“9·5”泸定地震人口密集区域地震诱发滑坡空间分布规律

宋静园[1]，刘洋[2*]，董秀军[1]，袁阳杰[1]

1. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室，成都 610059；
2. 四川省自然资源厅，成都 610072

第一作者，E-mail：2990732818@qq.com

* 通信作者，E-mail：274597918@qq.com

2023-11-03 收稿；2023-12-05 修回；2023-12-05 接受

基金项目：国家自然科学基金项目(42072306)

中图分类号：P642.22　　文章编号：2096-8523(2025)05-0202-13　　doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20230619

摘　要：研究地震诱发滑坡的空间分布规律，不仅能为灾区地质灾害隐患排查、灾情评估等提供重要依据，同时对后期灾后重建、灾后安置选址以及地质灾害防治等工作具有重要意义。以 2022 年 9 月 5 日四川甘孜泸定县 M_S 6.8 级地震为例，首先基于获取得到的震后 0.2 m 分辨率光学影像(digital orthophoto map，简称 DOM)和 0.5 m 分辨率的数字高程模型(digital elevation matrix，简称 DEM)，采用人工目视三维遥感解译地震诱发滑坡，再结合野外调查修正，确定最终地震诱发滑坡数量，并在此基础上分析地震诱发滑坡分布与地形地貌、地质构造、地震因子等地质背景的关系。结果表明：①此次泸定地震事件在约 680 km^2 的研究区内引发了 9248 处滑坡，且以中、小型滑坡为主，滑坡面积密度最高集中在鲜水河断裂、大渡河断裂以及锦屏山断裂 3 条断裂交汇处；滑坡总面积约 45.57 km^2，平均滑坡面积可达 4941 m^2。②本次地震滑坡分布主要受地面峰值加速度 *PGA* 以及断裂构造影响，多分布在 *PGA*> 0.6 *g*(*g* 为重力加速度)，距发震断裂两侧 1 km 范围内；此外滑坡的发育还与距水系及道路距离呈负相关；局部受地形因素影响滑坡主要发育在高程 1200 ~ 2400 m、坡度 30° ~ 60°、坡向 E 及 SE 向区域，且地层岩性多为硬岩。③此次泸定地震的滑坡数量及面积与震级关系也遵循指数分布；同时由于此次解译基础数据精度较高，解译得到的地震滑坡数量相比于其他文献而言更多，最小面积更小，总面积更大。本研究成果已应用于泸定地震灾区的灾后恢复重建工作，为提高抗灾能力和降低地震风险提供了科学依据。

关键词：泸定地震；地震滑坡；机载 LiDAR；分布规律；人口密集区

2022 年 9 月 5 日 12 时 52 分，四川省甘孜藏族自治州的泸定县发生了 M_S 6.8 级地震，震源深度 16 km，最高烈度达到Ⅸ度，为典型的左旋走滑型破裂，震中位于泸定县磨西镇(北纬 29.59°，东经 102.08°)，发震断裂为鲜水河断裂带[1-7]。由于此次地震灾区地貌多为高山峡谷，加之地质构造复杂，使得地震诱发了大量滑坡，对人类生命财产造成了巨大损失，截至目前，因地震死亡失踪 117 人，倒损房屋约 28.2 万间，造成直接经济损失约 157 亿元。

强震是诱发山区地质灾害的重要因素之一[1]，地质灾害的发生又给当地居民带来了灾难性的后果[3, 8]。自 2000 年以来，川西地区发生了多次 M_S 6.0 以上的中强震[9]，如 2008 年汶川地震，诱发了约 196000 处滑坡[10-11]，导致了约 2 万人死亡[12]；2013 年芦山地震，诱发了约 22500 处滑坡[13]，导致了 196 人死亡[14]；2017 年九寨沟地震，诱发了 5633 处滑坡[15]，导致了

著录信息：宋静园，刘洋，董秀军，等. “9·5”泸定地震人口密集区域地震诱发滑坡空间分布规律[J]. 地质科技通报，2025，44(5)：202-214.
SONG Jingyuan，LIU Yang，DONG Xiujun，et al. Spatial distribution of earthquake-induced landslide in densely populated area of the Luding 9·5 earthquake[J]. Bulletin of Geological Science and Technology，2025，44(5)：202-214.

© Editorial Office of Bulletin of Geological Science and Technology. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.　https://dzkjtb.cug.edu.cn

25 人死亡，525 人受伤[16]；2022 年芦山地震诱发了 1288 处滑坡[17]，导致了 4 人死亡，14427 人受灾[18]。泸定地区历史上也曾发生多次强震，如 1786 年磨西地震引发的巨型磨岗岭滑坡堵塞大渡河，溃坝后造成约 10 万人死亡，由此可见研究地震滑坡的空间分布对防灾减灾事业以及灾后重建工作具有重要的现实意义。

大量研究表明，进行完整且准确的地震滑坡编目，对于评估由一次地震事件引发的滑坡空间和大小分布至关重要[3, 15, 19-20]。目前泸定地震滑坡数据库的建立方法主要包括现场调查结合人工目视解译[3, 9, 21-26]以及机器学习算法自动提取滑坡[1-2, 27]。对于地震烈度在Ⅶ度以内的重震灾区来说，区内山高坡陡、植被茂密且道路阻断严重，人工现场调查存在巨大困难；同时人工目视解译和机器自动识别滑坡的基础数据主要是基于地震前后 10 m 分辨率的哨兵 2 号多光谱影像、2 m 分辨率的国产卫星高分影像、3 m 分辨率的 Planet 卫星影像以及局部 0.2 ~ 0.6 m 分辨率的无人机航拍影像，其对于高植被覆盖下"裂而未动"的地震滑坡边界难以准确识别。近年来机载 LiDAR 因其"可穿透"地表植被[28]，生成高分辨率的数字地形优势，成为研究地震滑坡的重要工具，如 YUSOFF 等[29]、LIU 等[30]及 RUIZ 等[31]利用激光雷达数据分别完成了 2015 年拉瑙地震、2018 年日本熊本地震及 2009 年金鸡纳地震震后的滑坡清单。

因此本研究基于四川省泸定地震灾后恢复重建获取的震后 0.2 m 分辨率的光学影像（DOM）和 0.5 m 分辨率的数字高程模型（DEM）数据，利用 EarthSurvey 软件建立三维解译环境进行目视解译，并结合野外复核情况，对本研究的地震滑坡（包括同震滑坡和"震而未动"的滑坡）进行编目；采用滑坡"面密度"和"面积占比"2 个指标[32]，论述地形地貌（坡度、坡向、高程、距河流距离、距道路距离）、地质参数（地层岩性）、地震参数（距发震断层距离、*PGA*）8 个因子对地震诱发滑坡的空间分布影响，旨为灾区地质灾害隐患排查、灾情评估、灾后安置选址提供重要依据，为灾后重建、地质灾害防治等提供基础数据和科技支撑。

1 研究区概况

笔者以重灾区（Ⅶ度带内）的人口密集区域作为研究区（图 1b），区域面积约 680 km²，涉及石棉县 5 个乡镇（草科乡、王岗坪乡、新民乡、新棉街道、安顺场镇）、泸定县 4 个乡镇（燕子沟镇、磨西镇、得妥镇、德威镇），区内人口主要集中在大渡河沿岸两侧平坦区域以及燕子沟与雅加梗河中部的磨西台地。如图 1c 所示，研究区横跨泸定县和石棉县（北纬 29°11′ ~ 29°45′，东经 101°56′ ~ 102°23′），最高海拔 4256 m，最低海拔 814 m，南北长约 62 km，东西宽约 42 km，主要覆盖大渡河、燕子沟、海螺沟以及田湾河流域，整体地形呈西高东低，为典型的高山峡谷地貌，区内地质构造复杂，发育多条断裂，历史地震活动强烈，作为本次地震的发震断裂——鲜水河断裂贯穿整个研究区。

2 地震滑坡编目

2.1 地震滑坡编目方法

本研究的地震滑坡编目主要是利用 EarthSurvy 软件建立三维解译环境进行人机交互解译，与基于二维解译环境的人机交互解译或基于深度学习的自动提取等手段相比，本研究的滑坡编目数据更为准确详细，同时本研究的地震诱发滑坡不仅包括同震滑坡还包括"裂而未动"的潜在滑坡。编目过程主要分为以下 3 个步骤：①首先基于 0.2 m 分辨率的光学影像（DOM）进行目视滑坡解译，其中具有不同滑源区的相邻滑坡被绘制为单独多边形，若多个滑源区共用同一滑动沟道，为避免重复计算面积，将其定义为最大滑源区的边界（图 2a）；②其次基于 0.5 m 分辨率的数字高程模型（DEM）对步骤①中圈定的植被层下的滑坡边界进行修正（图 2b），同时还可对基于 DOM 难以识别的植被覆盖下"裂而未动"的滑坡进行补充解译（图 2c）；③最后结合部分现场调查情况，确定滑坡编目结果。

需要注意的是，地震诱发的地质灾害往往不是单一的类型，本研究所用的"滑坡"是一个通用术语，可分为碎屑流、滑坡、崩塌等（图 3），重点研究地震诱发滑坡的空间分布，因此将不同类型的滑坡放在一起考虑。

2.2 地震滑坡编目结果

基于 2.1 节的滑坡编目方法，得到此次泸定地震共诱发滑坡 9248 处，面积从 15.5 ~ 338301.8 m^2 不等，平均滑坡面积可达 4941 m^2，以中小型滑坡为主，累计滑坡总面积约 45.57 km^2。

就滑坡数量来看，可归纳如下：①滑坡沿断裂带两侧呈线性展布，且多分布在高地震动加速度区域

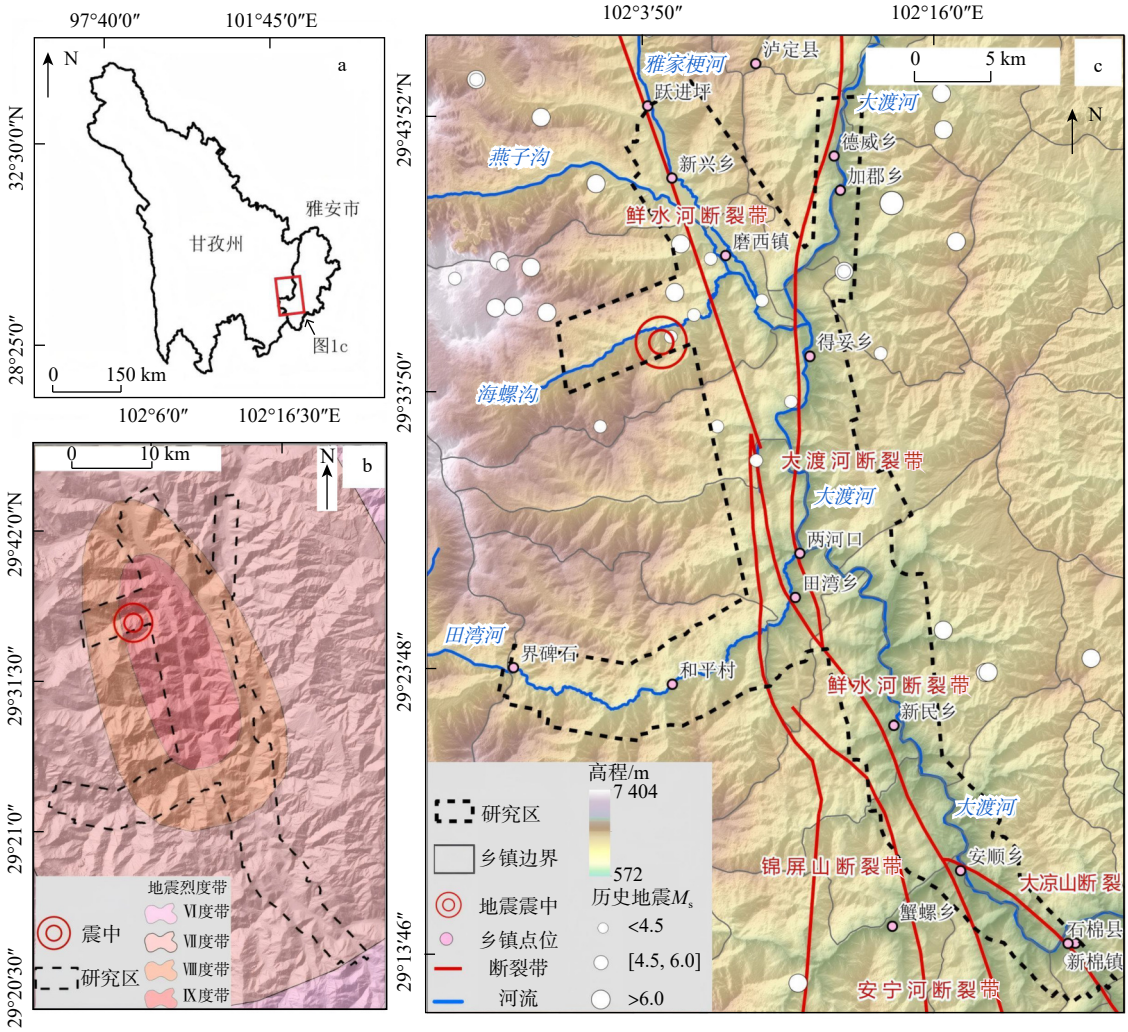


图 1　研究区位置 (a)、地震烈度带 (b) 和历史地震及断裂带分布 (c)

Fig. 1　Location (a), seismic intensity (b), distribution of historical earthquakes and fault zones (c) in the study area

(*PGA*≥0.7 *g*)；②得妥−田湾−挖角乡的大渡河两岸沿线是此次地震滑坡的集中区，该区域 3 条断裂带交错分布，共集中了 5 569 个滑坡，占总数的 60.2%；③此次滑坡面积密度最高位于鲜水河断裂带与锦屏山断裂带交汇处(图 4b，图 5)。

就滑坡尺寸而言，滑坡面积≥100 000、[10 000, 100 000)、[1 000, 10 000)、(100, 1 000)以及≤100 m^2 的滑坡分别有 33, 993, 3 743, 4 034, 445 处，分别占滑坡总数的 0.36%, 10.74%, 40.47%, 43.62%, 4.81%，且滑坡面积尤其集中在 100 ~ 300 m^2 范围内，占滑坡总数的 15.9%。其中面积≥100 000 m^2 的滑坡主要分布于鲜水河断裂与锦屏山断裂交汇处(*PGA*≥0.7 *g*)，约 63.6% 的大型滑坡距离鲜水河断裂不超过 1 km，说明此次地震的滑坡面积受发震断裂及地震动加速度影响较大，而面积≤100 m^2 的滑坡主要分布在各环山道路沿线，说明人类工程活动也对地震诱发滑坡有一定影响。

3　泸定地震诱发滑坡空间分布规律

通常滑坡分布的影响因素主要包括地形地貌、地震参数和地质参数等。笔者根据研究区特性，选择的地形地貌参数包括高程、坡度、坡向、距水系距离、距道路距离；选择的地震参数包括距发震断层距离、*PGA*；而地质参数仅选择了地层岩性，综合上述共选择 8 个因子作为分析同震滑坡空间分布规律的影响参数，各因子分级如表 1 所示。

通过统计各因子分级中滑坡面积占比(各因子分级中滑坡面积/滑坡总面积)和面密度(各因子分级中滑坡面积/各因子分级中地表面积)分析地震诱发滑坡的空间分布规律。其中坡度、坡向及高程等地形数据均根据 0.5 m 分辨率的 DEM 导出，下伏地层数据来自于 1∶200 000 的荥经幅和石棉幅地质图资料及现场详查，*PGA* 等地震相关数据均来自中国地震局，水系河流及道路均由 0.2 m 分辨率的 DOM 人

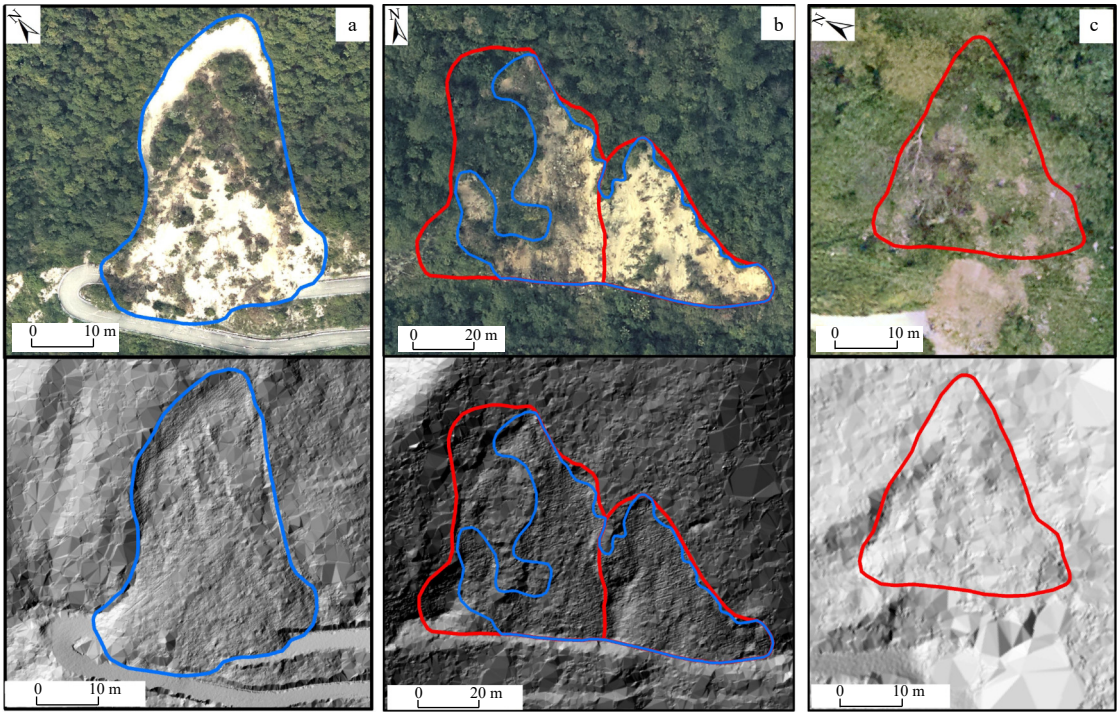


图 2　泸定地震解译滑坡

Fig. 2　Interpretation of the landslide by the Luding earthquake

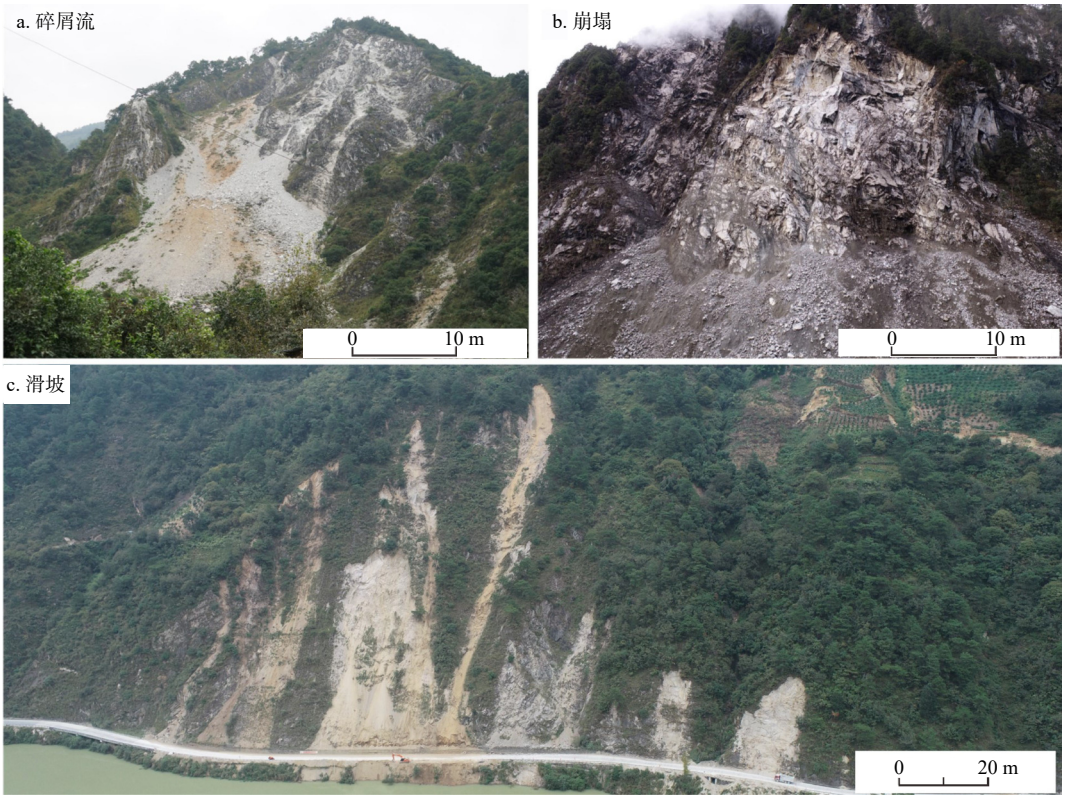
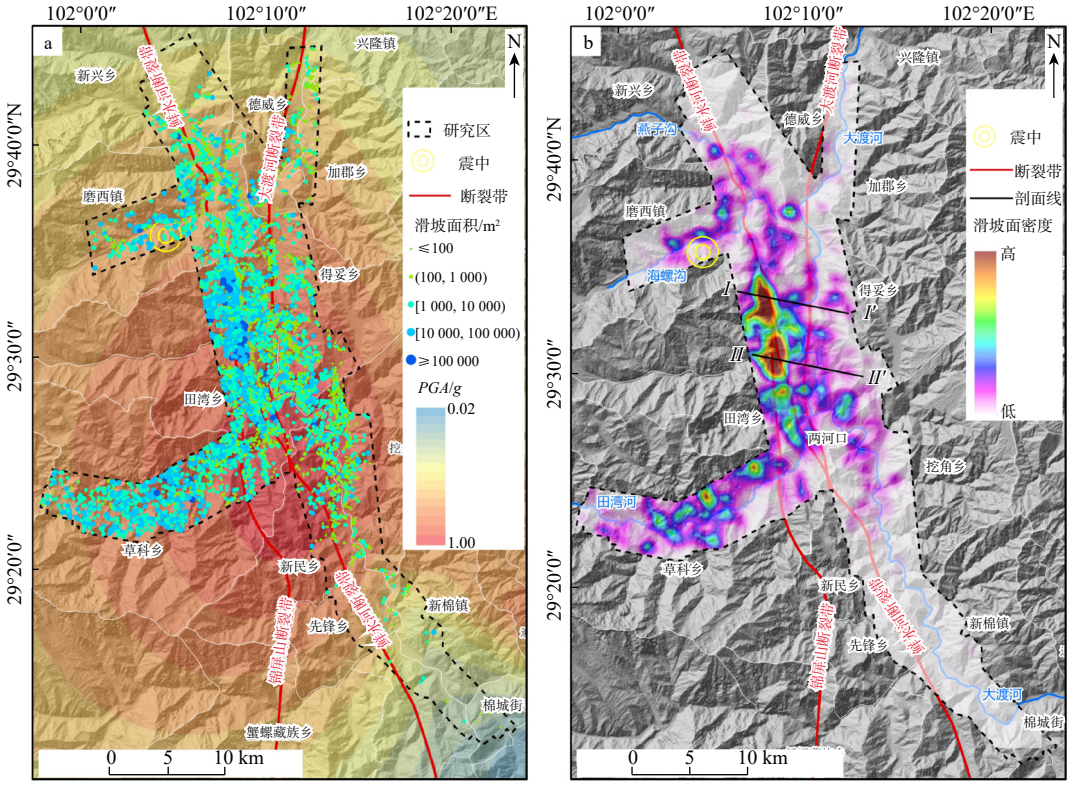


图 3　泸定地震滑坡的主要类型

Fig. 3　Main types of landslides by the Luding earthquake



a. 地震滑坡与 *PGA* 空间分布；b. 滑坡面密度空间分布；*PGA*. 地面峰值加速度，下同

图 4　研究区地震滑坡空间分布图

Fig. 4　Spatial distribution map of the earthquake-induced landslide in the study area

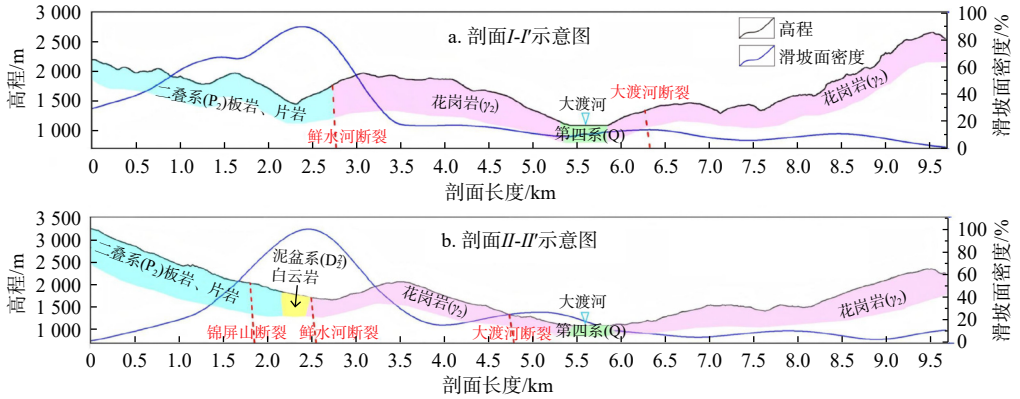


图 5　地震滑坡面密度、高程、地层岩性的剖面图（剖面位置见图 4b）

Fig. 5　Profile of area density, elevation and stratum lithology of earthquake-induced landslide

表 1　地震滑坡控制因子分级

Table 1　Classification of controlling factors of earthquake-induced landslide

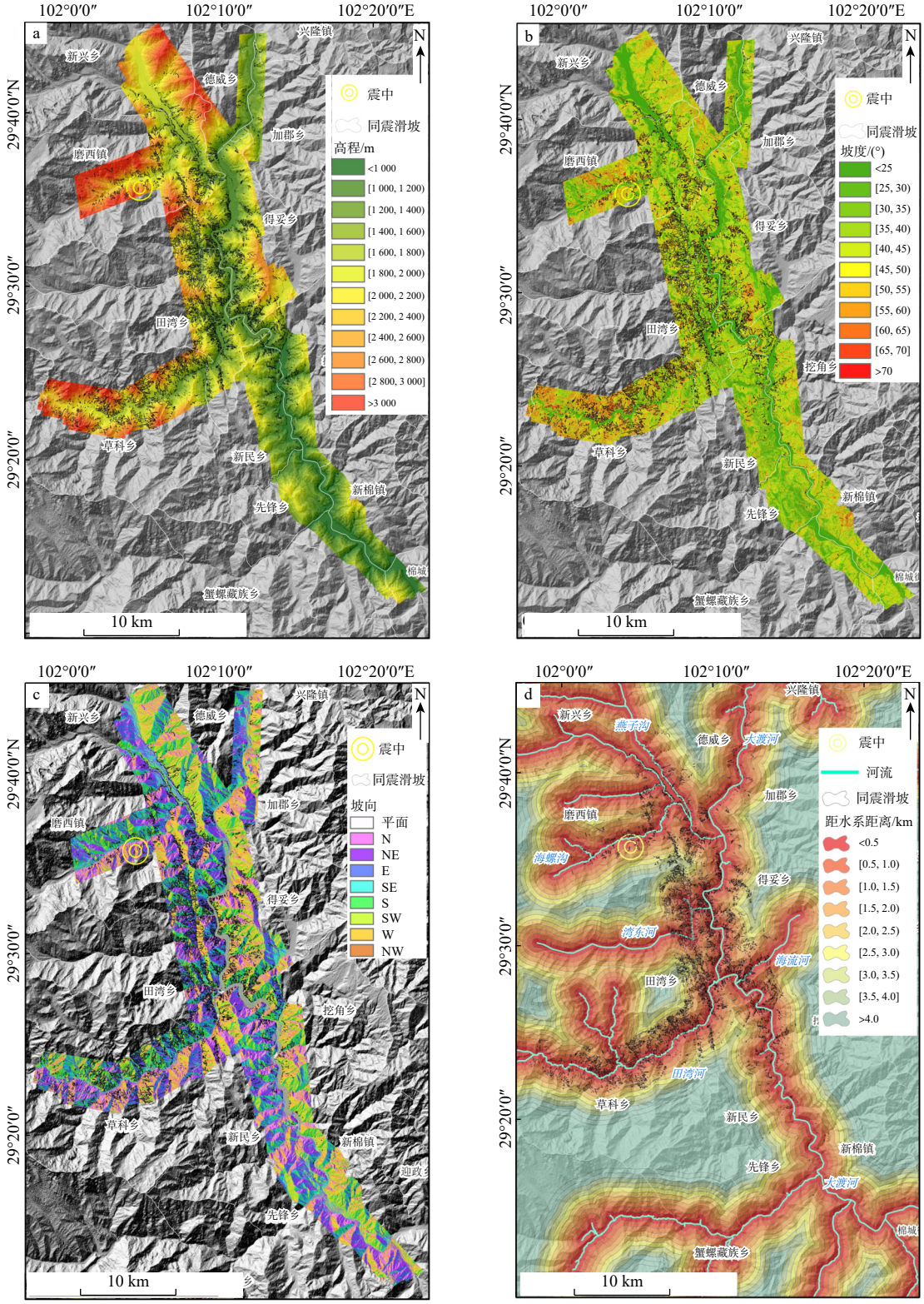
因子类型	因子名称	因子分级
地形地貌	高程/m	< 1 000, [1 000, 1 200), [1 200, 1 400), [1 400, 1 600), [1 600, 1 800), [1 800, 2 000), [2 000, 2 200), [2 200, 2 400], [2 400, 2 600), [2 600, 2 800), [2 800, 3 000], > 3 000
	坡度/（°）	< 25, [25, 30), [30, 35), [35, 40), [40, 45), [45, 50), [50, 55), [55, 60), [60, 65), [65, 70], > 70
	坡向	平面，N, NE, E, SE, S, SW, W, NW
	距水系距离/km	< 0.5, [0.5, 1.0), [1.0, 1.5), [1.5, 2.0), [2.0, 2.5), [2.5, 3.0), [3.0, 3.5), [3.5, 4.0], > 4.0
	距道路距离/km	< 0.5, [0.5, 1.0), [1.0, 1.5), [1.5, 2.0), [2.0, 2.5), [2.5, 3.0], > 3.0
地质参数	地层岩性	三叠系，二叠系，泥盆系，第四系，基性岩，超基性岩，花岗岩，闪长岩，其他
地震参数	距发震断层距离/km	[0, 1), [1, 2), [2, 3), [3, 4), [4, 5), [5, 6), [6, 7), [7, 8), [8, 9), [9, 10], [10, 11), [11, 12), [12, 13), [13, 14), [14, 15], > 15
	PGA/*g*	< 0.3, [0.3, 0.4), [0.4, 0.5), [0.5, 0.6), [0.6, 0.7], > 0.7

工提取得到。

3.1 与地形因子相关的滑坡分布规律

由图 6a, 7a 可知，此次地震滑坡面积随高程的增加呈现先增加后降低的趋势。地震滑坡主要分布在高程 [1 200, 2 400)m，占滑坡总面积的 79.93%，其中以高程 [1 600, 1 800)m 范围内发育最高，占滑坡总面积的 15.77%，该高程主要对应山的中下部，是宽谷向峡谷的过渡区，具有明显放大效应[33]（图 5）。

对于坡度来说，滑坡主要集中在坡度 [30°, 60°) 内，占滑坡总面积的 77.37%，特别是坡度在 [40°, 45°) 范围内发育滑坡面积最高，占滑坡总面积的 17.5%。此外，对于<45°的边坡，滑坡面积随坡度增加而增加，



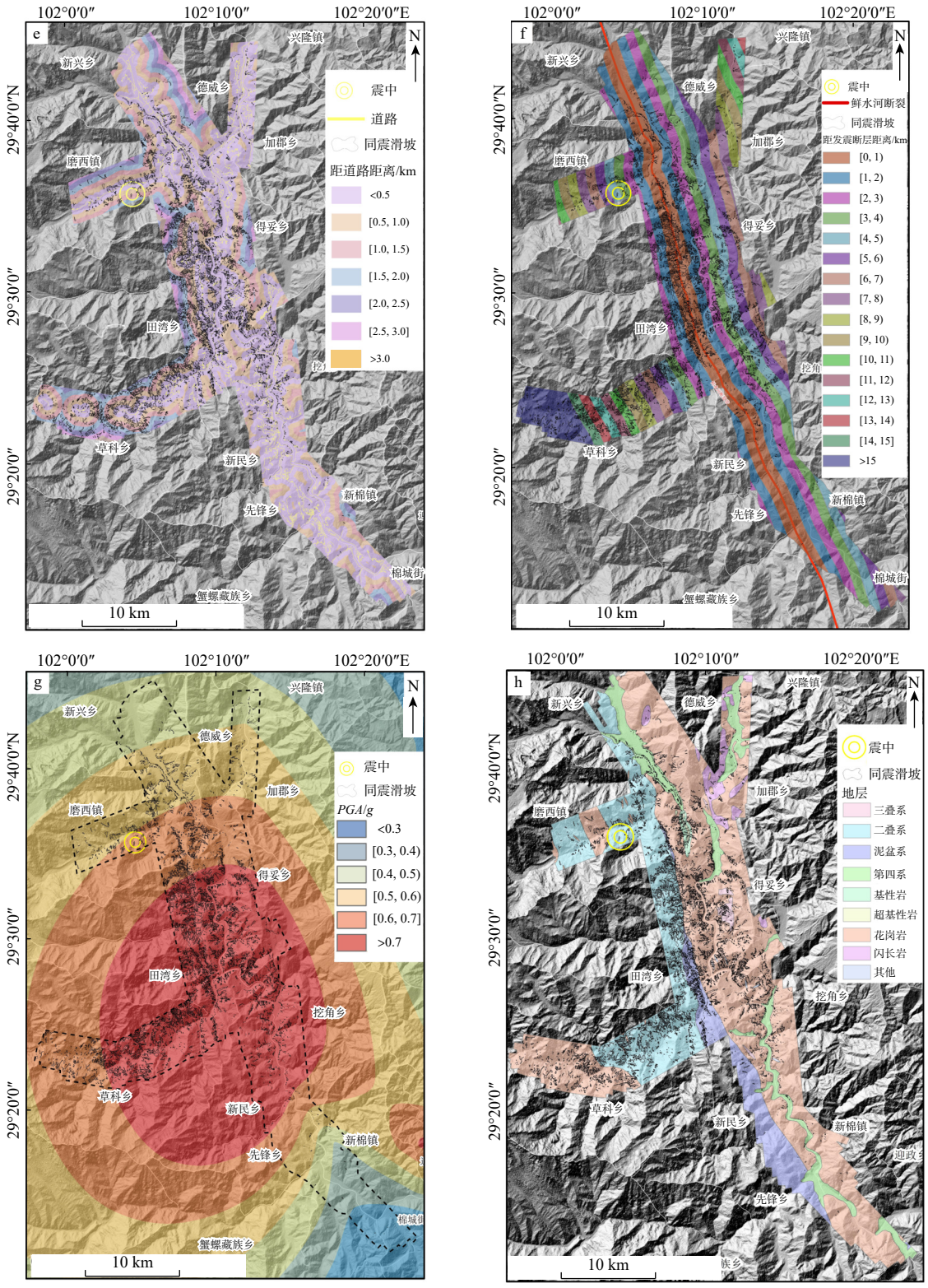


图 6　地震滑坡与地形 (a ~ e)、地震 (f，g) 以及地质 (h) 因子关系分布图

Fig. 6　Distribution of relationship between earthquake-induced landslide and topographic (a-e), earthquake (f, g) and geology (h) factors

而对于≥45°的陡峭边坡，滑坡面积随坡度增大反而呈现减小趋势(图 7b)。根据图 6c 坡向分布显示，此次地震滑坡主要分布在 E、SE 向，分别占总灾害面积的 16.54% 和 15.08%。

由图 6d 的水系分布图明显可见，此次泸定地震触发的滑坡在区域分布上的显著特征就是沿大渡河

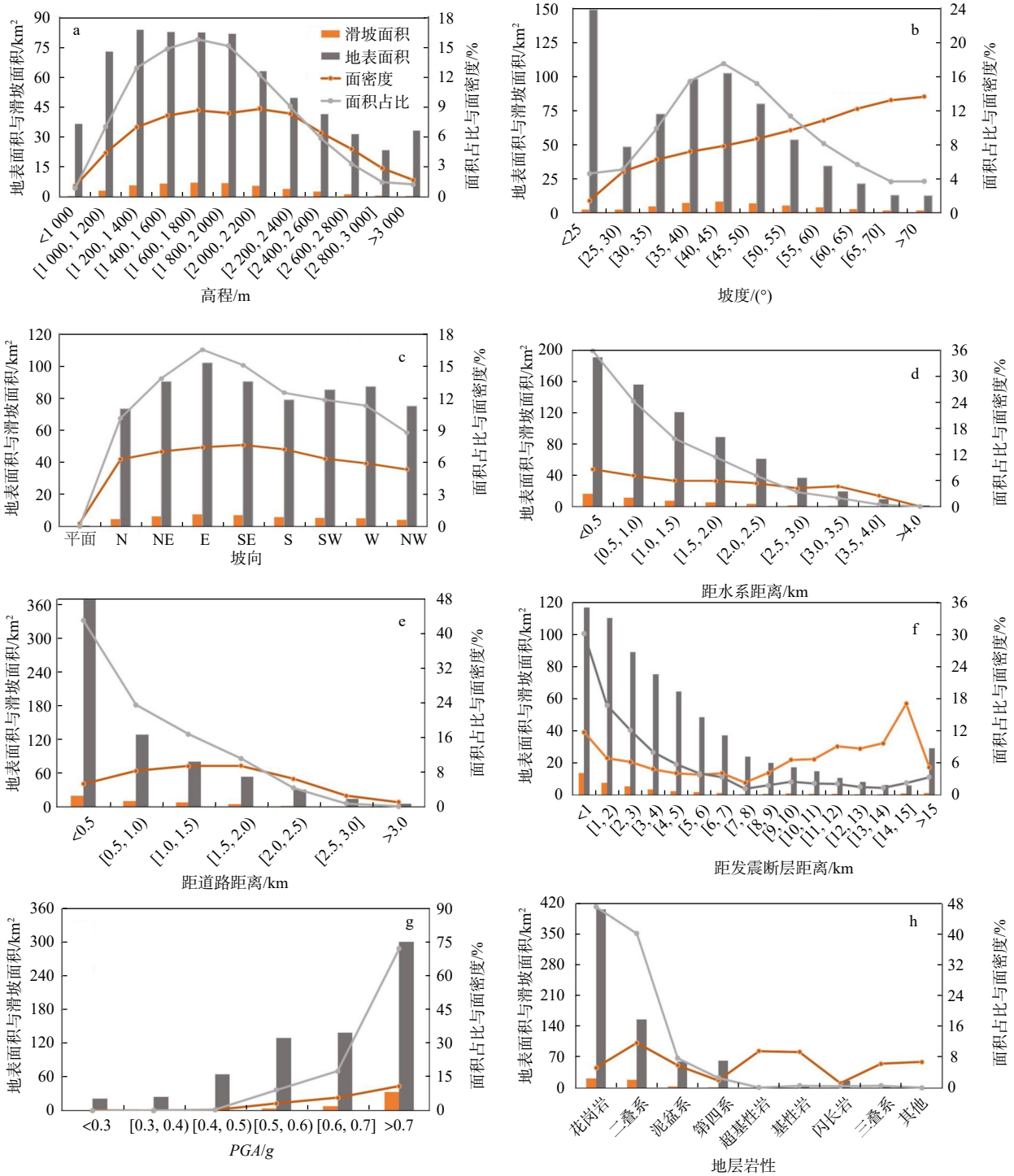


图 7　地震滑坡与地形 (a ~ e)、地震 (f，g) 以及地质 (h) 因子关系统计图

Fig. 7　Statistical plot of the relationship between earthquake-induced landslide and topographic (a−e), earthquake (f, g) and geology (h) factors

及其支流呈“线状”分布，而道路的开挖相当于改变了原始的地形地貌条件，对地质灾害的发生具有促进作用。由图 7d, e 可知，研究区内地震滑坡分布与距水系及道路距离均呈负相关关系，多分布在距离水系 2.0 km 范围内，占总滑坡面积的 87.06%，其中 35.83% 的滑坡面积分布在距离水系 0.5 km 范围内，表明深切河谷两岸受地震作用更强烈，66.7% 的滑坡面积多分布在距道路 1.0 km 范围内，表明道路的开挖对地震的响应较为强烈。

3.2　与地震因子相关的滑坡分布规律

不同学者研究表明，地震诱发滑坡的空间分布主要受地震因子控制[34-36]。由图 7f, g 可知，本次地

震滑坡发育面积随距发震断层距离增大而显著降低，主要集中在距发震断层 4 km 范围内，占滑坡总面积的 67.43%，且在距发震断层 1 km 范围内最为发育，此现象与 2008 年汶川地震、2013 年芦山地震以及 2017 年九寨沟地震类似。$PGA \geqslant 0.6\ g$ 的区域包含滑坡面积为 41.08 km^2，占滑坡总面积的 90.1%，其中 72.41% 滑坡面积主要集中在高地震动加速度（即 $PGA>0.7\ g$）范围内，说明滑坡的发生与地震动加速度密切相关。

3.3　与地层岩性相关的滑坡分布规律

滑坡的发生多取决于地层岩性的类型、软硬程度等。研究区内的地层岩性可大体分为三叠系、二叠系、泥盆系、第四系、基性岩、超基性岩、花岗岩、闪长岩、其他共 9 类。由图 6h 和图 7h 可知，研究区主要地表地层为花岗岩和二叠系板岩、片岩，均为较坚硬岩石，使得地震滑坡多分布于花岗岩类和二叠系板岩、片岩中，分别占总面积的 47.22% 和 40.29%。

4　分析

4.1　与历史地震滑坡特征对比分析

通过收集全球地震数据显示，地震诱发滑坡数量与地震震级遵循 $y = 6.545\ 8e^{0.960\ 3x}$ 的指数分布特征，同样地震诱发滑坡面积与震级遵循 $y = 9\times10^{-7}e^{2.458\ 5x}$ 的指数分布特征[37]。由图 8a，b 可知，此次泸定地震诱发的滑坡数量和面积基本符合指数分布特征，且均位于拟合线上方，数量和面积均比 2013 年芦山地震[13]、2014 年玉树地震[38]、2014 年鲁甸地震[39]、2017 年九寨沟地震[11] 以及 2022 年芦山地震[17] 高，但相比于 2008 年汶川地震[10]，其滑坡数量和面积明显偏低。

4.2　与泸定地震其他文献结果的对比分析

截至 2023 年 6 月，通过统计已有泸定 6.8 级地震诱发滑坡的研究成果[1-3, 21, 23, 26, 40] 发现，本研究识别的滑坡数量、总面积、最小面积及高程等特征与其他文献存在差异。如表 2 所示，本研究识别的滑坡数量相对于其他文献偏多，滑坡最小面积相对较小，总面积相对较大。

分析原因主要为：①解译的基础数据不同。本研究所用数据为 0.2 m 分辨率的光学影像，搭配 0.5 m 分辨率的 DEM 数据进行补充解译，而其他文献多基于 2 ~ 3 m 分辨率的高分卫星遥感影像，因此本研究解译的最小滑坡面积远远小于其他文献；②解译的环境的不同。本研究是基于有人机机载 LiDAR 获

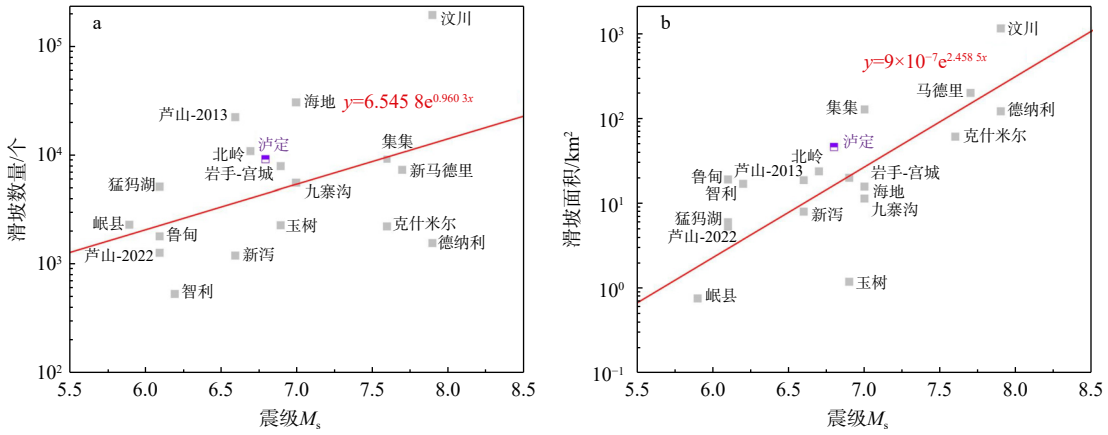


图 8　不同地震事件诱发的滑坡对比

Fig. 8　Comparison of landslides induced by different earthquake events

表 2　不同文献得到的泸定地震相关结果对比

Table 2　Comparison of Luding earthquake related results from different documents

文献来源	研究区面积/km^2	滑坡数量/个	滑坡总面积/km^2	滑坡最小面积/m^2	高程/m	坡度/(°)	坡向	距发震断层距离/km	地层岩性
文献[1-2]	419.2	3633	13.78	49	1200 ~ 1400	40 ~ 45	E	1	花岗岩
文献[3]	2600	4528	28.1	/	1200 ~ 1500	40 ~ 45	/	1	花岗岩
文献[21]	3056	2692	47	220.77	1800 ~ 2000	40 ~ 45	E	1	砂岩板岩
文献[25]	19000	8685	30.7	/	/	/	/	2	/
文献[26]	4393	5007	17.36	65	1300 ~ 1500	40 ~ 50	E	1	花岗岩
文献[40]	166	513	8.88	/	1400 ~ 2200	40 ~ 45	E、SE	3	/
本研究	682	9248	46	15.5	1600 ~ 1800	40 ~ 45	E	0.5	花岗岩

取的 0.5 m 分辨率的数字高程模型建立的三维解译环境进行解译，可以较为清楚地根据滑源区区分不同的滑坡边界，而其他文献多基于 5 m 分辨率的数字高程模型建立三维解译环境或直接基于光学影像进行二维解译，且本研究还解译了植被层下"裂而未动"的地震滑坡，因此本研究的滑坡数量相对其他文献偏高；③数据获取时间及研究区大小的不同。本研究数据来源时间是 2022 年 9 月 13 日之后通过有人机航飞获得，相对地震发生时间较远，而其他文献多是地震发生后的当天(即 2022 年 9 月 5 日)或地震后一周以内(即 2022 年 9 月 10 日之前)，因此尽管研究范围相对偏小，但滑坡总面积相对偏大。

5 结 论

(1)此次泸定地震事件在约 680 km^2 的研究区内引发了 9248 处滑坡，以中、小型滑坡为主，滑坡面积密度最高集中在鲜水河断裂、大渡河断裂以及锦屏山断裂 3 条断裂交汇处；滑坡总面积约 45.57 km^2，平均滑坡面积可达 4941 m^2，且滑坡面积在 100～300 m^2 范围内尤为发育。

(2)通过对地形、地震及地质因素的 8 个因子进行分析发现，本次地震滑坡的分布格局同 2008 年汶川地震相似，滑坡分布主要受 *PGA* 以及断裂构造影响，多分布在 $PGA \geqslant 0.6\ g$，距发震断裂两侧 1 km 范围内；此外滑坡的发育还与距水系及道路距离呈负相关，说明河流下切及道路开挖对地震的响应明显；局部受地形因素影响主要发育在高程 1200～2400 m、坡度 30°～60°、坡向 E 及 SE 向区域，且地层岩性多为硬岩。

(3)通过与历史地震对比发现，此次泸定地震的滑坡数量及面积与震级关系基本遵循指数分布；同时与已有泸定地震的文献对比发现，尽管研究区最小滑坡面积相对其他文献偏小，但得到的地震滑坡数量较多，最小面积较小，总面积相对较大。

所有作者声明不存在利益冲突。

The authors declare that no competing interests exist.

参考文献：

[1] 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 X M, WANG X, DAI L X, 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. (in Chinese with English abstract)

[2] 王欣，方成勇，唐小川，等. 泸定 M_S 6.8 地震诱发滑坡应急评价研究 [J]. 武汉大学学报(信息科学版)，2023，48(1)：25-35.
WANG X, FANG C Y, TANG X C, et al. Research on emergency evaluation of landslides induced by the Luding M_S 6.8 earthquake[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2023, 48(1): 25-35. (in Chinese with English abstract)

[3] ZHAO B, HU K H, YANG Z J, et al. Geomorphic and tectonic controls of landslides induced by the 2022 Luding earthquake[J]. Journal of Mountain Science, 2022, 19(12): 3323-3345.

[4] 魏旭，彭志忠，刘兴臣，等. 泸石高速公路沿线历史地震诱发滑坡遥感调查及发育分布规律 [J]. 地质科技通报，2024，43(2)：386-396.
WEI X, PENG Z Z, LIU X C, et al. Remote sensing investigation and development distribution of historical earthquake-induced landslides along Lushi Expressway[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2024, 43(2): 386-396. (in Chinese with English abstract)

[5] 李传友，孙凯，马骏，等. 四川泸定 6.8 级地震：鲜水河断裂带磨西段局部发起、全段参与的一次复杂事件 [J]. 地震地质，2022，44(6)：1648-1666.
LI C Y, SUN K, MA J, et al. The 2022 M_S 6.8 Luding earthquake: A complicated event by faulting of the moxi segment of the Xianshuihe fault zone[J]. Seismology and Geology, 2022, 44(6): 1648-1666. (in Chinese with English abstract)

[6] 邓建辉，韦晓，戴仕贵，等. 泸定地震诱发灾害特征分析 [J]. 工程科学与技术，2024，56(1)：117-126.
DENG J H, WEI X, DAI S G, et al. Characterization analysis of triggered disasters in the Luding earthquake[J]. Advanced Engineering Sciences, 2024, 56(1): 117-126. (in Chinese with English abstract)

[7] 孙东，杨涛，曹楠，等. 泸定 M_S 6.8 地震同震地质灾害特点及防控建议 [J]. 地学前缘，2023，30(3)：476-493.
SUN D, YANG T, CAO N, et al. Characteristics and mitigation of coseismic geohazards associated with the Luding M_S 6.8 earthquake[J]. Earth Science Frontiers, 2023, 30(3): 476-493. (in Chinese with English abstract)

[8] 唐辉明. 重大滑坡预测预报研究进展与展望 [J]. 地质科技通报，2022，41(6)：1-13.
TANG H M. Advance and prospects of major landslides prediction and forecasting[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(6): 1-13. (in Chinese with English abstract)

[9] 张佳佳，陈龙，李元灵，等. 2022 年 9 月 5 日泸定 M_S 6.8 地震的同震地质灾害发育特征及主控因素分析 [J]. 地震学报，2023，45(2)：167-178.
ZHANG J J, CHEN L, LI Y L, et al. Development characteristics and controlling factors of coseismic geohazards triggered by the Luding M_S 6.8 earthquake occurred on September 5, 2022[J]. Acta Seismologica Sinica, 2023, 45(2): 167-178. (in Chinese with English abstract)

[10] 许冲，徐锡伟，吴熙彦，等. 2008 年汶川地震滑坡详细编目及其空间分布规律分析 [J]. 工程地质学报，2013，21(1)：25-44.
XU C, XU X W, WU X Y, et al. Detailed catalog of landslides

triggered by the 2008 Wenchuan earthquake and statistical analyses of their spatial distribution[J]. Journal of Engineering Geology, 2013, 21(1): 25-44. (in Chinese with English abstract)

[11] 许冲. 2008年汶川地震滑坡编录及其量化成果 [J]. 地质学报, 2013, 87(增刊1): 307-308.
XU C. Landslide catalogue of the 2008 Wenchuan earthquake and its quantitative results[J]. Acta Ceologica Sinica, 2013, 87(S1): 307-308. (in Chinese with English abstract)

[12] 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 Y P. Researches on the geo-hazards triggered by Wenchuan earthquake, Sichuan[J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(4): 433-444. (in Chinese with English abstract)

[13] 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.

[14] 张佳佳, 李海兵, 赵国华, 等. 2013年四川芦山地震次生山地灾害发育规律 [J]. 地质通报, 2015, 34(5): 898-907.
ZHANG J J, LI H B, ZHAO G H, et al. Features of secondary mountain hazards triggered by the 2013 Lushan earthquake, Sichuan Province[J]. Geological Bulletin of China, 2015, 34(5): 898-907. (in Chinese with English abstract)

[15] LING S X, SUN C W, LI X N, et al. Characterizing the distribution pattern and geologic and geomorphic controls on earthquake-triggered landslide occurrence during the 2017 M_s 7.0 Jiuzhaigou earthquake, Sichuan, China[J]. Landslides, 2021, 18(4): 1275-1291.

[16] 许冲, 王世元, 徐锡伟, 等. 2017年8月8日四川省九寨沟 M_s7.0地震触发滑坡全景 [J]. 地震地质, 2018, 40(1): 232-260.
XU C, WANG S Y, XU X W, et al. A panorama of landslides triggered by the 8 August 2017 Jiuzhaigou, Sichuan M_s 7.0 earthquake[J]. Seismology and Geology, 2018, 40(1): 232-260. (in Chinese with English abstract)

[17] ZHAO B, LI W L, SU L J, et al. Insights into the landslides triggered by the 2022 Lushan M_s6.1 earthquake: Spatial distribution and controls[J]. Remote Sensing, 2022, 14(17): 4365.

[18] 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, 30(3): 729-739.
FAN X M, FANG C Y, DAI L X, et al. Near real time prediction of spatial distribution probability of earthquake-induced landslides: Taking the Lushan earthquake on June 1, 2022 as an example[J]. Journal of Engineering Geology, 2022, 30(3): 729-739. (in Chinese with English abstract)

[19] HAKAN T, LUIGI L. Completeness index for earthquake-induced landslide inventories[J]. Engineering Geology, 2020, 264: 105331.

[20] HUANG Y D, XIE C C, LI T, et al. An open-accessed inventory of landslides triggered by the M_s 6.8 Luding earthquake, China on September 5, 2022[J]. Earthquake Research Advances, 2023, 3(1): 37-44.

[21] 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, 49(6): 1-12.
TIE Y B, ZHANG X Z, LU J Y, 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, 49(6): 1-12. (in Chinese with English abstract)

[22] 陈博, 李振洪, 黄武彪, 等. 2022年四川泸定 M_w6.6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 B, LI Z H, HUANG W B, 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. (in Chinese with English abstract)

[23] 张宪政, 铁永波, 李光辉, 等. 四川泸定 M_s 6.8级地震区湾东河流域泥石流活动性预测 [J]. 地质力学学报, 2022, 28(6): 1035-1045.
ZHANG X Z, TIE Y B, LI G H, et al. Characteristics and risk assessment of debris flows in the Wandong catchment after the M_s 6.8 Luding earthquake[J]. Journal of Geomechanics, 2022, 28(6): 1035-1045. (in Chinese with English abstract)

[24] XIONG J, CHEN H Y, ZENG L, et al. Coseismic landslide sediment increased by the "9.5" Luding earthquake, Sichuan, China[J]. Journal of Mountain Science, 2023, 20(3): 624-636.

[25] ZHANG J Q, YANG Z J, MENG Q K, et al. Distribution patterns of landslides triggered by the 2022 M_s 6.8 Luding earthquake, Sichuan, China[J]. Journal of Mountain Science, 2023, 20(3): 607-623.

[26] XIAO Z K, XU C, HUANG Y D, et al. Analysis of spatial distribution of landslides triggered by the M_s 6.8 Luding earthquake in China on September 5, 2022[J]. Geoenvironmental Disasters, 2023, 10(1): 3.

[27] 张雨, 明冬萍, 赵文祎, 等. 基于高分光学卫星影像的泸定地震型滑坡提取与分析 [J]. 自然资源遥感, 2023, 35(1): 161-170.
ZHANG Y, MING D P, ZHAO W Y, et al. The extraction and analysis of Luding earthquake-induced landslide based on high-resolution optical satellite images[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2023, 35(1): 161-170. (in Chinese with English abstract)

[28] 邓博, 张会, 柏君, 等. 利用机载LiDAR的深圳市斜坡类地质灾害危险性评价 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(8): 1377-1391.
DENG B, ZHANG H, BAI J, et al. Hazard evaluation of the slope based on airborne LiDAR data in Shenzhen, China[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2024, 49(8): 1377-1391. (in Chinese with English abstract)

[29] YUSOFF H H M, RAZAK K A, YUEN F, et al. Mapping of post-event earthquake induced landslides in Sg. Mesilou using LiDAR[J]. IOP Conference Series(Earth and Environmental Science), 2016, 37: 012068.

[30] LIU W, YAMAZAKI F, MARUYAMA Y. Detection of earthquake-induced landslides during the 2018 Kumamoto earthquake using multitemporal airborne lidar data[J]. Remote Sensing, 2019, 11(19): 2292.

[31] RUIZ P, CARR M J, ALVARADO G E, et al. Coseismic landslide susceptibility analysis using LiDAR data PGA attenuation and GIS: The case of Poás volcano, costa rica, central America[M]. Berlin,

Germary: Springer International Publishing, 2019: 79-118.

[32] 孟华君, 乔建平, 田宏岭, 等. 小区域地震地质灾害空间分布特点分析方法探讨 [J]. 工程地质学报, 2014, 22(1): 14-23.
MENG H J, QIAO J P, TIAN H L, et al. Method discussion on spatial distribution analysis of earthquake induced geohazards in small region[J]. Journal of Engineering Geology, 2014, 22(1): 14-23. (in Chinese with English abstract)

[33] 赵方彬, 王运生, 寇瑞斌, 等. 四川珙县下软上硬山岭地貌斜坡地震动响应特征 [J]. 地质科技通报, 2023, 42(2): 279-287.
ZHAO F B, WANG Y S, KOU R B, et al. Seismic dynamic response characteristics of the lower soft and upper hard mountain slopes in Gongxian, Sichuan[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(2): 279-287. (in Chinese with English abstract)

[34] 王佳运, 张成航, 高波, 等. 玉树震区地质灾害分布规律与发育特征 [J]. 工程地质学报, 2013, 21(4): 508-515.
WANG J Y, ZHANG C H, GAO B, et al. Distribution regularity and development characteristics of geohazards in Yushu earthquake area[J]. Journal of Engineering Geology, 2013, 21(4): 508-515. (in Chinese with English abstract)

[35] 杨秀元, 姚亚辉, 田运涛. 云南鲁甸“8·3”震后地质灾害发育特征与分布规律 [J]. 科学技术与工程, 2018, 18(24): 16-21.
YANG X Y, YAO Y H, TIAN Y T. Development law and distribution characteristics of geological hazards after "8·3" earthquake in Ludian, Yunnan[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(24): 16-21. (in Chinese with English abstract)

[36] 蒋涛, 崔圣华. 川滇地区典型强震诱发滑坡分布对比研究 [J]. 科学技术与工程, 2022, 22(31): 13662-13671.
JIANG T, CUI S H. Comparative study on the distribution of typical strong earthquake-induced landslides in Sichuan and Yunnan regions[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(31): 13662-13671. (in Chinese with English abstract)

[37] XU C. Preparation of earthquake-triggered landslide inventory maps using remote sensing and GIS technologies: Principles and case studies[J]. Geoscience Frontiers, 2015, 6(6): 825-836.

[38] 许冲, 徐锡伟, 于贵华. 玉树地震滑坡分布调查及其特征与形成机制 [J]. 地震地质, 2012, 34(1): 47-62.
XU C, XU X W, YU G H. Study on the characteristics, mechanism, and spatial distribution of Yushu earthquake triggered landslides[J]. Seismology and Geology, 2012, 34(1): 47-62. (in Chinese with English abstract)

[39] ZOU Y, QI S W, GUO S F, et al. Factors controlling the spatial distribution of coseismic landslides triggered by the M_w 6.1 Ludian earthquake in China[J]. Engineering Geology, 2022, 296: 106477.

[40] 刘甲美, 王涛, 杜建军, 等. 四川泸定 M_s 6.8 级地震诱发崩滑灾害快速评估 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(2): 84-94.
LIU J M, WANG T, DU J J, et al. Emergency rapid assessment of landslides induced by the Luding M_s 6.8 earthquake in Sichuan of China[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(2): 84-94. (in Chinese with English abstract)

Summary for ""9·5"泸定地震人口密集区域地震诱发滑坡空间分布规律"

Spatial distribution of earthquake-induced landslide in densely populated area of the Luding 9·5 earthquake

SONG Jingyuan[1], LIU Yang[2*], DONG Xiujun[1], YUAN Yangjie[1]

1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. Department of Natural Resources of Sichuan Province, Chengdu 610072, China

First author, E-mail: 2990732818@qq.com

* Corresponding author, E-mail: 274597918@qq.com

Abstract: [**Objective**] The spatial distribution analysis of earthquake-induced landslides offers critical insights for identifying potential geological disasters in affected regions, which is fundamental for informing post-disaster reconstruction planning, relocation strategies, site selection processes, and the development of effective geological disaster mitigation measures. [**Methods**] Taking the earthquake that struck Luding County, Ganzi, Sichuan Province, on September 5, 2022, as a case study, earthquake-induced landslides were initially identified using artificial visual 3D remote sensing data. This analysis was based on an optical image (DOM) with a resolution of 0.2 meter and a digital elevation model (DEM) with a resolution of 0.5 meter, both acquired post-earthquake. Field investigations and subsequent corrections were performed to validate and finalize the landslide inventory. Subsequently, the relationships between the distribution of earthquake-induced landslides and various geological factors, including topography, geological structures, and earthquake parameters, were systematically analyzed. [**Results**] ①The Luding earthquake triggered 9 248 landslides, covering an area of approximately 680 km^2, with the majority classified as small- to medium-sized. The highest landslide density was observed at the tectonic intersection of the Xianshuihe fault, Daduhe fault, and Jinping mountain fault. The cumulative landslide area reached approximately 45.57 km^2, with an average landslide area of 4 941 m^2. ② The spatial distribution of landslide in the earthquake-affected region is predominantly controlled by *PGA* and fault structures, with the majority of landslides concentrated in areas where *PGA* exceeds 0.6 *g* and within 1 km on either side of the seismogenic fault. Furthermore, landslide occurrence exhibits a negative correlation with proximity to water systems and roads. At a local scale, topographic factors significantly influence landslide distribution, with the highest frequency observed at elevations ranging from 1 200 to 2 400 m, on slopes inclined between 30° and 60°, and predominantly facing east or southeast. Additionally, landslides are more prevalent in areas underlain by hard rock strata. ③ The number and area of landslides exhibit an exponential relationship with the magnitude of the Luding earthquake. Leveraging high-precision data, our analysis identified a significantly higher number of earthquake-induced landslides compared to previous studies, with a reduced minimum landslide area and an increased total affected area. [**Conclusion**] The findings of this study have been implemented to support post-disaster recovery and reconstruction efforts in the Luding earthquake-affected region, providing a scientific basis for enhancing resilience and reducing future earthquake risks.

Key words: Luding earthquake; earthquake-induced landslide; airborne LiDAR; distribution law; densely populated area

Received: 2023-11-03; Revised: 2023-12-05; Accepted: 2023-12-05

doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20230619