

陈 博,李振洪,黄武彪,等. 2022 年四川泸定 M_w 6.6 级地震诱发地质灾害空间分布及影响因素[J]. 地球科学与环境学报, 2022, 44(6): 971-985.

CHEN Bo, LI Zhen-hong, HUANG Wu-biao, et al. Spatial Distribution and Influencing Factors of Geohazards Induced by the 2022 M_w 6.6 Luding (Sichuan, China) Earthquake[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2022, 44(6): 971-985.

DOI: 10.19814/j.jese.2022.10012

• 纪念刘国昌先生诞辰 110 周年专辑 •

2022 年四川泸定 M_w 6.6 级地震诱发地质灾害 空间分布及影响因素

陈 博^{1,2}, 李振洪^{1,2,3,4*}, 黄武彪^{1,2}, 刘振江^{1,2}, 张成龙^{1,2}, 杜建涛^{1,2},
宋 闯^{1,2}, 丁明涛^{1,2,3}, 朱 武^{1,2,3,4}, 张双成^{1,2,3,4}, 王建伟^{5,6}, 彭建兵^{1,3,4}

(1. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054; 2. 长安大学 地学与卫星大数据研究中心, 陕西 西安 710054; 3. 长安大学 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710054; 4. 长安大学 自然资源部生态地质与灾害防控重点实验室, 陕西 西安 710054; 5. 长安大学 运输工程学院, 陕西 西安 710064; 6. 长安大学 道路基础设施数字化教育部工程研究中心, 陕西 西安 710064)

摘 要: 2022 年 9 月 5 日四川省泸定县发生 M_w 6.6 级地震, 诱发了大量的山体滑坡、崩塌等次生灾害, 造成了严重的人员伤亡与经济损失。快速获取灾区滑坡易发性和同震滑坡的空间分布对灾情评估尤为重要。首先, 联合震前高分辨率光学遥感影像解译和 GACOS 辅助下的 InSAR Stacking 技术探测灾区震前滑坡; 然后, 基于该滑坡数据利用机器学习算法获得震中附近滑坡的空间易发性图; 同时, 通过使用震前、震后的多源光学遥感影像建立了同震滑坡编目(2 692 处滑坡), 并采用空间统计法分析了此次地震诱发的滑坡与地形、地震和地质因素之间的关系。结果表明: 易发性图中, 中等及以上易发区的同震滑坡面积占滑坡总面积(47 km²)的 70.2%; 同震滑坡主要分布在高程 1 200~2 400 m、坡度 35°~50°、距震中 4~20 km、距断层 1 km 范围内和砂岩板岩性中, 并至少导致 10.34 km 道路受损。该研究可为灾区地质灾害排查和防治提供有力的数据支撑。

关键词: 泸定地震; 同震滑坡; 光学遥感; InSAR; 目视解译; 滑坡易发性; 空间分布; 影响因素

中图分类号: P23; P694

文献标志码: A

文章编号: 1672-6561(2022)06-0971-15

Spatial Distribution and Influencing Factors of Geohazards Induced by the 2022 M_w 6.6 Luding (Sichuan, China) Earthquake

CHEN Bo^{1,2}, LI Zhen-hong^{1,2,3,4*}, HUANG Wu-biao^{1,2}, LIU Zhen-jiang^{1,2},
ZHANG Cheng-long^{1,2}, DU Jian-tao^{1,2}, SONG Chuang^{1,2}, DING Ming-tao^{1,2,3},
ZHU Wu^{1,2,3,4}, ZHANG Shuang-cheng^{1,2,3,4}, WANG Jian-wei^{5,6}, PENG Jian-bing^{1,3,4}
(1. School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China;
2. Big Data Center for Geosciences and Satellites, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China;
3. Key Laboratory of Western China's Mineral Resources and Geological Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 4. Key Laboratory of Ecological Geology

收稿日期: 2022-10-10; 修回日期: 2022-10-30 投稿网址: <http://jese.chd.edu.cn/>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFC1512000); 陕西省科技创新团队项目(2021TD-51);

陕西省地学大数据与地质灾害防治创新团队项目(2022);

中央高校基本科研业务费专项资金项目(300102260301, 300102262902, 300102261108, 300203211261)

作者简介: 陈 博(1997-), 男, 甘肃白银人, 工学博士研究生, E-mail: b.chen@chd.edu.cn。

* 通讯作者: 李振洪(1975-), 男, 浙江永康人, 教授, 博士研究生导师, 哲学博士, E-mail: zhenhong.li@chd.edu.cn。

and Disaster Prevention of Ministry of Natural Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 5. College of Transportation Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 6. Engineering Research Center of Highway Infrastructure Digitalization of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: On 5 September 2022, an M_w 6.6 earthquake struck Luding county, Sichuan province, China, which triggered a large number of geohazards such as landslides and collapses, leading to serious casualties and economic losses. Rapid access to landslide susceptibility and the actual distribution maps of coseismic landslides are critical for disaster management. In this study, we combined optical remote sensing image interpretation with the Generic Atmospheric Correction Online Service (GACOS) assisted InSAR stacking technique to map pre-event landslides, and then used the detected landslide dataset to generate a landslide susceptibility map in the earthquake-affected area using a machine learning algorithm. In addition, we used multi-source optical remote sensing images to establish an inventory of 2 692 coseismic landslides and analyze its relationships with topography, seismic and geological factors. Our results showed that 70.2% of the total coseismic landslide area (47 km^2) were within the areas with moderate or higher susceptibility. These coseismic landslides were mainly distributed in elevations of 1 200–2 400 m, with slopes of 35° – 50° , 4–20 km from the epicenter, within 1 km of faults and with a lithology of sericites silt slate. The coseismic landslides also damaged at least 10.34 km of roads. It is believed that this research can provide data support for the assessment and prevention of geohazards in the earthquake-affected areas.

Key words: Luding earthquake; coseismic landslide; optical remote sensing; InSAR; visual interpretation; landslide susceptibility; spatial distribution; influencing factor

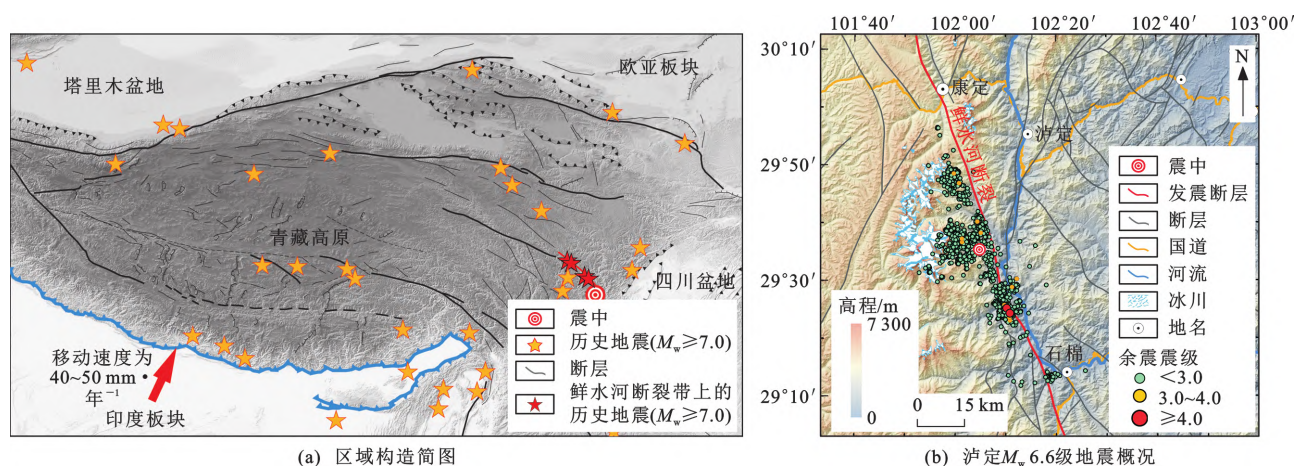
0 引言

据中国地震台网中心测定,北京时间 2022 年 9 月 5 日 12 时 52 分,四川省泸定县发生了 M_w 6.6 级地震,震源深度约为 16 km,震中位于四川省甘孜藏族自治州泸定县磨西镇,地理坐标为 (29.59°N , 102.08°E)。截至 2022 年 9 月 14 日,泸定 M_w 6.6 级地震共造成 93 人遇难,25 人失联,大范围道路受损,部分居民房屋被掩埋;截至 2022 年 9 月 9 日,共发生余震 1 675 次(图 1),其中 3.0 级及以上余震 15 次,4.0 级及以上余震 2 次^[1]。

强烈的地震往往会在山区引发大量山体滑坡等次生灾害,造成震区道路损毁、房屋掩埋、桥梁坍塌、河流堵塞等,直接影响震后应急救援,导致大量人员伤亡和严重经济损失^[2]。例如,2008 年四川汶川 M_w 7.9 级地震共诱发 197 481 处滑坡,面积高达 $1\,160 \text{ km}^2$,地震滑坡直接导致 25 000~30 000 人死亡,占汶川地震死亡人数的 $1/3$ ^[3-4];2010 年青海玉树 M_w 6.9 级地震诱发了 2 036 处滑坡,致 2 698 人死亡,270 人失踪,近 1.5 万间房屋受损^[5-7];2013 年四川芦山 M_w 6.7 级地震诱发 22 528 处滑坡,致 196

人遇难,21 人失踪^[8-11];2017 年四川九寨沟 M_w 6.5 级地震共诱发 1 883 处滑坡,面积达 8.11 km^2 ,造成 25 人死亡,525 人受伤,176 492 人受灾,73 671 间房屋受损^[12-14]。因此,地震诱发的滑坡等次生灾害链效应是震后防灾减灾主要关注的对象。同震地质灾害由于数量多,分布范围广,利用野外实地调查和航拍解译的方法,很难覆盖整个地震影响的范围^[15]。随着遥感技术的发展,高精度光学卫星影像广泛应用于震后地质灾害识别研究中,主要采用的方法为目视解译,该方法可准确为灾害救援提供精确详细的滑坡数据,已成功应用于汶川、玉树、芦山和九寨沟等多个地震^[2-5,8,12,14]。

泸定地震发生后,多名科研人员对此次地震进行了研究。如,铁永波等利用现场调查资料,结合震区地质灾害排查资料、遥感解译和区域地质构造背景资料,对此次地震地质灾害的特征、控灾条件及防灾减灾对策进行了分析和讨论^[16]。王欣等通过震后无人机和卫星遥感影像,采用机器学习算法和深度学习算法,对重灾区 312 km^2 范围内的震后地质灾害进行了智能识别^[17];范宣梅等在此基础上分析了地震诱发地质灾害的特征和空间分布规律^[18]。

图1 2022年四川泸定 M_w 6.6 级地震区域构造背景Fig. 1 Regional Tectonic Setting of the 2022 M_w 6.6 Luding (Sichuan) Earthquake

李为乐等通过归一化雪覆盖指数、像素偏移追踪、目视判译等方法,研究了此次地震对海螺沟冰川的影响^[19]。现有研究主要是在地震应急状态下开展的,以现场调查资料、重灾区无人机影像和有限的卫星遥感影像利用为主,而尚未利用多源遥感影像对此次地震的同震滑坡进行详细解译分析。

本文主要利用光学遥感解译与合成孔径雷达通用型大气改正在线服务(Generic Atmospheric Correction Online Service for InSAR, GACOS)辅助下的 InSAR Stacking 技术联合的方式对 2022 年四川泸定 M_w 6.6 级地震震前的滑坡进行广域探测,并基于探测到的震前滑坡数据,利用机器学习算法评估此次地震范围内滑坡的易发性空间分布;同时,利用人机交互的方式,通过对比地震前后的光学遥感影像,开展本次地震诱发滑坡的解译,建立同震滑坡编目;最后,对此次地震诱发滑坡的空间分布特征和影响因素进行分析,以期为震后灾区的地质灾害排查和防治提供数据支撑,亦为今后的地震应急响应提供技术积累。

1 研究区概况

2022 年泸定 M_w 6.6 级地震发生于鲜水河断裂带南东段的磨西断裂附近^[17-19]。鲜水河断裂带位于青藏高原东南缘,是川西地区著名的“Y”字形断裂带的重要组成部分(图 1),属于一条大型左旋走滑断裂带,全长约 350 km,走向整体呈 NW—SE 向,是控制高原物质向南东挤出的重要边界,也是中国陆内活动性最强的断裂带之一^[20-22]。自 1900 年以来,沿鲜水河断裂带已发生 4 次 M_w 7.0 级及以上大地震^[20],占青藏高原 M_w 7.0 级及以上地震数量的 10%(图 1)。活跃的构造活动使鲜水河断裂带一直

是国内外学者的研究热点,有多名学者发现鲜水河断裂带磨西断裂的库仑应力积累较高,一定程度上预知了此次地震的发生^[23-25]。

发生此次地震的四川省甘孜藏族自治州,地处中国最高一级阶梯青藏高原向第二级阶梯云贵高原和四川盆地的过渡带,主要以大陆性高原山地气候为主,属于典型的高山峡谷地貌,有四川最高山——贡嘎山,最高海拔达 7 566 m,发育着现代冰川 74 条,总面积达 255.1 km²,是中国重要的海洋型冰川作用区^[26]。区域内海拔高差大(最高达 6 000 m),水系发育,有大渡河和雅砻江及众多支流,导致河谷深切,岩体受到长期切割和风化后导致河流两岸发育有众多临空面,为地震诱发滑坡提供了地形、地质条件^[16]。该区域也是中国典型的地质灾害高易发区^[17-19]。

2 震区滑坡易发性评估

2.1 震前滑坡探测

多尺度多时相遥感影像解译方法具有大范围、非接触、低成本、高准确度等特点^[27-28]。利用不同时段的光学卫星影像光谱和纹理差异,结合地形地貌等标识可识别出研究区域内的历史变形破坏区。识别的主要标识有整体呈圈椅状的地貌特征(弧形或舌形),后壁可见滑坡壁,中部可见滑坡台坎、洼地,地表可见泉水等^[28]。

由于年平均形变速率可较为直观地反映变形特征,且考虑到研究区域地形起伏大,存在强对流天气,InSAR 干涉影像中大气影响严重,GACOS 辅助下的 InSAR Stacking 技术为较合理的方案^[28-33]。本文的 InSAR 处理均在 GAMMA 软件^[34]上进行,利用 AW3D30(ALOS Global Digital Surface Mod-

el, AW3D30) 数据削弱地形影响。为抑制噪声, Sentinel-1 影像在距离向和方位向采用 5:1 的多视因子, 设置时间基线为 60 d, 空间基线为 150 m, 生成干涉图, 通过自适应滤波和相位解缠处理获得解缠图, 之后引入 GACOS 大气改正产品^[35-37]削弱大气影响, 最终获取研究区域的雷达视线向 (Line of Sight, LOS) 年平均形变速率^[28]。

本文采用多时相光学卫星遥感影像解译与 GACOS 辅助下的 InSAR Stacking 技术联合的方式对泸定 M_w 6.6 级地震震前的滑坡进行广域探测。首先, 利用震前的高分二号、Google Earth 等多时相高精度光学卫星影像对研究区域内的历史变形破坏区进行识别。然后, 利用 GACOS 辅助下的 InSAR Stacking 技术对 2017 年 10 月到 2021 年 7 月的 Sentinel-1 升、降轨雷达影像进行处理, 获取雷达视线向年平均形变速率, 结果如图 2(a)、(b) 所示。其中, 年平均形变速率负值表示滑坡位移远离卫星方向; 正值表示滑坡位移靠近卫星方向。最后, 通过热点分析方法自动提取年平均形变速率中的有效形变区域^[28,38], 实现对震区斜坡变形区、复活历史变形破坏区和稳定历史变形破坏区的探测^[39]。最终探测震前滑坡共 217 处, 其中目视解译滑坡 154 处, InSAR 探测滑坡 72 处, 目视解译与 InSAR 均可探测滑坡 9 处[图 2(c)]。

2.2 震区滑坡易发性

地震发生后, 快速获取地震诱发滑坡的空间易发性图对灾后应急救援具有重要意义^[40]。本文基于第 2.1 节中探测的滑坡数据, 结合地质灾害成灾机理, 综合地形地貌、水文、地震、人类活动等因子, 利用机器学习算法, 获得了泸定 M_w 6.6 级地震诱发滑坡的空间易发性图。本次所使用的机器学习算法为支持向量机 (Support Vector Machine, SVM)^[41-42], 其已经成功应用于 2022 年青海门源 M_w 6.7 级地震的易发性图预测^[43]。支持向量机模型通过核函数将特征从低维空间映射到高维空间, 以寻找最优超平面对滑坡和非滑坡进行划分。该模型中所使用的样本为高程、坡度、坡向、曲率、平面曲率、剖面曲率、归一化植被指数 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)、地形湿度指数 (Topographic Wetness Index, TWI)、距断层距离、距道路距离、距河流距离、本次地震的地震峰值加速度 (Peak Ground Acceleration, PGA) 等 12 个因子组成的多通道数据。基于多通道数据进行支持向量机模型训练, 使用训练好的模型对研究区逐像元进

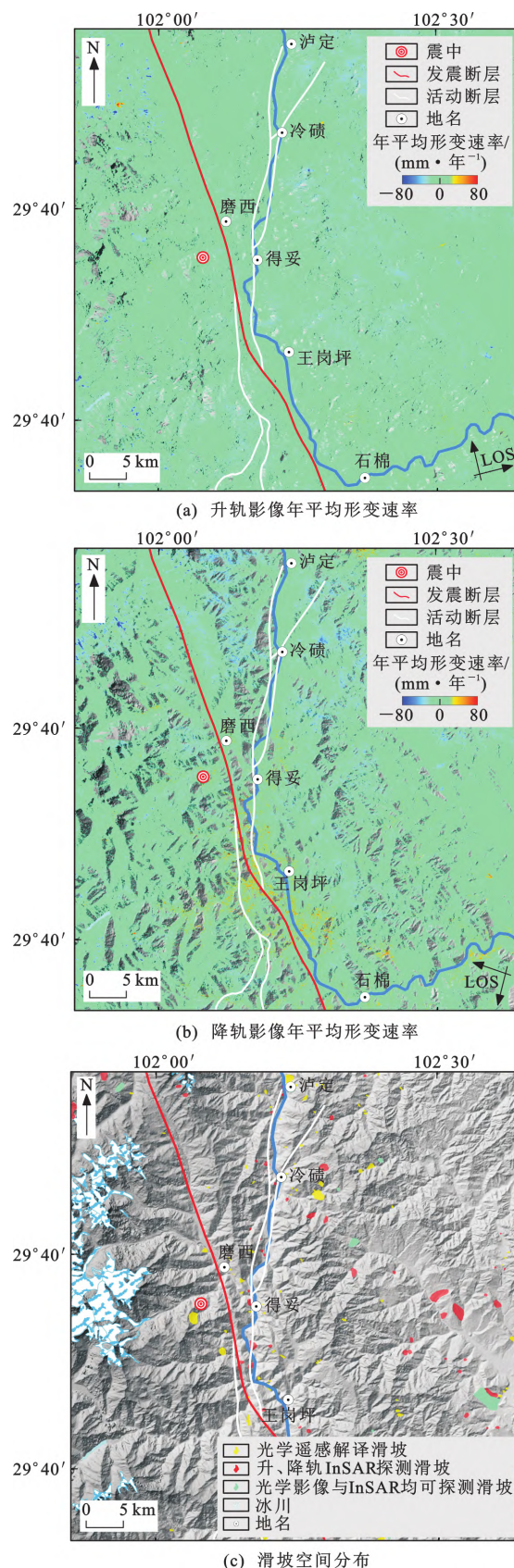


图 2 泸定 M_w 6.6 级地震震前滑坡分布
Fig. 2 Distributions of Landslide Before the M_w 6.6 Luding Earthquake

行预测,得到地震诱发滑坡的空间分布概率图。

将泸定 M_w 6.6 级地震诱发滑坡的空间分布概率图以自然间断法划分为极高、高、中等、低和极低易发区 5 个等级(图 3)。地震诱发滑坡的极高、高、中等、低和极低易发区面积分别为 171.72、290.96、445.26、433.88 和 1 713.41 km^2 ,分别占研究区域总面积的 5.62%、9.52%、14.57%、14.21% 和 56.08%。从图 3 可以看出,泸定 M_w 6.6 级地震可能诱发的滑坡主要集中分布在震中东部、东南部和大渡河两岸,尤其距震中较近的磨西镇、得妥乡和田湾彝族乡滑坡发生概率最高。与王欣等的研究结果^[17-18]相比,高和极高易发区分布大致相同。王欣等的研究结果显示高和极高易发区面积为 463.35 km^2 ^[17-18],本文的研究结果为 462.68 km^2 。

3 同震滑坡识别

3.1 数据处理

2022 年泸定 M_w 6.6 级地震发生后,中国资源

卫星应用中心于 9 月 5 日下午紧急调动在轨光学卫星(高分一号、高分二号、高分七号、环境二号、资源一号、资源三号等)对灾区进行拍摄,但受天气影响,直到 9 月 10 日高分六号和高分二号光学卫星才拍摄到灾区有效的影像数据。高分六号光学卫星影像含 2 m 空间分辨率的单波段全色影像和 8 m 空间分辨率的四波段多光谱影像;为消除地形或相机方位引起的变形,需对多光谱影像和全色影像分别进行正射校正,随后使用图像融合方法——GS 全色锐化(Gram-Schmidt Pan-sharpening)方法对正射校正后的多光谱与全色影像进行融合,充分发挥了多光谱和高空间分辨率的优势^[44],最终获取 2 m 空间分辨率的真彩色影像。高分二号光学卫星影像含 0.8 m 空间分辨率的单波段全色影像和 3.2 m 空间分辨率的五波段多光谱影像,数据预处理过程与高分六号类似。欧洲航天局(ESA)和美国航空航天局(NASA)于 9 月 11 日分别提供一景 Sentinel-2 影像和 Landsat 8 影像。Sentinel-2 影像为 10 m 空间分

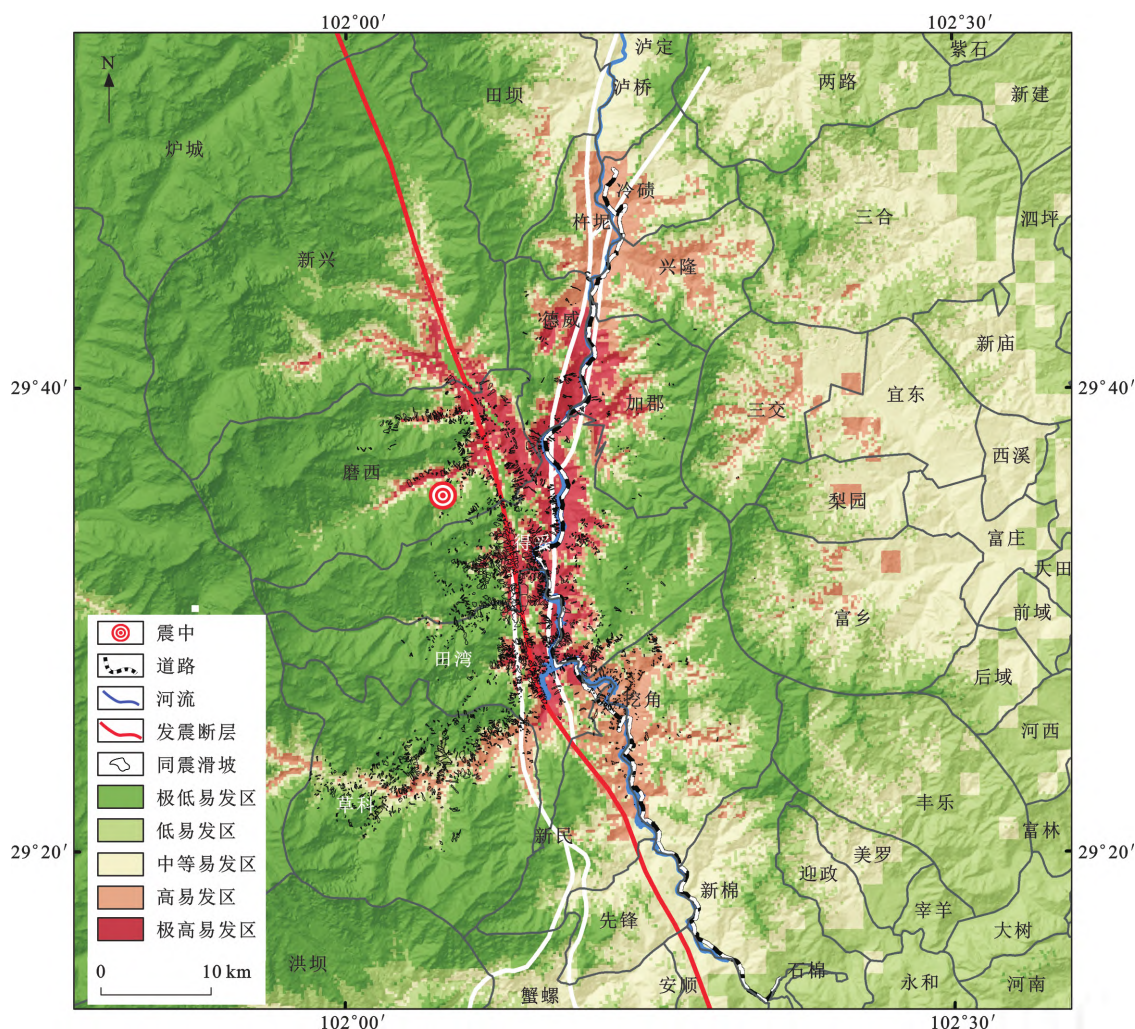


图 3 考虑历史滑坡和 2022 年 M_w 6.6 级泸定地震 PGA 因子的滑坡易发性图

Fig. 3 Landslide Susceptibility Map Derived from Historic Landslides and the PGA of the 2022 M_w 6.6 Luding Earthquake

分辨率的多光谱影像,提供的 L2A 影像已正射校正,可满足同震滑坡解译工作;Landsat8 影像为 15 m 空间分辨率的多光谱影像,提供的 L1T 产品精度基本满足解译需求。考虑到震区天气原因,本文联合多源光学遥感影像,尽可能全面地实现对此地震诱发滑坡的识别。

3.2 同震滑坡识别指标

使用经过预处理的震前、震后光学遥感影像(表 1),利用 ArcGIS 平台通过对比震前、震后影像对同震滑坡进行解译,可准确圈定出同震滑坡的位置与范围。本文解译同震滑坡使用光学影像的原则为:以区域范围内最高空间分辨率影像为主,若出现云层遮挡现象,将采取空间分辨率从高到低的顺序原则,直到光学影像清晰可见为止。震前、震后影像进行对比时,需选择空间分辨率相近的影像进行,如震后高分六号(2 m)与震前高分一号(2 m)光学卫星进行对比。同震滑坡的遥感影像解译主要存在 3 种

情况:①震前影像存在滑坡,但震后影像滑坡形态出现变化则为同震滑坡[图 4(a)];②震前影像不存在

表 1 本文所使用的数据集

Table 1 Datasets Used in This Study

数据类型	影像名称	时间	空间分辨率
震前	Google Earth	2010~2020 年	<1 m
	Sentinel-1	2017 年 10 月~ 2021 年 7 月	2.3 m× 13.9 m
	高分二号	2022 年 3 月 2 日	0.8 m
	高分一号	2022 年 3 月 3 日	2 m
	吉林一号	2022 年 5 月 4 日	0.75 m
	Sentinel-2	2022 年 7 月 23 日	10 m
震后	高分二号	2022 年 9 月 10 日	0.8 m
	高分六号	2022 年 9 月 10 日	2 m
	Sentinel-2	2022 年 9 月 11 日	10 m
	Landsat8	2022 年 9 月 10 日、 2022 年 9 月 11 日	15 m
DEM	ALOS	2006 年	12.5 m

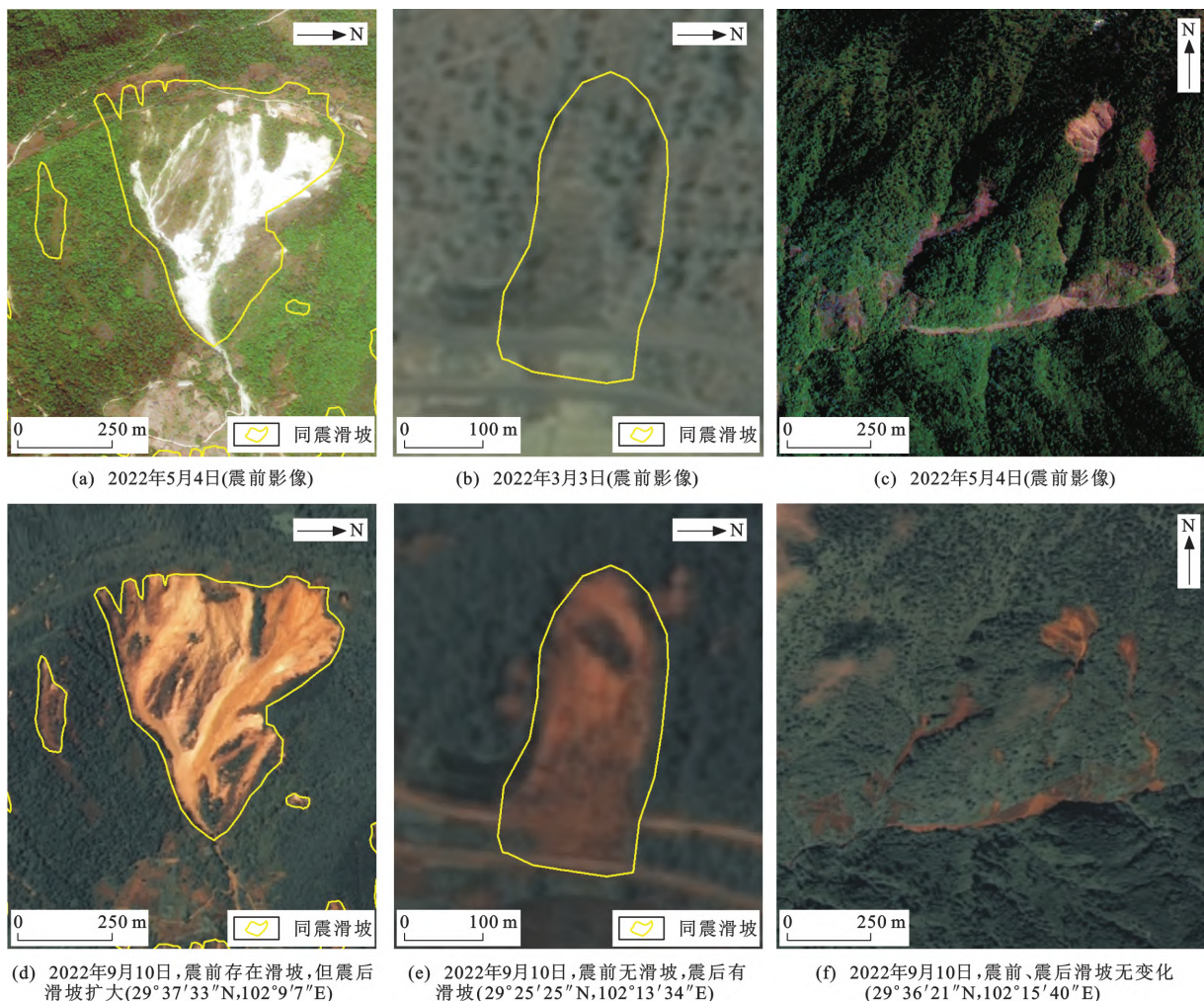


图 4 同震滑坡识别指标示例

Fig. 4 Examples of the Indicators for Coseismic Landslides

滑坡,但震后出现滑坡形态则为同震滑坡[图4(b)];③震前影像存在滑坡,但震后影像滑坡形态无任何变化,则为非同震滑坡[图4(c)]。

3.3 识别结果

基于以上识别准则,通过人机交互的方式,建立了2022年泸定 M_w 6.6级地震同震滑坡编目。此次地震诱发滑坡共计2692处,总面积达47 km²。由图5可以看出,滑坡主要集中在震中的东南侧,沿大渡河两岸滑坡分布较为密集,且多发生在发震断层的西侧,占59%以上。这与韩炳权等反演的发震断层西倾、同震滑动较浅的结果^[45]相一致,也与震后余震多集中发生在断层西侧相互验证(图1)。

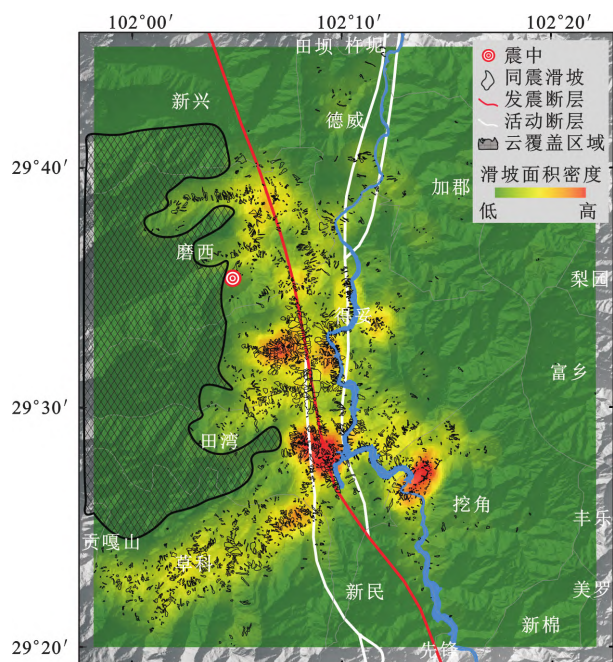


图5 泸定 M_w 6.6级地震同震滑坡分布

Fig. 5 Distribution of Coseismic Landslides of the M_w 6.6 Luding Earthquake

4 讨论

4.1 震区滑坡易发性结果的验证

通过叠加2022年泸定 M_w 6.6级地震同震滑坡识别结果与地震诱发滑坡的易发性图(图3),发现70.2%的同震滑坡发生在中等、高和极高易发区,在磨西镇、湾东村、得妥乡和田湾彝族乡等地区易发性准确性最好。计算各易发性分级的滑坡密度^[42],并对各易发性等级所占面积进行统计,结果如图6所示。从图6可以看出:滑坡密度与易发性等级成正相关关系,易发性等级越高,该等级内滑坡点密度越大,滑坡分布越稠密,滑坡发生概率越高;随着易发性等级的升高,该等级所占面积逐渐降低,其中极高

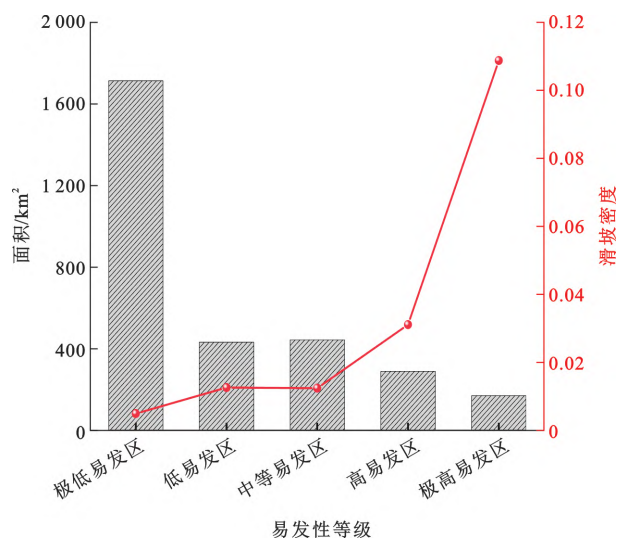


图6 同震滑坡与易发性图的统计分析

Fig. 6 Statistical Analysis of Coseismic Landslides and Susceptibility Map

易发区面积占比(5.62%)最低,极低易发区面积占比(56.08%)最高。以上指标均表明本文得到的泸定 M_w 6.6级地震诱发滑坡易发性准确性较高,基本可以满足震后应急救援指导工作。

4.2 同震滑坡分布规律

基于本文建立的泸定 M_w 6.6级地震2692处同震滑坡编目,研究地形因子(高程、坡度、坡向、地表粗糙度)、地震因子(距震中距离、距断层距离、地震烈度)和地质因子(岩性)对滑坡空间分布的影响规律^[3,12,14,46]。通过统计滑坡面积、滑坡面积百分比(因子分级内滑坡面积相对滑坡总面积的占比),分析地震诱发滑坡的空间分布特征。

4.2.1 地形因素与同震滑坡之间的关系

崎岖的高山地形比平缓的地形更容易发生滑坡。本文使用空间分辨率为12.5 m的DEM数据获取高程、坡度、坡向、粗糙度。采用空间统计方法将高程分为11类,间隔200 m;将坡度分为10类,间隔5°;将坡向分为8类,间隔45°;将粗糙度分为9类,间隔0.1(图7、8)。

地形对地震诱发的滑坡分布起着重要作用^[47]。通过统计发现,泸定 M_w 6.6级地震同震滑坡面积与地形因子均呈现近似高斯正态分布。其中,1200~2400 m高程范围内的同震滑坡面积(37.44 km²)占到滑坡总面积的79.03%,在1800~2000 m高程范围内同震滑坡面积达到最大,占比为14.67%[图8(a)];坡度在35°~50°范围内的同震滑坡面积(40.71 km²)占到滑坡总面积的86.23%,坡度在40°~45°范围内的同震滑坡面积达到最大,

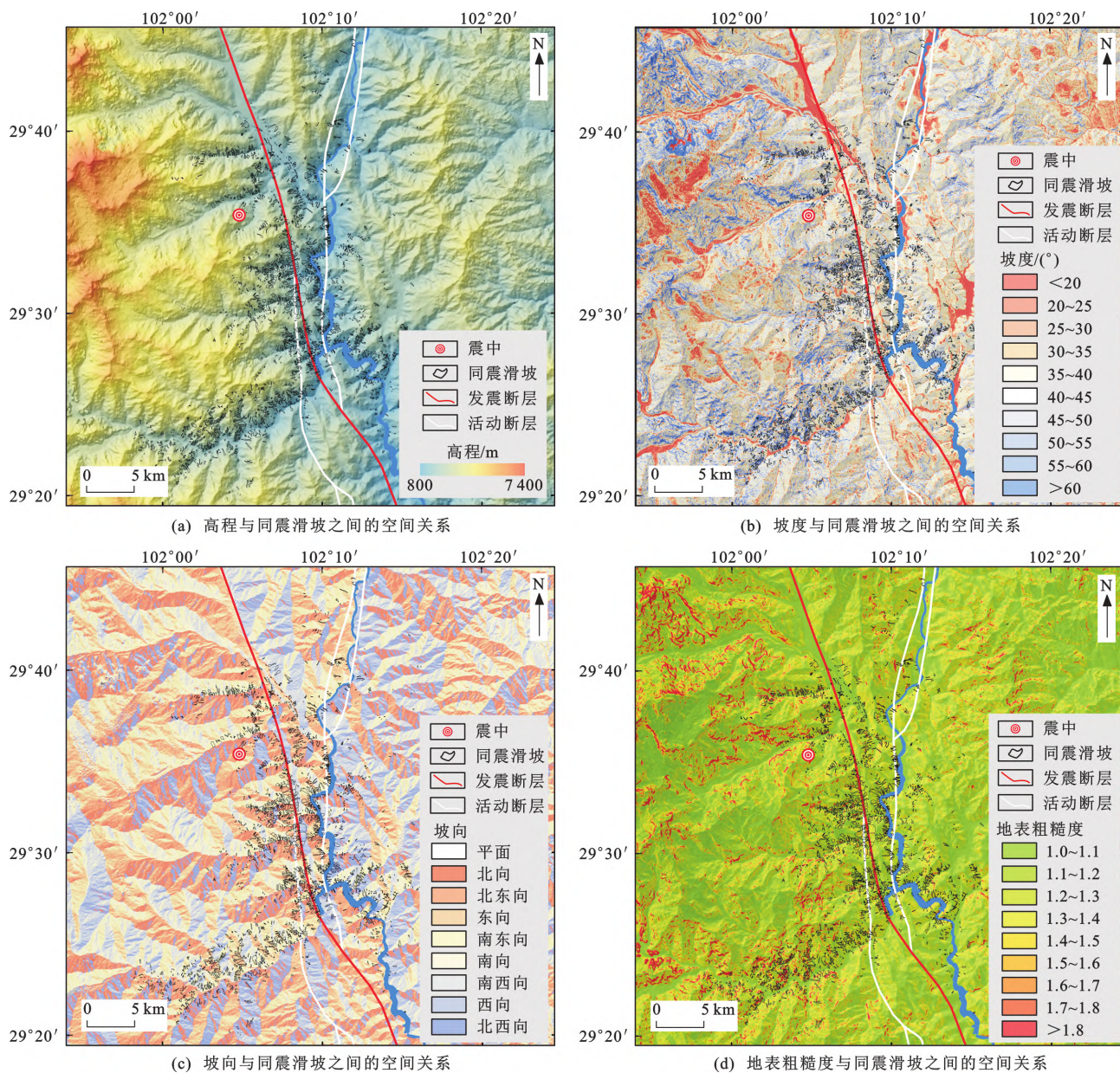


图7 泸定 M_w 6.6 级地震同震滑坡与地形因素之间的空间关系

Fig. 7 Spatial Relationships Between Coseismic Landslides Induced by the M_w 6.6 Luding Earthquake and Terrain Factors

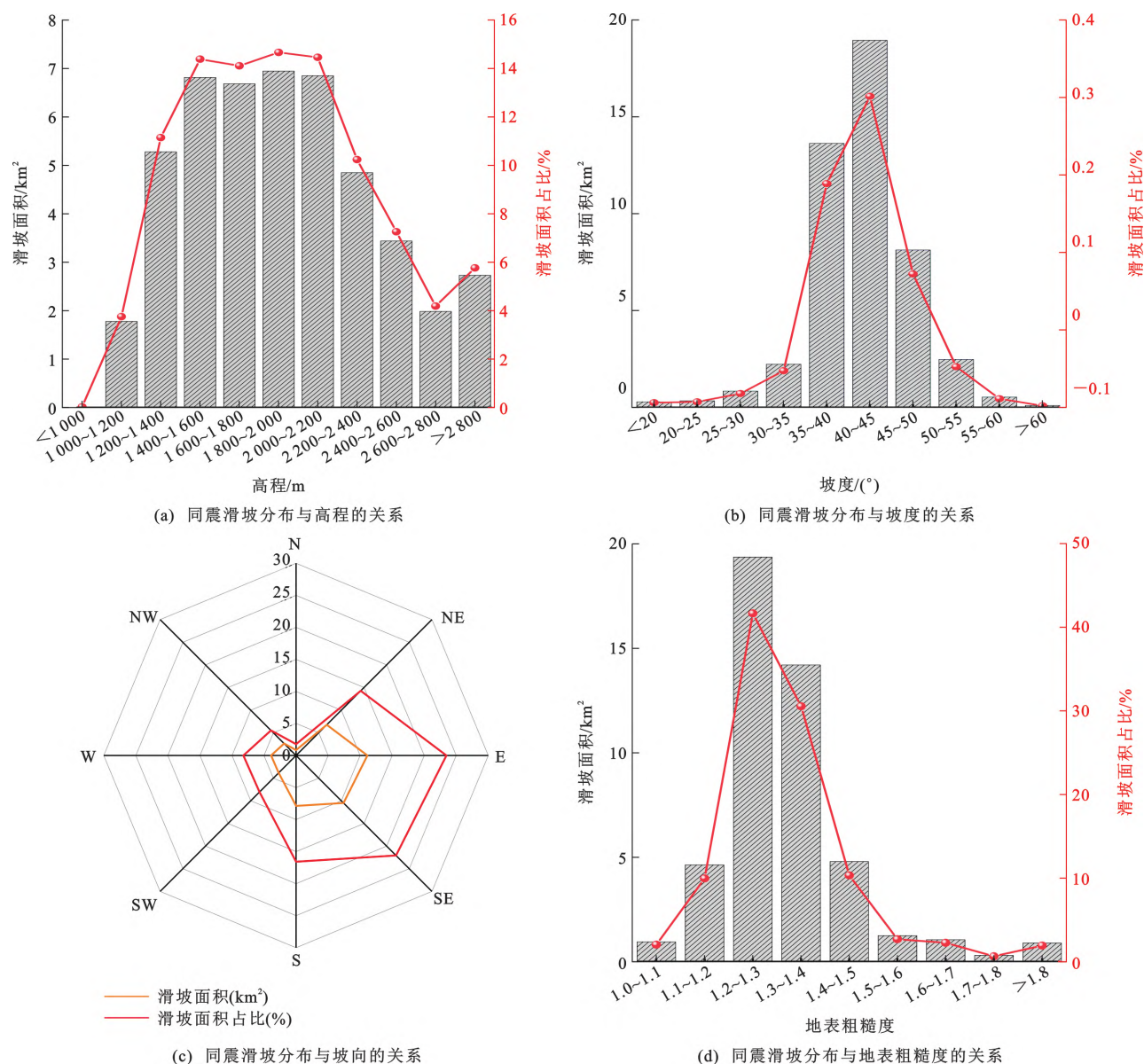
占比为 40.14% [图 8(b)]; 在坡向为北东、东、南东、南向上的同震滑坡面积达 36.25 km², 占比为 76.39%, 在东向上的同震滑坡面积最大, 占比为 23.47% [图 8(c)]; 地表粗糙度为 1.2~1.4 的区域内同震滑坡面积 (33.57 km) 占滑坡总面积的 72.21%, 在 1.2~1.3 的粗糙度上同震滑坡面积最大, 占比为 41.66% [图 8(d)]。上述结果说明此次地震诱发的滑坡主要集中分布在高程为 1 200~2 400 m, 坡度为 35°~50°, 坡向为北东、东、南东、南向, 地表粗糙度为 1.2~1.4 的区域。

4.2.2 地震因素与同震滑坡之间的关系

由于距震中距离、距断层距离、地震烈度均与地

震破裂和能量传播特征有关, 影响着同震滑坡的分布^[14], 所以选取距震中距离、距断层距离、地震烈度为地震因素。本文以泸定 M_w 6.6 级地震震中为中心设置间隔为 2 km 的缓冲带; 在断层沿线设置间隔 1 km 的缓冲带; 采用应急管理部发布的地震烈度图^[16], 将地震烈度分为Ⅸ度、Ⅷ度、Ⅶ度、Ⅵ度 (图 9)。

通常情况下, 地震诱发的滑坡数量和规模随着距震中距离的增加而减少, 但此次泸定 M_w 6.6 级地震类似于 2019 年九寨沟 M_w 6.5 级地震^[14], 诱发的滑坡随着距震中距离的增加呈现出先增加后减少的趋势, 多集中分布在距震中 4~20 km 内 [图 9 (b)], 其中在距震中 6~10 km 内发生的同震滑坡

图8 泸定 M_w 6.6级地震同震滑坡分布与地形因素的关系Fig. 8 Relationships Between Distribution of Coseismic Landslides Induced by the M_w 6.6 Luding Earthquake and Terrain Factors

面积达 15.14 km^2 ,占滑坡总面积的 31.9% 。同震滑坡面积随着距断层距离的增加而减少,其中 41.9% 的同震滑坡面积分布在距断层 1 km 范围内[图9(d)]。对地震烈度与同震滑坡之间的统计分析发现[图9(f)],同震滑坡集中发生在Ⅸ度和Ⅷ度区域,其同震滑坡面积约占滑坡总面积的 87% ,其中发生在Ⅸ度区域的约占 67% 。

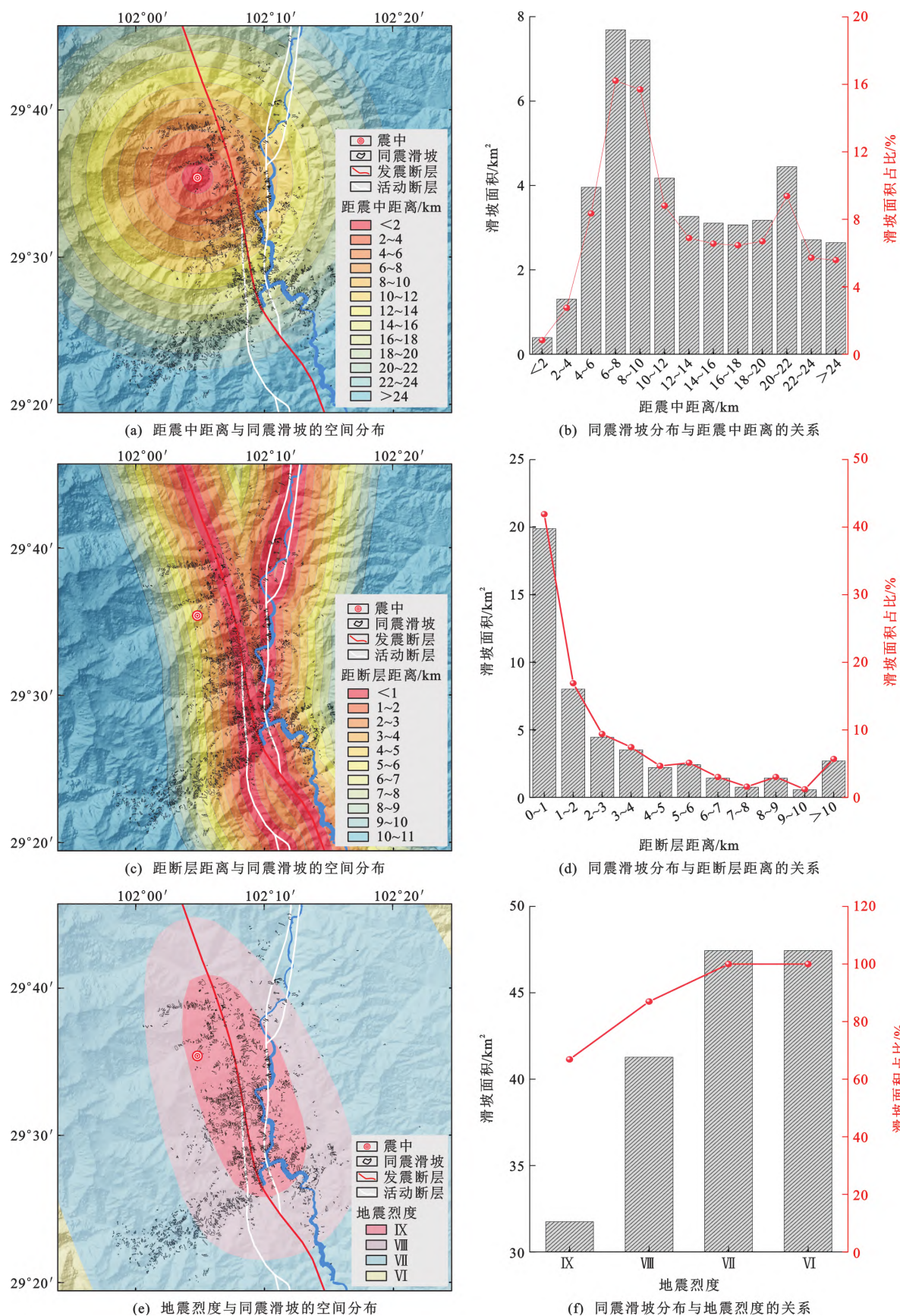
4.2.3 地质因素与同震滑坡之间的关系

利用 $1:2500000$ 全国岩性数据^[48],将研究区域划分为9个岩性单元,即砂岩板岩、花岗岩、闪长岩、碳酸盐岩、辉石岩、白云岩、玄武岩、角闪岩和其他(图10)。通过空间统计分析发现,泸定

M_w 6.6级地震诱发滑坡大部分发生在砂岩板岩、花岗岩、闪长岩区。虽然砂岩板岩区面积占研究区域面积的 24% ,但该岩性内的同震滑坡却占到滑坡总面积的 44.20% ,表明研究区域内砂岩板岩最易诱发滑坡。

4.3 同震滑坡对道路的影响

泸定 M_w 6.6级地震震区交通网主要包括G318国道、S211省道、S434省道、多条县道和乡道。为探究此次地震诱发滑坡造成的道路损毁情况,本文基于解译的2692处同震滑坡范围,与该区域交通网进行叠加分析,发现此次地震至少造成 10.34 km 道路损毁(图11),主要是受地震诱发滑坡堆积阻挡

图9 地震因素与泸定 M_w 6.6 级地震同震滑坡之间的空间关系Fig. 9 Spatial Relationships Between Earthquake Factors and Coseismic Landslides Induced by the M_w 6.6 Luding Earthquake

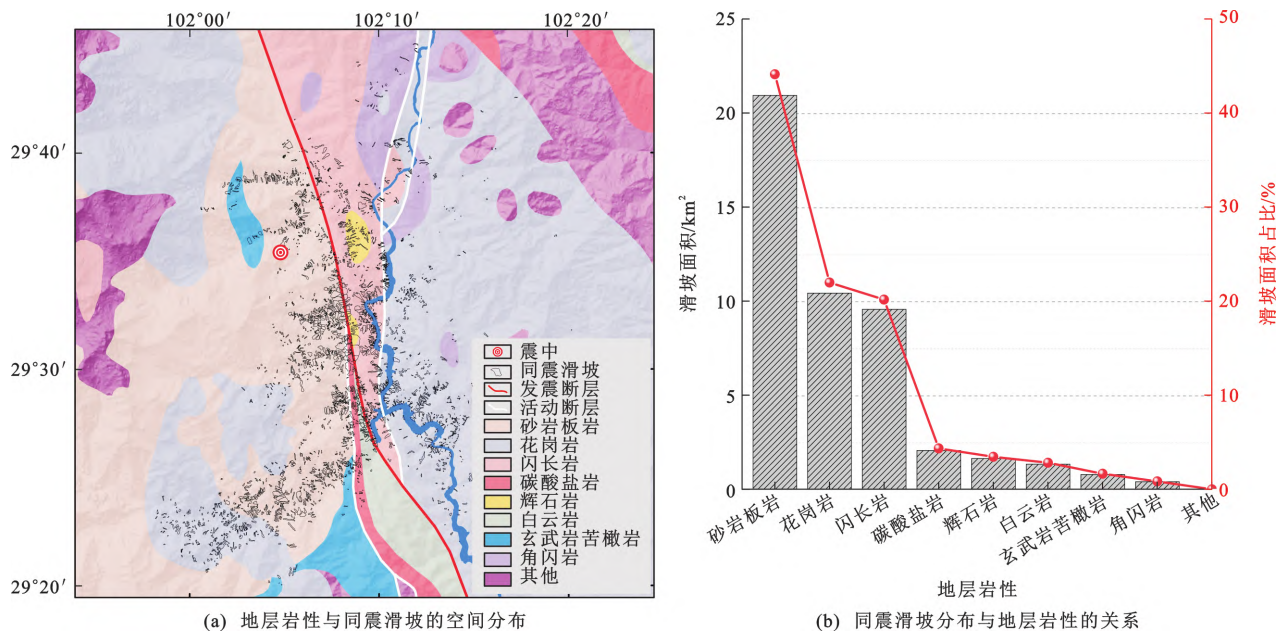


图 10 地质因素与泸定 M_w 6.6 级地震同震滑坡之间的空间关系

Fig. 10 Spatial Relationships Between Geologic Factors and Coseismic Landslides Induced by the M_w 6.6 Luding Earthquake

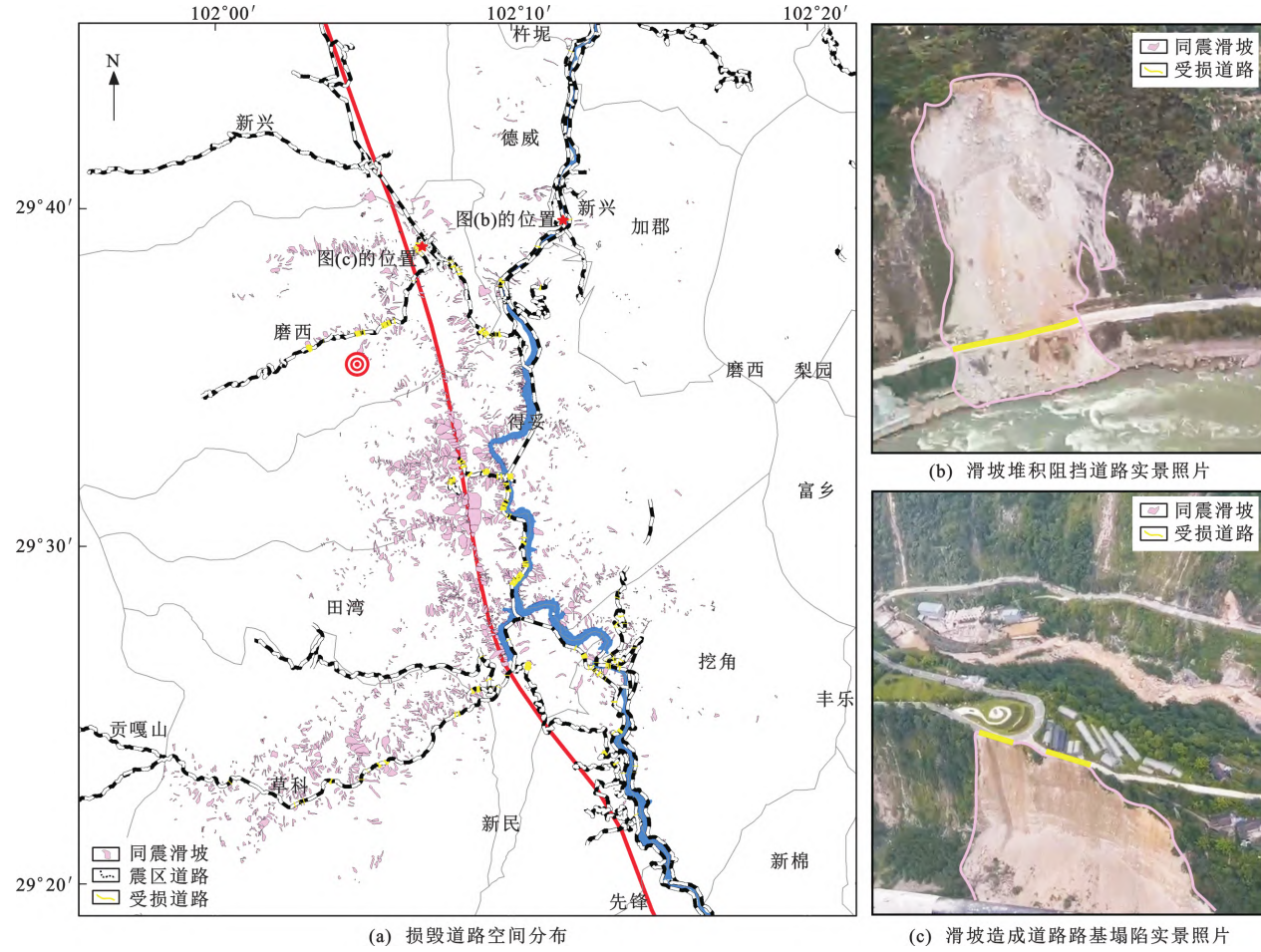


图 11 泸定 M_w 6.6 级地震同震滑坡损毁道路空间分布及实景照片

Fig. 11 Spatial Distribution of Road Damages Caused by Coseismic Landslides and the Real Photos for the M_w 6.6 Luding Earthquake

[图 11(b)]或直接造成路基塌陷[图 11(c)]。其中, G318 国道未有损毁, 3.21 km 的 S211 省道、0.98 km 的 S434 省道、8.11 km 的县道和乡道受到不同程度的破坏。

4.4 结果对比分析

泸定 M_w 6.6 级地震发生后, 多家科研院所启动了应急响应。通过统计已发表文章的研究结果(表 2)发现, 本文识别的同震滑坡数量、总面积、发育最集中的高程区段、地层岩性和道路损毁与王欣等的研究结果^[17-18]不同。主要原因是: 使用数据空间分辨率不同(王欣等的研究中使用无人机影像, 空间分辨率为 0.2~0.6 m^[17-18]; 本文使用光学卫星遥感影像, 空间分辨率最高为 1 m); 研究范围不同(王欣等的研究范围为 312 km²^[17-18], 本文研究范围为 1 553 km²); 此次地震诱发滑坡以小规模为主, 导致

本文识别的同震滑坡数量偏少, 但滑坡总面积却大于王欣等的研究结果^[17-18]。如图 5 所示, 本文识别的同震滑坡多分布在大渡河西侧, 其中西侧海拔较高, 岩性主要以砂岩板岩为主, 因此, 同震滑坡最发育的高程区段和地层岩性不同于王欣等的研究结果^[17-18]。

5 结 语

2022 年 9 月 5 日, 四川省泸定县发生 M_w 6.6 级地震, 诱发了大量的山体滑坡。课题组第一时间启动应急响应, 基于震前滑坡数据, 利用机器学习算法, 评估了此次地震影响范围内滑坡的易发性空间分布, 利用遥感技术建立了同震滑坡编目, 并对地震诱发滑坡的空间分布特征和影响因素进行了分析。

表 2 不同文献得到的泸定 M_w 6.6 级地震相关结果对比

Table 2 Comparisons of Related Results of the M_w 6.6 Luding Earthquake from Different Literatures

文献来源	滑坡数量	总面积/km ²	最小滑坡面积/m ²	地形			距断层距离/km	地层岩性
				高程/m	坡度/(°)	坡向		
[17]、[18]	3 633	13.78	49.00	1 200~1 400	40~45	东	1	花岗岩
本文	2 692	47.00	220.77	1 800~2 000	40~45	东	1	砂岩板岩

(1)地震发生后, 利用光学遥感解译与 GACOS 辅助下的 InSAR Stacking 技术联合的方式获取震区灾前滑坡数据, 然后基于该滑坡数据通过机器学习算法获取此次地震诱发滑坡的易发性。同震滑坡编目表明, 地震诱发滑坡易发性可靠性较好, 可为震后的应急救援提供数据支撑。

(2)利用震后多源光学卫星遥感影像, 建立了同震滑坡编目共 2 692 处, 总面积达 47 km², 主要集中在震中的东南侧, 沿大渡河两岸滑坡分布最为密集。

(3)通过统计同震滑坡与地形、地震和地质 3 类因素的关系, 发现此次地震诱发的滑坡主要集中分布在高程为 1 200~2 400 m、坡度为 35°~50°、距震中 4~20 km、距断层 1 km 的区域。

(4)将同震滑坡范围与研究区域交通网进行叠加分析, 发现此次地震至少造成 10.34 km 的道路受到不同程度的毁坏, 其中 S211 省道、S434 省道、各县道和乡道受损道路分别为 3.21、0.98 和 8.11 km。

李振洪: 为纪念刘国昌先生为我国工程地质教育事业和国家工程建设事业做出的突出贡献, 谨以此文向刘国昌先生致以最崇高的敬意! 刘国昌先生是杰出的工程地质学家, 区域稳定工程地质学创始

人, 我国工程地质事业的奠基人之一, 我国工程地质教育事业的一代宗师。刘国昌先生开拓进取和严谨治学的精神永存于我们青年科技工作者的心中, 也将一直指引我们赓续前行, 勇攀科技高峰! 此外, 我国资源卫星应用中心提供了高分六号、高分二号、高分一号、吉林一号光学卫星影像, 欧洲航天局提供了 Sentinel-1 雷达影像、Sentinel-2 光学影像, 国家冰川冻土沙漠科学数据中心提供了 12.5 m 的 DEM 数据, 美国地质调查局提供了历史地震数据, 在此一并表示感谢!

参考文献:

References:

- [1] 张 龙, 周一剑, 张 旭, 等. 2022 年四川泸定 M_s 6.8 地震: 一次填补地震空区的陆内强震[J]. 中国科学: 地球科学, 2022(评审中).
ZHANG Long, ZHOU Yi-jian, ZHANG Xu, et al. The 2022 M_s 6.8 Luding, Sichuan Earthquake Sequence: A Cascade Rupture Filling the Seismic Gap [J]. Science China: Earth Sciences, 2022(in Review).
- [2] 黄润秋. 汶川 8.0 级地震触发崩滑灾害机制及其地质力学模式[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(6): 1239-1249.
HUANG Run-qiu. Mechanism and Geomechanical Mo-

- des of Landslide Hazards Triggered by Wenchuan 8.0 Earthquake[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(6): 1239-1249.
- [3] XU C, XU X W, YAO X W, et al. Three (Nearly) Complete Inventories of Landslides Triggered by the May 12, 2008 Wenchuan M_w 7.9 Earthquake of China and Their Spatial Distribution Statistical Analysis[J]. Landslides, 2014, 11(3): 441-461.
- [4] 殷跃平. 汶川八级地震地质灾害研究[J]. 工程地质学报, 2008, 16(4): 433-444.
YIN Yue-ping. Researches on the Geo-hazards Triggered by Wenchuan Earthquake, Sichuan[J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(4): 433-444.
- [5] XU C, XU X W, YU G H, et al. Landslides Triggered by Slipping-fault-generated Earthquake on a Plateau: An Example of the 14 April 2010, M_s 7.1, Yushu, China Earthquake[J]. Landslides, 2013, 10(4): 421-431.
- [6] 殷跃平, 张永双, 马寅生, 等. 青海玉树 M_s 7.1 级地震地质灾害主要特征[J]. 工程地质学报, 2010, 18(3): 289-296.
YIN Yue-ping, ZHANG Yong-shuang, MA Yin-sheng, et al. Research on Major Characteristics of Geo-hazards Induced by the Yushu M_s 7.1 Earthquake[J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(3): 289-296.
- [7] LAN H X, LI L P, ZHANG Y S, et al. Risk Assessment of Debris flow in Yushu Seismic Area in China: A Perspective for the Reconstruction[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2013, 13(11): 2957-2968.
- [8] XU C, XU X W, SHYU J B H. Database and Spatial Distribution of Landslides Triggered by the Lushan, China M_w 6.6 Earthquake of 20 April 2013[J]. Geomorphology, 2015, 248: 77-92.
- [9] 兰恒星, 周成虎, 高星, 等. 四川雅安芦山地震灾区次生地质灾害评估及对策建议[J]. 地理科学进展, 2013, 32(4): 499-504.
LAN Heng-xing, ZHOU Cheng-hu, GAO Xing, et al. Secondary Geological Hazard Assessment and Hazard Mitigation Countermeasures in Lushan, Ya'an Earthquake, Sichuan Province[J]. Progress in Geography, 2013, 32(4): 499-504.
- [10] YANG Z H, LAN H X, LIU H J, et al. Post-earthquake Rainfall-triggered Slope Stability Analysis in the Lushan Area[J]. Journal of Mountain Science, 2015, 12(1): 232-242.
- [11] WANG Z, SU J, LIU C, et al. New Insights into the Generation of the 2013 Lushan Earthquake(M_s 7.0), China[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2015, 120(5): 3507-3526.
- [12] FAN X M, SCARINGI G, XU Q, et al. Coseismic Landslides Triggered by the 8th August 2017 M_s 7.0 Jiuzhaigou Earthquake(Sichuan, China): Factors Controlling Their Spatial Distribution and Implications for the Seismogenic Blind Fault Identification[J]. Landslides, 2018, 15(5): 967-983.
- [13] 徐锡伟, 陈桂华, 王启欣, 等. 九寨沟地震发震断层属性及青藏高原东南缘现今应变状态讨论[J]. 地球物理学报, 2017, 60(10): 4018-4026.
XU Xi-wei, CHEN Gui-hua, WANG Qi-xin, et al. Discussion on Seismogenic Structure of Jiuzhaigou Earthquake and Its Implication for Current Strain State in the Sountheastern Qinghai-Tibet Plateau[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2017, 60(10): 4018-4026.
- [14] TIAN Y Y, XU C, MA S Y, et al. Inventory and Spatial Distribution of Landslides Triggered by the 8th August 2017 M_w 6.5 Jiuzhaigou Earthquake, China[J]. Journal of Earth Science, 2019, 30(1): 206-217.
- [15] GUZZETTI F, MONDINI A C, CARDINALI M, et al. Landslide Inventory Maps: New Tools for an Old Problem[J]. Earth Science Reviews, 2012, 112(1): 42-66.
- [16] 铁永波, 张宪政, 卢佳燕, 等. 四川省泸定县 M_s 6.8 级地震地质灾害发育规律与减灾对策[J]. 水文地质工程地质, 2022, DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202209023.
TIE Yong-bo, ZHANG Xian-zheng, LU Jia-yan, et al. Characteristics of Geological Hazards and It's Mitigations of the M_s 6.8 Earthquake in Luding County, Sichuan Province[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202209023.
- [17] 王欣, 方成勇, 唐小川, 等. 泸定 M_s 6.8 级地震诱发滑坡应急评价研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, DOI:10.13203/J.whugis20220586.
WANG Xin, FANG Cheng-yong, TANG Xiao-chuan, et al. Research on Emergency Evaluation of Landslides Induced by Luding M_s 6.8 Earthquake[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2022, DOI:10.13203/J.whugis20220586.
- [18] 范宣梅, 王欣, 戴岚欣, 等. 2022年 M_s 6.8 级泸定地震诱发地质灾害特征与空间分布规律研究[J]. 工程地质学报, 2022, 30(5): 1504-1516.
FAN Xuan-mei, WANG Xin, DAI Lan-xin, et al. Characteristics and Spatial Distribution Pattern of M_s 6.8 Luding Earthquake Occurred on September 5,

- 2022[J]. Journal of Engineering Geology, 2022, 30(5):1504-1516.
- [19] 李为乐,陈俊伊,陆会燕,等. 泸定 M_s 6.8 地震对海螺沟冰川的影响应急分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, DOI:10.13203/J.whugis20220593.
LI Wei-le, CHEN Jun-yi, LU Hui-yan, et al. Emergency Analysis of the Impact of the Luding M_s 6.8 Earthquake on Hailuoguo Glacier[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2022, DOI: 10.13203/J.whugis20220593.
- [20] 白明坤, CHEVALIER M L, 李海兵, 等. 鲜水河断裂带乾宁段晚第四纪走滑速率及区域强震危险性研究[J]. 地质学报, 2022, 96(7):2312-2332.
BAI Ming-kun, CHEVALIER M L, LI Hai-bing, et al. Late Quaternary Slip Rate and Earthquake Hazard Along the Qianning Segment, Xianshuihe Fault[J]. Acta Geologica Sinica, 2022, 96(7):2312-2332.
- [21] BAI M K, CHEVALIER M L, PAN J W, et al. South-eastward Increase of the Late Quaternary Slip-rate of the Xianshuihe Fault, Eastern Tibet: Geodynamic and Seismic Hazard Implications[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2018, 485:19-31.
- [22] ZHANG P Z. A Review on Active Tectonics and Deep Crustal Processes of the Western Sichuan Region, Eastern Margin of the Tibetan Plateau[J]. Tectonophysics, 2013, 584:7-22.
- [23] PAN Y J, SHEN W B. Contemporary Crustal Movement of Southeastern Tibet: Constraints from Dense GPS Measurements[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 45348.
- [24] 徐 晶, 邵志刚, 刘 静, 等. 基于库仑应力变化分析巴颜喀拉地块东端的强震相互关系[J]. 地球物理学报, 2017, 60(10):4056-4068.
XU Jing, SHAO Zhi-gang, LIU Jing, et al. Analysis of Interaction Between Great Earthquakes in the Eastern Bayan Har Block Based on Changes of Coulomb Stress[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2017, 60(10): 4056-4068.
- [25] 程 佳, 徐锡伟. 巴颜喀拉块体周缘强震间应力作用与丛集活动特征初步分析[J]. 地震地质, 2018, 40(1):133-154.
CHENG Jia, XU Xi-wei. Features of Earthquake Clustering from Calculation of Coulomb Stress Around the Bayan Har Block, Tibetan Plateau[J]. Seismology and Geology, 2018, 40(1):133-154.
- [26] 廖海军, 刘 巧, 钟 妍, 等. 1990~2019 年贡嘎山地区典型冰川表碛覆盖变化及其空间差异[J]. 地理学报, 2021, 76(11):2647-2659.
LIAO Hai-jun, LIU Qiao, ZHONG Yan, et al. Supraglacial Debris-cover Change and Its Spatial Heterogeneity in the Mount Gongga, 1990-2019[J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(11):2647-2659.
- [27] 许 强. 对地质灾害隐患早期识别相关问题的认识与思考[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(11): 4-12.
XU Qiang. Understanding and Consideration of Related Issues in Early Identification of Potential Geohazards[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, 45(11):4-12.
- [28] CHEN B, LI Z H, ZHANG C L, et al. Wide Area Detection and Distribution Characteristics of Landslides Along Sichuan Expressways[J]. Remote Sensing, 2022, 14(14):3431.
- [29] 张成龙, 李振洪, 余 琛, 等. 利用 GACOS 辅助下 InSAR Stacking 对金沙江流域进行滑坡监测[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(11):1649-1657.
ZHANG Cheng-long, LI Zhen-hong, YU Chen, et al. Landslide Detection of the Jinsha River Region Using GACOS Assisted InSAR Stacking[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, 46(11):1649-1657.
- [30] XIAO R Y, YU C, LI Z H, et al. General Survey of Large-scale Land Subsidence by GACOS-corrected InSAR Stacking: Case Study in North China Plain[J]. Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences, 2020, 382:213-218.
- [31] ZHANG C L, LI Z H, YU C, et al. An Integrated Framework for Wide-area Active Landslides Detection with InSAR Observations and SAR Pixel Offsets[J]. Landslides, 2022, 19:2905-2923.
- [32] 李振洪, 朱 武, 余 琛, 等. 雷达影像地表形变干涉测量的机遇、挑战与展望[J]. 测绘学报, 2022, 51(7): 1485-1519.
LI Zhen-hong, ZHU Wu, YU Chen, et al. Interferometric Synthetic Aperture Radar for Deformation Mapping: Opportunities, Challenges and the Outlook[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2022, 51(7):1485-1519.
- [33] YU C, LI Z H, BAI L, et al. Successful Applications of Generic Atmospheric Correction Online Service for InSAR (GACOS) to the Reduction of Atmospheric Effects on InSAR Observations[J]. Journal of Geodesy and Geoinformation Science, 2021, 4(1):109-115.
- [34] WEGNULLER U, WERNER C, STROZZI T, et al. Sentinel-1 Support in the GAMMA Software[J]. Procedia Computer Science, 2016, 100:1305-1312.

- [35] YU C, LI Z H, PENNA N T, et al. Generic Atmospheric Correction Model for Interferometric Synthetic Aperture Radar Observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2018, 123 (10): 9202-9222.
- [36] YU C, LI Z H, PENNA N T. Interferometric Synthetic Aperture Radar Atmospheric Correction Using a GPS-based Iterative Tropospheric Decomposition Model[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 204:109-121.
- [37] YU C, PENNA N T, LI Z H. Generation of Real-time Mode High-resolution Water Vapor Fields from GPS Observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2017, 122(3):2008-2025.
- [38] ZHANG J, ZHU W, CHENG Y, et al. Landslide Detection in the Linzhi-Ya'an Section Along the Sichuan-Tibet Railway Based on InSAR and Hot Spot Analysis Methods[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(18):3566.
- [39] 李振洪,张成龙,陈 博,等.一种基于多源遥感的滑坡防灾技术框架及其工程应用[J]. *地球科学*, 2022, 47(6):1901-1916.
LI Zhen-hong, ZHANG Cheng-long, CHEN Bo, et al. A Technical Framework of Landslide Prevention Based on Multi-source Remote Sensing[J]. *Earth Science*, 2022, 47(6):1901-1916.
- [40] 范宣梅,方成勇,戴岚欣,等.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[J]. *工程地质学报*, 2022, 20(3):729-739.
FAN Xuan-mei, FANG Cheng-yong, DAI Lan-xin, et al. Near Real Time Prediction of Spatial Distribution Probability of Earthquake-induced Landslides: Take the Lushan Earthquake on June 1, 2022 as an Example[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2022, 20 (3):729-739.
- [41] HUANG W B, DING M T, LI Z H, et al. An Efficient User-friendly Integration Tool for Landslide Susceptibility Mapping Based on Support Vector Machines; SVM-LSM Toolbox[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14 (14):3408.
- [42] 黄武彪,丁明涛,王 栋,等.基于层数自适应加权卷积神经网络的川藏交通廊道沿线滑坡易发性评价[J]. *地球科学*, 2022, 47(6):2015-2030.
HUANG Wu-biao, DING Ming-tao, WANG Dong, et al. Evaluation of Landslide Susceptibility Based on Layer Adaptive Weighted Convolutional Neural Network Model Along Sichuan-Tibet Traffic Corridor [J]. *Earth Science*, 2022, 47(6):2015-2030.
- [43] 张成龙,李振洪,张双成,等.综合遥感解译2022年 M_w 6.7 青海门源地震地表破裂带[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2022, 47(8):1257-1270.
ZHANG Cheng-long, LI Zhen-hong, ZHANG Shuang-cheng, et al. Surface Ruptures of the 2022 M_w 6.7 Menyuan Earthquake Revealed by Integrated Remote Sensing[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(8):1257-1270.
- [44] AIAZZI B, BARONTI S, SELVA M, et al. Enhanced Gram-Schmidt Spectral Sharpening Based on Multivariate Regression of MS and Pan Data[C]// IEEE. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing. Denver*; IEEE, 2006:3789-3792.
- [45] 韩炳权,刘振江,陈 博,等.2022年泸定 M_w 6.6 地震 InSAR 同震形变与滑动分布[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2022, DOI: 10. 13203/J. whu-gis20220636.
HAN Bing-quan, LIU Zhen-jiang, CHEN Bo, et al. Coseismic Deformation and Slip Distribution of the 2022 Luding M_w 6.6 Earthquake Revealed by InSAR Observations[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, DOI: 10. 13203/J. whu-gis20220636.
- [46] 黄润秋,李为乐.“5·12”汶川大地震触发地质灾害的发育分布规律研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(12):2585-2592.
HUANG Run-qiu, LI Wei-le. Research on Development and Distribution Rules of Geohazards Induced by Wenchuan Earthquake on 12th May, 2008 [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(12):2585-2592.
- [47] WU C H, CUI P, LI Y S, et al. Seismogenic Fault and Topography Control on the Spatial Patterns of Landslides Triggered by the 2017 Jiuzhaigou Earthquake [J]. *Journal of Mountain Science*, 2018, 15 (4): 793-807.
- [48] 叶天竺,黄崇轲,邓志奇.1:2 500 000 中华人民共和国数字地质图空间数据库[J]. *中国地质*, 2017, 44(增1):19-24.
YE Tian-zhu, HUANG Chong-ke, DENG Zhi-qi. Spatial Database of 1:2 500 000 Digital Geologic Map of People's Republic of China [J]. *Geology in China*, 2017, 44(S1):19-24.