引用格式：陆诗铭，吴中海，黄婷，2025. 甘肃积石山 M_S6.2 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. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2024069

Citation: 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. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2024069

甘肃积石山 M_S6.2 地震地质灾害发育特征及孕灾环境分析

陆诗铭[1]，吴中海[1,2]，黄　婷[1,3]

LU Shiming[1]，WU Zhonghai[1,2]，HUANG Ting[1,3]

1. 中国地质科学院地质力学研究所，北京 100081；
2. 自然资源部活动构造与地质安全重点实验室，北京 100081；
3. 北京大学地球与空间科学学院，北京 100081

1. *Institute of Geomechanics*, *Chinese Academy of Geological Sciences*, *Beijing* 100081, *China*;
2. *Key Laboratory of Active Tectonics and Geological Safety*, *Ministry of Natural Resources*, *Beijing* 100081, *China*;
3. *School of Earth and Space Sciences*, *Peking University*, *Beijing* 100081, *China*

Characteristics of geological hazard development and disaster-inducing environment of the M_S6.2 earthquake in Jishishan, Gansu Province

Abstract: ［**Objective**］The M_S6.2 earthquake that struck Jishishan County, Gansu Province, on December 18, 2023, triggered a series of secondary geological disasters, including landslides, collapses, and debris flows. This earthquake is considered one of the most devastating seismic events in China in recent years. The study aims to analyze the characteristics of seismicity-induced disasters in the region and identify the underlying geological factors contributing to these secondary geological hazards. Specifically, the research focuses on how the geological environment influences the development of these disasters, particularly landslides, collapses, and debris flows. This understanding will help to develop better disaster prevention and mitigation strategies for similar seismic regions. ［**Methods**］To investigate these issues, the study uses a combination of field investigations, remote sensing image interpretation, and the analytic hierarchy process (AHP). The AHP was employed to evaluate the relative importance of five key factors—faults, lithology, vegetation cover, slope, and precipitation—in the formation of secondary geological hazards. The analysis also includes a detailed spatial distribution study of these factors and how they interact under seismic conditions. This multi-method approach provides a comprehensive understanding of the complex geological environment in Jishishan. ［**Results**］Based on the integrated analysis, the secondary geological hazard zones of the study area are primarily concentrated along the front edge of Lajishan, closely aligned with the VIII seismic intensity zone of the Jishishan M_S6.2 earthquake. Fewer hazard zones are located at the northern edge of Lijia Village, Guantan Village, and Manisigou Township. The higher-risk areas are centered around Jishishan County, extending eastward toward Lijia Village and Hanji Town. The secondary geological disaster points are concentrated in Jishishan County and the area surrounding it, particularly in valleys where Quaternary strata are abundant, forming a band-like distribution. Landslides are most prevalent in Jishishan County and Dahejia Town, where steep terrain, fragile geological structure, and significant rock weathering make the area vulnerable. The lack of vegetation exacerbates surface instability. Debris flows mainly occur in Baizang Town and around Jishishan, where steep slopes,

基金项目：中国地质调查项目（ DD20230002 ）；国家自然科学基金云南联合基金项目（ U2002211 ）；西藏自治区第 1 次全国自然灾害综合风险普查项目（ 2022 年地震灾害部分 ）（ XZLX-BMC-2022-053 ）

This research is financially supported by the China Geological Survey Project (DD20230002); Yunnan Joint Fund Project of the National Natural Science Foundation of China (U2002211) and the first National Comprehensive Natural Hazard Risk Census Project of the Xizang Autonomous Region (2022 Seismic Hazard Part) (XZLX-BMC-2022-053).

第一作者：陆诗铭（ 1996— ），女，在读博士，主要从事青藏高原活动构造研究。Email：lushiming0901@163.com

通信作者：吴中海（ 1974— ），男，研究员，从事新构造与活动构造方面的研究工作。Email：wuzhonghai8848@foxmail.com

收稿日期：2024−06−16；**修回日期**：2024−10−07；**录用日期**：2024−11−15；**网络出版日期**：2024−12−13；**责任编辑**：范二平

concentrated rainfall, and abundant loose materials create ideal conditions for disaster. These debris flow sites are located near rivers or lakes, indicating that water flow and increased soil saturation are key factors triggering such events. Landslide sites are generally scattered but concentrated in areas of significant topographic change, following the Quaternary strata in valleys. These sites are denser near the Lajishan fault zone, showing the influence of fault proximity and rainfall on landslide occurrence. Each type of geological disaster exhibits distinct spatial patterns: landslides and debris flows are more likely to occur in areas with steep slopes and proximity to water bodies, while collapses tend to occur in exposed rock areas, influenced by local lithology. Evidently, the distribution of secondary geological hazards in the study area is primarily influenced by weak geological conditions, with seismic activity, vegetation, topography, and precipitation compounding the risk. Hazard zones are concentrated along the front of Lajishan, matching the VIII seismic intensity zone. The disaster sites are primarily located in valleys with dense fourth-level strata, confirming the consistency between the simulated and actual hazard zones. [**Conclusion**] To conclude, lithology was found to be the most significant factor influencing disaster formation, with a weight of 42%, followed by fault zones (26%). While precipitation had the least impact, contributing only 6%, it still played a role in increasing the risk of landslides and debris flows. The high-risk disaster areas correspond closely to the seismic intensity zone VIII, particularly around the earthquake epicenter, where the geological conditions are most conducive to these hazards. The distribution of secondary geological disasters in Jishishan is primarily controlled by the weak geological conditions of the region. Besides, compared to the Wenchuan earthquake, where disasters were concentrated along the hanging wall of reverse faults, the disaster sites in Jishishan were mainly located in the down-thrust areas of fault zones. Additionally, fewer disaster points were observed in aftershock zones, suggesting that the main shock alleviated a significant amount of tectonic stress, leading to regional stabilization. [**Significance**] This study highlights the relationship between geological factors and seismicity-induced secondary disasters in Jishishan, emphasizing the need for targeted monitoring and protective measures in areas with loose Quaternary deposits and steep slopes. The results provide valuable insight for disaster prevention strategies in Jishishan and other seismic regions with similar geological conditions.

Keywords: Jishishan earthquake; disaster-prone environment; landslide; mudflow; spatial analysis

摘　要：2023 年 12 月 18 日甘肃省临夏州积石山县发生 M_S 6.2 地震，此次地震诱发了崩塌、滑坡和泥流等一系列地质次生灾害，是近年来中国 6 级以上地震损失极其严重的一次。综合分析区域孕灾环境及地质次生灾害发育特征发现，拉脊山地区海拔高、地形复杂、活断裂作用显著以及第四纪松散堆积物覆盖广且厚度大等因素，使得该地区在地震作用下极易产生蠕滑−拉裂破坏并诱发滑坡等地质次生灾害。利用层次分析法综合考虑断裂、地层岩性、植被覆盖、坡度及降水 5 个关键因子对积石山区域地质灾害发育的影响。研究结果显示，地层岩性是区域地质次生灾害的主导因素，其权重可达 42%；其次是断层，权重约占 26%；而降水的影响权重虽然只占 6%，但也不可忽视。积石山及其邻区地质次生灾害危险区主要集中在震中周围的拉脊山前缘一带，呈条状分布，与 VIII 度地震烈度区域大体一致。地质次生灾害点受软弱地质环境影响为主，集中在拉脊山断裂带下盘，尤其是积石山县、大家河镇和白藏镇等地，灾害分布密集且受地震影响显著，需要重点监测及预防，同时对第四系黄土层防护工程也应予以足够重视。另一方面，在余震分布密集区，未发现显著的地质次生灾害点，推测是因为主震释放了较大应力，诱发了主要地质次生灾害。在多次余震之后，岩体应力状态逐渐趋于平衡，地质构造在震后重组并趋向稳定，从而降低了进一步发生地质次生灾害的风险。

关键词：积石山地震；孕灾环境；滑坡；泥流；空间分析

中图分类号：P546　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1006−6616(2025)01−0139−17

DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2024069

0　引言

2023 年 12 月 18 日甘肃省临夏州积石山县发生 M_S 6.2 地震，震中位于临夏州积石山县柳沟乡，发震断层为拉脊山逆冲断裂带的分支断裂——拉脊山北缘逆冲断裂带东支。此次地震为青藏高原东北缘西宁−兰州断块沿海原断裂东向滑移过程中，受区内最大挤压应力影响(N64°E)，在日月山断裂带与西秦岭北缘断裂共扼走滑断裂带交汇部位由挤压作用触发逆断裂活动的结果，具有典型的逆断裂型地震上盘效应特征(陆诗铭等，2024)。地震引

发了大量次生灾害，如滑坡、泥流等，造成了严重破坏（白卓立等，2024；高永武和阚文亮，2024；郭富赟等，2024；郭聖煜等，2024；李俊磊等，2024）。

初步统计显示，此次地震共造成 151 人遇难，上千人受伤。其中，甘肃省大河家镇、刘集乡等地死亡 117 人；青海省中川乡、甘沟乡死亡 34 人。房屋损毁 4782 间（郭聖煜等，2024），是近年来中国 6 级以上地震中震害极其严重的一次。死亡原因中，86.8% 人员因房屋倒塌致死，13.2% 人员因泥流致死（高永武和阚文亮，2024；高孟潭，2024）。这些数据表明，次生灾害对当地人民群众的生命和财产安全构成重大威胁。因此，在积石山县及其邻区开展地质次生灾害风险评估工作尤为迫切。目前，已有学者采用山洪潜在指数（FFPI）、综合指数、斜坡单元划分等模型对滇中、十堰、舟曲等地进行滑坡易发性评价，分析单一灾害的隐患点（吴中海等，2016；周春景等，2016；牛全福等，2023；徐亚宁和刘钢一，2023）。在此基础上，多位学者运用随机森林、层次分析法等空间分析方法或遥感解译手段，开展了积石山地震震后灾害易发性评价，分析崩塌、滑坡等灾害隐患点（白卓立等，2024；高波等，2024；郭富赟等，2024；刘帅等，2024）。这些研究为地质次生灾害分析提供了研究基础，但主要集中于单一灾害或震后灾害易发性评价，缺乏对地震与灾害关系的深入探讨，难以满足震后灾害特征及隐患点预报的需要。

基于此，文章收集了积石山及其邻区地质次生灾害发育特征，结合 Arcgis 空间分析，总结受灾区域地震及其引发的次生灾害空间分布特征。根据区域地震地质、水文条件等孕灾环境条件，开展孕灾环境分区评价，探讨地震与地质次生灾害的关系，为积石山地区震后重建提供科学依据，并为未来地震诱发次生灾害的预防和应急管理提供理论基础和实践参考。

1　孕灾环境条件分析

此次地震发生在甘肃省临夏州积石山县，导致了严重的次生灾害，如崩塌、泥流等。这些灾害的发生不仅受地震动的影响，还与地震地质条件、水文土壤等因素密切相关。通过综合分析这些因素，对积石山县的孕灾环境条件进行初步评估。研究区主要为拉脊山北缘断裂带及其周边（图 1 虚线框），涵盖积石山地震烈度 VII 区及 VIII 区所在的区域。

1.1　地形地貌

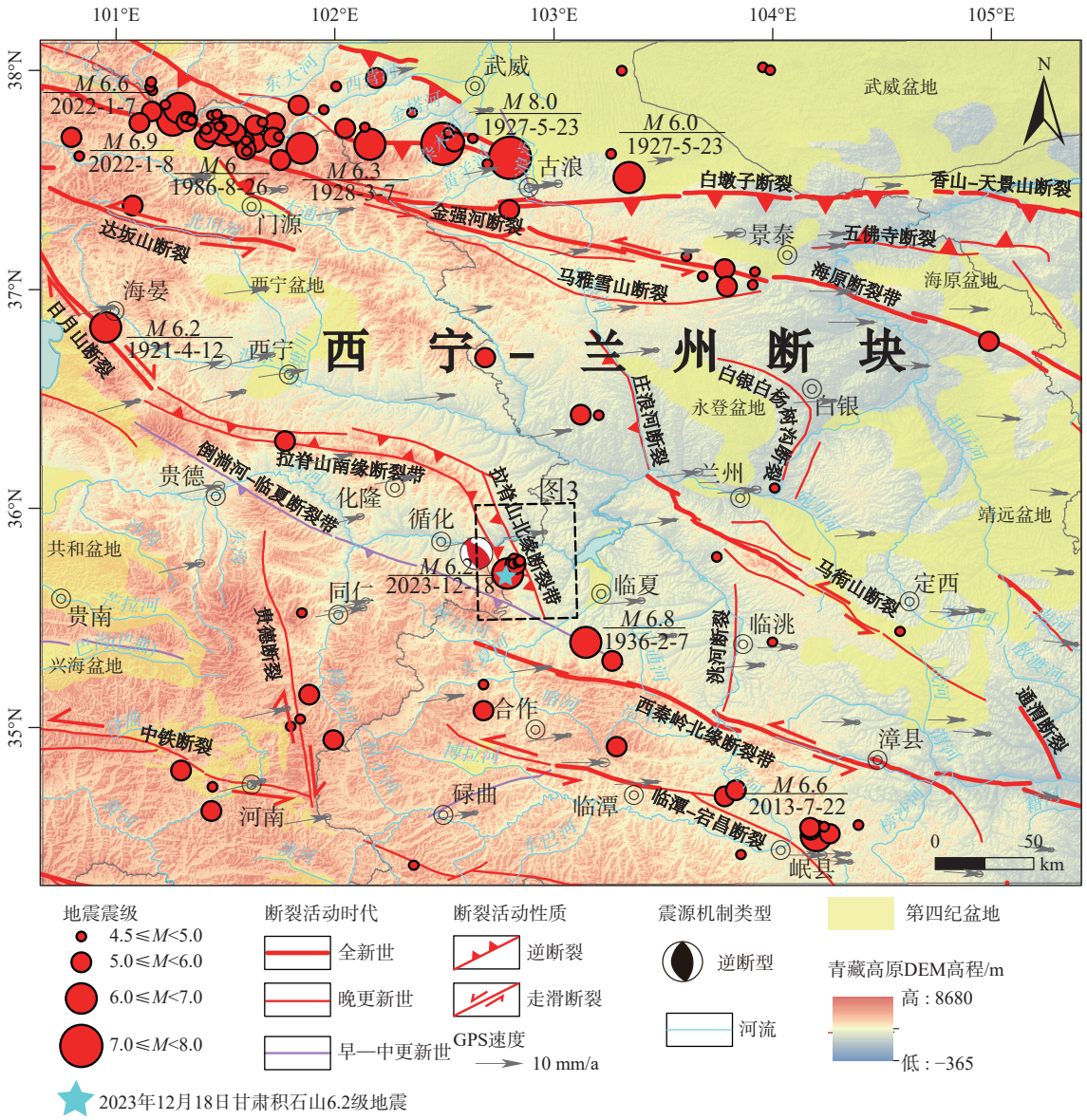
此次地震震中处于青藏高原与黄土高原的过渡区。其中西宁−兰州断块西部为拉脊山−积石山区，属高寒干旱山区；东部则为高寒阴湿区。地形自西向东海拔由 3800 m 降至约 2200 m，整体地势西高东低，地形复杂多样。根据海拔高程与地貌成因，断块内部地貌可分为构造侵蚀高山区、侵蚀堆积黄土丘陵区、构造侵蚀中山区和侵蚀堆积河谷区 4 种类型。山间发育有临夏盆地、西宁−民和盆地等新生代断陷盆地，多见黄土梁等典型黄土高原地貌。块体内部河谷密集，发育有黄河、湟水和大夏河等。基于 ALOS DEM（30 m 分辨率）数据进行 GIS 地形分析可知，研究区坡度主要集中在 10°～30°，超过 50°以上的陡坡仅占总面积的 3%（图 2a）；坡向则主要集中于东北坡和南坡（图 2b）。强德霞等（2022）研究认为滑坡、泥流等次生灾害多发生于 0°～10°和 20°～25°两个坡度范围内，且易发于东坡和东南坡向区域。

1.2　地震地质环境

在大地构造位置上，临夏州及周边地区主要位于西宁−兰州断块西南角，地处祁连造山带与秦岭造山带的交界处。西宁−兰州断块状似菱形，由海原断裂带、拉脊山断裂带、日月山断裂带以及西秦岭北缘断裂带围限，内部主要为黄土高原，下部基岩为白垩纪花岗岩。上部覆盖有厚 500～800 m 的新近系红土和晚更新世冲洪积物及风成黄土。积石山两侧出露前震旦纪地层及古生代侵入岩（陆诗铭，2022，2024）。

研究区内主要断裂带为拉脊山断裂带，是一条全新世左旋逆冲断裂带，由拉脊山南缘断裂带和拉脊山北缘断裂带共同组成一组北东向凸出的弧形构造带（袁道阳等，2005），地貌上具有较明显的陡坎等新活动特征，分割了临夏盆地与左侧高山区。该断裂带在（3136±51）a BP 左右发生过古地震事件，估算其全新世中晚期以来的断层滑动速率为 0.51 mm/a（李智敏等，2014）。依据小震密集分布研究，认为拉脊山断裂带作为日月山走滑断裂带与西秦岭断裂带的构造转换区，具备发生中强地震的构造条件；而在断裂带两侧的盆地内部不存在规模较大的断裂带，危险性较低（图 3）。

积石山 M_S 6.2 地震发震断层推测为拉脊山北缘断裂带东支，地震反射剖面显示拉脊山北缘各分



其中活动断裂相关数据源自郑文俊等, 2019 与袁道阳等, 2004a; 地震数据与震源机制解数源自 USGS; GPS 数据源自 Wang, et al., 2020

图 1 区域构造地质图（据陆诗铭等，2024 修改）

Fig. 1 Regional tectono-geological map (modified after Lu et al., 2024)

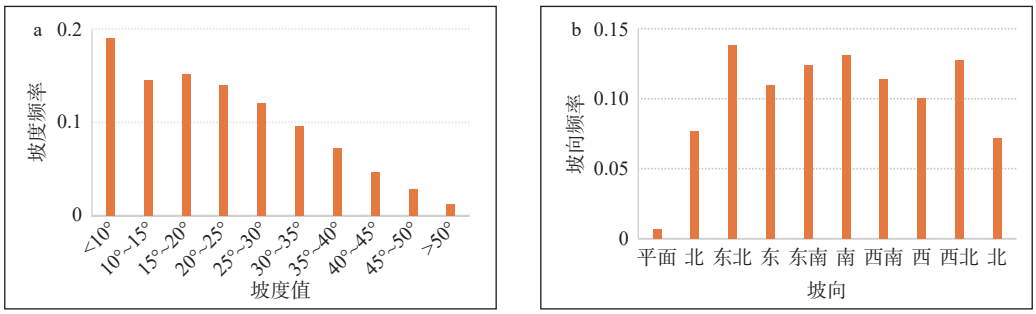
The active fault data are from Zhen et al.,2019 and Yuan et al., 2004a. The earthquake data and focal mechanism solutions are from the USGS, and the GPS data are from Wang et al., 2020.

支断裂在深部呈叠瓦式构造组合，断面形态呈铲形，在地壳深部收敛至一个统一的滑脱面(杨中轩，1993)。此次地震可能是在北东向挤压应力条件下，日月山走滑断裂带与西秦岭北缘断裂带共扼走滑断裂系交汇挤压作用下触发逆断裂活动的结果(陆诗铭等，2024)。

1.3 水文土壤条件

研究区位于温带半湿润和高寒湿润区的过渡地带，表现出典型的大陆性、季风性山地气候特征。年均日照率为 52%，年平均气温约为 5.9℃，年均降水量约为 630.6 mm，年均蒸发量为 541.9 mm(数据来源于临夏县人民政府；https://www.linxiaxian.gov.cn)。

根据区域土壤质地分析(采用 FAO 90 土壤分类；数据来源于联合国粮食及农业组织，2019)，研究区以壤土为主，约占 52.67%；其次为黏壤土，占 19.76%。壤土具有适中的含沙量，表现出良好的保水性和排水性；黏壤土质地较黏重，含沙量少，保水能力强但排水性差；沙土因颗粒较大，结构松散通透，保水能力弱，常见于干燥环境中(图 4a)。积石



a—拉脊山−积石山地区坡度−坡度频率图；b—拉脊山−积石山地区坡向−坡向频率图

图 2　拉脊山−积石山地区坡度、坡向统计图

Fig. 2　Gradient and slope orientation statistics for the Lajishan-Jishishan area

(a) Gradient frequency in the Lajishan-Jishishan area; (b) Slope direction frequency in the Lajishan-Jishishan area

山县附近富含黏土，水分含量高，地震后容易引发砂土液化、泥石流等地质次生灾害。

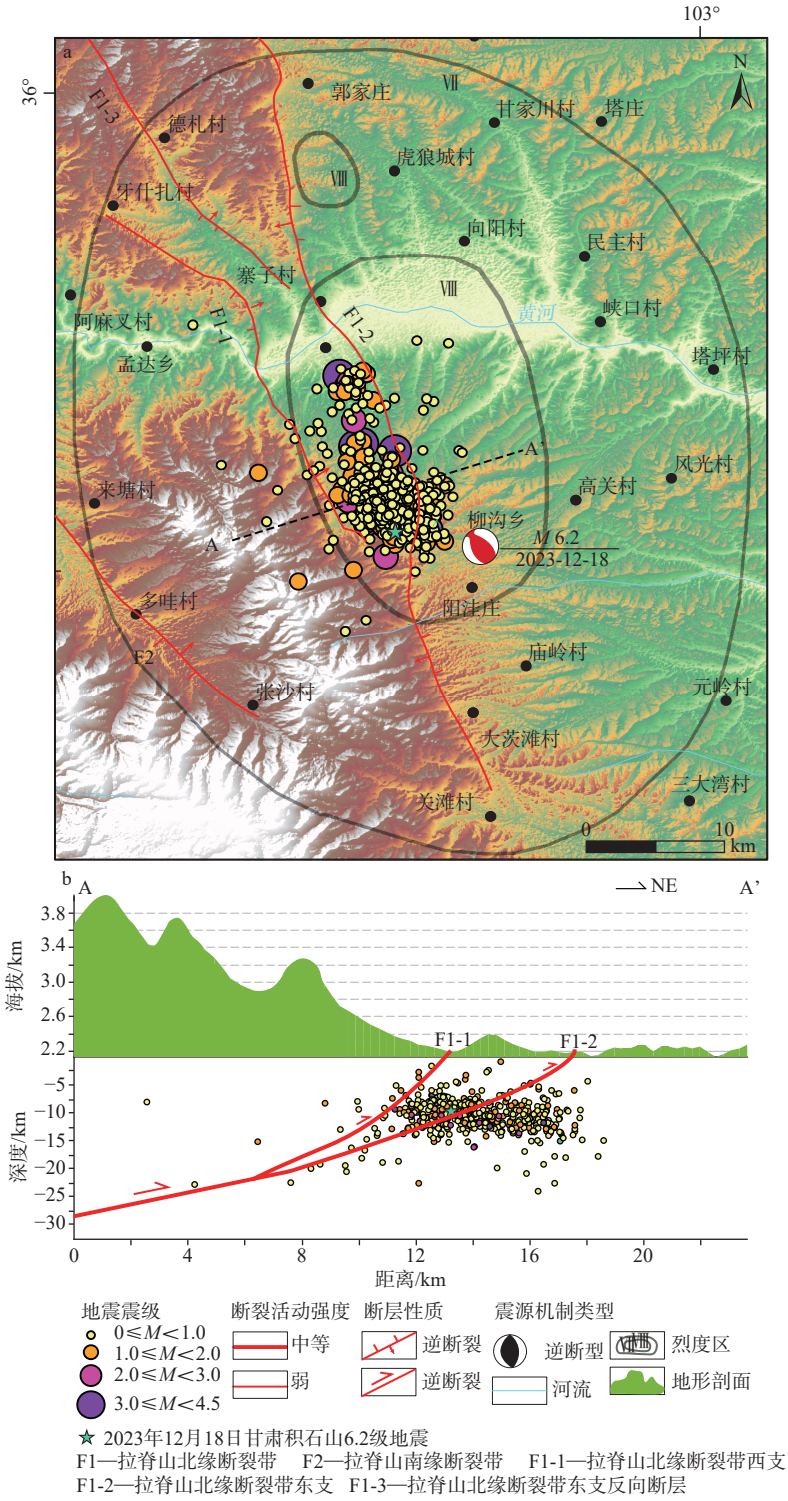
根据区域植被覆盖率分析（数据来源于中国科学院地理科学与资源研究所；http://www.resdc.cn），研究区内多为草地和林地（图 4b），分别占 54% 和 17%。林地的存在有助于固土，减少地表径流，增强土壤稳定性，从而降低泥石流和滑坡等自然灾害的发生风险。而在植被覆盖率较低的区域，土质易沙化，土壤稳定性差，土地裸露度高，在地震影响下更易发生滑坡、崩塌等灾害。

2　地震地质次生灾害发育特征

2.1　区域地震活动特征

根据中国地震动参数区划图（GB 18306—2015），研究区以柳沟乡−马营镇左侧为界，其峰值加速度分别为 0.1g 和 0.15g，虽处于全国较低地震风险区，但地震危险性仍不容忽视。基于西宁−兰州断块内部 1900 年 1 月 1 日至 2024 年 5 月 30 日的地震目录，该区域共发生 M 4.5 以下小震 122 次，M 5.0 以下地震 83 次，M 6.0 以下地震 61 次，M 6.0 及以上大震 14 次。近年来，积石山及其周边区域 6 级以上地震频发，如 2023 年积石山县 M_S 6.2 地震，2022 年门源 M_S 6.9 地震，2016 年门源 M_S 6.4 地震以及 2013 年岷县 M_S 6.6 地震（郑文俊等，2013；李彦宝等，2017；苏瑞欢等，2023；陆诗铭等，2024）。从地震空间分布来看，西宁−兰州块体内部 6 级以上大震主要集中在北祁连山北缘断裂带及西秦岭北缘断裂带附近，中—强震沿断裂带呈丛集特征，以条带状分布在北祁连北缘断裂带、西秦岭北缘断裂带、海原断裂带及拉脊山断裂带上。盆地内部地震零星分布，多为 M 3.5 以下小震。弱震震中分布图揭示拉脊山地区弱震密集分布在拉脊山断裂带北东端弧顶位置，两边盆地弱震活动一般，不具有中—强震危险（袁道阳等，2005）。

由于研究区内部记录的历史地震目录较少，研究区地震发育特征不易直观呈现，根据收集到的整个西宁−兰州断块自公元 138 年至 1944 年的 70 余次历史地震目录可综合判断积石山区域的地震发育特征。其中 M 5.0 以下地震 13 次，M 6.0 及以上大震 21 次。由于地震年代久远，部分地震无法确切判断其震中位置及发震构造，因此主要整理了 5 级以上的历史地震（表 1），这些地震多发于西宁−兰州断块的盆地内部，而在拉脊山等山间记录数据较少，推测可能是因为拉脊山等山边居民较少，地震时缺少记录。但根据已有的数据依然清晰可见地震大多沿着海原断裂、西秦岭北缘断裂带及拉脊山两侧分布。根据 3 级以上中—强震震级−时间（M-T）图（图 5），整个断块内部及周边边缘地区地震相对活跃，尚未进入地震平静期，地震危险性较高。典型的 6 级以上大震主要包括公元 138 年金城−陇西 6¾级地震、406 年菀川 6 级地震、1125 年兰州 7 级地震、1440 年永登 6¼级地震、1590 年永靖东南 6 级地震、1927 年古浪 8 级地震以及 1936 年康乐 6¾级地震等（袁道阳等，2002，2005；宋方敏等，2007；梁明剑，2008；张波，2012；蔡副全，2013；谢虹等，2014；张波等，2015）。其中，金城−陇西 6¾级地震极震区位置推测在甘肃省永靖县西北的湟水、黄河交汇带附近；1125 年兰州 7 级地震发震断裂确认为马衔山北缘断裂带西段，至今可见几千米长的地表破裂带（袁道阳等，2002；宋方敏等，2007）；1936 年康乐 6¾地震发震构造推测为围子山−大夏河断裂，沿线



其中地震烈度数据源自应急管理部中国地震局(https://www.mem.gov.cn/)；余震数据源自郭祥云等，2024；断层活动强度数据源自吴中海和周春景，2018

a—区域地震地质构造图；b—区域地形剖面图及余震分布图

图 3 区域地震构造图及余震分布剖面图（据陆诗铭等，2024 修改）

Fig. 3 Geotectonic map of the region and aftershock distribution profile (modified after Lu et al., 2024)

(a) Geotectonic map of the region; (b) Topographic section of the region and the distribution of aftershocks. The earthquake intensity data are from https://www.mem.gov.cn/, and the aftershock data are from Guo et al., 2024. The fault activity intensity data are from Wu and Zhou, 2018.

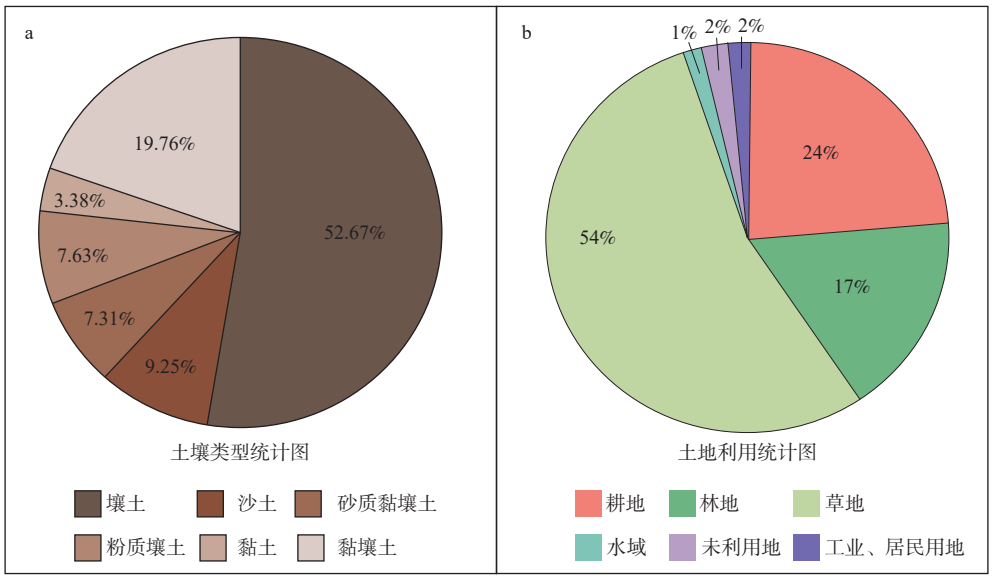


图 4　土壤类型分布图及土地利用分布图

Fig. 4　Distribution of soil types and land use

表 1　积石山区域周边 5 级以上的历史地震表

Table 1　Table of historical earthquakes of magnitude 5 or greater in the area around Jishishan

序号	时间	地点	震级	震中烈度	参考文献
1	1371年1月29日	渭源北	5	VI	梁明剑, 2008
2	1901年	兰州西固区南	5	VI	梁明剑, 2008
3	1944年	乐都南	5	VI	袁道阳等, 2005
4	1590年7月	乐都东	5	VI	袁道阳等, 2005
5	1821—1850年	循化	5	VI	袁道阳等, 2005
6	1878年10月	榆中高崖	5	VI	梁明剑, 2008
7	1629年	兰州	5½	VII	梁明剑, 2008
8	1875年2月6日—1875年3月7日	西宁	5½	VII	袁道阳等, 2005
9	1890年2月17日	西宁东	5½	VII	袁道阳等, 2005
10	1893年6月1日	西宁南	5½	VII	袁道阳等, 2005
11	1968年12月22日	化隆西	5.4	VI	袁道阳等, 2005
12	1819年2月24日	化隆	5¾	VII	袁道阳等, 2005
13	1847年7月12日	西宁	5¾	VII	袁道阳等, 2005
14	1590年7月7日	永靖东南	6	VIII	袁道阳等, 2007
15	公元406年	榆中县菀川	6	VII	袁道阳等, 2001
16	1440年11月4日	永登	6¼	VIII	梁明剑, 2008
17	1936年	康乐	6¾	IX	张波等, 2015
18	公元138年	金城-陇西	6¾	IX	袁道阳等, 2004b
19	1125年8月30日	兰州	7	IX	袁道阳等, 2002
20	1927年	古浪	8	XI	谢虹等, 2014

仍保留有明显的地震破裂面和滑坡等现象(张波等, 2015)。

综上, 整个块体内部地震强度低、频度高(袁道阳等, 2005), 地震活动密集。尽管拉脊山断裂带刚

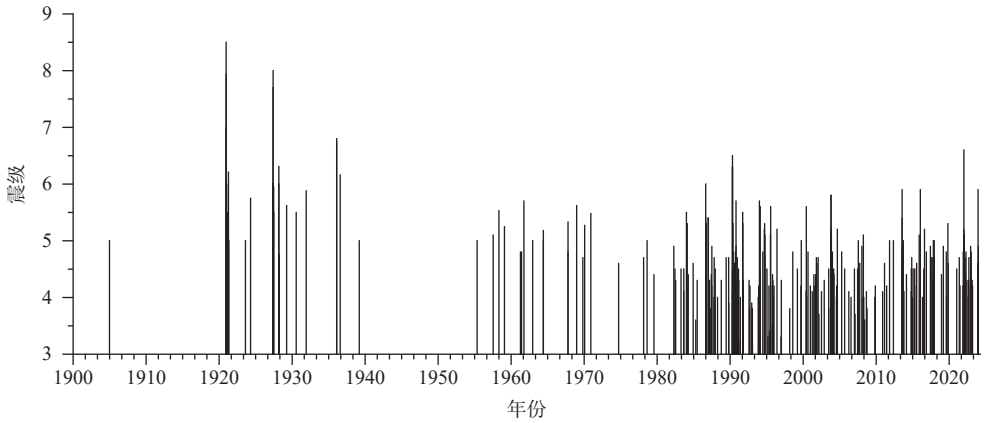


图 5 1900—2024 年拉脊山及其邻区中—强震震级−时间（*M-T*）图

Fig. 5 Magnitude-Time (*M-T*) diagram for moderate to strong earthquakes in Lajishan and neighboring areas from 1900 to 2024

刚释放过一次能量，但由于该区域地震频度较高，未来地震危险性仍然较高，需继续密切关注和防范。

2.2 地震引发的次生灾害特征

地震发生后，根据地震震级、断层类型、震源深度以及区域地质条件等的不同，会引发多种地质次生灾害、如滑坡、泥（石）流等。积石山一带因地形地貌、水文土壤等条件特殊，受地震影响，常引发严重的次生灾害。史料中也多次记录了该地区的崩塌、滑坡和地裂等灾害、如公元 138 年金城−陇西 6¾地震。1125 年兰州 7 级地震后，区域地裂、滑坡等灾害严重。该次地震地表破裂现今依然清晰可见，震后引起的陷坑、滑坡及裂缝等现象也十分明显（袁道阳等，2002；宋方敏等，2007）。1936 年康乐 6¾级地震后，临夏县记载有民房倒塌、河岸崩塌等情况；康乐、和政等地也有记录发生了规模较大的地裂缝、崩塌以及地震滑坡等严重的次生灾害。

地震发生后，积石山一带因特殊的地形地貌和水文土壤条件，常引发严重次生灾害。此次地震引发的次生灾害主要为崩塌、滑坡和泥流（图 6），其中新增次生灾害 75 处，加剧 72 处，主要集中于震中区域（积石山县）及其周边的山区，少数位于远离震中的临夏盆地及河流附近（图 7）。崩塌是区域最主要的次生灾害，积石山县、寨子沟乡和关家川乡是崩塌最为严重的地区。滑坡则集中于积石山县、小关乡和刘集乡等地。而泥流发生较少，主要集中于震中附近的某些特定地段。强德霞等（2022）研究认为积石山地区泥流的发生主要集中在大家河镇、刘集乡等特定区域，该区域受降水、土壤及植被覆盖率的综合影响最大，易发泥流。总体来看，次生灾害的分布主要受地层岩性、地形坡度和水文条件的控制，这与区域地质环境的特征密切相关（强德霞等，2022；白卓立等，2024；郭富赟等，2024；郭聖煜等，2024；李俊磊等，2024）。

区域内崩塌和滑坡的集中分布与山麓堆积物、厚层第四系黄土发育、坡度较大及缺乏植被固土等因素密切相关，尤其是在地震作用下，这些条件易产生蠕滑−拉裂破坏（强德霞等，2022；郭聖煜等，2024；郭富赟等，2024）。部分远离震中的区域，如临夏盆地和河流附近的滑坡和崩塌，多为先存的灾害点在地震动影响下重新激活，加剧了灾害。泥流主要发生在拉脊山前的斗状河谷，其发生受区域地形地貌及水文条件控制，松散黄土在水流冲刷下不断重新堆积，提供了丰富的泥流物源，从而在地震后爆发，表现出规模大、流速快、破坏性强的特点（强德霞等，2022）。总体来看，地震次生灾害的类型及其分布反映了地质环境条件的影响，地层岩性、地形坡度及水文条件等共同决定了地质次生灾害的易发性和分布特征。

综上所述，此次地震在积石山县及其周边引发了大量次生灾害，尤其是崩塌和滑坡，主要集中于坡度较大、第四系黄土发育的区域，反映出这些地质条件在地震作用下的高脆弱性。震中附近的积石山县、刘集乡和寨子沟乡是次生灾害最为密集的区域，反映了该地地质环境脆弱，易受地震影响导致崩塌和滑坡的高发。尽管黄刘村和东乡族自治县等远离震中的区域次生灾害点较为分散，但复杂的地形仍使这些地区有较高的灾害风险。红柳村等区域虽然距震中较远，但滑坡的发生表明地震波传播对这些区域同样产生了不容忽视的影响。整体来看，地层岩性、坡度和水文条件共同决定了次生灾害的易发性和分布特征，震后新增裂隙和土层



a—积石山县东南侧边坡旁地裂缝；b—中川乡东南侧泥流；c—积石山县东南侧滑坡群；d—大河家镇北侧见崩塌落石

图 6　地质次生灾害点野外调查图

Fig. 6　Images of geological hazard sites

(a) Ground cracks in the southeast of Jishishan County; (b) Mudflow in the southeast of Zhongchuan Township; (c) Landslides in the southeast of Jishishan County; (d) Avalanches in the north of Dajiahe Town

失稳显著增加了地质次生灾害的风险。

3　孕灾环境评价

为更全面、客观地评价积石山地区的孕灾环境，通过将断层活动与地质次生灾害结合起来，遵循科学性、完整性、适用性和独立性的原则，选择合适的数学方法，对区域孕灾环境进行定性定量的分区评价。

3.1　孕灾环境评价方案构建

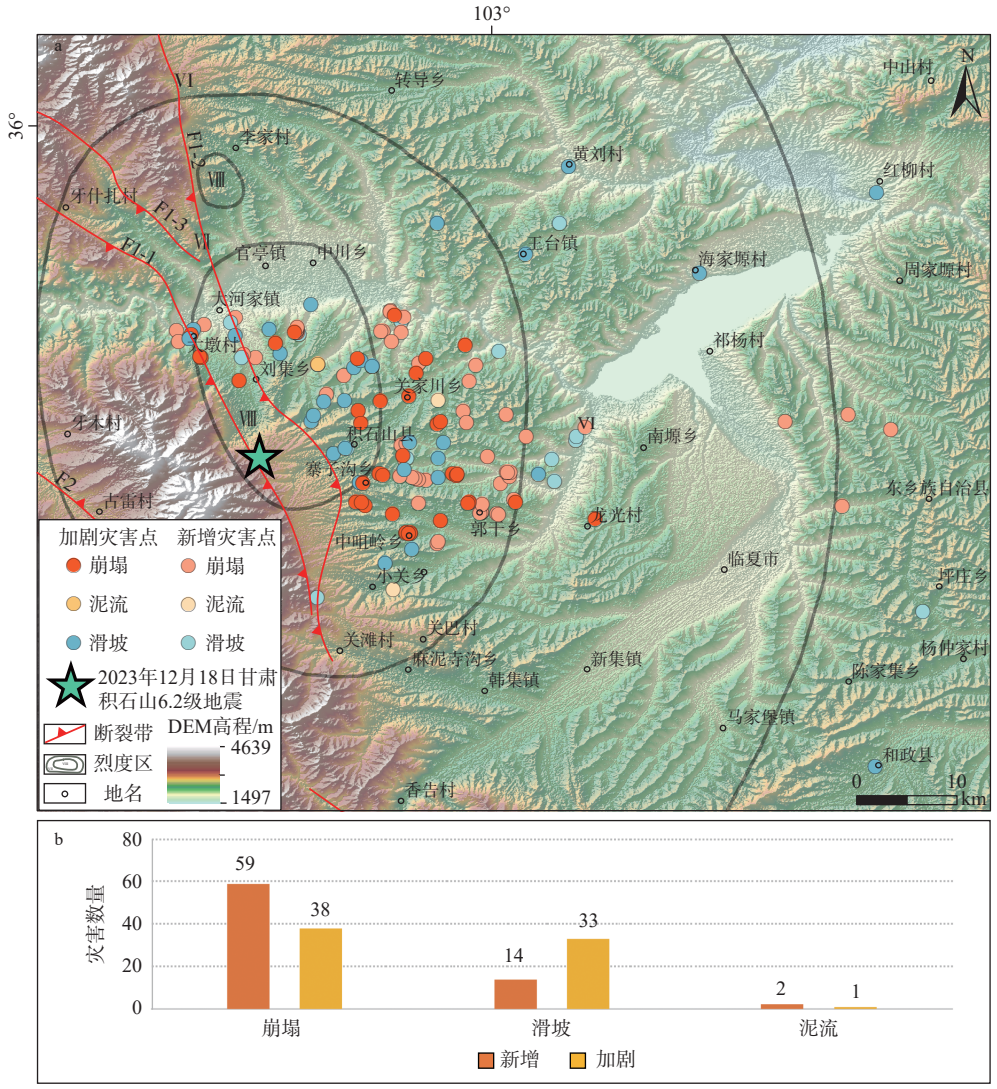
危险性评价可以选用多种评价因子的权重计算方法，如聚类分析、决策树和专家统计法等。层次分析法更适用于权重因子无法完全数字化的决策体系，例如，地层岩性和地质构造等因子无法用具体数值完全替代，需依靠个人主观经验构建判断矩阵，通过计算判断矩阵的特征向量得到各因子的权重值，从而简化孕灾环境的评价问题（窦强，2020；赵伟等，2022；向钊等，2023；张紫昭等，2023；乔波等，2024；周俊和马世澎，2024）。

结合上文地震次生灾害特征分析，推测此次地震次生灾害分布主要受控于地层，其次为断裂。在多次实验和分析后，初步选择降水、坡度、植被覆盖、地层岩性以及断裂 5 个因子作为模型构建的基础（表 2）。考虑土壤类型与地层岩性相关度较高以及高程和坡向与评价分析相关度较低，故此次评价模型构建剔除了土壤、高程和坡向 3 项因子。根据选取的因子构建“1—9 度判断矩阵”（表 3），数字代表指标之间的相对重要性，数值越大，说明相对重要性越强。针对降水、坡度、植被覆盖、地层岩性和断裂 5 项因素，构建 5 阶判断矩阵进行层次法研究（计算方法为方根法），分析得到特征向量为 0.312、0.493、0.805、1.309 和 2.081，由此计算得到因子权重值（表 4）。

根据计算，判断矩阵的一致性指标 CI 值为 0.017，由 CI 值可进一步计算一致性比例 CR 值：

$$CR = CI/RI \qquad (1)$$

其中 RI 值为随机一致性比例。根据表 5，RI 值为 1.12。根据 CR 值，可进一步判断选取的因子是否合理。若 CR=0，则表明判断矩阵具有完全一致



F1-1—拉脊山北缘断裂带西支；F1-2—拉脊山北缘断裂带东支；F1-3—拉脊山北缘断裂带东支反向断层；F2—拉脊山南缘断裂带

a—地震次生灾害区域分布图；b—地震次生灾害数量统计图

图 7 甘肃积石山地震震后灾害点分布图及数量直方图（灾害点数据来源于甘肃省环境监测院 https://gsigem.gsdkj.net/）

Fig. 7 Distribution of post-earthquake disaster sites and statistical tables for the Jishishan earthquake in Gansu Province (the disaster site data are from the Gansu Provincial Environmental Monitoring Institute; https://gsigem.gsdkj.net/)

(a) Map of the regional distribution of secondary seismic hazards; (b) Histogram of secondary disasters of earthquakes

F1-1: West branch of the Lajishan Fault Zone; F1-2: East branch of the northern margin of the Lajishan Fault Zone; F1-3: Reverse fault of the east branch of the north margin of the Lajishan Fault Zone; F2: South branch of Lajishan Fault Zone

性；若 CR=0.1，则表明判断矩阵为满意一致性矩阵；若 CR>0.1，则表明判断矩阵具有不一致性，需要对因子重新选取判断，调整之后重新分析计算。通常情况下 CR 值越小，则说明判断矩阵一致性越好。

根据公式(1)，得到 CR 值为 0.015<0.1(表 6)，表明判断矩阵满足一致性检验，计算所得权重具有较好的一致性，因子选取较为合理，可用于下一步孕灾环境评价。

3.2 孕灾环境评价结果分析

综合考虑断裂、地层岩性、植被覆盖、坡度及降水 5 个因素进行研究区地质次生灾害风险评价，各因素的权重赋值遵循以下原则(表 7)。根据距断裂距离的不同赋予不同的分值，越靠近发震断裂处，地震产生的影响就越大，分值越大。

不同地层岩性对地震响应的程度不同，古近系之前及古生代侵入岩已固结成岩，不易发生滑坡、

表 2　因子选取说明及其数据来源

Table 2　Description of selected factors and their data sources

编号	因子	因子内容	数据说明	来源
1	断裂	距断裂距离	指示断裂运动对周边环境影响，靠近断裂危险性越大，远离断裂危险性越小	陆诗铭等，2024
2	地层岩性	地层岩性分区	将地层划分为全新统、古近系及古近系之前与古生代侵入岩等，全新世地层尚未固结成岩，易受地震等影响发育滑坡、泥流、坍塌等灾害	全国地质资料馆 https://www.ngac.cn/125cms/c/qggnew/zxfw.htm
3	植被覆盖	植被覆盖分类	根据土地利用分布图绘制植被覆盖图，植被较多的地方土地稳定性大，较难发生滑坡等地质次生灾害	中国科学院地理科学与资源研究所 http://www.igsnrr.ac.cn/
4	坡度	地形特点	坡度越大，则坡体易受地震、降水等影响产生滑坡等地质次生灾害	ALOS DEM (30m分辨率)
5	降水	区域月均降水量	考虑区域降水大小对坡体稳定性影响程度	彭守璋，2020

表 3　1—9 度判断矩阵

Table 3　The AHP judgement matrix from 1 to 9

	降水	坡度	植被覆盖	断裂	地层岩性
降水	1.000	0.500	0.333	0.250	0.200
坡度	2.000	1.000	0.500	0.333	0.250
植被覆盖	3.000	2.000	1.000	0.500	0.333
断裂	4.000	3.000	2.000	1.000	0.500
地层岩性	5.000	4.000	3.000	2.000	1.000

表 4　因子权重表

Table 4　Factor weights

项	特征向量	权重值	最大特征值	CI值
降水	0.312	6.238%		
坡度	0.493	9.857%		
植被覆盖	0.805	16.105%	5.068	0.017
断裂	1.309	26.179%		
地层岩性	2.081	41.621%		

表 5　随机一致性指标

Table 5　Stochastic consistency indicators

n 阶	3	4	5	6	7	8	9
RI值	0.5200	0.8900	1.1200	1.2600	1.3600	1.4100	1.4600
n 阶	10	11	12	13	14	15	16
RI值	1.4900	1.5200	1.5400	1.5600	1.5800	1.5900	1.5943
n 阶	17	18	19	20	21	22	23
RI值	1.6064	1.6133	1.6207	1.6292	1.6358	1.6403	1.6462
n 阶	24	25	26	27	28	29	30
RI值	1.6497	1.6556	1.6587	1.6631	1.667	1.6693	1.6724

表 6　CR 值计算及一致性检验结果表

Table 6　Calculation of the CR value and result of the consistency test

最大特征根	CI值	RI值	CR值	一致性检验结果
5.068	0.017	1.120	0.015	通过

泥石流等次生灾害，因此赋值较低；区域全新世地层多为黄土区，质地疏松、空隙大，相比古近系及其之前的地层更易发生次生灾害，因此赋值较高。

植被覆盖的差异也会影响区域土壤稳定性。

表 7 评价指标及其分值表

Table 7 Evaluation indicators and their scores

评价指标	指标分类	原始分值	权重分值	总权重//%
地层	全新统	9	3.78	42
	古近系	2	0.84	
	老地层及岩体	1	0.42	
断裂	≤5km	9	2.34	26
	5～15km	7	1.82	
	15～30km	3	0.78	
	≥30km	1	0.26	
植被覆盖	未利用土地	9	1.44	16
	居民、工矿等用地	3	0.48	
	耕地、草地	2	0.32	
	林地	1	0.16	
	水域	0	0	
坡度	≥40°	9	0.9	10
	30°～40°	7	0.7	
	20°～30°	5	0.5	
	10°～20°	3	0.3	
	＜10°	1	0.1	
降水	≥43mm	9	0.54	6
	40～43mm	7	0.42	
	37～40mm	5	0.3	
	32～37mm	3	0.18	
	≤32mm	1	0.06	

植被覆盖较多的区域，土壤稳定性高，地表径流少，在地震动影响下，相比裸露的未利用土地难以发生滑坡等灾害。因此，依据土地利用特征的不同，对其赋予不同的分值。同时，坡度的变化也直接影响土壤的稳定性，坡度越大，土壤稳定性越差，根据坡度的大小划分等级，并赋予不同的分值。坡度越大，分值越高。降水对区域水文条件的影响不可忽视，根据中国逐月降水数据集计算年均降水量，依据自然分段间隔分为 5 段，依次赋予不同的分值。

根据综合分析评价结果（图 8），研究区的地质次生灾害危险区主要集中在拉脊山前缘，与积石山 6.2 级地震的 VIII 烈度区范围基本一致，少数危险区分布在李家村北端及关滩村、麻尼寺沟乡等地。较危险区主要包含了拉脊山区域，以积石山县为中心，向两边延伸至李家村及韩集镇。地质次生灾害点的分布主要集中在积石山县及其周边区域，呈现出密集分布的特征，且沿着沟谷间第四系呈条带状分布。崩塌灾害主要集中于积石山县、大河家镇等地，该区地质结构较为脆弱，山体陡峭、地形起伏大，区域岩石风化较严重，且缺乏足够的植被覆盖来稳固地表；泥流主要集中在白藏镇及积石山县周边，这些地区地形陡峭、降雨集中，有较多的松散堆积物，在强降雨等条件下容易发生泥流。泥流灾害点靠近河流或湖泊，表明水流冲刷和土壤饱和度的增加易引发泥流；滑坡点分布较为分散，但大多集中在地形变化剧烈的区域，多沿第四系黄土层呈条带状分布在沟谷间，从中部向东部扩展。滑坡灾害点越靠近拉脊山断裂带分布越密集，表明滑坡的发生受断裂距离和降雨等因素的影响较大。从空间分布上来看，不同类型的灾害具有不同的分布特征。滑坡和泥流更倾向于发生在靠近水体和坡度较陡的区域，而崩塌更多发生在陡峭山崖和岩石裸露的区域，且受到地层的影响较大，呈条带状分布。

综上，研究区的次生地质次生灾害分布主要受软弱地质条件影响，在地震、植被、地貌特征及降水条件的综合影响下，地质次生灾害危险区主要集

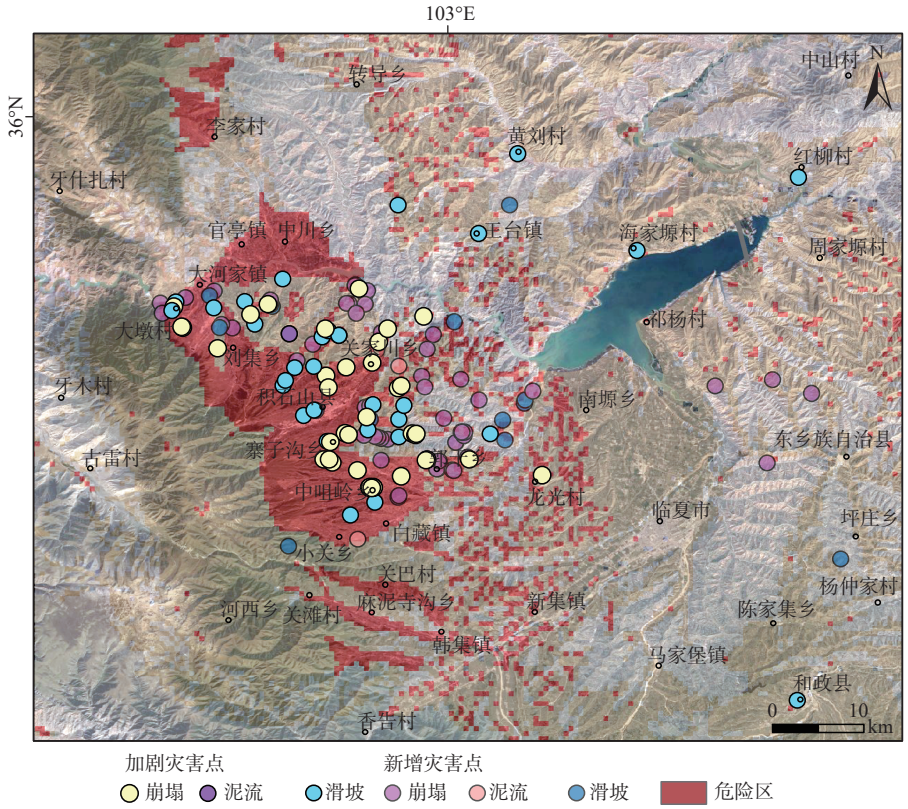


图 8　甘肃积石山地震震后次生灾害综合评价图（灾害点数据来源于甘肃省环境监测院；https://gsigem.gsdkj.net/）

Fig. 8　Comprehensive evaluation of secondary, post-earthquake disasters in Jishishan, Gansu Province (the disaster site data are from the Gansu Provincial Environmental Monitoring Institute; https://gsigem.gsdkj.net/)

中在以震中（积石山县）为中心的拉脊山前缘一带，与 VIII 烈度区范围基本一致，呈条状分布。同时，地质次生灾害点主要集中在拉脊山前缘第四系分布密集的沟谷间，以条带状形式分布，与地质次生灾害危险区范围一致，表明模拟与实际的一致性。其中积石山县、大家河镇和白藏镇灾害密集，需重点监测及预防。特别是在沟谷间人口密集的城镇区域，需加强第四系黄土层的防护工程建设，提升灾害应对能力。

4　讨论

4.1　灾害分布与孕灾地质环境关系

与此次地震发震构造较为相似的是 2008 年汶川大地震，其发震断裂带为龙门山中央主断裂中段的映秀–北川断裂，是一条挤压逆冲断裂带（李勇等，2008；白玉柱等，2010；李海兵等，2013）。震后地表破裂明显，切割了基岩区、河流阶地等，造成了巨大的破坏（李勇等，2008）。其次生灾害包括有滑坡、崩塌等，基于逻辑模型的滑坡易发性评价分析认为，高程、坡度等地形条件是汶川地震震后诱发滑坡的主导因素（杨伟华等，2021）。赵佳忆等（2024）通过机器学习也验证了坡度、侵蚀系数等地形地貌因子是诱发汶川地震震后次生灾害的主要因素。由此可见，汶川地震震后表现出明显的逆断裂“上盘效应”特征（郭富赟等，2024），上盘受地震动的剧烈影响，在陡峭基岩区和冲洪积扇区域诱发滑坡、崩塌等灾害。

而此次积石山地震虽然也具有明显的“上盘效应”特征，但仅仅表现在余震分布上，地质次生灾害反而集中在断裂带下盘。研究表明，拉脊山断裂带上盘主要以古近系之前的老地层及古生代侵入岩为主，且上盘区域受人类活动影响较小，植被发育良好，气候高寒干旱，土质紧密，因此不易发生滑坡、泥石流等地质次生灾害；而下盘区域第四系疏松黄土层发育较厚，无植被固土，土壤含水量丰富，在地震作用下，下盘区域易发生蠕滑–拉裂破坏，导致滑坡等灾害。此外，断裂带下盘受更多垂直应力的影响，易发生变形和破裂，加上人类活动的影响，

该区域在地震发生前已观测到多处因挖掘导致的山体受损，存在大量破碎岩体，经地震动作用诱发崩塌灾害。

值得关注的是，结合余震精定位分布与地质点灾害分布分析，发现余震分布密集处，未见显著的地质次生灾害点。这表明主震可能已经释放了较大应力，诱发了主要地质次生灾害。在多次余震之后，岩体应力状态趋于平衡，地质构造在震后重新排列趋于稳定，裂隙扩展及破裂频率降低，降低了进一步发生地质次生灾害的风险。

由此可见，此次地震震后灾害分布主要受控于区域软弱地质条件。相较于上盘的坚硬岩体区，下盘软弱黄土层在地震动影响下容易失稳，更易发生滑坡、崩塌等次生灾害。

4.2 评价方法的不足与展望

层次分析法是一种半机器半人工决策的评价方法，具有计算简单、操作便捷的优点，特别适用于此次研究区域地质次生灾害的初步评价。然而，在影响因子选取方面仍存在一定的局限性。由于评价指标的选取较为单一，且评价结果的精度主要依赖于人工判断的准确性，因此在层次划分不够精确的情况下，结果可能会受到影响。基于此，利用多次计算判断矩阵，降低 CR 值，构建更精确的影响因子判断矩阵提高人工判断的精确性，可进一步减少误差。

在此次孕灾环境评价方案中，主要选择了 5 个主要影响因子，虽然这些因子对区域地质次生灾害的分布有重要作用，但因资料的完整度限制，还是欠缺一些因素，如人类活动、坡向等，可能会在震后灾害评价中遗漏部分潜在风险。由于积石山研究区范围较小，且多数区域为高山峡谷区，人类活动影响较为有限；根据判断矩阵分析，坡度、坡向与高程影响因子相关度较高，选用坡向及高程加入计算反而可能产生冗余计算。因此，尽管使用的层次分析法考虑的影响因子有所欠缺，但是在处理小尺度地质次生灾害评价方面具有一定优势比较精确，但在大尺度区域次生灾害评价仍存在不足，需考虑更多影响因子。

综上所述，未来的研究将进一步优化影响因子的选取，考虑引入更多与地质次生灾害相关的因子，并采用更先进的机器学习评价方法，如网络层次分析法、模糊层次分析法、模糊综合评价法或灰色系统理论等，以减少主观判断的不足，提升评价结果的准确性和精度。这将有助于构建更精细、更科学、更大区域范围的震后次生灾害评价体系，并为其他地区的震后次生灾害评价提供科学依据和技术参考。

5 结论

（1）甘肃积石山及其邻区第四系疏松黄土层较厚、坡度较大且缺乏植被，使得该区域在地震作用下容易发生崩塌、滑坡和泥石流等次生灾害。其中多数崩塌与滑坡主要位于山麓地带，呈条带状分布，这与山麓堆积物发育、无植被固土以及土壤含水量丰富等因素有关，在地震影响下易产生蠕滑-拉裂破坏。泥石流的发生主要集中于拉脊山前河谷，其松散物源在地震动和水流冲刷下导致灾害加剧。

（2）综合考虑断裂、地层岩性、植被覆盖、坡度及降水 5 个关键影响因子，根据层次分析法研究认为地层岩性是区域地质次生灾害的主导因素，其权重可达 42%；其次是断裂，约占 26%；而降水的影响虽然最小，约占 6%，但仍不可忽视。研究区地质次生灾害危险区主要集中在以震中（积石山县）为中心的拉脊山前缘一带，与 VIII 烈度区范围基本一致。地质次生灾害点主要集中在拉脊山前缘第四系分布密集的沟谷间，呈条带状分布。其中积石山县、大家河镇和白藏镇等地灾害密集，需重点监测及预防，同时也需重点关注区域第四系黄土层防护工程。

（3）对比同样是由逆冲断裂活动引起的汶川地震，其震后灾害主要受到地震动影响，灾害分布集中在断裂带上盘；而积石山震后灾害点分布主要受控于区域软弱地质条件，集中在断裂带下盘。此外，余震密集区灾害点分布较少，推测主震后，经过多次应力释放，区域地质构造环境趋于稳定，降低了进一步发生地质次生灾害的风险。

References

BAI Y Z, XU J, XU X W, et al., 2010. Simulations on displacement fields of ground surface in 2008 Wenchuan earthquake: the case of inverse and right-lateral motion of Yingxiu-Beichuan Fault[J]. Seismology and Geology, 32(1): 16-27. (in Chinese with English abstract)

BAI Z L, JI L Y, ZHU L Y, et al., 2024. Causes and destructive analysis of the liquefied mudflow in Zhongchuan Town triggered by the 2023 Jishishan, Gansu M_S6.2 earthquake[J]. China Earthquake Engineering Journal, 46(4): 768-777. (in Chinese with English abstract)

CAI F Q, 2013. New discovery and application of some historical data for the

*M*8.0 earthquake in southern Wudu in 1879[J]. China Earthquake Engineering Journal, 35(2): 311-320. (in Chinese with English abstract)

DOU Q, 2020. Geological environment evaluation of abandoned mines in Shenzhen city based on GIS and AHP[D]. Changchun: Jilin University. DOI: 10.27162/d.cnki.gjlin.2020.005985. (in Chinese with English abstract)

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2019. Dataset of soil texture on the Qinghai-Tibet Plateau (2010)[DB]. A Big Earth Data Platform for Three Poles. (in Chinese)

GAO B, DONG Y, JIA J, et al., 2024. Development feature and risk assessment of geological hazards caused by the Ms 6.2 earthquake in Jishishan County, Linxia, Gansu Province[J]. Northwestern Geology, 57(2): 209-219. (in Chinese with English abstract)

GAO M T, 2024. Observations on rural earthquake safety in western China from the Jishishan M_S 6.2 earthquake[J]. Overview of Disaster Prevention(1): 4-9. (in Chinese)

GAO Y W, KAN W L, 2024. Brief analysis of the earthquake damage and suggestions for investigation of disaster-bearing bodies in Jishishan M_S6.2 earthquake, Gansu[J]. Overview of Disaster Prevention(1): 16-21. (in Chinese)

GUO F Y, ZHANG Y J, DOU X D, et al., 2024. Distribution patterns and development characteristics of secondary geological hazards caused by the Ms 6.2 earthquake in Jishishan, Gansu[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 60(1): 6-12. (in Chinese with English abstract)

GUO S Y, GUO H X, XIN M Y, 2024. Management suggestions for enhancing the earthquake resistance capacity of rural self-built houses: reflections based on the Jishishan earthquake in Gansu[J]. Hubei Emergency Management(3): 56-57. (in Chinese)

GUO X Y, HAN L B, ZHANG X, et al., 2024. Source parameters and rupture characteristics of the M6.2 Jishishan earthquake in Gansu Province on December 18, 2023[J]. Progress in Earthquake Sciences, 54(1): 75-85. (in Chinese with English abstract)

LI H B, XU Z Q, WANG H, et al., 2013. The principle slip zone of the 2008 Wenchuan earthquake: a thrust fault oblique cutting the Yingxiu-Beichuan fault zone[J]. Geology in China, 40(1): 121-139. (in Chinese with English abstract)

LI J L, ZHANG X J, YU H L, et al., 2024. Lajia ruins in Qinghai Province might be caused by seismic-induced liquefaction mudflows of sands and soils: implication from the Jishishan Earthquake in Gansu Province on December 18, 2023[J]. Geoscience, 38(1): 248-259. (in Chinese with English abstract)

LI Y, ZHOU R J, DENSMORE L A, et al., 2008. Surface rupture and deformation of the Yingxiu-Beichuan fault by the Wenchuan earthquake[J]. Acta Geologica Sinica, 82(12): 1688-1706. (in Chinese with English abstract)

LI Y B, GAN W J, WANG Y B, et al. , 2017. Seismogenic structure of the 2016 M_S6.4 Menyuan earthquake and its effect on the Tianzhu seismic gap[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 37(8): 792-796, 829. (in Chinese with English abstract)

LI Z M, LI Y J, TIAN Q J, et al., 2014. Study on the relationship between paleoseismic on Laji mountain fault and catastrophic event on Lajiashan site[J]. Journal of Seismological Research, 37(S1): 109-115. (in Chinese with English abstract)

LIANG M J, 2008. Earthquake risk assessment on active faults of Lanzhou city[D]. Lanzhou: Lanzhou Institute of Seismology, CEA. (in Chinese with English abstract)

HE B, WANG T, et al., 2024. Development characteristics and susceptibility assessment of coseismic geological hazards of Jishishan M_S6.2 earthquake, Gansu Province, China[J]. Journal of Geomechanics, 30(2): 314-331. (in Chinese with English abstract)

LU S M, 2022. New activity characteristics and tectonic significance of the western margin of Ganjia basin faults[D]. Lanzhou: Lanzhou Institute of Seismology, CEA. DOI: 10.27491/d.cnki.gzdls.2022.000004. (in Chinese with English abstract)

LU S M, WU Z H, LI Z C, 2024. Seismic structure characteristics of the 18 December 2023 *M*6.2 Jishishan earthquake, Gansu Province[J]. Progress in Earthquake Sciences, 54(1): 86-93. (in Chinese with English abstract)

NIU Q F, XIONG C, LEI J J, et al., 2023. Risk assessment of flash flood disasters in Longnan mountain area of Gansu Province based on FFPI model[J]. Journal of Natural Disasters, 32(4): 36-47. (in Chinese with English abstract)

PENG S Z, 2020. 1-km monthly precipitation dataset for China (1901-2021)[DB]. A Big Earth Data Platform for Three Poles, DOI: 10.5281/zenodo.3185722. (in Chinese)

QIANG D X, MA H Z, ZHU Z P, et al. , 2022. Spatial distribution and analysis of debris flow in Jishishan County of Gansu province[J]. Bulletin of Surveying and Mapping(7): 107-111, 117. DOI: 10.13474/j.cnki.11-2246.2022.0212. (in Chinese with English abstract)

QIAO B, GUO J X, JIA N, et al., 2024. Analysis and research on the evaluation index system of earthquake emergency response capacity of earthquake monitoring center station based on AHP method[J]. Journal of Catastrophology, 39(2): 172-177. (in Chinese with English abstract)

SONG F M, YUAN D Y, CHEN G H, et al., 2007. Pattern and combination features of the surface ruptures of the 1125 A. D. Lanzhou *M* 7 earthquake[J]. Seismology and Geology, 29(4): 834-844. (in Chinese with English abstract)

SU R H, YUAN D Y, XIE H, et al., 2023. Classified surface rupture characteristics and damage analysis of the 2022 M_S6.9 Menyuan earthquake, Qinghai[J]. Acta Seismologica Sinica, 45(5): 797-813. (in Chinese with English abstract)

WANG M, SHEN Z K, 2020. Present - day crustal deformation of continental China derived from GPS and its tectonic implications[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 125(2): e2019JB018774.

WU Z H, ZHOU C J, TAN C X, et al., 2016. The active tectonics and regional crustal stability features in the area of Yangtze River economic belt[J]. Journal of Geomechanics, 22(3): 379-411. (in Chinese with English abstract)

WU Z H, ZHOU C J, 2018. Distribution map of active faults in China and its adjacent sea area (1: 5, 000, 000)[M]//HAO A B, LI R M. Atlas sets of geological environment of China. Beijing: Geological Publishing House. (in Chinese)

XIANG Z, LI Q F, WANG C R, et al., 2023. Analysis on development characteristics and disaster-pregnant environmental conditions of geological disasters in Huangping County, southeastern Guizhou Province[J]. Re-

sources Environment & Engineering, 37(3): 320-327. (in Chinese with English abstract)

XIE H, YUAN D Y, LEI Z S, et al., 2014. Seismic hazard characteristics of and lessons from Gulang Ms 8 earthquake in 1927[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 50(5): 622-627. (in Chinese with English abstract)

XU Y N, LIU G Y, 2023. Susceptibility evaluation of geological disasters in a key town of Shiyan City[J]. Energy and Environment(6): 139-142. (in Chinese)

YANG W H, YANG Z Q, ZHAO J L, et al. , 2021. Research on the risk of collapse and landslide in Wenchuan earthquake disaster area based on logistic regression model[J]. Hubei Agricultural Sciences, 60(6): 42-48, 59. (in Chinese with English abstract)

YANG Z X, 1993. On the overthrust zone in the north margin of the Lajishan, the Southern Qilian Mountains[J]. Experimental Petroleum Geology, 15(2): 138-145. (in Chinese with English abstract)

YUAN D Y, LEI Z S, LIU B C, et al. , 2001. Preliminary research on the 406 Wenchuan earthquake (My≈6) in Yuzhong Country, Lanzhou[C]//Proceedings of the research and disaster mitigation academic conference of China's eight magnitude earthquakes. Lanzhou: Seismological Society of China. (in Chinese)

YUAN D Y, LEI Z S, LIU B C, et al., 2002. Textual research on the 1125 Lanzhou *M*7.0 earthquake and the causative structure[J]. Earthquake Research in China, 18(1): 67-75. (in Chinese with English abstract)

YUAN D Y, ZHANG P Z, LIU B C, et al., 2004a. Geometrical imagery and tectonic transformation of late Quaternary active tectonics in northeastern margin of Qinghai-Xizang Plateau[J]. Acta Geologica Sinica, 78(2): 270-278. (in Chinese with English abstract)

YUAN D Y, LEI Z S, LIU X F, et al., 2004b. Textual research on the historical data of the 138 AD Jincheng-Longxi *M*6¾ earthquake and discussion on its seismogenic structural background[J]. Seismology and Geology, 26(1): 52-60. (in Chinese with English abstract)

YUAN D Y, ZHANG P Z, LEI Z S, et al., 2005. A preliminary study on the new activity features of the Lajishan mountain fault zone in Qinghai Province[J]. Earthquake Research in China, 21(1): 93-102. (in Chinese with English abstract)

YUAN D Y, LEI Z S, ZHANG J L, et al., 2007. Textual research on July 7, 1590 A. D. Yongjing earthquake in Gansu Province[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2(2): 158-165. (in Chinese with English abstract)

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, CEA. (in Chinese with English abstract)

ZHANG B, HE W G, FANG L H, et al., 2015. Surveys on surface rupture phenomena of Gansu Kangle *M*¾ earthquake in 1936[J]. Journal of Seismological Research, 38(2): 262-271. (in Chinese with English abstract)

ZHANG Z Z, ZHANG T D, YU X K, et al., 2023. Zonation of disaster environments of collapse, landslide and debris flow geologic hazards and their formation mechanisms in Xinjiang[J]. Journal of Engineering Geology, 31(4): 1129-1144. (in Chinese with English abstract)

ZHAO J Y, TIAN S J, LI K, et al., 2024. Susceptibility assessment of debris flow in the upper reaches of the Minjiang River before and after the Wenchuan earthquake[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 35(1): 51-59. (in Chinese with English abstract)

ZHAO W, ZHOU J, CHEN K J, et al., 2022. Sensitivity analysis on hazard - formative environmental factors for wind disasters caused by typhoon in Zhejiang power grid[J]. Journal of Catastrophology, 37(3): 118-121,

ZHENG W J, MIN W, HE W G, et al., 2013. Distribution of the related disaster and the causative tectonic of the Minxian-Zhanxian M_S6.6 earthquake on July 22, 2013, Gansu, China[J]. Seismology and Geology, 35(3): 604-615. (in Chinese with English abstract)

ZHENG W J, ZHANG P Z, YUAN D Y, et al., 2019. Basic characteristics of active tectonics and associated geodynamic processes in continental China[J]. Journal of Geomechanics, 25(5): 699-721. (in Chinese with English abstract)

China Earthquake Administration, 2015. Earthquake Intensity Zoning Map of China: GB 18306-2015[S]. Beijing: Standards Press of China. (in Chinese)

ZHOU C J, WU Z H, MA X X, et al., 2016. The major active faults and regional crustal stability assessment in the area of city group in central Yunnan[J]. Journal of Geomechanics, 22(3): 454-477. (in Chinese with English abstract)

ZHOU J, MA S P, 2024. SPSSAU scientific data analysis methods and applications[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry. (in Chinese)

附中文参考文献

白玉柱，徐杰，徐锡伟，等，2010. 2008年汶川8.0级地震地表位移场的模拟：映秀-北川断裂逆冲兼右旋走滑错动形成的地表位移场[J]. 地震地质，32(1)：16-27.

白卓立，季灵运，朱良玉，等，2024. 2023年甘肃积石山M_S6.2地震中川乡泥流成因及破坏性分析[J]. 地震工程学报，46(4)：768-777.

蔡副全，2013. 1879年武都南8级地震新资料的发现与应用[J]. 地震工程学报，35(2)：311-320.

窦强，2020. 基于GIS和层次分析法的深圳市废弃矿山地质环境评价[D]. 长春：吉林大学. DOI:10.27162/d.cnki.gjlin.2020.005985.

高波，董英，贾俊，等，2024. 甘肃临夏积石山县6.2级地震地质灾害发育特征及危险性评价[J]. 西北地质，57(2)：209-219.

高孟潭，2024. 从积石山6.2级地震看西部农村地震安全[J]. 防灾博览(1)：4-9.

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.

郭富赟，张永军，窦晓东，等，2024. 甘肃积石山M_s6.2地震次生地质灾害分布规律与发育特征[J]. 兰州大学学报(自然科学版)，60(1)：6-12.

郭聖煜，郭海湘，辛美仪，2024. 关于提升农村自建房抗震能力的管理建议：基于甘肃积石山地震的思考[J]. 湖北应急管理(3)：56-57.

郭祥云，韩立波，张旭，等，2024. 2023年12月18日甘肃积石山6.2级地震震源参数和破裂特征[J]. 地震科学进展，54(1)：75-85. DOI：10.19987/j.dzkxjz.2023-197.

李海兵，许志琴，王焕，等，2013. 汶川地震主滑移带(PSZ)：映秀—北川断裂带内的斜切逆冲断裂[J]. 中国地质，40(1)：121-139.

李俊磊，张绪教，鱼海麟，等，2024. 青海喇家遗址极可能由地震导致的砂土液化泥流造成："12·18"积石山地震的启示[J]. 现代地质，38(1)：248-259.

李彦宝，甘卫军，王阅兵，等，2017. 2016 年门源 M_S6.4 强震的发震构造及其对"天祝地震空区"的影响[J]. 大地测量与地球动力学，37(8)：792-796，829.

李勇，周荣军，DENSMORE A L，等，2008. 映秀-北川断裂的地表破裂与变形特征[J]. 地质学报，82(12)：1688-1706.

李智敏，李延京，田勤俭，等，2014. 拉脊山断裂古地震与喇家遗址灾变事件关系研究[J]. 地震研究，37(S1)：109-115.

联合国粮食及农业组织(FAO)，2019. 青藏高原土壤质地数据集(2010)[DB]. 时空三极环境大数据平台.

梁明剑，2008. 兰州市活断层地震危险性评价[D]. 兰州：中国地震局兰州地震研究所.

刘帅，何斌，王涛，等，2024. 甘肃积石山县 M_S6.2 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，2022. 甘加盆地西缘断裂新活动特征与构造意义[D]. 兰州：中国地震局兰州地震研究所. DOI: 10.27491/d.cnki.gzdls.2022.000004.

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.

牛全福，熊超，雷姣姣，等，2023. 基于 FFPI 模型的甘肃陇南山区山洪灾害风险评价[J]. 自然灾害学报，32(4)：36-47.

彭守璋，2020. 中国 1 km 分辨率逐月降水量数据集(1901-2021)[DB]. 时空三极环境大数据平台. DOI：10.5281/zenodo.3185722.

强德霞，马海政，朱自平，等，2022. 甘肃省积石山县泥石流空间分布及分析[J]. 测绘通报(7)：107-111，117. DOI:10.13474/j.cnki.11-2246.2022.0212.

乔波，郭建兴，贾宁，等，2024. 基于 AHP 方法的地震监测中心站地震应急能力评价指标体系分析研究[J]. 灾害学，39(2)：172-177.

宋方敏，袁道阳，陈桂华，等，2007. 1125 年兰州 7 级地震地表破裂类型及其分布特征[J]. 地震地质，29(4)：834-844.

苏瑞欢，袁道阳，谢虹，等，2023. 2022 年青海门源 M_S6.9 地震地表破裂特征分类及震害分析[J]. 地震学报，45(5)：797-813.

吴中海，周春景，谭成轩，等，2016. 长江经济带地区活动构造与区域地壳稳定性基本特征[J]. 地质力学学报，22(3)：379-411.

吴中海，周春景，2018. 中国及毗邻海区活动断裂分布图(1∶500 万)[M]//郝爱兵，李瑞敏. 中国地质环境图系(图件编号：00-01-05). 北京：地质出版社.

向钊，李青峰，王春仁，等，2023. 黔东南黄平县地质灾害发育特征与孕灾环境条件分析[J]. 资源环境与工程，37(3)：320-327.

谢虹，袁道阳，雷中生，等，2014. 1927 年古浪 8 级地震的震灾特征与启示[J]. 兰州大学学报(自然科学版)，50(5)：622-627.

徐亚宁，刘钢一，2023. 十堰市某重点集镇地质灾害易发性评价研究[J]. 能源与环境(6)：139-142.

杨伟华，杨志强，赵建林，等，2021. 基于逻辑回归模型的汶川地震灾区崩塌滑坡易发性评估[J]. 湖北农业科学，60(6)：42-48，59.

杨中轩，1993. 南祁连拉脊山北缘逆冲推覆构造带[J]. 石油实验地质，15(2)：138-145.

袁道阳，雷中生，刘百篪，等，2001. 兰州榆中 406 年菀川 6 级地震的初步研究[C]//中国八级大震研究及防震减灾学术会议论文集. 兰州：中国地震学会.

袁道阳，雷中生，刘百篪，等，2002. 兰州 1125 年 7 级地震考证与发震构造分析[J]. 中国地震，18(1)：67-75.

袁道阳，张培震，刘百篪，等，2004a. 青藏高原东北缘晚第四纪活动构造的几何图像与构造转换[J]. 地质学报，78(2)：270-278.

袁道阳，雷中生，刘小凤，等，2004b. 138 年金城-陇西 6¾级地震的史料考证与发震构造背景探讨[J]. 地震地质，26(1)：52-60.

袁道阳，张培震，雷中生，等，2005. 青海拉脊山断裂带新活动特征的初步研究[J]. 中国地震，21(1)：93-102.

袁道阳，雷中生，张俊玲，等，2007. 1590 年 7 月 7 日甘肃永靖东南地震考证[J]. 震灾防御技术，2(2)：158-165.

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.

张波，何文贵，方良好，等，2015. 1936 年甘肃康乐 6¾级地震地表破裂带调查[J]. 地震研究，38(2)：262-271.

张紫昭，张天栋，于喜坤，等，2023. 新疆崩滑流地质灾害孕灾环境分区及其形成机制[J]. 工程地质学报，31(4)：1129-1144，

赵佳忆，田述军，李凯，等，2024. 岷江上游汶川地震前后泥石流易发性评价[J]. 中国地质灾害与防治学报，35(1)：51-59.

赵伟，周娟，陈科技，等，2022. 浙江电网台风风灾的孕灾环境因子敏感性分析[J]. 灾害学，37(3)：118-121，

郑文俊，闵伟，何文贵，等，2013. 2013 年甘肃岷县漳县 6.6 级地震震害分布特征及发震构造分析[J]. 地震地质，35(3)：604-615.

郑文俊，张培震，袁道阳，等，2019. 中国大陆活动构造基本特征及其对区域动力过程的控制[J]. 地质力学学报，25(5)：699-721，

中国地震局，2015. 中国地震动参数区划图：GB 18306-2015[S]. 北京：中国标准出版社.

周春景，吴中海，马晓雪，等，2016. 滇中城市群重要活动断裂与区域地壳稳定性评价[J]. 地质力学学报，22(3)：454-477.

周俊，马世澎，2024. SPSSAU 科研数据分析方法与应用[M]. 北京：电子工业出版社.