

元阳梯田滑坡泥石流灾害链致灾模式研究

李林¹, 陈安¹, 孔德彪¹, 和江宏¹, 杨子川¹, 徐继刘², 付俊³

(1. 昆明理工大学国土资源工程学院, 昆明 650093; 2. 云南铜业股份有限公司, 昆明 650051;
3. 同济大学土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 以元阳梯田滑坡泥石流灾害链为研究对象, 以野外精细化调查为基础, 结合室内试验模拟, 对试验中滑坡泥石流演化过程和基质吸力变化进行分析, 对灾害链致灾模式展开研究。试验共设置两种工况共3组试验, 其中暴雨工况试验共进行了两次, 挑选试验结果较好的一次工况进行分析, 试验结论为灾害治理和区域减灾提供依据。研究表明, 滑坡泥石流灾害链致灾过程极为复杂, 降雨使得坡面碎石块大量出露之后, 地表水流速也会逐渐降低, 更有利于地表水入渗, 梯田边坡受持续强降雨影响发生滑动后演化为泥石流继续沿梯田区运移, 上部坡体形成巨大临空面, 不稳定性增加, 相比于持续暴雨而言持续中雨诱发坡体滑动所需时间更长, 滑坡破坏力相比暴雨偏小, 该灾害链致灾模式分为滑坡致灾和泥石流致灾, 前者破坏力较大, 后者影响范围较大, 且不同区域致灾程度差别较大。

关键词: 强降雨; 梯田边坡; 灾害链; 试验模拟; 致灾过程

中图分类号: P642.22; P642.23; TU411; TV131.61 **文献标识码:** A

RESEARCH ON THE DISASTER MODEL OF LANDSLIDE AND DEBRIS FLOW DISASTER CHAIN IN YUANYANG TERRACED FIELDS

LI Lin¹, CHEN An¹, KONG De-biao¹, HE Jiang-hong¹, YANG Zi-chuan¹, XU Ji-liu², FU Jun³

(1. Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;
2. Yunnan Copper Co., Ltd, Kunming 650051, China;
3. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Based on field investigation and laboratory simulation, the evolution process of landslide and debris flow and the change of matric suction were analyzed in the terraced fields of Yuanyang County, China, research on the disaster-causing model of disaster chain. Three groups of tests were carried out under two working conditions, among which the rainstorm test was carried out twice, and the one with better test results was selected for analysis. The results show that the process of landslide and debris flow disaster chain is very complex, and the surface water flow velocity will decrease gradually after the large amount of debris on the slope surface is exposed by rainfall, which is more advantageous to the infiltration of surface water, due to the continuous heavy rainfall, the slope of terraced field slides and then evolves into debris flow which continues to move along the terraced field, compared with the continuous heavy rain, the time of landslide induced by continuous moderate rain is longer, and the destructive force of landslide is smaller than that of heavy rain, the latter has a

larger impact area, and the disaster-causing degree varies greatly in different regions.

Key words: heavy rainfall; terraced slope; disaster chain; experimental simulation; disaster-causing process

1 前言

元阳梯田位于哀牢山南部,地处中低山深切切割地带,此地受元江、藤条江水系的深度切割,地形呈“V”字形发育,不易耕作,地表破碎,平地极少,梯田随山势地形变化,面积大小不一。同时,云南西部山区独特的亚热带季风气候对该梯田的形成和种植带来了丰沛的降雨和热量^[1]。这样一个地处高海拔山区、构造活跃、而且面对雨热同季的气候条件,对该环境下孕育地质灾害提供了充足的条件^[2]。

对于滑坡的研究,不论是从形成机理、风险预警和防治措施都有很多学者展开,对于大多数的滑坡形成机理都考虑到与降雨有关,外动力条件和人类活动对滑坡的影响也很多^[3]。有部分学者对梯田边坡进行研究,吴光杰等通过构建虚拟梯田边坡并对其进行监测,结合原始滑坡资料预测出边坡滑动的临界参数,并进行预警^[4]。在对滑坡的致灾过程研究方面,李滨等^[5]主要采用现场调查、数值模拟、稳定性分析的方式对坡体变形和致灾过程进行分析,主要得出致灾过程与极端降雨气候有很大关系;Matjaž Mikoš 等^[6](2009)对 Slano Blato 滑坡进行调查分析之后,研究了滑坡由干旱时期到潮湿时期土颗粒的变化,并对地下水进行观测,并进行了风险预警;Salee^[7]等对泰国南部滑坡进行监测提出坡体滑动与降雨量、持续时间存在很深的联系;李小琴等^[8]、汤明高等^[9]对边坡失稳启动和滑体破坏后的运动过程进行研究,主要考虑滑体所蓄积的能量和地形对滑动过程的影响,在此研究上对边坡失稳后的致灾范围进行了评估;降雨是引发大多数边坡失稳的主要原因,但是不同的边坡地质条件也就造成了失稳机理,存在着很多差异,所以各种研究成果都有一定的研究意义,Paola Gattinoni, Ram Krishna Regmi, L·Picarelli^[10-12]等就主要考虑到降雨水量引发边坡失稳的主要机理以及致灾阈值,定量进行分析,并进行预警。在对滑坡启动的物理模型试验方面,林鸿州等^[13]、赵建军等^[14]通过降雨对边坡失稳的启动进行模型试验,对不同类型的边坡通过改变坡角、降雨量等进行研究,得出很多具有参考价值的结论;包小华等^[15]对不同渗流条件下粉砂土质边坡的失稳破坏进行研究,提出不同入渗边界条件

下边坡土体局部由非饱和变为饱和状态,最后在坡面形成不稳定区域塌落破坏;陈腾辉等^[16]建立输油管道和边坡土体的相互作用模型分析天然及暴雨工况下,管道平行滑坡滑向穿越滑体时的成灾机理。在对滑坡泥石流的成灾机理方面,何元宵等^[17]、江彬等^[18]通过对野外滑坡泥石流资料收集、现场调查等手段系统研究了区内滑坡泥石流成灾机理,根据滑坡泥石流成灾机理采取针对性的防治措施,对防灾减灾具有重要意义。

在对滑坡灾害的形成机理上,大多数学者采用模型模拟试验,调节降雨量或者渗透条件观察坡体变形破坏情况,总结坡体破坏的雨量阈值和破坏情况。滑坡致灾过程大多是对坡体破坏后的运动进行研究,不论是否在降雨条件下,主要对坡体蓄积的能量和坡体下部的地形情况有关,通过统计多个滑坡的运动过程推算坡体的致灾范围。滑坡的风险预警主要通过统计或者相似性试验模拟得出降雨诱发坡体滑动的雨量阈值和持续时间,进行风险评估和预警。

梯田边坡滑动后会对下方梯田造成损毁,遇到后期持续强降雨还会使得泥沙继续沿山坡运动,造成损失。元阳梯田作为世界遗产,发生破坏之后,所造成的损失是不可估量的,不论从防灾减灾还是遗产保护来说,它的研究都是很有意义的。论文主要通过灾后滑坡进行现场精细化调查,结合室内模拟试验,对滑坡泥石流形成演化过程进行分析,总结其致灾模式。

2 研究区工程概况

元阳梯田老虎嘴景区位于元阳县攀枝花乡东北部,管理中心地处东经 102° 44′ 40.92″,北纬: 23° 04′ 33.85″,(位置如图 1);包括勐品、硐浦、阿勐控、保山寨等近 800 hm² 梯田,是元阳梯田地势最险峻、气势最恢宏、布局最壮观、面积最大的梯田景区。滑坡形成之后在持续强降雨作用下迅速演变为泥石流沿沟谷区继续运动,冲毁梯田,使得遗产区破坏巨大,景区损失严重。滑坡上部不稳定斜坡也产生明显拉张裂缝,主干道二级公路发生明显沉降,严重威胁景区建筑安全。

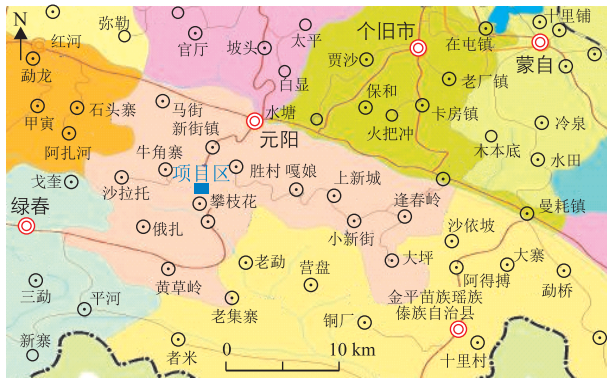


图1 元阳梯田滑坡位置示意图

2.1 地形地貌植被

研究区地形两侧高,中间相对低洼(图2),上部植被茂密,下部为景区核心梯田。滑坡坡向 240° ,主轴长约167 m,滑坡范围内地形坡度在 $20^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 之间,坡面不平整,局部近似直立。滑坡体发生滑移之后,地貌改变,两侧植被稀疏,多为梯田。



图2 滑坡体形态特征

2.2 地层岩性

经现场调查和勘察显示,研究区范围内地层岩性为第四系耕植土层、残破积层及下伏片麻岩。第四系耕植土层呈褐色,结构松散,湿,成分由粘性土、全风化片麻岩及少量植物根系组成,分布于滑坡两侧边缘地带。第四系残破积层粉质粘土呈黄褐色,软-可塑,湿,成分由粘性土、全风化片麻岩及少量强风化片麻岩碎石、角砾组成,主要分布于滑坡两侧边缘地带。片麻岩呈褐灰色,硬塑,湿,上部多呈土块状,原生结构明显,由地表向下由土块状全风化向中风化改变,普遍分布于坡体地带。

2.3 水文地质条件

研究区属云南高原中亚热带山地季风气候区。气候呈现垂直分布,年平均气温 16.4°C ,年降雨量 $1\,397.6\text{ mm}$,降水集中在5~10月,春季降水较少,强降雨前会出现极度干旱。研究区后缘见两处出水点。地下水位深度 $1.80\sim 10.90\text{ m}$,水位受土岩结合面的影响较大,多位于土岩结合部附近。滑动面位于土岩结合部的可能性大。

3 滑坡体形态结构特征

滑坡区现状圈椅状地形明显,总体上坡体地形较陡,滑坡堆积体较厚;滑坡后缘及两侧边界明显,形成一定高度的陡坎,后缘可见基岩出露;依据勘察资料及现场调查资料综合分析,确定滑动面为土岩结合面。

滑体主要由强-中等风化片麻岩块石、碎石、角砾及粘土组成(图3),其中块石、碎石和角砾综合含量大于 60% ,滑坡体原有厚度一般 $3.90\sim 10.30\text{ m}$,平均约 7.00 m 左右。



图3 滑体结构特征

滑坡发生季节正值旱季结束、雨季开始时段,而在经历了将近5个月的旱季之后,突然迎来暴雨天气,使得在自然状态下稳定的梯田区边坡受水的地质作用影响而发生滑动,坡体滑动后在降雨影响下沿着下部梯田区继续运动,形成泥石流,冲毁田埂,对梯田区形成侵蚀(图4),并在下游地势稍缓处形成堆积区(图5)。梯田区滑坡发生后,滑坡体上部坡体临空面增大,形成不稳定斜坡,并发生一定沉降,后缘明显可见拉张裂缝(图6)。



图4 流通区梯田被侵蚀

4 强降雨边坡试验模拟分析

4.1 试验介绍

强降雨条件下梯田区边坡试验方案主要考虑模型制作、降雨设施和过程监测几方面,结合滑坡发生的实际情况,才可确定试验方案。按照元阳梯田滑坡区的实际情况,边坡模型制作地形坡度取 20° ,方



图 5 泥石流下游堆积区掩埋梯田



图 6 不稳定斜坡后缘裂缝



图 7 梯田区边坡试验模型

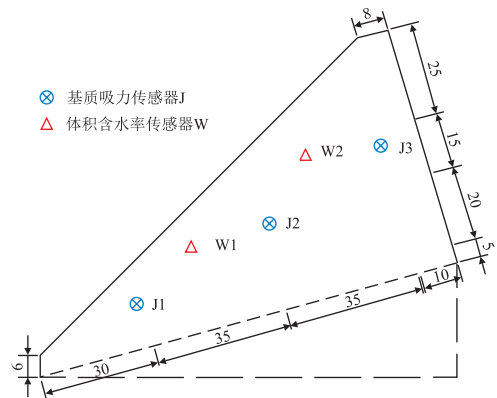


图 8 梯田边坡模型结构及尺寸位置示意图

便布置梯田,基于地形堆积成整体 45° 坡角的边坡,下部根据元阳梯田情况布置梯田大约 10 级。试验选用模型槽分为边坡部分和梯田部分,其中边坡模型选用尺寸为 $1\ 000\ \text{mm} \times 1\ 000\ \text{mm} \times 1\ 000\ \text{mm}$,梯田区模型选用尺寸为 $2\ 000\ \text{mm} \times 1\ 000\ \text{mm} \times 500\ \text{mm}$ 。试验用土为元阳梯田研究区范围内岩土体。考虑发生滑坡时为大暴雨情况,所以本次试验选取降雨工况为 $120\ \text{mm/h}$ (工况一)和 $60\ \text{mm/h}$ (工况二),模拟持续暴雨天气和中雨天气下坡体滑动过程以及破坏影响范围。监测设备主要有高速摄影仪、录像设备、张力计(基质吸力)传感器 3 个和体积含水率传感器 2 个。试验进行过程中,观察坡体破坏过程是否一致。期间观测坡体形态特征变化,并进行地表流速测定。

4.2 边坡模型参数选用

边坡模型采用人工方式堆填击实(图 7),考虑相似性原理之后,结合元阳梯田所处工程地质条件,坡体沿模型长度 $1\ 000\ \text{mm}$,宽度 $1\ 000\ \text{mm}$,高度 $600\ \text{mm}$,坡体依照地形坡度为 20° 布置,边坡整体坡度控制为 45° 。土体在堆积过程中密实度通过相同击实数来控制。土体初始参数(表 1)保持一致。梯田边坡模型结构及尺寸位置示意图如图 8 所示。

表 1 试验土体初始参数

项目	天然重度 γ / $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	含水率 ω /%	黏聚力 c / kPa	内摩擦角 φ /°
取值	18.9	25.6	33.9	10.0

4.3 试验结果分析

试验共开展了 3 次降雨工况下固定坡度的模拟,工况一进行 2 次,工况二进行 1 次,工况一主要以试验过程较好的第二次试验结果为主进行分析。

工况一试验开始后 90 s 左右产成坡面流,流量比较小,随着试验进行流量逐渐增大,并在 10 min 后保持稳定。15 min 左右坡面出现明显冲刷现象,泥沙在坡脚梯田形成淤积,随着时间进行,冲刷逐渐加重,由于坡体碎石含量较重,90 min 后坡面出现大量石块使得冲刷变得很微弱。如图 9 所示为 15 min 左右坡面受到降雨冲刷后大量碎石块明显出露。



图 9 坡面受降雨冲刷碎石出露明显

降雨出现地表径流后每隔 20 min 进行一次流速测定,测定方法通过高速摄影仪录像,然后泼洒墨水,如图 10 所示为试验过程中泼洒墨水测速,主要选择同一位置多次泼墨来计算通过坡面固定距离所需时间。如图 11 所示为试验中所测地表水流速随时间变化规律,在持续降雨作用下刚开始地表水流速较大,在之后的 100 min 内流速逐渐降低,降低后的 100 min 内流速逐渐保持稳定,200 min 后流速缓慢上升且趋于稳定,直到发生灾害链。



图 10 泼洒墨水测地表水流速

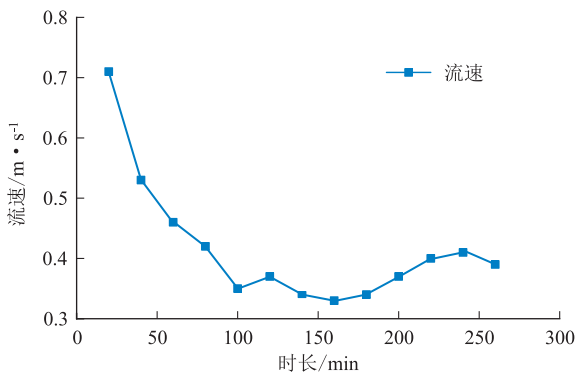
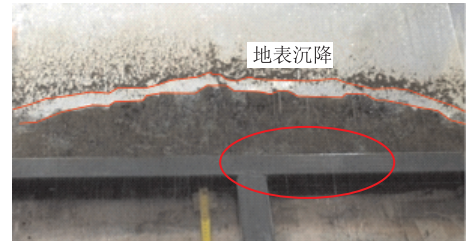


图 11 地表水流速随时间变化规律

171 min 坡体后缘开始形成两条较小拉张裂缝,此时孔隙水压力传感器出现明显上升;196 min 坡体后缘出现明显沉降(图 12a),沉降位移为 4.6 cm;205 min 后缘拉裂缝变为一整条并逐渐加大(图 12b),裂缝长约 64 cm,宽 4.8 cm,深 20.4 cm,且明显可以看出坡体整体向前蠕动,逐渐覆盖第一级梯田,前缘剪出口明显。209 min 坡体前缘出现局部小滑动,滑移距离 34 cm,坡面出现碎石滚落现象;224 min 坡面中部出现明显裂缝(图 13a),裂缝长 96 cm,最大深度 51 cm;226 min 出现滑坡体前半部分的大幅滑动(图 13b),滑块沿主轴长度 59 cm,滑移距离 75 cm,在滑块后缘形成巨大陡坎;229 min 发生第二次滑动(图 14),可以看到土压力传感器读数明显下降,滑块沿主轴长度 32 cm,滑移距离 117 cm,两次滑动滑移面最大深度为 63 cm,滑动速度明显比第一次更快,坡体滑动之后迅速覆盖前三级梯

田;滑坡岩土体在持续降雨影响下演化为泥石流向下游梯田运移,梯田形成侵蚀破坏,大部分停留在第 8 级梯田以上,少量碎石移动速度极快,运动到第 10 级梯田。



(a) 沉降

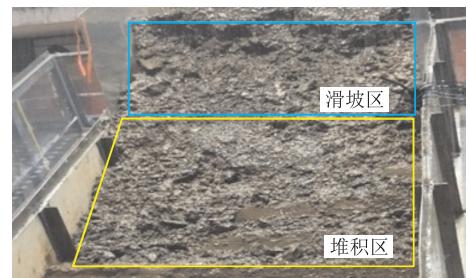


(b) 裂缝

图 12 坡体后缘出现明显沉降和裂缝



(a) 坡面裂缝



(b) 下部边坡体滑动后状态

图 13 工况一边坡滑动前后特征

较工况一而言,工况二试验中滑坡过程明显放慢,236 min 开始产生局部小滑动,264 min 主体部分滑块一开始滑动,滑移距离 36 cm,后续经过 70 min 的时间陆续滑动,主要滑块分为 5 次滑动,最大滑动距离 72 cm,最大滑移面深 47 cm,期间伴随局部崩塌和碎石滚落。滑坡后产生泥石流运动并不强烈,经过持续降雨大部分泥石流到达 6 级梯田处,少

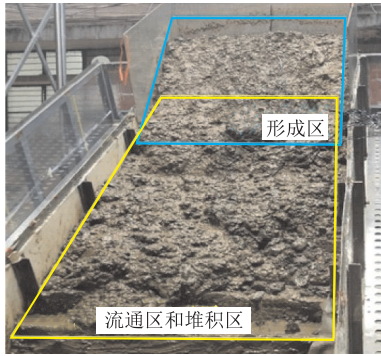


图14 滑坡结束后形成泥石流

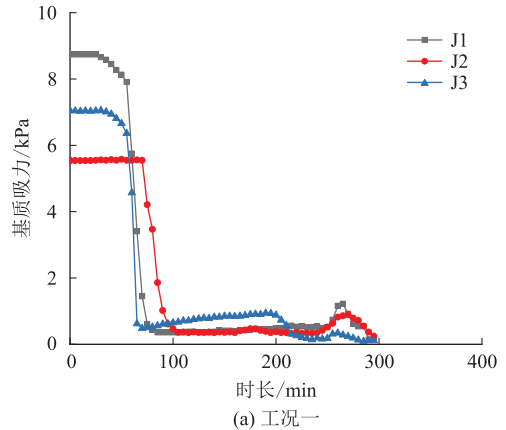
部分碎石到达8级梯田,泥石流方量减少,对梯田侵蚀破坏能力降低。工况二滑坡后状态如图15所示。



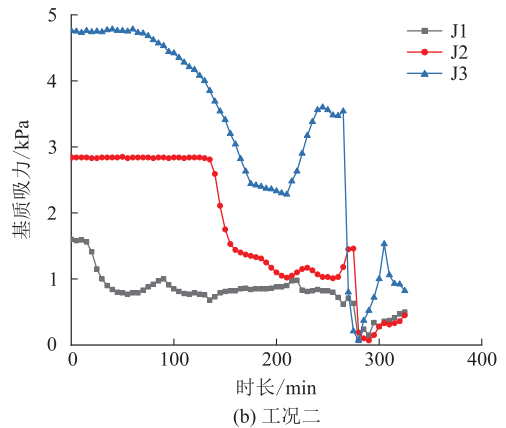
图15 工况二试验滑坡后状态

通过张力计传感器(图16)实时读数可知,工况一在暴雨情况下基质吸力变化剧烈程度远远大于工况二。基质吸力初始值保持在3~9 kPa,这与边坡中张力计埋设深度有关。工况一的初始数值较大,在降雨发生约70~100 min后大幅下降,逐渐趋近于0,并保持一定稳定,可以明显看出200 min后出现很大变动,是由于坡体逐渐变形且发生滑动所导致的,J1和J2传感器读数明显上升,这与坡体滑动之后大量岩土体位置变动有关,同时继续降雨后传感器数值又逐渐下降为0。工况二基质吸力变化则比较复杂,J1传感器在降雨20 min后就迅速下降到0.8 kPa,保持一定波动;J2传感器在150 min后才迅速下降到1.4 kPa,并在之后逐渐下降到1.0 kPa;J3传感器则在80 min后逐渐下降到2.4 kPa,随后迅速上升到3.7 kPa,考虑是地表冲刷到一定程度后泥沙被大量带走地表水流速反而逐渐上升,入渗的雨水减少所致,可以明显看出在260 min后坡体发生持续滑动,基质吸力变化比较剧烈,考虑是滑动前后大量雨水渗入所引起,试验结束前基质吸力保持不断变化,300 min后后缘坡体发生滑动引

起基质吸力突然上升和下降,随后持续降雨和汇水作用使得基质吸力降低。



(a) 工况一



(b) 工况二

图16 基质吸力变化情况

5 滑坡泥石流灾害链致灾模式讨论

5.1 试验结果讨论

由模型模拟试验灾害链形成演化过程可知,随着降雨的进行,坡面首先被冲刷侵蚀,泥沙于坡脚梯田区逐渐堆积。按照试验常理,随着降雨的进行,坡面径流流速会逐渐变快,但在本试验中流速却逐渐降低,分析原因为坡面受到地表径流冲刷侵蚀后,并没有形成水沟,反而使得被粘土覆盖的碎石出露,碎石块分布杂乱无章,使得径流实际距离加长,进而石块的阻碍使流速降低。试验所用黏性土渗透系数很低,由于流速降低,使得更多地表水能够渗透下去,加快水对边坡的地质作用。

试验进行不足3 h,坡体后缘见明显拉裂缝且持续发生沉降,裂缝随时间不断变宽,前缘部分出现剪出口。这些受强降雨的影响而使得坡体滑动前出现的特征都可以作为灾害预警很重要的标志。在遇到持续中雨天气时,应该对周边可能存在安全隐患的坡体进行长期监测,观察是否会出现上述现象。试验主要研究稳定强降雨作用下边坡形态特征随时

间的发展,在工况一条件下 226 min 开始滑动,时间短,速度快,破坏力强;工况二条件下 264 min 开始滑动,滑体小,时间长,破坏力小。在干旱季节突然迎来暴雨及更大降雨量的天气时,发生灾害链所需要的时间更短。

根据试验前后对边坡岩土体体积含水率的测试发现,试验前土体体积含水率为 25%左右,发生滑坡时土体含水率为 40%~45%,滑动后含水率迅速上升,形成泥石流后土体含水率最大可达到 60%左右,并逐渐趋于稳定,说明边坡发生滑动时土体并不饱和,滑动后随着降雨持续进行演化为泥石流时土体才逐渐趋于饱和。

多次试验结果发现泥石流影响范围与现场实际情况相比偏小,可能原因如下:

(1) 试验模型中选取地形坡度为 20°,现场地形坡度为 20°~40°,在坡度较大的地方,泥石流所蓄积的能量就比较大,运移距离也更远。

(2) 试验坡体滑坡后土石方量偏小,滑动面与预估相比上移了约 10 cm,形成泥石流后运移距离明显偏小。

(3) 泥石流汇水面积较小,试验模型地形较平坦,现场地形坡度过渡大,汇水面积大,运移距离相比模型中也比较大。

若考虑以上 3 个主要因素,并进行推算,泥石流运移距离会增加很多,而且还有可能超过现场运移距离。泥石流在运移过程中速度先快后慢,有明显的形成区、流通区和堆积区,对现场侵蚀作用比较明显,局部受侵蚀后基岩出露。

5.2 致灾模式讨论

工况一试验边坡的破坏过程迅速,前后两次滑动在 4 min 内结束,在实际情况中该地区极有可能在更短时间内完成滑动,滑动后掩埋前 4 级梯田,而且随着降雨进行,剩余部分坡体也会发生局部小滑动,形成泥石流后大部分掩埋前 8 级梯田,少部分到达 10 级梯田。

结合元阳梯田现场和模拟试验,从灾害链成灾过程来看,滑坡形成泥石流的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;滑床泥石流则是滑坡形成后滑床上松散物质在雨水作用下运动形成泥石流;滑坡泥石流分为局部滑坡泥石流和整体滑坡泥石流,都是各种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,小部分是在滑移后直接转化为泥石流,大部分滑坡堆积物先堆积于坡

脚,然后在持续降雨作用下逐渐发生多次泥石流运移和汇集。

从致灾程度来看,滑坡的破坏力要高于泥石流的破坏力。滑坡形成后,坡体后缘出现巨大陡坎,对地表破坏巨大。滑坡体上部坡体形成不稳定斜坡,斜坡上部出现地表沉降和拉裂缝,存在很大安全隐患,威胁周边景区和居住区安全,泥石流运移后主要掩埋和冲毁梯田,对经过的区域形成侵蚀,对世界遗产破坏巨大。从灾毁影响来看,泥石流的影响范围大于滑坡,滑坡影响范围主要是梯田区上游,而泥石流从形成区到堆积区,影响范围要大得多。

6 结论

对元阳梯田滑坡泥石流灾害链进行野外精细调查和室内模型模拟,通过野外调查数据和模拟破坏过程分析,对梯田区灾害链的致灾模式进行研究,得出以下主要结论:

(1) 持续的降雨并不会带走大量泥沙颗粒,雨水冲刷使得坡面碎石块大量出露之后,地表水流速也会逐渐降低,更有利于地表水入渗。

(2) 通过室内模拟情况来看,持续中雨诱发坡体滑动所需时间更长,但也并未长很久,考虑是雨量小有利于降雨入渗所引起的,滑坡破坏力相比偏小。持续性暴雨诱发滑坡所需时间短,破坏力也比较大。

(3) 降雨是地质灾害链形成的主要原因,致灾模式主要分为滑坡致灾和泥石流致灾,滑坡破坏力较大,泥石流致灾范围较广,不同区域致灾程度差异较大。

参考文献

- [1] 王妍,张超,宋维峰,等.元阳梯田空间分布特征研究[J].水土保持研究,2013,20(2):103-107.
- [2] 史培军,杨文涛.山区孕灾环境下地震和极端天气气候对地质灾害的影响[J].气候变化研究进展,2020,16(4):405-414.
- [3] 杨迁,王雁林,马园园.2001~2019年中国地质灾害分布规律及引发因素分析[J].地质灾害与环境保护,2020,31(4):43-48.
- [4] 吴光杰,王海宝,谢小维.虚拟式梯田滑坡监测试验研究[J].农机化研究,2008,(4):161-162+248.
- [5] 李滨,冯振,赵瑞欣,等.三峡地区“14·9”极端暴雨型滑坡泥石流致灾过程分析[J].水文地质工程地质,2016,43(4):118-127.
- [6] Matjaž Mikoš, Ana Petkovšek, Bojan Majes. Mechanisms of landslides in over-consolidated clays and flysch [J]. Landslides, 2009, 6(4): 367-371.
- [7] Salee, Rattana, Chinkulkijniwat, Avirut, New threshold for

- landslide warning in the southern part of Thailand integrates cumulative rainfall with event rainfall depth-duration [J]. *Natural Hazards*, 2022, 113(1): 1-17.
- [8] 李小琴, 富海鹰, 张迎宾, 等. 地形起伏对滑坡运动的影响规律研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2020, 40(6): 867-877.
- [9] 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(04): 128-134 + 140.
- [10] Paola Gattinoni, Laura Scesi, Luca Arieni, Marco Canavesi. The February 2010 large landslide at Maierato, Vibo Valentia, Southern Italy[J]. *Landslides*, 2012, 9(2): 255-261.
- [11] Ram Krishna Regmi, Kwansue Jung, Hajime Nakagawa, Jaewon Kang. Study on mechanism of retrogressive slope failure using artificial rainfall[J]. *Catena*, 2014, 122: 27-41.
- [12] L Picarelli, L Olivares, E Damiano, et al.. The effects of extreme precipitations on landslide hazard in the pyroclastic deposits of Campania Region: a review[J]. *Landslides*, 2020, 17(10): 1-16.
- [13] 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.
- [14] 赵建军, 李金锁, 马运韬, 等. 降雨诱发采动滑坡物理模拟试验研究[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(2): 760-769.
- [15] 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.
- [16] 陈腾辉, 阿发友, 黑明昌, 等. 输油管道纵向穿越滑坡的成灾机理研究[J]. *地质灾害与环境保护*, 2022, 33(1): 57-62.
- [17] 何元宵, 王玉夜. 甘肃省宕昌县布竜沟泥石流成灾机理研究[J]. *地质灾害与环境保护*, 2020, 31(2): 3-8.
- [18] 江彬, 黄国平, 柳侃. 南平蔡源滑坡泥石流成灾特点及灾后反思[J]. *地质灾害与环境保护*, 2015, 26(4): 36-39.

作者简介: 李林(1996—), 男, 硕士研究生, 主要从事工程地质和灾害防治研究。E-mail: 1090198957@qq.com

通讯作者: 陈安(1971—), 男, 博士学位, 硕士生导师、高级工程师, 主要研究方向为水文地质与工程地质、岩土工程。
E-mail: 373034075@qq.com