移动阅读

铁永波，高云建，张宪政，等，2025. 西藏定日县 M_S6.8 级地震区地质灾害发育规律与减灾对策研究[J]. 沉积与特提斯地质，45(1)：212−224. doi: 10.19826/j.cnki.1009-3850.2025.01002

TIE Y B，GAO Y J，ZHANG X Z，et al.，2025. Study on the development laws and mitigation of geological hazards in Dingri M_S 6.8 earthquake region, Xizang Autonomous Region[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology，45(1)：212−224. doi: 10.19826/j.cnki.1009-3850.2025.01002

西藏定日县 M_S6.8 级地震区地质灾害发育规律与减灾对策研究

铁永波[1,2,3]，高云建[1,2,3]，张宪政[1,2,3]，史安文[1,2,3]，黄文洁[2,4]，秦雅东[1,2,3]，李宗亮[1,2,3]，董 磊[5]，宁志杰[1,2,3]

（1. 中国地质调查局成都地质调查中心（西南地质科技创新中心），四川 成都 610218；2. 自然资源部地质灾害风险防控工程技术创新中心，四川 成都 610000；3. 自然资源部成都地质灾害野外科学观测研究站，四川 成都 610000；4. 中国地质调查局探矿工艺研究所，四川 成都 611734；5. 西藏自治区地质矿产勘查开发局第二地质大队，西藏 拉萨 850000）

摘要：2025 年 1 月 7 日，西藏自治区定日县发生 M_S 6.8 级地震，诱发同震地质灾害并导致部分已有地质灾害发生变形。为深入研判地质灾害发展趋势及潜在风险，基于现场应急调查获取的一手资料和区域地质资料综合研究，分析了此次地震地质灾害发育特征与分布规律并提出了防灾减灾对策。结果表明：（1）震区震前发育有 868 处地质灾害点，灾害规模以小型和中型为主，此次地震新增同震地质灾害 91 处，主要以滑坡、泥石流、崩塌为主；（2）地震还导致 107 处震前地质灾害点发生进一步变形；（3）此次地震虽未引发大量的同震地质灾害，但仍会对高位山体、冰川、冰湖等的稳定性造成一定影响，需进一步开展详细调查评价，并深化砂土液化成因机制及其对城镇和工程建设带来的潜在风险。研究成果可为定日县震区地质灾害排查及灾后重建规划提供科学参考。

关 键 词：定日县地震；地质灾害发育规律；控灾条件；防灾建议

中图分类号：P694 **文献标识码：**A

Study on the development laws and mitigation of geological hazards in Dingri M_S 6.8 earthquake region, Xizang Autonomous Region

TIE Yongbo[1,2,3]，GAO Yunjian[1,2,3]，ZHANG Xianzheng[1,2,3]，SHI Anwen[1,2,3]，HUANG Wenjie[2,4]，QIN Yadong[1,2,3]，LI Zongliang[1,2,3]，DONG Lei[5]，NING Zhijie[1,2,3]

（1. *Chengdu Center, China Geological Survey* (*Geosciences Innovation Center of Southwest China*), *Chengdu* 610218, *China*；2. *Technology Innovation Center for Risk Prevention and Mitigation of Geohazards, Ministry of Natural Resources, Chengdu* 610000, *China*；3. *Observation and Research Station of Chengdu Geological Hazards, Ministry of Natural Resources, Chengdu* 610000, *China*；4. *Exploration Technology Research Institute of China Geological Survey, Chengdu* 611734, *China*；5. *The*

收稿日期：2025-01-20；**改回日期：**2025-01-22；**责任编辑：**黄春梅

作者简介：铁永波（1979—），博士，教授级高级工程师，博士生导师，主要从事地质灾害形成机理与防治研究。E-mail：tyongbo@mail.cgs.gov.cn

资助项目：西藏重点研发计划项目（XZ202401ZY0029）；西藏自治区自然科学基金重点项目（XZ202401ZR0073）；中国地质调查局公益性地质调查项目（DD20230086）

Second Geological Brigade of Xizang Autonomous Region Geological and Mineral Exploration and Development Bureau, Lhasa 850000, *China*）

Abstract: On January 7th, 2025, an M_S 6.8 earthquake occurred in Dingri County, Xizang Autonomous Region, triggering coseismic geological hazards and causing deformation of some existing geological hazards. In order to deeply analyze their development trend and potential risks, based on primary data obtained from on-site emergency investigation and comprehensive studies of regional geological data, this paper studies the development and distribution characteristics as well as disaster prevention and reduction countermeasures of the geological disasters in the earthquake area. The results show that 868 geological disaster sites, including landslides, debris flows, collapses and ground cracks, were identified before the earthquake, and this number increased by 91 after the earthquake. The scales of the disasters were mainly small and medium; 107 geological disaster sites were significantly or slightly changed due to the earthquake. It is believed that, although the earthquake did not cause a large number of coseismic geological hazards, it will still have a certain impact on the stability of high mountains, glaciers, glacial lakes, etc. It is necessary to further carry out detailed investigation and evaluation in the earthquake area, and to pay attention to the research and evaluation of the genetic mechanism of sand liquefaction in the valley area, as well as to investigate the potential risks that may be posed to regional towns and engineering constructions. The research results of this paper can provide a scientific reference for the determination of key areas and objects of geological disaster investigation and post-disaster reconstruction planning in the Dingri County earthquake area.

Key words: earthquake in Dingri County; geological disaster development law; disaster control conditions; disaster prevention suggestions

0　引言

2025 年 1 月 7 日 9 时 5 分, 西藏自治区日喀则市定日县发生 M_S6.8 级地震, 震中位于 28.50°N, 87.45°E, 震源深度 10 km, 最高烈度达到Ⅸ度, Ⅵ度区及以上面积约 23 986 km^2, 共涉及西藏日喀则市定日县、拉孜县、定结县、昂仁县、萨迦县、岗巴县等 6 县 45 个乡镇。地震导致大量房屋倒塌、路基塌方、供水供电设施受损, 截至 2025 年 1 月 9 日, 地震已经造成 126 人遇难, 188 人受伤, 约 6.15 万名群众不同程度受灾, 紧急转移安置 4.75 万人。

受印度板块推挤和地壳增厚等高原隆升效应影响, 青藏高原边界主要以逆冲褶皱和走滑变形为主, 但内部却发生近东西向的伸展变形, 促使高原内部形成一系列呈近南北向和北东向的裂谷及相关的活动正断层, 并构成高原内部的重要控震构造(图 1; 吴中海等, 2015)。第四纪期间, 北北东向伸展构造极为活跃, 发生多次正断层型强震事件, 形成地表破裂、错断地貌、大型滑坡等一系列同震遗迹(殷跃平等, 2014; 吴中海等, 2015; 田浩然等, 2023; Zeng et al., 2020; 李为乐等, 2024; 王运生等, 2023; 许强等, 2025)。本次定日 M_S6.8 级地震发生在青藏高原内部发育的大型东西向伸展构造之一的申扎—定结裂谷附近(张进江等, 2023), 该区主要发育一系列南北走向的正断层, 发震断裂为近南北向延伸的登么错正断层, 兼有一定的走滑分量, 断层活动在地表形成长达 26 km 的地表破裂带, 垂直位错量可达 3 m, 是青藏高原内部东西向伸展构造持续变形的又一次证明。本次地震波及区域为高差巨大的高寒山区, 从低海拔河谷盆地到高海拔冰雪覆盖区, 局部地形高差超过 3 000 m, 该区高陡斜坡发育, 冰川冰湖分布, 发生于这种高寒环境的强震可能直接触发砂土液化、滑坡、崩塌、冰岩碎屑流和冰湖溃决等次生地质灾害(韩金良等, 2009; 殷跃平等, 2011; 李明辉等, 2014; Fan et al., 2019; 铁永波等, 2024); 与此同时, 强烈的地震动会对一定范围内的地质环境造成强烈冲击, 导致震区斜坡岩土体结构劣化, 发生震裂、松弛等变形(张永双等, 2016; 金章东等, 2022; Xi et al., 2024; 高延超等, 2024)。这种岩土体的劣化效应将长期影响震区地质灾害的发生频率。已有研究证明, 地震过后山区崩塌、滑坡和泥石流等地质灾害易发程度及破坏性显著增强, 地表物质侵蚀速率增加, 活跃周期持续数十年之久, 且震后次生地质灾害的群发性和链生效应突出, 规模明显增大, 对震区社会经济的可持续发展造成威胁(Fan et al., 2019; Chen et al., 2020; 铁永波等, 2022a; 范宣梅等, 2022; 铁永波等, 2022b; 熊小辉等, 2024)。因此, 研究本次地震特征及同震地质灾害发育特征, 不仅对震区灾害重建规划与地质灾害防治具有重要指导意义, 而且对于揭

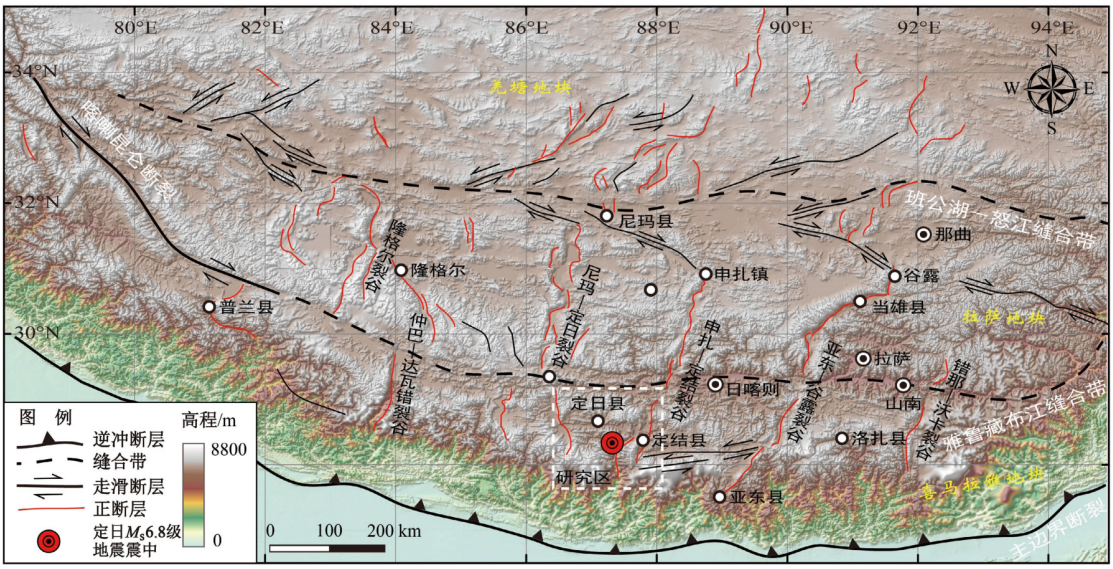

图 1 青藏高原活动断裂分布图（据卞爽等，2021；刘璐等，2022）

Fig. 1 Distribution map of active faults in the Qingzang Plateau (after Bian et al., 2021; Liu et al., 2022)

示晚新生代青藏高原内部南北向构造变形机制、地震周期预测和评价该地区及其周边地区的未来地震危险性具有重大科学意义。

此次研究主要聚焦定日县 M_S6.8 级地震影响区内已有和新增地质灾害分布规律及发育特征，在分析区域地质条件对地质灾害的控灾基础上，提出震区地质灾害的防灾减灾建议，为震区灾后重建规划与地质灾害防治提供科学依据。

1 研究区概况

本次地震震中位于西藏日喀则市定日县措果乡附近，地处青藏高原南部，喜马拉雅山脉北麓，震中及邻近地区山峦起伏、沟谷纵横，平均海拔接近 4 000 m，局部地形高差超过 3 000 m。该区宏观地貌以深大断裂为构造格架，盆岭走向为北北东—南南西向，整体呈现出一系列强烈侵蚀切割的高山与平缓谷地相间地貌，海拔从低到高依次发育河谷地貌、剥蚀低中山地貌、强侵蚀和剥蚀中高山地貌、以冰蚀为主的极高山地貌，其地貌形成过程与整个青藏高原的隆升和演化密切相关。震区地处喜马拉雅山脉北翼，气候类型属于高原温带半干旱季风气候，年降水量 319 mm，降水主要集中在七、八月份；地表水系以朋曲河水系为主，呈近东西向展布，受大气降水和融雪补给，水量充沛，但随季节变化波动较大。此外，震中北部及南部的高海拔地区发育大量冰川、石冰川、冰湖等地貌，为冰岩碎屑流、冰湖溃决、冰川泥石流等地质灾害的发育创造了有利条件。

震区地层岩性复杂，广泛出露奥陶系(O)、志留系(S)、志留系(S)、泥盆系(D)、石炭系(C)、二叠系(P)、三叠系(T)、侏罗系(J)、白垩系(K)和第四系(Q)，其中，以中生界三叠系和侏罗系沉积岩分布最广。震中区域下伏地层主要为三叠系和侏罗系的石灰岩、页岩、砂岩等沉积岩；河谷区域上覆第四系，主要分布在朋曲河及其支流的相邻区域内，包括更新世和全新世湖积相、冲积相及少量洪积相的松散沉积物，为地震时砂土液化的发生提供了物质条件。震中北部发育前寒武系拉轨岗日杂岩，主要为一套花岗片麻岩—黑云斜长片麻岩建造；震中南部同样发育一套前寒武系变质岩，主要包括片岩、片麻岩、石英岩、石英片岩、花岗闪长质–英云闪长质片麻岩等，岩体变质程度较强；侵入岩体主要为新生代花岗岩类，包括二云二长花岗岩、黑云母二长花岗岩、电气石白云母花岗岩等，伴随前震旦系变质岩零星产出。

本次地震位于喜马拉雅地块，雅鲁藏布江缝合带(IYS)以南、藏南拆离系(STDS)以北、尼玛—定日裂谷以东、申扎—定结裂谷以西，其中，南北向延伸的尼玛—定日裂谷和申扎—定结裂谷向北切割雅鲁藏布江缝合带，向南切割藏南拆离系并延入喜马拉雅，导致该地区地质构造复杂，但研究程度相对较低(吴中海等，2015)。晚新生代以来，在南北向挤压和青藏高原整体式隆升的构造背景下，高原内部东西向伸展变形显著，并在高原中南部广泛

形成一系列呈南北走向的大型伸展构造，在构造形迹上表现为南北向的地堑和正断层，地貌上形成南北向延伸的狭长带状平缓谷地(图 1)。地貌单元以正断层为分界线，山脉与谷地之间相对高度差达到数百甚至上千米，并发育一系列断层三角面、错断地貌、大型古滑坡等断裂活动遗迹(Zeng et al., 2020; Wang et al., 2024)。本次定日 M_S6.8 级地震发震断层为登么错正断层，位于尼玛—定日裂谷和申扎—定结裂谷之间，全新世活动性强烈，历史上曾发生过多次 M_S5.0 级以上地震(图 2; 侯丽燕等, 2020; 张小涛等, 2020)。据国家地震台网中心发布数据，自 1900 年以来，该地区距震中 50 km 范围内 M_S3.0 级及以上地震共发生 40 次，其中 3.0～3.9 级地震 25 次，4.0～4.9 级地震 6 次，5.0～5.9 级地震 7 次，6.0～6.9 级地震 2 次。在这些地震中，距本次地震时间最近的地震是 2020 年 3 月 20 日发生于西藏日喀则市的定日 M_S5.9 级地震，位于尼玛—定日裂谷带附近，两次地震震中相距仅 15 km。

2　定日县 M_S6.8 级地震区地质灾害发育规律

2.1　震前地质灾害发育分布特征

根据西藏自治区地质灾害隐患点在库统计数据，此次震区 5 县境内共有地质灾害隐患点 868 处，从空间分布特征上看，震前地质灾害隐患点主要沿河流分布(图 3)。灾害类型以泥石流为主，其中泥石流 634 处、滑坡 104 处、崩塌 130 处(表 1)。灾害规模以小型和中型为主，其中小型 555 处、中型 252 处、大型 60 处、特大型 1 处。

定日县 M_S6.8 级地震影响范围内，震前地质灾害发育，其分布密度与地震烈度无显著相关关系(图 4)。在烈度为Ⅸ度区内，地质灾害点共 8 处，主要分布在长所乡附近。在烈度为Ⅷ度区内，地质灾害点共 15 处，主要分布在曲洛乡附近。在烈度

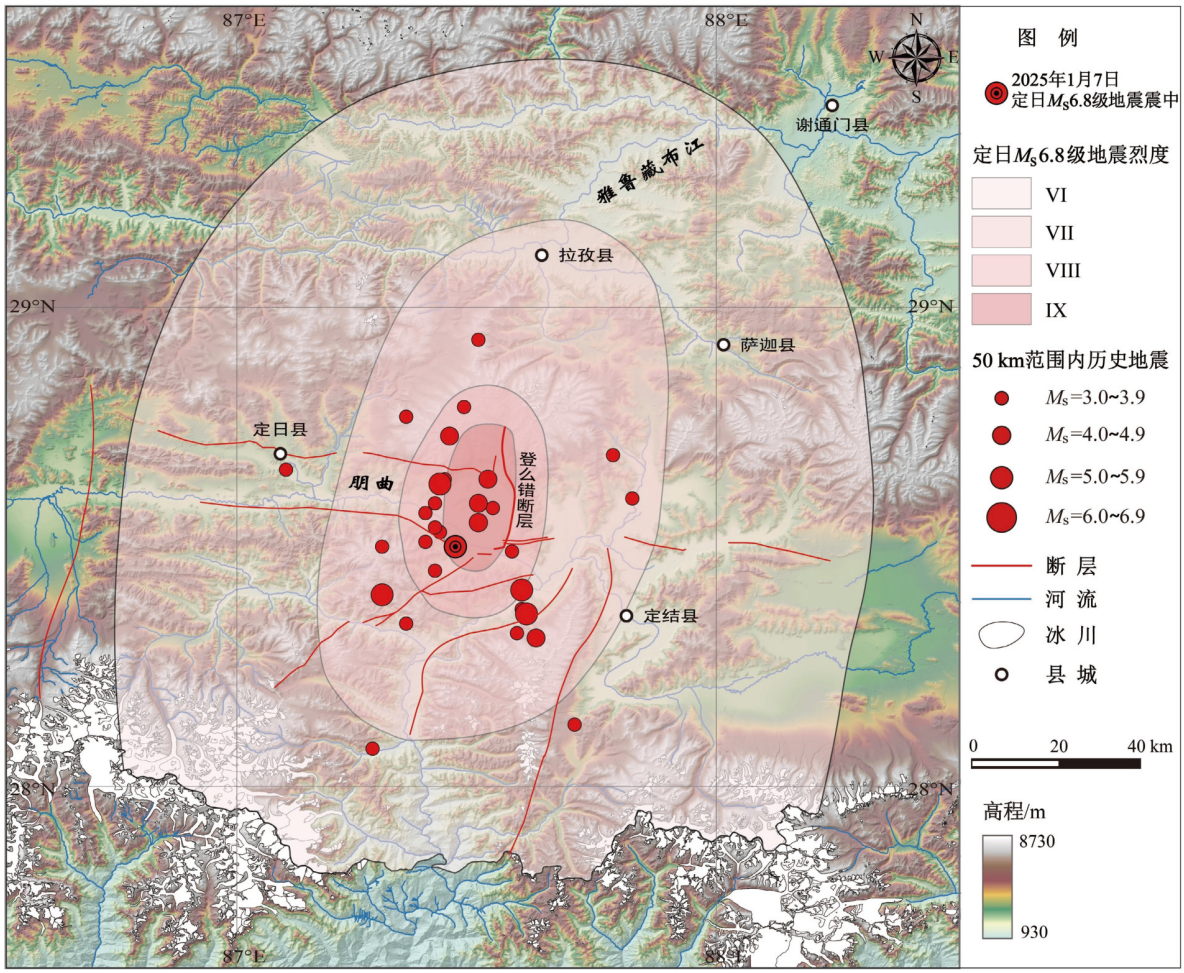

图 2　定日 M_S6.8 级地震烈度及历史地震分布图

Fig. 2　Seismic intensity of the M_S6.8 Dingri earthquake and catalog of the earthquakes around the study area

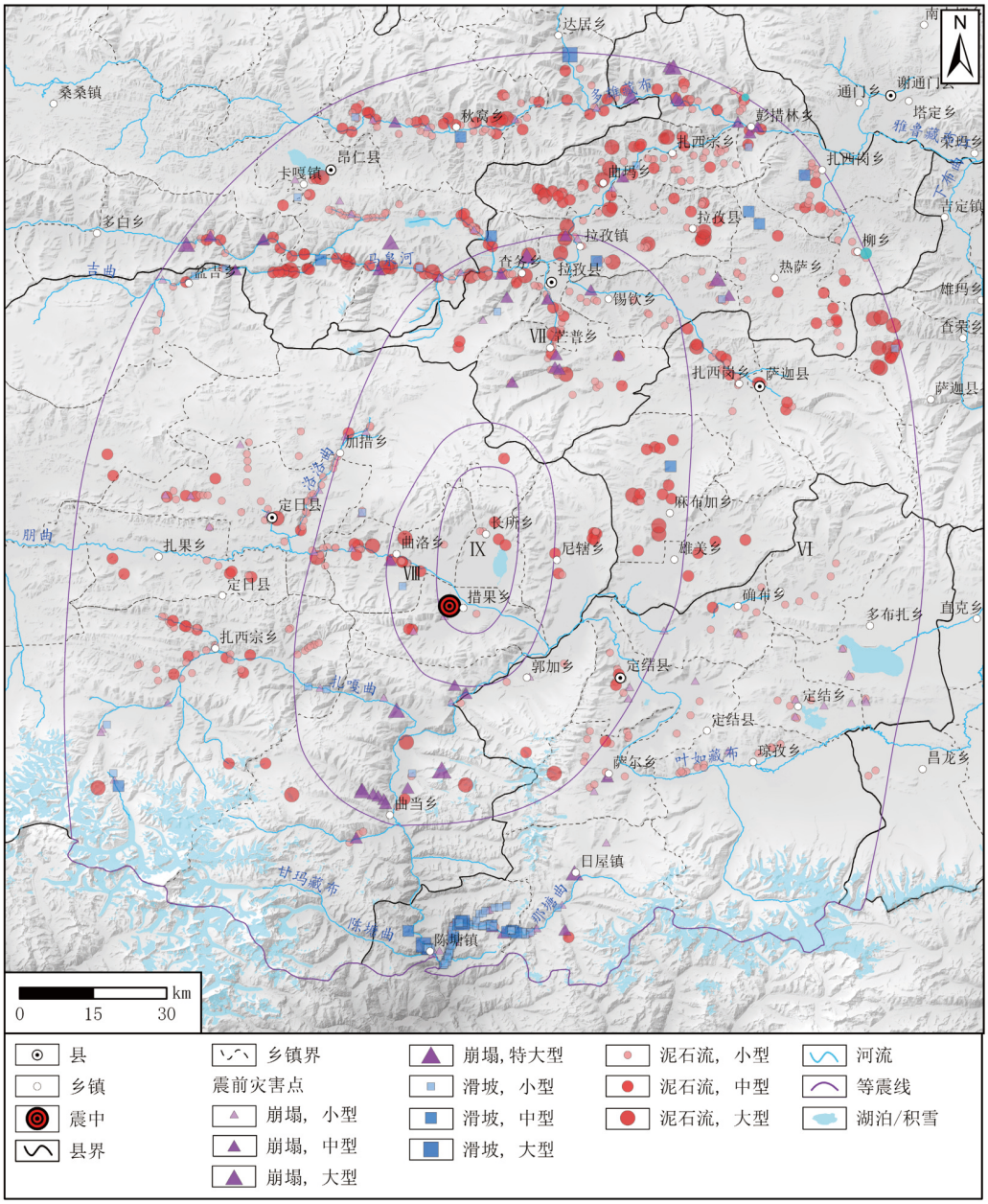

图 3　震前地质灾害点分布图

Fig. 3　Distribution of geological disaster sites before the earthquake

表 1　震区震前地质灾害点统计表

Table 1　Statistical table of geological disaster points before the earthquake in earthquake area

县	泥石流/处	滑坡/处	崩塌/处	合计/处
拉孜县	226	9	26	261
定日县	156	10	36	202
定结县	73	77	51	201
昂仁县	123	6	17	146
萨迦县	54	2	0	56
岗巴县	2	0	0	2
合计	634	104	130	868

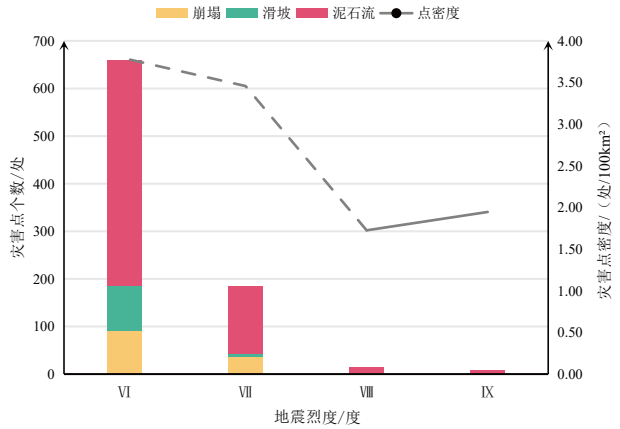

图 4　震区震前地质灾害点与地震烈度统计图

Fig. 4　Statistical diagram of geological damage points and seismic intensities before the earthquake

为Ⅶ度区内，地质灾害点共 185 处，主要分布在定日县—曲洛乡段、拉孜县查务乡—芒普乡段、萨迦县麻布加乡、定结县城附近。在烈度为Ⅵ度区内，地质灾害点共 660 处，主要分布在定日县扎西宗乡、定日县周边、昂仁县卡嘎镇附近和马泉河沿线、拉孜县拉孜镇—彭措林乡段、萨迦县扎西岗乡、定结县定结乡—萨尔乡段、确布乡。

2.2　地震地质灾害分布规律

地震发生后，西藏自治区自然资源厅组织专家重点对已有地质灾害隐患点开展地面排查，主要包括寺庙、学校、居民区、公路等区域，主要按照地震对灾害点的影响分为：无明显变化、轻微变化和明显变化三个等级。

根据震后地质灾害应急排查结果，截至 2025 年 1 月 15 日，此次地震引发 91 处新增地质灾害点，并导致 107 处已有地质灾害点发生不同程度变形（图 5）。在震后新增的 91 处地质灾害点中，滑坡 34 处、崩塌 25 处，潜在泥石流 29 处，地裂缝 3 处，

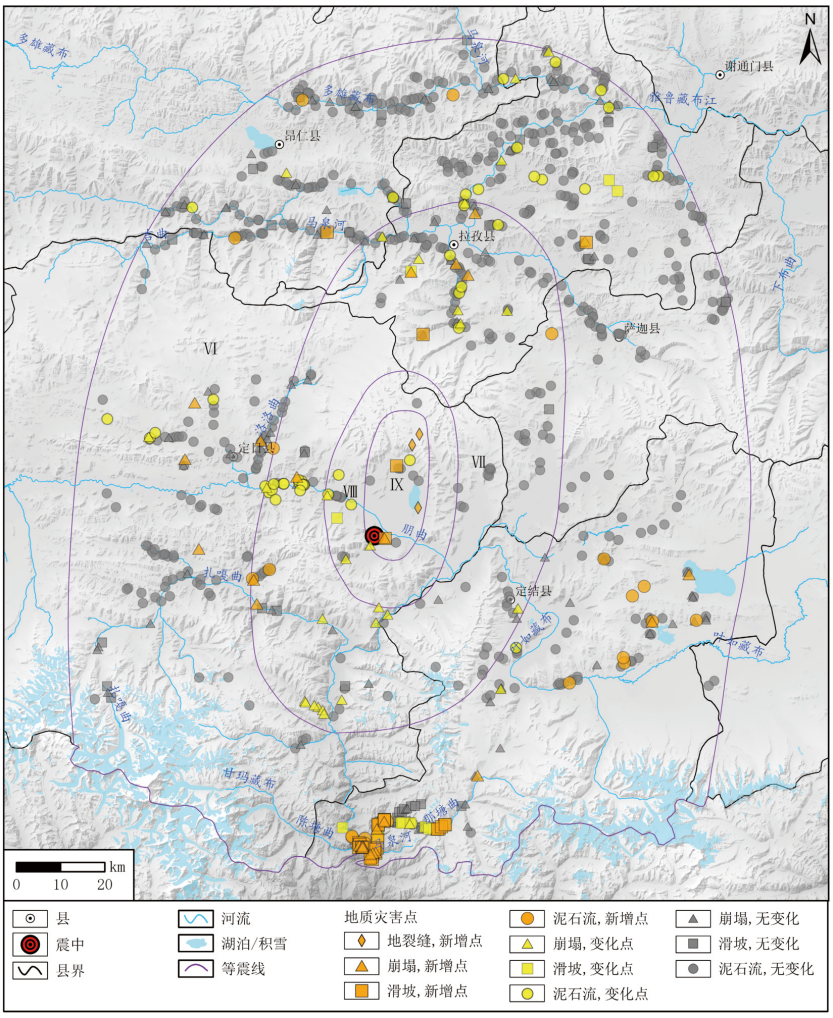

图 5　震后地质灾害点变化情况图

Fig. 5　Change of geological disaster sites after the earthquake

轻微变化的隐患点大多集中在Ⅶ度区和Ⅵ度区，在定日县和拉孜县沿河流呈条带状分布。受地震影响的地质灾害点分布密度与地震烈度呈正相关关系(图 6)。

2.3 震区地质灾害形成机制分析

2.3.1 震源机制

1 月 7 日发生在西藏定日县的 M_S6.8 级地震发生在青藏高原南部，位于喜马拉雅逆冲断裂系北侧，属喜马拉雅地块内部地震，距南侧藏南拆离断层约 15 km。本次地震震源机制解显示为近乎垂直于喜马拉雅逆冲断层系的正断型地震，指示为北北西—南南东向挤压、北东东—南西西向拉张的走滑型应力结构，利用现今 GPS 速度场模拟获得喜马拉雅地块内部的构造力学环境为南北向挤压为主(Wang and Barbot, 2023)。因此，定日 M_S6.8 级地震与印度板块向欧亚板块汇聚及其造成的喜马拉雅块体内部东西向伸展有关。本次发震断裂登么错断裂走向为 NNE，倾向 W，断层上盘(西盘)为主动盘(图 7a)。

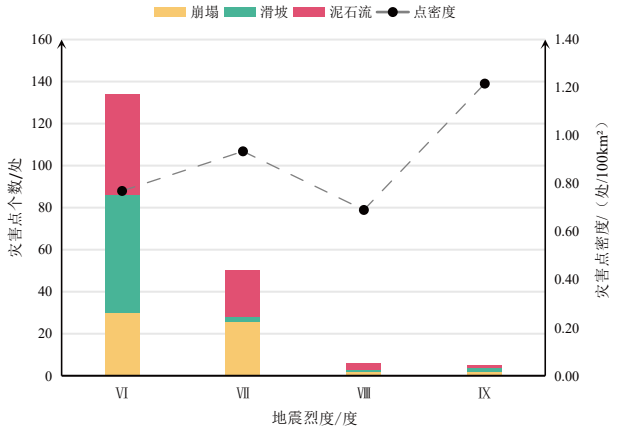

图 6 震后地质灾害点与地震烈度统计图

Fig. 6 Statistical diagram of geological damage points and seismic intensities after the earthquake

本次定日县地震导致严重的地表形变，而地表形变在登么错正断层上、下盘呈现出显著的差异(李雨森等, 2025)。因登么错断裂上盘(西盘)为主动盘，地表形变主要集中于西盘，为显著的下错变形，最大地表位错达 1.5 m。同时受西盘弧形拆离系断裂影响，形变区呈人耳状形态，而在登么错下盘(东盘)，地表形变有限，具体见图 7b。

2.3.2 震区地质灾害发育特征

截至 2025 年 1 月 15 日，根据西藏自治区自然资源系统组织完成的震区地质灾害应急排查数据，震区目前已查明的地质灾害点总计 959 处，其中滑坡 138 处，泥石流 663 处，崩塌 155 处，地裂缝 3 处。结合震前、震后地质灾害的入库和排查成果，将各类型地质灾害点分成所有点、地震诱发新增点、地震诱发变化点三类数据。调查发现，此次地震还在震中区附近形成长 20 km 的地表破裂带，最大宽度约 0.3 m，并在朋曲河谷内形成了大量砂土液化现象(图 8)。为进一步查明区域地质条件对震区地质灾害的控灾机制，论文对构造与岩性、断层、地形等因素与地质灾害的关系进行了研究。

(1)区域构造与岩性控制。本次定日县地震区地质灾害主要集中于特提斯喜马拉雅地块区和雅鲁藏布江缝合带。在特提斯喜马拉雅地块区，因海陆转换和板块碰撞阶段诱发的强挤压变形，地层岩性极为破碎，且多种岩性混杂交织出露(曾庆高等, 2020)，岩性特征呈现强变形和复杂结构特征，加剧了地质灾害的发育。雅鲁藏布江缝合带多出露蛇绿岩、混杂岩等强蚀变和破碎结构的软弱岩体，一

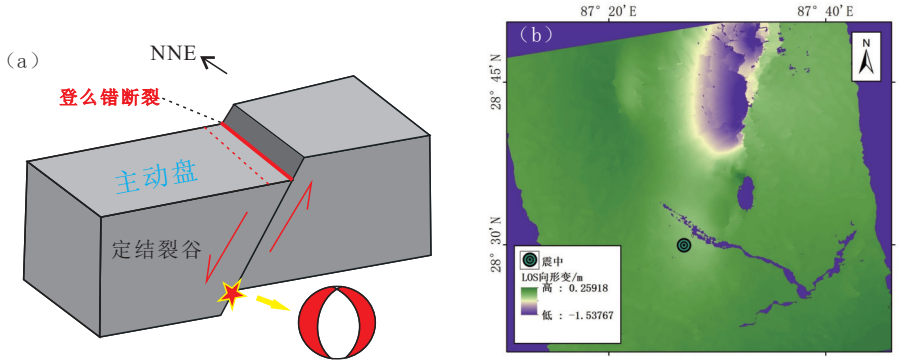

图 7 定日 M_S6.8 级地震震源机制(a)及定日县地震区形变分布图(b)

Fig. 7 Seismogenic fault model diagram of Dingri M_S6.8 earthquake (a) and deformation distribution map of earthquake area in Dingri County (b)

定程度上控制了地质灾害点的集中发育(张永双等, 2024)。同时, 缝合带内分布有弧前盆地, 该区域多发育因构造和造山阶段残留的弧前松散碎屑堆积(潘桂棠等, 2019; 葛肖虹等, 2014), 对泥石流的发育作用尤为显著。统计显示: ①仅在雅鲁藏布江缝合带, 所有复核灾害类型中, 灾害点数量高达 387 处, 占比约 40%, 因地震新增和变化的地质灾害点 39 处, 占比约 20%, 缝合带发育地质灾害优势显著; ②定日县地震区地质灾害点发育的优势岩性主要包括板岩、千枚岩、变质砂岩、砂岩、页岩、片岩、片麻岩、灰岩等, 其中新增和有变化地质灾害点多发育于片岩、片麻岩、泥页岩、砂岩、砂砾岩、板岩、千枚岩、变质砂岩、蛇绿混杂岩、第四系冰川堆积区(图 9)。

(2)活动断裂控制。定日县地震位于登么错拆离断裂区, 地震导致严重的地表形变和开裂, 如图 8 所示。定日县地震区周边断层分布密集, 断层性质丰富。受印度板块和欧亚板块 NS 向的强烈挤压, 青藏高原发生隆升和快速侧向伸展, 在高温高压的中下地壳岩石作塑性形变, 但在弹性的上地壳中在垂直于 NS 挤压方向上形成 EW 向水平拉张, 形成 NS 向脆性正断层(嵇少丞等, 2008; Molnar and Tapponnier, 1978; Tapponnier et al., 1981; 韩同林等, 1987; 吴中海等, 2007)。NS 向脆性正断层区

图 8　定日县地震区地表破裂与砂土液化特征

Fig. 8　Characteristics of surface rupture and sand liquefaction in earthquake area of Dingri County

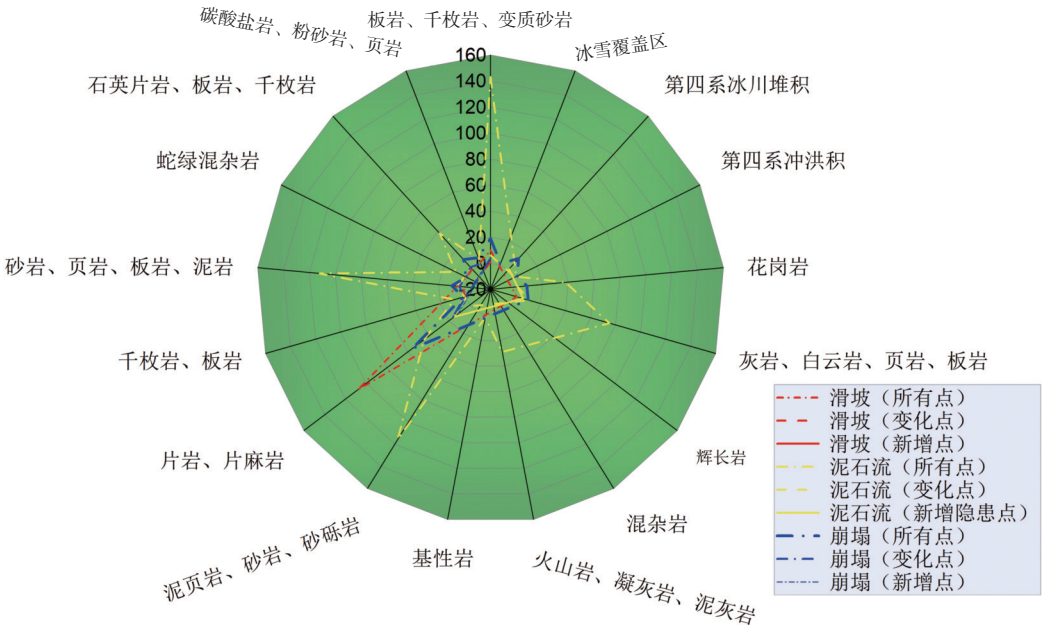

图 9　定日县地震区各岩性区灾害点分布数量（单位：处）

Fig. 9　The number of disaster sites distributed in each lithologic area of Dingri County earthquake zone

多形成裂谷带，这些裂谷区塑造了陡峻的地形，同时伴有断层的分布。与此同时，在水平空间上，因板块 NS 向的持续挤压，多条 EW 向的断裂密集分布。因此，在定日县地震区，南北向拆离断裂与东西向逆冲断交汇分布，断层密度高。地震区地质灾害点具有显著的沿断裂发育和集中的趋势（图 10c）。此次统计的 959 余处地质灾害点，滑坡、泥石流、崩塌灾害分别有 24%、32%、29% 分布于距离断层 1 km 范围内，距离断层 5 km 范围内的占比分别高达 89%、93%、88%（图 11a，图 12a，图 13a），其中因地震导致的新增点和变化点中，几乎所有类型的地质灾害点发育于断层 1 km 和 5 km 范围内的占比

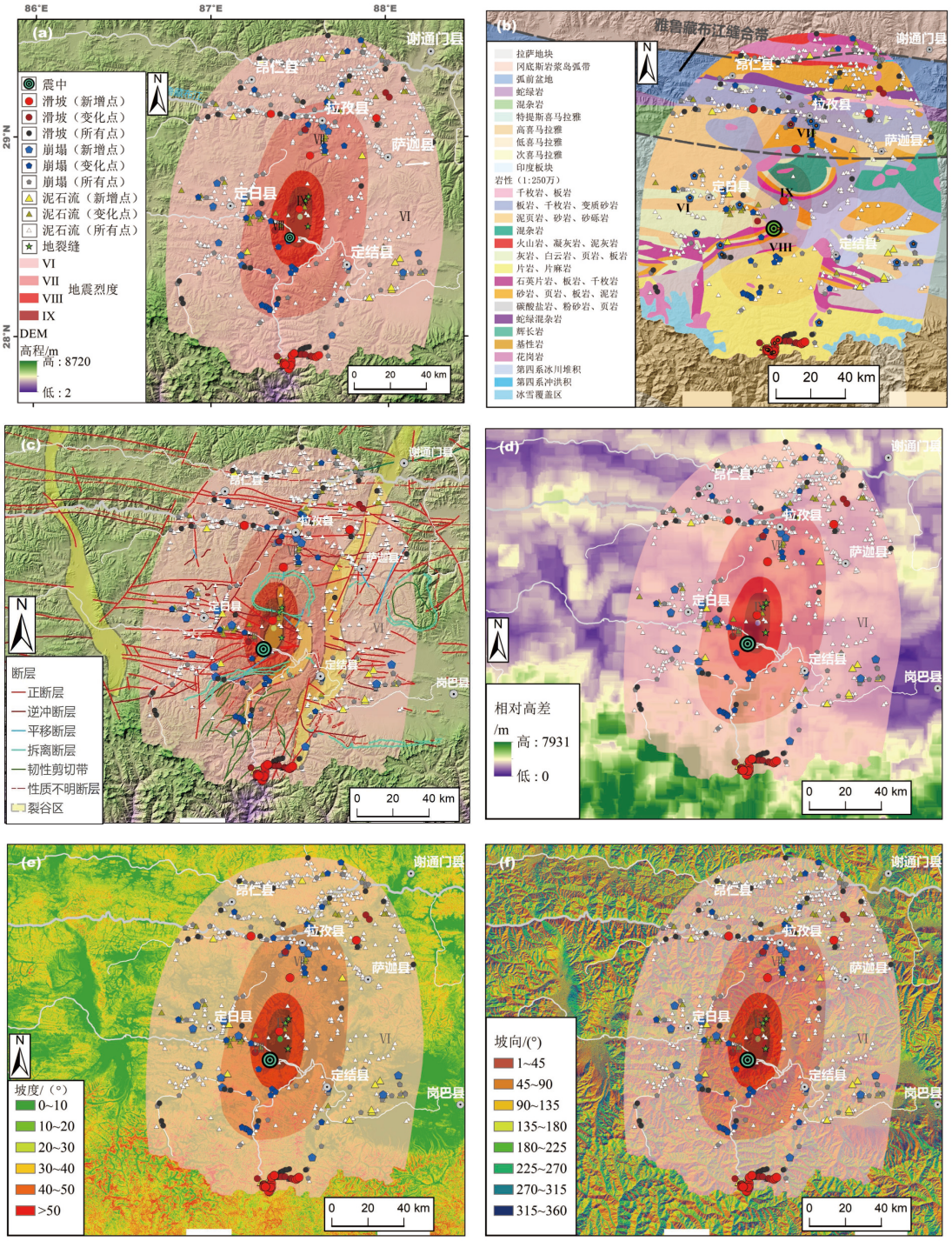

图 10　断层、地形等对定日县地震诱发地质灾害点的控制

Fig. 10　The contributions of faults and topographies to earthquake-induced geological disaster sites in Dingri County

分别约占 30% 和 90%。

(3)地形地貌控制。本次地震区地形条件显著控制了地质灾害的分布。相对高差、坡度和坡向对地质灾害影响显著,尤其是滑坡和崩塌灾害,需要较高的势能和动能条件(图 10d-f)。统计发现,滑坡灾害多发育在相对高差为 1 500～3 000 m 的范围内,占比达 73%(图 11b),泥石流多发育于相对高差为 500～2 000 m 的范围内,占比达 85%(图 12b),崩塌多发育于相对高差为 500～2 000 m 的范围内,占比达 78%(图 13b),三类灾害新增点和变化点的高程分布基本与所有点一致。滑坡灾害点多发育于坡度为 10°～40°的范围内,占比达 77%(图 11c),泥石流灾害点多发育于坡度为＜20°的范围内,占比达 86%(图 12c),崩塌灾害点在坡度为＜40°的范围内均比较发育,占比达 97%(图 13c)。滑坡灾害其坡向多集中于 SEE(90°～135°)、SSE(135°～180°)、SSW(180°～225°)三个方向,占比达 59%(图 11d),这可能与滑坡灾害多分布于震中南侧的峡谷区有关,即地震诱发滑坡产生了背坡向放大效应。泥石流和崩塌受坡向影响较小(图 12d,图 13d)。

3　防灾减灾建议

西藏自治区定日县 6.8 级地震目前已完成首轮地震地质灾害应急排查,下一步将转入地震地质灾害常规排查阶段,并同步启动地震地质灾害防治规划。为准确把握此次地震的影响特征,准确掌握震区地质灾害发展趋势,有针对性地编制科学的地质灾害防治规划方案,基于对定日县 6.8 级地震地质灾害特征及规律研究,提出下一步震区地质灾害详细调查需关注高位震裂山体、冰湖坝体与后缘冰川、砂土液化调查评价等建议。

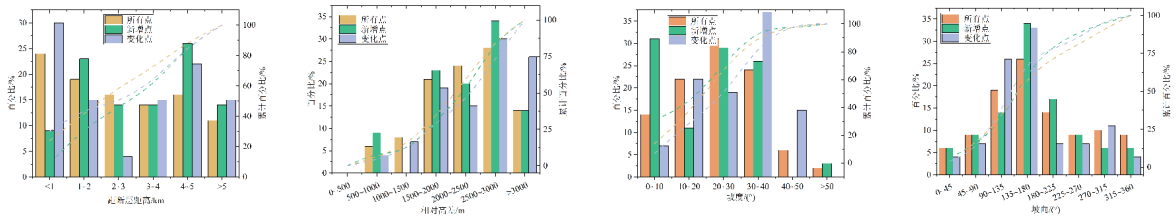

图 11　滑坡灾害分布与断层距、相对高差、坡度、坡向的关系

Fig. 11　The relationship between landslide hazard distribution and fault distance, relative elevation difference, slope, and slope direction

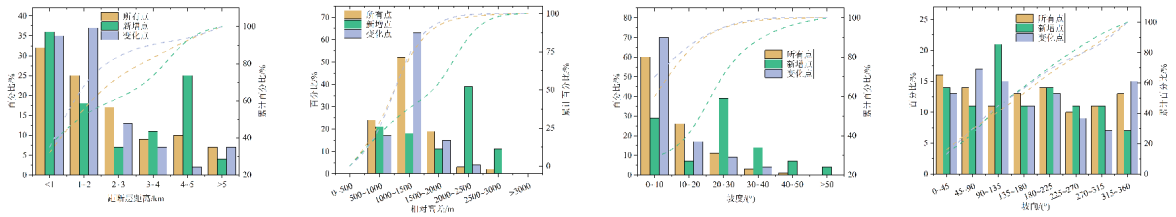

图 12　泥石流灾害分布与断层距、相对高差、坡度、坡向的关系

Fig. 12　The relationship between debris flow hazard distribution and fault distance, relative elevation difference, slope, and slope direction

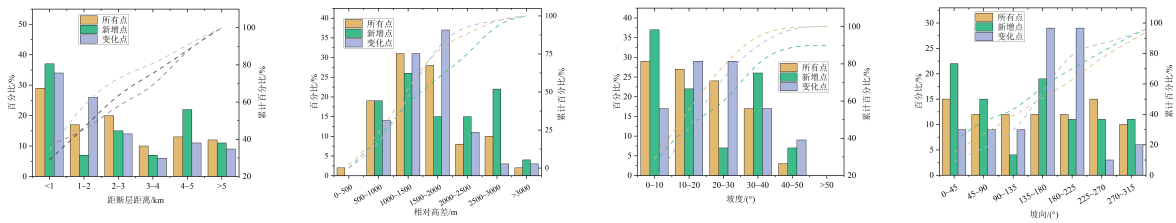

图 13　崩塌灾害分布与断层距、相对高差、坡度、坡向的关系

Fig. 13　The relationship between collapse hazard distribution and fault distance, relative elevation difference, slope, and slope direction

(1)高度关注高位震裂山体调查评价,加强新技术方法的应用

根据对典型地区震前和震后高精度遥感影响对比解译,此次地震虽然未造成较为明显的同震滑坡、崩塌等地质灾害,但根据 InSAR 揭示的区域地表形变场特征分析,震区山体上部具有较为明显的形变过程。因此,震区内高位山体在此次地震中被震裂的分布区域、震裂程度及稳定性调查评价是下一步需要重点关注的内容。鉴于此次震区平均海拔较高,且多数区域为无人区,传统的地表调查难度相对较大,但由于震区地表植被覆盖较差,可采用高精度光学遥感影像解译、InSAR 形变监测、无人机三维倾斜摄影及贴近摄影等新技术方法,有针对性地对山体的震裂特征进行精准识别,对高位震裂山体的稳定性进行评价,研判其失稳后可能形成的高速远程地质灾害风险,精准划定潜在危险区范围,为地质灾害风险防控提供科学依据。

(2)**重点关注冰湖坝体与后缘冰川稳定性评价,加强地质灾害链风险研判**

西藏自治区内的冰湖和冰川多分布在海拔 4 000 m 以上的区域,受地形高度对震波的放大效应影响,高海拔冰川和冰湖分布区的地震动峰值加速度会显著增大,对冰湖坝体和冰川自身结构造成影响,失稳风险进一步增加。因此,需要对此次地震影响范围内的冰湖坝体及冰川稳定性开展调查评估,充分利用高精度遥感手段查明冰川表面冰裂缝发育规律和冰湖坝体形变特征,对比震前震后冰裂缝和冰湖坝体的变化差异,评价冰川和冰湖坝体稳定性,研判冰川失稳进入冰湖可能导致的冰湖溃决风险,评价冰湖坝体受地震影响下的稳定性及发展趋势,圈定冰湖溃坝灾害链的影响区范围,为震区地质灾害防灾减灾规划提供参考。

(3)**重点关注砂土液化特征调查评价**

此次地震的震中位于朋曲河流域内,震中附近的河谷中冲洪积物、风积沙、湖相沉积物等多成因土体混杂堆积,结构多为粉土、粉砂、细砂、中砂等易液化地层,在地震作用下易发生砂土液化,在此次地震后的调查中在朋曲河谷内发现了多处较为典型的同震砂土液化现象,导致地表产生形变破坏,虽然未发现因砂土液化导致的房屋或建筑受损现象,但对这类特殊成因灾害需要加强调查评价,要进一步查明朋曲河谷内砂土液化区的空间分布特征、液化区土体结构与地下水和地震烈度的关系,总结地震工况下砂土液化机理及破坏模式,为今后同类地质结构地区砂土液化灾害防范提供科学参考,也为未来区朋曲河谷及周边类似区域城镇、工程规划建设选址防灾减灾提供依据。

(4)**需重点关注地震地表破裂带调查评价**

根据野外调查,此次地震在地表形成了十余千米的地表变形带和数百米的地表破裂带,最大破裂带下错高度可超过 3 m,且局部破裂带区域存在蠕动变形现象,特别是在斜坡地带易演化成次生地质灾害,对建筑及基础设施造成破坏。今后需关注并加大震区大比例尺基础地质调查力度,特别要查明区域断层的活动性、层空间展布特征,精准划定潜在地表破裂带范围,研判地表破裂可能的致灾模式及风险,提出合理的避让距离,结合国土空间规划提出科学的防灾减灾建议。

4 结论

(1)受定日县地震影响的 5 个主要县震前境内在册地质灾害隐患点共 868 处,灾害规模以小型和中型为主,其中小型 555 处、中型 252 处、大型 60 处、特大型 1 处。

(2)此次地震震区新增地质灾害点 91 处,其中滑坡 34 处、崩塌 25 处、泥石流 29 处、地裂缝 3 处。同时,受地震影响发生变形的灾害点 107 处。

(3)定日县地震发生于拉萨地块和喜马拉雅地块的结合部位以南仅约 80 km,NS 向断裂、裂谷及 EW 向断裂密集发育,区域岩性、断裂和地形显著控制着震区地质灾害的发育分布,如区内的雅鲁藏布江缝合带软弱岩体内地质灾害发育数量占比高达 40%。

(4)相比其他地区同震级地震而言,定日县地震诱发的同震地质灾害数量相对较少,灾害规模也较小,但受地形对地震波的放大效应影响,发育在高山或极高山地区的高位山体、冰川、冰湖等可能会受到不同程度的影响,需要高度关注对这类可能诱发地质灾害或潜在灾害链的易灾地质体调查评价。

(5)定日县地震区灾后重建中,特别是重要城镇或工程建设选址时,要充分考虑强震工况下河谷区深厚覆盖砂土层液化和潜在地表破裂带致灾风险,并开展专项评估。

致谢:本文在野外数据获取方面得到了日喀则市自然资源局、西藏自治区地质矿产勘查开发局、四川省地质矿产勘查开发局、四川省地质调查研究院、四川省自然资源投资集团等单位技术人员的大力支持,在此一并表示感谢!

References

Bian S，Yu Z Q，Gong J F，et al.，2021. Spatiotemporal distribution and geodynamic mechanism of the nearly NS-trending rifts in the Tibetan Plateau[J]. Journal of Geomechanics，27（2）：178 − 194 (in Chinese with English abstract).

Chen M，Tang C，Xiong J，et al.，2020. The long-term evolution of landslide activity near the epicentral area of the 2008 Wenchuan earthquake in China[J]. Geomorphology，367：107317.

Fan X M，Scaringi G，Korup O，et al.，2019. Earthquake-induced chains of geologic hazards：Patterns，mechanisms，and impacts[J]. Reviews of Geophysics，57：421 − 503.

Fan X M，Wang X，Dai L X，et al.，2022. Characteristics and spatial distribution pattern of M_s6.8 Luding earthouake occurred on September 5，2022[J]. Journal of Engineering Geology，30（5）：1504 − 1516 (in Chinese with English abstract).

Gao Y C，Gong L F，Cao J W，et al.，2024. The distribution and risk assessment of geo-hazards in the border areas of Xizang[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology，44（3）：467 − 477 (in Chinese with English abstract).

Ge X H，Ma W P，2014. Regional geotectonics course in China[M]. Beijing：Geological Publishing House.

Han J L，Wu S R，He S J，et al.，2009. Basal characteristics and formation mechanisms of geological hazards triggered by the May 12，2008 Wenchuan earthquake with a moment magnitude of 8.0 [J]. Earth Science Frontiers，16（3）：306 − 326 (in Chinese with English abstract).

Han T L，1987. Active structure in Tibet[M]. Beijing：Geological Publishing House.

Hou L Y，Shan X J，Gong W Y，et al.，2020. Characterizing seismogenic fault of 2016 Dingjie earthquake based on multitemporal DInSAR[J]. Chinese Journal of Geophysics，63（4）：1357 − 1369 (in Chinese with English abstract).

Ji S C，Wang Q，Sun S，et al.，2008. Continental extrusion and seismicity in China[J]. Acta Geologica Sinica，82（12）：1644 − 1667 (in Chinese with English abstract).

Jin Z D，Robert G，Joshua W，et al.，2022. The Role of seismic landslides in the erosion and weathering of active orogenic belts：Progress and outlook[J]. Scientia Sinica （Terrae），52（2）：222 − 237 (in Chinese with English abstract).

Li M H，Wang D H，Gao Y C，et al.，2014. Research on the geohazards induced by the M7.9Luhuo earthquake in Xianshuihe fault zone[J]. Journal of Catastrophology，29（1）：37 − 41 (in Chinese with English abstract).

Li W L，Xu Q，Li Y S，et al.，2024. Preliminary analysis of the coseismic geohazards induced by the 2023 Jishishan *Ms* 6.2 earthquake[J]. Journal of Chengdu University of Technology （Science & Technology Edition），51（1）：33 − 45+90 (in Chinese with English abstract).

Li Y S，Li W L，Xu Q，et al.，2025. InSAR co-seismic deformation detection and fault slip distribution inversion of the Ms 6.8 earthquake in Dingri, Tibet on January 7, 2025[J/OL]. Journal of Chengdu University of Technology（Natural Science Edition）：1 − 13. http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1634.N.20250117.1150.002.html (in Chinese with English abstract).

Liu L，Shao Y X，Wang W，et al.，2022. Study on the tectonic geomorphology and fault activity characteristics of the Zhongba Rift，southern Tibet[J]. EarthScience，47（8）：3029 − 3044 (in Chinese with English abstract).

Molnar P，Tapponnier P，1978. Active tectonics of Tibet[J]. Journal of Geophysical Research，83（B11）：5361 − 5375.

Pan G T，Xiao Q H，Zhang K X，et al.，2019. Recognition of the oceanic subduction-aceretion zones from the orogenic belt in continents and its important scientific significance[J]. Earth Science，44（5）：1544 − 1561 (in Chinese with English abstract).

Tapponnier P，Mercier J L，Armijo R，et al.，1981. Field evidence for active normal faulting in Tibet[J]. Nature，294（5840）：410 − 414.

Tian H R，2023. Study on the accumulation characteristics of high-speed remote landslide based on UAV photogrammetry[D]. Southwest Jiaotong University (in Chinese with English abstract).

Tie Y B，Ge H，Gao Y C，et al.，2022. The research progress and prospect of geological hazards in Southwest China since the 20th Century[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology，42（4）：653 − 665 (in Chinese with English abstract).

Tie Y B，Zhang X Z，Cao J W，et al.，2024. Comparative research of the characteristics of geological hazards induced by the Jishishan （Ms 6.2） and Luding （Ms 6.8） earthquakes[J]. Journal of Chengdu University of Technology （Science & Technology Edition），51（1）：9 − 21+59 (in Chinese with English abstract).

Tie Y B，Zhang X Z，Lu J Y，et al.，2022. Characteristics of geological hazards and it's mitigations of the *Ms*6.8 earthquake in Luding County，Sichuan Province[J]. Hydrogeology & Engineering Geology，49（6）：1 − 12 (in Chinese with English abstract).

Wang L，Barbot S，2023. Three-dimensional kinematics of the India–Eurasia collision[J]. Communications Earth & Environment，4（1）：164.

Wang S G，Chevalier M，Tapponnier p，et al.，2024. Timing and characteristics of co-seismic surface ruptures in the Yadong rift，southern Tibet[J]. Journal of Structural Geology，188：105264.

Wang Y H，Xu Q，Zhao W H，et al.，2023. Inheritance and regeneration of seismogenic faults of the Maduo 7.4 earthquake in Qinghai Province[J]. Journal of Catastrophology，38（1）：57 − 62+71 (in Chinese with English abstract).

Wu Z H，Zhang Y S，Hu D G，et al.，2007. Discussion on the Quaternary positive fault activity and its mechanism of the Woka Graben in Sangri County，Xizang Province[J]. Journal of Geology，81（10）：1328 − 1337 (in Chinese with English abstract).

Wu Z H，Ye P S，Wang C M，et al.，2015. The Relics，ages and significance of prehistoric large earthquakes in the Angang Graben in south Tibet[J]. Earth Science，40（10）：1621 − 1642 (in Chinese with English abstract).

Xi C J，Tanyas H，Lombardo L，et al.，2024. Estimating weakening on hillslopes caused by strong earthquakes[J]. Communications Earth & Environment，5（1）：1−14.

Xiong X H，Bai Y J，Tie Y b，et al.，2024. Identification of potential geohazards in mountainous towns based on “Space-Air-Ground-Underground” approach：A case study of key towns in Xide County，Sichuan Province[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology，44（3）：560 − 571 (in Chinese with English abstract).

Xu Q，Peng D L，Fan X M，et al.，2025. Preliminary study on the characteristics and initiation mechanism of Zhongchuan Flowslide due to liquefaction triggered by the Ms 6.2 Jishishan Earthquake in Gansu

Province[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University，50（2）：207−222 (in Chinese with English abstract).

Yin Y P，2022. Evaluation methods and application practices of geological disaster risk investigation[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control，33 （4）： 5 − 6 (in Chinese with English abstract).

Yin Y P，Cheng Y L，Wang J，et al.，2014. Remote Sensing research on Daguangbao gigantic rockslide triggered by Wenchuan earthouake[J]. Journal of Engineering Geology，1（1）： 1 − 9 (in Chinese with English abstract).

Yin Y P，Zhang Y S，Wu F Q，et al.，2014. Results and prospects of geological disaster investigation in Wenchuan earthquake[J]. Geological Survey of China，1（1）： 1 − 9 (in Chinese with English abstract).

Zeng Q G，Wang B D，Xiluo L J，et al.，2020. Suture zones in Tibetan and Tethys evolution[J]. Earth Science，45（8）： 2735 − 2762 (in Chinese with English abstract).

Zeng Q L，Yuan G X，McSaveney M，et al.，2020. Timing and seismic origin of Nixu rock avalanche in southern Tibet and its implications on Nimu active fault[J]. Engineering Geology：105522.

Zhang J J，Ding L，2025. East west extension in Tibetan Plateau and its significance to tectonic evolution [J]. Chinese Journal of Geology （2）： 179 − 189 (in Chinese with English abstract).

Zhang X T，Jiang X H，Xue Y，et al.，Summary of the Dingri M_s 5.9 earthquake in Tibet on March 20， 2020[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research，41 （4）： 193 − 203 (in Chinese with English abstract).

Zhang Y H，Wang D B，Li X，et al.，2024. Research on hazard prone geological genes and major engineering geological problems in tectonic mélange belts of Tibetan Plateau[J]. Acta Geologica Sinica，98（3）： 992 − 1005 (in Chinese with English abstract).

Zhang Y S，Yao X，Guo C B，et al.，2016. Regional warning of debris flow hazards after Wenchuan earthquake in Longmenshan region[J]. Journal of Southwest Jiaotong University，51（5）： 1014 − 1023 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

卞爽，于志泉，龚俊峰，等，2021. 青藏高原近南北向裂谷的时空分布特征及动力学机制[J]. 地质力学学报，27（2）： 178 − 194.

范宣梅，王欣，戴岚欣，等，2022. 2022 年 *M*s6.8 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，30（5）： 1504 − 1516.

高延超，龚凌枫，曹佳文，等，2024. 西藏边境地区地质灾害分布规律与危险性分析[J]. 沉积与特提斯地质，44（3）： 467 − 477.

葛肖虹，马文璞，2014. 中国区域大地构造学教程[M]. 北京：地质出版社.

韩金良，吴树仁，何淑军，等，2009.5. 12 汶川 8 级地震次生地质灾害的基本特征及其形成机制浅析[J]. 地学前缘，16（3）： 306 − 326.

韩同林，1987. 西藏活动构造[M]. 北京：地质出版社.

侯丽燕，单新建，龚文瑜，等，2020. 基于多期 DInSAR 数据的 2016 年定结地震序列发震断层特征研究[J]. 地球物理学报，63（4）： 1357 − 1369.

嵇少丞，王茜，孙圣思，等，2008. 亚洲大陆逃逸构造与现今中国地震活动[J]. 地质学报，82（12）： 1644 − 1667.

金章东，Robert G，Joshua W，等，2022. 地震滑坡在活跃造山带侵蚀和风化中的作用：进展与展望[J]. 中国科学：地球科学，52（2）： 222 − 237.

李明辉，王东辉，高延超，等，2014. 鲜水河断裂带炉霍 7.9 级地震地质灾害研究[J]. 灾害学，29（1）： 37 − 41.

李为乐，许强，李雨森，等，2024. 2023 年积石山 *M*s6.2 级地震同震地质灾害初步分析[J]. 成都理工大学学报：自然科学版，51（1）： 33 − 45+90.

李雨森，李为乐，许强，等，2025.2025 年 1 月 7 日西藏定日 Ms 6.8 级地震 InSAR 同震形变探测与断层滑动分布反演[J/OL]. 成都理工大学学报：自然科学版：1 − 13. http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1634.N.20250117.1150.002.html.

刘璐，邵延秀，王伟，等，2022. 藏南仲巴裂谷带地貌和断裂活动特征研究[J]. 地球科学，47（8）： 3029 − 3044.

潘桂棠，肖庆辉，张克信，等，2019. 大陆中洋壳俯冲增生杂岩带特征与识别的重大科学意义[J]. 地球科学，44（5）： 1544 − 1561.

田浩然，2023. 基于无人机摄影测量的高速远程滑坡堆积特征研究[D]. 西南交通大学.

铁永波，葛华，高延超，等，2022a. 二十世纪以来西南地区地质灾害研究历程与展望[J]. 沉积与特提斯地质，42（4）： 653 − 665.

铁永波，张宪政，曹佳文，等，2024. 积石山 *M*s6.2 级和泸定 *M*s6.8 级地震地质灾害发育规律对比[J]. 成都理工大学学报：自然科学版，51（1）： 9 − 21+59.

铁永波，张宪政，卢佳燕，等，2022b. 四川省泸定县 *M*s6.8 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，49（6）： 1 − 12.

王运生，许强，赵伟华，等，2023. 青海玛多 7.4 级地震发震断裂继承性及新生性探讨[J]. 灾害学，38（1）： 57 − 62+71.

吴中海，张永双，胡道功，等，2007. 西藏桑日县沃卡地堑的第四纪正断层活动 及其机制探讨[J]. 地质学报，81（10）： 1328 − 1337.

吴中海，叶培盛，王成敏，等，2015. 藏南安岗地堑的史前大地震遗迹、年龄及其地质意义[J]. 地球科学，40（10）： 1621 − 1642.

熊小辉，白永健，铁永波，等，2024. 基于“天–空–地–深”方法的山区城镇地质灾害隐患判识：以四川省喜德县重点乡镇为例[J]. 沉积与特提斯地质，44（3）： 560 − 571.

许强，彭大雷，范宣梅，等，2025. 甘肃积石山 Ms 6.2 地震触发青海中川乡液化型滑坡-泥流特征与成因机理[J]. 武汉大学学报：信息科学版，50（2）： 207−222.

殷跃平，2022. 地质灾害风险调查评价方法与应用实践[J]. 中国地质灾害与防治学报，33（4）： 5 − 6.

殷跃平，成余粮，王军，等，2011. 汶川地震触发大光包巨型滑坡遥感研究[J]. 工程地质学报，19（5）： 674 − 684.

殷跃平，张永双，伍法权，等，2014. 汶川地震地质灾害调查成果与展望[J]. 中国地质调查，1（1）： 1 − 9.

曾庆高，王保弟，西洛郎杰，等，2020. 西藏的缝合带与特提斯演化[J]. 地球科学，45（8）： 2735 − 2762.

张进江，丁林，2023. 青藏高原东西向伸展及其地质意义[J]. 地质科学（2）： 179 − 189.

张小涛，姜祥华，薛艳，等，2020.2020 年 3 月 20 日西藏定日 MS 5.9 地震总结[J]. 地震地磁观测与研究，41（4）： 193 − 203.

张永双，王冬兵，李雪，等. 2024. 青藏高原构造混杂岩带的孕灾地质基因与重大工程地质问题研究. 地质学报，98（3）： 992 − 1005.

张永双，姚鑫，郭长宝，等，2016. 龙门山地区震后泥石流灾害区域预警研究[J]. 西南交通大学学报，51（5）： 1014 − 1023.