

引用格式: 王信,郭富赞,张娟,窦晓东,张毅,冯自明. 基于滑坡动力学过程的甘肃舟曲磨里滑坡风险评价[J]. 山地学报, 2025, 43(1): 105-121.

WANG Xin, GUO Fuyun, ZHANG Juan, DOU Xiaodong, ZHANG Yi, FENG Ziming. A dynamic process-based risk assessment of a resurgent landslide at Moli Village in Zhouqu County, Gansu Province, China [J]. Mountain Research, 2025, 43(1): 105-121.

基于滑坡动力学过程的甘肃舟曲磨里滑坡风险评价

王信¹,郭富赞^{1*},张娟¹,窦晓东¹,张毅²,冯自明³

(1. 甘肃省地质环境监测院,兰州 730000; 2. 兰州大学 地质科学与矿产资源学院,兰州 730000;

3. 甘肃省地质矿产勘查开发局 第一地质矿产勘查院,甘肃 天水 741020)

摘要: 甘肃舟曲县耶镇磨里滑坡位于青藏高原东北缘断裂构造带破碎岩土区。受区域地震及持续极端降雨耦合作用的影响,磨里滑坡于2021年发生渐进式复活变形,严重威胁果耶村、磨里村居民的生命财产安全,存在重大灾害风险。本文在现场调查、原位监测的基础上,采用连续介质力学模型模拟分析该滑坡复活变形和极端条件下失稳破坏的动力过程,并基于滑坡堆积体最大淤埋深度和最大冲击动量等典型滑坡破坏特征值,开展了极端条件下磨里滑坡灾害风险预测评价。调查发现:(1)磨里滑坡属于典型特大超深层断层破碎岩滑坡,其复活主控因素为长历时降雨入渗导致的岩体强度劣化。(2)动力过程数值模拟表明,磨里滑坡变形呈现出牵引式变形特征,极端条件下滑坡失稳破坏兼有推移式、牵引式复合变形特点;变形过程可以分为0~50 s的局部滑动阶段和50 s之后整体蠕滑变形两个阶段;滑动后0~150 s为强烈变形阶段,表现出推移式变形的特点,150 s之后为缓慢变形阶段,以牵引式变形为主。滑坡堆积体在滑动后40 s时刻将堵断滑坡前缘大水坝沟,堰塞体厚度最大可达28.3 m。(3)风险区划显示高风险区(20.4%)、中风险区(70.3%)与低风险区(9.3%)呈斑块分布,主要位于滑坡体前缘部位。本研究成果可以为磨里滑坡应急治理提供动态决策基准,也可为类似地区典型特大型滑坡风险防控提供可推广的方法框架。

关键词: 磨里滑坡;动力过程;数值模拟;风险评估

中图分类号: X43

文献标志码: A

地质灾害风险评估是灾害管控与治理的基础。滑坡风险评价作为该类灾害风险防控体系的关键环节,其理论与方法创新始终是地质灾害研究的前沿领域^[1-3]。中国学者在滑坡风险评价理论构建与技术应用层面取得显著进展:在数据平台建设方面,完成了单体滑坡灾害编录、全国滑坡基础数据编目与建库工作;在方法论维度,建立了涵盖易发性-危险性-风险递进式评估的技术框架^[4-6];在实践应用层

面,基于多源异构数据融合,形成了多尺度定量风险评估范式^[7-9]。

随着防灾减灾策略由灾情管理向灾害风险管理转变^[10],发展精细化定量风险评估技术已成为实现滑坡全生命周期风险防控的必然要求。值得关注的是,基于深度积分连续介质力学理论构建的准三维模型,能精细反演地表斜坡重力作用的动力学过程,且具有较高的计算效率^[9,11-14],可以为基于滑坡动

收稿日期(Received date): 2024-03-18;改回日期(Accepted date): 2025-02-15

基金项目(Foundation item): 中央引导地方科技发展资金项目(23ZYQA0326)。[Central Guiding Funds for Local Science and Technology Development (23ZYQA0326)]

作者简介(Biography): 王信(1989-),男,甘肃会宁人,本科,高级工程师,主要研究方向:地质灾害防灾减灾。[WANG Xin (1989-), male, born in Huining, Gansu Province, B.S., senior engineer, research on geological disaster prevention and reduction] E-mail: 1285740995@qq.com

* 通讯作者(Corresponding author): 郭富赞(1970-),男,博士,正高级工程师,主要研究方向:地质灾害防灾减灾。[GUO Fuyun (1970-), male, Ph.D., professor of engineer, research on geological disaster prevention and reduction] E-mail: fyg51913@163.com

温约 $2\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 15\text{ }^{\circ}\text{C}$, 多年平均降水量 435.8 mm , 70% 的降雨量集中在 5—9 月。大水坝河的丰水期集中在 6—9 月, 期间河水常以洪流形式呈现, 不仅流量大, 而且流速快, 具备极强的冲刷侵蚀能力^[19-21]。

研究区位于西秦岭构造带, 区内分布着一系列 NW—NWW 向构造行迹, 包括白龙江复背斜、光盖山—迭山南麓断裂带、坪定—化马断裂带、迭部—白龙江断裂带等^[20,22]。受主断裂影响, 区内发育有近北东向的次级断裂, 如三角坪—黑松坪断裂带。这些断裂控制着地貌形成和地质灾害发育。

1.2 滑坡形态和变形特征

磨里滑坡发育于三角坪—黑松坪断裂带及其支断裂形成的槽谷中, 滑坡周界清晰, 主滑方向 170° , 前后缘高差 348 m , 主滑方向长度 1500 m , 平均宽度 385 m , 滑坡区面积 $5.3 \times 10^5\text{ m}^2$, 滑坡厚度 $32 \sim 73\text{ m}$, 总体积 $2.12 \times 10^7\text{ m}^3$, 属于特大型超深层断层破碎带滑坡。滑坡整体坡度 11° , 具有上部 and 下部

较陡、中部平缓的特点, 其中上部平均坡度 13° , 中部平均坡度 6° , 下部平均坡度 15° 。依据钻孔揭露, 滑体岩性以碎石土和千枚岩、板岩碎屑为主(图 2a); 滑带土为黑色含砾黏土(图 2b), 厚度 $0.5 \sim 0.8\text{ m}$; 滑床岩性以志留系千枚岩为主(图 2c)。滑坡区域地势低洼, 汇水条件良好。枯水季调查和勘察结果显示, 滑坡体含水量较大, 大部分钻孔均揭露到地下水位, 如滑坡体后部钻孔 ZK1 揭露稳定水位埋深为 4 m , 中部的钻孔 ZK9 揭露稳定水位埋深为 14 m , 前缘布设的钻孔 ZK16 揭露稳定水位埋深为 15 m , 且滑坡体上部和中下部均有泉水出露, 中下部的泉眼被改造后作为磨里村集中供水水源(图 2d), 上部出露的泉水流量为 $2.0\text{ m}^3/\text{d}$, 地下水主要赋存于滑体碎石土和千枚岩、板岩碎屑中(图 3)。

根据现场调查和分析, 滑坡下部及前缘于 2019 年 9 月即开始产生复活变形, 牵引滑坡体中上部开始缓慢变形, 2021 年 2 月之后变形开始逐渐加



图 2 滑坡体结构特征: (a) 滑体岩芯特征; (b) 滑带土特征; (c) 滑坡体前缘基岩裸露; (d) 滑坡体中前缘出露泉水

Fig. 2 Structural features of the landslide: (a) features of the landslide core; (b) features of the landslide zone soil; (c) exposure of bedrock at the front edge of the landslide; (d) emergence of spring water at the middle and front edges of the landslide

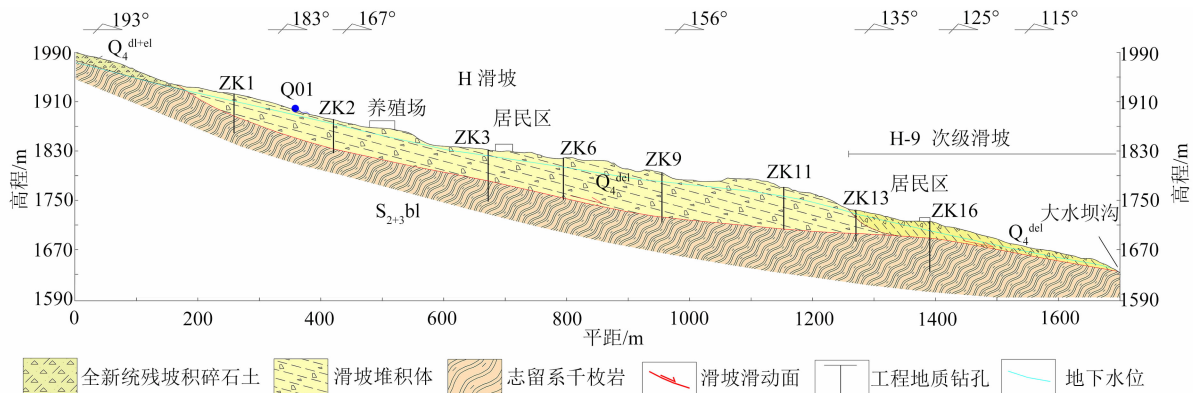


图3 磨里滑坡主滑方向地质剖面图

Fig. 3 Geological profile of the main sliding direction of the Moli landslide

剧^[23]。滑坡区近五年降雨数据显示,只有2018年降雨量低于年均降雨量,其余各年份降雨量均偏高,其中2019年偏高75.7%,2020年偏高97.4%(图4),特别是2020年“8·17”暴雨接近50年一遇暴雨强度,属于滑坡的直接激发因素。滑坡复活变形开始时间与当地雨季及强降雨发生时间完全一致,当属降雨激发型滑坡。滑坡主要变形特征呈现出局部滑动破坏、整体蠕滑变形的牵引式变形特点,滑动开始后前缘及侧缘临空条件较好的区域首先发生滑动破坏,产生一系列次级滑坡(H1~H9),其后受前缘滑动后失去支撑及牵引影响,中上部滑体整体发生蠕滑变形。现场调查发现,滑坡后缘发育多组拉张裂缝,长度为25~65 m,宽度为5~15 cm,错动面擦痕清晰,错落高度为10~30 cm。滑坡东侧长达1500 m的剪切裂缝基本贯通,宽度最大为20 cm;西侧剪切裂缝主要发育在滑坡上部,长度为5~50 m,最大宽度为30 cm。地表变形最强烈的区域为次级滑坡H9发育的区域,具有多级多期滑动的特征,“圈椅”状地貌特征明显,后壁高度约25 m,滑坡体上发育多组横向拉张裂缝,但其影响范围内未有村民居住;房屋建筑损毁最严重的区域主要位于次级滑坡H1、H6、H7、H8发育的区域,房屋及道路多变形开裂或倒塌损毁(图5)。

2 数据来源

2.1 遥感及地形数据来源

本研究所有遥感数据及地形数据均来自无人机低空摄影测量数据,采集时间为2021年2—4月。

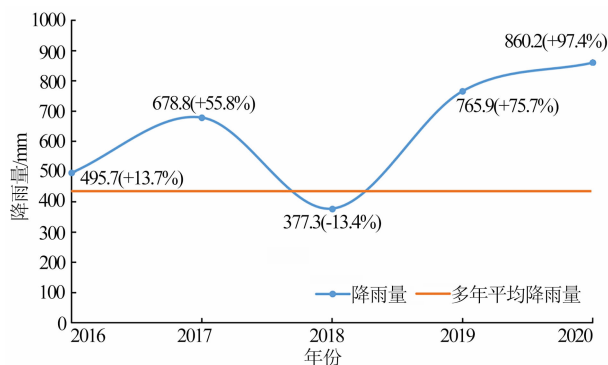


图4 滑坡发生前5年降雨量变化曲线

Fig. 4 Rainfall variation curve for 5 years before landslide occurrence

地形图成图比例尺1:500,遥感影像图件分辨率优于0.05 m。

2.2 变形监测数据来源

所有变形监测数据均来源于研究人员现场调查及实测,地表位移监测数据精度为毫米级,采集时间为2021年4—8月。

2.3 地质资料来源

所有地层、构造等基础数据,为研究人员在充分收集分析前人研究成果的基础上,结合现场调查分析确定。

3 研究方法和数据准备

3.1 动力学模型建立

Massflow 软件模型基于经典的 Navier-Stokes 方程,采用深度积分的连续介质力学模型,目前已被成功应用于金沙江白格滑坡、深圳光明新区、甘肃黑方台滑坡等多起国内重大滑坡灾害动力过程重建及灾

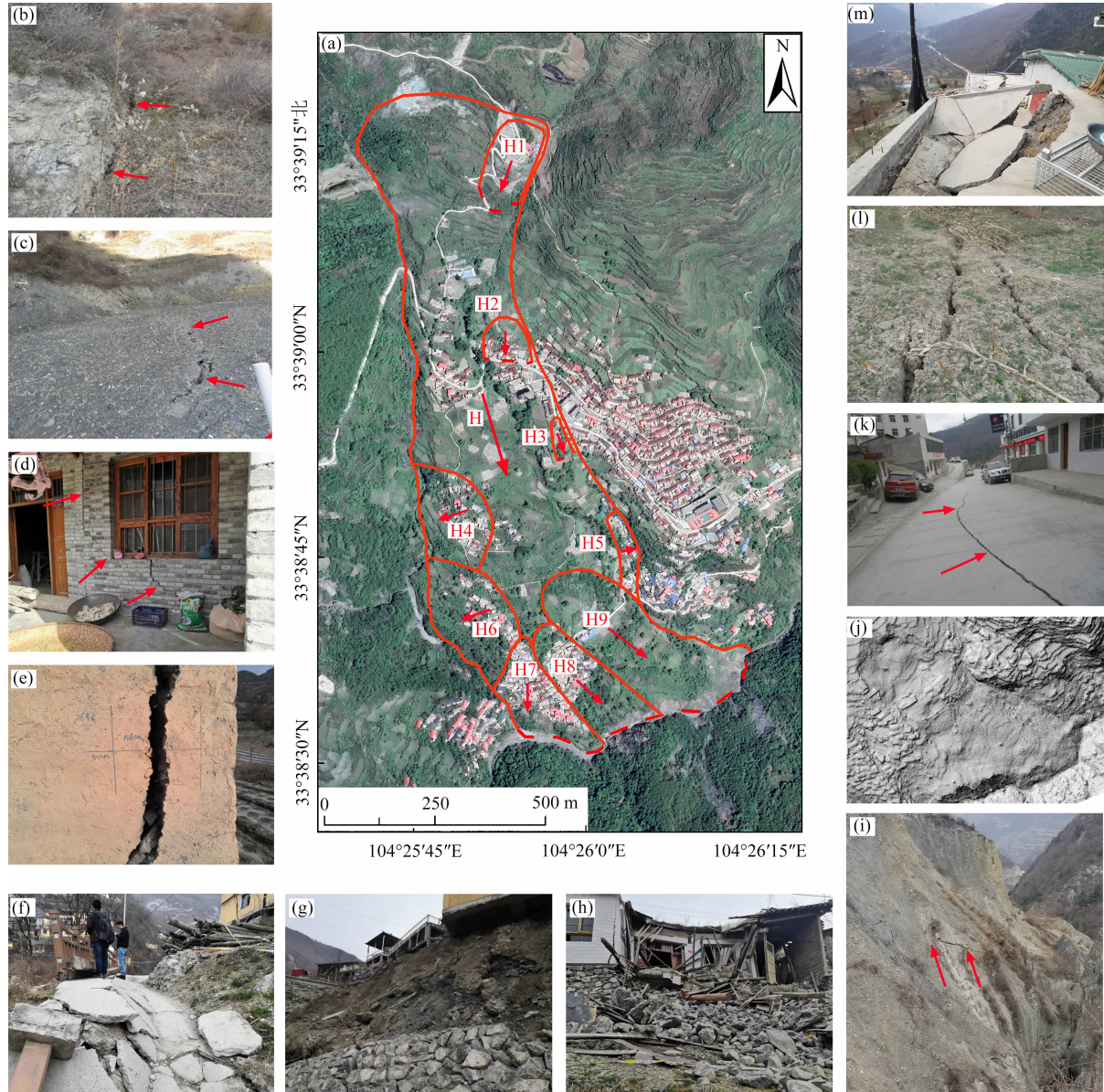


图5 磨里滑坡平面图及各部位变形迹象:(a)磨里滑坡平面图(b)后缘拉张裂缝;(c)西侧剪切裂缝;

(d) H6 滑坡后缘房屋变形;(e) H6 滑坡后缘房屋墙体开裂;(f) H7 滑坡前缘道路变形;(g) H7 滑坡前缘房屋基础凌空;
(h) H7 滑坡前缘房屋倒塌;(i) 滑坡前缘剪出口;(j) H9 滑坡全貌;(k) 东侧剪切裂缝;(l) 东侧剪切裂缝;(m) H1 滑坡后缘房屋变形

Fig. 5 Plan view of the Moli landslide and deformation signs of each part: (a) plan view of Moli Landslide;

(b) tension cracks at the trailing edge; (c) west side shear crack; (d) deformation of houses at the rear edge of H6 landslide;
(e) wall of the house at the trailing edge of H6 landslide has cracked; (f) road damage in the leading edge of H7 landslide;
(g) damage to the foundation of the house in the leading edge of H7 landslide; (h) building collapses in the leading edge of H7 landslide;
(i) shear-outlet in the leading edge of landslide; (j) overview of H9 landslide; (k) shear cracks on the east side of the landslide;
(l) shear cracks on the east side of the landslide; (m) house damage at the trailing of H1 landslide

害风险预测分析中^[9-14]。本文运用 Massflow 软件对磨里滑坡动力过程进行模拟,研究滑坡的运动过程及堆积特征。在该方法中动量方程表示为:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2 + k_{ap}gh^2/2)}{\partial x} + \frac{\partial huv}{\partial y} = -k_{ap}gh \frac{\partial z_b}{\partial x} - \frac{(\tau_{zx})_b}{\rho} \quad (2)$$

$$\frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial huv}{\partial x} + \frac{\partial(hv^2 + k_{ap}gh^2/2)}{\partial y} = -k_{ap}gh \frac{\partial z_b}{\partial y} - \frac{(\tau_{zy})_b}{\rho} \quad (3)$$

式中, ρ 为滑体密度; h 为滑体厚度; u 和 v 分别为 x 和 y 方向的深度积分速度; $(\tau_{xx})_b$ 和 $(\tau_{yy})_b$ 为基底阻力; k_{ap} 为侧向土压力系数, 定义如下:

$$k_{ap} = \begin{cases} k_{\text{active}} & (\partial \bar{u} / \partial \bar{x} + \partial \bar{v} / \partial \bar{y}) > \varepsilon \\ 1 & (|\partial \bar{u} / \partial \bar{x} + \partial \bar{v} / \partial \bar{y}|) \leq \varepsilon \\ k_{\text{passive}} & (\partial \bar{u} / \partial \bar{x} + \partial \bar{v} / \partial \bar{y}) < -\varepsilon \end{cases} \quad (4)$$

式中, ε 为精度阈值; k_{active} 和 k_{passive} 分别为主动和被动的土压力系数:

$$\begin{cases} k_{\text{active}} \\ k_{\text{passive}} \end{cases} = \frac{2}{\cos^2 \varphi} \times 1 \mp \sqrt{1 - (1 + \tan^2 \delta) \cos^2 \varphi} - 1 \quad (5)$$

式中, φ 和 δ 分别为滑动体的内摩擦角和基底摩擦角。

滑坡整体坡度较缓, 沿着软弱层滑动, 滑动过程中整体性较好。因此, 滑动过程中采用库伦摩擦模型, 假设基础摩擦应力 τ 具有以下形式:

$$\tau = c + (1 - \lambda) \rho g h \tan \varphi \quad (6)$$

式中, c 为黏聚力; λ 为孔隙水压力系数, 本次计算中将动态摩擦角概化为单一变量表示。

$$\varphi_b = \arctan(1 - \lambda) \tan \varphi \quad (7)$$

则模拟计算中需用的基底摩擦系数 μ 的计算公式为:

$$\mu = (1 - \lambda) \tan \varphi \quad (8)$$

3.2 数据准备

由于磨里滑坡规模巨大, 为确保快速计算时精度不受影响, 在计算中采用 5 m 的空间网格。滑动前地形数据采用无人机航测数据, 滑面数据利用钻

孔揭露的滑动面高程数据, 采用克里金插值法获得 (图 6a)。滑体物源数据采用滑动前滑坡区地形数据和滑面数据差分获得 (图 6b), 厚度为 0 ~ 73.6 m, 与前期调查、勘察获取的数据基本一致。基底地形数据采用滑动前滑坡区地形数据和滑体物源数据差分获得 (图 6c)。

3.3 滑坡动力过程分析

3.3.1 2021 年滑坡复活动力分析

综合现场勘察及已有学者研究成果^[23], 该滑坡后部、中部及前部的滑带土均为千枚岩、板岩碎屑泥化后形成的含砾黏土, 特征及物质组成一致, 依据试验数据、反算结果并参考周边工程经验, 选取参数 (滑坡体密度 $\rho = 2000 \text{ kg/m}^3$, 黏聚力 $c = 18 \text{ kPa}$, 内摩擦角 $\varphi = 16^\circ$, 基底摩擦系数 $\mu = 0.23$, 孔隙水压力系数 $\lambda = 0.2$) 开展滑坡动力过程模拟, 能够代表该滑坡滑带土物理力学特性。结果显示, 滑坡复活滑动后整体位移不明显, 主要破坏形式为滑坡体后部局部地形较陡部位的失稳破坏以及滑坡体前缘向大水坝沟谷的滑移破坏, 滑体前缘侵占大水坝沟谷 (图 7)。滑坡复活滑动后变形过程呈现出明显的牵引式变形的特点, 根据滑动速度模拟结果, 可以明显地将变形过程分为两个阶段, 本次用滑坡体不同部位 A、B、C 点来分别代表滑坡上部、中部及下部分析滑动过程中速度变化特征。

第一阶段: 局部滑动阶段, 时间为滑动开始后 0 ~ 50 s, 主要表现为滑坡上部地形较陡以及滑坡前

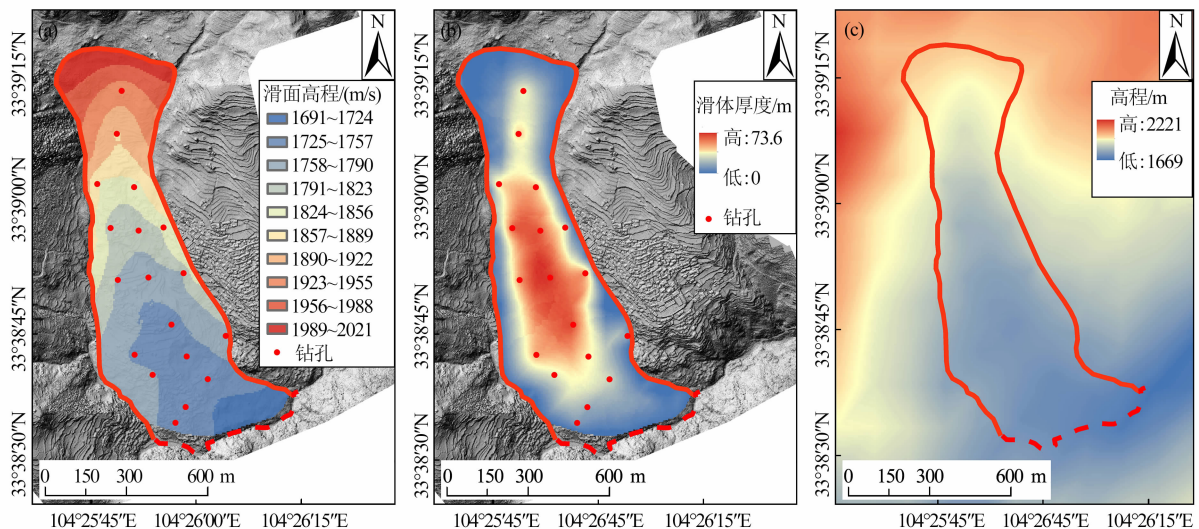


图 6 滑坡区地形数据: (a) 滑动面; (b) 滑体厚度; (c) 基底地形

Fig. 6 Terrain data of the landslide area: (a) sliding surface; (b) source of landslide material; (c) substrate topography

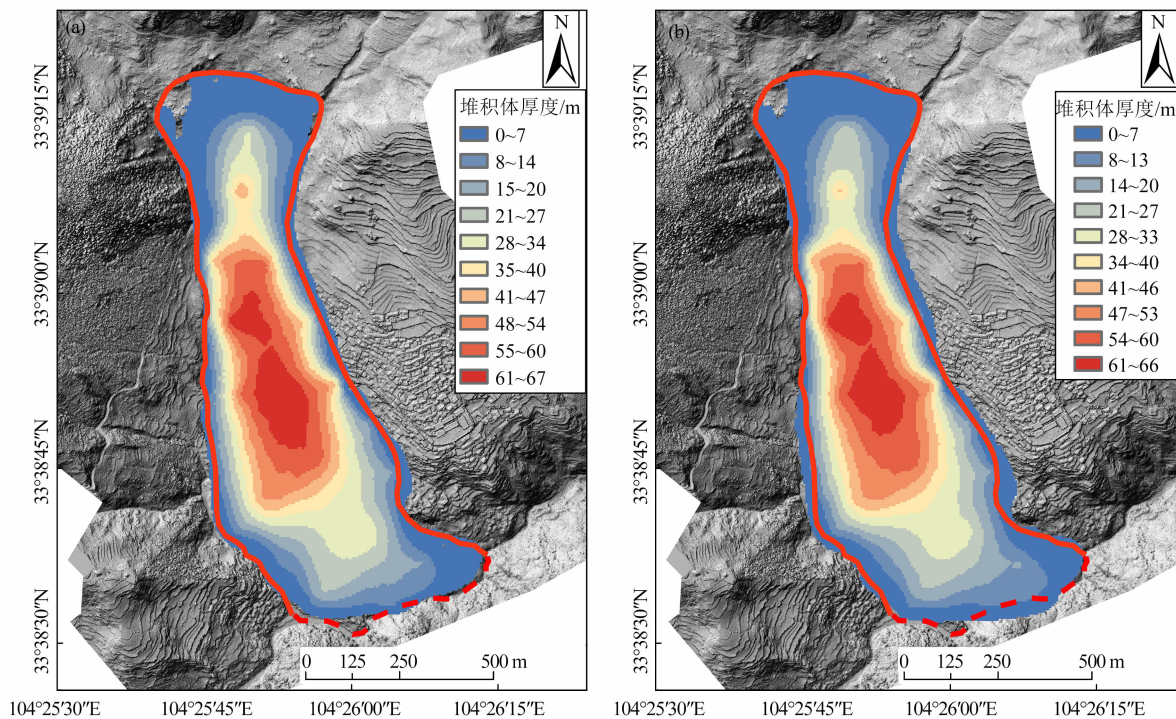


图7 不同时刻滑坡堆积体厚度计算结果:(a) $t = 25$ s;(b) $t = 50$ s

Fig. 7 Calculation results of the landslide accumulation thickness: (a) $t = 25$ s;(b) $t = 50$ s

缘临空条件较好的区域首先发生滑动破坏(图8a~8c),该阶段滑坡上部(A点)平均速度1.54 m/s,最大滑动速度为2.51 m/s;滑坡中部(B点)平均速度为0.21 m/s,最大滑动速度0.24 m/s;滑坡下部(C点)平均速度为1.68 m/s,最大滑动速度3.19 m/s(图9)。由于局部滑动速度远大于滑坡体中部及整体滑动速度,因此该变形阶段造成滑坡体前缘、侧缘及后部一系列次级滑坡体的出现。

第二阶段:整体蠕滑阶段,时间为开始滑动50 s之后,主要原因为滑坡前缘一系列次级滑坡形成后,中后部受前缘滑动牵引影响,整体呈现蠕动变形(图8e~8f)。滑坡各部位速度计算结果显示(图9),该阶段滑坡下部(C点)平均速度为0.85 m/s,滑坡中部(B点)平均速度为0.20 m/s,滑坡后部(A点)平均速度为0.24 m/s。滑坡中部在 $t = 50$ s的时刻,受前缘滑动牵引影响,速度出现明显的增大,由前期平均速度0.19 m/s增大到0.27 m/s;受滑坡中部蠕滑牵引影响,滑坡后部在100 s的时刻速度出现明显的增大,由0.16 m/s增大到0.29 m/s。该阶段滑坡前缘平均滑动速度大于滑坡中部以及后部,主要原因为滑坡前缘滑体较薄,

厚度16 m左右,滑面较陡,平均坡度 11° 。该变形阶段也是滑坡侧缘长达1.5 km的纵向贯通性剪切裂缝形成时期。

整个滑动过程中,滑坡中部滑动速度为0.12~0.27 m/s,平均滑动速度为0.20 m/s,分析主要原因为滑坡中部滑面最大埋深达73 m,滑面平均坡度为 5° ,由于滑体厚度大、滑面坡度缓,阻滑作用明显,所以滑动速度小,滑坡整体性好,因此在现场调查过程中滑坡中部未发现明显的变形迹象。模拟结果与现场调查、勘察获取的变形结果一致性较好,说明模型设置科学,参数选择合理,基本能够反映该滑坡复活滑动后的动力过程特点。

3.3.2 极端条件下滑坡动力过程

已有研究成果显示,该滑坡在极端条件下的破坏模式以整体失稳滑动破坏为主^[23],为模拟极端条件下滑坡整体滑动后的动力变形过程,本研究选取同一组参数并将基底摩擦系数($\mu = 0.21$)适当降低用来模拟滑坡整体滑动的情景。模拟结果显示,滑坡在开始滑动后40 s,滑坡前缘会堵塞大水坝沟,随着时间增大,滑坡堰塞体厚度不断增大,堰塞体厚度最大可达28.3 m(图10),受后部滑坡体推挤沿

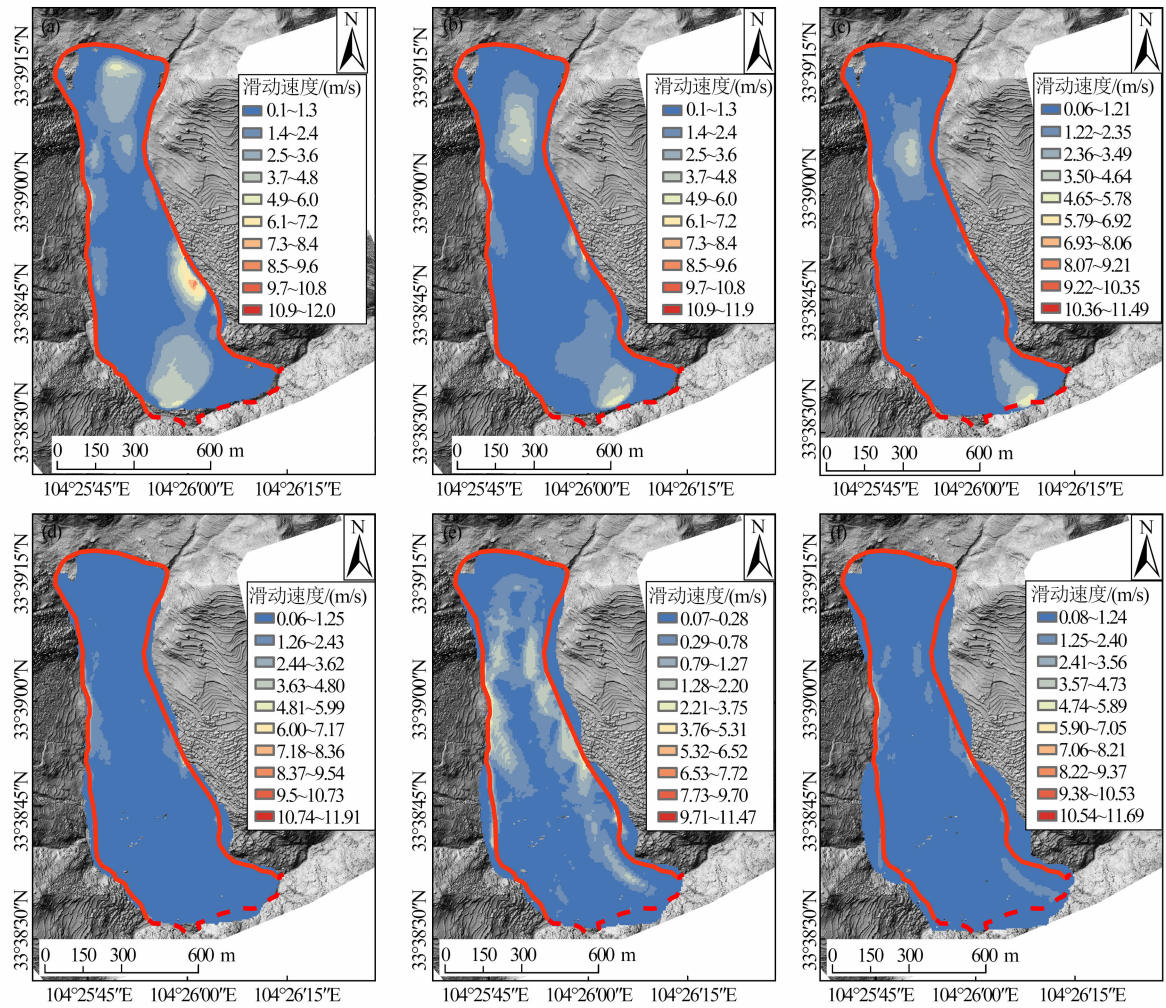


图 8 不同时刻滑坡滑动速度计算结果：

(a) $t = 10$ s; (b) $t = 20$ s; (c) $t = 30$ s; (d) $t = 50$ s; (e) $t = 100$ s; (f) $t = 200$ s

Fig. 8 Calculation results of the landslide sliding speed at different times;

(a) $t = 10$ s; (b) $t = 20$ s; (c) $t = 30$ s; (d) $t = 50$ s; (e) $t = 100$ s; (f) $t = 200$ s

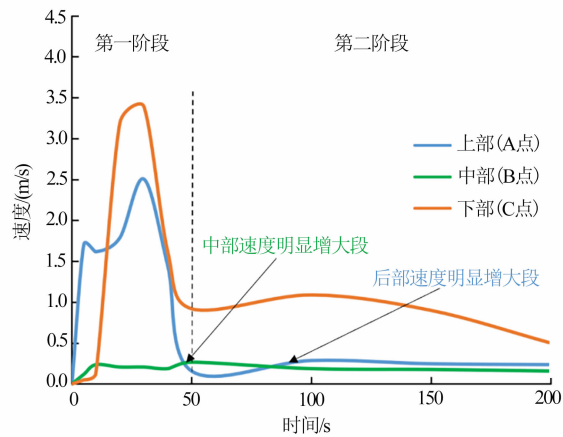


图 9 滑坡不同区域滑动速度-时间曲线

Fig. 9 Sliding velocity-time curve in different areas of the landslide

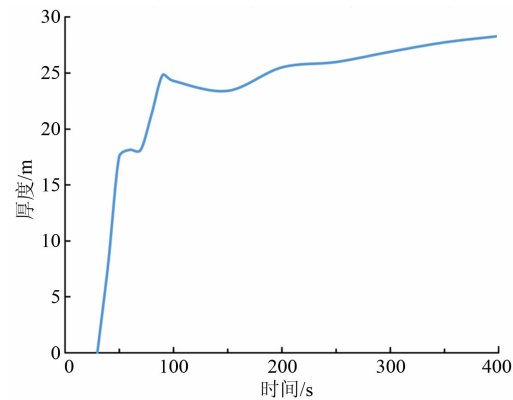


图 10 堰塞体堆积厚度-时间变化曲线

Fig. 10 Curve of accumulation thickness-time variation of the landslide barrier

大水坝沟向下游滑动。同时,滑坡体受大水坝沟阻挡后,滑坡中下部会向两侧扩散,威胁到滑坡东西两侧侧缘之外的区域(图 11b ~ 11f)。

滑动速度模拟结果显示,极端条件下滑坡的变形过程兼有推移式和牵引式变形的特点,其动力过程可以明显地分为两个阶段(图 12),仍然采用 A、B、C 点来分别代表滑坡上部、中部及下部来分析滑

动过程中速度变化特征。

第一阶段:强烈变形阶段,该阶段滑坡变形特征以典型的推移式变形为主,时间为滑动后 0 ~ 150 s。该阶段滑坡上部平均速度为 2.50 m/s,最大滑动速度 6.30 m/s;滑坡中部平均速度为 0.89 m/s,最大滑动速度为 2.38 m/s;滑坡下部平均速度为 4.28 m/s,最大滑动速度为 6.64 m/s。滑动开始后滑坡上部、

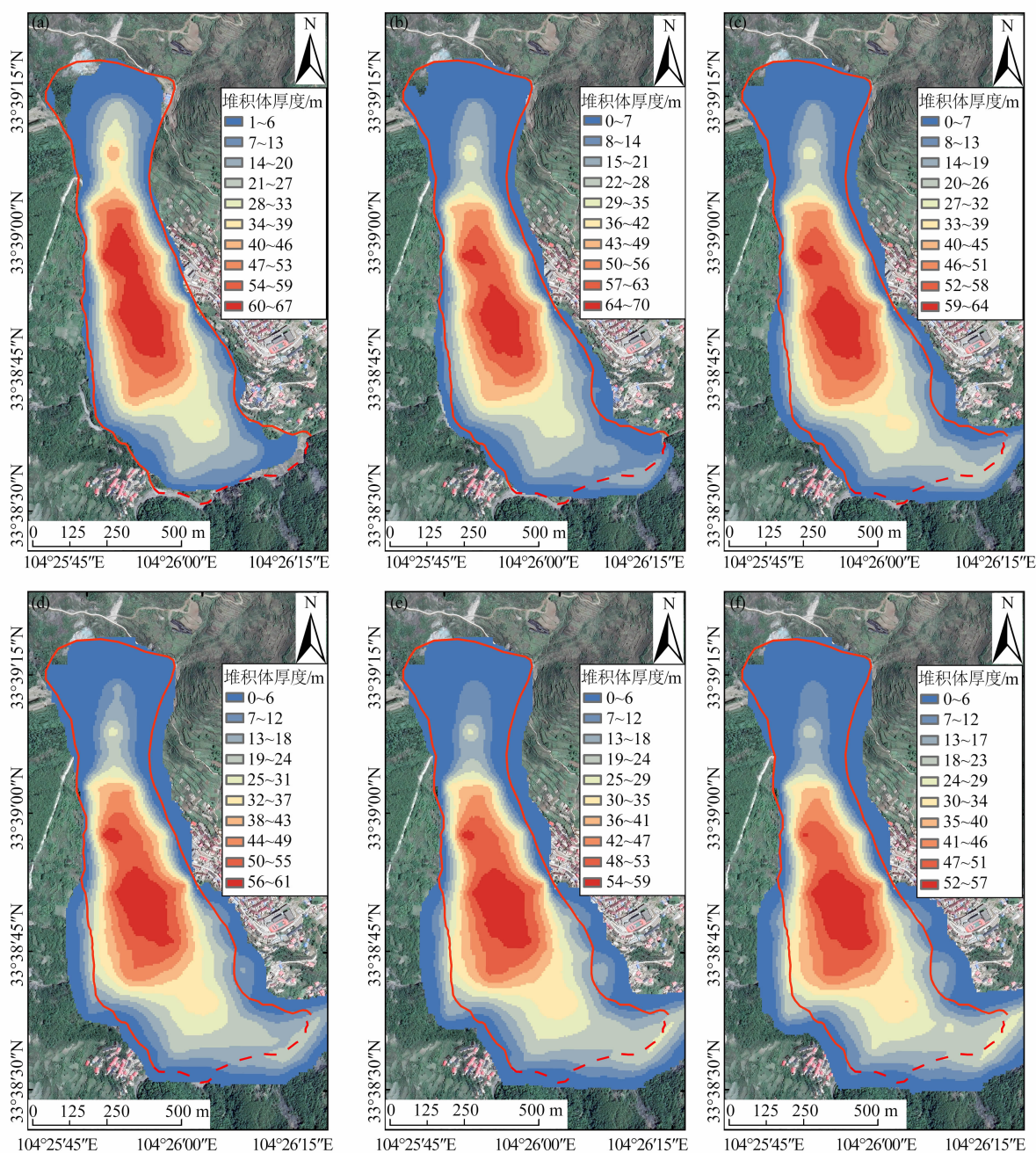


图 11 极端工况下滑坡堆积体厚度计算结果:

(a) $t=20$ s; (b) $t=50$ s; (c) $t=100$ s; (d) $t=200$ s; (e) $t=300$ s; (f) $t=400$ s

Fig. 11 Calculation results of the thickness of landslide accumulations under extreme working conditions:

(a) $t=20$ s; (b) $t=50$ s; (c) $t=100$ s; (d) $t=200$ s; (e) $t=300$ s; (f) $t=400$ s

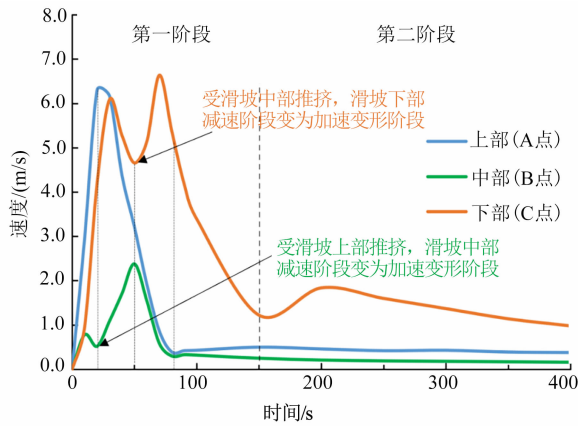


图 12 极端工况下滑坡不同部位速度-时间变化曲线

Fig. 12 Speed-time variation curve of different parts of the slope under extreme working conditions

中部及下部均进入加速变形阶段,在 $t = 10$ s 时刻,滑坡上部和下部处于加速阶段,滑坡中部速度达到第一次峰值 0.78 m/s 后开始减速;在 $t = 20$ s 时刻,滑坡上部滑动速度达到最大值 6.30 m/s 后开始减速,滑坡下部仍然处于加速变形阶段,受到滑坡上部推挤影响,滑坡中部由减速阶段进入加速变形阶段;在 $t = 50$ s 时刻,滑坡上部处于减速变形阶段,滑坡

中部滑动速度达到最大值 2.38 m/s 后开始减速,受滑坡中部推挤影响,滑坡下部由减速阶段进入加速变形阶段;在 $t = 80$ s 时刻,滑坡上部、中部减速变形阶段结束进入缓慢变形阶段;在 $t = 150$ s 时刻,滑坡下部减速阶段结束,滑坡整体进入缓慢变形阶段(图 13a ~ 13g)。

第二阶段:缓慢变形阶段,该阶段滑坡变形特征以牵引式变形为主,时间为开始滑动 150 s 之后。滑坡上部平均速度 0.42 m/s,最大滑动速度 0.46 m/s;滑坡中部平均速度为 0.18 m/s,最大滑动速度为 0.21 m/s;滑坡下部平均速度为 1.39 m/s,最大滑动速度为 1.84 m/s。该阶段滑坡下部滑动速度明显大于中、上部,受牵引作用影响滑坡中、上部持续处于缓慢变形阶段(图 13h ~ 13i)。

在整个滑动变形过程中,滑坡上部平均滑动速度为 1.85 m/s,中部平均速度为 0.67 m/s,下部平均速度为 3.38 m/s。由于各部位滑动速度不同,滑动过程中仍然会沿着前缘、侧缘等临空条件较好的区域形成一系列次级滑坡。

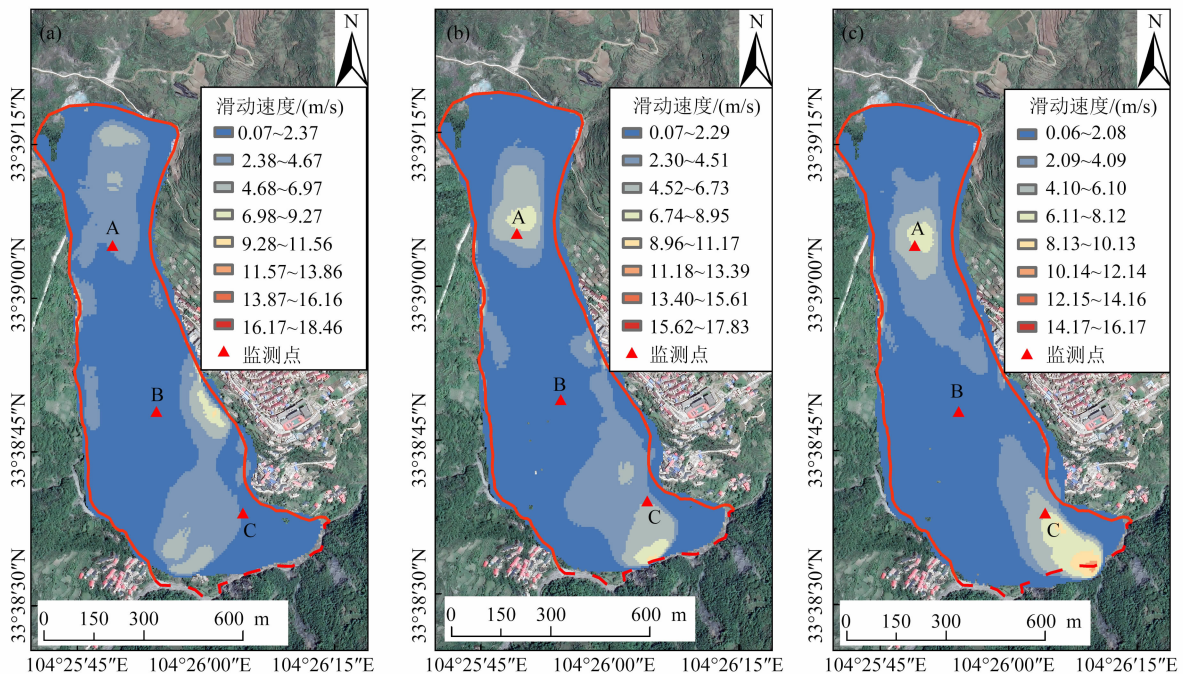


图 13 极端工况下滑坡滑动速度计算结果:

(a) $t = 10$ s; (b) $t = 20$ s; (c) $t = 30$ s; (d) $t = 40$ s; (e) $t = 50$ s; (f) $t = 60$ s; (g) $t = 100$ s; (h) $t = 200$ s; (i) $t = 400$ s

Fig. 13 Calculation results of landslide sliding speed under extreme conditions:

(a) $t = 10$ s; (b) $t = 20$ s; (c) $t = 30$ s; (d) $t = 40$ s; (e) $t = 50$ s; (f) $t = 60$ s; (g) $t = 100$ s; (h) $t = 200$ s; (i) $t = 400$ s

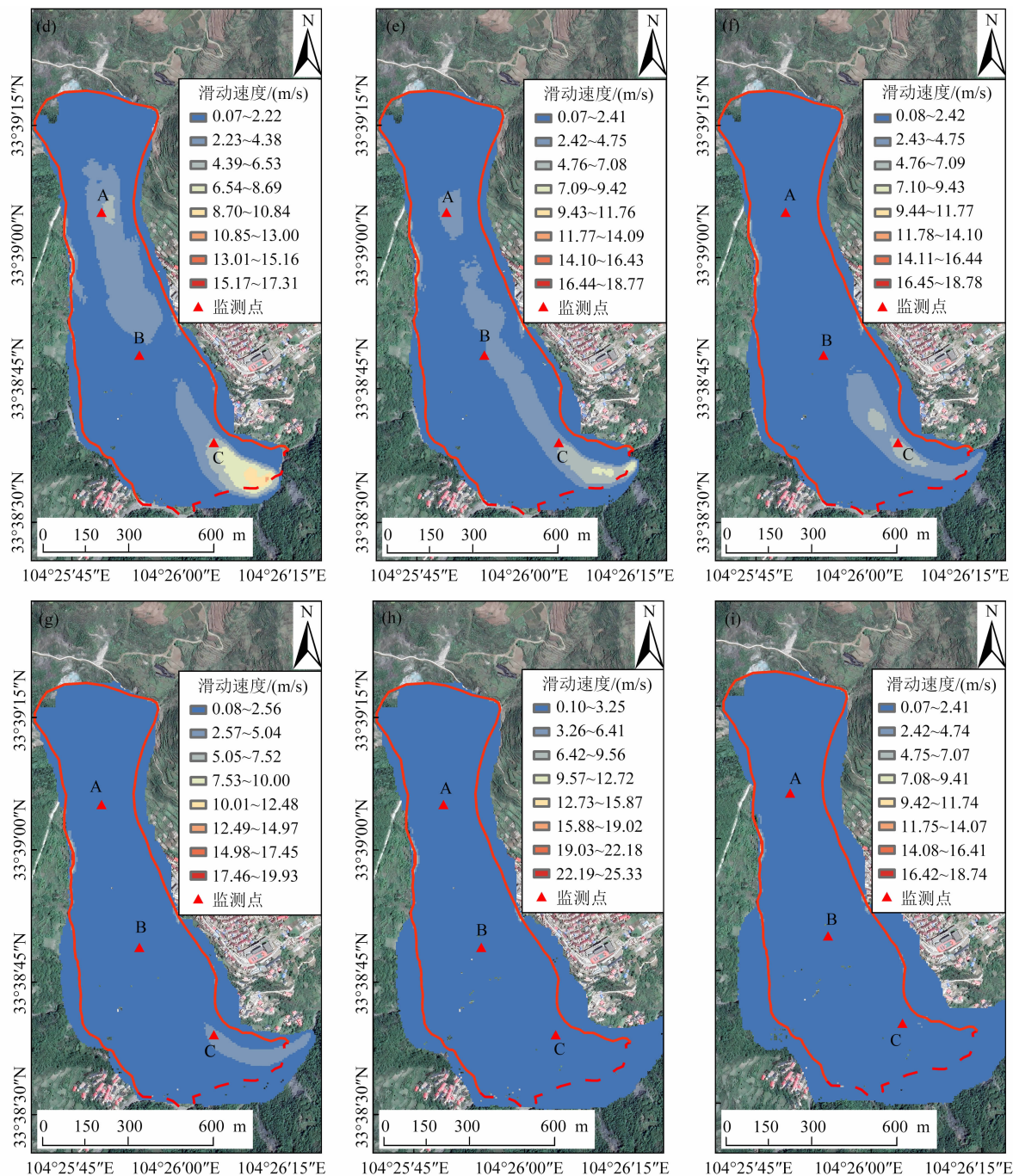


图 13(续)

4 风险评价

本研究中滑坡灾害风险评价工作只考虑最危险的情况,即滑坡在极端条件下整体失稳破坏后造成的直接灾害风险,不考虑由滑坡堆积体堵沟对上下游造成的次生灾害风险。

4.1 危险性评价

根据野外调查,受磨里滑坡威胁的住户大部分

位于滑坡体上,因此本研究中对滑坡危险性的评价可分为两部分,即滑动前滑坡体所在区域的危险性和滑坡前缘、侧缘堆积区或影响区的危险性评价。由于评价过程只考虑滑坡极端条件下整体失稳破坏的情景,因此滑坡体所在区域在滑动后会遭受完全破坏,所以该区域可直接定义为高危险区。对于滑坡前缘、侧缘堆积区或影响区,主要考虑滑坡最大淤埋深度和最大冲击动量进行危险性评价,分区标准根据现场承灾体特征进行分级(表1)。数值模拟结

表 1 滑坡堆积区危险性分区判别标准
Tab.1 Discrimination criteria for hazard zoning in
landslide accumulation areas

危险性	最大淤埋深度/m	最大冲击动量/(m ² /s)
高	≥3.0	≥8.0
中	1.5≤h<3.0	2.0≤h<8.0
低	0<h<1.5	0<h<2.0

注:危险性分区判别采用最大淤埋深度和最大冲击动量计算结果综合判定,采用就高原则。

果显示,滑坡最大堆积厚度和最大冲击动量均位于滑坡前缘大水坝沟谷中,参照危险性分区标准将最大堆积厚度和最大冲击动量分别进行分级显示后即可获得基于最大堆积厚度和最大冲击动量的危险性分区(图 14)。综合评价结果显示,磨里滑坡及堆积区域总面积为 782 830.0 m²,其中 86.2% 的区域为高危险区,6.7% 的区域为中危险区,7.1% 的区域为低危险区(图 15、表 2)。

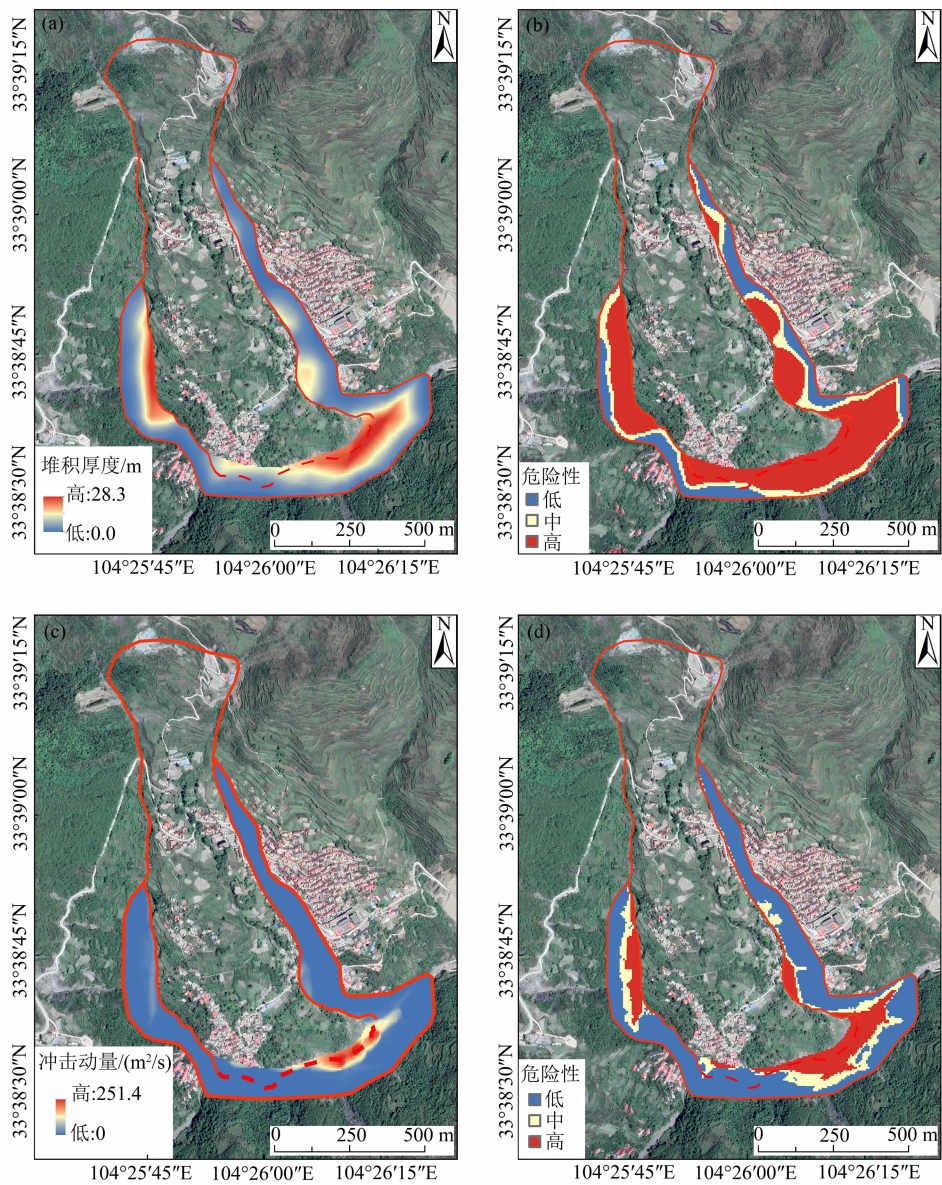


图 14 滑坡堆积区危险性评价:(a) 最大堆积厚度计算结果;(b) 基于最大堆积厚度的危险性分区;
(c) 最大冲击动量计算结果;(d) 基于最大冲击动量的危险性分区

Fig. 14 Risk assessment of landslide accumulation area;
(a) calculation results of maximum stacking thickness; (b) hazard zoning based on maximum accumulation thickness;
(c) calculation result of maximum impact momentum; (d) hazardous zoning based on maximum impact momentum

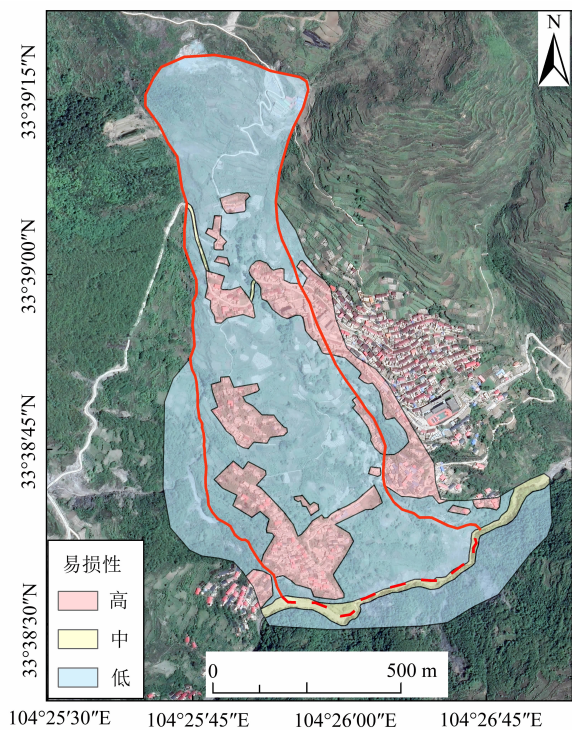


图 15 磨里滑坡危险性评价

Fig. 15 Hazard assessment of the Moli landslide

表 2 磨里滑坡危险性分区面积统计表

Tab. 2 Statistics of the landslide hazard zoning area

危险性分区	面积/m ²	占比/%
高危险区	674 815.6	86.2
中危险区	52 513.7	6.7
低危险区	55 500.7	7.1

4.2 易损性评价

对于易损性的评价,不同学者选择参与评价的指标不同,获得的评价结果也不尽相同。磨里滑坡发育地区主要为农村,承灾体以村庄、道路、耕地以及分布于滑坡前缘的大水坝沟为主,无工厂、大型交通干线等工程,危险区内人口与财产的分布特征基本一致,因此计算出的人员易损性和财产易损性分区规律基本一致。所以本次评价工作中,主要选择经济损失程度来代表综合易损性,易损程度(V)主要由承灾对象的经济价值(V_u)和损失程度(C)来决定^[24]:

$$V = V_u \times C \tag{9}$$

V_u 由成灾对象单价乘以尺寸获得。

承灾体结构特征和数量特征主要根据野外现场调查和无人机图像解译,承灾体单价主要参照当地

实际市场价格。损伤程度(C)的取值标准可参照相关研究成果^[24]。根据现场调查,滑坡区范围内村庄建筑结构主要以砖木、土木结构为主,依据危险性评价结果,认为位于滑坡体上的承灾体在滑坡整体滑动时将被完全摧毁,位于威胁区内的承灾体大部分位于堆积厚度大于 3.0 m 和冲击动量大于 8.0 m²/s 的区域。因此,本次评价中假定每一个被滑坡灾害袭击的承灾体损伤程度(C)为 1,即滑坡灾害将完全摧毁承灾体。

最后,根据式(9)对磨里滑坡易损性程度进行计算,结果显示滑坡区及堆积区 20.5% 的区域为高易损区,3.4% 的区域为中易损区,76.1% 的区域为低易损区(图 16、表 3)。

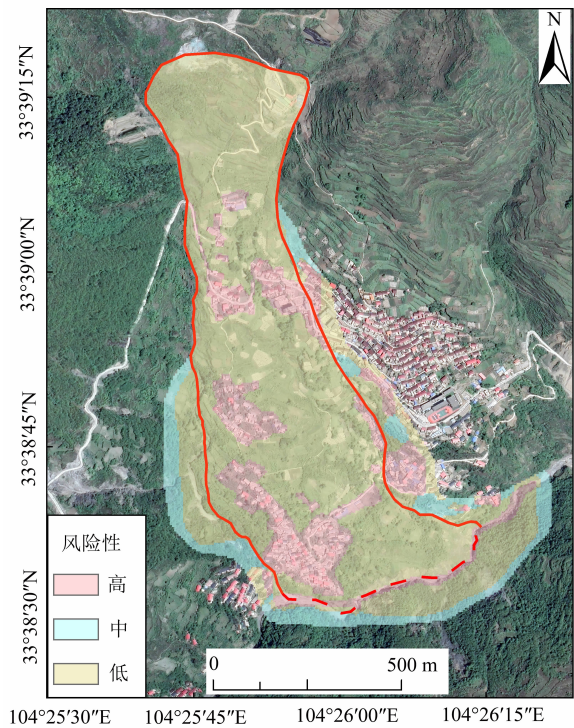


图 16 滑坡易损性评价结果

Fig. 16 Assessment results of the landslide vulnerability

表 3 滑坡易损性分区面积统计表

Tab. 3 Statistics of vulnerable landslide area

易损性分区	面积/m ²	占比/%
高易损区	160 813.1	20.5
中易损区	26 387.6	3.4
低易损区	595 629.3	76.1

4.3 风险性评价

风险性评价方法参照联合国人道主义事务部关

于自然灾害风险的统一定义^[24]：

$$R = D \times V \quad (10)$$

式中, R 为风险性等级; D 为危险性等级; V 为易损程度。根据式(10)对滑坡区域风险性进行评价,结果显示高风险区面积为159 835.8 m²,占比 20.4%;中风险区面积为 550 465.7 m²,占比 70.3%;低风险区面积为 72 528.5 m²,占比 9.3%(图 17、表 4)。

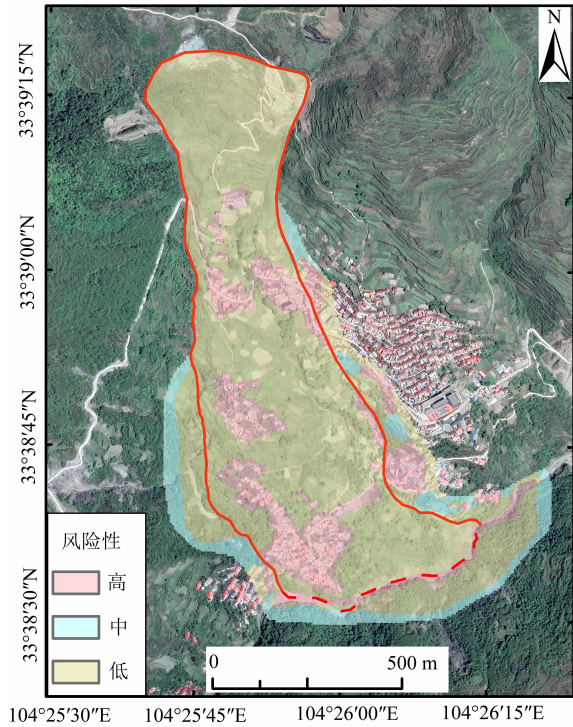


图 17 磨里滑坡风险性评价结果

Fig. 17 Risk assessment of the Moli landslide

表 4 磨里滑坡风险性分区面积统计表

Tab. 4 Statistics of risk zoning area of the Moli landslide

风险性分区	面积/m ²	占比/%
高风险区	159 835.8	20.4
中风险区	550 465.7	70.3
低风险区	72 528.5	9.3

5 不足与展望

特大型、巨型滑坡灾害往往造成巨大的灾害损失,以往在此类地质灾害险情处置工作中,单体滑坡灾害风险评价工作很少进行定量评价,危险性程度往往依靠经验判定,存在精细程度不够的问题,无法有效地指导灾害现场险情处置。本次研究在现场大

量调查、勘查工作的基础上,采用数值模拟等技术手段,快速获取了研究区的地形、物质结构及变形数据,准确再现了本次滑坡复活及极端条件下整体失稳滑动的动力过程,精确划分了滑坡变形阶段,分析了各阶段变形机理及速度变化特征。在淤埋深度和最大冲击动量计算的基础上,进行了精细化定量风险评价,为后期滑坡险情处置提供了科学依据。但是,由于特大型、超深层断层破碎带滑坡成因机理复杂,具多期次滑动特征,在实际勘查、评价研究工作中均存在诸多难度,需要补充大量新近滑坡研究案例,探明滑坡复活破坏过程,揭示极端降雨下滑坡运动变化趋势,精细化评价此类滑坡灾害风险,为险情处置和监测预警提供科学依据,为类似滑坡灾害风险评价研究工作提供参考。后续研究拟从三方面深化,首先,通过多源监测数据技术优化滑带本构模型,重点突破深部剪切带蠕变-突变转换的定量表征方法;其次,构建考虑降雨时空异质性的非饱和渗流动态模型,揭示极端气象条件下滑坡体孔隙水压力场的演化规律;最后,建立基于机器学习的多案例知识图谱,集成 InSAR 时序监测、微震信号等多维度信息,发展“机理模型-数据驱动”双引擎驱动的滑坡风险动态评估框架。预期研究成果可为滑坡全生命周期风险管理提供更精准的技术支撑。

6 结论

本文以舟曲磨里滑坡为研究对象,在对滑坡变形特征充分调查分析的基础上,基于深度积分的连续介质力学模型,对滑坡复活及极端条件下的滑坡动力过程进行了数值模拟,并开展了滑坡定量风险评价,主要结论如下。

(1)磨里滑坡滑体由碎石土及千枚岩、板岩碎屑组成,滑带主要为碳质含砾黏土,滑床为千枚岩和碳质板岩。厚度为 32 ~ 73 m,平均宽度为 385 m,长度为 1500 m,体积为 2.12×10^7 m³,为特大型超深层断层破碎带滑坡。

(2)磨里滑坡本次复活滑动的主要诱发因素为近年来持续强降雨。总体变形特征呈现出局部滑动破坏、整体蠕滑变形的牵引式变形特点,滑动开始后前缘及侧缘临空条件较好的区域首先发生滑动破坏,产生一系列次级滑坡(H1 ~ H9),其后受牵引影响,中上部滑体整体发生蠕滑变形。其变形过程可

分为局部滑动阶段和整体蠕滑两个阶段。

(3) 极端条件下, 整个变形过程兼有推移式和牵引式变形的特点, 磨里滑坡将整体失稳滑动。滑坡前缘将堵塞大水坝沟形成堰塞体, 厚度最大可达 28.3 m。同时在滑动过程中滑坡中下部会向两侧扩散, 威胁到滑坡东西两侧侧缘之外的区域。其动力过程可以分为强烈变形和缓慢变形两个阶段。第一阶段(强烈变形阶段)呈现出显著的推移式变形特点, 第二阶段(缓慢变形阶段)呈现出明显的牵引式变形特点。

(4) 在最大淤埋深度和最大冲击动量计算的基础上, 开展磨里滑坡定量风险评价, 评价结果显示, 高风险区占比 20.4%, 中风险区占比 70.3%, 低风险区占比 9.3%。该评价结果应用于磨里滑坡灾害应急处置工作中, 为灾害威胁范围划定及避险搬迁方案编制提供了依据, 有效支撑了政府应急决策。

参考文献(References)

- [1] DAI F C, LEE C F, NGAI Y Y. Landslide risk assessment and management: An overview [J]. *Engineering Geology*, 2002, **64** (1): 65–87. DOI: 10.1016/S0013-7952(01)00093-X
- [2] FELL R, HO K K S, LACASSE S, et al. A framework for landslide risk assessment and management [C]//HUNG R O F, et al. *Landslide risk management*. London: Taylor and Francis, 2005: 3–26
- [3] CASCINI L, BONNARD C, COROMINAS J, et al. Landslide hazard and risk zoning for urban planning and development [C]//HUNG R O F, et al. *Landslide risk management*. London: Taylor and Francis, 2005: 199–235
- [4] 石菊松, 石玲, 吴树仁. 滑坡风险评估的难点和进展[J]. *地质论评*, 2007, **53**(6): 797–806. [SHI Jusong, SHI Ling, WU Shuren. Difficulties and problematical aspects of landslide risk assessment: An overview [J]. *Geological Review*, 2007, **53**(6): 797–806] DOI: 10.16509/j.georeview.2007.06.018
- [5] 唐亚明, 张茂省. 滑坡风险评价难点及方法综述[J]. *水文地质工程地质*, 2011, **38**(2): 130–134+138. [TANG Yaming, ZHANG Maosheng. Landslide risk assessment difficulties and methods: An review [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2011, **38**(2): 130–134+138] DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2011.02.004
- [6] 吴树仁, 石菊松, 张春山, 等. 地质灾害风险评估技术指南初论[J]. *地质通报*, 2009, **28**(8): 995–1005. [WU Shuren, SHI Jusong, ZHANG Chunshan, et al. Preliminary discussion on technical guideline for geohazard risk assessment [J]. *Geological Bulletin of China*, 2009, **28**(8): 995–1005] DOI: 10.3969/j.issn.1671-2552.2009.08.001
- [7] 唐亚明, 张茂省, 薛强. 陕西延安市虎头岭滑坡社会风险评价[J]. *地质通报*, 2008, **27**(11): 1782–1786. [TANG Yaming, ZHANG Maosheng, XUE Qiang. Social risk assessments of the Hutoumao landslide in Xi'an City, Shaanxi, China [J]. *Geological Bulletin of China*, 2008, **27**(11): 1782–1786] DOI: 10.3969/j.issn.1671-2552.2008.11.004
- [8] 潘孝城, 聂荣孙, 罗浩洋. 基于模糊综合评价法的单体滑坡风险评价[J]. *土工基础*, 2018, **32**(3): 330–334. [PAN Xiaocheng, NIE Rongsun, LUO Haoyang. Application of fuzzy comprehensive evaluation in the risk assessment of single landslide [J]. *Soil Engineering and Foundation*, 2018, **32**(3): 330–334] DOI: CNKI:SUN:TGJC.0.2018-03-022
- [9] WANG Dongpo, LI Yizhi, WANG Zhongwen, et al. Threat from above! Assessing the risk from the Tonghua high-locality landslide in Sichuan, China [J]. *Landslides*, 2022, **19**(3): 731–746. DOI: 10.1007/s10346-021-01836-w
- [10] United Nations Office for Disaster Risk Reduction. Sendai framework for disaster risk reduction 2015–2030 [C]//Proceedings of the 3rd United Nations World Conference on Disaster Risk Reduction. Sendai, Japan, 14–18 March 2015
- [11] CLEARY P W, PRAKASH M. Discrete-element modelling and smoothed particle hydrodynamics: Potential in the environmental sciences [J]. *Philosophical Transactions Royal Society of London Series A – Mathematical*, 2004, **362**: 2003–2030. DOI: 10.1098/rsta.2004.1428
- [12] OUYANG Chaojun, ZHAO Wei, AN Huicong, et al. Early identification and dynamic processes of ridge-top rockslides: Implications from the Su Village landslide in Suichang County, Zhejiang Province, China [J]. *Landslides*, 2019, **16**(4): 799–813. DOI: 10.1007/s10346-018-01128-w
- [13] OUYANG Chaojun, WANG Zhongwen, AN Huicong, et al. An example of a hazard and risk assessment for debris flows: A case study of Niwan Gully, Wudu, China [J]. *Engineering Geology*, 2019, **263**: 1–42. DOI: 10.1016/j.enggeo.2019.105351
- [14] OUYANG Chaojun, ZHOU Kaiqi, XU Qiang, et al. Dynamic analysis and numerical modeling of the 2015 catastrophic landslide of the construction waste landfill at Guangming, Shenzhen, China [J]. *Landslides*, 2017, **14**(2): 1–14. DOI: 10.1007/s10346-016-0764-9
- [15] 张毅. 基于 InSAR 技术的地表变形监测与滑坡早期识别研究—以白龙江流域中游为例[D]. 兰州: 兰州大学, 2018: 1–130. [ZHANG Yi. Detecting ground deformation and investigating landslides using InSAR technique-taking middle reach of Bailong River Basin as an example [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2018: 1–130]
- [16] ZHANG Yi, MENG Xingmin, JORDAN C, et al. Investigating slow-moving landslides in the Zhouqu region of China using InSAR time series [J]. *Landslides*, 2018, **15**(7): 1299–1315. DOI: 10.1007/s10346-018-0954-8

- [17] 郭长宝, 任三绍, 李雪, 等. 甘肃舟曲南峪江顶崖古滑坡发育特征与复活机理[J]. 现代地质, 2019, **33**(1): 206 – 217. [GUO Changbao, REN Sanshao, LI Xue, et al. Development characteristics and reactivation mechanism of the Jiangdingya ancient landslide in the Nanyu Town, Zhouqu County, Gansu Province [J]. Geoscience, 2019, **33**(1): 206 – 217] DOI: 10.19657/j. geoscience. 1000 – 8527. 2019. 01. 20
- [18] 吴玮江, 王国亚, 刘兴荣, 等. 甘肃舟曲县牙豁口滑坡发育特征与成因分析[J]. 冰川冻土, 2021, **43**(2): 544 – 554. [WU Weijiang, WANG Guoya, LIU Xingrong, et al. The development characteristics and causes of the Yahuokou landslide in Zhouqu County, Gansu Province [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, **43**(2): 544 – 554] DOI: 10.7522/j. issn. 1000 – 0240. 2021. 0019
- [19] 黎志恒, 文宝萍, 贾贵义, 等. 甘肃省白龙江流域滑坡分布规律及其主控因素[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2015, **51**(6): 768 – 776. [LI Zhiheng, WEN Baoping, JIA Guiyi, et al. Characteristics of the landslide distribution along the Bailongjiang river basin and its controlling factors [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2015, **51**(6): 768 – 776] DOI: 10.13885/j. issn. 0455 – 2059. 2015. 06. 002
- [20] ZHAO Yan, MENG Xingmin, QI Tianjun, et al. AI-based identification of low-frequency debris flow catchments in the Bailong River Basin, China [J]. Geomorphology, 2020, **359**: 107125. DOI: 10.1016/j. geomorph. 2020. 107125
- [21] 徐彩仙, 巩杰, 李焱, 等. 基于地形梯度的甘肃白龙江流域典型生态系统服务分布特征[J]. 生态学报, 2020, **40**(13): 4291 – 4301. [XU Caixia, GONG Jie, LI Yan, et al. Spatial distribution characteristics of typical ecosystem services based on terrain gradients of Bailongjiang Watershed in Gansu [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, **40**(13): 4291 – 4301] DOI: 10.5846/stxb201911152447
- [22] 黄晓, 杨为民, 张春山, 等. 甘肃南部坪定-化马断裂带锁儿头滑坡成因机制[J]. 地质通报, 2013, **32**(12): 1936 – 1942. [HUANG Xiao, YANG Weimin, ZHANG Chunshan, et al. The formation mechanism of Suoertou landslide in Pingding-Huama fault zone, Southern Gansu [J]. Geological Bulletin of China, 2013, **32**(12): 1936 – 1942] DOI: 10.3969/j. issn. 1671 – 2552. 2013. 12. 007
- [23] 郭富赞, 王信, 吴正军, 等. 舟曲磨里巨型滑坡基本特征及破坏模式[J]. 山地学报, 2022, **40**(4): 557 – 569. [GUO Fuyun, WANG Xin, WU Zhengjun, et al. Characteristics and failure mode of giant Moli landslide in Zhouqu County, Gansu Province, China [J]. Mountain Research, 2022, **40**(4): 557 – 569] DOI: 10.16089/j. cnki. 1008 – 2786. 000693
- [24] CUI Peng, ZOU Qiang, XIANG Lingzhi, et al. Risk assessment of simultaneous debris flows in mountain townships [J]. Progress in Physical Geography, 2013, **37**(4): 516 – 542. DOI: 10.1177/0309133313491445

A Dynamic Process-Based Risk Assessment of a Resurgent Landslide at Moli Village in Zhouqu County, Gansu Province, China

WANG Xin¹, GUO Fuyun^{1*}, ZHANG Juan¹, DOU Xiaodong¹, ZHANG Yi², FENG Ziming³

(1. Gansu Provincial Institute for Geo-Environment Monitoring, Lanzhou 730000, China; 2. School of Earth Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 3. First Geology and Mineral Exploration Institute, Gansu Provincial Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Tianshui 741020, Gansu, China)

Abstract: The landslide occurring at Moli Village in Guoye Town, Zhouqu County, Gansu Province, China is located in fractured rock-soil area of the fault belt on the northeast margin of the Qinghai-Tibet Plateau. Influenced by sustained extreme rainfall with regional earthquakes, the Moli landslide underwent progressive deformation with obvious trend of reactivation in 2021, posing a severe threat to the lives and property of residents in Moli villages and its surrounding areas.

In this paper, it conducted field investigations and in-situ monitoring on the Moli landslide deformation, followed by introducing a continuum mechanics model to predict the dynamic process of the landslide's resurgent deformation, and failure in case of extreme excitation conditions. Then it evaluated its failure risk and zoning by inclusion of some key landslide failure eigenvalues in a risk model, such as the maximum burial depth and the

maximum impact momentum of the landslide deposit.

(1) The investigation revealed that the Moli landslide was a typical extra-large and ultra-deep landslide in fault fracture zone, with primary controlling factor for its reactivation being the deterioration of rock mass strength due to diachronic rainfall infiltration.

(2) By numerical simulations of the dynamic process, it suggested that the Moli landslide generally described a retrogressive deformation pattern; however, at the critical point of failure it behaved in a way of simultaneous retrogressive and slumping motions. The deformation process can be divided into two stages: a local sliding stage from 0 to 50 seconds and an overall creep deformation stage thereafter. The period from 0 to 150 seconds after sliding represented a stage of intense deformation, characterized by slumping deformation, followed by a slow deformation stage dominated by retrogressive deformation after 150 seconds. The landslide deposit would block the Dashuiba Gully at the toe of the landslide 40 seconds after sliding, with the maximum thickness of the dammed body reaching 28.3 meters.

(3) In the risk zoning, high-risk areas (20.4%), medium-risk areas (70.3%), and low-risk areas (9.3%) were distributed in patches, mainly located at the front of the landslide body.

This finding provides a dynamic decision-making benchmark for emergency management of the Moli landslide and also offers a generalizable methodological framework for risk prevention and control of typical giant landslides in similar regions.

Key words: the Moli landslide; dynamic process; numerical simulation; risk assessment

(责任编辑 朱颖彦 李 嵘)