

德钦县城直溪河泥石流成灾模式及运动过程模拟

王俊豪, 管建军, 魏云杰, 高培强, 梅傲霜, 张东伟

A study of the disaster model and movement process simulation of debris flow in the Zhixi River of Deqin County

WANG Junhao, GUAN Jianjun, WEI Yunjie, GAO Peiqiang, MEI Aoshuang, and ZHANG Dongwei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202107017>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于数值模拟的耳阳河流域泥石流灾害危险性评价

Debris flow hazard assessment of the Eryang River watershed based on numerical simulation

侯圣山, 曹鹏, 陈亮, 冯振, 王立朝, 李昂, 刘军友, 李阳光, 郑浩 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 143–151

西藏天摩沟泥石流形成机制与成灾特征

Formation mechanism and disaster characteristics of debris flow in the Tianmo gully in Tibet

高波, 张佳佳, 王军朝, 陈龙, 杨东旭 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 144–153

构建中国自然灾害防灾减灾新体系

Establishment of an innovative system of natural disaster prevention and mitigation in China

陈其针, 仲平, 张贤, 刘家琰, 贾莉 水文地质工程地质. 2020, 47(4): 1–4

地形因素对白龙江流域甘肃段泥石流灾害的影响及权重分析

Impacts of topographical factors on debris flows and weight analysis at the Gansu segment of the Bailongjiang River Basin

刘德玉, 贾贵义, 李松, 丛凯, 张伟 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 33–33

泥石流容重的时空变化特征及影响因素研究

A study of the characteristics and influencing factors of spatial-temporal changes in the debris flow density

黄海, 刘建康, 杨东旭 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 161–168

基于HEC-HMS模型的不同雨型泥石流流量变化特征

Flow characteristics of different rainfall type debris flow based on the HEC-HMS model

熊江, 唐川, 龚凌枫 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 154–154



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202107017

德钦县城直溪河泥石流成灾模式及运动过程模拟

王俊豪¹, 管建军², 魏云杰¹, 高培强³, 梅傲霜³, 张东伟³

(1. 中国地质环境监测院(自然资源部地质灾害防治技术指导中心), 北京 100081; 2. 武汉大学电子信息学院, 湖北 武汉 430072; 3. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083)

摘要: 云南省德钦县曾多次暴发较大规模的泥石流, 是云南遭受地质灾害最严重的地区之一。根据直溪河泥石流的分区、物源、流体和堆积等特征, 首先确定了直溪河泥石流的5种成灾模式: 崩塌-碎屑流、岩质滑坡-碎屑流、土石混合体滑坡-碎屑流、松散堆积层-基岩接触面滑坡-碎屑流和松散堆积层内滑坡-碎屑流; 其次, 采用FLO-2D模型对直溪河在10年、20年、50年和100年一遇暴雨周期下发生泥石流时的运动情况进行模拟, 定量分析了不同降雨重现期的最大流速、最大堆积深度、冲出沟口堆积距离和体积规模。结果表明: 该泥石流暴发时具有启动加速度大、流速快、破坏力强、流通区长的特点; 当100年一遇的泥石流发生时, 其最大流速达到了3.07 m/s; 最大泥深为2.27 m; 泥石流冲出方量为84 419 m³; 致灾面积达到91 600 m²。研究结果可为直溪河泥石流灾害防治与治理提供数据参考, 为德钦县防灾减灾工程设计提供依据。

关键词: 直溪河; 泥石流; 成灾模式; 暴发周期; FLO-2D; 防灾减灾

中图分类号: P642.23

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2021)06-0187-09

A study of the disaster model and movement process simulation of debris flow in the Zhixi River of Deqin County

WANG Junhao¹, GUAN Jianjun², WEI Yunjie¹, GAO Peiqiang³, MEI Aoshuang³, ZHANG Dongwei³

(1. China Institute of Geo-Environment Monitoring (Guide Center of Prevention Technology for Geo-hazards, MNR), Beijing 100081, China; 2. Electronic Information School, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China; 3. School of Earth Science and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: Deqin County is one of the areas suffering the most serious geological disasters in Yunnan Province. Based on the development characteristics of the debris flow in the Zhixi River, this study identifies five disaster-generating modes for the debris flow in the Zhixi River: Collapse - clastic flow, rock landslide-clastic flow, soil-rock mixture landslide-clastic flow, loose accumulation layer -bedrock contact surface landslide-clastic flow and landslide in loose accumulation layer-clastic flow. The FLO-2D model is used to simulate the debris flow movement in the Zhixi River under the rainstorm cycle of 10, 20, 50 and 100 years, and the maximum flow velocity, the maximum accumulation depth, the accumulation distance and the volume scale in different rainfall return periods are quantitatively analyzed. The results show that the debris flow is characterized by high acceleration, fast velocity, strong destructive force, and long circulation area when it erupts. When the debris flow occurs once in 100 years, its maximum velocity reaches 3.07 m/s, the maximum mud depth is 2.27 m, the volume of debris flow washed out is 84 419 m³, and the disaster area reaches 91 600 m². The results provide quantitative data reference for the prevention and control of debris flow disasters in Zhixi River, and also provides an

收稿日期: 2021-07-17; 修订日期: 2021-09-20

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20190647; DD20179609); 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0904)

第一作者: 王俊豪(1987-), 男, 工程师, 主要从事地质灾害调查与技术研究。E-mail: 278802594@qq.com

通讯作者: 魏云杰(1973-), 男, 教授级高级工程师, 主要从事地质灾害、岩土工程等相关领域研究。E-mail: wyj1973@126.com

important basis for the design of disaster prevention and mitigation projects in Deqin County.

Keywords: Zhixi River; debris flow; disaster model; outbreak cycle; FLO-2D; disaster prevention and mitigation

云南省处于我国低纬度的高原地区,山地面积占总面积的94%,跨越多种气候带,部分地区强降雨频繁,是我国遭受滑坡、泥石流灾害最严重的省份之一^[1]。德钦县位于云南省西北部,处于横断山脉和三江并流腹地,地形高差较大,属于典型的高山峡谷地貌。该地区岩体次生作用强烈且被结构面切割包围,历经多次构造运动致使地层岩性较为复杂。德钦县在1957年、1966年、1968年、1974年、1977年、1986年、1988年、1995年、1996年、1997年、2002年等多个年份遭遇过较大规模的泥石流灾害,造成多人伤亡。尤其是2002年7月18日,多处泥石流冲进城区,给德钦县人民造成了严重的经济损失。为保证城区安全,德钦县对泥石流沟进行了多期治理,上游设拦挡坝,城区铺设“V”型排导槽。防治工程经过1995年、1996年、1997年和2002年4次大规模黏性泥石流的检验,发挥了预期效果。但目前拦挡工程已满库运行,且上游松散物源量巨大,大量新物源不断累积,一旦成灾后果严重^[2]。

泥石流危险性评价方法方面的研究成果较多。王俊豪等^[3]采用层次分析与模糊评价相结合的模型对洮河流域泥石流进行了危险性评价;崔传峰等^[4]采用灰色可拓模型建立了泥石流易发性评价模型;邵海等^[5]对泥石流的形成条件和成灾模式进行了分析,同时给出了防灾减灾建议;管建军等^[6]利用无人机倾斜技术生成三维模型,对泥石流易发性评价因子进行了分析和确定。

数值模拟是泥石流研究前沿领域,其成果可为高精度小范围泥石流灾害风险评估提供准确可靠的要素。因此,数值模拟是泥石流灾害风险评估的关键性工作。目前,对泥石流过程的模拟已有较成熟的模型,如Debris-2D模型^[7]和FLO-2D模型^[8]等。FLO-2D模型作为一款专用于洪水和泥石流模拟的二维软件,操作简单、能真实模拟泥石流运动时的流变状态,因此得到广泛应用。张鹏等^[9]、黄勋等^[10]分别运用FLO-2D模型对特定泥石流沟进行模拟,并与现场调查结果进行对比,验证了FLO-2D模型模拟试验区泥石流威胁范围的准确性;杜雪剑等^[11]、王骏等^[12]利用FLO-2D模型模拟结果对泥石流沟提出了相应的工程治理措施;贾涛等^[13]运用FLO-2D模型模拟结果对研

究区进行了泥石流危险性评价;Lin等^[14]、梁鸿熙等^[15]运用FLO-2D模型分别对泥石流的运动堆积进行模拟,并对影响堆积特征的因素进行了初步讨论;侯圣山等^[16]用FLO-2D模型模拟了耳阳河流域实际降雨条件下的泥石流运动特征和堆积特征,对耳阳河“5·10”泥石流灾害过程进行了重现;Peng等^[17]、Wu等^[18]等学者利用FLO-2D模型对小流域运动淤积过程进行模拟并取得良好效果。

上述研究结果表明运用FLO-2D可以取得较好的模拟结果,但对不同降雨暴发周期下的泥石流运动情况的分析较少,不足以为多种降雨工况下的泥石流运动情况提供有效参考。本文基于前期现场调查及基础资料分析的基础上,确定了直溪河泥石流形成条件及成灾模式,结合降雨资料、数字高程模型和相关参数,运用FLO-2D软件分别模拟10年、20年、50年、100年一遇降雨情况下直溪河泥石流运动情况,可为当地泥石流防治工程设计提供有效参考。

1 研究区概况及泥石流形成条件

1.1 地形地貌

直溪河泥石流流域面积6.38 km²,其中形成区面积5.35 km²,流通区面积1.78 km²,堆积区面积0.25 km²(图1)。泥石流主沟长5.50 km,其中形成区沟长2.75 km,流通区沟长1.10 km,堆积区沟长1.65 km。沟域内最

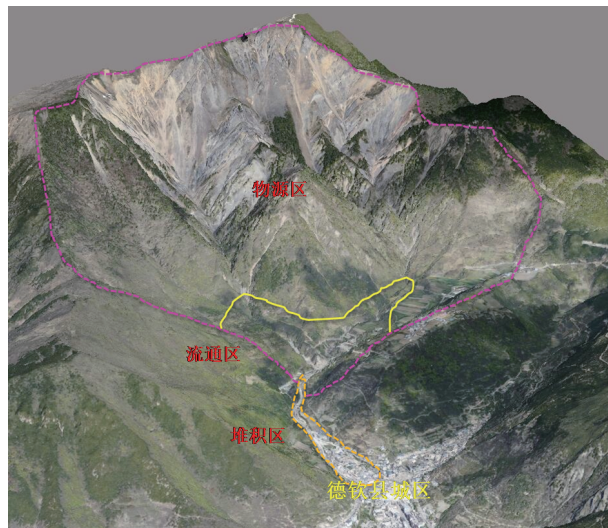


图1 直溪沟流域分区图

Fig. 1 Zoning map of Zhixigou area

高点海拔 4 519 m, 最低点 3 080 m, 高差 1 439 m, 平均纵坡降 178.16‰。

形成区由南北支沟组成, 平面呈漏斗形, 治理前沟谷呈“V”型, 底宽 2~4 m, 岸坡 40°~70°, 多跌水陡坎, 坎高 3~8 m, 最高约 10 m, 沟床纵坡降 420.7‰。自拦挡坝防治工程实施以来, 坝库区沟床纵坡逐年变缓, 淤满后达到稳定状态, 纵坡降保持在 60‰~80‰。沟谷相对宽缓, 宽 15~30 m, 库区淤积利于沟谷岸坡稳定, 一定程度上起到压脚、固床的作用。上游未设工程的沟谷段, 自然地貌形态变化不大, 纵坡

降较大, 水动力条件良好, 侵蚀冲刷作用强烈, 沟岸塌滑发育, 加剧了源头崩塌堆积体和岩溜坡的失稳, 为泥石流提供了持续的物源。流通区、堆积区沟道目前为“V”形排导槽, 槽宽 11.6~13.0 m, 槽深 2.0~3.3 m。沟谷形态大致趋于稳定, 无较大变化, 沟道两岸多为民用建筑。在泥石流形成区、流通区、堆积区、主要崩滑物源点、侵蚀物源区及已建拦挡工程段部署工程地质剖面 26 条合计 7 km, 用于查明泥石流地形、物源分布及运动参数。该泥石流流地形地貌及工程部署情况如图 2 所示。

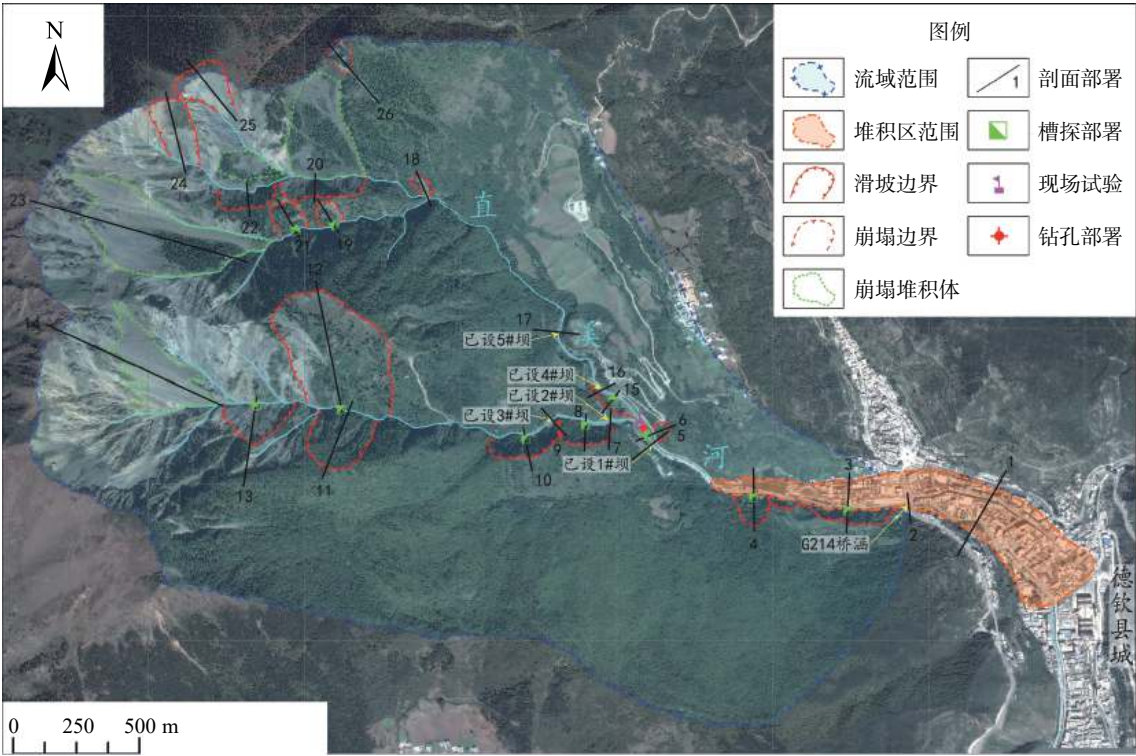


图 2 泥石流调查工程部署图

Fig. 2 Schematic diagram of the process of debris flow

1.2 水源条件

研究区水文地质条件较复杂, 沟内多见孔隙水和基岩裂隙水出露。孔隙水受大气降雨、雪融水补给, 经孔隙比较大、渗透性较好的地表松散堆积层, 向下沿基岩表面和斜坡面向沟道内侧补给, 局部地下水出露于地表形成细流。基岩裂隙水受构造、结构面的控制, 埋藏较浅, 多在沟谷内基岩陡坎处以面状流或泉的形式出露。

直溪河属高原山区常年性河流, 年内流量变幅较大, 枯季一般小于 0.1 m³/s, 雨季一般 1~5 m³/s, 最大流量为 1986 年的 45.7 m³/s。除少量冰雪融水补给外,

主要靠大气降雨补给。区内年降雨量虽不大, 但雨量较集中, 历史资料显示, 区内连续降雨时间最长达 32 d, 最大日降雨 74.7 mm, 最大 5 分钟降雨 7.1 mm, 属于典型的集中短时强降雨特征, 为激发泥石流的启动提供了优越的水动力条件^[19]。

1.3 物源条件

直溪河泥石流物源主要包括滑坡堆积物、崩塌堆积物、坡积物、洪积物及人工弃渣。滑坡堆积物是直溪河泥石流主要的物源, 分布于直溪河及其南侧支沟的高陡斜坡下方。根据调查, 直溪河泥石流松散固体物源储量约为 22.55×10⁶ m³, 可移储量约 2.18×10⁶ m³,

一次最大可移动储量约 $3.65 \times 10^4 \text{ m}^3$, 详见表 1。

表 1 直溪河泥石流沟松散固体物储量表
Table 1 Calculations of the loose solids reserves in the debris
flow gully of the Zhixi River

物源类型	滑坡	崩塌	坡积物	残坡积物	洪积物	弃渣	合计
面积/(10^4 m^2)	13	24	147	521	31	2	738
体积/(10^4 m^3)	127	360	326	662	775	5	2 255
可移储量/(10^4 m^3)	29	18	22	138	9	2	218
一次最大可移储量/(10^4 m^3)	1.46	0.09	0.73	0.69	0.49	0.19	3.65

2 泥石流发育特征及成灾模式

2.1 泥石流分区特征

直溪河泥石流具有明显的高寒高海拔特性, 发育过程受人类工程活动影响显著, 属于山区沟谷型旺盛期粘性泥石流。该泥石流具有明显的分区性, 根据该沟谷的整体地形形态结构与地理特征、水流向沟谷汇集的气候条件和泥石流沟谷中的松散物和固体物质的形成堆积流通分布, 将该泥石流沟分为形成区、流通区和堆积区(图 1)。

2.2 泥石流物源特征及成灾模式

2.2.1 补给特征

滑坡堆积物是直溪河泥石流主要的物源, 分布在直溪河及其南侧支沟高陡斜坡下方, 由于两条沟岸斜坡岩性、风化程度差异性较大, 因此, 滑坡堆积物成分也不相同, 以页岩、灰岩、砂岩等为主, 岩块粒径从西向东逐渐变大。山体受到构造、冻融和降雨的影响, 形成了多处不稳定危岩体, 在后期外界条件的改变下易失稳形成崩塌堆积物。大量松散堆积主要分布在沟道内的斜坡地带, 为黏性土、砂土夹碎石层, 杂乱无明显结构, 碎块石粒径较小。土体较为松散, 局部发生了小型滑塌灾害。由于其主要分布在沟道内, 洪水对斜坡坡脚的冲刷和侵蚀作用会造成斜坡失稳而形成新的泥石流物源补给。

2.2.2 链式灾害成灾模式

基于直溪河泥石流形成区斜坡的失稳模式及其物质组成, 将直溪河泥石流沟域内提供物源的链式灾害进行分析, 可归纳为以下 5 种成灾模式:

(1) 崩塌-碎屑流: 岩体结构破坏→形成危岩体→岩体失稳→岩体碰撞解体→碎屑流分选堆积。由于崩塌区位置一般较高, 因此其势能较大, 堆积碎屑流向下滑动的距离较长。

(2) 岩质滑坡-碎屑流: 岩体结构破坏→形成不稳定滑体→滑体失稳→滑体解体、铲刮→碎屑流堆积。

由于滑坡产生的碎屑流具有速度快、滑移距离远的特征, 因此物源体会沿着沟道向沟口方向以碎屑流的形式运移, 如有水的参与, 其下滑距离会明显增大。

(3) 土石混合体滑坡-碎屑流: 该模式主要发育在支沟西北侧的斜坡上, 滑坡规模一般较小, 呈条带状分布, 在向下滑动的过程中势能逐渐消耗, 因此滑坡物源多在斜坡中部的滑坡地带堆积, 小部分会滑移到沟底。

(4) 松散堆积层-基岩接触面滑坡-碎屑流: 前期的崩塌、滑坡和坡积物在坡体中部停留、堆积, 由于斜坡中部的坡度仍旧较陡, 加之土岩不良地质界面的控制, 在降雨和冻融的作用下会发生松散堆积层-基岩接触面滑坡。由于其厚度较小, 土体松散, 下滑过程中坡体解体完全, 如果滑体处于较高的斜坡上, 其下滑速度较快, 碎屑流运移距离较长。

(5) 松散堆积层内滑坡-碎屑流: 在斜坡中下部, 由于前期的不良地质作用形成了较厚的松散堆积体, 在降雨和坡脚冲刷的作用下, 易整体失稳下滑, 但总体完整性较好。

2.3 泥石流流体特征

该沟泥石流历时短, 来势猛, 堵塞严重, 具阵性, 龙头较高, 流速大, 弯道超高现象严重, 沿途补给性强, 规模大, 巨砾多。2002 年 8 月暴发的泥石流, 弯道超高达 1.1 m, 龙头高达 3.5 m, 流体像混凝土一样, 容重达 2.1 t/m^3 。在县医院、五中桥、变电站桥上泥浆保存完好, 一次性泥石流持续 30~40 min, 整个县城有震感和异味, 具有清晰的石头碰撞声, 属典型的黏性泥石流。

2.4 泥石流堆积物特征

受到特殊气候地形及地理条件的影响, 泥石流包砾堆积现象普遍, 石块呈南北向排列展布, 形似柳叶: 分布区长 1 650 m, 宽 1~400 m, 面积 0.25 km^2 , 较大块石多数部分位于上部。2002 年 8 月暴发的泥石流, 在与水磨房河交汇弯道处的堆积物高达 5 m, 体积 $44 000 \text{ m}^3$, 多为卵石, 砾石含量占 2%~5%, 直径 40 cm 左右, 无分选, 磨圆度差, 小于 2 mm 的颗粒占 9%~26%^[20-21]。

3 泥石流运动过程数值模拟

3.1 FLO-2D 原理

FLO-2D 模型原理主要是非牛顿流体模型和中央有限差分法计算固液二相流的运动方程^[22]。本研究采用 FLO-2D 模型模拟泥石流流速、堆积深度、冲出体积、致灾范围的过程中, 主要采用以下 3 个控制方程:

(1) 连续性方程

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial (uh)}{\partial x} + \frac{\partial (vh)}{\partial y} = I \tag{1}$$

式中: h ——流体堆积深度/m;
 t ——泥石流运动时间/s;
 u ——水平方向的平均流速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$);
 v ——垂直方向的平均流速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$);
 I ——沟谷坡降/%。
模拟运算时, 式(1)控制泥石流质量守恒。

(2) 运动方程

$$S_{fx} = S_{ox} - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{\partial u}{g\partial t} - u\frac{\partial u}{\partial x} - v\frac{\partial u}{g\partial y} \tag{2}$$

$$S_{fy} = S_{oy} - \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{\partial v}{g\partial t} - u\frac{\partial v}{\partial x} - v\frac{\partial v}{g\partial y} \tag{3}$$

式中: S_{fx} 、 S_{fy} —— x 、 y 方向的摩擦坡降/%;
 S_{ox} 、 S_{oy} —— x 、 y 方向的河床坡降/%。
(3) 泥石流模型的基础是 O'Brien 和 Julien 的流变模型流变方程

$$S_f = S_{td} + S_v + S_y = \frac{\tau_y}{\gamma_m^h} + \frac{K\eta v}{8\gamma_m h^2} + \frac{n^2 v^2}{h^{4/3}} \tag{4}$$

式中: S_f 、 S_y 、 S_v 、 S_{td} ——分别为摩擦坡降、屈服坡降、黏性坡降、紊流分散坡降/%;
 y ——屈服应力;
 m ——流体比重;
 K ——层流阻力系数;
 h ——泥深/m;

η ——流体黏滞系数;
 n ——曼宁系数;
 v ——流体流速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)。

3.2 流量计算

3.2.1 设计频率

在泥石流模拟中降雨量的不同直接影响着泥石流运动堆积范围的划定。考虑泥石流灾害形成条件与降雨关系密切, 而强降雨作为直溪河泥石流主要引发条件, 因此用降雨频率表示泥石流发生的频率。对直溪沟 10 年一遇 ($P=10\%$)、20 年一遇 ($P=5\%$)、50 年一遇 ($P=2\%$) 和 100 年一遇 ($P=1\%$) 4 种重现周期下的冲淤过程进行对比。4 种工况具体降雨情况见表 2。

表 2 4 种工况具体降雨情况
Table 2 Precipitation situation of four kinds of working conditions

工况	最大日降雨量/mm	降雨强度/($\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$)
$P=10\%$	56.19	23.04
$P=5\%$	63.03	25.84
$P=2\%$	71.64	29.37
$P=1\%$	77.94	31.96

3.2.2 参数设定

数值模拟中准确选取泥石流相关参数对正确输出模拟结果非常重要。本研究通过现场实际调查, 结合查阅文献资料和 FLO-2D 用户使用手册建议取值等综合分析, 设定最终参数(表 3)。

表 3 泥石流参数取值
Table 3 Parameters for the debris flow

参数	重度/($\text{t}\cdot\text{m}^{-3}$)	体积浓度	曼宁系数	宾汉屈服系数		宾汉黏滞系数		层流阻滞系数	放大因子 BF
				α_1	β_1	α_2	β_2		
取值	2.7	0.61	0.3、0.35	0.081 1	13.72	0.004 62	11.24	3 000	2.56

3.2.3 流量数值模拟结果

模拟不同重现周期下泥石流冲淤过程的关键在于获取准确的泥石流流量过程线。根据 FLO-2D 使用手册, 将洪峰流量乘以放大因子 (BF , $\text{BF}=1\cdot(1-C_v)-1$), 得到泥石流最大流量, 其模拟结果如图 3 所示。

3.3 泥石流模拟结果分析

根据 4 种降雨频率情况下泥石流流量的模拟结果, 对泥石流致灾情况进行模拟, 得出泥石流在 4 种工况条件下发生时的流动速度、堆积深度、冲出距离、冲出体积及致灾范围。具体见表 4。10 年一遇、

20 年一遇、50 年一遇、100 年一遇降雨工况下的堆积深度如图 4(a)、图 5(a)、图 6(a)、图 7(a) 所示, 泥石流流速如图 4(b)、图 5(b)、图 6(b)、图 7(b) 所示。

3.4 综合分析

通过对上述 4 种不同工况条件下泥石流运动过程的计算结果(表 3 和图 4—图 7)进行分析, 可以得到以下结论:

(1) 直溪沟泥石流的最大流动速度、最大堆积深度以及冲出沟口堆积距离、体积与不同降雨重现期均呈正相关性。

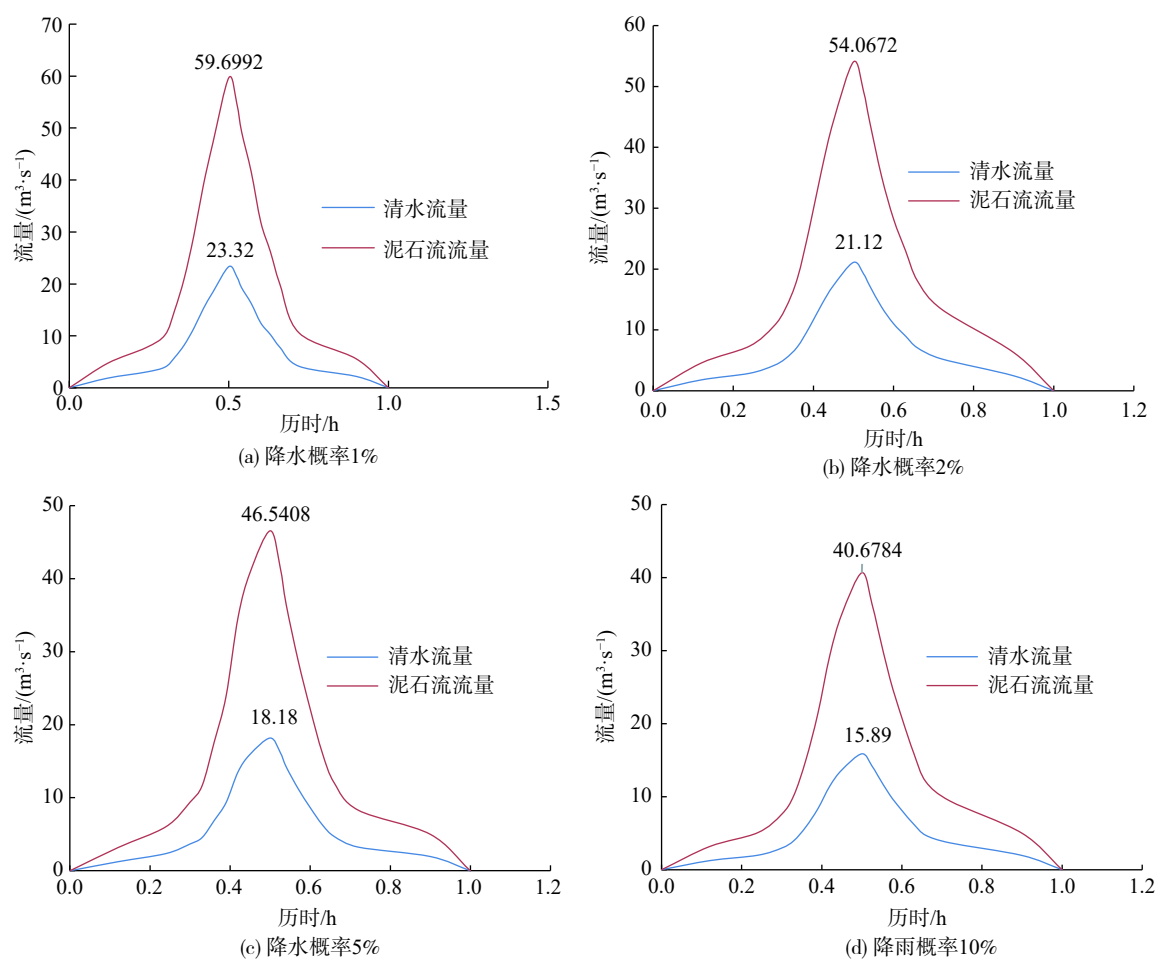


图 3 直溪沟清水流量、泥石流流量过程线

Fig. 3 Changes in clear water flow and debris flow in the Zhixi Gully

表 4 不同降雨频率下直溪沟泥石流模拟结果

Table 4 Simulation results of debris flow in Zhixi Gully under different rainfall frequencies

爆发周期	冲出体积/ m^3	冲出距离/m	致灾(堆积区)面积/ m^2	堆积区泥石流体积/ m^3	堆积最大深度/m	最大流速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
$P=10\%$	34 290	1 272	23 200	15 513	2	1.81
$P=5\%$	41 892	1 334	33 200	21 580	2.21	1.91
$P=2\%$	47 823	1 447	38 800	25 491	2.35	1.96
$P=1\%$	84 419	1850	91 600	59 814	3.07	2.27

(2)从模拟结果来看,泥石流流速与堆积深度整体主要受地形控制。由于泥石流流体主要沿高程降低方向流动,泥石流形态并非呈“扇形”堆积,而是呈不规则堆积,且随着降雨重现周期的增大,泥石流的最大流动速度、堆积厚度、堆积范围和冲出体积都在不断增大,但增加幅度不同。

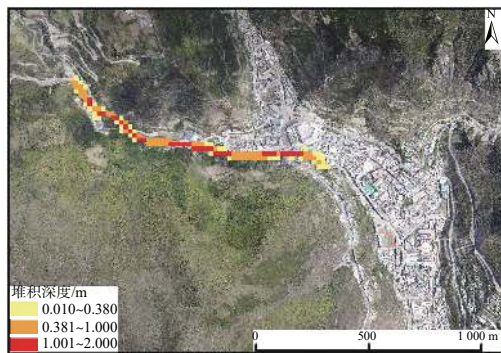
(3)设计频率从 10%、5% 降至 2% 时,各项结果的增加幅度较小。从 2% 到 1% 时,各项结果增幅明显变大,表明降雨频率越小,泥石流爆发时对县城居住区的致灾影响越大。从图 4—图 7 可以看出,各个设计频率下的泥石流均已冲进县城,尤其当设计频率为

1% 时,其冲出面积为 $91\,600\,\text{m}^2$,致灾面积接近其他三种设计频率的总和。

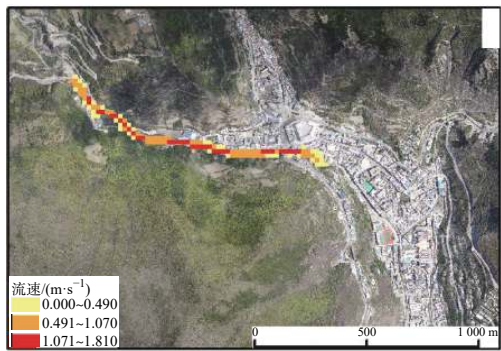
4 结论

(1)直溪河泥石流成灾模式主要为 5 种:崩塌-碎屑流、岩质滑坡-碎屑流、土石混合体滑坡-碎屑流、松散堆积层-基岩接触面滑坡-碎屑流和松散堆积层内滑坡-碎屑流。

(2)直溪河引发泥石流具有启动加速度大、流速快、破坏力强、流通区长的特点,尤其在 100 年一遇的泥石流发生时,其最大流速达到 $3.07\,\text{m/s}$,最大泥深为

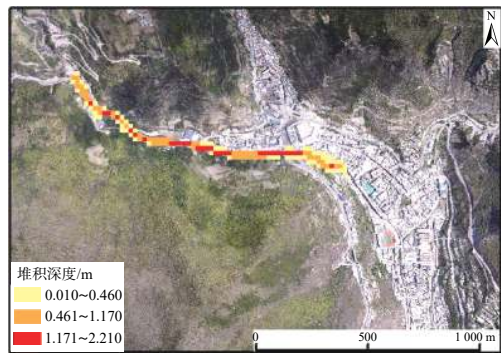


(a) 堆积深度

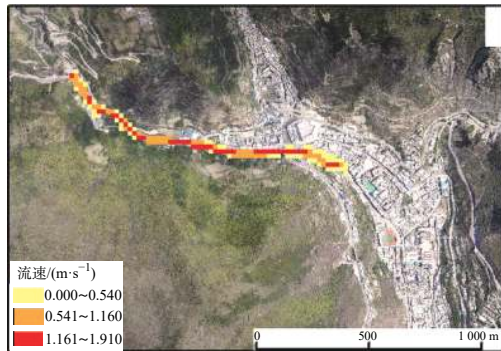


(b) 流动速度

图 4 10 年一遇泥石流堆积深度和流动速度
Fig. 4 Depth and flow velocity of debris flow accumulation once in 10 years

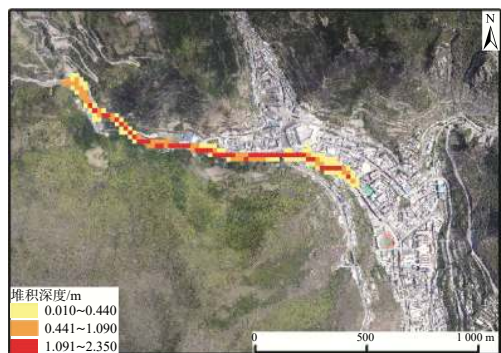


(a) 堆积深度

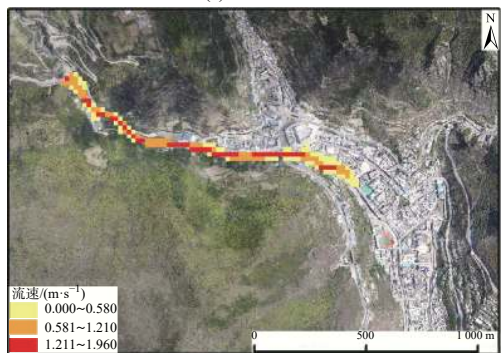


(b) 流动速度

图 5 20 年一遇泥石流堆积深度和流动速度
Fig. 5 Depth and flow velocity of debris flow accumulation once in 20 years

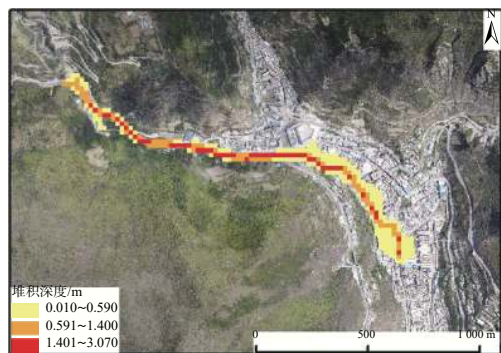


(a) 堆积深度

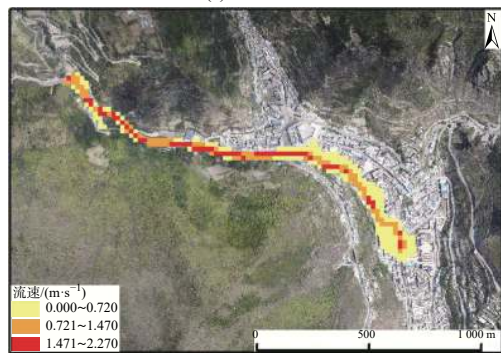


(b) 流动速度

图 6 50 年一遇泥石流堆积深度和流动速度
Fig. 6 Depth and flow velocity of debris flow accumulation once in 50 years



(a) 堆积深度



(b) 流动速度

图 7 100 年一遇泥石流堆积深度和流动速度
Fig. 7 Depth and flow velocity of debris flow accumulation once in 100 years

2.27 m, 泥石流冲出体积为 $84\,419\text{ m}^3$, 致灾面积为 $91\,600\text{ m}^2$ 。

(3)随着设计频率的减小, 泥石流的冲出体积、冲出距离、致灾面积和堆积体体积逐渐增大。尤其 100 年一遇的泥石流发生时, 相对于其他三种设计频率, 其破坏力显著提高。

参考文献 (References) :

- [1] 万石云, 李华宏, 胡娟. 云南省滑坡泥石流灾害危险区划 [J]. 灾害学, 2013, 28(2): 60 – 64. [WAN Shiyun, LI Huahong, HU Juan. Hazard zoning of landslide and debris flow disasters in Yunnan Province [J]. *Journal of Catastrophology*, 2013, 28(2): 60 – 64. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 王研. 云南省德钦县一中河泥石流形成机制和防治对策 [D]. 北京: 中国地质大学 (北京), 2016. [WANG Yan. Formation mechanism and prevention measures of Debris flow in Yizhong River, Deqin County, Yunnan Province [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2016. (in Chinese with English Abstract)]
- [3] 王俊豪, 金华丽, 倪天翔, 等. 基于层次分析法的模糊综合评判模型在康乐县泥石流沟危险性评价中的应用 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2017, 28(3): 52 – 57. [WANG Junhao, JIN Huali, NI Tianxiang, et al. The application of fuzzy comprehensive evaluation model based on analytic hierarchy process in risk assessment of debris flow gully in Kangle County [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2017, 28(3): 52 – 57. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 崔传峰, 王俊豪, 崔志超, 等. 基于灰色可拓模型的洮河下游泥石流易发性评价 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(6): 40 – 48. [CUI Chuanfeng, WANG Junhao, CUI Zhichao, et al. Evaluation of debris flow susceptibility in the lower reaches of Taohe River based on grey extension model [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2019, 30(6): 40 – 48. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 邵海, 魏云杰, 黄喆, 等. 新疆伊宁克孜勒赛黄土滑坡堵溃型泥石流成灾模式 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2018, 29(6): 40 – 46. [SHAO Hai, WEI Yunjie, HUANG Zhe, et al. Kezilesai loess landslide dam-breaking debris flow hazards model in Yining County, Xinjiang [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2018, 29(6): 40 – 46. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 管建军, 王俊豪, 王双亭, 等. 无人机倾斜摄影在黄土地区泥石流灾害调查与评价中的应用 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2017, 28(4): 137 – 145. [GUAN Jianjun, WANG Junhao, WANG Shuangting, et al. Application of UAV oblique photography in investigation and evaluation of debris flow disasters in loess area [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2017, 28(4): 137 – 145. (in Chinese with English abstract)]
- [7] HSU Y C, LIU K F. Combining TRIGRS and DEBRIS-2D models for the simulation of a rainfall infiltration induced shallow landslide and subsequent debris flow [J]. *Water*, 2019, 11(5): 890.
- [8] 方群生, 陈志和, 唐川, 等. 基于 FLO-2D 数值模拟震区急陡型泥石流冲出量: 以瓦窑沟为例 [J]. 中山大学学报 (自然科学版), 2020, 59(3): 23 – 3. [FANG Qunsheng, CHEN Zhihe, TANG Chuan, et al. Numerically simulating the runout volume of debris flow at urgent steep gully in the earthquake areas based on FLO-2D: Illustrated with a case of Wayao gully [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2020, 59(3): 23 – 3. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 张鹏, 马金珠, 舒和平, 等. 基于 FLO-2D 模型的泥石流运动冲淤数值模拟 [J]. 兰州大学学报 (自然科学版), 2014, 50(3): 363 – 368. [ZHANG Peng, MA Jinzhu, SHU Heping, et al. Numerical simulation of erosion and deposition debris flow based on FLO-2D Model [J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2014, 50(3): 363 – 368. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 黄勋, 唐川, 周伟. 基于数值模拟的暴雨泥石流暴发频率计算模型 [J]. 工程地质学报, 2014, 22(6): 1271 – 1278. [HUANG Xun, TANG Chuan, ZHOU Wei. Numerical simulation of occurrence frequency estimation model for debris flows [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2014, 22(6): 1271 – 1278. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 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. [DU Xuejian, SUN Shuqin, ZHAO Zheng, et al. Research on engineering control effect on Hongchun gully debris based on FLO-2D model [J]. *Earth and Environment*, 2016, 44(3): 376 – 381. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 王骏, 丁明涛, 黄英. 基于 FLO-2D 的联合溪沟泥石流运动特征及防治对策 [J]. 西南科技大学学报, 2016,

- 31(2): 59-66 [Wang Jun, Ding Mingtao, Huang Ying Debris flow motion feature and control measures of Lianhexi valley based on FLO-2D[J]. Journal of Southwest University of Science and Technology, 2016, 31(2): 59-66. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 贾涛,唐川,王纳纳. 基于FLO-2D与冲量模型的泥石流危险度分区方法及应用[J]. 水电能源科学, 2015, 33(2): 152 – 155. [JIA Tao, TANG Chuan, WANG Nana. Method and application of debris flow hazard zoning based on FLO-2D and impulse model[J]. Water Resources and Power, 2015, 33(2): 152 – 155. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 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(1/2): 100 – 112.
- [15] 梁鸿熙, 尚敏, 徐鑫. 基于FLO-2D数值模拟的泥石流流动与堆积影响因素研究[J]. 工程地质学报, 2016, 24(2): 228 – 234. [LIANG Hongxi, SHANG Min, XU Xin. Research on the influence factors of flow and deposition of debris flow based on the FLO-2D simulation[J]. Journal of Engineering Geology, 2016, 24(2): 228 – 234. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 侯圣山, 曹鹏, 陈亮, 等. 基于数值模拟的耳阳河流域泥石流灾害危险性评价[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(2): 143 – 151. [HOU Shengshan, CAO Peng, CHEN Liang, et al. Debris flow hazard assessment of the Eryang River watershed based on numerical simulation[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(2): 143 – 151. (in Chinese with English abstract)]
- [17] PENG S H, LU S C. FLO-2D simulation of mudflow caused by large landslide due to extremely heavy rainfall in southeastern Taiwan during Typhoon Morakot[J]. *Journal of Mountain Science*, 2013, 10(2): 207 – 218.
- [18] WU Y H, LIU K F, CHEN Y C. Comparison between FLO-2D and Debris-2D on the application of assessment of granular debris flow hazards with case study[J]. *Journal of Mountain Science*, 2013, 10(2): 293 – 304.
- [19] 黄勇, 方宏宇, 刘任鸿. 德钦县巨水沟泥石流危险性评价[J]. 地下水, 2021, 43(2): 133 – 136. [HUANG Yong, FANG Hongyu, LIU Renhon. Risk evaluation of debris flow in Jushui drain in Deqin County[J]. Ground Water, 2021, 43(2): 133 – 136. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 亓春英, 聂俊丽, 杨云保, 等. 云南省德钦县泥石流特征及成因分析[J]. 地球与环境, 2005, 33(增刊1): 388 – 391. [QI Chunying, NIE Junli, YANG Yunbao, et al. Analysis of the characteristic cause of debris flow in Deqin County[J]. Earth and Environment, 2005, 33(Sup1): 388 – 391. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 黄琴辉, 张杰, 冯望. 云南德钦县地质灾害特征分析及防治对策[J]. 云南地质, 2018, 37(3): 359 – 365. [HUANG Qinhui, ZHANG Jie, FENG Wang. The feature analysis and prevention strategy of geologic disaster in Deqin, Yunnan[J]. *Yunnan Geology*, 2018, 37(3): 359 – 365. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 曹鹏, 侯圣山, 陈亮, 等. 基于数值模拟的群发性泥石流危险性评价: 以甘肃岷县麻路河流域为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(2): 100 – 109. [CAO Peng, HOU Shengshan, CHEN Liang, et al. Risk assessment of mass debris flow based on numerical simulation: an example from the Malu River basin in Min County[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(2): 100 – 109. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 汪美华