

甘肃积石山 M_s 6.2 级地震的同震地质灾害基本特征及风险防控建议

王立朝, 侯圣山, 董英, 铁永波, 张鸣之, 杨旭东, 肖锐铧, 刘明学, 冯振, 张永军, 王仲复

Basic characteristics of co-seismic geological hazards induced by Jishishan M_s 6.2 earthquake and suggestions for their risk control

WANG Lichao, HOU Shengshan, DONG Ying, TIE Yongbo, ZHANG Mingzhi, YANG Xudong, XIAO Ruihua, LIU Mingxue, FENG Zhen, ZHANG Yongjun, and WANG Zhongfu

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202312026>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

甘肃定西地区地质灾害危险性评价

Risk assessment of geological hazards in Dingxi region of Gansu Province

沈迪, 郭进京, 陈俊合 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(4): 134–142

四川长宁“6·17”地震诱发的次生地质灾害类型及其发育特征

Types and their characteristics of geological hazards triggered by “6·17” earthquake in Changning, Sichuan Province

廖勇, 徐闯, 陈军, 周世文 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(1): 77–83

云南鲁甸地震红石岩堰塞湖右岸特高边坡综合监测及变形特征分析

Comprehensive monitoring and deformation analysis of extra high slope on the right bank of Hongshiyan Dammed Lake in Ludian Earthquake

郭延辉, 杨溢, 高才坤, 杨志全 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 30–37

地震条件下悬臂式挡墙主动土压力的极限分析方法

Limit analysis method of active earth pressure on cantilever retaining wall subjected to earthquake

李志浩, 肖世国 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(5): 79–87

黄河流域甘肃段地质灾害发育特征

The development characteristics of geological hazards in Gansu segment of the Yellow River basin

郭富, 宋晓玲, 刘明霞 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 130–136

基于自然灾害风险评价框架的省级地质灾害风险区划方法探讨——以吉林省为例

Provincial geological disaster risk zoning method based on natural disaster risk assessment framework: a case study in Jilin Province

张以晨, 郎秋玲, 陈亚南, 张继权, 田书文 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 104–110



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202312026

王立朝, 侯圣山, 董英, 等. 甘肃积石山 M_s 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, 2024, 35(3): 108-118.

WANG Lichao, HOU Shengshan, DONG Ying, et al. Basic characteristics of co-seismic 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, 2024, 35(3): 108-118.

甘肃积石山 M_s 6.2 级地震的同震地质灾害基本特征及风险防控建议

王立朝¹, 侯圣山¹, 董英², 铁永波³, 张鸣之¹, 杨旭东¹, 肖锐铧¹, 刘明学¹, 冯振¹, 张永军⁴, 王仲复⁵

(1. 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; 2. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710054; 3. 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610081; 4. 甘肃省地质环境监测院, 甘肃 兰州 730050; 5. 青海省地质环境监测总站, 青海 西宁 810000)

摘要: 2023 年 12 月 18 日甘肃省临夏州积石山县发生 M_s 6.2 级地震, 引发了大量地质灾害, 威胁人民生命与基础设施的安全。地震后, 甘肃、青海两省迅速开展地质灾害隐患核查, 文章基于这次地震地质灾害调查成果, 对积石山地震诱发地质灾害的特征、控制因素、发展趋势进行了分析, 提出防灾减灾措施建议。截至 12 月 23 日, 共核查隐患点 2 044 处, 包括 78 处新增地质灾害隐患、88 处地震加剧变形的在库隐患点和 1 878 处无明显变形的在库隐患点。新增和变形加剧的隐患点数量以崩塌居多, 占 67.5%, 滑坡次之, 占 31.9%; 规模等级以小型居多, 占 84.9%, 中型次之, 占 10.8%; 成灾模式多为小型崩塌威胁房屋和道路。同震地质灾害密集分布于发震断层附近, 发育密度随地震烈度增强而增大。国家地质安全监测台网震中 50 km 范围内 206 组加速度计数据显示, 震区峰值加速度为 30.4~1 969.7 mg, 并随与震中距离的增大呈对数衰减。此外, 地表变形监测设备也记录了典型滑坡的同震位移曲线。分析认为, 积石山地震地质灾害后效应与链式致灾效应将增强, 建议尽快更新震区地质灾害隐患点数据库, 有针对性地实施风险防控措施, 深入开展综合遥感监测与同震地质灾害机理研究, 完善气象预警模型及阈值, 有效降低地质灾害风险。

关键词: 地质灾害; 地震; 甘肃积石山; 黄土; 风险防控

中图分类号: P694

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2024)03-0108-11

Basic characteristics of co-seismic geological hazards induced by Jishishan M_s 6.2 earthquake and suggestions for their risk control

WANG Lichao¹, HOU Shengshan¹, DONG Ying², TIE Yongbo³, ZHANG Mingzhi¹, YANG Xudong¹, XIAO Ruihua¹, LIU Mingxue¹, FENG Zhen¹, ZHANG Yongjun⁴, WANG Zhongfu⁵

(1. China Institute of Geo-Environment Monitoring (Guide Center of Prevention Technology for Geo-Hazards, MNR), Beijing 100081, China; 2. Xi'an Center of China Geological Survey, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 3. China Geological Survey of Chengdu Center, Chengdu, Sichuan 610081, China; 4. Gansu Institute of Geological Environment Monitoring, Lanzhou, Gansu 730050, China; 5. Qinghai Provincial General Geological and Environmental Monitoring Station, Xining, Qinghai 810000, China)

收稿日期: 2023-12-24; 修订日期: 2023-12-27

投稿网址: <https://www.zgdzzhyfzxb.com/>

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20221748; DD20190645; DD20160280)

第一作者: 王立朝(1972—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 从事地质灾害调查评价与地质灾害形成机理与防治研究。

E-mail: wanglichao@mail.cgs.gov.cn

通讯作者: 侯圣山(1977—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事地质灾害调查监测相关研究。E-mail: houshengshan@mail.cgs.gov.cn

Abstract: On December 18, 2023, an M_s 6.2 earthquake occurred in Jishishan County, Linxia Prefecture, Gansu Province, causing a large number of geological disasters and threatening people's lives and the safety of infrastructure. After the earthquake, Gansu and Qinghai provincial governments quickly deployed hundreds of geology professionals to carried out the investigation and verification geological disasters in the earthquake area. Based on the results of the earthquake geohazard investigation and verification, this paper analyses the characteristics, control factors and development trend of the earthquake-induced geohazards, and puts forward suggestions on disaster prevention and risk mitigation measures. Till December 23, a total of 2044 geohazards have been checked, including 78 new geohazards, 88 existing geohazards with intensified deformation due to earthquake, and 1 878 existing geohazards without obvious different from before. Most of new and intensified deforming geohazards are collapse, accounting for 67.5%, followed by landslide, accounting for 31.9%. Most of new and intensified deforming geohazards are small in scale, accounting for 84.9%, followed by medium, accounting for 10.8%. Disaster mode of new and intensified deforming geohazards are mostly small collapse threatening houses and roads. The co-seismic geohazards are densely distributed along the seismic fault, and the spatial density increases with the enhancement of earthquake intensity. Data from 206 groups of accelerate-meters within 50 km from the epicenter of the National Geological Safety Monitoring Network showed that the peak acceleration of the earthquake area was 30.4 ~ 1 969.7 mg, and decayed logarithm with the increase of the distance from the epicenter. In addition, the surface deformation monitoring equipment also recorded the co-seismic displacement curve of a typical landslide. Analysis shows, earthquake put a deteriorate effect to rock and soil, which decreased their integration and strength. There is a magnificent geohazard after-effect of earthquake; collapse, landslide and debris flow will be much often than before. So the authors suggest: (1) update earthquake geohazard database as soon as possible, (2) work out targeted prevention and control measures for the geohazards with large potential danger, (3) conduct comprehensive remote sensing monitoring and research of earthquake-induced geohazard mechanism, (4) improve the meteorological early warning model and threshold. By all this efforts the risk of geohazards after earthquake will be reduced and controlled.

Keywords: geohazard; earthquake; Jishishan County of Gansu Province; loess; risk prevention and control

0 引言

2023年12月18日23时59分30秒,甘肃临夏州积石山县发生 M_s 6.2级地震,震源深度10 km。截至12月25日0时,地震已造成甘肃、青海两省149人遇难、2人失联。

地震是引发地质灾害的重要因素之一。历史上地震造成人员伤亡中有很大比例由同震地质灾害导致,因此,地震引发同震地质灾害问题受到国内外学者的广泛关注。如2008年四川汶川 M_s 8.0级地震触发了15 000余处滑坡、崩塌、泥石流,估计直接造成2万人死亡^[1];黄润秋^[2]提出汶川地震地质灾害后效应将持续20~25 a。2013年四川芦山 M_s 7.0级地震触发了1 800余处地质灾害,比地震前增加14%,类型以浅层滑坡与崩塌、落石为主,高程放大效应特征突出^[3]。2010年青海玉树 M_s 7.1级地震导致地质灾害数量明显增加,类型以低位滑坡为主,空间分布受活动断裂控制,链生效应显著^[4]。2013年甘肃岷县漳县 M_s 6.6级地震引发的地质灾害以小型—中型黄土崩塌、滑坡为主,主要位于海拔

2 200 ~ 2 800 m,坡度10° ~ 30°的斜坡地带,与发震断裂和水系关系密切^[5~6]。2022年四川泸定 M_s 6.8级地震在石棉县诱发565处有威胁对象的地质灾害,导致81处已有隐患点变形加剧,主要分布在鲜水河断裂带和大渡河两岸的高烈度区,受发震断层控制,推测震后泥石流风险加剧^[7~11]。Yunus等^[12]研究了地震诱发土质滑坡的规律,对地震滑坡规模进行了预测分析。Sorensen等^[13]对挪威地震诱发滑坡的特征和规律进行了综述。Pyakurel等^[14]尝试了利用机器学习技术来预测地震诱发滑坡。廖勇等^[15]对2019年四川长宁 M_s 6.0地震前后地质灾害进行了对比,提出地震地质灾害不仅受到地震的控制,而且人类活动也是重要因素。2015年尼泊尔 M_s 8.1强烈地震引发了至少445处地质灾害,主要分布于发震断层上盘。张永双等^[16]总结了最近十余年我国地震地质灾害的特征,指出山区地震引起的地质灾害远远超过地震本身造成的危害,在震后相当长的时期内,降雨导致震区滑坡、泥石流灾害频发,并提出了监测防控的措施建议。

本文通过分析地震地质灾害现场调查成果,总结了

积石山地震同震地质灾害分布规律、致灾特征,提出防灾减灾措施建议。

1 积石山地震及影响区概况

1.1 积石山地震概况

据中国地震台网测定,积石山 M_s 6.2 级地震震中坐标为北纬 35.70°、东经 102.79°,震源深度 10 km。地震发生在甘东南活动构造区,属于中国南北地震带北部,是青藏高原东北缘的一个重要组成区域。受欧亚板块与印度板块的长期挤压作用,该区构造活动强烈,发育多条深大断裂。积石山地震震中周边 200 km 范围内,1949 年以来发生 6.0~6.9 级地震 2 次、5.0~5.9 级地震 14 次,最大为 2013 年 7 月 22 日甘肃省定西市岷县、漳县交界 M_s 6.6 级地震,距本次震中的距离约 185 km。积石山地震发震断层为拉脊山南缘断裂,和拉脊山北缘断裂一起构成拉脊山断裂带,为一条区域性的活动断裂,晚更新世至全新世以来都有活动,有历史记载以来发生过 20 多次 5 级左右中等地震^[17~18]。

积石山地震为逆冲型地震,破裂面呈现 SE—NW 走向,破裂由震中向 NW 方向延伸,由深部向浅部扩展。中国地震局对灾区 668 个调查点展开了实地震害调查,确定了此次地震的烈度分布(图 1),最大烈度为 VIII 度,等震线长轴呈 NNW 走向,长轴 124 km,短轴 85 km。VI 度区及以上面积 8 364 km²,此次地震涉及甘肃省 3 个市(州)9 个县(市、区)、青海省 2 个市(州)4 个县(市)30 个乡镇^[19]。

积石山地震震源深度浅、发震机制为逆冲断层、地震发生时间为午夜,造成了较大人员伤亡。据央视新闻报道,仅在积石山县,房屋损毁数量就达 155 393 间(截至 2023 年 12 月 19 日 13 时)。图 2 为发震断裂带附近房屋毁损的无人机和现场照片。

1.2 震区地质环境概况

积石山地震震区地处青藏高原与黄土高原的交汇过渡带,拉脊山山脉和积石山山脉沿拉脊山断裂、倒淌河—临夏断裂、西秦岭北缘断裂展布,构成青藏高原与黄土高原的分界线。震区地势由西南向东北方向倾斜逐渐降低,黄河自西向东穿过震区。

积石山震区地貌类型以构造侵蚀山地、侵蚀剥蚀低山丘陵、侵蚀堆积河谷平原为主,区域最高点为 4 636 m 的达里架山,黄河常水位为 1 735~1 860 m。震区地层岩性复杂,包括元古代和加里东期侵入岩体,寒武系火山岩,石炭系砂岩、板岩,二叠系、三叠系的砂岩、泥钙质板岩及薄层灰岩,侏罗系、白垩系、新近系

的泥岩、砂岩、砂砾岩等,在侵蚀低山丘陵区和河谷平原区,第四系黄土、黄土状土呈披覆状堆积在下伏新近系泥岩及黄河阶地之上。黄河河谷发育有多级阶地,地势宽阔平坦,撒拉族、东乡族、保安族、回族、土族等众多民族世代居住于此。

2 地震地质灾害特征及控制因素分析

2.1 震前地质灾害隐患情况

地震发生后,中国地质环境监测院自动报告系统根据全国地质灾害动态数据库实时统计了地震前距震中 10, 30, 50 km 的已有隐患点情况。震中 10 km 范围内涉及甘肃省积石山县,有隐患点 49 处,威胁人数约 2 639 人,威胁财产约 14 833.00 万元;震中 30 km 范围内涉及甘肃省积石山县和青海的民和等县,共有隐患点 472 处,威胁人数约 33 257 人,威胁财产约 127 086.90 万元;震中 50 km 范围内共有隐患点 1 296 处,威胁人数约 87 623 人,威胁财产约 326 215.13 万元^[20](表 1、图 3,其中地质灾害隐患来自全国地质灾害数据库;图 3 地形阴影来自公开版 30 m 分辨率 ASTER GDEM;烈度区范围来自文献[19])。

地震前,研究区地质灾害隐患点主要分布于石塬、柳沟、关家川、居集、癿藏一线以东的黄土丘陵及侵蚀—剥蚀低山丘陵地带,区域黄土大面积覆盖,多呈梁、峁地形,下覆基岩多为花岗岩和泥岩、砂岩,属二元结构斜坡。下伏基岩质地坚硬,为相对的隔水层,起到了润滑的作用;泥岩、砂岩遇水易软化,力学强度显著降低,致使斜坡体容易发生黄土、黄土红层崩塌、滑坡等灾害。加之区内人类工程活动较强烈,削坡建房、修路等现象较为普遍,改变了斜坡形态,造成斜坡坡脚失去支撑,应力集中,导致该区域较易发生滑坡、崩塌灾害。受地形地貌、地层岩性、人类工程活动等因素影响,境内地质灾害多在河流、河谷两岸及道路沿线等地段集中分布,对村庄居民住宅造成威胁。

2.2 同震地质灾害排查

截至 12 月 22 日,甘肃、青海两省累计排查震中约 50 km 范围内(甘肃省临夏州积石山县、东乡县、和政县、临夏市、临夏县、永靖县及甘南州的夏河县 7 个县区,青海省海东市民和县、化隆县、循化县)地质灾害隐患点 2 044 处(甘肃 1 142 处、青海 902 处),其中已有地质灾害隐患点 1 966 处(甘肃 1 078 处、青海 888 处),新增地质灾害隐患点 78 处(甘肃 64 处、青海 14 处)。已有地质灾害隐患点中,地震导致变形加剧的地质灾害隐

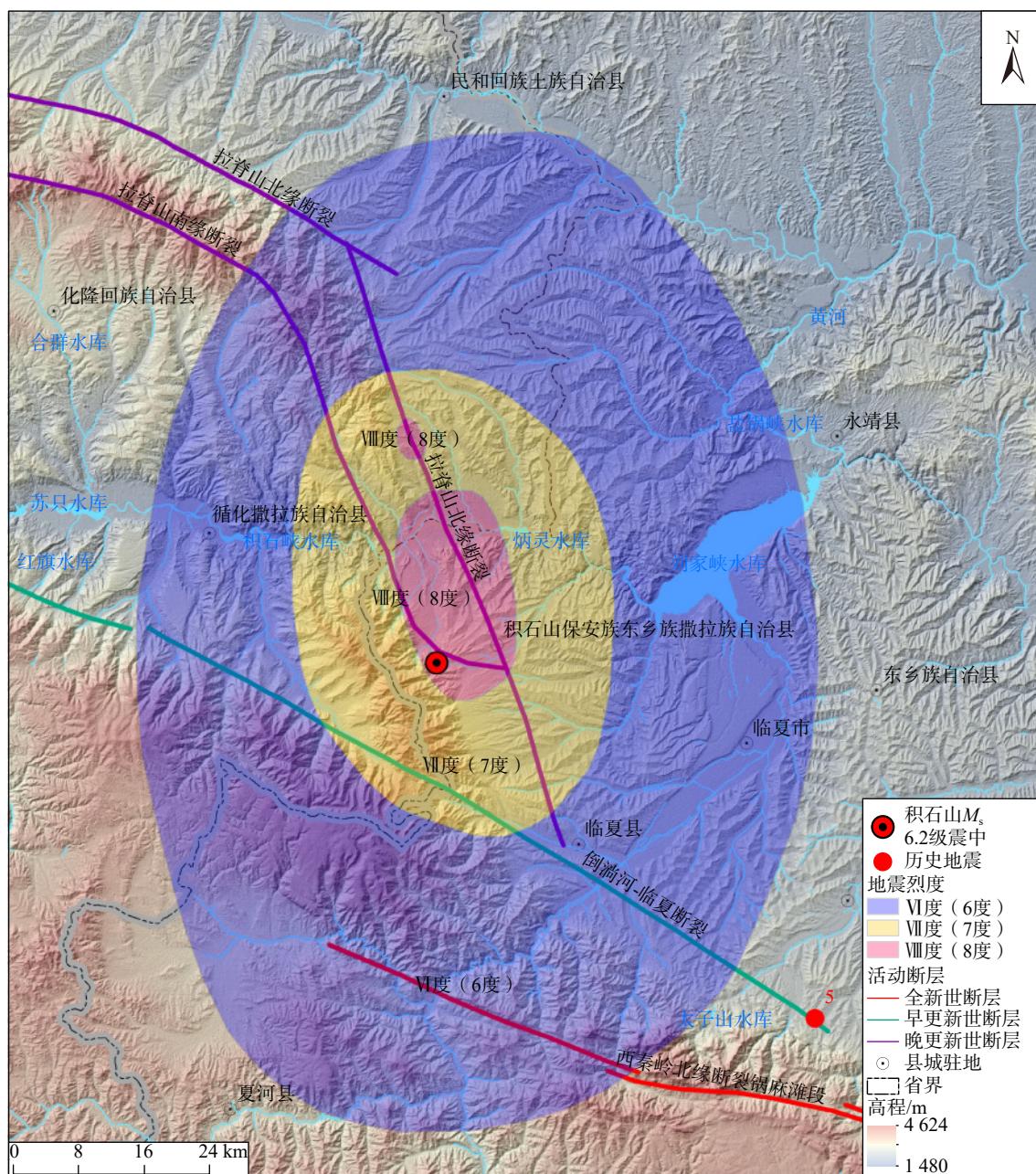
图1 积石山 M_s 6.2级地震震中、断裂与地震烈度分布图Fig. 1 Epicentre, fault and intensity of Jishishan M_s 6.2 earthquake

图2 积石山地震导致大量房屋倒塌

Fig. 2 House damage caused by Jishishan M_s 6.2 earthquake

表1 距震中10, 30, 50 km范围地质灾害隐患统计简表
Table 1 Table of geological hazards 10, 30, 50 km from epicentre

距震中距离/km	隐患点数/处	崩塌/处	滑坡/处	泥石流/处	其他/处	威胁人数/人	威胁财产/万元
10	49	3	23	3	20	2 639	14 833.00
30	472	50	214	91	117	33 257	127 086.90
50	1 296	101	609	241	345	87 623	326 215.13

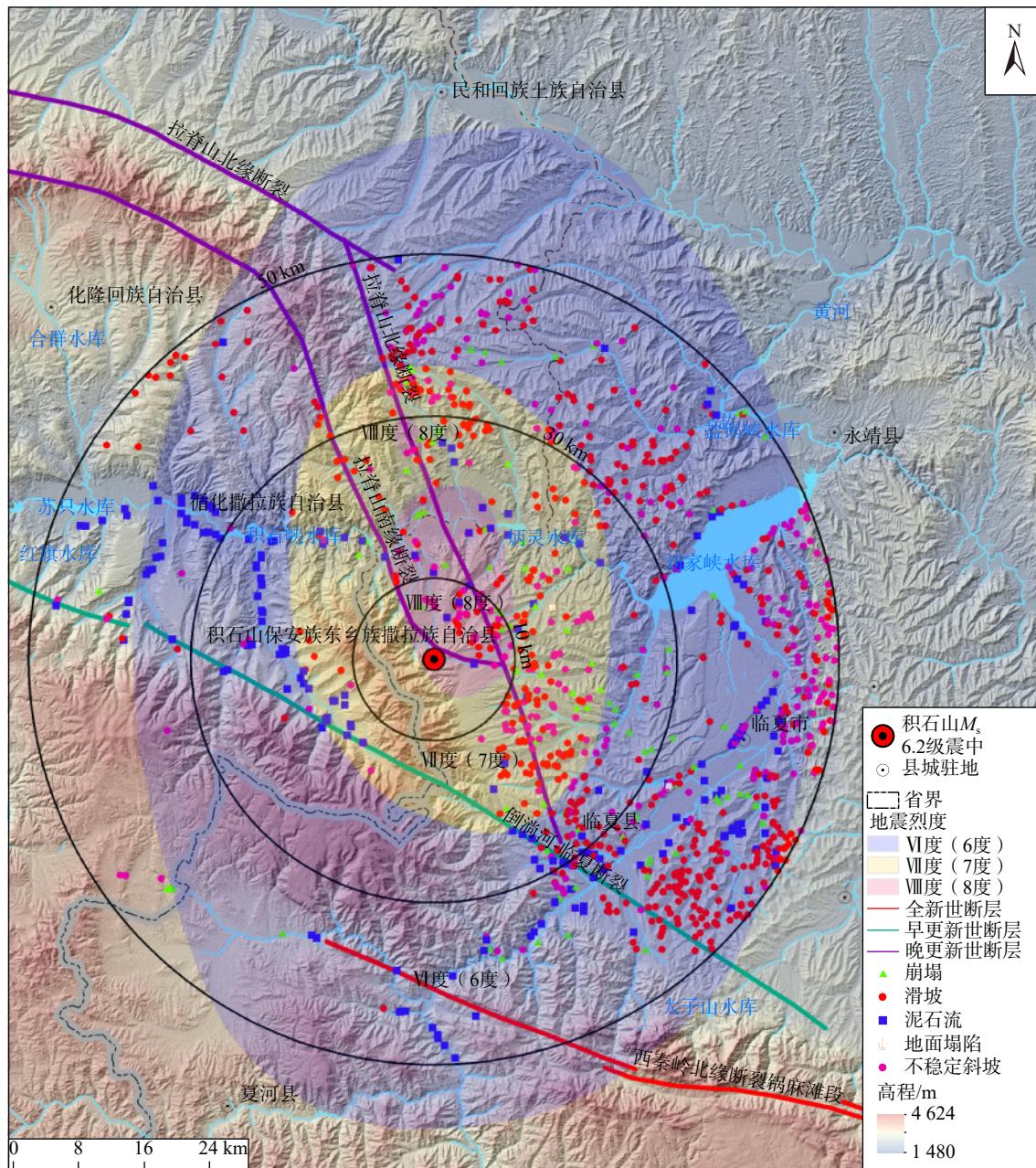


图3 震区已有地质灾害隐患分布图
Fig. 3 Distribution of geological hazard in Jishishan earthquake area

患点有88处(甘肃63处、青海25处),地震前后未发生明显变化的隐患点有1 878处(甘肃1 015处、青海863处)(表2、图4)。此次排查未发现因地震引发地质灾害造成人员伤亡的事件。

2.3 地震导致已有隐患点加速变形

在此次地震中变形加剧的地质灾害隐患共有88处(甘肃63处、青海25处),按灾害类型划分,崩塌50处(甘肃39处、青海11处),滑坡38处(甘肃24处、青海

表2 积石山震区地质灾害隐患排查点数

Table 2 Geological hazard investigation in the Jishishan earthquake area

省份	排查地质灾害数量/处	无明显变形的已有隐患点数量/处	地震加剧变形的已有隐患点数量/处	地震新引发的地质灾害数量/处
甘肃省	1 142	1 015	63	64
青海省	902	863	25	14
合计	2 044	1 878	88	78

14处);按规模划分,特大型1处(甘肃),大型6处(甘肃2处、青海4处),中型13处(甘肃10处、青海3

处),小型68处(甘肃50处、青海18处)(表3)。

变形加剧的已有隐患点集中分布于高地震烈度区(表4),其中位于Ⅷ度烈度区内的有29处,占33.0%;位于Ⅶ度烈度区内的有51处,占57.9%;位于Ⅵ度烈度区的有6处,占6.8%;位于Ⅴ度烈度区的有2处,占2.3%。地震作用破坏已有隐患点的平衡状态,导致原有处于不稳定、基本稳定状态的地质灾害加速变形,稳定性进一步降低。

2.4 地震新引发的地质灾害

排查发现,此次地震新引发的地质灾害隐患共78

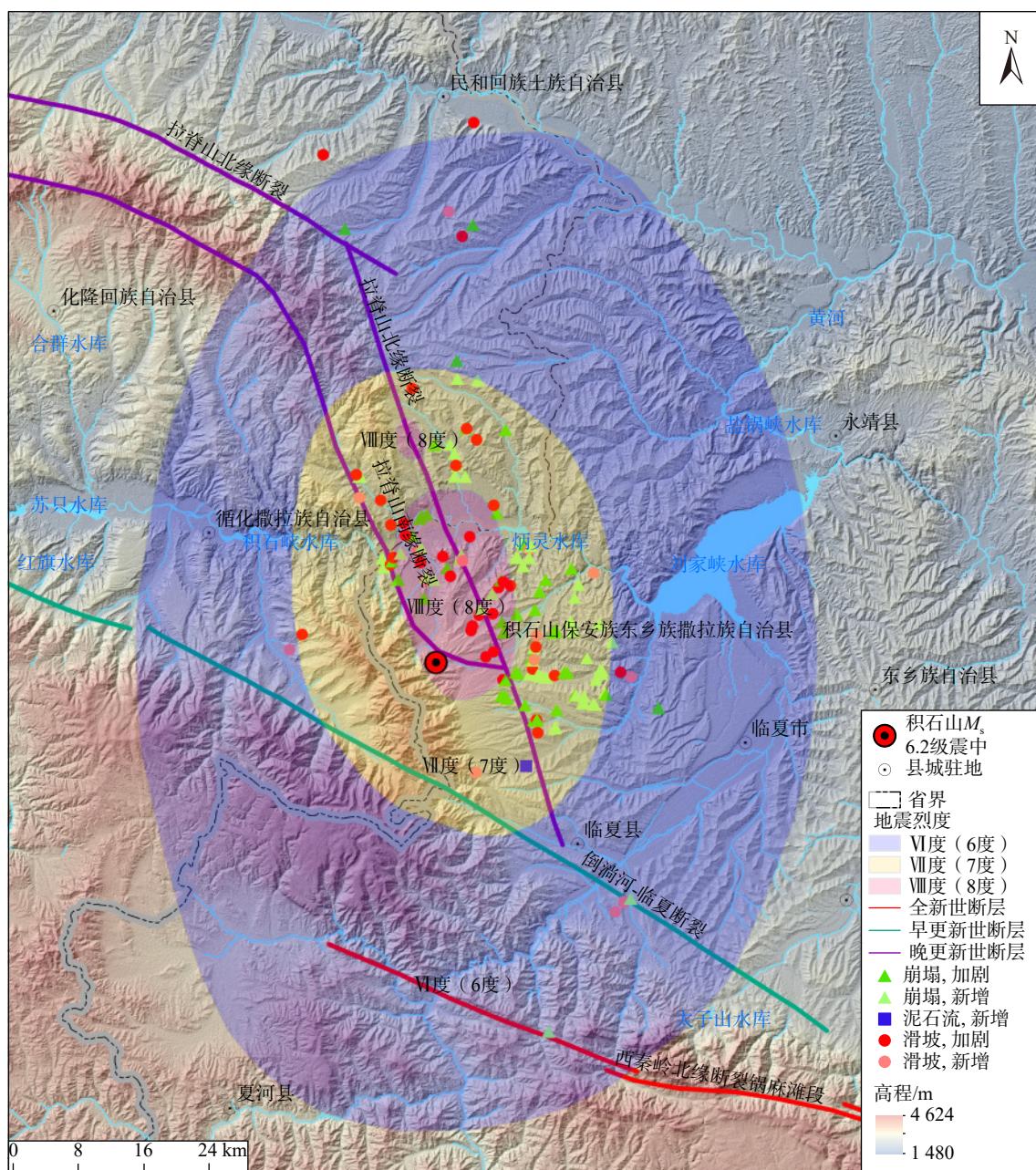


图4 地震新引发或加剧变形的地质灾害分布图

Fig. 4 Distribution of geological hazard newly generated and accelerated by the earthquake

表3 积石山地震期间变形加剧的地质灾害类型和规模等级
Table 3 Type and scale of geological hazards accelerated by the earthquake

省份	加剧变形 隐患点 数量/处	类型		规模		
		崩塌/处	滑坡/处	特大型/处	大型/处	中型/处
甘肃省	63	39	24	1	2	10
青海省	25	11	14	0	4	3
合计	88	50	38	1	6	13
						68

表4 积石山地震期间变形加剧的地质灾害空间分布与地震烈度关系表
Table 4 Earthquake intensity of geological hazards accelerated by the earthquake

地震烈度	变形加剧灾害点数量/处	占比/%
Ⅷ度(8度)	29	33.0
Ⅶ度(7度)	51	57.9
Ⅵ度(6度)	6	6.8
Ⅴ度(5度)	2	2.3
合计	88	100.00

处(甘肃 64 处、青海 14 处), 按灾害类型划分, 崩塌 62 处(甘肃 51 处、青海 11 处), 滑坡 15 处(甘肃 12 处、青海 3 处), 泥石流沟 1 条(甘肃); 按规模等级划分, 中型 5 处(甘肃), 小型 73 处(甘肃 59 处、青海 14 处)(表 5)。

新增地质灾害全部位于Ⅵ度以上烈度区(表 6), 多位于拉脊山断裂带内, 其中位于Ⅷ度烈度区内的有 15 个, 占 19.3%; 位于Ⅶ度烈度区内的有 54 个, 占 69.2%;

表5 积石山地震新引发的地质灾害类型和规模等级
Table 5 Type and scale of geological hazards newly generated by the earthquake

省份	地震新引发地质 灾害数量/处	类型		规模	
		崩塌/处	滑坡/处	泥石流/处	中型/处
甘肃省	64	51	12	1	5
青海省	14	11	3	0	0
合计	78	62	15	1	5
					73

位于Ⅵ度烈度区的有 9 个, 占 11.5%。强烈的地震动使得本来没有地质灾害的地方发生边坡垮塌, 新增地质灾害多为崩塌威胁房屋、道路, 例如黄土陡坎垮塌、碎裂基岩高位崩塌。

表6 积石山地震新引发的地质灾害与地震烈度关系表
Table 6 Earthquake intensity of newly-generated geological hazards by the earthquake

地震烈度	地震新引发地质灾害数量/处	占比/%
Ⅷ度(8度)	15	19.3
Ⅶ度(7度)	54	69.2
Ⅵ度(6度)	9	11.5
合计	78	100.00

2.5 典型同震地质灾害

同震地质灾害沿拉脊山断裂在高地震烈度区密集分布。图 5 为 4 种典型同震地质灾害, 分别代表了地震危岩体威胁道路、震裂山体产生滑坡隐患、碎裂基岩高位崩塌和黄土陡坎坍塌破坏房屋。4 处典型同震地质灾害均位于甘肃省临夏州积石山县, 其中 1 处为已有隐



图5 典型同震地质灾害
Fig. 5 Typical co-seismic geological hazard

患点加速变形,3处为新发地质灾害点。

(1)长一里 Y558 公路东侧崩塌,位于大河家镇长一里村 Y558 公路东侧,地震诱发已有隐患点加速变形。公路内侧边坡坡高 45~50 m,平均坡度 35°~48°,局部陡坎坡度达到 65°,坡体中部泥岩层近乎直立。本次地震加剧了斜坡的变形导致崩塌,黄土及泥岩层崩塌堆积物压埋了下方 Y558 公路,部分崩塌体翻过公路,滚落至河道中。坡体中上部仍有残留危岩体,威胁下方道路及过往车辆人员(图 5a)。

(2)石塬乡秦阴村二社潜在滑坡,位于石塬乡秦阴村二社,为地震新引发的地质灾害点。斜坡长约 70 m,宽约 220 m,受地震影响,后缘发育多条平行于滑向的拉张裂缝,推测滑面位于马兰黄土层内或黄土与泥岩分界面,滑体厚度 5~8 m,体积约 $12 \times 10^4 \text{ m}^3$,稳定性差,在余震、降雨等因素影响下易失稳发生滑动,威胁下方公路和居民(图 5b)。

(3)大墩峡景区崩塌,位于大河家镇大墩村大墩峡景区游客服务中心西侧,为地震新引发的地质灾害点。崩塌部位相对高差约 180 m,坡度 45°~65°,局部陡坎近乎直立,本次地震引发高位岩体局部崩塌,沿坡面滚落,部分碎裂岩块发生碰撞弹跳,跌落到坡脚游客中心建筑及道路上。目前,残留危岩体仍然不稳定,威胁游客服务中心和景区道路的安全(图 5c)。

(4)大河家镇大河村七社崩塌,位于大河家镇大河村七社,为一处地震新引发地质灾害,平面形态呈 L 形,走向呈近东西向,坡宽约 80 m,坡高 12.6~15 m,坡度为 85°左右。坡面形态呈“直线”形,坡度 65°~80°,局部坡体近直立,上部为马兰黄土,厚约 5 m,下部为黄河阶地卵砾石层。本次地震造成局部崩塌,崩塌体掩盖坡下房屋,威胁坡脚和坡顶的居民(图 5d)。

2.6 同震地质灾害影响因素分析

从图 4、表 7 可以看出,甘肃、青海两省地震后排查发现的 166 处新发和变形加剧的地质灾害隐患点中,有 44 处分布在Ⅷ度烈度区,有 105 处分布在Ⅶ度烈度区,

表 7 不同地震烈度区新发和变形加剧地质灾害隐患点数量及密度

Table 7 Geological hazard amount and density of different seismic intensity zones

地震烈度区	隐患点数量/个	烈度区面积/km ²	隐患点密度/(个·km ⁻²)
Ⅷ度(8度)	44	331	0.132 9
Ⅶ度(7度)	105	1 514	0.069 4
Ⅵ度(6度)	15	6 519	0.002 3
Ⅴ度(5度)	2	—	—

有 15 处分布在Ⅵ度烈度区。同震地质灾害发育密度和地震烈度高度相关。

据国家自然灾害防治研究院,本次地震发震断层为拉脊山南缘断裂,为逆冲型地震^[18]。从图 4 可以看出,166 处新发和变形加剧的地质灾害隐患点沿拉脊山南缘断裂和拉脊山北缘断层密集分布,其中有 160 处分布在拉脊山南缘断裂的上盘(北东东侧),仅有 6 处位于断层下盘,这说明逆冲断层上盘震动破坏作用明显高于断层下盘,断层上盘效应显著。

3 地质灾害监测仪器对地震动的响应及监测点的变形特征

根据震中附近 GS.N002B 强震台站(35.80°N, 102.85°E)观测到震动持续时间约 19 s,考虑地震波按照随距离增大而延迟的情况,作者认为 12 月 18 日 23:59:30~19 日 00:00:56 时间段内加速度传感器有响应即为有效观测,具体数据响应情况如下:震中距 50 km 范围内监测点 206 处,安装加速度传感器的监测点有 164 处,安装有加速度传感器 312 个,有效观测 100 组峰值加速度(以下简称 PGA)数据,记录到的 PGA 响应范围为 30.4~1 969.7 mg。震中距 50~80 km 范围监测点 331 处,安装加速度传感器的监测点有 223 处,安装有加速度传感器 550 个,有效观测 121 组 PGA 数据,记录到的 PGA 响应范围 30.13~1 620.5 mg。PGA 数值范围 1 500~2 000 mg 的加速度传感器主要沿拉脊山南缘断裂及倒淌河—临夏断裂分布,位于Ⅵ—Ⅷ烈度带范围内(图 6)。部分加速度设备存在工作模式不符合《地质灾害监测数据通信技术要求》(DZ/T 0450—2023)的情况,导致未能及时获取有效观测数据,分析其原因,可能存在单芯片模式设计导致唤醒时长超过震动持续时间、采样频率较低、定时采传数据、非上传周期内采集最大值等因素。

测得最大加速度的观测台站位于青海省海东市民和回族土族自治县官亭镇赵木川村滑坡,该点距震中 16 km。通过分析监测数据发现,加速度突变之后,随即地表变形设备监测到滑坡加速变形,12 月 18—20 日日形变速率分别为 84.1, 12.6, 2.6 mm/d, 其中 18 日 23 时 59 分 30 秒形变值达到最大,但 1 h 内,于 19 日凌晨 1 时数据迅速回弹。据观察,周边地表位移变形设备同样出现类似跳变。通过分析原始观测数据发现,由于地震时刻基站位置发生了瞬间位移,导致测站监测结果发生趋势性位移,后期基站恢复稳定,测站数据也随后恢复正常。12 月 19 日 10 时之后滑坡变形趋于稳定(图 7)。

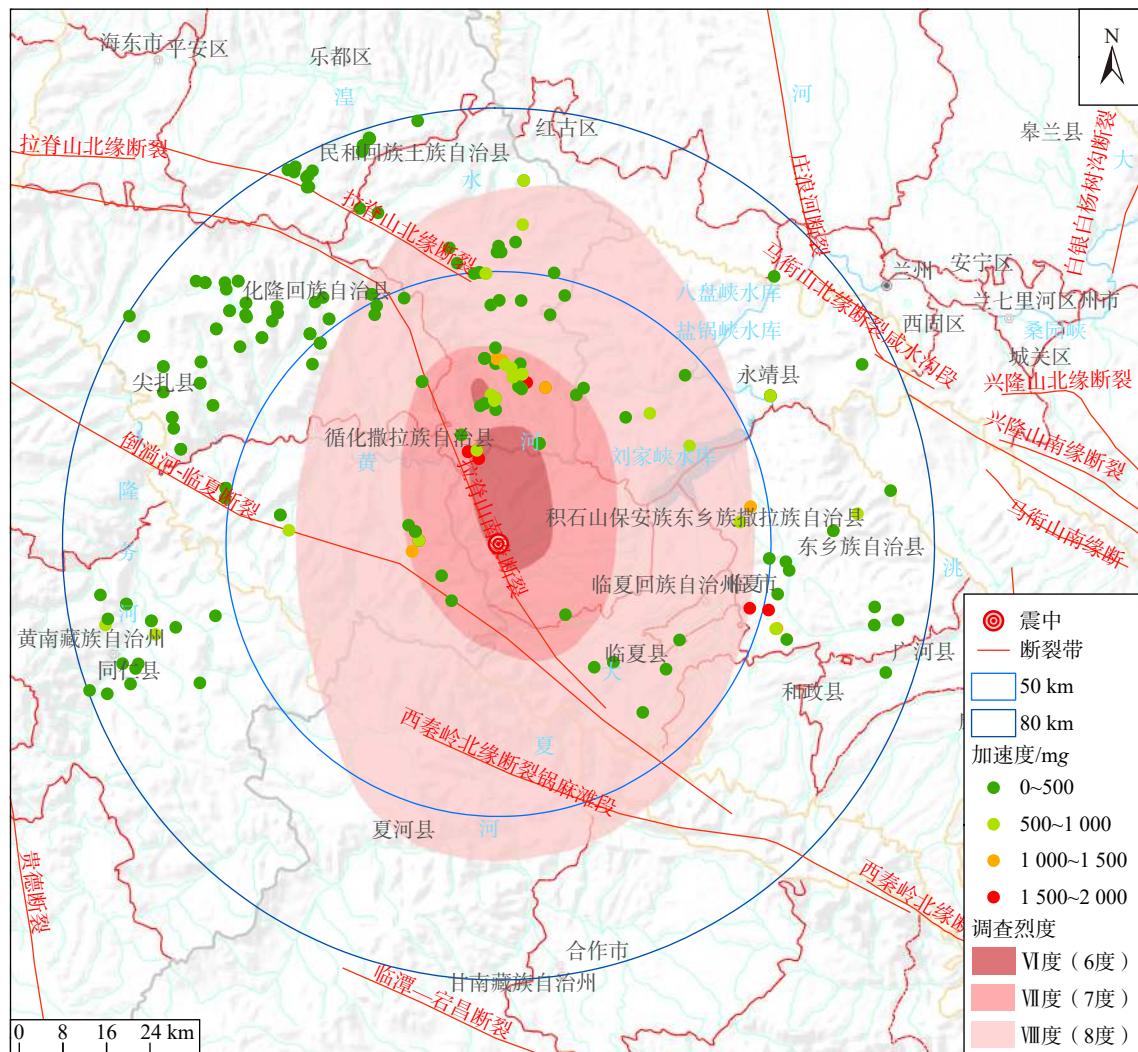


图 6 国家地质安全监测台网加速度监测点位置图

Fig. 6 Distribution of monitoring sites of national geo-safty monitor network

4 地震后地质灾害风险防控建议

甘肃积石山地震发生以后,震区地质环境条件发生了改变,地质灾害风险防控面临新的形势,建议采取以下针对性的措施,降低灾害风险。

(1)科学部署隐患排查,更新震区地质灾害隐患库,针对威胁较大的地质灾害点,合理安排搬迁避让、工程治理、监测预警等措施,提前部署地质灾害勘查、可行性研究等项目前期工作,纳入地质灾害防治项目储备库,适时筹措资金进行搬迁、治理,实现对地质灾害风险的全面防控。

(2)综合利用国产陆探 SAR、高分系列光学遥感数据等国产卫星综合遥感资源,运用地学空间分析与人工智能技术等先进技术,开展中、大型滑坡地质灾害监测评价工作,推进中、大型滑坡灾害综合遥感监测示范应用,为中、大型滑坡地质灾害的隐患早期识别与监测预

警提供新技术新方法。

(3)考虑地质灾害后效应和链式致灾效应,建议在拉脊山断裂等构造活动性评估、黄土区同震地质灾害成因机理、地震沙土液化致灾机制等方面开展深入研究,加深对地震地质灾害的认识,更新地质灾害易发性分区图,并在编制震后地质灾害防治专项规划、恢复重建规划及国土空间规划时予以充分考虑。

(4)地震造成岩体松动,震后山区崩塌、滑坡和泥石流等将会呈现出增强趋势并延续相当长的一段时间,降雨引发地质灾害阈值降低。震区是甘肃省暴雨中心之一,降水强度大,日最大降雨量 95.4 mm,小时最大降水量 29.3 mm,10 min 最大降雨量 12.6 mm^[21]。震区海拔高度高,冬季寒冷,1月均温仅-8 °C,冻土深度达 86 cm。主震区存在降雨和冻融诱发地质灾害的气象因素,呈现多季地质灾害高发规律。建议更新地震区地质

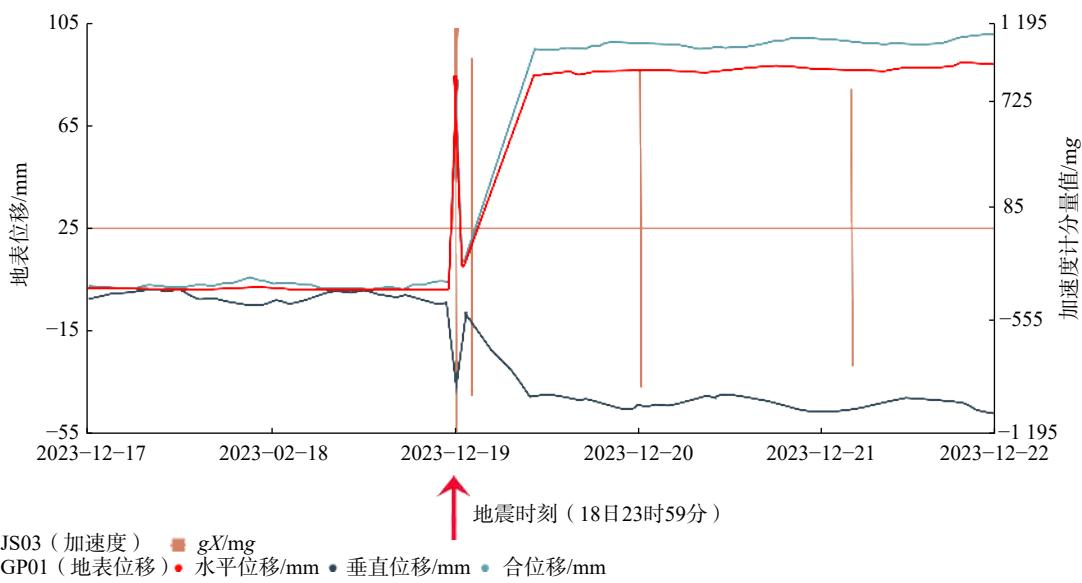


图 7 赵木川村滑坡地表位移和加速度设备监测曲线耦合分析

Fig. 7 GNSS and accelerometer monitoring data of Zhao muchuan landslide

灾害气象风险预警模型及阈值,深化预警模型和判据的研究,加强对地质灾害监测系统建设的指导,提升监测预警工作成效。

(5)积石山震区构造活动强烈,随着青藏高原隆升与河流下切,河谷高阶地侵蚀作用强烈,地质灾害发育。受地震影响大量隐患点变形加剧,引发大量新生灾害。建议加大地震影响区震后地质灾害调查评价,重点研究震后阶地岩土体动力学响应以及次生地质灾害发育演化特征,为编制震后地质灾害防治规划和灾后重建提供科学指导。

5 结论

(1)积石山 M_s 6.2级地震新引发了78处地质灾害,88处原有隐患点变形加剧。地震新引发地质灾害及加速变形的地质灾害多分布在高烈度区,类型以崩塌为主,规模以小型为主。地质灾害的断层上盘效应显著。

(2)地震影响区地质环境条件发生了改变,地质灾害后效应显著。预计未来地质灾害风险增加,崩塌、滑坡、泥石流发育频次升高,在降水、冻融条件下易形成链式地质灾害。

(3)已有地质灾害监测网络捕捉到地震动信号,震中50 km范围内206组加速度计数据显示,峰值加速度为30.4~1969.7 mg,随与震中的距离增大呈对数衰减。

(4)针对积石山地震后地质灾害防控新形势,提出了科学部署隐患排查、开展早期识别、更新预警判据等风险管控措施建议。

后记:本文网络首发于2023年12月28日。文中

地质灾害隐患数据来源于全国地质灾害信息系统,自然资源部、甘肃省、青海省积石山 M_s 6.2级地震震后地质灾害排查,在此对所有资料提供人员一并表示感谢!希望本文为编制震后地质灾害防治规划提供依据。同时借此机会向地震遇难者表示深切哀悼!

参考文献(References):

- [1] 殷跃平.汶川八级地震地质灾害研究 [J].工程地质学报,2008, 16(4): 433~444. [YIN Yueping. Researches on the geo-hazards triggered by Wenchuan earthquake, Sichuan [J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(4): 433~444. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 黄润秋.汶川地震地质灾害后效应分析 [J].工程地质学报,2011, 19(2): 145~151. [HUANG Runqiu. After effect of geohazards induced by the Wenchuan earthquake [J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19(2): 145~151. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 裴向军,黄润秋.“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),2013, 40(3): 257~263. [PEI Xiangjun, HUANG Runqiu. Analysis of characteristics of geological hazards by “4·20” Lushan earthquake in Sichuan, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2013, 40(3): 257~263. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 殷跃平,张永双,马寅生,等.青海玉树 M_s 7.1级地震地质灾害主要特征 [J].工程地质学报,2010, 18(3): 289~296. [YIN Yueping, ZHANG Yongshuang, MA Yinsheng, et al. Research on major characteristics of geohazards induced by the Yushu M_s 7.1 earthquake [J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(3): 289~296. (in Chinese with English abstract)]

- [5] 陈冠, 孟兴民, 乔良, 等. “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, 2013, 21(5): 750 – 760. [CHEN Guan, MENG Xingmin, QIAO Liang, et al. Distribution, characteristics, and associated influencial factors of the geohazards induced by Minxian-Zhangxian earthquake on 22 July, 2013, Gansu, China [J]. Journal of Engineering Geology, 2013, 21(5): 750 – 760. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 殷志强, 徐永强, 陈红旗, 等. 2013年甘肃岷县—漳县 M_s 6.6级地震地质灾害展布特征及主控因素研究 [J]. 第四纪研究, 2015, 35(1): 88 – 99. [YIN Zhiqiang, XU Yongqiang, CHEN Hongqi, et al. Study on the distribution characteristics of geohazards and the causative tectonic of the Minxian-Zhangxian M_s 6.6 Earthquake on 22 July, 2013, Gansu, China [J]. Quaternary Sciences, 2015, 35(1): 88 – 99. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 范宣梅, 王欣, 戴岚欣, 等. 2022年 M_s 6.8级泸定地震诱发地质灾害特征与空间分布规律研究 [J]. 工程地质学报, 2022, 30(5): 1504 – 1516. [FAN Xuannie, WANG Xin, DAI Lanxin, et al. Characteristics and spatial distribution pattern of M_s 6.8 Luding earthquake occurred on September 5, 2022 [J]. Journal of Engineering Geology, 2022, 30(5): 1504 – 1516. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 铁永波, 张宪政, 卢佳燕, 等. 四川省泸定县 M_s 6.8级地震地质灾害发育规律与减灾对策 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(6): 1 – 12. [TIE Yongbo, ZHANG Xianzheng, LU Jiayan, et al. Characteristics of geological hazards and it's mitigations of the M_s 6.8 earthquake in Luding County, Sichuan Province [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(6): 1 – 12. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 刘甲美, 王涛, 杜建军, 等. 四川泸定 M_s 6.8级地震诱发崩滑灾害快速评估 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(2): 84 – 94. [LIU Jiamei, WANG Tao, DU Jianjun, et al. Emergency rapid assessment of landslides induced by the Luding M_s 6.8 earthquake in Sichuan of China [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(2): 84 – 94. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 孙东, 杨涛, 曹楠, 等. 泸定 M_s 6.8地震同震地质灾害特点及防控建议 [J]. 地学前缘, 2023, 30(3): 476 – 493. [SUN Dong, YANG Tao, CAO Nan, et al. Characteristics and mitigation of coseismic geohazards associated with the Luding M_s 6.8 earthquake [J]. Earth Science Frontiers, 2023, 30(3): 476 – 493. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 武新宁, 易俊梅, 周淑丽, 等. 尼泊尔 M_s 8.1级地震活动构造及次生地质灾害研究 [J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(4): 137 – 144. [WU Xinning, YI Junmei, ZHOU Shuli, et al. A study on the active faults structures and geohazards triggered by the M_s 8.1earthquake in Nepal [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2017, 44(4): 137 – 144. (in Chinese with English abstract)]
- [12] YUNUS A P, CHEN Xinyu, CATANI F, et al. Earthquake-induced soil landslides: volume estimates and uncertainties with the existing scaling exponents [J]. *Scientific Reports*, 2023, 13(1): 8151.
- [13] SØRENSEN M B, HAGA T, NESJE A. Earthquake-induced landslides in Norway [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2023, 23(4): 1577 – 1592.
- [14] PYAKUREL A, DAHAL B K, GAUTAM D. Does machine learning adequately predict earthquake induced landslides? [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2023, 171: 107994.
- [15] 廖勇, 徐闯, 陈军, 等. 四川长宁“6·17”地震诱发的次生地质灾害类型及其发育特征 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(1): 77 – 83. [LIAO Yong, XU Chuang, CHEN Jun, et al. Types and their characteristics of geological hazards triggered by “6·17” earthquake in Changning, Sichuan Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(1): 77 – 83. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 张永双. 我国地震地质灾害特点与监测防治进展 [J]. 城市与减灾, 2018(3): 9 – 18. [ZHANG Yongshuang. Characteristics of earthquake induced geological disasters in China and their progress of monitoring, prevention and control [J]. City and disaster reduction. 2018(3): 9 – 18. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 李智敏, 李延京, 田勤俭, 等. 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, 2014, 37(增刊1): 109 – 115. [LI Zhimin, LI Yanjing, TIAN Qinjian, et al. Study on the relationship between Paleoseismic on Laji Mountain fault and Catastrophic event on Lajiaoshan site [J]. Journal of seismological research, 2014, 37(Sup 1): 109 – 115. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 国家自然灾害防治研究院. 甘肃临夏州积石山县 6.2 级地震发震构造环境分析 [Z/OL]. (2023-12-20) [2023-12-24] [National Institute of Natural Hazards. Analysis of the seismogenic tectonic environment of the M_s 6.2 earthquake in Jishishan County, Linxia Prefecture, Gansu Province [Z/OL]. (2023-12-20) [2023-12-24]. (in Chinese)]
- [19] 中华人民共和国应急管理部. 甘肃积石山 6.2 级地震烈度图 [Z/OL]. (2023-12-22) [2023-12-24] [Ministry of Emergency Management of the People's Republic of China. Gansu Jishishan M_s 6.2 earthquake intensity map [Z/OL]. (2023-12-22) [2023-12-24]. (in Chinese)]
- [20] 中国地质环境监测院. 甘肃临夏州积石山县震区 6.2 级地震地质灾害监测预警智能速报 [R]. 2023. [China Institute of Geo-Environment Monitoring. Intelligent quick report on monitoring and early warning of 6.2 earthquake geological hazards in Jishishan County, Linxia Prefecture, Gansu Province [R]. 2023. (in Chinese)]
- [21] 甘肃工程地质研究院. 甘肃省临夏州积石山县地质灾害详细调查报告 [R]. 2014. [Gansu Institute of Engineering Geology. Detailed investigation report on geological hazards in Jishishan County, Linxia Prefecture, Gansu Province [R]. 2014. (in Chinese)]