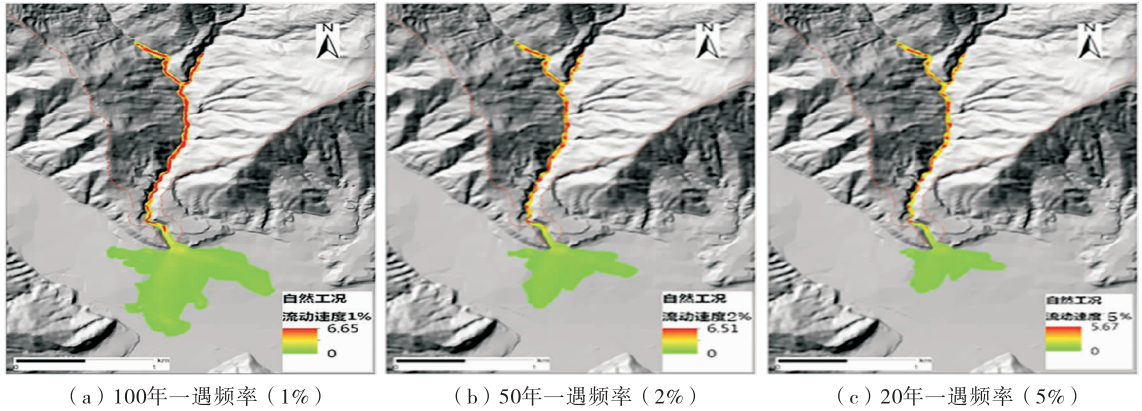


图 3 自然工况下不同频率泥石流流动速度图

Fig. 3 Velocity of debris flows with different frequencies under natural conditions

泥石流冲击力和泥深是决定泥石流对建筑物破坏程度的关键参数,泥石流冲击力的值与泥石流流速的平方成正比。因此,泥石流速度和泥深在堆积区的分布是影响泥石流危害性高低的重要因素(唐川等,1993)。结合唐川(1993)基于二维非恒定流理论得到泥石流流速和泥深在堆积泛滥区的分布情况,根据流速和泥深分布的理论,及 JAKOB 和 HUNGR 在对委内瑞拉沿海群发的泥石流进行强度划分的结果,本研究取最大泥深与最大流速的乘积作为泥石流强度指标(JAKOB M et al., 2005),最终确定本次泥石流强度评价标准(表 3)。

表 3 泥石流影响程度判别表

Tab. 3 The discrimination Tab of the impact degree of debris flow

泥石流强度等级	泥深 h (m)	关系	泥深 h 与流速 v 的乘积(m^2/s)
高	$h \geq 2.5$	或	$vh \geq 2.5$
中	$0.5 \leq h < 2.5$	且	$0.5 \leq vh < 2.5$
低	$0.001 \leq h < 0.5$	且	$vh < 0.5$

由于区内泥石流均由降水引发,泥石流发生的频率可认为与暴雨发生的频率一致。综合考虑泥石流影响强度与发生频率 2 个指标,可确定泥石流的危险性(表 4)。

将泥湾沟泥石流模拟结果按照堆积深度(H)和泥深与速度相乘(VH)的分级方法进行泥石流强度划分,得到不同频率下的泥石流强度等级。然后结合频率进行泥石流危险范围的划分,得到危险性分区(图 4)。可以看出,泥湾沟流域泥石流高危险范

围主要分布在泥石流沟道区域;中危险区面积相对较小,范围主要分布在泥石流流通区与堆积区交界区域;低危险范围相对较大,主要集中在沟道两侧和堆积扇的两翼区域。

表 4 泥石流危险性综合判别表

Tab. 4 Comprehensive discrimination of the risk of debris flow

重现周期	强度等级		
	高	中	低
20 年一遇(5%)	危险性大	危险性大	危险性大
50 年一遇(2%)	危险性大	危险性中等	危险性小
100 年一遇(1%)	危险性中等	危险性小	危险性小

3.2 治理工程效益分析

在确定坝体的位置后,在坝体所在的栅格创建坝体,对比泥石流流体在建坝前后的堆积、流速变化及壅水回淤情况,分析防治工程在泥石流灾害中起到的影响作用。泥湾沟 2009 年实施过泥石流防治工程,分别在泥湾沟上游谢家坡沟和寨子沟 2 条支沟沟口各布置 1 座重力式浆砌石拦挡坝(谢 1# 坝、寨 2# 坝),在主沟布置 4 座重力式浆砌石拦挡坝(泥 3# 坝、泥 4# 坝、泥 5# 坝、泥 6# 坝),旨在控制沟脑泥沙冲出量,减轻对下游坝体压力。防治工程条件下不同频率数值模拟情况见图 5、图 6。

根据以上模拟结果,计算出泥石流危险性分区图(表 5)。

FLO-2D 软件在模拟过程中不考虑拦挡坝的损坏因素,所以模拟结果都是在拦挡坝稳固的情况下得出的。根据最终模拟结果,从堆积物厚度、泥石

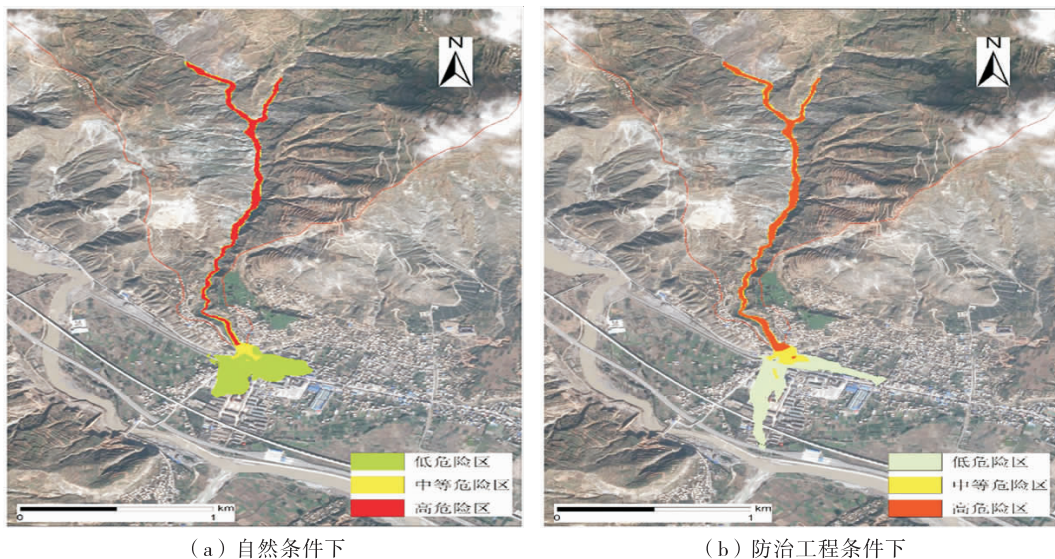


图4 泥石流危险性模拟分区图

Fig. 4 Hazard simulation zoning of debris flow

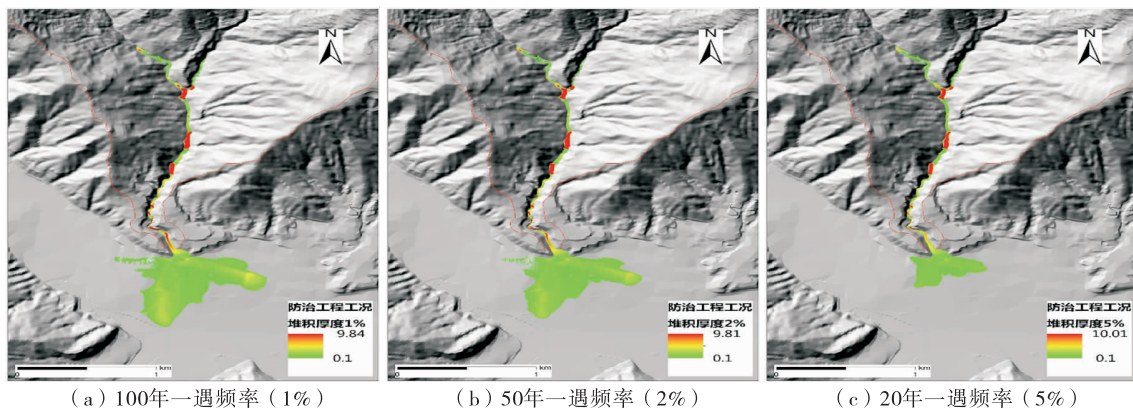


图5 防治工程条件下不同频率堆积厚度图

Fig. 5 Stacking thickness of different frequencies under the control engineering conditions

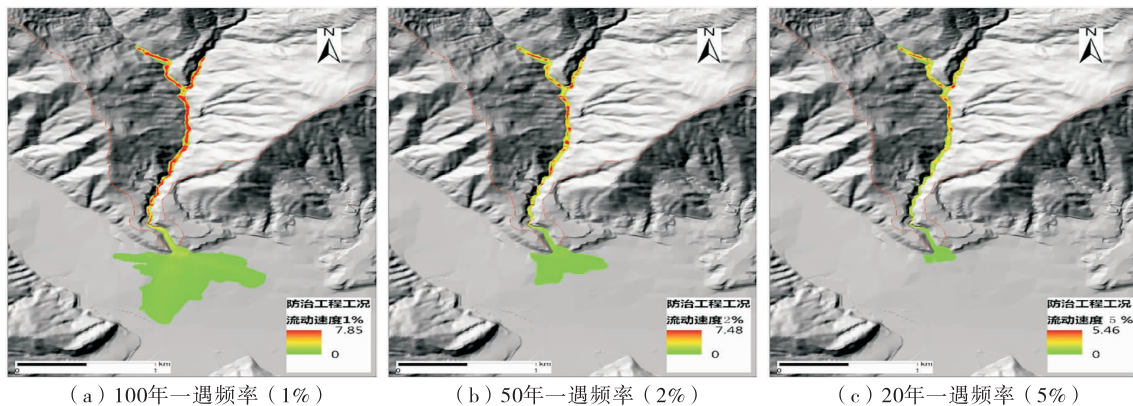


图6 防治工程条件下不同频率流动速度分布图

Fig. 6 Flow velocity distributions of different frequencies under control engineering conditions

表 5 防治工程条件下泥石流模拟结果一览表

Tab. 5 Simulation results of debris flow under control engineering conditions

频率(%)	堆积区最大泥深(m)	最大流速(m/s)	最大冲出距离(m)	堆积扇最大宽度(m)
1	9.84	7.85	635	503
2	9.81	7.48	552	460
5	10.01	5.46	276	363

流流速、沟口堆积范围及危险性评价 4 个方面进行治理工程效益分析。

自然条件下,泥石流堆积物最大厚度为 6.13~6.29 m,堆积最深处位于沟口位置;防治工程条件下,泥石流堆积物最大厚度为 9.81~10.01 m,堆积最深位置为拦挡坝坝前区域。100 年一遇条件下,泥 3、泥 4、泥 5、泥 6 及寨 2 拦挡坝坝前均有淤积,其中泥 4 淤积深度最大,回淤长度最长。根据地形、回淤长度及淤积深度确定,该频率下拦挡工程共拦截松散物质为 $3.97 \times 10^4 \text{ m}^3$,拦蓄效果明显。50 年一遇及 20 年一遇条件下,泥 3、泥 4、泥 5 及寨 2 拦挡坝坝前淤积明显,泥 6 淤积深度不高。拦挡工程在 50 年一遇频率条件下共拦截松散物质 $3.04 \times 10^4 \text{ m}^3$,20 年一遇频率条件下共拦截松散物质 $2.48 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。可见拦挡工程效益明显。

对比 2 种条件下不同频率泥石流流速可知,自然条件下泥石流流速最大值(5.67~6.65 m/s)小于布设防护工程条件下流速最大值(5.46~7.85 m/s)。但通过观察流速分布图可知,自然条件下最大流速在沟道内基本呈连续分布,即流速在沟道内基本无大变化且为较大流速。而在防护工程条件下,最大流速在沟道内呈点状分布,基本位于布设拦挡工程附近,其余区域流速均较小,沟口更小。原因在于拦挡坝处沟道被人为抬高,流速势必因为地形变化而升高,而其余区域由于拦挡工程回淤致使沟道宽度增大,过水范围增加,同样流量条件下,流速势必减少,接近沟口处流速基本为最小流速。工程对流速的限制与削弱效果明显,泥石流冲击力得到有效控制。

根据两次模拟结果计算可知(表 6),不同频率泥石流覆盖面积变化较大,减少比例均大于 74%,对沟口村民威胁范围明显减小,减灾效果明显。

防治工程条件下,泥石流危害范围明显减少,虽然高危险区范围依旧主要分布在泥石流沟道中间,但中危险区和低危险区范围均有一定的减小,仅分

布在堆积区地势较为低洼的区域,绕开居民密集区,说明在存在防治工程条件下泥石流的危险性得到一定的控制。

表 6 两种条件下泥石流覆盖面积统计表

Tab. 6 Statistical Tab of the area covered by debris flow under two conditions

频率(%)	自然条件下堆积物覆盖面积(m^2)	防治工程条件下堆积物覆盖面积(m^2)	减少比例(%)
1	1 234 810	319 405	74.13
2	1 014 650	253 920	74.97
5	626 562	100 188	84

4 结论

本研究通过数值模拟软件 FLO-2D 对泥湾沟泥石流在多种频率下的爆发过程进行模拟,得到泥石流运动和堆积特征。

(1)通过 FLO-2D 自然条件下泥石流运动模拟结果可得:100 年一遇泥石流堆积物覆盖面积为 1.23 km^2 。据现场调查,泥湾沟泥石流松散物质储量巨大,流域内存在过沟断层,易发性高,历史灾情严重。泥石流堆积区面积为 1.13 km^2 ,模拟结果与实际情况吻合较好。

(2)通过 FLO-2D 防治工程条件下泥石流运动模拟结果可得:防治工程的布设能有效拦截流域内松散物质,100 年一遇条件下拦截方量约为 $3.97 \times 10^4 \text{ m}^3$,50 年一遇频率下共拦截松散物质为 $3.04 \times 10^4 \text{ m}^3$,20 年一遇频率下共拦截松散物质为 $2.48 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。回淤反压稳固坡体效果更加明显;泥石流流速控制作用明显,1%降雨频率下到达沟口处流速为 2.7 m/s,且呈沿拦挡工程逐级减小的趋势;在松散物质及流速得到有效控制的情况下,泥石流冲出

方量减少,100年一遇缩小比例为74.13%,50年一遇缩小比例为74.97%,20年缩小比例最大达84%,堆积扇淤积面积明显萎缩,泥石流威胁范围显著减小。

(3)该数值模拟方法,可以为泥石流治理方案的比较提供有力技术支撑。在野外调查的基础上选择不同坝址位置进行模拟,将危险性最小、工程效果最好的方案推荐为最佳方案。

(4)模拟的主要不足之处是FLO-2D在计算中无法加入泥石流中的侵蚀作用,在泥石流的暴发过程中,沟道侵蚀引发两岸坡体的崩塌和滑坡形成的新的物源无法加入到计算中,所以对比实际情况,数值模拟的结果稍显偏小,较为保守。

参考文献(References):

唐邦兴,周必凡,吴积善,等. 中国泥石流[M]. 北京:商务印书馆,2000.

TANG Bangxing, ZHOU Bifan, WU Jishan, et al. Debris Flow in China[M]. Beijing: Business Press, 2000.

李智毅,杨裕云. 工程地质学概论[M]. 武汉:中国地质大学出版社,2012:176.

LI Zhiyi, YANG Yuyun. An Introduction to Engineering Geology[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2012:176.

唐得胜. 基于FLO-2D模型的不同频率泥石流数值模拟研究[D]. 成都:成都理工大学,2014.

TANG Desheng. The numerical simulation study on the debris-flow in different frequency base on FLO-2D[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014.

夏添. 震区泥石流危险性评价及预警减灾系统研究[D]. 成都:成都理工大学,2013.

XIA Tian. Hazard assessment of debris flow in earthquake-region and system design for warning and mitigation [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2013.

唐川,刘希林,朱静. 泥石流堆积泛滥区危险度的评价与应用[J]. 自然灾害学报,1993,2(4):79-84.

TANG Chuan, LIU Xilin, ZHU Jing. Assessment and Application of Risk Degree in Debris Flow Accumulation Flood Area[J]. Journal of Natural Disasters, 1993, 2(4):79-84.

杨海龙,樊小一,姜元俊. 基于FLO-2D的泥石流工程治理效果分析[J]. 人民长江,2017,48(17):66-71.

YANG Hailong, FAN Xiaoyi, JIANG Yuanjun. Analysis of Debris Flow Control Effect Based on FLO-2D[J]. Yangtze River, 2017, 48(17):66-71.

杜雪剑,孙淑勤,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.

DU Xuejian, SUN Shuqin, ZHAO Zheng, et al. Study on Debris Flow Control Effect of Hongchungou Based on FLO-2D Model[J]. Earth and Environment, 2016, 44(3):376-381.

马富存,袁术. 陇南市武都区两水镇泥湾沟泥石流灾害治理工程[R]. 兰州:甘肃地质工程勘察院,2008.

MA Fucun, YUAN Shu. Debris Flow Control Project of Niwan Ditch in Liangshui Town, Wudu District, Longnan City[R]. Lanzhou: Gansu Institute of Geological Engineering Investigation, 2008.

LIN J Y, Yang M D, Lin B R, et al. Risk assessment of debris flows in Songhe Stream, Taiwan [J]. Engineering Geology, 2011, 123(1): 100-112.

JAKOB M., HUNGR O. Debris-flow hazards and related phenomena[M]. Chichester: Praxis Publishing Ltd, 2005, 519-538

LIN C. W., SHIEH C. L., YU B. D., et al. Impact of Chi-Chi earthquake on the occurrence of land-slides and debris flows: example from the Chenyulan River watershed, Nantou, Taiwan [J]. Engineering Geology, 2003, 71:49-61.