

董磊, 铁永波, 高云建, 等, 2025. 定日  $M_s6.8$  和积石山  $M_s6.2$  地震诱发地质灾害发育特征对比研究[J]. 沉积与特提斯地质, 45(2): 434-445. doi: 10.19826/j.cnki.1009-3850.2025.06004

DONG L, TIE Y B, GAO Y J, et al., 2025. Comparative study on the development characteristics of co-seismic geohazards from the Dingri  $M_s$ 6.8 and Jishishan  $M_s$ 6.2 earthquakes[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 45(2): 434–445. doi: 10.19826/j.cnki.1009-3850.2025.06004

# 定日 $M_s$ 6.8 和积石山 $M_s$ 6.2 地震诱发地质灾害发育特征对比研究

董 磊<sup>1</sup>,铁永波<sup>2,3,4</sup>,高云建<sup>2,3,4</sup>,张宪政<sup>2,3,4\*</sup>,秦雅东<sup>2,3,4</sup>,李光辉<sup>2,3,4</sup>, 宁志杰<sup>2,3,4</sup>.史安文<sup>2,3,4</sup>

(1. 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; 2. 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; 3. 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; 4. 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)

摘要: 2025 年定日  $M_s$ 6.8 地震和 2023 年积石山  $M_s$ 6.2 地震是最近分别发生在青藏高原南部和北部的两次强震事件。两次事件均导致了比较显著的同震地质灾害现象,但是由于断层类型、地形地貌、地质条件的差异,两个地震影响区内的同震地质灾害类型、空间分布及发育密度等都呈现出显著差异性。为揭示正断层和逆断层地震诱发地质灾害发育规律的差异性,采用地面调查、遥感综合解译、空间分析等方法,对比分析了定日和积石山地震影响区内地质灾害的分布规律与控制因子。结果表明: 两次地震诱发同震地质灾害的垂向空间展布相反,即定日地震(正断层)主要分布在上盘,而积石山地震(逆断层)主要分布在下盘。研究表明,地震影响区的岩土体特征及地形地貌是导致地震诱发地质灾害类型与发育密度差异性的主控因子,即两个震区均以崩塌和滑坡为主,但定日震区灾害点沿河呈线状分布,发育密度相对较低,积石山震区灾害点主要沿黄土台地边缘或深切台地的沟谷边坡呈散点状分布,而且发育密度相对较高。综合分析认为,在地震活动区,防范地震地质灾害和评价其易发性时,应综合考虑特殊岩土体、气候和地形条件等的影响。

关键词:定日地震;积石山地震;地震诱发地质灾害;地震滑坡;控灾因子

中图分类号: P694 文献标识码: A

## Comparative study on the development characteristics of co-seismic geohazards from the Dingri $M_s$ 6.8 and Jishishan $M_s$ 6.2 earthquakes

DONG Lei<sup>1</sup>, TIE Yongbo<sup>2,3,4</sup>, GAO Yunjian<sup>2,3,4</sup>, ZHANG Xianzheng<sup>2,3,4</sup>, QIN Yadong<sup>2,3,4</sup>, LI Guanghui<sup>2,3,4</sup>, NING Zhijie<sup>2,3,4</sup>, SHI Anwen<sup>2,3,4</sup>

(1. The Second Geological Brigade of Xizang Autonomous Region Geological and Mineral Exploration and Development Bureau, Lhasa 850000, China; 2. Chengdu Center, China Geological Survey (Geosciences Innovation Center of Southwest China), Chengdu 610218, China; 3. Technology Innovation Center for Risk Prevention and Mitigation of Geohazards, Ministry of Natural

收稿日期: 2025-05-23; 改回日期: 2025-05-30; 责任编辑: 戴婕

作者简介: 董磊(1979—),男,博士,高级工程师,主要从事地质灾害调查与防治研究。E-mail: 360444976@qq.com 通信作者: 张宪政(1990—),男,博士,高级工程师,主要从事地质灾害形成机理与防治研究。E-mail: zhangxianzheng@

mail.cgs.gov.cn

**资助项目:** 西藏自治区自然科学基金重点项目(XZ202401ZR0073);西藏重点研发计划项目(XZ202401ZY0029); 重点地区特大地质灾害链调查评价(DD202306004) Resources, Chengdu 610000, China; 4. Observation and Research Station of Chengdu Geological Hazards, Ministry of Natural Resources, Chengdu 610000, China)

Abstract: The 2025 M<sub>s</sub>6.8 Dingri earthquake and the 2023 M<sub>s</sub>6.2 Jishishan earthquake were two recent strong seismic events that occurred in the southern and northern parts of the Qingzang (Tibet) Plateau, respectively. Both events triggered significant co-seismic geohazards. However, due to differences in fault types, geomorphology, and geological conditions, the types, spatial distribution, and development density of the co-seismic geohazards in the impact zones of the two earthquakes exhibited notable differences. To reveal the differences in the development patterns of geohazards triggered by normal and thrust faulting earthquakes, this study employed field investigations, remote sensing interpretation, and spatial analysis to compare the distribution patterns and controlling factors of geohazards in the impact zones of the Dingri and Jishishan earthquakes. The results indicate that the vertical spatial distribution of coseismic geohazards triggered by the two earthquakes was inversely related: the Dingri earthquake (normal fault) primarily occurred in the upper plate, while the Jishishan earthquake (thrust fault) mainly occurred in the lower plate. The study found that the lithological and geomorphological characteristics of the earthquake impact zones were the primary controlling factors for the differences in the types and densities of earthquake-induced geohazards. Specifically, both earthquake zones were dominated by collapses and landslides, but the distribution patterns differed: In the Dingri earthquake zone, geohazards were linearly distributed along rivers with relatively low densities, while in the Jishishan earthquake zone, geohazards were scattered along the edges of loess platforms or deeply incised valleys with relatively high densities. Comprehensive analysis suggests that when assessing the risk and preventability of earthquake-induced geohazards in seismically active areas, it is essential to consider the combined effects of factors such as special lithological and geomorphological conditions, climate, and terrain.

Key words: Dingri earthquake; Jishishan earthquake; co-seismic geohazards; co-seismic landslide; control factors

## 0 引言

地震地质灾害一般指由地震诱发的崩塌、滑 坡和砂土液化等次生地质灾害(黄润秋, 2011; 殷跃 平,2008)。在特殊地质环境下,地震次生地质灾害 往往会造成灾难性的伤亡和损失,有时甚至超过地 震本身的直接损害,因此引起国内外学者的广泛关 注(何思明等, 2024)。目前, 国内外学者已发现地 震地质灾害发育明显受震级大小、发震断层类型 与产状、震区的地质条件与地理环境、地表地貌 (起伏度、坡度和坡向等)等因素的共同控制,并从 不同角度开展过不同断层类型诱发同震地质灾害 的对比研究。李秀珍对比了两次逆冲断层地震诱 发地质灾害的规律特征(李秀珍等, 2014), 王兰民 对比分析了逆冲、走滑和正断层地震诱发黄土滑 坡的成灾机制(王兰民等, 2023), 殷志强和铁永波 都对比了逆冲和走滑断层地震诱发地质灾害的主 控因子(铁永波等, 2024; 殷志强等, 2013)。但前人 未对逆冲断层和正断层地震诱发地质灾害的发育 特征进行深入研究,因此本文拟开展逆冲断层和正 断层地震地质灾害对比研究,揭示不同孕灾背景条 件下的地震地质灾害发育分布规律及成因机制,对 区域防灾减灾具有重要意义。

自 2008 年汶川大地震以来, 青藏高原内部及 周缘地带频发多成因类型的6.0级及以上强震(田 婷婷等, 2023; 吴中海, 2024), 并且地震诱发地质灾 害经常造成不亚于地震本身的损害,因而成为关注 热点之一。2025年西藏定日地震的发震断层为正 断层活动为主,2023年甘肃定日地震的发震断层 为逆冲断层活动为主,两次地震在造成大量房屋倒 塌和损坏的同时,都诱发了特点不同的崩塌、滑坡 等次生地质灾害。其中积石山地震造成151人遇 难和受伤(高永武等, 2024), 定日地震造成 126人 遇难,188人受伤(王秀英等,2025)。国内外学者 对两次地震诱发地质灾害发育特征进行了不同角 度的深入研究(陆诗铭等, 2025; 邢珂等, 2025; 张丽 等, 2025; Song et al., 2025), 研究结果显示, 正断层 与逆断层地震的诱发地质灾害特征存在显著差异 (刘帅等, 2024; 铁永波等, 2025; 王立朝等, 2024)。 因而两次强震事件为开展正断层和逆断层诱发地 质灾害发育特征差异性研究提供了典型震例。

地震诱发地质灾害的发育规律及成灾特征与 地震和发震断层属性、地质条件及地形地貌等多 因素有关, 断层类型的差异可能造成地质灾害空间 分布的巨大差异。为揭示正断层和逆断层诱发的 地震地质灾害发育分布规律,为今后类似地震地质 灾害的快速评判和处置救援提供科学依据,本文选 取 2025 年定日  $M_s$ 6.8 地震和 2023 年积石山  $M_s$ 6.2 地震地质灾害事件作为研究对象,采用地面调查、 遥感解译和空间分析等方法,对比研究两种类型地 震作用下诱发地质灾害特征,并揭示其差异性,从 而为深入认识青藏高原内部不同类型地震环境下 的诱发地震灾害发育规律,并为类似地质灾害的应 急调查和风险预测等提供参考。

## 1 研究区概况

## 1.1 定日地震的区域背景

2025年1月7日西藏自治区日喀则市定日县

发生 M,6.8 地震, 地震影响区地处青藏高原南部, 地貌以深切割高山与平缓山谷相间地貌为主。地震影响区岩性复杂, 震中区主要为元古界混杂岩、片岩、片麻岩, 二叠系灰岩、砂岩、白云岩、页岩、板岩, 白垩系砂岩、页岩和板岩。河谷区域覆盖有第四系冰川堆积。震区西北部主要为古近系页岩、砂岩和砂砾岩(图 1A)。定日地震震源机制解显示为近乎垂直与喜马拉雅逆冲断层系的正断型地震, 发震断裂为登么错断裂, 走向为 NNE, 倾向为 NWW, 断层类型为正断层(图 2A), 并兼有一定的走滑分量上盘为主动盘(高扬等, 2025; 李雨森等, 2025)。

## 1.2 积石山地震的区域背景

2023年12月18日甘肃省临夏回族自治州积石山县发生 M.6.2 地震, 发震断层为拉脊山北缘断

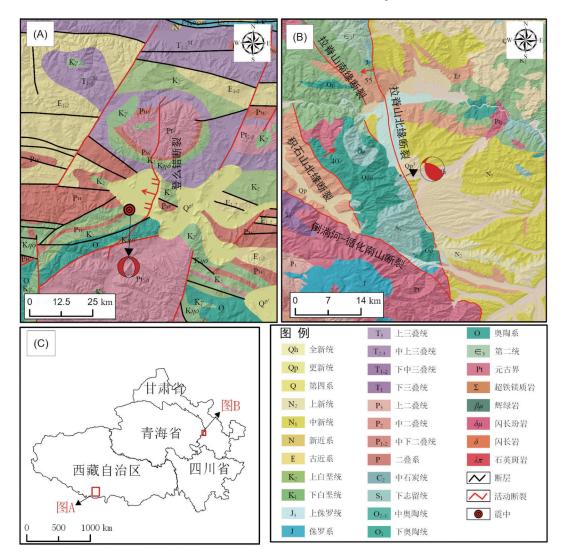
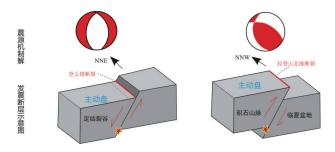


图 1 研究区地质概况图(A, 曹树钊等, 2002; B, 樊光明等, 2007)

Fig. 1 Geological overview of the study area

and seismic faults



A. 2025 年西藏定日  $M_5$ 6.8 级地震(陈鲲等,2025); B. 2023 年甘肃积石山  $M_5$ 6.2 地震(平孜菲等,2025)

## 图 2 地震震源机制解和发震断层对比示意图 Fig. 2 Contrast diagram of seismic source mechanisms

裂。地震影响区地处青藏高原东北缘的东段,发震断层西侧主要为高山深谷,东侧主要为黄土地貌。积石山地震影响区岩性同样复杂,发震断层西侧分布有奥陶系石英闪长岩、志留系花岗闪长岩、白垩系长英砂岩、砂砾岩、泥岩(图 1B)。发震断层东侧主要为洪冲积扇、河流相的砾石土、砂、黏土,以及风成马兰黄土层(张克信等,2006)。积石山地震震源机制解显示为低倾角逆冲兼右旋走滑变形模式,发震断裂走向为 NNW,倾向为 SWW(图 2B),断层类型为挤压逆冲型断层(陆诗铭等,2024; 张波等,2025)。

总体来说,定日县和积石山县震区均位于青藏高原边缘地带,但处于不同的地质构造环境。定日地震影响区地层结构复杂,涵盖从元古界到白垩系多个时代的岩石类型。积石山地震影响区以发震断层为界,东西两侧地貌和岩性差异明显。

## 2 震前地质灾害发育特征对比

## 2.1 震前地质灾害发育概况

根据西藏自治区、甘肃省和青海省地质灾害

隐患的在库统计数据, 2025 年定日 *M*,6.8 地震烈度 在 VI 度以上区域内,已有地质灾害隐患点 880 处。灾害类型以泥石流、滑坡和崩塌为主,其中泥石流 638 处、滑坡 108 处、崩塌 134 处。2023 年积石山 *M*,6.2 地震烈度在 VI 度以上区域内,已有地质灾害 隐患点 1248 处。灾害类型以滑坡、不稳定斜坡、泥石流和崩塌为主,其中滑坡 597 处、不稳定斜坡 313 处、泥石流 241 处、崩塌 97 处(表 1)。

从灾害类型及发育密度上看,定日地震影响区 内震前地质灾害类型以泥石流为主,积石山影响区 内以滑坡和不稳定斜坡为主。定日地震影响区灾 害点密度远小于积石山地震影响区。

#### 2.2 震前地质灾害空间分布特征对比

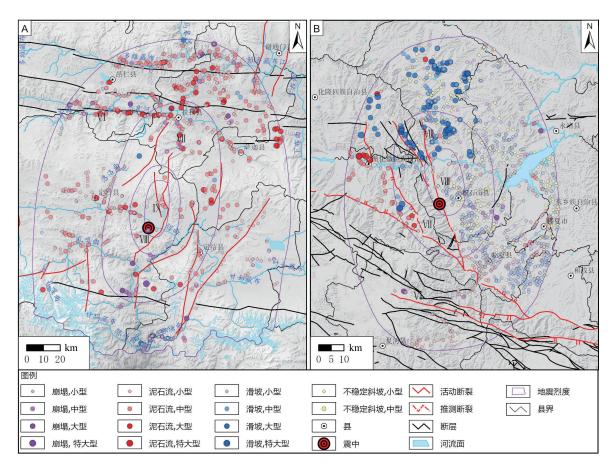
从空间分布特征看,定日地震和积石山地震影响区内地质灾害点均沿河流呈线性分布,但灾害类型和分布密度差异较大。定日地震影响区北侧灾害点分布密集,灾害点规模以中型和大型为主,在定日地震影响区中部和南部地区分布相对分散,且规模以中小型为主。积石山地震影响区内灾害点主要分布在发震断层的东侧,灾害类型以滑坡和不稳定斜坡为主,相比定日地震影响区灾害点分布密集。积石山地震影响区西北部集中分布中型和大型滑坡,地震影响区西部主要分布泥石流(图 3)。

## 2.3 震前地质灾害与烈度统计关系对比

定日地震和积石山地震影响区内地质灾害点发育,其分布密度与烈度等级无显著相关关系。定日地震和积石山影响区内灾害点数量随地震烈度的增加而减小,主要原因为地震烈度分布面积随烈度的增加而急剧减小。定日地震影响区内灾害点密度随地震烈度的增加而减小,但积石山地震影响区内灾害点密度随地震烈度的增加而增加(图 4)。定日地震烈度IX度区域包含朋曲宽河谷与盆地地

表 1 震区震前地质灾害点统计表
Table 1 Statistics of geological disaster points before the earthquakes

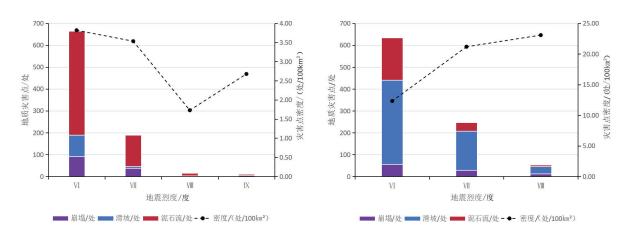
			•		-		·
震中位置	地震烈度/度	滑坡/处	泥石流/处	崩塌/处	不稳定斜坡/处	合计/处	密度/(处/100 km²)
定日县	VI	98	476	91	/	665	3.82
	VII	9	143	37	/	189	3.53
	VIII	1	12	2	/	15	1.73
	IX	0	7	4	/	11	2.68
	合计	108	638	134	/	880	3.66
积石山	VI	385	193	56	199	833	12.32
	VII	179	39	29	87	334	21.18
	VIII	33	9	12	27	81	23.08
	合计	597	241	97	313	1 248	14.36



A. 定日地震震区; B. 积石山地震震区

## 图 3 研究区震前地质灾害分布图

Fig. 3 Distribution of geological hazards before the earthquakes in the study area



A. 定日地震震区; B. 积石山地震震区

图 4 震区震前地质灾害点与地震烈度统计图

Fig. 4 Statistics of geological disaster points and seismic intensities before the earthquakes

貌,其面积约占IX度区面积的32%。该类地貌中地质灾害不发育,从而导致定日地震烈度IX度区内灾害点密度偏低。

## 3 地震诱发地质灾害发育分布特征对比

西藏定日地震和甘肃积石山地震影响区内同

震地质灾害数据来源于地面排查和影像解译,主要包括居民区、工程区和交通线路等区域。完整的同震地质灾害数据见(铁永波等,2024,2025),同时参考积石山同震地质灾害解译数据(陈博等,2025;李为乐等,2024),但为保持与定日地震同震地质灾害数据调查标准的统一,仅参考了部分面积较大的同震崩滑体。为消除震级和西藏定日地震烈度VI度区不完整的影响,本文选取地震烈度VI度以上区域进行同震地质灾害发育分布特征对比研究。

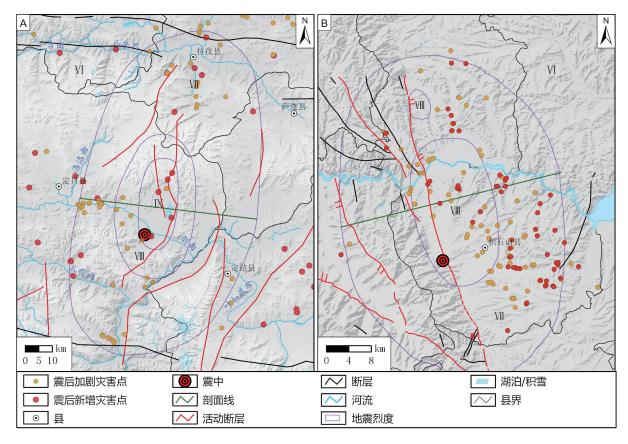
#### 3.1 发育特征对比

定日和积石山同震地质灾害类型及密度具有明显差异。定日同震地质灾害以新增地质灾害点为主,在地震烈度WI度及以上区域内,新增地质灾害点47处,加剧灾害点17处,灾害点面积密度为0.97处/km²。积石山同震地质灾害新增和加剧地质灾害点数相差不大,在地震烈度WI度及以上区域内,新增地质灾害点78处,加剧灾害点88处,灾害点面积密度为8.61处/km²。推测主要原因为定日地形地貌相对积石山地形地貌不利于崩滑体发育,

定日地貌以高山和宽缓河谷盆地为主,积石山地貌以黄土台地和丘陵为主,且定日震前地质灾害隐患点相对积石山较少。

## 3.2 分布特征对比

定日和积石山同震地质灾害空间分布呈现显著差异性(图 5)。定日和积石山同震地质灾害均主要部分在发震断层的一侧,但定日同震地质灾害主要分布在发震断层西侧,该方向与断层倾向一致,积石山同震地质灾害主要分布在发震断层东侧,该方向与断层倾向相反,主要原因为断层类型不同(详见 5.1 地震诱发地质灾害的主控因素)。定日同震地质灾害主要沿河流呈线状展布,而积石山同震地质灾害主要沿河流呈线状展布,而积石山同震地质灾害呈散点状分布。主要原因为定日地貌为高山河谷地貌,同震地质灾害主要发育在河谷两侧斜坡陡缓交界处,且居民区及交通也主要沿河谷分布;积石山地貌以黄土台地为主,同震地质灾害主要发育在黄土台地边缘、台塬山脊等位置,且居民和道路分别呈散点和网格状分布。



A. 西藏定日地震; B. 甘肃积石山地震

图 5 地震地质灾害点分布图

Fig. 5 Distribution of co-seismic geological disasters in the study area

## 4 两次地震的诱发地质灾害控制因子差 异性

为深入分析定日和积石山同震地质灾害整体 密度及空间发育特征,下面将从距断层距离、高程、 坡度和坡向共4个关键因子分析同震地质灾害发 育特征。

## 4.1 距断层距离

定日同震地质灾害面积和面积密度未呈现与积石山相似的趋势。积石山同震地质灾害面积和面积密度随距断层距离增加呈现指数衰减的趋势(图 6),该趋势与 2022年泸定地震(铁永波等,2022)、2013年芦山地震(Xu et al., 2015)、2008年汶川地震(黄润秋等,2008)等规律相似,且符合地震能量衰减规律。定日同震地质灾害面积和面积密度未呈现随距断层距离衰减趋势的主要原因为

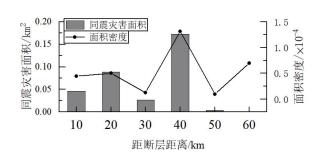
地形地貌。首先,位于震中区的宽缓河谷地貌不利于同震地质灾害的发育;其次,在震中区周边的高山地区人迹罕至且影像解译特征不明显,导致调查精度和覆盖范围有限。这两个原因导致定日同震地质灾害面积及面积密度未随距断层距离增加而减小。

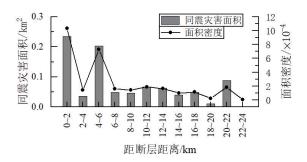
## 4.2 高程

定日和积石山同震地质灾害面积和面积密度 均具有高程分布优势区间,其中积石山地震的高程 分布优势空间更明显。定日同震地质灾害面积均 匀分布在海拔 3 800~4 600 m 的范围内,其中同震 地质灾害面积密度在 3 800~4 000 m 出现峰值 (图 7)。积石山同震地质灾害面积优势分布区间 为 1900~2 300 m,同震地质灾害面积密度峰值为 1900~2 100 m。

#### 4.3 坡度

定日和积石山同震地质灾害面积和面积密度

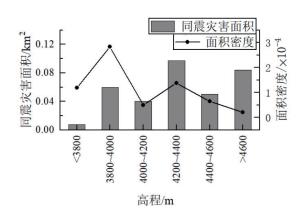


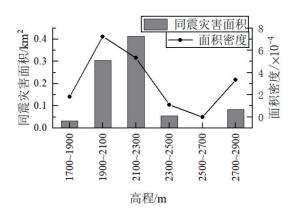


A. 西藏定日地震; B. 甘肃积石山地震

图 6 同震地质灾害面积及密度与距断层距离的关系统计图

Fig. 6 Relationship between the co-seismic landslide area and distance from the fault





A. 西藏定日地震; B. 甘肃积石山地震

图 7 同震地质灾害面积及密度与高程的关系统计图

Fig. 7 Relationship between the co-seismic landslide area and elevation

随坡度增加呈现不同的变化趋势。定日同震地质灾害面积主要分布在坡度为0°~10°和40°~50°两个区间内,同震地质灾害面积密度峰值出现在坡度为40°~50°的区间内(图8)。这是由于同震地质灾害主要类型为泥石流和崩塌(铁永波等,2025),坡度呈现两极峰值。积石山同震地质灾害面积和密度呈现单峰特征,优势坡度区间为20°~25°,其同震地质灾害主要类型为滑坡(铁永波等,2024)。

## 4.4 坡向

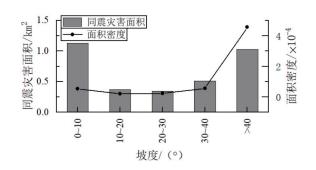
定日和积石山地震同震地质灾害分布坡向和 发震断层倾向呈强相关。定日地震的发震断层为 正断层,断层走向为 NNE,上盘运动方向为 SWW。 同震地质灾害主要分布坡向为 SE,与断层运动方 向相反(图 9)。积石山地震的发震断层为逆断层,断层走向为 NNW 向,上盘运动方向为 NEE。同震地质灾害主要分布坡向为 E 和 SE,与断层运动方向大致相同。定日和积石山地震发震断层运动方向大致相反,但同震地质灾害主要分布坡度相同。

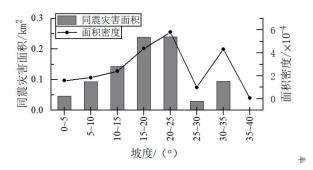
## 5 讨论

## 5.1 地震诱发地质灾害的主控因素

## (1)发震断层

定日和积石山同震地质灾害沿断层垂直方向 分布特征与断层类型相关。选取定日和积石山地 震震中位置剖面线,统计分布于剖面线两侧且烈度 大于WI度区域的地质灾害,剖面线见图 5。地质灾

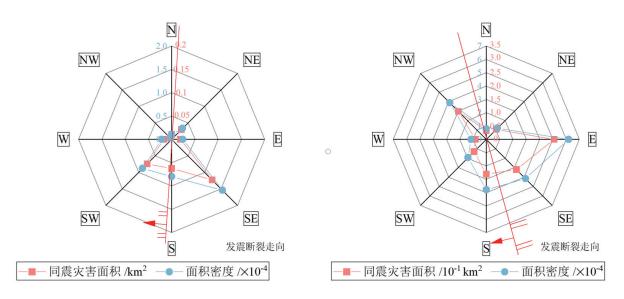




A. 西藏定日地震; B. 甘肃积石山地震

图 8 同震地质灾害面积与坡度的关系统计图

Fig. 8 Relationship between co-seismic landslide area and slope



A. 西藏定日地震; B. 甘肃积石山地震

图 9 同震崩滑体面积及密度与坡向的关系雷达图

Fig. 9 Relationship between co-seismic landslide area and aspect

害沿剖面分布的结果如图 10 所示,定日和积石山同震地质灾害在断层两侧分布不均匀,更多地分布在断层一侧,其中定日同震地质灾害主要分布在断层的上盘,而积石山为下盘侧。定日同震地质灾害与断层的"上盘效应"一致,而积石山同震地质灾害并未显示出"上盘效应",汶川地震的发震断层为逆冲断层,地质灾害显示出明显的"上盘效应"(黄润秋等,2008),这说明断层作用在积石山同震地质灾害控灾因素中未起到主导地位。类似的情况同样出现在芦山地震(李秀珍等,2014)。

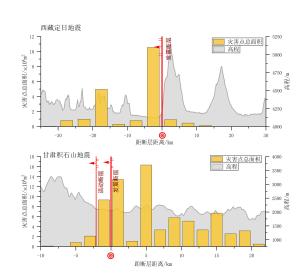
## (2)特殊土体

定日和积石山地震影响区内均具有一类特殊的土体,即存在于河谷地区的第四系覆盖土。定日地震影响区内有朋曲自西向东穿过,朋曲河谷宽0.8~4.6 km,地震诱发大量砂土液化灾害(图 11A)。积石山地震影响区内有黄河自西向东穿过,距离黄河约 3.2 km 的左侧发生面积约 1.5 km²的砂土液化,并形成泥石流掩埋下游区域(图 11B)。定日地震砂土液化区域与朋曲补给密切相关,而积石山砂土液化区与其特殊地层结构关系密切(李智超等,2025; Wang et al., 2024; Zhang et al., 2024)。

## 5.2 两次地震诱发地质灾害差异性的原因分析

定日和积石山地震诱发地质灾害的主要差异性表现在灾害发育密度和沿发震断层的垂直展布。其主要原因为两次地震的岩土体结构和地貌差异,定日地震影响区内分布有大面积的平缓河谷,不利于同震崩滑体的诱发,利于砂土液化灾害的发生。而积石山地震影响区内,在断层的下盘分布有厚层黄土台地,在台地边缘、台塬山脊等部位利于同震崩滑体的发育。且在发震断层下盘的同震灾害面





A. 西藏定日地震; B. 甘肃积石山地震; 横轴负号表示位于断层的上盘

图 10 研究区地震新增地质灾害点个数与距断层距离统计图(剖面线位置见图 5)

Fig. 10 Number of newly added geological disaster points and distance from the fault in the study area (see Fig. 4 for the positions of the section lines)

积远大于下盘,其主要原因为特殊的黄土台地。

本文具有数据和机制分析的局限性。定日地 震影响区内,震前灾害和同震灾害数据获取的主要 手段为地面调查,且该地区人口密度低,主要居住 在河谷地段,因此对高山区的调查不够深入,但是 烈度大于WI度区域的同震灾害,与坡向、距断层距 离的分布规律基本与前人研究相符合;积石山同震 地质灾害沿断层展布未呈现出常见的"上盘效 应",黄土台地的特殊土体和地形是其主要原因, 而对于其是否存在台地放大效应,或黄土特殊土力



A. 西藏定日地震区朋曲河谷; B. 甘肃积石山地震区金田村(Zhang et al., 2024)

图 11 砂土液化示意图

Fig. 11 Sand liquefaction area

学特性是否存在与地震波的叠加效应都需要进一 步的机制研究。

## 6 结论

通过定日和积石山地震影响区地质灾害发育 规律对比分析,得出以下2点结论。

- (1)定日和积石山同震地质灾害在类型、密度和空间展布上差异显著。定日同震地质灾害以新增地质灾害点为主,灾害点沿河呈线状分布,而且发育密度相对较低;而积石山同震地质灾害点新增和加剧地质灾害点数量接近,灾害点主要沿黄土台地边缘或深切台地的沟谷边坡呈散点状分布,发育密度相对较高。导致该现象的主要原因为两次地震的地形地貌的显著差异,即宽缓河谷地貌不利于同震崩滑体的发育,特殊的黄土台地利于同震崩滑体的发育。
- (2)正断层与逆断层诱发同震地质灾害的垂向空间展布相反:定日同震地质灾害(正断层)主要分布在发震断层的上盘,具有显著的"上盘效应",而积石山同震地质灾害(逆断层)主要分布在发震断层的下盘,特殊的黄土台地地貌是导致积石山该差异的主要原因。

本次调查和解译的同震地质灾害主要针对有威胁的点位,虽然从空间分布、面积、面积密度三个角度分析了距断层距离、高程、坡度、断层类型等因子对同震地质灾害发育的控制作用,但是各因子间相互作用复杂且难以量化,因此有关不同地震诱发的同震崩滑体的发育规律有待进一步深入研究。

## References

- Song C, Chen B, Li Y, et al., 2025. Amplified coseismic loess failure and postseismic landslide acceleration triggered by the 2023 Jishishan, China earthquake [J]. Engineering Geology, 352: 108074.
- Wang F, Feng Y, Chen Y, et al., 2024. A liquefied long-runout loess landslide triggered by the Jishishan  $M_s$ 6.2 earthquake on 18 December 2023 in Qinghai, China[J]. Landslides, 21 (12): 3169 3177.
- Xu C, Xu X, Shyu J B H, 2015. Database and spatial distribution of landslides triggered by the Lushan, China  $M_{\rm w}$  6.6 earthquake of 20 April 2013 [J]. Geomorphology, 248: 77-92.
- Zhang Z, Zeng R, Zhao S, et al., 2024. 2023 Jishishan Earthquake-triggered river terrace landslide enabled by tectonic and human activities [J]. Natural Hazards, 29 (1): 1-15.
- Cao S Z, Li D W, 2002. Geological Map of Dingjie Area (1:250, 000)

- [CM]. Hubei: Hubei Provincial Institute of Cartography.
- Chen B, Song C, Chen Y, et al., 2025. Emergency identification and influencing factors of coseismic landslides and building damage from the 2023 Jishishan  $M_s$  6.2 earthquake, Gansu Province [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 50 (2): 322-332.
- Chen K, Yang T, Wang Y Z, et al., 2025. Rapid output parameters of the January 7, 2025  $M_s$ 6.8 Dingri earthquake, Tibet[J]. Progress in Earthquake Sciences, 55 (3): 164 172.
- Fan G M, Zhu Y H, Zhang K X, et al., 2007. Geological map of Linxia

  City (1: 250000) [CM]. Hubei: Hubei Provincial Institute of

  Cartography.
- Gao Y, Wu Z H, Han S, et al., 2025. Late Quaternary vertical slip rate of the seismogenic fault (Dengmocuo Fault) of the 2025 Dingri  $M_36.8$  earthquake [J/OL]. Seismology and Geology: 1-18.
- Gao Y W, Kan W L, 2024. Brief analysis of seismic damage and suggestions for exposed elements survey of the Jishishan M6.2 earthquake, Gansu[J]. Disaster Reduction Review, (1): 16 21
- He S M, Zhang Z, Yan S X, et al., 2024. Geodisaster seismology [J]. Mountain Research, 42 (5): 591 606.
- Huang R Q, 2011. After effect of geohazards induced by the Wenchuan earthquake[J]. Journal of Engineering Geology, 19 (2): 145 151.
- Huang R Q, Li W L, 2008. Research on development and distribution rules of geohazards induced by wenchuan earthquake on 12th may, 2008[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 27 (12): 2585 – 2592.
- Li W L, Xu Q, Li Y S, et al., 2024. Preliminary analysis of coseismic geological hazards induced by the 2023 Jishishan  $M_s$ 6.2 earthquake [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 51 (1): 33 45+90.
- Li X Z, Kong J M, 2014. Comparative analysis of development law and characteristics of secondary geo-hazard induced by Lushan and Wenchuan earthquakes[J]. Journal of Natural Disasters, 23 (5): 11-18.
- Li Y S, Li W L, Xu Q, et al., 2025. InSAR coseismic deformation detection and fault slip distribution inversion of the  $M_s6.8$  earthquake in Dingri, Tibet on January 7, 2025 [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 52 (2): 199 211
- Li Z C, Wu Z H, Han S, et al., 2025. Characteristics of sand liquefaction and structural causes of the January 7, 2025 Dingri M6.8 earthquake[J]. Earth Science, 50 (5): 1830 1841.
- Liu S, He B, Wang T, et al., 2024. Development characteristics and susceptibility assessment of coseismic geological hazards of Jishishan  $M_36.2$  earthquake, Gansu Province, China[J]. Journal of Geomechanics, 30 (2): 314 331. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2024009.
- Lu S M, Wu Z H, Huang T, 2025. Characteristics of geological hazard development and disaster-inducing environment of the  $M_s6.2$

- earthquake in Jishishan, Gansu Province[J]. Journal of Geomechanics, 31 (1): 139-155.
- Lu S M, Wu Z H, Li Z C, 2024. Seismic structure characteristics of the 18 December 2023 M6.2 Jishishan earthquake, Gansu Province[J]. Progress in Earthquake Sciences, 54 (1): 86-93.
- Ping Z F, Ge W P, Zhang B, et al., 2025. Controversy over the dip of the seismogenic fault of the 2023 Jishishan *M*<sub>8</sub>6.2 earthquake and seismic risk assessment of adjacent faults[J]. China Earthquake Engineering Journal, 47 (2): 480 491.
- Tian T T, Wu Z H, 2023. The latest prehistoric great earthquake event of the Dingmu Co normal fault in the southern segment of the Shenzha-Dingjie Rift, Tibet, and its seismogeological significance[J]. Geological Review, 69 (S1): 53-55.
- 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.
- Tie Y B, Zhang X Z, Cao J W, et al., 2024. Comparative research of the characteristics of geological hazards induced by the Jishishan  $(M_56.2)$  and Luding  $(M_56.8)$  earthquakes [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 51 (1): 9-21+59.
- Tie Y B, Zhang X Z, Lu J Y, et al., 2022. Characteristics of geological hazards and it's mitigations of the M<sub>6</sub>6.8 earthquake in Luding County, Sichuan Province[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 49 (6): 1-12.
- Wang L M, Cai S F, Bo J S, et al., 2023. Triggering types, characteristics and disaster mechanism of seismic loess landslides [J].
  Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 45 (8): 1543 1554.
- Wang L C, Hou S S, Dong Y, et al., 2024. Basic characteristics of coseismic geological hazards induced by Jishishan  $M_s$  6.2 earthquake and suggestions for their risk control[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 35 (3): 108-118.
- Wang X Y, Dan Z, Zhao G C, et al., 2025. Preliminary damage analysis of Dingri 6. 8-magnitude earthquake in Xizang using ground motion data[J]. Safety and Environmental Engineering, 32 (2): 41-49.
- Wu Z H, 2024. The  $M_{\rm w} {\geqslant} 6.5$  strong earthquake events since 1990 around the Tibetan Plateau and control-earthquake effect of active tectonic system[J]. Progress in Earthquake Sciences, 54 (1): 10-24.
- Xing K, Ni H, Zhang L L, et al., 2025. Analysis of surface rupture and seismic damage characteristics of 2025 Dingri M<sub>6</sub>6. 8 earthquake in Xizang [J]. Safety and Environmental Engineering, 32 (2): 20 30
- Yin Y P, 2008. Research on geological disasters of the Wenchuan Earthquake [C]// Collection of Invited Reports and Special Reports of the 2008 Disaster Prevention and Mitigation Forum of the China Association for Science and Technology. China Geological Survey: 29 – 44.

- Yin Z Q, Chen H Q, Chu H L, et al., 2013. Analysis of main controlling factors for geological disasters induced by five typical earthquakes in China since 2008[J]. Earth Science Frontiers, 20 (6): 289-302.
- Zhang B, Wang A G, Yao Y S, et al., 2025. Seismic fractures and their genetic mechanisms of the 2023 Jishishan  $M_s6.2$  earthquake [J]. Journal of Geomechanics, 31 (2): 211-222.
- Zhang K X, Zhu Y H, Fan G M, et al., 2006. Geological map of the People's Republic of China I48C001001 (Linxia City) [Z]. Institute of Geological Survey, China University of Geosciences (Wuhan).
- Zhang L, Li M, Liu B, et al., 2025. Characterization of co-seismic deformation and geological hazard development of Dingri  $M_s6$ . 8 earthquake in Xizang[J]. Safety and Environmental Engineering, 32 (2): 1-13.

## 附中文参考文献

- 曹树钊,李德威,2002. 定结幅(1:25万)地质图[CM]. 湖北:湖 北省地图院.
- 陈博,宋闯,陈毅,等,2025.2023年甘肃积石山 $M_s$ 6.2地震同震滑坡和建筑物损毁情况应急识别与影响因素研究[J].武汉大学学报:信息科学版,50(2):322-332.
- 陈鲲,杨婷,王永哲,等,2025.2025年1月7日西藏定日6.8级地震的快速产出参数[J].地震科学进展,55(3):164-172.
- 樊光明,朱云海,张克信,等,2007.临夏市幅(1:25万)地质图 [CM].湖北.湖北省地图院.
- 高扬,吴中海,韩帅,等,2025.2025 年定日 M<sub>6</sub>6.8 地震发震断层 (登么错断裂)晚第四纪垂直滑动速率[J/OL].地震地质:1-18. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2192.P.20250519.1157.002.html.
- 高永武, 阚文亮, 2024. 甘肃积石山 6.2 级地震震害简析及承灾体调查建议[J]. 防灾博览(1): 16-21.
- 何思明,张振,闫帅星,等,2024.灾害地震学[J].山地学报,42(5):591-606.
- 黄润秋,2011.汶川地震地质灾害后效应分析[J].工程地质学报,19(2):145-151.
- 黄润秋, 李为乐, 2008. "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, 27(12): 2585-2592.
- 李为乐,许强,李雨森,等,2024.2023年积石山 $M_6$ 6.2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.
- 李秀珍,孔纪名,2014. 芦山和汶川地震诱发次生地质灾害的规律及特征对比分析[J]. 自然灾害学报,23(5):11-18.
- 李雨森,李为乐,许强,等,2025.2025年1月7日西藏定日 $M_s$ 6.8级地震 InSAR 同震形变探测与断层滑动分布反演[J].成都理工大学学报:自然科学版,52(2):199-211.
- 李智超, 吴中海, 韩帅, 等, 2025. 2025 年 1 月 7 日定日 6.8 级地震砂土液化特征及成因机制 [J]. 地球科学, 50(5): 1830-1841.
- 刘帅,何斌,王涛,等,2024.甘肃积石山县 M,6.2 地震同震地质灾 害发育特征与易发性评价[J].地质力学学报,30(2):314-331.

- 陆诗铭,吴中海,黄婷,2025. 甘肃积石山  $M_s$ 6.2 地震地质灾害发育特征及孕灾环境分析 [J]. 地质力学学报,31 (1): 139-155.
- 陆诗铭,吴中海,李智超,2024.2023年12月18日甘肃省积石山6.2级地震的控震构造及特征[J].地震科学进展,54(1):86-93
- 平孜菲,葛伟鹏,张波,等,2025.2023年积石山 M,6.2 地震发震 断层倾向争议讨论与相邻断裂地震危险性评估[J]. 地震工程学 报,47(2):480-491.
- 田婷婷,吴中海,2023.西藏申扎一定结裂谷南段丁木错正断层的最新史前大地震事件及其地震地质意义[J].地质论评,69(S1):53-55
- 铁永波,高云建,张宪政,等,2025.西藏定日县 M,6.8 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.
- 铁永波, 张宪政, 曹佳文, 等, 2024. 积石山  $M_s$ 6.2 级和泸定  $M_s$ 6.8 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,2022.四川省泸定县 $M_6$ 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,49(6):1-12
- 王兰民,柴少峰,薄景山,等,2023.黄土地震滑坡的触发类型、特征与成灾机制[J].岩土工程学报,45(8):1543-1554.

- 王立朝,侯圣山,董英,等,2024.甘肃积石山 M,6.2 级地震的同震地质灾害基本特征及风险防控建议[J].中国地质灾害与防治学报,35(3):108-118.
- 王秀英,旦增,赵国存,等,2025.基于地震动数据的西藏定日6.8级地震震害初步分析[J].安全与环境工程,32(2):41-49.
- 吴中海,2024. 青藏高原1990年以来的 $M_w \ge 6.5$ 强震事件及活动构造体系控震效应[J]. 地震科学进展,54(1):10-24.
- 邢珂,黎昊,张乐乐,等,2025.2025年西藏定日M,6.8地震地表破裂与震害特征分析[J].安全与环境工程,32(2):20-30.
- 殷跃平,2008. 汶川特大地震地质灾害研究[C]//中国科协2008 防灾减灾论坛特邀报告、专题报告文集. 中国地质调查局:29-44.
- 股志强, 陈红旗, 褚宏亮, 等, 2013. 2008 年以来中国 5 次典型地 震事件诱发地质灾害主控因素分析[J]. 地学前缘, 20 (6): 289-302
- 张波,王爱国,姚赟胜,等,2025.2023年积石山 $M_6$ 6.2 地震的地震裂缝及其成因机制[J].地质力学学报,31(2):211-222.
- 张克信,朱云海,樊光明,等.2006.中华人民共和国地质图 I48C001001(临夏市幅)[Z].中国地质大学(武汉)地质调查 研究院.
- 张丽,李曼,刘斌,等,2025.西藏定日 $M_s$ 6.8 地震同震形变与地质灾害发育特征分析[J].安全与环境工程,32(2):1-13.