

## 积石山 Ms 6.2 级和泸定 Ms 6.8 级地震地质 灾害发育规律对比

铁永波<sup>1,2,3</sup>, 张宪政<sup>1,2,3</sup>, 曹佳文<sup>4</sup>, 秦雅东<sup>1,2,3</sup>, 王立朝<sup>5</sup>, 董英<sup>6</sup>, 郭富赞<sup>7</sup>,  
郭兆成<sup>8</sup>, 白永健<sup>1,2,3</sup>, 冉涛<sup>1,2,3</sup>, 侯圣山<sup>5</sup>, 王涛<sup>9</sup>, 高波<sup>6</sup>, 卢佳燕<sup>1,10</sup>,  
李光辉<sup>11</sup>, 宁志杰<sup>1,10</sup>, 向炳霖<sup>1,10</sup>, 孙才<sup>1,10</sup>

- (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), 成都 610081;  
2. 自然资源部地质灾害风险防控工程技术创新中心, 成都 611734;  
3. 自然资源部成都地质灾害野外科学观测研究站, 成都 610000; 4. 中国地质调查局, 北京 100037;  
5. 中国地质环境监测院(自然资源部地质灾害技术指导中心), 北京 100081;  
6. 中国地质调查局西安地质调查中心(西北地质科技创新中心), 西安 710119;  
7. 甘肃省地质环境监测院, 兰州 730000; 8. 中国自然资源航空物探遥感中心, 北京 100083;  
9. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081; 10. 中国地质科学院, 北京 100037;  
11. 成都理工大学, 成都 610059)

[摘要] 2023 年积石山 Ms 6.2 级地震是继 2022 年泸定 Ms 6.8 级地震后在青藏高原东缘—东北缘地区发生的又一次强震事件。2 次地震均诱发大量地震地质灾害, 但由于发震断层类型、地质和地貌等条件的差异, 2 次地震地质灾害发育分布规律呈现显著的差异性。为揭示不同震区地震地质灾害发育规律, 本研究采用地面调查、遥感解译和空间叠加统计等方法, 对比分析了积石山和泸定地震地质灾害发育分布特征和控灾因子。结果表明: 断层类型控制了同震地质灾害的发育优势坡向和垂向空间展布, 即“背向坡效应”和“上下盘效应”; 地貌条件是影响同震地质空间分布的主要因子, 即川西高山峡谷地貌中“线状”分布和陇西黄土地貌中“面状”分布; 特殊土体类型、气候、植被覆盖等差异性是同震地质灾害调查与应急处置中需要重点关注的因子。本次研究可为不同断层类型和不同地貌区同震地质灾害重点防范区范围划定、趋势预测和灾后重建提供科学参考。

[关键词] 积石山地震; 泸定地震; 地震地质灾害对比研究; 同震滑坡分布特征; 控灾因子

[分类号] P315.9

[文献标志码] A

[收稿日期] 2023-12-30。

[基金项目] 国家自然科学基金项目(U20A20110-01); 中国地质调查局地质调查项目(DD20221746, DD20230086); 中央引导地方科技发展资金项目(3ZYQA03262)。

[第一作者] 铁永波(1979—), 男, 教授级高级工程师, 研究方向: 地质灾害形成机理与防治研究, E-mail: tyongbo@mail.cgs.gov.cn。

[通信作者] 曹佳文(1979—), 男, 高级工程师, 研究方向: 地质灾害、城市地质及重大工程地质安全风险, E-mail: cjiawen@mail.cgs.gov.cn。

[引用格式] 铁永波, 张宪政, 曹佳文, 等, 2024. 积石山 Ms 6.2 级和泸定 Ms 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.

Tie Y B, Zhang X Z, Cao J W, et al., 2024. Comparative research of characteristics of geological hazards induced by 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.

## Comparative research of the characteristics of geological hazards induced by the Jishishan (Ms 6.2) and Luding (Ms 6.8) earthquakes

TIE Yongbo<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Xianzheng<sup>1,2,3</sup>, CAO Jiawen<sup>4</sup>, QIN Yadong<sup>1,2,3</sup>,  
WANG Lichao<sup>5</sup>, DONG Ying<sup>6</sup>, GUO Fuyun<sup>7</sup>, GUO Zhaocheng<sup>8</sup>, BAI Yongjian<sup>1,2,3</sup>,  
RAN Tao<sup>1,2,3</sup>, HOU Shengshan<sup>5</sup>, WANG Tao<sup>9</sup>, GAO Bo<sup>6</sup>, LU Jiayan<sup>1,10</sup>,  
LI Guanghui<sup>11</sup>, NING Zhijie<sup>1,10</sup>, XIANG Binglin<sup>1,10</sup>, SUN Cai<sup>1,10</sup>

1. Chengdu Center of China Geological Survey (Geosciences Innovation Center of Southwest China), Chengdu 610081, China;
2. Technology Innovation Center for Risk Prevention and Mitigation of Geohazard, Ministry of Natural Resources, Chengdu 611734, China;
3. Observation and Research Station of Chengdu Geological Hazards, Ministry of Natural Resources, Chengdu 610000, China;
4. China Geological Survey, Beijing 100037, China;
5. China Institute of Geo-Environment Monitoring (Guide Center of Prevention Technology for Geo-Hazard, MNR), Beijing 100081, China;
6. Xi'an Center of China Geological Survey (Northwest China Center on Geosciences Innovation), Xi'an 710119, China;
7. Institute of Geo-Environment Monitoring of GANSU Province, Lanzhou 730000, China;
8. China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Natural Resources, Beijing 100083, China;
9. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;
10. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;
11. Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

**Abstract:** The 2023 Jishishan earthquake (Ms 6.2) was another strong earthquake that occurred in the eastern/northeastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau after the 2022 Luding earthquake (Ms 6.8). Both earthquakes triggered large numbers of co-seismic landslides. To reveal the differences of the distributions and control factors of co-seismic landslides caused by the Jishishan and Luding earthquakes, distribution maps of co-seismic landslides were compared and analyzed using ground survey data, remote sensing interpretation data, and spatial superposition statistics. The results showed that the fault type controlled the dominant slope direction of co-seismic landslides as well as the spatial distribution along the vertical fault, where the “back slope” effect and “up-fault and down-fault” effect were clearly identified. Geomorphic conditions were the main factors affecting the spatial distribution characteristics of co-seismic landslides. The distribution of co-seismic landslides was “linear” in the mountain and canyon landforms in western Sichuan, and “planar” in the loess landforms in Longxi. Attention should be given to the differences of special soil type, climate, and vegetation cover in investigations and emergency treatment of co-seismic landslides. This research provided a scientific reference for the delineation of the key prevention areas of co-seismic landslides in different fault types and different geomorphic areas, including trend predictions and the post-disaster reconstruction.

**Key words:** Jishishan earthquake; Luding earthquake; comparative research of co-seismic landslides; distribution characteristics of co-seismic landslides; hazard control factors

据中国地震台网中心发布的数据,2023年12月18日23时59分,甘肃省临夏回族自治州积石

山县发生 Ms 6.2 级地震,震中位于北纬 35.70°、东经 102.79°,震源深度 10 km,最高烈度达到 VIII

度。地震造成大量房屋、交通、通信、电力等基础设施受损,同时诱发大量滑坡、崩塌、砂土液化等地震地质灾害。截至 2023 年 12 月 22 日 8 时,地震已经造成 148 人遇难,3 人失联。

地震地质灾害一般指由地震作用诱发的崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害(Yin et al., 2009; 黄润秋, 2017; 周洪福等, 2023), 通常对震区建筑物造成严重破坏, 因此其分布特征、发育规律、控灾机制、演变规律和风险预测等引发国内外学者广泛关注(Fan et al., 2021; Huang et al., 2009; Kamranzad et al., 2020)。在青藏高原东缘—东北缘地区, 因印度—欧亚陆陆碰撞导致该区域构造活动强烈和地震频发(刘同振等, 2023; 潘桂棠等, 2022; 许志琴等, 2016)。自 2008 年以来, 该区域共发生了 8 次震级超过 Ms 6.0 级的强震事件, 分别为 2008 年汶川地震、2010 年玉树地震、2013 年芦山和岷县漳县地震、2017 年九寨沟地震、2022 年芦山和泸定地震、2023 年积石山地震(李佳妮, 2023)。国内外学者基于这些地震事件对地质灾害发育规律进行了大量研究, 并发现了震级、断层上下盘、距断层距离、坡度、高程等因素对灾害类型、分布特征和成灾机制的影响(Chang et al., 2021; Xiong et al., 2023; 陈冠等, 2013; 范宣梅等, 2022; 黄润秋等, 2009; 梁靖等, 2019; 裴向军等, 2013; 铁永波等, 2022; 殷跃平等, 2010)。特别是针对该区域相似地貌环境的地震地质灾害对比研究成果尤为丰硕, 如刘秀珍等(2014)对比分析了龙门山地区的芦山和汶川地震地质灾害发育规律和特征, 王兰民等(2023)基于黄土地区的 9 次强震事件分析了黄土地震滑坡的触发类型、特征和成灾机制。殷志强等(2013)通过搜集中国西部 2008~2013 年 5 次典型地震事件诱发的地质灾害, 从宏观角度分析了断层性质、地震峰值加速度和坡度等对地震地质灾害分布的控制作用。然而到目前为止, 针对不同地貌区和不同发震断层类型的地震地质灾害发育规律详细对比研究仍较为薄弱。

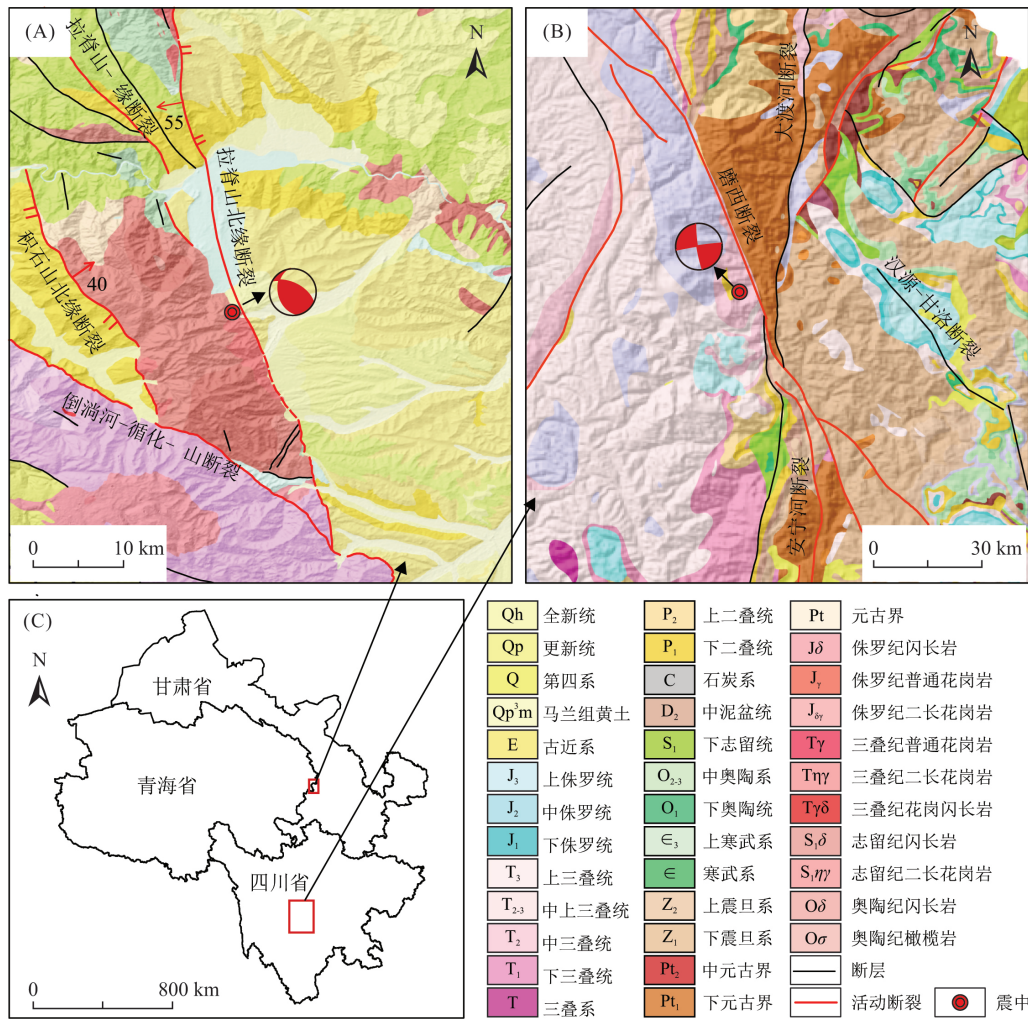
地震诱发的地质灾害发育规律与成灾特征受发震断层、地震烈度、地形地貌、地层岩性等多种因素的组合控制, 震级和烈度相似的地震也会在不同地区造成地震地质灾害发育的显著差异, 给地震地质灾害的成灾特征研判、发展趋势预测及救援力量调配等带来极大的不确定性。为揭示不

同地形地貌区和不同断层活动特性对地震地质灾害发育特征的控制机制, 给今后类似地震地质灾害的快速评价、研判与处置提供借鉴经验, 本文选取 2023 年积石山 Ms 6.2 级地震和 2022 年泸定 Ms 6.8 级地震地质灾害作为研究对象。虽然 2 次地震震级相似, 但 2 次地震发生在不同断层类型、不同地质构造和地形地貌区, 且地震地质灾害的发育规律也有显著差异。此次研究采用地面调查、影像解译和空间叠加统计等方法, 对比研究西南峡谷区和陇西黄土地区地震地质灾害发育规律, 拟揭示 2 次地震对地震地质灾害的控制特征, 为地震地质灾害的应急处置和风险预测提供科学依据。

## 1 研究区概况

本文的研究区包括甘肃积石山 Ms 6.2 级地震和四川泸定 Ms 6.8 级地震影响区(图 1)。甘肃积石山 Ms 6.2 级地震震中位于积石山县西部的柳沟乡, 震区地处青藏高原东北缘的东段, 距离积石山县 8 km。发震断裂为拉脊山北缘断裂东段, 为一条走向 NNW、倾向 SWW 的挤压逆冲型断层, 断层两侧地貌高差显著(袁道阳, 2003; 张波, 2012)。震区地层岩性复杂, 其中, 拉脊山、积石山等高山区出露古生界砂岩、粉砂岩、泥岩和碳酸盐岩等海相地层, 晚古生界—中生界砂砾岩、泥岩、煤页岩等海陆交互相地层, 晚中生界砂泥岩互层的陆相红层, 以及加里东期、印支期、燕山期的基性—酸性火山岩和大量中酸性侵入岩, 局部见前寒武纪片岩、片麻岩等中深变质岩。循化、临夏 2 个中生代盆地沉积了大片晚白垩系—新近系红层, 以砂砾岩、砂岩、泥岩互层为主; 青藏运动后, 更新世和全新世沉积了大量洪冲积扇、河流相的砾石土、砂、黏土, 以及风成马兰黄土层(张克信等, 2006)。

四川泸定 Ms 6.8 级地震震中位于泸定县南部的磨西镇, 震区内地形高差大, 震区地层岩性复杂, 从第四系至震旦系均有分布, 广泛出露震旦系、志留系、泥盆系、石炭系、二叠系、三叠系、古近系和第四系, 其中以中生界、古生界三叠系及元古界变质岩系分布最广。震区西部主要出露三叠系的砂岩、板岩和少量石灰岩, 东部主要出露石英岩、大理岩、白云石、变质砂岩、碳酸盐岩、基性和酸性火山岩。震区内多时代、多类型的岩性特征



(A) 积石山地震影响区地质图(张克信,2006),震源机制解来源于王勤彩等(2024);(B) 泸定地震影响区地质图,震源机制解来源于易桂喜等(2023);(C) 鹰眼图,基于标准地图(审图号:GS(2023)2766)制作

图 1 研究区地质概况图  
Fig. 1 Geological overview of the study area

导致地质灾害孕灾的复杂性,尤其是河谷斜坡上部的破碎岩体,这些岩石在地震下为群发性浅表层崩塌的发育创造了有利条件;但是相对坚硬的花岗岩体在高陡临空条件下形成卸荷裂隙,这又为高位大块体的岩质崩塌的发育提供了有利因素(铁永波等,2022)。

总体来说,2个震区构造条件的复杂性基本相当。甘肃积石山 Ms 6.2 级地震震区地貌和岩性分区相对简单,但差异性明显;四川泸定 Ms 6.8 级地震震区地貌和岩性分区相对复杂。

## 2 地震地质灾害发育规律对比

### 2.1 震前地质灾害发育分布特征对比

根据应急管理部和 中国地震局提供的烈度分

布数据以及四川省、甘肃省、青海省地质灾害隐患点在库统计数据,2023 年积石山 Ms 6.2 级地震烈度在 VI 度以上影响范围内,已有地质灾害点 1 248 处,灾害类型主要为滑坡、不稳定斜坡、泥石流和崩塌,其中滑坡 597 处、不稳定斜坡 313 处、泥石流 241 处、崩塌 97 处;2022 年泸定 Ms 6.8 级地震烈度在 VI 度以上影响范围内,有地质灾害点 934 处,灾害类型主要为滑坡、泥石流和崩塌,其中滑坡 420 处、泥石流 375 处、崩塌 139 处;(表 1)。从空间分布特征上看,积石山 Ms 6.2 级地震与泸定 Ms 6.8 级地震 VI 度以上影响范围内地质灾害均是主要沿水系呈线状分布,不同的是积石山震区地质灾害沿黄河及其支流分布相对松散,而泸定震区地质灾害沿大渡河及其支流分布相对更为集中(图 2)。

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	滑坡/处	泥石流/处	崩塌/处	不稳定斜坡/处	合计/处	密度/(处·10 km <sup>-2</sup> )
泸定	IX	14	20	8	/	42	14.72
	VIII	8	46	8	/	62	12.19
	VII	144	139	46	/	329	9.12
	VI	254	170	77	/	501	3.42
积石山	VIII	33	9	12	27	81	23.01
	VII	179	39	29	87	334	21.18
	VI	385	193	56	199	833	12.32

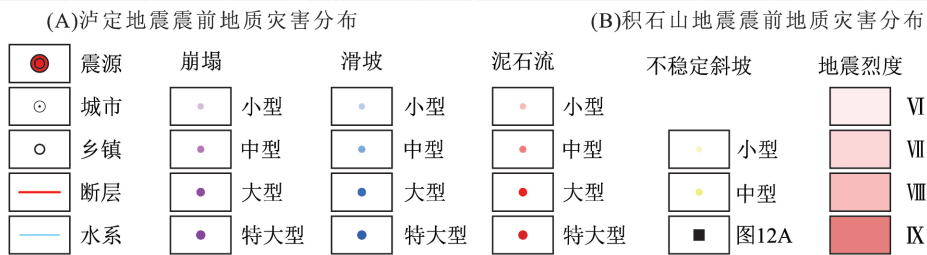
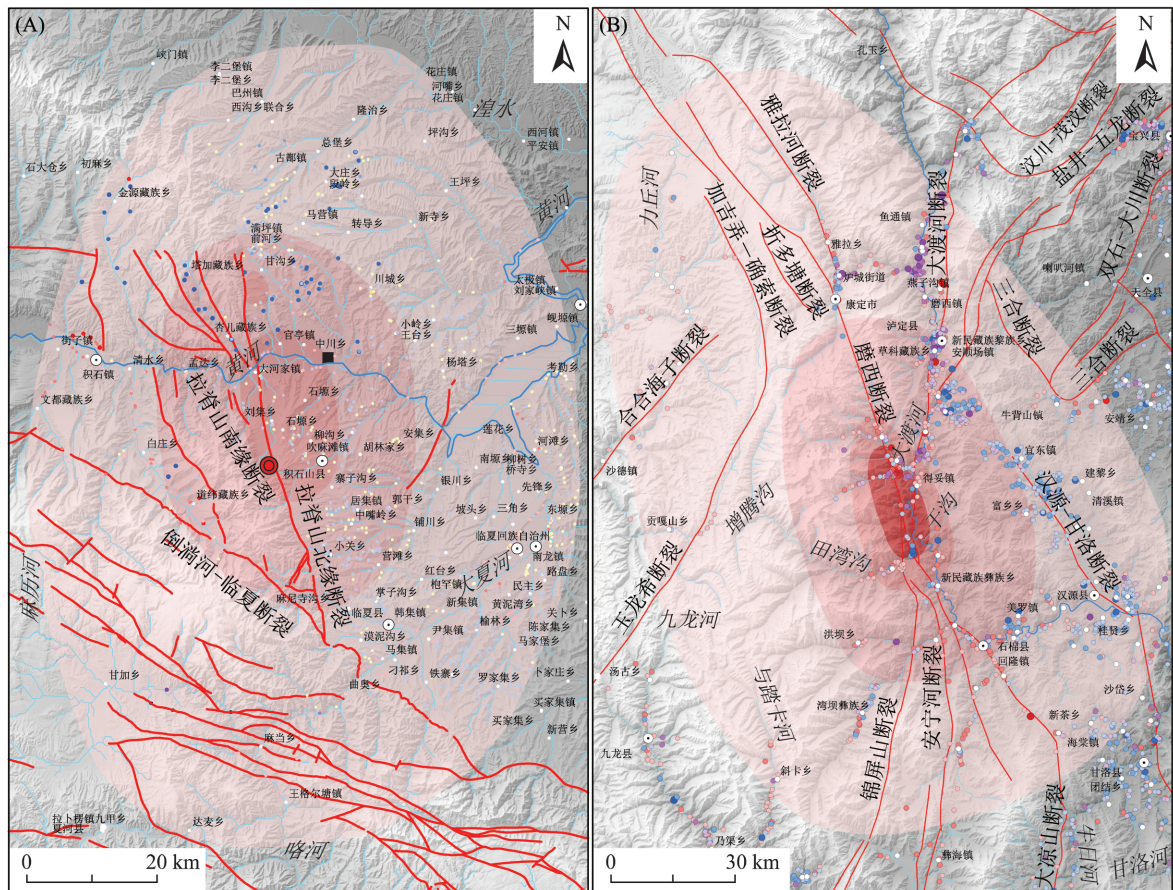


图 2 研究区震前地质灾害分布图

Fig. 2 Distribution of geological hazards before the earthquakes in the study area

积石山 Ms 6.2 级地震与泸定 Ms 6.8 级地震影响范围内,震前地质灾害均强烈发育,

且其分布密度均与烈度等级呈正相关,积石山震区灾害点分布密度相对泸定震区较高

(图 3)。积石山 Ms 6.2 级地震烈度在Ⅷ度影响范围内,已有地质灾害点 81 处,主要分布在大河家镇、刘集乡、石塬乡、柳沟乡和吹麻滩镇,尤以吹麻滩镇最多,少数分布在中川乡和官亭镇;在Ⅶ度影响范围内,已有地质灾害点

334 处,主要分布在小关乡—胡林家乡段和杏儿藏族乡—满坪镇段;在Ⅵ度影响范围内,已有地质灾害点共 833 处,主要分布在临夏县—临夏市段和古鄯镇—川城乡—杨塔乡段,沿水系两岸呈散点状分布。

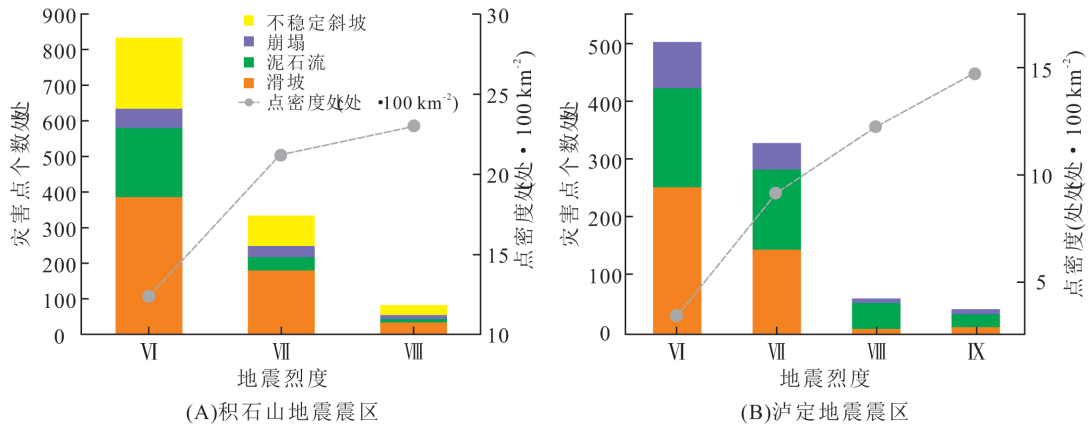


图 3 震区震前地质灾害点与地震烈度统计图  
Fig. 3 Statistics of geological disaster points and seismic intensity before the earthquakes

泸定 Ms 6.8 级地震的地震烈度在Ⅷ度及以上影响范围内有地质灾害点 104 处,主要分布在燕子沟镇、磨西镇和德妥镇,磨西镇地质灾害点最多,有少数灾害点分布在草科乡和王岗坪乡;在地震烈度Ⅶ度影响范围内,有地质灾害点 329 处,主要分布在泸定县城—德威镇地区,少数分布在安顺场镇附近;在地震烈度Ⅵ度影响范围内,有地质灾害点共 501 处,主要分布在泸定县—磨西镇段和石棉县—汉源县段,这些灾害点沿河流两岸呈散点状分布。

### 2.2 同震崩滑体发育规律对比

甘肃积石山地震同震崩滑体数据来源于地面排查和影像解译,主要包括居民区、重大工程区和公路等区域。遥感解译数据来源于高分三号、路探-1 号和 Planet 遥感影像,时间为 2023 年 11 月 24 日~2023 年 12 月 24 日。截至 2022 年 12 月 27 日,共发现新增灾害点 78 处,加剧灾害点 88 处,灾害类型以滑坡和崩塌为主,灾害规模以小型和中型为主。

积石山地震和泸定地震诱发的同震崩滑体的空间分布呈现不同特征(图 4)。(1)积石山地震影响区内同震崩滑体密度明显小于泸定地震影响区,积石山地震Ⅷ度区内同震崩滑体密度为 0.1%,而泸定地震Ⅷ度区内为 0.6%,Ⅸ度区内

为 4%。地震震级是主要的影响因素之一,积石山地震震级为 Ms 6.2 级,而泸定地震震级为 Ms 6.8 级。(2)同震崩滑体空间分布特征差异明显。如图 4 所示,积石山地震影响区内同震崩滑体呈现面状分布,而泸定地震影响区内沿河谷呈现线状分布。地貌是主要的影响因素之一,积石山地震影响区同震崩滑体主要分布在断层西侧的黄土丘陵,而泸定地震影响区主要以高山峡谷地貌为主。

为进一步对比同震崩滑体发育规律,下面将从距断层的距离、高程、坡度和坡向进行分析。通过 ArcGIS 空间叠加工具,统计了积石山地震影响区内同震崩滑体面积和面积密度与距断层距离、高程、坡度和坡向之间的关系,泸定地震影响区则基于前期统计成果(张宪政等,2022)。

#### 2.2.1 距断层距离

2 次地震影响区内同震崩滑体面积和面积密度均随距断层距离的增加呈现指数衰减的趋势,但积石山地震影响区内同震崩滑体呈现出较缓的衰减速率(图 5-A)。积石山震区同震崩滑体面积和面积密度在距离断层 6 km 处开始显著减小,而泸定震区在 2 km 处开始显著减小(图 5-B)。积石山震区同震崩滑体面积在距断层 2~4 km 处出现了低值,这与其特殊地貌有关,将在 3.1 节详细分析。

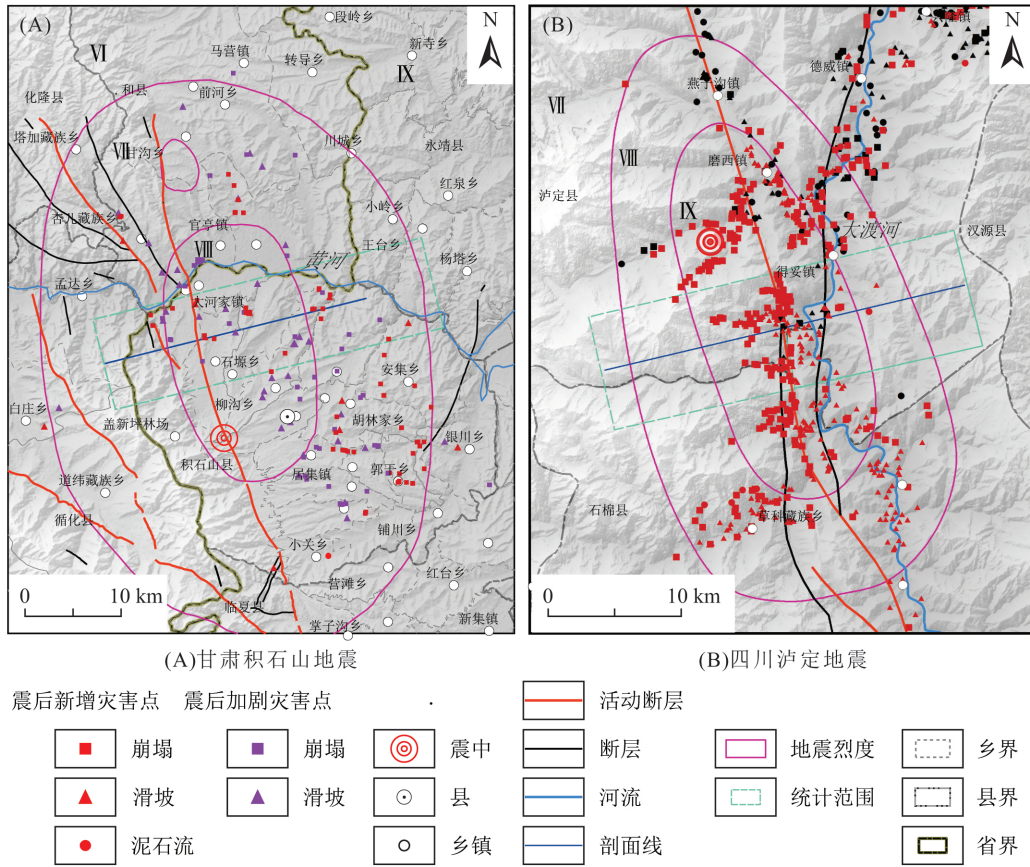


图 4 地震地质灾害点分布图  
Fig. 4 Distribution of co-seismic geological disasters in the study area

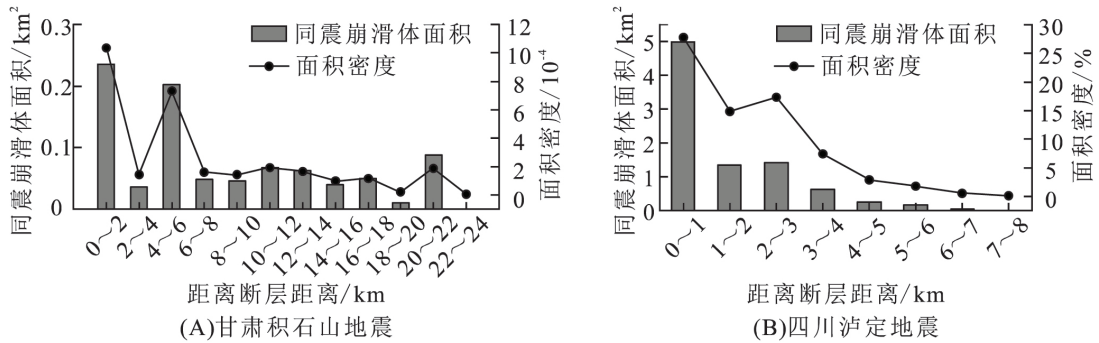


图 5 同震崩滑体面积及密度与距断层距离的关系统计图  
Fig. 5 Relationship between the co-seismic landslide area and distance from the fault

2.2.2 高程

2 次地震影响区同震崩滑体面积及面积密度均有高程优势分布区间,但二者的优势区间范围不同。积石山震区同震崩滑体主要分布在海拔 1 900~2 300 m 范围内,而泸定震区主要分布在 1 400~2 200 m 范围内,相比积石山震区呈现较广的海拔分布区间(图 6)。地貌是导致该高程分布特征的主要因素,积石山震区同震崩滑体主要

分布在断层东侧黄土高原丘陵区,而泸定震区同震崩滑体分布在高山峡谷区,高差相比丘陵区较大,因而具有较宽的海拔分布区间。

2.2.3 坡度

2 次地震影响区内同震崩滑体面积和面积密度均随坡度的增加呈现先增大后减小的趋势,但两者的主要坡度分布区间不同。积石山震区同震崩滑体面积主要坡度为 15°~25°,而

泸定震区为  $30^{\circ} \sim 50^{\circ}$  (图 7)。地貌是导致坡度分布差异的主要因素之一, 积石山震区黄土丘

陵地貌高差小, 而泸定高山峡谷区高差大, 坡度变化快。

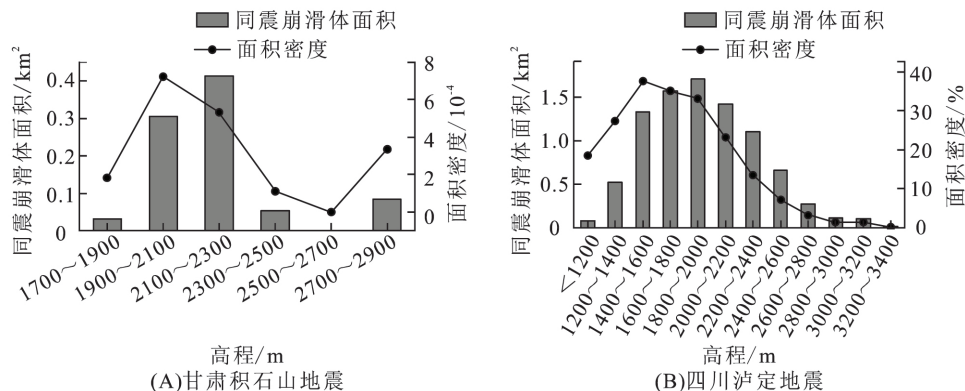


图 6 同震崩滑体面积及密度与高程的关系统计图  
Fig. 6 Relationship between the co-seismic landslide area and elevation

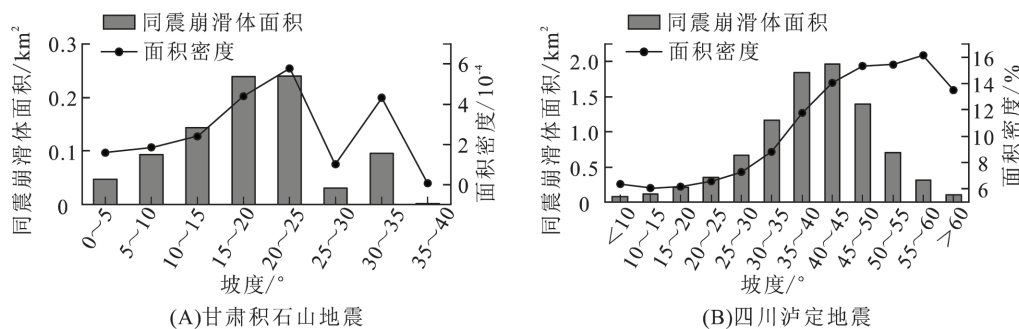


图 7 同震崩滑体面积与坡度的关系统计图  
Fig. 7 Relationship between co-seismic landslide area and slope

2.2.4 坡向

2 次地震影响区内同震崩滑体分布坡向与发震断层类型和地震波传播方向呈强烈相关。积石山震区发震断层为逆冲断层, 断层倾向为南西向,

上盘运动方向为北东东向。同震崩滑体主要分布在断层的东侧, 主要坡向大致与断层运动方向相同(图 8)。泸定地震发震断层为走滑断层, 断层西南侧的运动方向为南南东向, 泸定震区同震崩

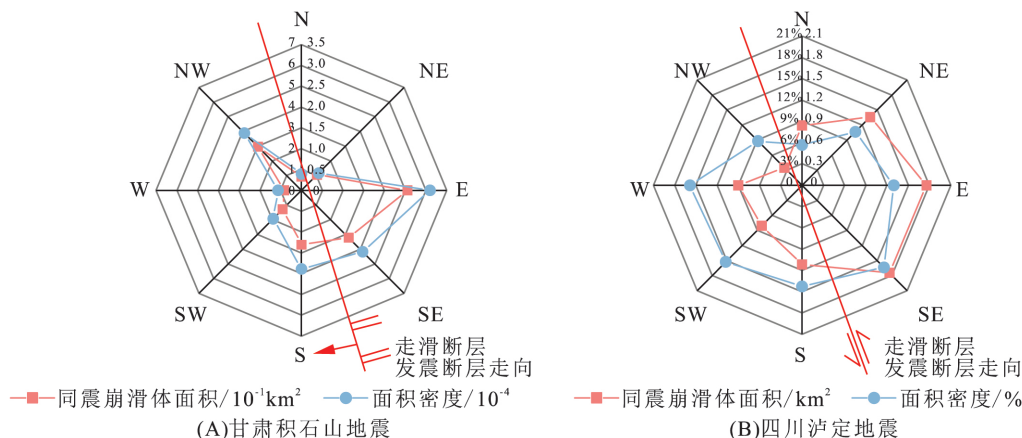


图 8 同震崩滑体面积及密度与坡向的关系雷达图  
Fig. 8 Relationship between co-seismic landslide area and aspect

滑体的主要分布坡向为东向、南东向、南向和南西向,两者具有强烈的相关性。虽然 2 次地震的断层类型不同,但符合前人提出的“背面坡效应”(许强等,2010),即地震波传播的背面坡的同震崩滑体面积及其密度远大于迎面坡一侧。

### 3 地震地质灾害控制因子对比分析

#### 3.1 发震断层类型

2023 年积石山 Ms 6.2 级地震发生在青藏高原东北缘 NE 突出的弧形拉脊山北缘断裂南段,

地震震源机制解显示为低倾角逆冲兼右旋走滑变形模式(王勤彩等,2024),指示上盘(南盘)积石山脉向临夏盆地逆冲(图 9-A),这与青藏高原东北缘持续向东挤出有关;泸定 Ms 6.8 级地震发生在青藏高原东缘川滇地块东边界鲜水河断裂带南段,地震震源机制解显示为纯走滑变形模式(易桂喜等,2023),指示断层西盘的川滇地块相对东盘巴颜喀拉地块向南东方向挤出,为青藏高原东南缘地壳物质向东南持续挤出所引发,发震断层西盘为主动盘(图 9-B)。

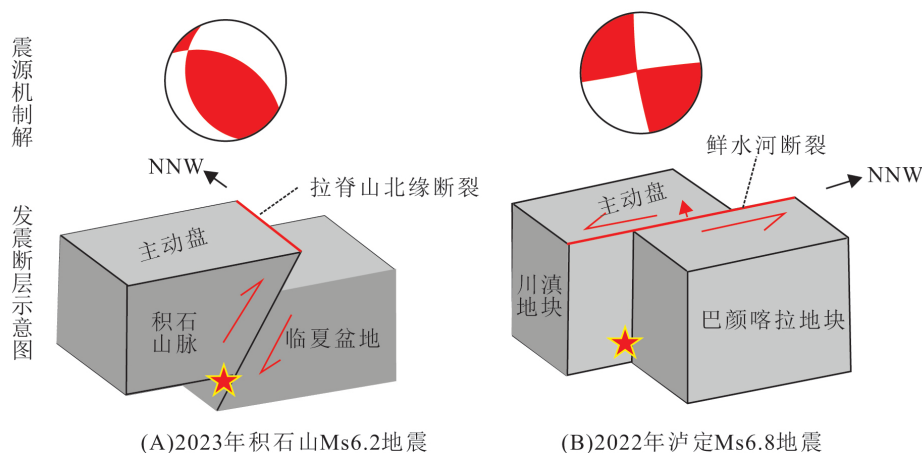


图 9 地震震源机制解和发震断层对比示意图

Fig. 9 Contrast diagram of seismic source mechanism and seismic fault

同震崩滑体沿断层垂直方向分布特征与发震断层类型强相关。选取 2 次地震同震崩滑体发育密集区,绘制垂直发震断层剖面线,并对剖面线两侧同震崩滑体进行统计分析,剖面线和统计范围见图 4。由图 10 可知,积石山发震逆冲断层两侧同震崩滑体分布面积不均匀,崩滑体主要分布在断层的下盘,即明显的“下盘效应”(图 10-A)。该分布规律与 2008 年汶川地震明显不同,汶川地震中同震崩滑体主要分布在断层的上盘(黄润秋等,2009)。泸定发震走滑断层两侧同震崩滑体分布随断层距离增加均急速衰减,在 2 km 范围内主动盘同震崩滑体面积约是被动盘的 2 倍,但断层两侧崩滑体总面积大致相同(图 10-B)。

#### 3.2 特殊地貌——黄土台地和冰碛土台地

黄土台地和冰碛台地分别是 2023 年积石山地震和 2022 年泸定地震影响区内一类特殊地貌。积石山地震影响区内居集镇分布有黄土台地,主要为晚更新世以来的风成黄土经侵蚀搬运形成的

次生黄土,广泛分布于陇西黄土高原。泸定地震影响区典型冰碛台地分布在磨西镇,它是由早期冰川作用形成,具有宽级配、胶结性好的特点。

黄土台地与冰碛土台地的土体结构具有显著差异:(1)黄土颗粒级配均匀,而冰碛土颗粒级配较宽;(2)部分积石山黄土台地具有分层结构,而磨西镇冰碛土台地为单层结构。如(图 11-A)所示,黄土台地下部有卵石层,推测为风成黄土覆盖在原有河流阶地表面。

虽然黄土台地和冰碛土台地土体结构差异较大,但在地震作用下二者具有以下相似点:(1)台地边缘都具有较陡的临空面;(2)在地震作用下边缘处均发育大量崩滑体;(3)前期研究发现冰碛土台地(Liu et al., 2023; 李孝波等, 2022)和黄土台地(王兰民等, 2023)都具有显著的地震放大效应。如(图 11-B, C)所示,黄土台地和冰碛土台地的边缘陡立,在地震作用下发生了崩塌,崩塌距离有限,主要堆积在坡脚位置。

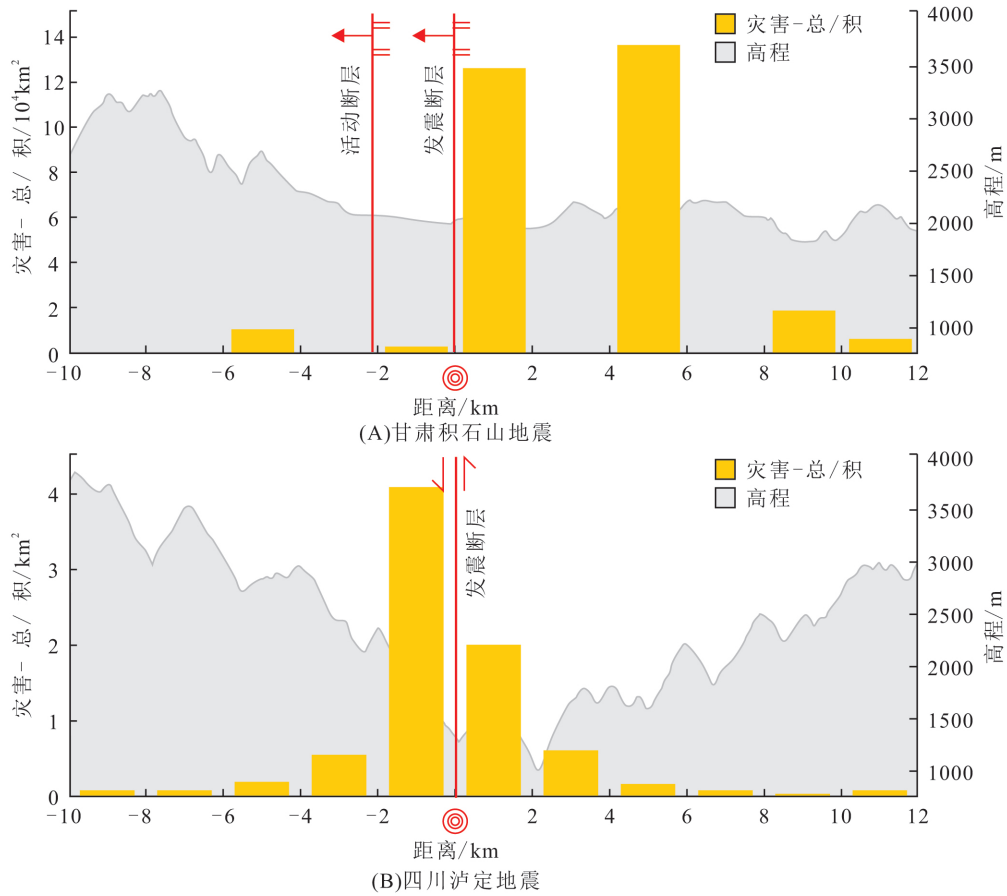


图 10 研究区地震新增地质灾害点个数与距断层距离统计图(剖面线位置见图 4)

Fig. 10 Number of newly added geological disaster points and distance from the fault in the study area



图 11 黄土台地和冰碛土台地崩塌

Fig. 11 Loess platform and moraine platform collapse

### 3.3 特殊土体—黄土

与 2022 年泸定地震导致磨西台地(冰水堆积体)垮塌(与常规的土质崩塌相似)相比,黄土作为

2023 年积石山地震影响区内的一类特殊土体,在当地冬灌时节,黄土空隙中饱含水分,在地震荷载作用下会转变为流态状,该现象被称为砂土液化

(袁中夏等,2004)。积石山地震影响区内的中川乡金田村发育的黄土台地在地震作用下发生了液化(王运生等,2024)(图 12),经测量砂土液化区面积约  $1.49 \times 10^5 \text{ m}^2$ ,液化土体平均厚度约 15 m,液化土体方量约  $2.24 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。外溢区总面积约  $1.61 \times 10^5 \text{ m}^2$ ,漫流长度约 2 300 m,造成草滩村、

金田村部分房屋被冲毁、淤埋(图 12)。此外,积石山地震引发和加剧的滑坡、崩塌大部分发生在黄土覆盖区,可见该区域黄土是主要的易滑地层。这与积石山震区黄土裂隙发育、黄土与下伏新近系红层形成的双层顺向斜坡结构均有密切关联。

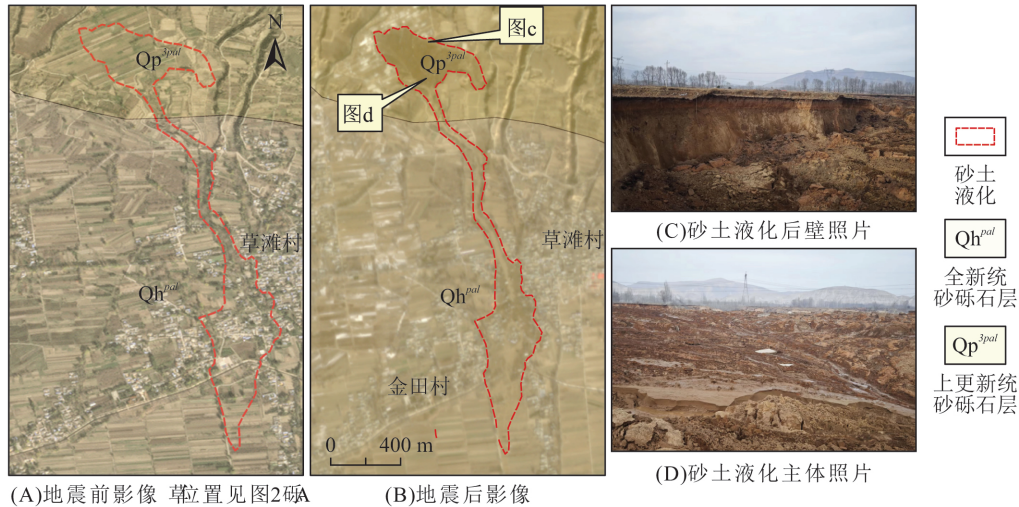


图 12 金田村砂土液化范围示意图  
Fig. 12 Sand liquefaction area in Jintian village

## 4 讨论与结论

a. 发震断层类型控制地震地质灾害的发育优势坡向和垂向空间展布特征。①逆冲断层和走滑断层均发现“背向坡效应”。②泸定地震显示走滑断层两侧地震地质灾害发育密度无明显差异。③积石山地震显示逆冲断层具有显著的“上、下盘效应”,即下盘地震地质灾害密度大于上盘;而汶川地震的上盘地震地质灾害密度大于下盘(黄润秋等,2009),导致二者之间灾害分布特征差异的内在机制需要进一步研究。因此在地震地质灾害应急调查和处置时,应首先判明断层类型,并对不同性质断层的控灾特征有针对性快速确定重点调查和处置区。灾后重建选址阶段,也应将发震断裂的类型和特征作为重建选址的依据之一。

b. 地貌条件是影响同震灾害空间分布特征的主要因子。①陇西黄土地貌中,同震地质灾害呈现面状分布特征,而在川西高山峡谷地貌中,同震地质灾害通常沿河谷线状分布。②黄土台地和冰碛土台地均具有显著的地震放大效应,其边缘处均利于同震地质灾害发育。因此在不同地貌区

开展地震地质灾害规律分析和灾后重建时,应充分考虑因地貌差异导致的同震灾害空间分布差异,同时地貌也是今后不同地区灾害重建过程中重要安置区选址评价中的一个重要参考依据。

c. 同震地质灾害分布规律受岩土体结构及地形控制显著。①黄土是本次积石山地震影响区内一类特殊土体,并在地震作用下发生了液化,是今后黄土地区地质灾害危险性评估内容中需要重点关注的问题。②受西南高山峡谷和陇西黄土地形影响,地震诱发地质灾害的优势坡度分布区间及高程等均具有显著差异,这是今后这 2 类地区地震地质灾害安全区划定需考虑的一个重要因素。③基于全色影像解译方法被广泛用于泸定地震地质灾害解译,而该方法难以在植被覆盖较差的积石山震区开展,而基于 InSAR 技术的影像解译是区域应急调查的补充手段。因此在不同地貌区开展地质灾害调查时,因充分考虑因区域地质、气候和植被覆盖等因素,导致的特殊地质灾害类型、调查方法适用性等问题。

本次调查和解译的同震灾害主要针对有威胁对象的点,用于对比分析不同震区的地震地质灾

害的发育分布规律和控制因子。积石山和泸定震区内发震断层、地质、地貌、气候等条件差异显著,本次对比分析了同震地质灾害发育分布规律差异性,从断层类型、地貌类型和特殊土体等方面探讨了同震地质灾害分布的控制因子,但对各因子间的复杂相互作用机制未开展量化研究,因此关于不同震区地震地质灾害的分布规律对比分析还有待进一步深入。

致谢:本文在撰写过程中得到了中国地质调查局西安地质调查中心(西北地质科技创新中心)尹立河副主任、甘肃省地质环境监测院张永军副院长等领导 and 专家对论文撰写思路的启发与指导,也得到了甘肃省地质矿产勘查开发局、甘肃省有色金属地质勘查局、甘肃省煤田地质局、甘肃省有色金属地质勘查局等单位技术人员在野外调查过程中对数据获取的大力支持,在此一并表示感谢!

### [ 参 考 文 献 ]

- 陈冠,孟兴民,乔良,等,2013.“7·22”岷县漳县地震地质灾害分布、特征及与影响因子间关系分析[J].工程地质学报,21(5):750—760.
- Chen G, Meng X M, Qiao L, *et al.*, 2013. Distribution, characteristics, and associated influential factors of the geohazards induced by Minxian Zhangxian earthquake on 22 July, 2013, Gansu, China[J]. Journal of Engineering Geology, 21(5): 750—760. (in Chinese)
- 范宣梅,方成勇,戴岚欣,等,2022.地震诱发滑坡空间分布概率近实时预测研究——以2022年6月1日四川芦山地震为例[J].工程地质学报,30(3):729—739.
- Fan X M, Fang C Y, Dai L X, *et al.*, 2022. Near real time prediction of spatial distribution probability of earthquake-induced landslides Take the Lushan Earthquake on June 1, 2022 as an example [J]. Journal of Engineering Geology, 30(3): 729—739. (in Chinese)
- 黄润秋,2017.强震地质灾害效应及风险防控[J].民主与科学,6:18—20.
- Huang R Q, 2017. Effect and risk prevention of geological disasters of strong earthquakes [J]. Democracy & Science, 6: 18—20. (in Chinese)
- 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.
- 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. (in Chinese)
- 李佳妮,2023.青藏高原东缘岷山活动地块周缘的地震活动特征与启示[D].北京:中国地震局地质研究所.
- Li J N, 2023. Characteristics and Implications of Seismic Activity Around Minshan Active Block in Eastern Margin of Qinghai-Tibet Plateau [D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration. (in Chinese)
- 李孝波,常晁瑜,蔡晓光,等,2022.泸定磨西台地场地地震效应研究[J].防灾科技学院学报,24(4):34—45.
- Li X B, Chang C Y, Cai X G, *et al.*, 2022. Site seismic effect of the Moxi platform in Luding, Sichuan [J]. Journal of Institute of Disaster Prevention, 24(4): 34—45. (in Chinese)
- 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.
- 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. (in Chinese)
- 梁靖,裴向军,温勇,等,2019.2017年九寨沟地震地质灾害发育分布规律研究[J].自然灾害学报,28(5):181—188.
- Liang J, Pei X J, Wen Y, *et al.*, 2019. Research on development and distribution rules of geohazards in Jiuzhaigou earthquake in 2017 [J]. Journal of Natural Disasters, 28(5): 181—188. (in Chinese)
- 刘同振,高原,2023.青藏高原东北缘地壳地震各向异性研究进展[J].中国地震,39(2):225—242.
- Liu T Z, Gao Y, 2023. Reviews on the crustal seismic anisotropy in the northeast margin of the Tibetan Plateau [J]. Earthquake Research in China, 39(2): 225—242. (in Chinese)
- 潘桂棠,王立全,尹福光,等,2022.青藏高原形成演化研究回顾、进展与展望[J].沉积与特提斯地质,42(2):151—175.
- Pan G T, Wang L Q, Yin F G, *et al.*, 2022. Researches on geological-tectonic evolution of Tibetan Plateau, A review, recent advances, and directions in the future [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 42(2): 151—175. (in Chinese)
- 裴向军,黄润秋,2013.“4·20”芦山地震地质灾害特征分析[J].成都理工大学学报(自然科学版),40(3):257—263.
- Pei X J, Huang R Q, 2013. Characteristics analysis of the “April 20” Lushan earthquake geological disaster[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Sci-

- ence & Technology Edition), 40(3): 257–263. (in Chinese)
- 铁永波,张宪政,卢佳燕,等. 2022. 四川省泸定县 Ms6.8 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.
- Tie Y B, Zhang X Z, Lu J Y, *et al.*, 2022. Characteristics of geological hazards and its mitigations of the Ms6.8 earthquake in Luding County, Sichuan Province[J]. Hydrogeology Engineering Geology. 49(6): 1–12. (in Chinese)
- 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.
- Wang L M, Chai 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. (in Chinese)
- 王勤彩,罗钧,陈翰林,等. 2024. 2023 年 12 月 18 日甘肃积石山 6.2 级地震震源机制解[J]. 地震, 44(1): 1–4.
- Wang Q C, Luo J, Chen H L, *et al.*, 2024. Source mechanism of the M6.2 Jishishan earthquake in Gansu Province on December 18, 2023 [J]. Earthquake. 44(1): 1–4. (in Chinese)
- 王运生,赵波,吉锋,等. 2024. 2023 年甘肃积石山 Ms 6.2 级地震震害异常的启示 [J]. 成都理工大学学报(自然科学版). 51(1): 1–8.
- Wang Y S, Zhao B, Ji F, *et al.*, 2024. Preliminary insights into some hazards triggered by the 2023 Jishishan Ms 6.2 earthquake, Gansu Province [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition). 51(1): 1–8. (in Chinese)
- 许强,李为乐. 2010. 汶川地震诱发大型滑坡分布规律研究[J]. 工程地质学报, 18(6): 818–826.
- Xu Q, Li W L, 2010. Distribution of large-scale landslides induced by the Wenchuan earthquake [J]. Journal of Engineering Geology, 18(6): 818–826. (in Chinese)
- 许志琴,杨经绥,侯增谦,等. 2016. 青藏高原大陆动力学研究若干进展[J]. 中国地质, 43(1): 1–42.
- Xu Z Q, Yang J S, Hou Z Q, *et al.*, 2016. The progress in the study of continental dynamics of the Tibetan Plateau[J]. Geology in China, 43(1): 1–42. (in Chinese)
- 易桂喜,龙锋,梁明剑,等. 2023. 2022 年 9 月 5 日四川泸定 Ms 6.8 地震序列发震构造[J]. 地球物理学报, 66(4): 1363–1384.
- Yi G X, Long F, Liang M J, *et al.*, 2023. Seismogenic structure of the 5 September 2022 Sichuan Luding Ms6.8 earthquake sequence [J]. Chinese Journal of Geophysics. 66(4): 1363–1384. (in Chinese)
- 殷跃平,张永双,马寅生,等. 2010. 青海玉树 Ms 7.1 级地震地质灾害主要特征[J]. 工程地质学报, 18(3): 289–296.
- Yin Y P, Zhang Y S, Ma Y S, *et al.*, 2010. Research on major characteristics of geohazards induced by the Yushu Ms 7.1 earthquake [J]. Journal of Engineering Geology, 18(3): 289–296. (in Chinese)
- 殷志强,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.
- Yin Z Q, Chen H Q, Chu H L, *et al.*, 2013. Analysis on the key controlling factors of geo-hazards triggered by five typical earthquake events in China since 2008 [J]. Earth Science Frontiers, 20(6): 289–302. (in Chinese)
- 袁道阳. 2003. 青藏高原东北缘晚新生代以来的构造变形特征与时空演化[D]. 北京: 中国地震局地质研究所.
- Yuan D Y, 2003. Tectonic Deformation Features and Space-time Evolution in Northeastern Margin of the Qinghai-Tibetan Plateau since the Late Cenozoic Time [D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration. (in Chinese)
- 袁中夏,王兰民, Yasuda Susumu, 等. 2004. 黄土液化机理和判别标准的再研究[J]. 地震工程与工程振动, 24(4): 164–169.
- Yuan Z X, Wang L M, Yasuda S, *et al.*, 2004. Further study on mechanism and discrimination criterion of loess liquefaction [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 24(4): 164–169. (in Chinese)
- 张波. 2012. 西秦岭北缘断裂西段与拉脊山断裂新活动特征研究[D]. 兰州: 中国地震局兰州地震研究所.
- Zhang B, 2012. The Study of New Activities on Western Segment of Northern Margin of Western Qinling Fault and Laji Shan Fault [D]. Lanzhou: Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Administration. (in Chinese)
- 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]. 武汉: 中国地质大学(武汉)地质调查研究院
- 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]. Wuhan: Institute of Geological Survey, China University of Geosciences (Wuhan). (in Chinese)

- Chemistry Research, 27(8):1551—1553.
- Evans E V, Evans R D, 1988. The Influence of an immobile or mobile saturation upon non-Darcy compressible flow of real gases in propped fracture[J]. Journal of petroleum technology, 40(10):1343—1351.
- Evans R D, Hudson C S, Greenlee J E, 1987. The effect of an immobile liquid saturation on the non-Darcy flow coefficient in porous media[J]. SPE Production Engineering, 2(4):331—338.
- Forchheimer P, 1901. Wasserbewegung durch boden[J]. Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure, 45:1782—1788.
- Gershenfeld N A, Gershenfeld N, 1999. The Nature of Mathematical Modeling[M]. Cambridge: Cambridge University Press.
- Kennedy H T, Wieland D R, 1960. Equilibrium in the methane-carbon dioxide-hydrogen sulfide-sulfur system[J]. Transactions of the AIME, 219(1):166—169.
- Li D C, Engler T W, 2001. Literature review on correlations of the non-Darcy coefficient[C]// Proceedings of SPE Permian Basin Oil and Gas Recovery Conference. Midland: Society of Petroleum Engineers, 70015. <https://doi.org/10.2118/70015-MS>.
- Méndez-Santiago J, Teja A S, 1999. The solubility of solids in supercritical fluids[J]. Fluid Phase Equilibria, 158:501—510.
- Roberts B E, 1997. The effect of sulfur deposition on gas well inflow performance[J]. SPE Reservoir Engineering, 12(2):118—123.
- Sun C Y, Chen G J, 2003. Experimental and modeling studies on sulfur solubility in sour gas [J]. Fluid Phase Equilibria, 214(2):187—195.
- Wong S W, 1970. Effect of liquid saturation on turbulence factors for gas-liquid systems[J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 9(4):274—278.

(责任编辑:黄维婷)



(上接第 21 页)

- 张宪政, 铁永波, 李光辉, 等, 2022. 四川泸定 Ms 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, 28(6):1035—1045.
- Zhang X Z, Tie Y B, Li G H, *et al.*, 2022. Characteristics and risk assessment of debris flows in the Wandong catchment after the Ms 6.8 Luding earthquake[J]. Journal of Geomechanics, 28(6):1035—1045. (in Chinese)
- 周洪福, 方甜, 韦玉婷, 2023. 国内外地震滑坡研究:现状、问题与展望[J]. 沉积与特提斯地质, 43(3):615—628.
- Zhou H F, Fang T, Wei Y T, 2023. Research situations and suggestions on earthquake-induced landslides[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 43(3):615—628. (in Chinese)
- Chang M, Cui P, Xu L, *et al.*, 2021. The spatial distribution characteristics of coseismic landslides triggered by the Ms7.0 Lushan earthquake and Ms7.0 Jiuzhaigou earthquake in southwest China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 28(16):20549—20569.
- Fan X, Yunus A P, Scaringi G, *et al.*, 2021. Rapidly evolving controls of landslides after a strong earthquake and implications for hazard assessments[J]. Geophysical Research Letters, 48(1):e2020GL090509.
- Huang R Q, Li W L, 2009. Analysis of the geo-hazards triggered by the 12 May 2008 Wenchuan Earthquake, China[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 68(3):363—371.
- Kamranzad F, Memarian H, Zare M, 2020. Earthquake risk assessment for Tehran, Iran[J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 9(7):430.
- Liu X, Su P, Li Y, *et al.*, 2023. Spatial distribution of landslide shape induced by Luding Ms6.8 earthquake, Sichuan, China; Case study of the Moxi Town[J]. Landslides, 20(8):1667—1678.
- Xiong J, Chen H, Zeng L, *et al.*, 2023. Coseismic landslide sediment increased by the “9.5” Luding earthquake, Sichuan, China[J]. Journal of Mountain Science, 20(3):624—636.
- Yin Y, Wang F, Sun P, 2009. Landslide hazards triggered by the 2008 Wenchuan earthquake, Sichuan, China[J]. Landslides, 6(2):139—152.

(责任编辑:魏 崑)