

芦山地震作用下山区干线公路地质灾害发育演化特征及成灾运动过程

郭 凯¹, 易雪斌¹, 付晓东^{2, 3*}, 杜文杰^{2, 3}, 丁海锋^{2, 3}, 赵海松¹, 习 田^{2, 3}

1. 四川省公路规划勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610041

2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程安全全国重点实验室, 湖北 武汉 430071

3. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 研究强震山区干线公路沿线典型地质灾害发育演化特征及成灾运动过程, 对灾害识别评估和公路防灾减灾工作具有重要意义。本文基于现场调查、遥感解译、GIS 空间分析等多种方法, 综合考虑 2013 年、2022 年芦山多期地震事件的影响, 研究了震区国道 351 线宝兴段沿线同震地质灾害发育规律和演化特征, 并采用三维两相物质点法(MPM), 分析了新华村高位堆积体滑坡的成灾运动过程, 讨论了地震频发区干线公路高位崩滑灾害场景推演关键技术。结果表明: (1) 研究区共发育 2022 年同震地质灾害 215 处, 主要分布于东河河谷两侧岸坡 1500m 高程范围内, 30°~50° 的斜坡上, 与 2013 年同震地质灾害共同的分布特征是硬质岩高陡斜坡段是灾害高发区。(2) 2022 年同震地质灾害发育分布主要受地貌、河流和断层因素控制为主, 与震中位置空间耦合性不强; 对公路影响较大的灾害点, 主要发育在多面临空的突出山体部位和断裂带附近, 且受多期地震叠加和历史降雨作用影响显著。(3) 新华村高位滑坡受多期地震、降雨、冻融等作用叠加影响, 近十年来表现为不断向上扩展的渐近后退式变形, 最终在 2022 年强震作用下整体大范围失稳并堵塞河道; 三维两相 MPM 模拟再现了滑坡运动→入水涌浪→堆积成坝全过程, 结果显示滑坡体约 76 万方, 最大运动距离约 609m, 涌浪高度最高 8 m, 模拟滑坡运动后堆积形态与现场实际基本吻合。研究成果对强震山区干线公路灾前风险评估和灾后建设提供了理论与技术支撑。

关键词: 芦山地震; 地质灾害; 发育演化特征; 三维两相 MPM; 运动过程分析

中图分类号: P642.2

收稿日期: 2024-11-22

Analysis of the Development and Evolution Characteristics of Geohazards and the Process of Disaster Movement on the Main Highway in the Mountain Area Affected by the Lushan Earthquake

WU Kai¹, YI Xuebin¹, FU Xiaodong^{2, 3}, DU Wenjie^{2, 3}, DING Haifeng^{2, 3}, ZHAO Haisong¹, XI Tian^{2, 3}

1. Sichuan Highway Planning, Survey, Design and Research Institute Ltd., Chengdu, Sichuan 610041, China

2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering Safety, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Studying the development and evolution characteristics, as well as the disaster-forming motion processes of typical geological disasters along the trunk highways in strong earthquake mountainous areas is significant for disaster identification and evaluation and the work of highway disaster prevention and reduction. Based on multi-source geological analysis methods such as field survey, remote sensing interpretation and GIS spatial analysis, this paper comprehensively considers the impacts of the 2013 and 2022 Lushan multi-phase seismic events, studies the development rules and evolution characteristics of co-seismic geological hazards along the Baoxing section of National Highway 351 in the earthquake area. On this basis, three-dimensional two-phase material point method (MPM) was used to analyze the disaster movement process of the high-level accumulation landslide in Xinhua Village. The key technologies for scenario deduction of high-level landslide disasters on main highways in earthquake prone areas were discussed. The results showed that: (1) In the study area, there were a total of 215 co-seismic geological hazards developed in 2022. They were mainly distributed

基金项目: 国家重点研发计划青年科学家项目(2023YFC3081200); 国家自然科学基金资助项目(52179117); 四川省交通运输科技项目(2024-A-02)

Supported by the National Key R&D Programs for Young Scientists(Grant No. 2023YFC3081200), National Natural Science Foundation of China(Grant No. 52179117) and the Transportation Science and Technology Project of Sichuan Province(Grant No. 2024-A-02)

作者简介: 郭 凯(1985-), 男, 博士, 2006 年毕业于四川大学水利水电工程专业, 现任正高级工程师, 主要从事公路边坡地质灾害防治方面的研究工作。E-mail: 179030548@qq.com, ORCID: 0000-0001-8789-485X。通讯作者: 付晓东(1986-), 男, 博士, 现任研究员、博士生导师。E-mail: xdfu@whrsm.ac.cn, ORCID: 0000-0002-0646-7643。

within the 1500m elevation range of the bank slopes on both sides of the Donghe River Valley and a slope range of 30° to 50° . The common distribution characteristics of co-seismic geological hazards in 2013 are that the high-steep slope section of hard rock is a high-incidence area for disasters. (2) The development and distribution of co-seismic geological hazards in 2022 were mainly controlled by factors such as topography, river, and faults, and the spatial coupling with the epicenter location was not particularly strong. The hazard points that have significant impact on the highway were mainly developed near the protruding mountain parts with multiple exposed surfaces and fault zones, and were significantly affected by multi-period earthquakes superposition and historical rainfall. (3) The high-position landslide in Xinhua Village was affected by the superposition of multi-period earthquakes, rainfall, freeze-thaw cycles. In the past decade, it has shown a gradual backward deformation that continues to expand upward. Eventually, under the action of strong earthquakes in 2022, the overall large-scale instability occurred and the river channel was blocked. The three-dimensional two-phase MPM simulation reproduced the entire process of landslide movement, water inflow surge, accumulation and dam formation. The results showed that the landslide body was about $760,000\text{ m}^3$, with a maximum movement distance of about 609 m and a surge height of up to 8 m. The accumulation shape after simulated landslide movement was basically consistent with the actual situation on site. The research results provide theoretical and technical support for pre disaster risk assessment and post disaster construction of main highways in strong earthquake mountainous areas.

Key words: Lushan earthquake; geological hazard; development and evolution characteristics; three-dimensional two-phase MPM; movement process analysis

引 言

2022 年 6 月 1 日 17 时 00 分, 四川省雅安市芦山县(30.37°N , 102.94°E)发生 $\text{Ms}6.1$ 级地震, 震源深度 17 km, 发震断层为龙门山断裂带南段前山一山前断裂系的一条盲逆冲断层, 震源机制为逆冲型, 受到 2013 年芦山地震的抑制作用(肖阳等, 2024)。此次地震震中距离 2013 年芦山 $\text{Ms}7.0$ 级地震震中不到 10km, 震源机制均以逆冲为主(范宣梅等, 2022; 李军鹏等, 2024), 都造成了区内主要交通干线国道 351 线沿线出现大量同震地质灾害, 道路受损中断。2022 年芦山地震还诱发了新华村高位滑坡(周赞等, 2024), 滑坡掩埋道路并堵江壅塞形成堰塞湖, 对道路抢通和河道行洪产生极大影响。地震灾区干线公路是灾区的生命线, 快速抢通生命通道是灾区应急抢险的关键任务。地震诱发地质灾害及其长期震后效应对山区干线公路防灾减灾和运营安全具有重要影响。

同震地质灾害分布特征及发育分布规律研究对地震应急救援和灾后重建都具有重要指导意义。近 20 年我国多次强震发生后, 均有学者及时开展震害调查及评估工作。2017 年九寨沟地震诱发地质灾害 1883 处, 以中小型浅层滑坡和崩塌为主(戴岚欣等, 2017)。四川泸定 $\text{Ms}6.8$ 级地震诱发地质灾害集中在断裂带交汇处, 且分布格局同 2008 年汶川地震相似(宋静园等, 2025)。2013 年芦山地震公路地质灾害主要表现为浅层滑坡与崩塌、落石, 高陡边坡崩塌落石问题突出, 陡坡硬岩段是地震崩塌灾害高发区(许冲等, 2013; 程强和郑同健, 2014)。2022 年芦山地震也有不少学者对其震源机制解、震害分布特征(潘毅等, 2023; 李军鹏等, 2024; 周赞等, 2024)和地震诱发滑坡空间分布进行了近实时预测并开展了现场应急调查与模型复核(范宣梅等, 2022)。以上研究初步呈现了强震发生后灾区震害特征, 但缺少对地质灾害发育规律和空间分布特征的深入分析。在成灾过程分析方面, 以有限元、有限差分、有限体积为代表的网格法发展最为成熟(Ouyang *et al.*, 2013; 杜娟等, 2015), 但在大变形分析时容易产生网格扭曲降低计算精度的问题, 而无网格法在处理大变形问题中自适应性强, 近年来得到了广泛关注(胡嫚等, 2016; Shi *et al.*, 2019)。MPM 是一种结合了拉格朗日和欧拉双重描述的非网格方法, 在模拟滑坡大变形失稳运动全过程方面具有巨大优势(孙玉进等, 2015; xu *et al.*, 2019); 同时, 引入两相 MPM, 即在同一套背景网格上, 采用两套质点分别描述滑坡体固相、水体液相, 可以高效地处理土水耦合作用, 非常适用于滑坡入水堵江过程分析(Liu *et al.*, 2020; 杜文杰等, 2022), 为震后堆积体失稳成灾运动过程模拟提供了新的研究手段。

本文研究团队在两次芦山地震震后第一时间赴灾区开展了震害调查和道路抢通保通工作, 并长期跟踪了该区域典型地质灾害的长期演化特征, 特别是发现该区域受多次强震和充沛降雨作用, 典型地质灾害发育演化特征及成灾运动过程极具研究意义。为此, 本文在研究区通过遥感影像结合现场调查等手段, 利用 GIS 空间分析功能, 研究了震区国道 351 线宝兴段沿线同震地质灾害发育规律以及典型地质灾害的历史演化特征, 然后采用三维两相 MPM 分析了典型震害新华村高位堆积体滑坡的成灾运动过程。本文研究成果为多期地震作用及震后效应影响下灾害演化特征分析提供了宝贵案例, 对强震山区灾害识别评估和公路防灾减灾工作具有重要指导意义。

该区具有亚热带气候特点，潮湿多雨，雨量充沛，暴雨强度大。如[错误!未找到引用源。](#)所示，近 10 年的年平均降雨量约 1700mm，特别是震后的 2023 年降雨量达 1997mm，为近 10 年最高，为震后次生地质灾害的孕育和演化提供了充足条件。沿线水系属岷江支流青衣江水系，东河及宝兴电站水库为场地主要地表水体，东河为区内主要干流，发源于宝兴县北部夹金山，河谷高程在 1300m 左右，河谷内为侵蚀堆积地貌，呈条带状展布。

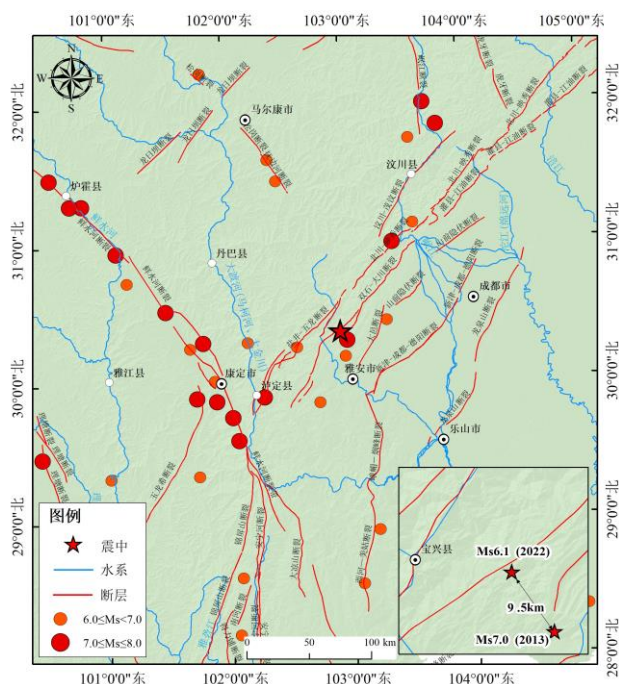


图 2 区域构造及历史地震图

Fig. 2 Regional structure and historical seismic map

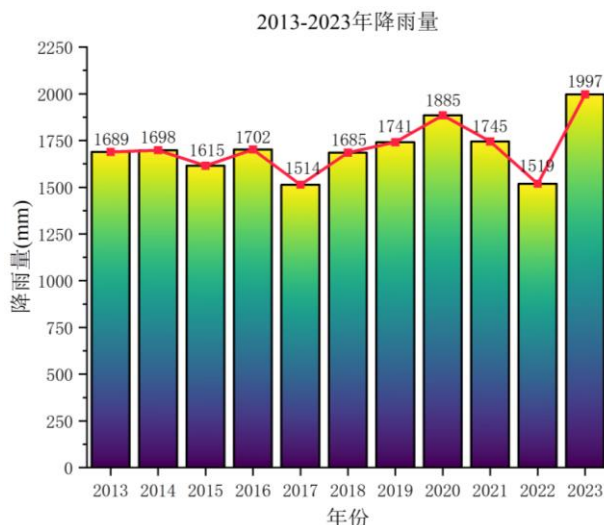


图 3 2013 至 2023 年降雨量柱状图

Fig. 3 Histogram of rainfall from 2013 to 2023

1.2 道路灾损情况

如错误!未找到引用源。所示，国道 351 线宝兴段从县城起沿东河河谷向北至夹金山垭口，道路近平行于龙门山中央断裂带南段的盐井—五龙断裂，岩体破碎，岸坡陡峻。如错误!未找到引用源。所示，2022 年芦山地震造成沿线出现崩塌、浅层滑塌等，崩落巨石砸坏吊桥，失稳岩体崩解冲击损坏路面，沿线边坡、挡防工程也出现了损坏（图中灾害点具体位置见图 1）。特别是新华村隧道出口段出现高位堆积体滑坡，掩埋洞口并壅塞东河河道，形成堰塞湖，成为道路抢通的卡脖子工点。2013 年地震也曾对国道 351 线宝兴段造成震损，以崩塌灾害掩埋公路，砸毁路面为主，当时该段道路总体灾损程度小于 2022 年地震。



图 4 道路沿线损毁典型工点图

Fig. 4 Damage to typical work sites along the road

2 地震诱发地质灾害发育规律

2.1 地震诱发地质灾害特征

如**错误!未找到引用源。**所示, 2022 年芦山地震研究区总面积为 $2.99 \times 10^8 \text{ m}^2$, 经排查统计, 沿线同震地质灾害共计 215 处, 平均面积 5674 m^2 , 总面积 $1.22 \times 10^6 \text{ m}^2$, 占研究区面积的 0.41%。单点同震地质灾害面积小于 1000 m^2 为 33 处, $1000\text{-}5000 \text{ m}^2$ 为 115 处, $5000\text{-}10000 \text{ m}^2$ 为 42 处, $10000\text{-}50000 \text{ m}^2$ 为 22 处, 大于 50000 m^2 为 3 处, 分别占同震地质灾害总数的 15.35%, 53.49%, 19.53%, 10.23%和 1.40%, 可以看出其同震灾害规模以 $1000\text{-}5000 \text{ m}^2$ 为主。以**错误!未找到引用源。**来看, 同震地质灾害主要沿东河河谷及国道 351 线呈线状分布, 另外集中分布于上游两支流交汇处, 受河流切割作用影响明显。

相比于本次地震, 2013 年芦山地震总计发生崩塌滑坡 703 处, 滑坡总面积约 1.2 km^2 , 具有背坡效应, 震害均以小型为主, 主要沿双石-大川断裂带, 北西向几个深切峡谷段等断裂带分布(黄润秋等, 2013)。靠近震中附近崩塌密度最大, 强风化表层的滑塌和楔形体失稳在崩塌中最为常见, 陡坡硬岩段是地震崩塌灾害高发区, 滑坡总体不发育。本次研究的国道 351 线宝兴段在 2013 年芦山地震中共发育 26 处崩滑灾害, 主要以小型崩塌落石灾害为主(程强和郑同健, 2014)。

2022 年芦山地震地质灾害除诱发新华村高位滑坡外, 其余也均以中小型崩滑灾害为主。崩塌体集中发育于具节理裂隙的闪长岩、花岗岩等硬质岩中, 滑塌后可见较为新鲜的断裂岩面, 该类地质灾害具有数量多、运动速度快、危害大等特点。浅表层滑塌多以坡表崩坡积物为主, 滑动范围顺坡面向下呈条带状展布。现场调查发现, 崩滑灾害多呈条带状分布于山脊、多面临空的山体部位和东河及支沟两侧岸坡由缓变陡的过渡转折部位, 高陡地形且具明显的变坡点, 使得其地震荷载放大效应显著(罗永红和王运生, 2013; 杨长卫和张建经, 2013)。

2.2 同震地质灾害分布规律

为系统分析同震地质灾害发育特征和分布规律, 支撑道路灾后重建方案, 如**错误!未找到引用源。**所示, 基于前述工作, 以高程、震中距离、断层距离、水系距离、地层岩性和坡度为分析因子, 通过统计各因子分级中灾害面积, 分区面积, 计算灾害面密度(因子分级内灾害面积 / 分区面积), 从而分析同震地质灾害的空间分布特征。地层岩性分类以年代地层单位进行合并, 因子分级标准及统计结果如**错误!未找到引用源。**和**错误!未找到引用源。**所示。

2.2.1 高程

研究区最大高差达 2665 m, 以东河为最低侵蚀基准面, 两侧为由西北向东南倾斜的山峦地貌, 最高海拔 3592m, 垂直气候差异显著。由**错误!未找到引用源。**(a)和**错误!未找到引用源。**(a)可知, 研究区各高程段分区面积呈正态分布, 即大部分面积分布于高程为 1500~2700 m 的坡中部位, 表明区域山体山脊形态多呈尖峭状。高程在小于 1500m 范围内分区面积占比 12.14%, 该段区间主要为东河河谷的两侧岸坡, 其中发育的地质灾害面积为 $5.19 \times 10^5 \text{ m}^2$, 占比灾害总面积的 42.59%, 灾害面密度达到 0.028, 占比 57.39%。灾害面密度高程增大先小幅度增加, 随后快速下降最后区域稳定。以上数据说明研究区地质灾害集中发育于高程小于 1500m 的沟谷两侧岸坡段。

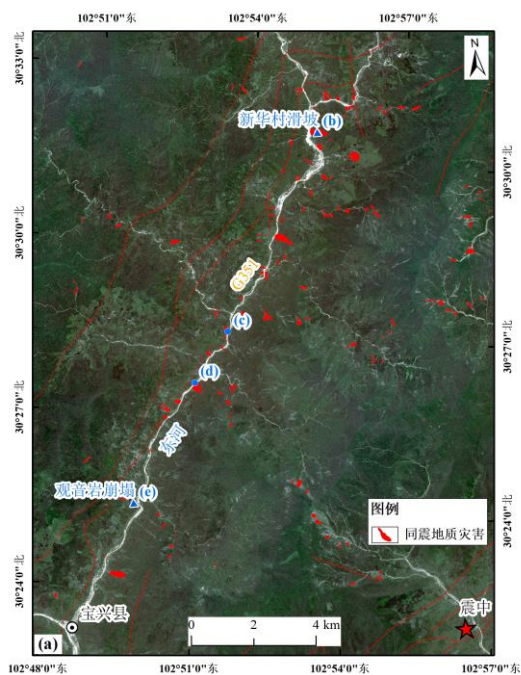


图 5 研究区灾后影像图

Fig. 5 Post-disaster image of study area

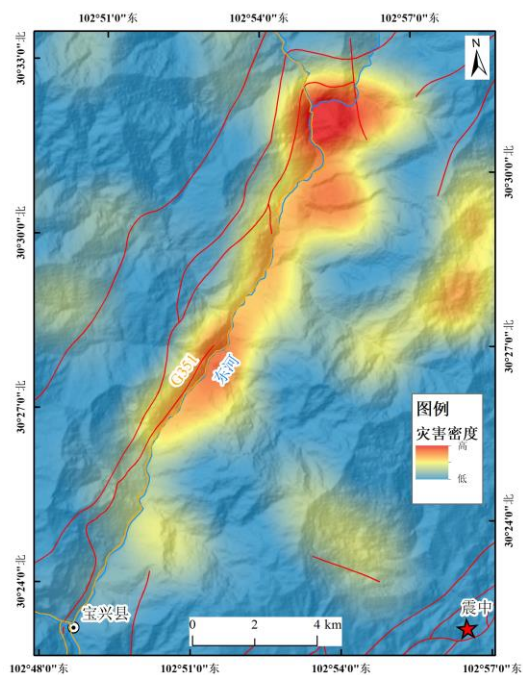
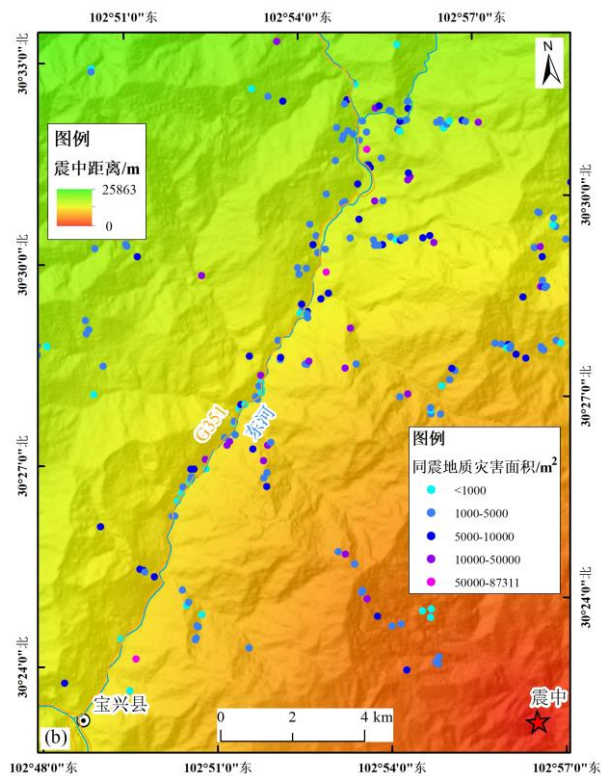
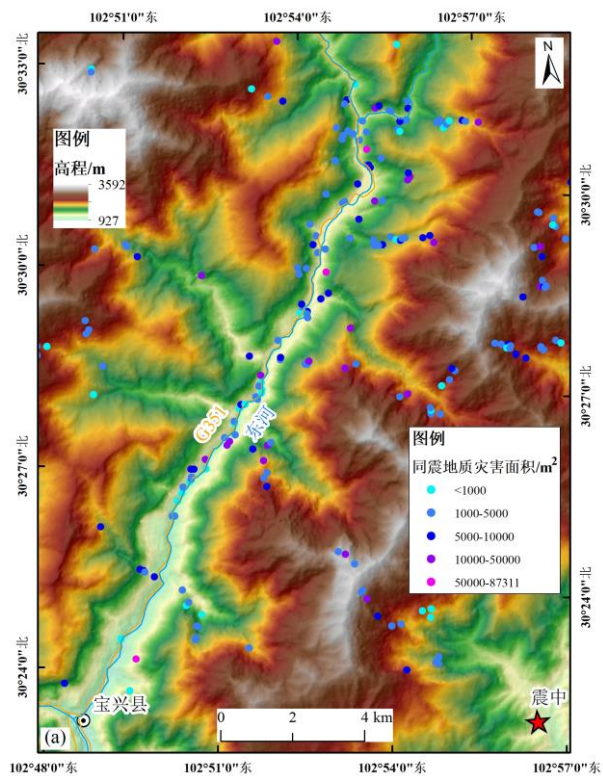


图 6 研究区同震地震灾害核密度图

Fig. 6 Coseismic disaster nuclear density in the study area



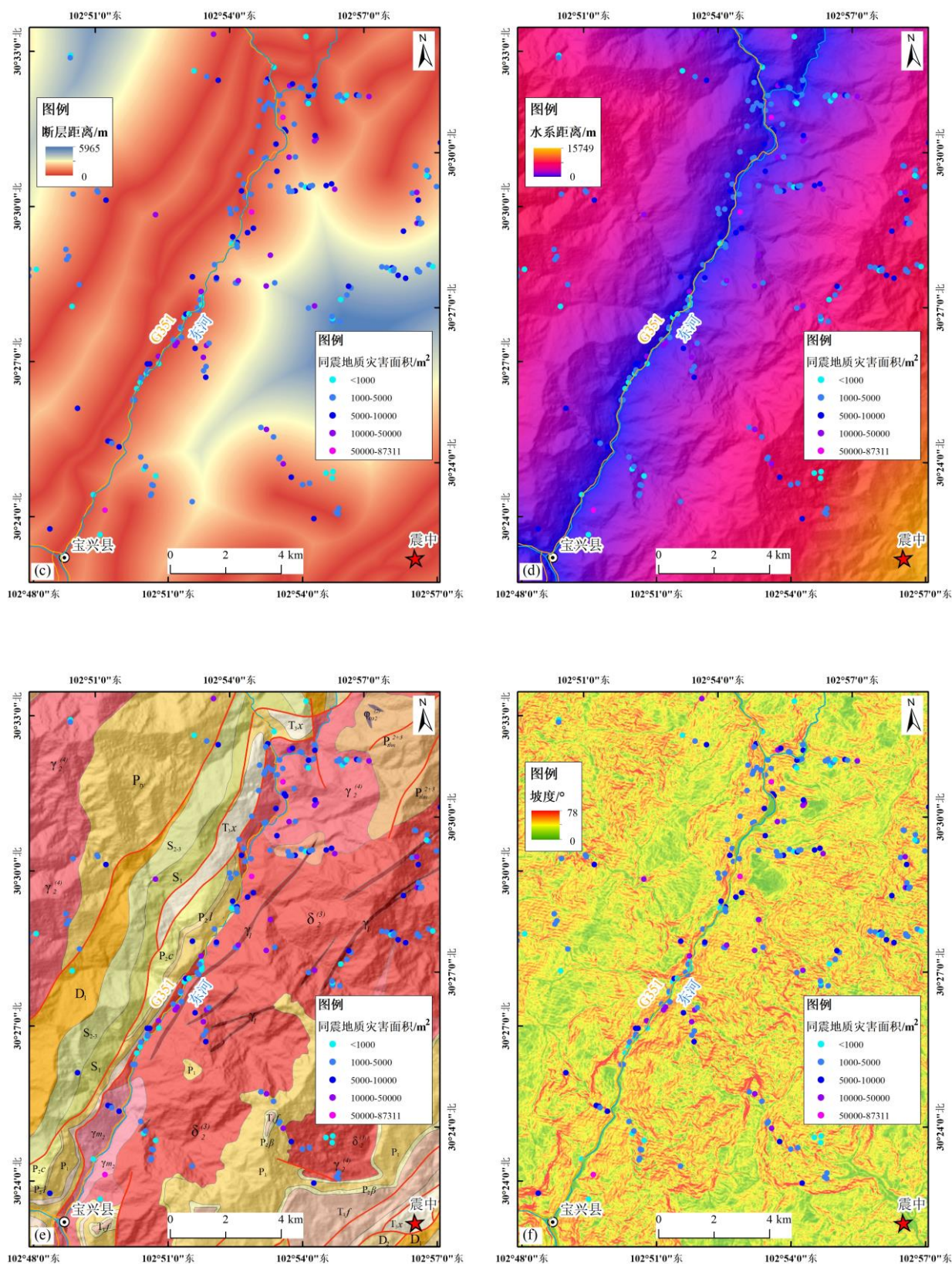


图 7 同震地质灾害分布规律图, (a) 高程, (b) 震中距离, (c) 断层距离, (d) 水系距离, (e) 地层岩性, (f) 坡度
 Fig. 7 Distribution law of coseismic geological hazards, (a) elevation, (b) Epicentral distance, (c) Fault distance, (d) Drainage distance, (e) Stratigraphic lithology, (f) slope

表 1 同震地质灾害因子分级
Table 1 Classification of coseismic geological hazard factors

因子类型	因子分级
高程/m	<1300, 1300~1300, 1500~1700, 1700~1900, 1900~2100, 2100~2300, 2300~2500, 2500~2700, 2700~2900, >2900
距震中距离/m	<2000, 2000~4000, 4000~6000, 6000~8000, 8000~10000, 10000~12000, 12000~14000, 14000~16000, 16000~18000, >18000
距断层距离/m	<500, 500~1000, 1000~1500, 1500~2000, 2000~2500, 2500~3000, >3000
距河流距离/m	<1000, 1000~2000, 2000~3000, 3000~4000, 4000~5000, 5000~6000, 6000~7000, 7000~8000, >8000
地层岩性	T(三叠系), P(二叠系), D(泥盆系), S(志留系), Z(震旦系), Pt(前震旦系), γ(元古界)
坡度/°	<10, 10~20, 20~30, 30~40, 40~50, 50~60, 60~70, >70

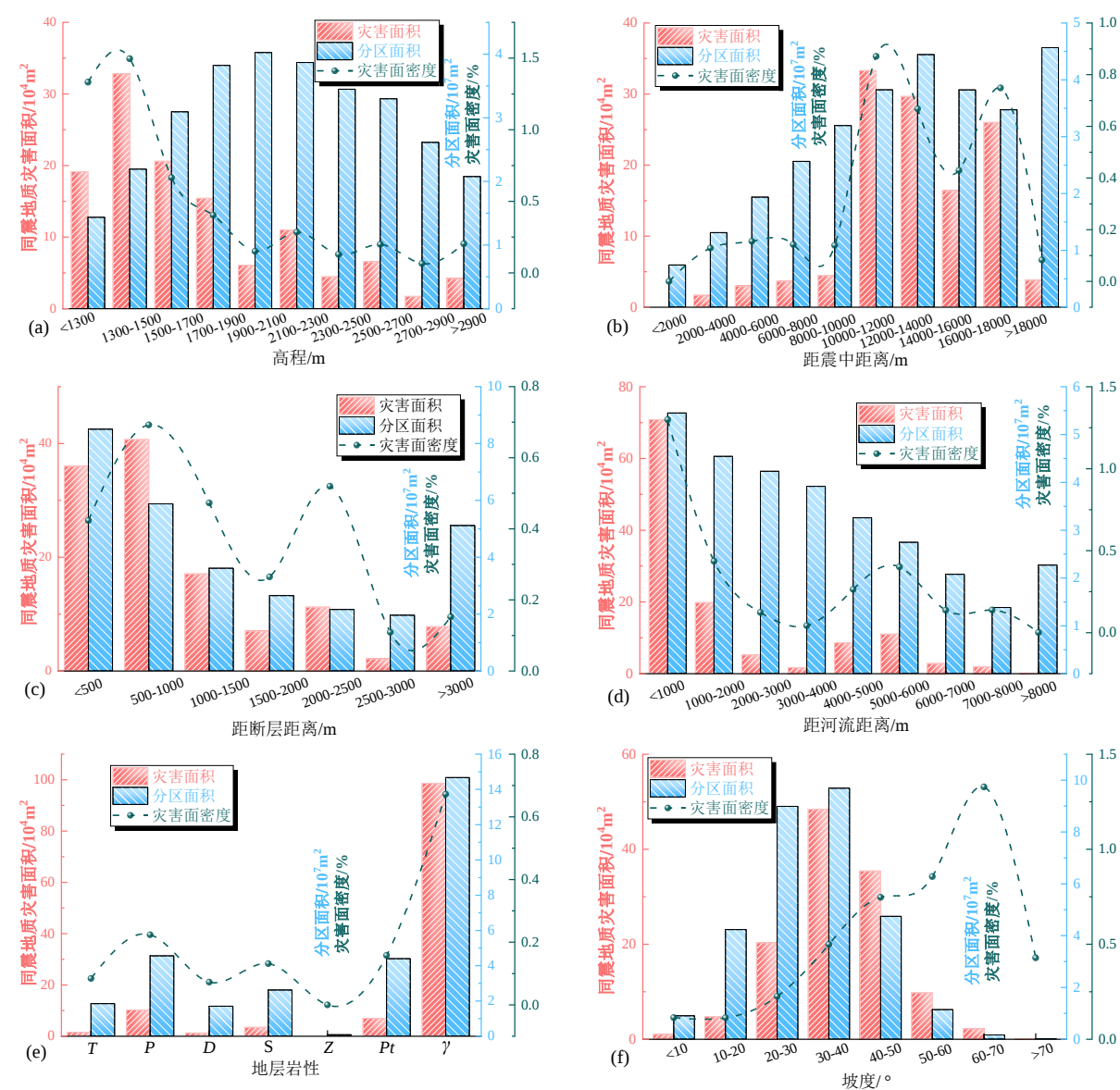


图 8 同震地质灾害统计图, (a) 高程, (b) 震中距离, (c) 断层距离, (d) 水系距离, (e) 地层岩性, (f) 坡度
Fig. 8 Statistical map of coseismic geological hazards, (a) elevation, (b) Epicentral distance, (c) Fault distance, (d) Drainage distance, (e) Stratigraphic lithology, (f) slope

2.2.2 距震中距离

此次地震震中位于研究区右下角, 故震中分区面积随距震中距离呈现递增趋势, 如错误!未找到引用源。(b)和错误!未找到引用源。(b), 分区面积多集中于距离震中 $1 \times 10^4 \text{m} \sim 1.8 \times 10^4 \text{m}$ 内, 其同震地质灾害也集中发育于此。同震地质灾害面积总计 $1.05 \times 10^6 \text{m}^2$, 占比总灾害面积的 86.41%, 可见同震地质灾害在此区间内

的发育的集中程度。这与 2013 年该区域 Ms7.0 地震及以往同类震害分布规律截然不同，即与集中发育于震中附近，随震中距离增大而同震地质灾害面积减小的规律相悖（李永威等，2023）。

2.2.3 距断层距离

除了震中断裂，该区还存在总体走向为北东-南西，并向北西倾斜的多条断裂带，分布于河谷两侧坡中部位。从**错误!未找到引用源。**(c)可见，地震引发的震害与现存断裂带之间存在显著相关性，即分区面积和灾害面积均随断层距离增加而逐渐减小。由**错误!未找到引用源。**(c)可知，同震地质灾害还较为集中的发育于断裂带附近，在距断层 0~1000m 范围内，分区面积占比 48.13%，发育了 62.89%的同震地质灾害。

2.2.4 距河流距离

区内为深切峡谷地貌，主要干流为东河，有多处冲沟于坡面汇入，呈条带状，国道 351 线沿干流两岸展布。如**错误!未找到引用源。**(d)和**错误!未找到引用源。**(d)可知，河流对研究区同震地质灾害的分布具有极为重要的控制作用，其发育程度随距河流距离增加而迅速减小。河流切割侵蚀形成的深切峡谷地貌不仅为同震地质灾害的发育提供了极大的势能条件，对坡岸的冲刷也创造了同震地质灾害从坡脚剪出的临空条件（吴昊等，2021；王运生等，2022）。距河流距离在 0~1000 m 范围内，同震地质灾害面积就已经达到总灾害面积的 58.07%，而该区面积仅为研究区总面积的 18.24%。

2.2.5 地层岩性

对照**错误!未找到引用源。**(e)，将研究区地层进行整合划分为 7 个地层岩性单元。通过空间统计分析发现(**错误!未找到引用源。**(e))，研究区以 γ (元古界)地层为主，面积为 $1.4 \times 10^8 \text{ m}^2$ ，占总面积的 49.09%，其中同震地质灾害也主要发育于这套地层之中，面积为 $1.5 \times 10^5 \text{ m}^2$ ，占比 80.82%，在该套地层中，岩性以闪长岩、花岗岩等硬质岩为主。其余少量同震地质灾害发育于 P(二叠系)、Pt(前震旦系)和 S(志留系)等地层中。可以看出，在地震作用下，硬质岩更易发生失稳，其原因为硬质岩浅表层中的结构面经风化作用后，在地震荷载作用下极易达到临界破坏状态。

2.2.6 坡度

由**错误!未找到引用源。**(f)和**错误!未找到引用源。**(f)，研究区坡度基本符合正态分布，以灾害面密度曲线来看，同震地质灾害发育密度随坡度的增加而增加。其中， $30^\circ \sim 50^\circ$ 区域面积占研究区总面积的 48.31%，发育了 68.72%的同震地质灾害。上述也说明研究区地形最低和最高处分别以深切狭长沟谷和陡峭绝壁为主，而中间过渡部分则为过渡相对均匀的斜坡地带。宽谷与峡谷过渡段在地形上形成的陡缓变坡点即坡折带，是地质灾害的易发区（程强和郑同健，2014）。

3 新华村高位滑坡演化特征及成灾运动过程分析

3.1 历史演化特征

新华村隧道出口原为下陡上缓的折线型斜坡，斜坡下部为高度近 40m 的花岗岩陡坡，坡度约 55° ，岩体破碎；上部为近 40° 斜坡，坡表为崩坡积块碎石层覆盖，厚度 5~8m。该处斜坡受降雨、冻融、地震等作用影响，近年来持续发生变形垮塌，包括 2013 地震、2016 降雪，主要表现为斜坡上部崩坡积层及强风化卸荷松动岩体产生浅层滑移破坏，堆积物以碎石为主，但总体方量不大。

如**错误!未找到引用源。**a 所示，2013 年芦山地震后 S210 省道新华村段斜坡曾发生滑动，滑坡后壁高于路面约 50m，方量约 1500 m^3 。芦山地震后，由于新华村段地质灾害强烈发育，选择新建新华村隧道绕避地质灾害群，设计隧道长 791m，其中正洞长 735m，出口接明洞长 56m。自 2013 年起，滑坡后壁已从高于路面 50m 持续向上渐进扩展，形成渐进后退式高位浅层滑坡。2016 年 1 月 21 日，宝兴县普降暴雪，降雪量达到 19.3mm。受冻融作用、积雪加载等因素影响，隧道洞口上方斜坡于 1 月 22 日出现局部变形滑塌现象，随后滑塌范围逐渐向上方扩展，2 月 27 日晚 10 点左右，斜坡上方出现大面积滑移失稳，从**错误!未找到引用源。**c 可见，滑坡主轴线长度约 180m，高 130m，堆积体平均厚度约 5m，滑坡规模约 23000 m^3 。滑坡堆积体掩埋原省道 S210 路基约 90m，以及在建的新华村隧道洞口。受余震及降雨影响，隧道出口段斜坡在 2016~2017 年施工期间发生多次滑塌变形，规模逐步扩大，此后在坡口滑塌段通过加长明洞等措施进行防护（**错误!未找到引用源。**d）。如**错误!未找到引用源。**所示，2022 年 6 月 1 日受芦山地震和持续近一个月的降雨影响，原滑坡上方发生大规模高位山体滑坡，堆积物堵塞东河并掩埋坡脚公路和隧道

出口。

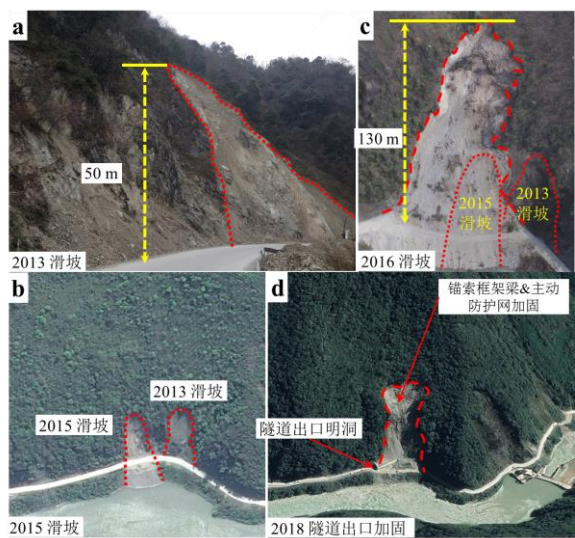


图 9 滑坡的多期遥感影像数据

Fig. 9 Multi period remote sensing image of the landslide



图 10 滑坡历史演化过程与堵江情况

Fig. 10 The evolution process of the landslide and the situation of river blockage

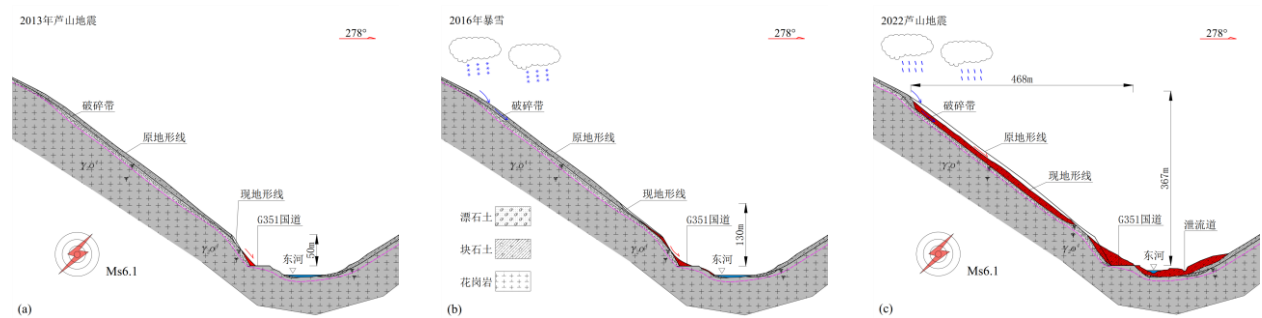


图 11 地震和降雨联合作用下边坡的损伤演化模式

Fig. 11 Damage evolution model of slope under combined action of earthquake and rainfall

如错误!未找到引用源。所示，通过对历史演化过程分析，可以得出开挖边坡受地震和降雨影响的破坏模式为堆积层向上不断扩展的后退式滑动。由错误!未找到引用源。(a)可知，地震运动引起的滑动首先出现在开挖区域，边坡内可能出现裂缝。滑动面基本沿堆积层与基岩界面。在随后的降雨过程中，震动引起的裂缝为雨水流入斜坡内部提供了一个优先的渗漏路径。土壤含水量的增加导致了强度的下降。由于在振动过程中由于滑动导致的前缘缺乏支撑，滑动体向上发展到坡顶。滑动面也沿岩土界面不断向上发展，连接到坡面上的拉伸裂缝，如错误!未找到引用源。(c)所示。

研究区从 2022 年 5 月 6 日开始了持续性的降雨，截止 6 月 5 日降雨量已累计达到 330mm。持续降雨叠加芦山地震的影响，新华村隧道出口上部坡体发生高位大范围失稳，形成大型崩滑体，掩埋隧道洞口明洞及洞外部分路基，堵塞东河河道，宝兴电站坝体上游约 280m 形成壅塞体（错误!未找到引用源。a,b）。并致使河水面上涨约 5m；隧道洞内结构出现垮塌，垮塌位置距离洞口约 65m，靠近垮塌位置衬砌拱部出现多条纵向裂缝，如错误!未找到引用源。d 所示。滑坡高差达到 356m，总体呈现后缘滑体厚度小、中部滑体厚度大、前缘基岩陡坎段滑体厚度变化大的特点，滑坡体总体积约 76 万方，堆积于隧道出口及东河河床内，路基标高以下以及壅塞于河道内的方量约 20 万方，路基标高以上的残留滑坡体方量约 56 万方。壅塞体整体处于宝兴电站的库内，顺河向长 160 m，宽 90 m，坝高 18 m，壅塞回水长度 250 m，壅水高度 16 m，壅塞体上游水位 1358.6 m。



图 12 高位滑坡震损图

Fig. 12 Seismic damage map of high landslide

3.2 成灾运动过程分析

针对地震触发滑坡失稳后的破坏运动、堵江全过程，通过高精度无人机调查结果建立三维物质点模型，基于两相MPM模拟结果分析了新华村隧道滑坡失稳破坏特征。根据地质调查信息，将MPM模型划分为滑体、滑带、强风化花岗岩、完整花岗岩和东河水体五个分组，共计生成质点2054603个，其中滑体质点1428203个；水体质点626400个，如错误!未找到引用源。错误!未找到引用源。错误!未找到引用源。错误!未找到引用源。错误!未找到引用源。错误!未找到引用源。(a)所示；采用结构化背景网格，节点数共计2721400个。基于丰富的工程实践经验并参考《工程地质手册》（第五版）中不同风化程度花岗岩力学性质指标，结合前人对花岗岩试样数值模拟取值（周赞等，2024），得到各分组岩土体变形、强度参数见错误!未找到引用源。，相应流体及流固耦合计算参数列于错误!未找到引用源。。

表 2 滑坡岩土物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of landslide rock and soil					
分组	密度/ kg/m ³	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ °	杨氏模量/ MPa	泊松比
滑体	2300	100	26	300	0.33
滑带	2200	39	7	120	0.38
强风化花岗岩	3000	1200	41	6000	0.28
花岗岩	3070	6700	50	30000	0.2

表 3 滑坡堵江流固耦合分析参数

Table 3 Fluid-solid coupling analysis parameters of landslide river blocking		
材料	参数	值
滑体	渗透系数/ cm/s	1.98
	初始孔隙比	0.2
	流体初始深度/ m	140.0
水体	密度/ kg/m ³	1000.0
	γ	7.0
	η	0.01

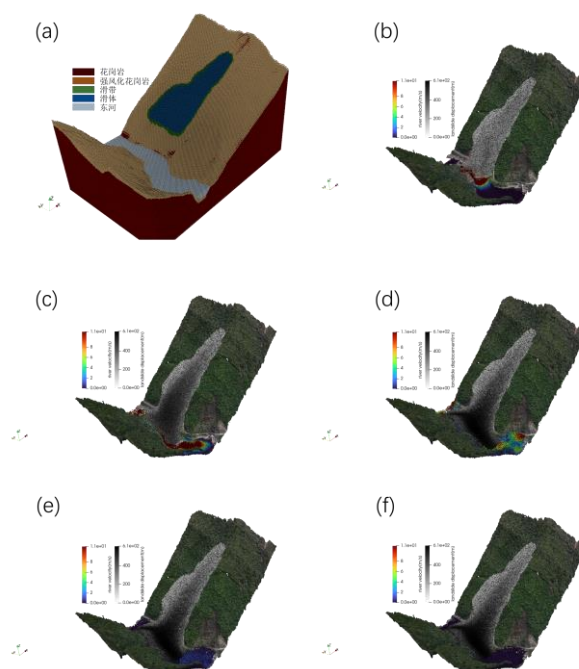


图 13 新华村滑坡成灾运动过程

Fig. 13 Xinhua Village landslide disaster movement process

图13给出了数值计算再现的新华村滑坡堵塞东河全过程。滑坡启动后，滑体沿着历史滑床迅速向下运移，在8s左右进入东河（错误!未找到引用源。b），滑体前缘速度接近42 m/s；滑体入水后，在对岸山体的阻挡作用下，运动速度急剧降低，13s左右开始在河谷堆积（错误!未找到引用源。c）；在滑坡巨大的动能冲击下，在沿河流断面方向以水体破碎为主，沿河流走向方向在滑体的挤压作用下，水位急剧抬升，一部分水体向滑体内渗透，但大部分以涌浪的方式向上下游传播（错误!未找到引用源。d），涌浪高度达到近8 m；最终滑体通过冲击的方式完全挤出水体，切断东河形成堰塞坝（错误!未找到引用源。f）。模拟得到的滑坡体最大运动距离约609m，滑坡在东河内的堆积形态与现场实际情况基本吻合。

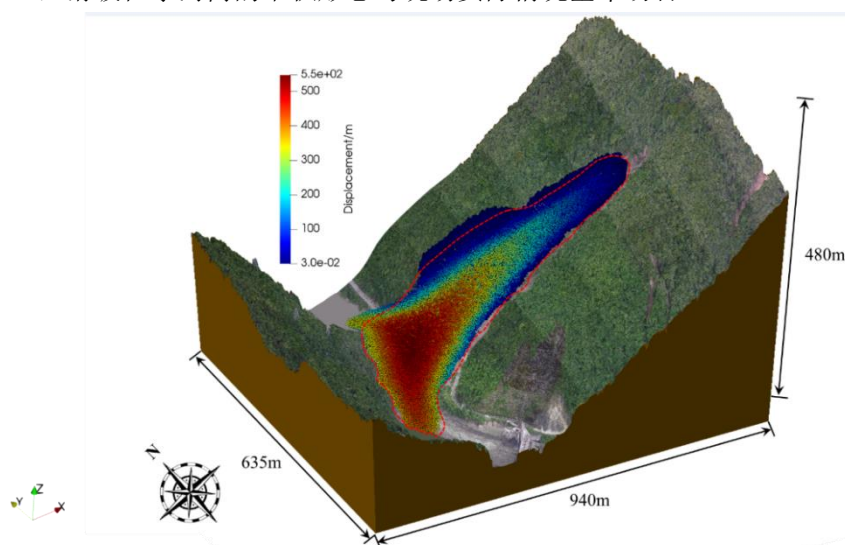


图 14 新华村滑坡最终堆积情况对比

Fig. 14 The compare of the deposit situation Xinhua Village landslide

滑坡失稳运动持续了约80 s，计算得到的滑坡最终堆积形态如错误!未找到引用源。所示，通过与现场勘察滑坡范围（图14中红色虚线）以及无人机获取的实景三维模型进行对比，计算得到的滑坡堆积边界与实际堆积情况相符。

新华村滑坡堵塞东河是一个典型的峡谷区滑坡灾害链，在MPM计算过程中，质量、速度和能量等物理信息均是由质点携带，方便我们实时计算并输出质点的能量信息和系统的能量演化，滑坡体和水体各种形式的能量，包括滑坡体的动能、水体的动能和势能，以及在运动过程中系统耗散的能量，均假设来自滑坡体

初始动能加上重力对滑坡体所做的功。两相质点的能量计算包括质点动能：

$$K_t^\alpha = \frac{1}{2} m^\alpha (v_t^\alpha)^2$$

其中 K_t^α 代表质点动能， m^α 代表质点质量， v_t^α 代表质点速度。

质点势能：

$$P_t^\alpha = m^\alpha g (h_t - h_0)$$

其中 P_t^α 代表质点势能， g 代表重力加速度， h_t 代表当前质点高程， h_0 代表初始质点高程。

滑坡体与水体之间的能量传递决定了次生涌浪灾害的规模，滑坡与河流之间的能量转换效率是评估滑坡诱发涌浪灾害链风险评估中的一个关键指标。定义滑坡诱发涌浪过程中的能量转换比为水体能量与滑坡机械能损失之比：

$$T_t^{s-w} = \frac{P_t^w + K_t^w}{K_0^s + P_t^s - K_t^s}$$

其中 T_t^{s-w} 为能量转换比， P_t^w 为水体势能， K_t^w 为水体动能， K_0^s 为滑坡初始动能， P_t^s 为滑动体所做的重力功， K_t^s 为滑坡的动能。

演进过程中东河水体能量演化曲线如错误!未找到引用源。15 所示，滑坡体到水体的能量传递效率仅为 5%左右，峡谷区河流涌浪消散后水体最终的能量形式以堰塞湖势能为主，次生灾害风险高。

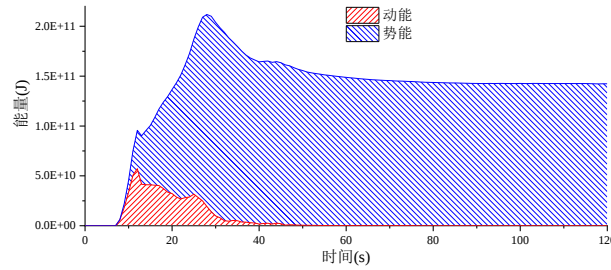


图 15 堵江过程中东河水体能量演化

Fig. 15 Energy evolution of Donghe River during the process of river-blocking

4 讨 论

2022 年芦山 Ms6.1 地震诱发同震地质灾害分布规律主要受地形坡度、河流切割和断裂分布控制，与距震中相关性不强，表明虽然地震是地质灾害的触发因素，但河谷地貌对灾害分布有很大的控制作用。特别是本次地震诱发灾害中规模最大的新华村高位滑坡，也处于三面临空的突出地形、坡折微地貌处地震波放大效应叠加背坡效应，导致该处地震波放大效应极其显著。对比 2013 年芦山 Ms7.0 地震诱发同震地质灾害分布规律，2013 年地震造成铜头至朱砂溪砾岩峡谷段和上坝至宝兴段灰岩、岩浆岩峡谷段，同震地质灾害点连续、密集分布，都表明硬质岩高陡斜坡段是同震灾害高发区。此外，随着 AI 技术的快速发展，在掌握同震地质灾害分布规律和大量历史数据的基础上，可以采用基于数据驱动的机器学习模型建立近实时同震地质灾害评估模型，为震后快速获取崩塌滑坡的分布范围和精准开展应急救援提供支撑(窦杰等，2023；郭飞等，2024)。

新华村高位滑坡典型灾害的演化经历了近十年间两次主震的叠加影响以及降雨、融雪等不利环境因素作用，也表明强震是一个瞬时事件，但震后效应是一个长期的、渐进的演化过程。强震作用后山体表面和内部产生损伤，表现为堆积体斜坡拉张裂缝形成和岩质边坡裂隙张开扩展，为雨雪入渗提供了优势通道，在多期次内外动力共同作用下，坡体产生渐进性累计损伤，潜在变形破裂范围不断扩大，最终产生失稳破坏。新华村高位滑坡失稳时间滞后地震发生约 4 小时，也表明高陡堆积体边坡失稳是地震力和重力联合作用结果，边坡在动力作用下产生破裂，但滑面完全形成贯通需要在重力作用下经历一定时间的损伤演化过程。

现场调研表明，地震频发区的高位崩滑灾害具有隐蔽性强、致灾能级高、震后影响时间长等特点，极易造成干线公路基础设施严重损坏。针对地震频发区干线公路高位崩滑灾害场景推演，目前主要存在震后特征参数识别难、成灾过程模拟难等问题。在震后特征参数调查方面，传统的人工现场调查不仅效率低、调查范围有限，而且面临着崩塌落石和余震的风险，基于无人机遥感的非接触测量成为震后高位崩滑体识别的

新兴技术(崔激等, 2023)。在成灾过程模拟方面,常用的连续介质分析方法难以合理描述高位崩滑灾害呈现的破碎解体、远距离运动特征,亟需引入非连续、大变形理论,选择针对性的三维数值方法进行灾情推演,包括同震反演和震后长期效应正演,为灾害影响区内承灾体易损性评价、抢险救灾提供基础(周赞等, 2024; 卢彦丞等, 2024)。地震频发区工程建设应充分考虑强震叠加作用,尽量绕避大型地质灾害,无法绕避时应采用主动和被动相结合的方式综合处治,并充分考虑灾害发展演化规律,提升基础设施安全韧性和防灾抗灾能力。

5 结 论

本文以芦山地震作用下国道 351 线宝兴段地质灾害为研究对象,通过现场调查、遥感解译、GIS 空间分析等多种分析方法,研究了 2022 年芦山 Ms6.1 地震同震地质灾害发育规律和 2013 年芦山 Ms7.0 地震以来典型灾害的演化特征,采用三维两相 MPM 分析了新华村高位滑坡的成灾运动过程,取得主要结论如下:

(1) 研究区总面积 $2.99 \times 10^8 \text{ m}^2$, 2022 年同震地质灾害总共 215 处,灾害总面积 $1.22 \times 10^6 \text{ m}^2$, 占研究区面积 0.41%; 除新华村高位滑坡外,其余多以中小型崩滑灾害为主;灾害主要分布于东河河谷两侧岸坡 1500m 高程范围内, $30^\circ \sim 50^\circ$ 的斜坡上,与 2013 年同震地质灾害共同的分布特征是硬质岩高陡斜坡段是灾害高发区。

(2) 2022 年同震地质灾害发育分布主要受地貌、河流和断层因素控制为主,与震中位置相关性不强;对公路影响较大的灾害点,主要发育在多面临空的突出山体部位和断裂带附近,且受多期地震叠加和历史降雨作用影响显著。

(3) 新华村高位滑坡受多期次降雨、冻融、地震等作用影响,近十年来表现为不断向上扩展的渐近后退式变形,滑坡高度扩大了 7 倍,最终在 2022 年强震作用下整体大范围失稳并壅塞河道,滑动方量达 76 万方。三维两相 MPM 模拟成灾过程显示,滑坡体最大运动距离约 609m,涌浪高度最高 8 m,模拟滑坡运动后堆积形态与现场实际基本吻合。

References

- Cai, Y., Wu, J.P., Fang, L.H., et al., 2023. The 2022 Lushan Ms6.1 Earthquake: A Moderately Strong Earthquake on a Blind Back Thrust Fault. *Acta Seismologica Sinica*, 45(5): 823-835(in Chinese with English abstract).
- Chen, H.L., Wang, Q.C., Zhang, J.C., et al., 2023. Discussion on Seismogenic Structure of the June 2022 Ms6.1 Earthquake and Its Relationship with the April 2013 Ms7.0 Earthquake in Lushan, Sichuan Province. *Seismology and Geology*, 45(5): 1233-1246(in Chinese).
- Cheng, Q., Zhen, T.J., 2014. Investigation and Evaluation of Geological Disasters Caused by Lushan Earthquake along the Highway. *Journal of Catastrophology*, 29(1): 131-135(in Chinese).
- Cui, W., Gao, D.Y., Wang, X.H., et al., 2023. Identification of Rocky Ledge on Steep and High Slopes Based on Aerial Photogrammetry. *Earth Science*, 48(9): 3378-3388(in Chinese with English abstract).
- Dai, L.X., Xu, Q., Fan, X.M., et al., 2017. A Preliminary Study on Spatial Distribution Patterns of Landslides Triggered by Jiuzhaigou Earthquake in Sichuan on August 8th, 2017 and Their Susceptibility Assessment. *Journal of Engineering Geology*, 5(4): 1151-1164(in Chinese with English abstract).
- Dou, J., Xiang, Z.L., Xu, Q., et al., 2023. Application and Development Trend of Machine Learning in Landslide Intelligent Disaster Prevention and Mitigation. *Earth Science*, 48(5): 1657-1674(in Chinese with English abstract).
- Du, J., Yin, K.L., Wang, J.J., 2015. Simulation of Three-Dimensional Movement of Landslide-Debris Flow Based on Finite Volume Method. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 34(3): 480-488(in Chinese with English abstract).
- Du, W.J., Sheng, Q., Yang, X.H., et al., 2022. Chain Generation Process of Landslide Blocking River Based on Two-Phase Double-Point Material Point Method. *Advanced Engineering Sciences*, 54(3): 36-45(in Chinese with English abstract).
- Fan, X.M., Fang, C.Y., Dai, L.X., et al., 2022. Near Real Time Prediction of Spatial Distribution Probability of Earthquake-Induced Landslides-Take the Lushan Earthquake on June 1, 2022 as an Example. *Journal of Engineering Geology*, 30(3): 729-739(in Chinese with English abstract).
- Guo, F., Lai, P., Huang, F.M., et al., 2024. Literature Review and Research Progress of Landslide Susceptibility

- Mapping Based on Knowledge Graph. *Earth Science*, 49(5): 1584-1606(in Chinese with English abstract).
- Hu, M., Xie, M.W., Wang, L.W., 2015.SPH Simulations of Post-Failure Flow of Landslides Using Elastic-Plastic Soil Constitutive Model. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 38(1): 58-67(in Chinese with English abstract).
- Huang, R.Q., Wang, Y.S., Pei, X.J., et al., 2013.Characteristics of Co-Seismic Landslides Triggered by the Lushan Ms7.0 Earthquake on the 20th of April, Sichuan Province, China. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 48(4): 581-589(in Chinese with English abstract).
- Li, J.P., Wu, Z.B., Su, J.R., et al., 2024.Study of Focal Mechanism and Aftershocks of the Ms6.1 Earthquake in Lushan on June 1th, 2022. *Progress in Geophysics*, 39(4): 1315-1329(in Chinese with English abstract).
- Li, Y.W., Xu, L.R., Zhang, L.L., et al., 2023.Study on Development Patterns and Susceptibility Evaluation of Coseismic Landslides within Mountainous Regions Influenced by Strong Earthquakes. *Earth Science*, 48(5): 1960-1976(in Chinese with English abstract).
- Liu, X., Wang Y., Li, D.Q., 2020.Numerical Simulation of the 1995 Rainfall-Induced Fei Tsui Road Landslide in Hong Kong: New Insights from Hydro-Mechanically Coupled Material Point Method. *Landslides*, 17: 2755-2775. doi:10.1007/s10346-020-01442-2
- Lu, Y.C., Li, J., Liang, F., et al., 2024.Failure Probability Simulation of Passive Protection Net for Collapses and Rockfalls in Typical Karst Area. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 43(3): 240-250(in Chinese).
- Luo, Y.H., Wang, Y.S., 2013.Mountain Slope Ground Motion Topography Amplification Effect Induced by Wenchuan Earthquake. *Mountain Research*, 31(2): 200-210(in Chinese with English abstract).
- Ouyang, C.J., He, S.M., Xu, Q., et al., 2013.A Maccormack-TVD Finite Difference Method to Simulate the Mass Flow in Mountainous Terrain with Variable Computational Domain. *Computers & geosciences*, 52(3): 1-10. doi:10.1016/j.cageo.2012.08.024
- Pan, Y., Fan, Y.Q., Ren, Y., et al., 2023.Typical Seismic Damage Investigation and Analysis in Mountain Area after Ms6.1 Lushan Earthquake. *China Civil Engineering Journal*, 56(12): 35-48(in Chinese with English abstract).
- Pei, X.J., Huang, R.Q., 2013.Analysis of Characteristics of Geological Hazards by “4 • 20” Lushan Earthquake in Sichuan, China. *Journal of Chengdu University of Technology(Science & Technology Edition)*, 40(3): 257-263(in Chinese).
- Shi, B.T., Zhang, Y., Zhang, W., 2019.Run-Out of the 2015 Shenzhen Landslide Using the Material Point Method with the Softening Model. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78: 1225–1236. doi:10.1007/s10064-017-1167-4
- Song, J.Y., Liu, Y., Dong, X.J., et al., 2025.Spatial Distribution of Earthquake-Induced Landslide in Densely Populated Area of the Luding 9 • 5 Earthquake. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 44(): 1-13(in Chinese with English abstract).
- Sun, Y.J., Song, E.R., 2015.Simulation of Large-Displacement Landslide by Material Point Method. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 37(7): 1218-1225(in Chinese with English abstract).
- Wang, Y.S., Cheng, W.Q., Liu, J.W., 2022.Forming Process and Mechanisms of Geo-Hazards in Luding Section of the Sichuan-Tibet Railway. *Earth Science*, 47(3): 950-958(in Chinese with English abstract).
- Wu, H., Pei, X.J., Cui, S.H., et al., 2021.Study of Topographic and Geological Controls on Landslide Development and Distribution within Mountainous Regions Influenced by Strong Earthquakes. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 40(5): 972-986(in Chinese with English abstract).
- Xiao, Y., Shan, B., Liu, C.L., et al., 2024.Stress Triggering and Seismic Hazard Assessment of the 2022 Lushan Ms6.1 Earthquake. *Earth Science*, 49(8): 2979-2991(in Chinese with English abstract).
- Xu, C., Xu, X.W., Zhen, W.J., et al., 2013.Landslides Triggered by the April 20, 2013 Lushan, Sichuan Province Ms7.0 Strong Earthquake of China. *Seismology And Geology*, 35(3): 641-660(in Chinese).
- Xu, X.R., Jin, F., Sun, Q.C., et al., 2019.Three-Dimensional Material Point Method Modeling of Runout Behavior of the Hongshiyuan Landslide. *Canadian Geotechnical Journal*, 56: 1318-1337. doi:10.1139/cgj-2017-0638
- Yang, C.W., Zhang, J.J., 2013.Analysis of Landslide Responses of a Typical High Hill-River Valley Field Near National Road G213 during Wenchuan Earthquake. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 32(7): 1467-1475(in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z.W., Long, F., Zhao, X.Y., et al., 2022.Study on Focal Mechanism Solution and Stress Field Characteristics in Sichuan and Yunnan Area. *Seismology and Geology*, 44(1): 170-187(in Chinese).

Zhou, Z., Luo, Y.H., Nan, K., et al., 2024. Discrete Element Simulation of Dynamic Response and Instability Process of the Xinhua Village Landslide in Baoxing County under “6.1” Lushan Earthquake. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 43(2): 226-237(in Chinese).

中文参考文献

- 蔡妍, 吴建平, 房立华, 等, 2023. 2022 年芦山 Ms6.1 地震: 发生在隐伏反冲断层上的一次中强地震. *地震学报*, 45(5): 823-835.
- 陈翰林, 王勤彩, 张金川, 等, 2023. 四川芦山 2022 年 6 月 Ms6.1 地震的发震构造及其与 2013 年 4 月 Ms7.0 地震关系的探讨. *地震地质*, 45(5): 1233-1246.
- 程强, 郑同健, 2014. 芦山地震公路地质灾害调查及评估. *灾害学*, 29(1): 131-135.
- 崔澈, 高德宇, 王轩毫, 等, 2023. 基于航空影像的高陡边坡岩体识别方法. *地球科学*, 48(9): 3378-3388.
- 戴岚欣, 许强, 范宣梅, 等, 2017. 2017 年 8 月 8 日四川九寨沟地震诱发地质灾害空间分布规律及易发性评价初步研究. *工程地质学报*, 5(4): 1151-1164.
- 窦杰, 向子林, 许强, 等, 2023. 机器学习在滑坡智能防灾减灾中的应用与发展趋势. *地球科学*, 48(5): 1657-1674.
- 杜娟, 殷坤龙, 王佳佳, 2015. 基于有限体积法的滑坡-碎屑流三维运动过程模拟分析. *岩石力学与工程学报*, 34(3): 480-488.
- 杜文杰, 盛谦, 杨兴洪, 等, 2022. 基于两相双质点 MPM 的滑坡堵江灾害链生全过程分析. *工程科学与技术*, 54(3): 36-45.
- 范宣梅, 方成勇, 戴岚欣, 等, 2022. 地震诱发滑坡空间分布概率近实时预测研究——以 2022 年 6 月 1 日四川芦山地震为例. *工程地质学报*, 30(3): 729-739.
- 郭飞, 赖鹏, 黄发明, 等, 2024. 基于知识图谱的滑坡易发性评价文献综述及研究进展. *地球科学*, 49(5): 1584-1606.
- 胡嫚, 谢谟文, 王立伟, 2016. 基于弹塑性土体本构模型的滑坡运动过程 SPH 模拟. *岩土工程学报*, 38(1): 58-67.
- 黄润秋, 王运生, 裴向军, 等, 2013. 4·20 芦山 Ms7.0 级地震地质灾害特征. *西南交通大学学报*, 48(4): 581-589.
- 李军鹏, 武振波, 苏金蓉, 等, 2024. 2022 年 6 月 1 日芦山 Ms6.1 主震震源机制及余震研究. *地球物理学进展*, 39(4): 1315-1329.
- 李永威, 徐林荣, 张亮亮, 等, 2023. 强震山区地震诱发滑坡发育规律与易发性评估. *地球科学*, 48(5): 1960-1976.
- 卢彦丞, 李军, 梁风, 等, 2024. 岩溶典型区崩塌落石被动防护网失效概率模拟. *地质科技通报*, 43(3): 240-250.
- 罗永红, 王运生, 2013. 汶川地震诱发山地斜坡震动的地形放大效应. *山地学报*, 31(2): 200-210.
- 潘毅, 范元青, 任宇, 等, 2023. 芦山 6.1 级地震山区典型震害调查与分析. *土木工程学报*, 56(12): 35-48.
- 裴向军, 黄润秋, 2013. “4·20” 芦山地震地质灾害特征分析. *成都理工大学学报: 自然科学版*, 40(3): 257-263.
- 宋静园, 刘洋, 董秀军, 等, 2025. “9·5” 泸定地震人口密集区域地震诱发滑坡空间分布规律. *地质科技通报*, 44(1): 1-13.
- 孙玉进, 宋二祥, 2015. 大位移滑坡形态的物质点法模拟. *岩土工程学报*, 37(7): 1218-1225.
- 王运生, 程万强, 刘江伟, 2022. 川藏铁路廊道泸定段地质灾害孕育过程及成灾机制. *地球科学*, 47(3): 950-958.
- 吴昊, 裴向军, 崔圣华, 等, 2021. 强震山区滑坡发育分布的地形地质控制作用研究. *岩石力学与工程学报*, 40(5): 972-986.
- 肖阳, 单斌, 刘成利, 等, 2024. 2022 年芦山 Ms6.1 地震应力触发及地震危险性分析. *地球科学*, 49(8): 2979-2991.
- 许冲, 徐锡伟, 郑文俊, 等, 2013. 2013 年四川省芦山 “4.20” 7.0 级强烈地震触发滑坡. *地震地质*, 35(3): 641-660.
- 杨长卫, 张建经, 2013. 汶川地震中国道 G213 左侧某典型高山河谷场地地震滑坡响应分析. *岩石力学与工程学报*, 32(7): 1467-1475.
- 张致伟, 龙锋, 赵小艳, 等, 2022. 川滇地区的震源机制解及应力场特征. *地震地质*, 44(1): 170-187.

周赞, 罗永红, 南凯, 等, 2024. “6.1”芦山地震作用下宝兴新华村滑坡动力响应与失稳过程离散元模拟.地质科技通报, 43(2): 226-237.