

基于试验模拟的滑坡泥石流灾害链风险监测预警

李林¹, 李涛¹, 何治林¹, 李树建^{1,2}, 董健¹, 王彪¹

(1.云南磷化集团有限公司, 云南 昆明 650600; 2.国家磷资源开发利用工程技术研究中心, 云南 昆明 650600)

摘要: [目的] 开展以元阳梯田滑坡泥石流地质灾害链为基础的风险监测预警研究, 为改善降雨诱发型滑坡泥石流灾害链的预警精度, 提高防灾减灾工作针对性提供科学依据。[方法] 采用降雨模型模拟试验来探讨元阳梯田滑坡—泥石流灾害链破坏过程, 通过对降雨量、体积含水率和坡体变形破坏过程进行实时监测, 分析不同降雨条件下灾害链风险预警阈值。试验设置长时间中雨(50 mm/h)、长时间暴雨(120 mm/h)、循环间歇暴雨和干旱突发型暴雨4种降雨工况。[结果] 在降雨持续作用下, 灾害链发展过程为: 地表冲刷、蠕滑、快速滑动、泥石流运移及运移结束。坡体破坏最先从左侧坡脚开始, 右侧坡脚稍后。不同降雨工况下坡体破坏形式不同: 暴雨工况下坡体中部会产生一条横向裂缝, 而形成上下两个滑块; 中雨工况下坡体则陆续形成多个滑块; 干旱突发暴雨工况下泥石流形成时间最短, 运移距离最远, 流通和堆积范围相比其他降雨工况更广。[结论] 滑坡泥石流灾害链预警监测指标主要为累积降雨量、降雨持续时间、含水率变化和坡体变形发展现场监测。这些监测参数受降雨条件、土体性质、坡角和外部动力条件等诸多因素影响, 因此在实际应用中需要综合考虑这些因素。

关键词: 强降雨; 滑坡; 泥石流; 灾害链; 模型试验; 监测预警

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2024)02-0167-09

中图分类号: P642.2

文献参数: 李林, 李涛, 何治林, 等. 基于试验模拟的滑坡泥石流灾害链风险监测预警[J]. 水土保持通报, 2024, 44(2): 167-175. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.02.018; Li Lin, Li Tao, He Zhilin, et al. Monitoring and early warning of landslide and debris flow disaster chain risk based on experimental simulation [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(2): 167-175.

Monitoring and Early Warning of Landslide and Debris Flow Disaster Chain Risk Based on Experimental Simulation

Li Lin¹, Li Tao¹, He Zhilin¹, Li Shujian^{1,2}, Dong Jian¹, Wang Biao¹

(1. Yunnan Phosphate Chemical Group Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650600, China;

2. National Phosphorus Resources Development and Utilization Engineering Research Center, Kunming, Yunnan 650600, China)

Abstract: [Objective] Risk monitoring and early warning were studied based on the geological disaster chain of landslides and debris flows in Yuanyang terraced fields in order to improve the accuracy of warnings related to rainfall-induced landslides and debris flow disaster chains and to provide a scientific basis for improving the pertinence of work related to reducing and preventing such disasters. [Methods] This investigation delved into the failure process of disaster chains related to landslides and debris flows in the Yuanyang terraced area through rainfall model simulation experiments. Real-time monitoring of rainfall, volumetric moisture content, and slope deformation coupled with an analysis of the early-warning thresholds for disaster chain risks under various rainfall conditions formed a crucial part of the study. Four specific rainfall conditions [i.e., long-term moderate rain (50 mm/h), long-term heavy rain (120 mm/h), cyclic intermittent heavy rain, and drought-sudden heavy rain] were established. [Results] The continuous impact of rainfall revealed the development stages of the disaster chain, progressing through surface scouring, creeping, rapid sliding, and debris flow migration until the culmination of the movement process. Slope damage initiated from the foot of the left slope, subsequently affecting the foot of the right slope. Various forms of slope damage manifested themselves under distinct rainfall conditions: transverse cracks appeared in

收稿日期: 2023-11-14

修回日期: 2024-01-29

资助项目: 国家自然科学基金项目“深部硬岩巷道围岩板裂化破坏动静力学响应机制”(52204160)

第一作者: 李林(1996—), 男(汉族), 云南省曲靖市人, 硕士研究生, 助理工程师, 主要从事采矿安全技术与工程地质方面的研究。Email: 1090198957@qq.com。

the middle of the slope during heavy rain, resulting in the formation of two landslides (one above and one below); multiple landslides occurred consecutively under moderate rain conditions; and mudslides formed rapidly under drought-sudden heavy rain, covering the longest distances and accumulating over a broader area than observed for other rainfall scenarios. [Conclusion] The main monitoring indicators for disaster chain early warning of landslide and debris flow include cumulative rainfall, duration of rainfall, changes in moisture content, and on-site monitoring of slope deformation development. These monitoring parameters are influenced by various factors such as rainfall conditions, soil properties, slope angle, and external dynamic conditions. Therefore, in practical applications, it is necessary to comprehensively consider these factors.

Keywords: heavy rainfall; landslide; debris flow; disaster chain; model test; monitoring alert

引发边坡破坏的因素众多(如降雨、地震和人工不合理开发等),降雨是诱发滑坡最常见的因素之一。例如,云南省红河市元阳梯田滑坡灾害发生于干旱季节向雨水季节过渡期间,突发持续强降雨诱发边坡滑动,后形成泥石流持续沿梯田流动,对元阳梯田农业生产造成极大破坏(图 1)。

降雨对边坡破坏可分为两类:①降雨改变坡体应力平衡,如增加坡体自重、冲刷渗流等;②降雨改变边坡岩土体性质,如软化作用、降低土体强度等^[1-2]。基于边坡工程地质条件、降雨趋势和规律,持续监测能够对灾害进行预警,在减少人员伤亡和财产损失方面发挥重要作用。

a 滑坡



b 泥石流



图 1 元阳梯田滑坡泥石流灾害链现场情况

Fig.1 Situation of disaster chain of mud-rock flow in Yuanyang terrace landslide

近年来降雨引发边坡失稳是边坡灾害研究的热点。利用降雨强度、饱和度、基质吸力、坡度等多参数指标进行计算分析坡体实时稳定性的方法已十分成熟。通过监测上述相关指标建立边坡滑动预警体系,可以为降雨滑坡的准确预警预报提供方法和借鉴^[3-5];李忠燕,李子豪等^[6-7]通过建立降雨临界或阈值模型,考虑降雨强度和天气预报,结合地质灾害实际情况展开预报和评价;而进行滑坡泥石流等地质灾害的预测,前提是做好其易发性评价,结合多个指标进行风险等级评价^[8];朱赛楠等^[9]通过数据解译与动态观测的方法,对金沙江色拉滑坡的变形过程特征、形成机理及发展趋势进行分析,并结合金沙江特殊地质条件探讨了高位堵江滑坡早期识别与灾害风险管理问题。

在边坡破坏机理和破坏过程研究方面,国内学者^[10-14]取得显著成果,他们针对不同工程地质条件、降雨条件及振动荷载的边坡进行研究,而作为诱发滑

坡重要的降雨条件更是研究重点,通过模型试验分析不同降雨条件和土体渗流情况,为边坡失稳预警机制提供依据;刘广宁等^[15]以野外区域实际发生滑坡地质灾害情况,进行资料梳理,结合其空间分布和影响因素展开灾害发育特征及成因机制的研究。在泥石流形成机理方面,杨进兵等^[16]通过渗透试验确定影响泥石流堆积土渗透性的细颗粒上限粒径,并研究了细颗粒含量与泥石流堆积土渗透系数的关系,为泥石流机理研究做出重要贡献。在降雨诱发泥石流研究方面,很多学者^[17-18]从降雨条件和土体渗流入手,分析降雨量与泥石流发生的关系、水岩耦合规律和泥石流的发展过程,为泥石流灾害预警、防灾减灾提供理论依据;松散岩性边坡在降雨条件下滑动之后极易演化为泥石流,随后沿沟谷流动,形成灾害链,滑坡泥石流灾害链其转化机理非常复杂,受多种致灾因素影响^[19-21]。因此灾害链的起演进、破坏效应和风险防范措施是边坡灾害研究的重点^[22-24]。

实现滑坡泥石流灾害链的预警难度比较高,其受岩土性质、地形条件、降雨特性等诸多复杂因素的影响,所以基于一部分基准值进行预警的精度低。目前大多数预警方式为针对滑坡或者泥石流的单一预警,对降雨诱发滑坡泥石流灾害链的综合预警研究较为欠缺^[25]。此次研究以世界遗产元阳梯田为对象,梯田区边坡具有其特殊性,农忙时节活荷载和蓄水量增加边坡荷载及灾害危险性。本文基于山区工程地质条件,选取合适雨量预警参数,结合前人研究和实地勘察资料,探讨降雨对梯田边坡破坏的影响,综合考虑梯田边坡的各种因素,构建滑坡泥石流灾害链预警模型。本研究成果对于改善降雨诱发型滑坡泥石流灾害链的预警精度,提高防灾减灾工作具有重要意义。

1 模型试验概述

研究开展方式主要以模型模拟试验和野外现场滑坡泥石流灾害详细调查,结合区域气象资料情况进行降雨预警值修正。模型试验包括模型构成、制作和试验方案布置。

1.1 试验模型介绍

试验模型主要包括主体部分、降雨设施和监测设施。

(1) 模型主体。模型主体部分为一个具有自由升降和角度调节功能的模型槽,其长×宽×高为 3.0 m×1.0 m×0.5 m。槽体周围构建有机玻璃与铝质挡板,以保障透明度和结构稳定性。模型槽内部构造可根据试验需要自动调节,以高度还原野外场地条件,增加模拟试验真实性。模型槽偏低一侧顶底部设有出一排水口,以进行泥沙量和水流量观测。顶部为 1 个大出水口,用于模拟、观测地表水径流;底部设有 2 个小出水孔,用于观测地下水渗流、泥沙量及排水情况。通过调节出水口的出水量,能够实现降雨量小区域调控。此外,模型槽坡度可进行灵活调节,以用

于不同坡角坡体破坏的反演分析。

(2) 降雨装置。主要由钢管、降雨喷头、抽水泵和电子水表等组成。装有电子水表的抽水泵放置于水箱内,钢管连接抽水泵和降雨喷头,降雨喷头分为大、中、小 3 种类型。试验通过控制水泵压力和切换喷头类型模拟小雨—大暴雨不同降雨工况,同时电子水表能够监测降雨量。

(3) 监测装置。包括孔隙水压力传感器、土压力传感器、体积含水率传感器、高速摄影仪和拍照录像仪等实时监测设备。这些监测设备能够直接测量孔隙水压力、土压力和体积含水率,体现相关参数的变化规律,同时具有计时、录像、拍照等功能,实时记录试验动态变化情况,为后续分析研究提供数据和资料支持。

1.2 模型制作

(1) 在基础矩形模型槽上增加有机玻璃板及铝质挡板加以改进,使模型槽高度满足试验地形地貌条件,其具体操作为:分别将两块 1.5 m×1.0 m 铝板和一块 1 m×1.0 m 有机玻璃板放置于模型槽两个长边与顶部宽边并固定,选用有机玻璃便于试验观测和记录。

(2) 试验用土取自元阳梯田灾害区,主要为夹不同粒径石块的粉质黏土,石块磨圆度高,土体含碎石量约为 40%。试验用土颗粒级配分布如表 1 所示。试验用土物理特性指标如表 2 所示。采用分层填筑法制作边坡模型,逐层进行夯实并通过标准贯入试验记录锤击数,使各工况试验土体与野外现场土锤击情况接近,夯击过程中保持土体密实度均匀。在模型槽内先堆填 0.3 m 垫层,垫层夯击压实后模型槽整体坡度调节为 20°。试验模型边坡主轴长设置为 1.1 m,边坡高度 0.65 m,随后平整边坡面使边坡整体坡度为 45°(其制作边坡模型为 25°)。孔隙水压力传感器、土压力传感器和体积含水率传感器埋置于土体中,以实时监测相关参数变化情况。

表 1 试验用土颗粒级配分布
Table 1 Size gradation distribution of test soil particles

粒径/mm	10	5	2	1	0.5	0.25	0.1	0.075	0.005
小于某粒径土颗粒含量/%	100	83.04	71.43	51.1	43.99	32.4	24.11	7.8	1.03

表 2 试验用土物理性质指标
Table 2 Physical property indexes of test soil

相对密度(G_s)/(g·cm ⁻³)	粒径中值 d_{50} /mm	孔隙比(e)	饱和渗透系数 k_s /(m·s ⁻¹)	黏聚力 c /(kPa)	内摩擦角 φ /(°)
2.67	0.98	0.84	6.99×10^{-8}	33.9	10.2

(3) 梯田分布区地形坡度根据现场情况取 15°。元阳梯田依坡而建,由于梯田大小不一,在试验中灵活布置,其尺寸范围选择为长 0.2~0.6 m,宽 0.1~0.3 m,

田埂高 0.04~0.1 m。梯田布置于模型槽土体上,按照地形坡度(15°)压实后布置,总共布置 10 级梯田。梯田边坡模型实体如图 2 所示。



图 2 梯田边坡模型
Fig.2 Terrace slope model

1.3 试验方案

2022 年 5 月中旬开始进行试验,为研究不同降

雨特性对滑坡泥石流灾害链的影响,本次试验模拟降雨类型分为中雨(50~60 mm/h)和暴雨(100~120 mm/h)两种。试验工况设置为:持续长时间中雨(G1)、持续长时间暴雨(G2)、循环间歇暴雨(G3)和干旱状态突发持续长时间暴雨(G4)4 种,其中 G3 试验循环间隔:1 h 暴雨—停雨 0.5~1 h 暴雨—停雨 30 min,如此循环进行至灾害发生。具体试验方案如表 3 所示。试验开始后进行实时记录监测,对坡体发展变形进行观测拍照,记录坡面裂缝产生的时间、位置、长度等信息;每隔 30 s 对各传感器进行一次读数,同时记录孔隙水压力(μ)、土压力(E_0)和体积含水率(ω),试验中出现滑移趋势或数据波动较大则每 10 s 读数并记录,主要关注滑移时各临界值、滑坡体和泥石流含水峰值,作为监测预警依据;坡体滑移之后对滑坡过程和灾害链形成过程进行描述,并记录关键时间。

表 3 不同试验工况模型参数及试验方案

Table 3 Model parameters and test schemes of different test conditions

暴雨编号	2 mm 以上碎石含量/%	地形坡度/(°)	干密度 ρ_d /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	降雨强度 q /($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)	降雨历时/h
G1	0.39	20	1.49	50~60	7
G2	0.43	20	1.48	100~120	5
G3	0.41	20	1.51	100~120	5
G4	0.43	20	1.52	100~120	3

2 试验结果与分析

2.1 降雨诱发滑坡泥石流形成演化过程分析

试验表明,在中雨(50~60 mm/h)或暴雨(100~120 mm/h)降雨作用持续进行下,灾害链形成过程整体表现为地表冲刷→石块出露→地表沉降→后缘拉裂缝增长→前缘剪出口出现→局部崩滑→中部贯穿拉裂缝→整体滑移→泥石流蔓延。其中 G4 工况致灾时间极短。各工况由于降雨强度不同而使得灾害

链各现象出现时间不一。
通过对不同降雨工况试验现象观察,梯田边坡致灾模式为降雨—滑坡—泥石流灾害链,在每个工况中都表现出降雨引发滑坡,在持续降雨作用下滑坡体演化成泥石流。降雨入渗和地表径流会带走土体中的细颗粒物质,导致地表石块出露和土体结构变化,使得地表水流速下降,有利于雨水入渗,加剧坡体变形(地表沉降和拉裂缝如图 3 所示,由 G2 试验可明显观察到前缘剪出口)。



图 3 坡体变形过程中的沉降和拉裂缝
Fig.3 Subsidence and tension cracks during slope deformation

坡体整体破坏前容易形成局部崩滑和局部泥石流(图 4),较陡峭部位会出现孤石崩落,这些现象都可作为灾害链风险预警的重要指标。依照泥石流形成过程可将泥石流分为局部泥石流、滑床泥石流和滑坡型泥石流。局部泥石流主要是坡体局部汇水较大且土体松散直接形成泥石流运移;滑床泥石流是滑坡形成后滑床上松散物质在雨水作用下运移成泥石流;滑坡泥石流是滑坡形成的松散堆积物受降雨影响出现的流动。

滑坡转化为泥石流过程较为复杂,滑移后大多数土体还保持一定结构和完整性,但滑移运动之后使得土体结构更加松散,裂缝变宽,更有利于雨水入渗,使得土体结构越来越差,直到演化为泥石流,因此滑移后少部分直接转化为泥石流,大部分滑坡堆积物先堆积于坡脚,在持续降雨作用下经过多次泥石流运移而

汇集。G4 工况坡体滑动后大部分演化为泥石流,对下游梯田区造成大范围破坏。灾害链形成演化过程如图 5 所示。

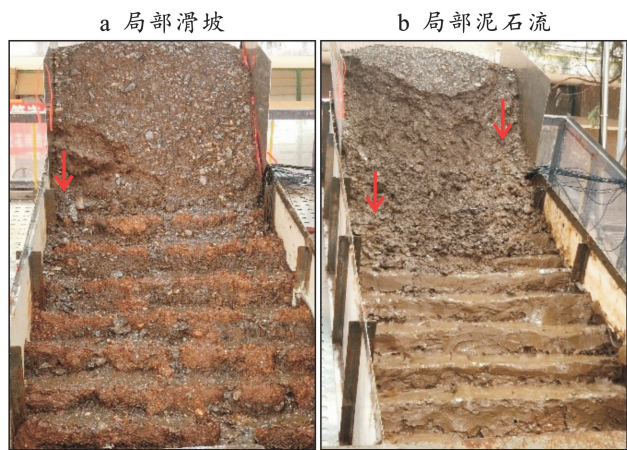


图 4 试验中局部滑坡和泥石流
Fig.4 Local landslide and debris flow in test

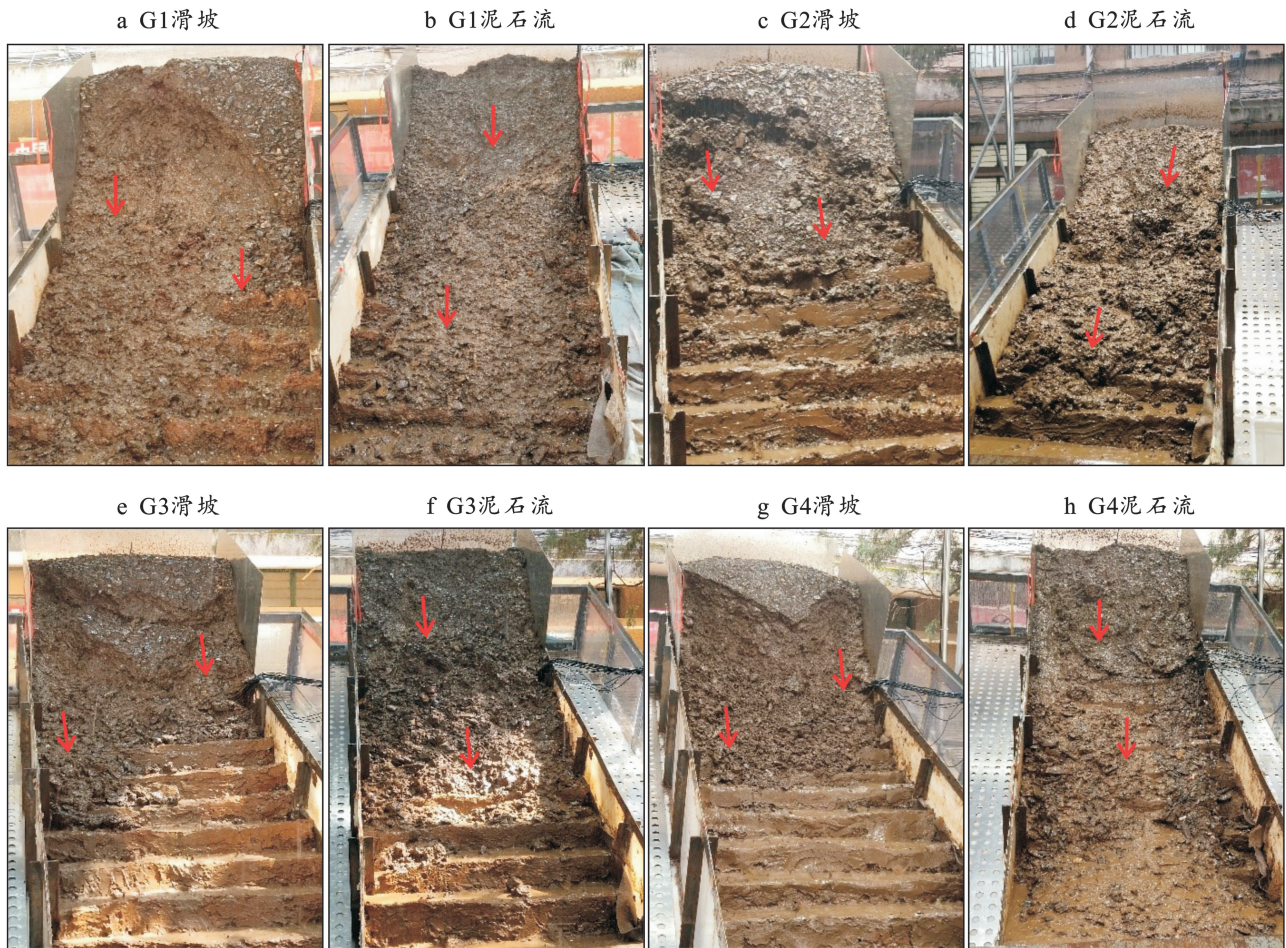


图 5 不同降雨工况下滑坡泥石流灾害链形成过程
Fig.5 Formation process of disaster chain of landslide and debris flow under different rainfall condition

2.2 灾害链致灾过程分析

本次试验降雨工况下灾害链主要分为局部崩滑、局部泥石流、整体滑移和泥石流,滑坡破坏程度较高,

泥石流影响范围较大。根据多次试验可知在 G2 与 G3 降雨条件下第 3—4 h 出现局部滑坡和块体滚落,第 4—5 h 出现边坡整体滑动;相比之下 G1 试验灾害链

出现时间更久且坡体分为多次滑动,致灾过程较缓; G4 试验因土体松散,在突发性暴雨作用下 30~40 min 即发生局部崩滑和局部泥石流,1 h 出现坡体整体滑动,且以流滑为主,致灾速度极快。泥石流的物质来源主要为局部崩滑物质、滑坡堆积物和滑床表面松散物质。坡体滑移后少部分土体迅速演化为泥石流向下游运移,大部分土体则在后续降雨作用下形成泥石流对梯田区进行侵蚀和掩埋。试验中滑坡体大部分堆积于 4 级梯田以上,泥石流大部分位于 8 级梯田以上,少部分块石、细颗粒物能到达 10 级梯田,G4

工况下泥石流远超 10 级梯田。不同降雨工况下滑坡泥石流灾害链形成演化和致灾情况如表 4 所示。根据多次监测显示,土体滑移前后体积含水率可达 40%~45%左右,滑动后含水率迅速上升,形成泥石流后土体含水率峰值可达约 60%,并逐渐趋于稳定,说明滑移时土体并不饱和,滑移后随着降雨持续进行演化为泥石流时土体才趋于饱和;土压力在试验过程中持续上升,在发生快速滑移时会迅速减少;孔隙水压力变化比较稳定,处于 0.25~0.3 kPa 时致灾风险极高。

表 4 不同降雨工况下灾害链情况
Table 4 Disaster chain under different rainfall conditions

试验 工况	局部滑动 时间/min	局部崩滑 块体数	整体滑动 时间/min	滑坡泥石流 转化程度/%	滑坡致 灾范围	泥石流致 灾范围	现象描述
G1	261	3	327	70	3 级梯田	6 级梯田	滑坡自下而上逐渐发展,多次形成拉裂缝和局部崩滑,主体滑动分为 3 个块体,伴随局部流滑,滑动后逐渐转化为泥石流,过程较缓,对梯田破坏稍弱
G2	239	1	275	65	5 级梯田	8 级梯田	滑坡自下而上逐渐发展,滑动前在滑体中部形成横向贯穿裂缝,整体滑动在 3 min 内结束,滑坡体迅速转化为泥石流运移,过程较强烈,对梯田破坏较强
G3	218	2	267	50	4 级梯田	7 级梯田	整体过程和 G2 试验近似,泥石流形成过程稍缓慢
G4	41	2	65	85	5 级梯田	远超 10 级梯田	滑坡所需时间很短,且分为两部分,下部坡体以块体运动为主,上部坡体以流滑为主,坡体滑动后大部分迅速转化为泥石流,速度较快,运移距离较远,形成泥石流冲沟大量堆积于梯田下游

3 讨论

3.1 不同降雨工况对灾害链形成影响

通过降雨试验和监测数据分析,不同降雨工况下滑坡泥石流灾害链具体形成演化过程存在差异。监测数据表明,在降雨过程中孔隙水压力、体积含水率和土压力都随时间变化,边坡发展情况与监测数据存在密切联系。根据每次试验发生滑坡前的数值规律,可以建立一种基于含水率监测的预警方法。

不同降雨工况试验结果具有不同特点。G1 试验因雨量较小,发生滑坡所需时间较长,试验过程分为多次破坏,且转化为泥石流过程较缓,致灾范围偏小。暴雨工况下,滑移时间较短,速度较快,转化为泥石流较剧烈,致灾范围也较大。G3 试验为循环间隔暴雨,灾害发生时间和 G2 相近,但成灾后转化为泥石流过程则较弱。而 G4 为干旱状态突发暴雨,土质较疏松,雨水容易入渗,滑动后产生更多松散物质,为泥石流形成提供了有利条件,因此,G4 试验中泥石流形成量极大,流动速度快,运移距离远。

根据试验数据,物源来源主要包括局部崩滑物质、整体滑坡堆积物和滑床表面松散物质。泥石流形

成区主要位于 3 级梯田以上,流通区主要为第 4—6 级梯田,堆积区为第 6—9 级梯田。此外,坡体滑动后滑床整体呈圆弧形,在雨水后续作用下,滑床也会产生泥石流,使得滑床呈斜线形。

3.2 滑坡泥石流灾害链风险预警

滑坡泥石流灾害链风险预警阈值与预警时间主要通过坡体发生滑移时的累积降雨量和所对应的试验时间,结合该时间段的体积含水率、孔隙水压力和土压力的变化规律合理总结得出。

传感器数据整个试验土水特征变化规律(图 6),体现了试验过程中土体内部土体特征整体变化情况。在 4 个工况中,体积含水率、孔隙水压力和土压力都随着降雨持续进行逐渐上升,其中 G4 为特殊工况,考虑干旱状态,所以致灾历时较短。

试验中体积含水率发生较大波动时,则是发生了坡体滑移,波动变化时间基本上和坡体破坏时间相近,波动情况反映土体内部变化特征。使得地下水入渗作用变强,且含水率快速持续上升,直至演化为泥石流,逐渐趋近于饱和状态。孔隙水压力在整体呈现上升状态,发生骤降的情况时,此时坡体发生滑移,滑移后受降雨影响数值逐渐上升,并在后续形成泥石流

时发生波动。土压力上升规律比较均衡,一旦发生滑移就迅速降低,降低量与滑移量相关,基本上数值发生较大波动都与发生滑移有关。根据试验中数据变化规律一方面可以对坡体情况进行判断,另一方面可以根据峰值情况结合坡体发展变化特征进行预测。

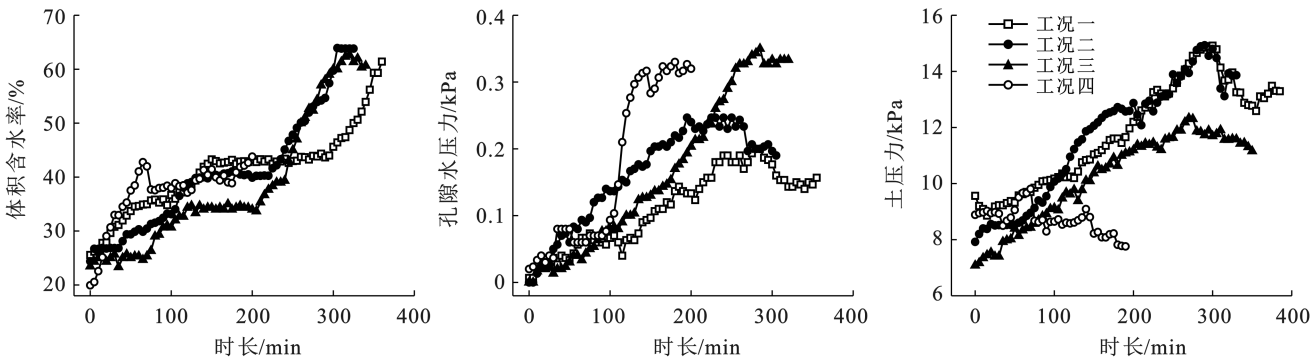


图 6 滑坡泥石流灾害链预警土水特征变化规律

Fig.6 Changes of soil and water characteristics in landslide and debris flow disaster chain warning

表 5 不同降雨工况灾害链预警值

Table 5 Disaster chain warning values under different rainfall conditions

试验工况	滑坡雨量 阈值/mm	泥石流雨量 阈值/mm	预警阈值/ mm	预警时间/ min	滑坡含水率 预警值 ω /%	泥石流体积 含水率 ω_0 /%
G1	320	330	180	210	41	52.4
G2	550	570	410	180	42	55.6
G3	360	410	240	190	41	53.9
G4	130	130	80	40	37	59.2

注:预警阈值与预警时间是根据不同降雨工况所对应的坡体变形破坏特征总结出累积雨量;滑坡含水率预警值取值比滑坡含水率小约 5%,滑移前易发生突变。

不同降雨工况下所引发滑坡雨量阈值有显著差异,最小阈值只有 130 mm(G4),最大阈值可达到 550 mm(G2),在利用雨量阈值进行监测预警需要考虑土体松散程度、季节、降雨类型等。中雨条件(G1)的滑坡雨量阈值为 320 mm,远远小于持续暴雨(G2)作用下的雨量值,说明降雨持续时间是影响灾害发生的重要控制因素,雨量少反而更有利于雨水入渗,因此不能只通过降雨量监测来进行预警。土一水特征变化也是一种重要监测预警参数,常规情况下土体含水率约为 25%,干旱情况下土体含水率会更低,使得土体更松散。体积含水率传感器实时监测不同工况下土体含水率,当坡体即将滑坡时土体含水率易发生突变,试验中通过传感器数值和滑坡土样含水率测定,考虑到预警反馈时间,本文确定含水率预警值要比滑坡含水率低 5%。而孔隙水压力和土压力则可作为监测预警的重要依据,结合坡体发展、累积雨量和体积含水率等进行分析,更有利于监测预警。坡体变形发展情况的预警主要根据边坡现场监测,观察坡体是否出现拉裂缝、地表沉降和前缘剪出口,部分边坡

滑坡泥石流灾害链风险预警监测指标主要为雨量阈值、土一水变化特征、降雨持续时间和边坡变形发展特征,试验过程中坡体变形发展在体积含水率、孔隙水压力和土压力数据中也能够体现,时间基本一致。不同降雨工况预警值总结如表 5 所示。

脚是否出现渗水情况,一旦出现这些现象且不断变化应及时预警,同时局部崩塌、滑移和泥石流也是关键监测内容。

4 实践运用

本预警监测研究方法主要适用于元阳梯田景区及周边范围内工程地质条件相似边坡,除此之外还需综合考虑岩土性质、坡角以及外部动力等因素的影响,对不同气候条件下的监测预警也应该考虑预警值的不同,尤其是雨季和旱季。该方法在很多坡体预警监测中都具有借鉴和参照作用。

(1) 雨量阈值预警法。在对坡体进行野外详细调查的前提下,结合地区气候降雨特点,对相近地质条件滑坡可设置合理雨量预警阈值,并布置雨量监测器,超过雨量阈值立即预警,元阳梯田雨季雨量预警值为 4 h 内约 300 mm,旱季为 2 h 内约 120 mm。

(2) 滑坡泥石流灾害链变形发展规律监测。大多数滑坡泥石流在滑移前都或多或少产生拉裂缝、地表沉降、剪出口或滑移前征兆的一些特征,长期对坡

体进行特征监测,一旦特征变化过于明显则展开预警,这些特征可以直接作为元阳梯田监测变形特征。

(3) 斜坡体破坏模式判别法。坡体滑移除了观察变形特征外,还有破坏模式,就试验中元阳梯田来说,每次滑移前都会形成局部崩塌或滑坡,干旱状态下形成局部泥石流。一般而言形成局部灾害或产生贯穿拉裂缝,主体滑移的风险极高,有助于进行风险判别。大多数坡体致灾发生滑坡或泥石流都具有该特点,直接作为监测指标。

(4) 土水特征变化长期监测预警。该方法是一种借助传感器实时工程地质条件监测分析的方法。通过传感器埋设到坡体中监测含水率、土压力和孔隙水压力等参数实时变化,结合工程地质条件,如元阳梯田体积含水率接近 40%时就需要进行预警,同时还要结合土压力、孔隙水压力等参数变化情况综合分析。

5 结论

(1) 本研究开发了一种降雨诱发梯田区滑坡泥石流灾害链的模型试验装置,并模拟不同降雨工况诱发灾害链的试验过程。

(2) 试验表明,灾害链演化过程整体表现为:地表冲刷→石块出露→地表沉降→后缘拉裂缝增长→前缘出现剪出口→局部崩滑→中部贯穿拉裂缝→整体滑移→泥石流蔓延。

(3) 4 种降雨工况所表现的破坏模式非常接近,均为左侧坡脚先发生局部破坏,其次是右侧坡脚,同时伴随碎石滚落和局部泥石流。暴雨工况下坡体中部先出现横向贯穿裂缝,中雨工况下坡体主滑则分为多个滑块。

(4) 密实度较高坡体在滑坡发生后,部分土体迅速演化为泥石流,主体则在后续降雨作用下演化为泥石流。土体较松散干旱型边坡在坡体滑动后,大部分土体迅速转化为泥石流,少部分在降雨作用下陆续转化为泥石流。

(5) 滑坡泥石流灾害链预警监测指标主要为累积降雨量、降雨持续时间、含水率变化和坡体变形发展现场监测。这些监测参数受降雨条件、土体性质、坡角和外部动力条件等诸多因素影响,因此在实际应用中需要综合考虑这些因素。

参考文献(References)

[1] 林鸿州,于玉贞,李广信,等.降雨特性对土质边坡失稳的影响[J].岩石力学与工程学报,2009,28(1):198-204.
Lin Hongzhou, Yu Yuzhen, Li Guangxin, et al. Influence of rainfall characteristics on soil slope failure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,

2009,28(1):198-204.

- [2] 郭剑,崔一飞.滑坡—泥石流转化研究进展[J].工程地质学报,2023,31(3):762-779.
Guo Jian, Cui Yifei. An overview of landslide-induced debris flow[J]. Journal of Engineering Geology, 2023, 31(3):762-779.
- [3] Yang Zongji, Cai Huan, Shao Wei, et al. Clarifying the hydrological mechanisms and thresholds for rainfall-induced landslide: In situ monitoring of big data to unsaturated slope stability analysis[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2019,78:2139-2150.
- [4] 崔鹏,郭剑,沟谷灾害链演化模式与风险防控对策[J].工程科学与技术,2021,53(3):5-18.
Cui Peng, Guo Jian. Evolution models, risk prevention and control countermeasures of the valley disaster chain[J]. Advanced Engineering Sciences, 2021,53(3):5-18.
- [5] Ering P, Sivakumar Babu G L S. Characterization of critical rainfall for slopes prone to rainfall-induced landslides[J]. Natural Hazards Review, 2020, 21(3):06020003.
- [6] 李忠燕,田其博,张东海,等.遵义市不同地质灾害易发区滑坡临界雨量研究[J].水土保持通报,2018,38(6):217-223,239.
Li Zhongyan, Tian Qibo, Zhang Donghai, et al. Critical rainfall of landslides at Zunyi City in different geological hazard prone regions[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018,38(6):217-223,239.
- [7] 李子豪,王钧,郭婷婷,等.基于降雨强度—历时的安徽省黄山市滑坡分组阈值研究[J].水土保持通报,2022,42(1):184-190.
Li Zihao, Wang Jun, Guo Tingting, et al. Landslide classification threshold in Huangshan City of Anhui Province based on rainfall intensity-duration[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022,42(1):184-190.
- [8] 唐兴港,王慧勇,黄豆,等.长江中下游地区滑坡的易发性评价:以江西省为例[J].水土保持通报,2021,41(3):166-172.
Tang Xinggang, Wang Huiyong, Huang Dou, et al. Evaluation of landslide susceptibility in middle and lower reaches of Yangtze River: Taking Jiangxi Province as a case study[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021,41(3):166-172.
- [9] 朱赛楠,殷跃平,王猛,等.金沙江结合带高位远程滑坡失稳机理及减灾对策研究:以金沙江色拉滑坡为例[J].岩土工程学报,2021,43(4):688-697.
Zhu Sainan, Yin Yueping, Wang Meng, et al. Instability mechanism and disaster mitigation measures of long-distance landslide at high location in Jinsha River junction zone: Case study of Sela landslide in Jinsha River, Tibet[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021,43(4):688-697.

- [10] 杨旭,周翠英,刘镇,等.华南典型巨厚层红层软岩边坡降雨失稳的模型试验研究[J].岩石力学与工程学报, 2016,35(3):549-557.
Yang Xu, Zhou Cuiying, Liu Zhen, et al. Model tests for failure mechanism of typical soft rock slopes of red beds under rainfall in South China [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35 (3): 549-557.
- [11] 汤明高,许强,李九乾,等.降雨诱发震后松散堆积滑坡的启动试验研究[J].水文地质工程地质, 2016,43(4): 128-134,140.
Tang Minggao, Xu Qiang, Li Jiujian, et al. An experimental study of the failure mechanism of shallow landslides after earthquake triggered by rainfall [J], Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43 (4): 128-134,140.
- [12] 杨宗佶,蔡焕,雷小芹,等.非饱和地震滑坡堆积体降雨破坏水-力耦合行为试验[J].岩土力学, 2019,40(5): 1869-1880.
Yang Zongji, Cai Huan, Lei Xiaoqin, et al. Experiment on hydro-mechanical behavior of unsaturated gravelly soil slope [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019,40(5): 1869-1880.
- [13] 包小华,廖志广,徐长节,等.不同渗流边界条件下粉砂边坡失稳模型试验研究[J].岩土力学, 2019,40(10): 3789-3796.
Bao Xiaohua, Liao Zhiguang, Xu Changjie, et al. Model test study of the failure of silty sand slope under different seepage boundary conditions [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019,40(10):3789-3796.
- [14] 马蓓青,杜玉鹏,王怀星,等.持续降雨条件下黄土边坡稳定性试验研究[J].水土保持学报, 2021,35(5):50-56.
Ma Beiqing, Du Yupeng, Wang Huaixing, et al. Experimental study on stability of loess slope stability under continuous rainfall [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021,35(5):50-56.
- [15] 刘广宁,齐信,黄波林,等.西陵峡水田坝区域地质灾害发育特征及成因机制[J].水土保持通报, 2017,37(1): 319-324.
Liu Guangning, Qi Xin, Huang Bolin, et al. Development characteristics and mechanism of regional geohazards in Shuitianba area of Xiling gorge [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017,37(1):319-324.
- [16] 杨进兵,陈兴长,汪惠,等.泥石流堆积物中细颗粒含量与渗透系数关系试验研究[J].岩土力学, 2016,37(11): 3184-3190.
Yang Jinbing, Chen Xingchang, Wang Hui, et al. An experimental study of relationship between fine grain content and permeability coefficient of debris flow deposits [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016,37(11): 3184-3190.
- [17] 刘丽楠,李守定,姜越,等.新疆伊犁加朗普特黄土滑坡泥石流降雨诱发机理[J].工程地质学报, 2017,25(5): 1230-1237.
Liu Linan, Li Shouding, Jiang Yue, et al. Failure mechanism of loess landslides due to saturated unsaturated seepage: Case study of Gallente landslide in Ili, Xinjiang [J]. Journal of Engineering Geology and the Environment, 2017,25(5):1230-1237.
- [18] 常鸣,窦向阳,唐川,等.降雨驱动泥石流危险性评价[J].地球科学, 2019,44(8):2794-2802.
Chang Ming, Dou Xiangyang, Tang Chuan, et al. Hazard assessment of typical debris flow induced by rainfall intensity [J]. Earth Science, 2019,44(8):2794-2802.
- [19] Chalk C M, Peakall J, Keevil G, et al. Spatial and temporal evolution of an experimental debris flow, exhibiting coupled fluid and particulate phases [J]. Acta Geotechnica, 2022,17(3):965-979.
- [20] Rosli M I, Che Ros F, Razak K A, et al. Modelling debris flow runout: A case study on the Mesilau Watershed, Kundasang, Sabah [J]. Water, 2021, 13 (19):2667.
- [21] 侯伟鹏,余国安.超孔隙水压力的形成及其对滑坡泥石流起动和演进的影响[J].人民黄河, 2023,45(4):102-108.
Hou Weipeng, Yu Guoan. The formation of excess pore water pressure and its influence to the initiation and evolution of landslide and debris flow [J]. Yellow River, 2023,45(4):102-108.
- [22] Shen Danyi, Shi Zhenming, Peng Ming, et al. Preliminary analysis of a rainfall-induced landslide hazard chain in Enshi City, Hubei Province, China in July 2020 [J]. Landslides, 2021, 18(1):509-512.
- [23] Zhou Wenqi, Qiu Haijun, Wang Luyao, et al. Combining rainfall-induced shallow landslides and subsequent debris flows for hazard chain prediction [J]. Catena, 2022,213:106199.
- [24] Liu Wei, Ju Nengpan, Zhang Zhen, et al. Simulating the process of the Jinshajiang landslide-caused disaster chain in October 2018 [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2020,79:2189-2199.
- [25] 杨宗佶,王礼勇,石莉莉,等.降雨滑坡多指标监测预警方法研究[J].岩石力学与工程学报, 2020,39(2): 272-285.
Yang Zongji, Wang Liyong, Shi Lili, et al. Research of monitoring and early warning methods for rainfall-induced landslides based on multivariate thresholds [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020,39(2):272-285.