



引文格式: 高波, 董英, 贾俊, 等. 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, 2024, 57(2): 209–219. DOI: 10.12401/j.nwg.2024013

Citation: GAO Bo, DONG Ying, JIA Jun, et al. Development Feature and Risk Assessment of Geological Hazards Caused by the Ms 6.2 Earthquake in Jishishan County, Linxia, Gansu Province[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(2): 209–219. DOI: 10.12401/j.nwg.2024013

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

高波, 董英*, 贾俊, 薛强, 武文英, 李林, 王涛, 刘港, 江睿君

(自然资源部黄土地质灾害重点实验室, 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710119)

摘要: 2023 年 12 月 18 日 23 时 59 分, 甘肃省临夏州积石山县发生 Ms6.2 级地震, 诱发了大量崩滑地质灾害, 严重威胁人民生命财产安全。基于震区现场实地调查成果, 开展地震诱发加剧地质灾害的发育特征、危险性评价研究, 提出防灾减灾措施建议。根据实地调查统计, 此次地震后新增地质灾害隐患点 64 处, 加剧的地质灾害隐患点有 63 处。新增和变形加剧的隐患点以崩塌为主, 滑坡次之; 规模等级以小型为主, 中型次之。崩滑地质灾害主要集中在黄土丘陵区, 以黄土陡坎地带切坡建房、切坡修路为主。利用 GIS 技术的加权信息量法评价积石山县域地质灾害易发性。结果显示, 高易发区、中易发区、低易发区、非易发区占比分别为 5.45%、9.83%、32.70% 和 52.02%, 其中高易发区主要分布在积石山东部黄土丘陵区的山梁地带。基于区域地质灾害易发性评价, 开展地震活动断裂、地震动分布以及不同降雨工况条件(10 年、20 年、50 年、100 年一遇)下积石山县域地质灾害危险性评价。结果显示: 100 年一遇极高危险区较 10 年一遇极高危险区的增幅最大为 18.26%, 说明未来区内遭遇极端降雨会显著提高区内地质灾害危险程度。研究认为, 积石山地震地质灾害后效应将增强, 未来崩塌、滑坡发生频次升高, 地质灾害易在降水、冻融条件下形成, 需针对性地采取防控措施, 有效降低其威胁程度。

关键词: 地震; 地质灾害; 发育特征; 危险性评价; 甘肃积石山

中图分类号: P694

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2024)02-0209-11

Development Feature and Risk Assessment of Geological Hazards Caused by the Ms 6.2 Earthquake in Jishishan County, Linxia, Gansu Province

GAO Bo, DONG Ying*, JIA Jun, XUE Qiang, WU Wenyong, LI Lin, WANG Tao, LIU Gang, JIANG Ruijun

(Key Laboratory of Loess Geological Hazards of the Ministry of Natural Resources, Xi'an Center of China Geological Survey, Xi'an 710119, Shaanxi, China)

收稿日期: 2024-01-16; 修回日期: 2024-01-24; 责任编辑: 吕鹏瑞

基金项目: 国家自然科学基金项目“黄土丘陵植被与淤地坝调控重力侵蚀的协同作用机制”(42177346), 中国地质调查局项目“西北黄土高原区地质灾害智能监测预警系统应用示范”(DD20230443), “黄土高原等典型地区地质灾害精细调查与风险管控”(DD20221739)联合资助。

作者简介: 高波(1981-), 男, 高级工程师, 从事地质灾害、工程地质、监测预警与风险评价研究。E-mail: 43617102@qq.com。

*通讯作者: 董英(1981-), 男, 博士, 正高级工程师, 长期从事地质灾害、城市地质及重大工程地质安全风险评价。E-mail: dongy329@163.com。

Abstract: On December 18, 2023 at 23:59, an Ms6.2 earthquake occurred in Jishishan County, Linxia Prefecture, Gansu Province, triggering a large number of landslides and geological disasters, seriously threatening the safety of people's lives and property. This article is based on the results of on-site investigations in earthquake prone areas, conducting research on the development characteristics and risk assessment of geological disasters induced by earthquakes, and proposing suggestions for disaster prevention and reduction measures. According to on-site investigations and statistics, there are 64 new geological hazard points added after this earthquake. There are 63 potential geological hazards that have intensified. The main hidden danger points of newly added and intensified deformation are landslides, followed by landslides; The scale level is mainly small, followed by medium. Landslide geological disasters are mainly concentrated in loess hilly areas, with the main focus on building houses and roads by cutting slopes in steep loess slopes. The weighted information method based on GIS technology was used to evaluate the susceptibility of geological disasters in Jishishan County. The evaluation results showed that the proportions of high susceptibility areas, medium susceptibility areas, low susceptibility areas, and non susceptibility areas were 5.45%, 9.83%, 32.70%, and 52.02%, respectively. The high susceptibility areas were mainly distributed in the mountain ridge area of the loess hilly area in the eastern part of Jishi Mountain. On the basis of regional geological hazard susceptibility assessment, a geological hazard risk assessment of Jishishan County was conducted based on seismic activity faults, seismic motion distribution, and different rainfall conditions (10 year, 20 year, 50 year, 100 year return period). The evaluation results showed that the maximum increase in the 100 year return period extremely dangerous area compared to the 10 year return period extremely dangerous area was 18.26%. In the future, encountering extreme rainfall in the area will significantly increase the risk of geological disasters in the area. Research suggests that the post earthquake effects of geological disasters in Jishishan will be enhanced, and the frequency of landslides and collapses will increase in the future. Geological disasters are prone to form under precipitation and freeze-thaw conditions, and targeted prevention and control measures need to be taken to effectively reduce their threat level.

Keywords: earthquake; geological hazards; developmental feature; risk assessment; Jishishan in Gansu

2023 年 12 月 18 日 23 时 59 分 30 秒, 在甘肃临夏州积石山县(N 35.70°, E 102.79°)发生 Ms6.2 级地震, 震源深度 10 km。截至 12 月 31 日 1 时, 地震已造成甘肃、青海两省 151 人遇难。地震是触发崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害的重要因素之一(丛凯等, 2023; 万飞鹏等, 2023; 王运生等, 2024; 李为乐等, 2024)。2008 年汶川 Ms8.0 级特大地震触发了 56 000 余处地质灾害隐患点(黄润秋等, 2008; 许强等, 2010; Dai et al., 2011; Tang et al., 2011)。2010 年玉树 Ms7.1 级地震触发了约 2000 余处滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害(殷跃平等, 2010)。2012 年云南彝良 Ms5.7 和 Ms5.6 级地震触发了 259 处滑坡, 189 处崩塌灾害(王东坡等, 2013)。2013 年芦山 Ms7.0 级强烈地震诱发了区内 8 个县(区)2 515 处地质灾害隐患点(裴向军等, 2013; 李秀珍等, 2014)。2013 年甘肃岷县漳县 Ms6.6 级, 触发 634 处地质灾害隐患点(殷志强等, 2015)。2022 年四川泸定 Ms6.8 级地震在触发石棉县 565 处地质灾害隐患(铁永波等, 2022; 张宪政等, 2022)。黄润秋等(2008,

2011)系统研究了汶川地震触发地质灾害的发育分布规律, 并提出汶川地震地质灾害后效应将持续 20~25 a, 并以 4~5 a 一个高峰为周期呈震荡式的衰减下降并最终恢复到震前的水平。殷志强等(2015)研究了岷县-漳县 Ms6.6 级地震地质灾害展布特征及主控因素。铁永波等(2022)研究了泸定县 Ms6.8 级地震地质灾害发育规律。徐敏等(2014)通过对石碑源滑坡黄土动三轴试验研究, 探讨了强震作用下石碑源滑坡黄土的动力特性, 从液化的地震强度条件、地层特性、水文地质条件等方面论述了石碑源滑坡的形成机制。杨博等(2020)通过理论分析和数值计算方法研究了石碑源滑坡初始状态、地震动力响应和流滑发展过程, 探讨了该滑坡的形成机制。王兰民等(2023)系统了研究黄土地区历史上 9 次大震和强震所诱发的黄土滑坡, 并提出了黄土地震滑坡的触发类型、特征与成灾机制。周洪福等(2023)归纳了国内外地震滑坡研究现状, 提出了未来地震滑坡应关注的主要研究方向和重点。戴岚欣等(2017)总结了四川九寨沟地震诱

发地质灾害空间分布规律并采用逻辑回归模型,利用地震、地形和地质三大因素对地质灾害易发性进行了快速评价和分区。许强等(2024)通过现场调查和遥感解译分析,确认青海省海东市民和县中川乡金田村和草滩村“砂涌”灾害实为地震触发的典型地震液化型滑坡-泥流,并探讨了其成因机理。

笔者通过积石山县震区地质灾害实地调查,总结了地震地质灾害发育分布特征,开展了县域地质灾害易发性评价,并在其基础上完成了基于不同降雨条件下积石山县域地质灾害危险性评价,并针对评价结果提出了灾后重建及防灾减灾建议。

1 积石山地震概况

据中国地震台网测定,甘肃省临夏州积石山县6.2级地震震中坐标为N 35.70°, E 102.79°,震源深度为10 km。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)。地震最大烈度为Ⅷ度,等震线长轴呈NNW走向,长轴为124 km,短轴为85 km。Ⅵ度区及以上面积为8364 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(中华人民共和国应急管理部, 2023)。

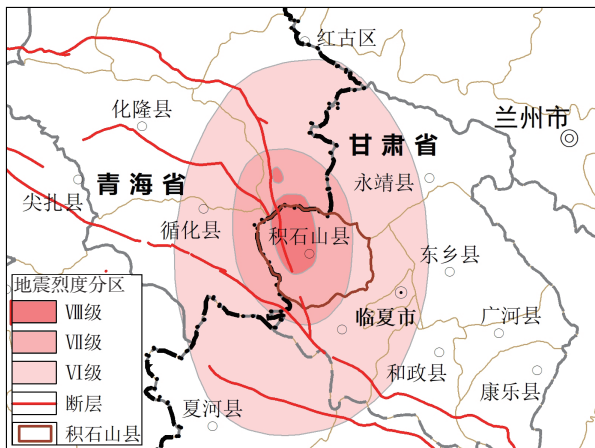


图1 甘肃积石山6.2级地震烈度图(据中华人民共和国应急管理部, 2023修)

Fig. 1 Intensity map of the 6.2 magnitude earthquake in Jishishan, Gansu Province

2 震区地质环境概况

积石山县地处甘东南活动构造区,地处青藏高原

与黄土高原的交汇过渡带,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。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。区内地势由WS向EN方向倾斜逐渐降低,黄河自西向东穿过。区内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。区内地层岩性复杂,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 and 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。区内黄河河谷发育有多级阶地,地势宽阔平坦(图2)。

3 地震地质灾害特征

3.1 震前地质灾害隐患发育特征

根据调查统计,震前积石山县共有地质灾害在册隐患点416处,新增地质灾害隐患点64处(积石山县)。已有地质灾害隐患点中,加剧的地质灾害隐患点有63处(积石山县),未发生明显变形的隐患点有353处。区内地质灾害隐患点主要分布于积石山以东,石塬、柳沟、居集、乱藏一线以东的黄土丘陵及侵蚀-剥蚀低山丘陵地带(图2、图3)。区内黄土大面积覆盖,下覆基岩多为花岗岩和泥岩、砂岩。泥岩、砂岩遇水易软化,力学强度会显著降低,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,导致区内滑坡、崩塌等灾害发生的概率进一步增大。受上述多因素影响,区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危害。

3.2 同震地质灾害隐患发育特征

现场调查发现,此次地震中积石山县域内变形加剧的地质灾害隐患共有63处,按灾害类型划分,崩塌39处,滑坡24处;按规模划分,特大型1处,大型2处,中型10处,小型50处。此次地震新引发的地质灾害隐患共有64处,按灾害类型划分,崩塌51处,滑坡12处、泥石流1条;按规模等级划分,中型5处,小型59处(图4)。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。

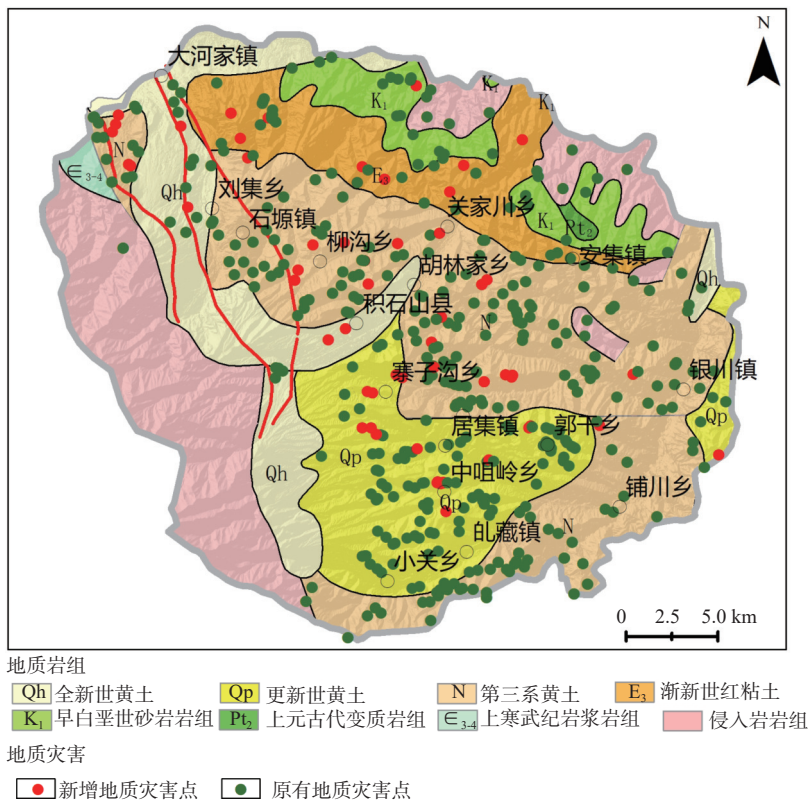


图2 积石山县地质图

Fig. 2 Geological map of Jishishan county

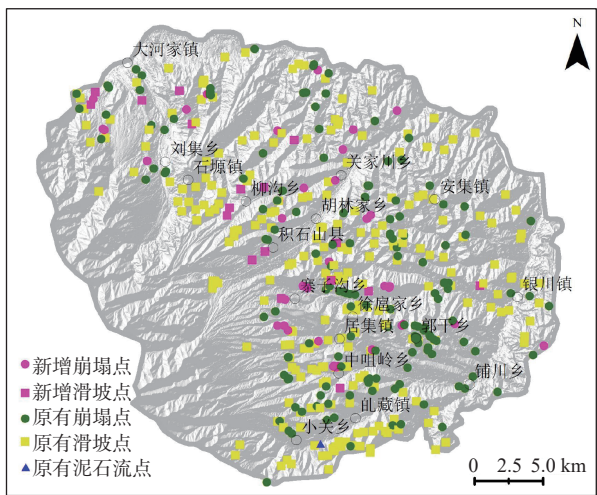


图3 积石山县地质灾害分布图

Fig. 3 Geological hazard distribution map of Jishishan county

根据现场调查,积石山县城内地震地质灾害类型主要为滑坡、崩塌。滑坡主要位于黄土丘陵区切坡地带,地震烈度(VII-VIII)度带内,多发育在黄土梁坡体中上部。由于切坡形成黄土高陡临空面,在地震作用下,因地形放大效应和二元结构斜坡土层放大效应,导致裂隙黄土体发生上拉下剪的失稳破坏,滑带位于黄土层内或黄

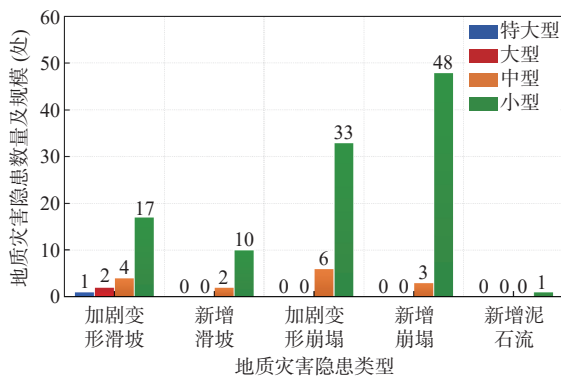


图4 积石山县地震地质灾害规模类型统计图

Fig. 4 Statistical chart of the scale and types of seismic geological hazards in Jishishan county

土与泥岩接触面处,一般规模较小(图 5a、图 5b)。

区内崩塌按岩土体条件主要分为黄土崩塌、岩质崩塌。其中黄土崩塌主要位于黄土丘陵区,地震烈度(VII-VIII)度带内,多发育在建房和公路切坡形成的黄土陡坎部位,在区域分布广泛,坡体结构主要受卸荷作用控制,在地震作用下,斜坡坡肩处沿卸荷裂隙发生变形破坏(图 5c、图 5d)。区内岩质崩塌,主要位于积石山前陡崖区,地处Ⅷ度区外缘地带,主要为岩浆岩高陡斜坡上部碎裂岩体形成的浅表层滚石掉块或碎

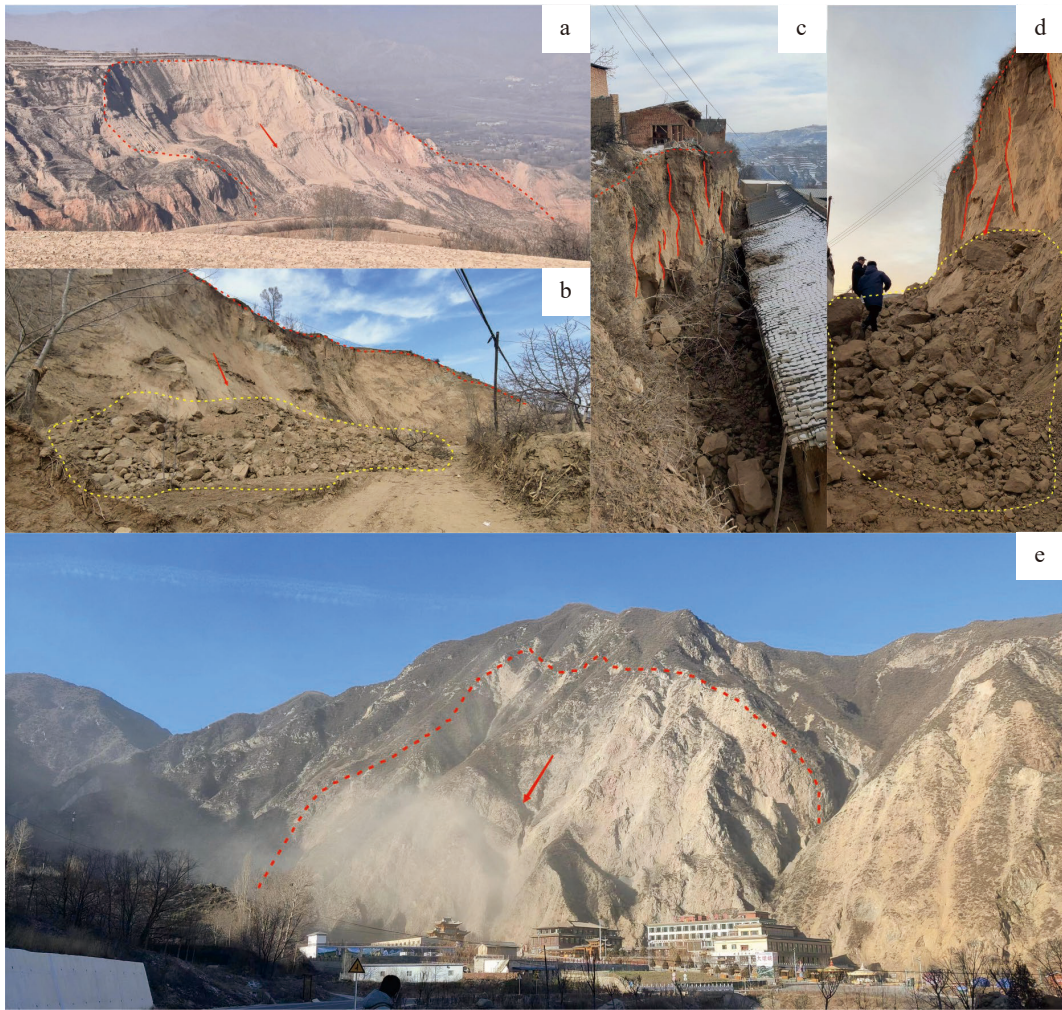


图5 积石山县典型地震崩滑地质灾害

Fig. 5 Typical geological hazards of earthquake collapse and sliding in Jishishan county

屑流, 该类崩塌主要因地震作用下高陡斜坡放大效应, 导致碎裂岩体沿强风化层剪切面或卸荷带发生剪切滑移破坏, 主要威胁坡脚建筑及道路(图5e)

4 地震地质灾害危险性评估

4.1 地质灾害易发性评价

根据积石山县实际情况, 采用8 m×8 m分辨率的栅格单元作为易发性评价的基本单元。易发性评价指标的确定着重从积石山县的孕灾地质环境条件入手, 综合考虑地形地貌、地层岩性、灾点分布、地震动分布等因素(吴常润等, 2020; 贾丽娜等, 2024), 指标主要包括坡度、坡高、坡向、工程地质岩组、灾点分布和地震烈度等6个因素(图6)。

按照比例标度表的标准, 采用专家打分的方法, 两两比较确定因素间的重要性比值, 构建出易发性判

断矩阵。计算各判断矩阵的最大特征根($\lambda_{\max}$)和特征向量, 并进行一致性检验, 计算归一化后的权重(表1)。

由层次分析法计算每一评价因子的权重(冯卫等, 2021), 用信息量法计算各评价因素子类的信息量值(马红娜等, 2023), 按权重将信息量汇总计算出各单元总信息量值(表2)。对各评价因素信息量分布, 按总排序权重叠加即可得到积石山县地质灾害总信息量分布。结合研究区地质环境整体实际状况, 采用自然间断点法找到3个突变点作为分区界线, 将易发性信息量分布粗略的进行分区, 划分为高易发区、中易发区、低易发区和非易发区。在定量分区的基础上, 综合考虑各种因素, 进行人工修正, 得到最终积石山县地质灾害易发性分区图(图7), 分区说明见表3。

4.2 地质灾害危险性评价

积石山县地质灾害危险性评价是在区域易发性

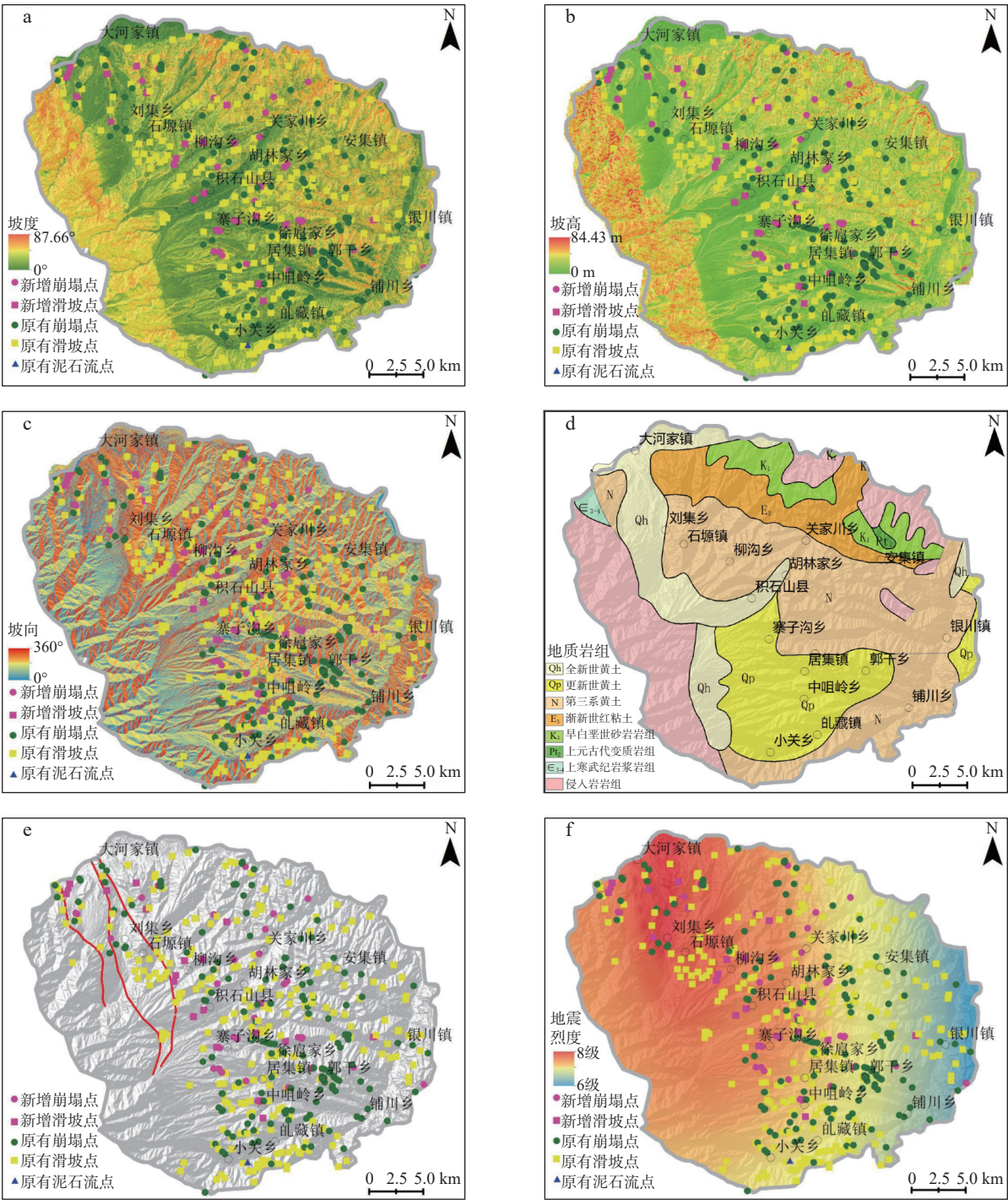


图6 积石山县域地质灾害易发性评价指标图

Fig. 6 Evaluation index map of geological hazard susceptibility in Jishishan County

表 1 易发评价指标权重统计表

Tab. 1 Weight of susceptibility evaluation indicators

权重	坡高	坡向	坡度	工程地质岩组	灾点分布	地震烈度
矩阵法	0.2	0.08	0.19	0.22	0.2	0.11
专家打分法	0.23	0.09	0.18	0.22	0.2	0.08
综合	0.22	0.08	0.19	0.22	0.2	0.09

表 2 各因子图层分类情况及其对应的信息量值统计表

Tab. 2 Classification of each factor layer and its corresponding information value

评价指标图层		评价因素子类						
	分类范围(°)	< 5	5~15	15~25	25~35	35~45	45~55	> 55
坡度	分类值	1	2	3	4	5	6	7
	信息量	0.27	0.13	-0.533	-0.87	-0.25	-0.24	-0.68
	分类范围(°)	0~20	20~40	40~60	> 60			
坡高	分类值	1	2	3	4			
	信息量	0.22	-0.07	-1.14	-1.83			
	分类范围(°)	0~90	90~180	180~270	270~360			
坡向	分类值	1	2	3	4			
	信息量	-1.57	-0.18	0.23	1.10			
	分类范围(°)	土体类	碎屑岩类	岩浆岩类	变质岩类	碳酸盐岩类	混合岩类	
工程地质岩组	分类值	1	2	3	4	5	6	
	信息量	0.67	-0.27	-1.37	-2.30	-1.390	0.340	
	分类范围(m)	0~200	200~500	500~1 000	>1 000			
灾点分布	分类值	1	2	3	4			
	信息量	-10.132	-10.693	-11.180	-11.00			
	分类范围(°)	8	7	6				
地震烈度	分类值	1	2	3				
	信息量	1.690	1.350	1.16				

评价的基础上,结合 10 年一遇、20 年一遇、50 年一遇、100 年一遇的降雨工况开展。地质灾害危险性时间概率分析能解决“一定重现期内地质灾害发生可能性有多大”的问题。文中拟将地灾编录的历史地质灾害发生时间数据作为计算地质灾害危险性时间频率的依据。其经验公式为:

$$\begin{cases} P(N_L) = 1 - e^{-\frac{T}{N}} \\ RI = \frac{T}{N} \end{cases} \quad (1)$$

式中: T 为评价的重现期; t 为研究区内最新历史地质灾害与最老地质灾害的年份之差; N 为评价单元里发生地质灾害的个数。

在危险性叠加诱导因子降雨量的基础上,通过上述经验公式,计算得到 10 年一遇、20 年一遇、50 年一遇和 100 年一遇降雨工况的概率值,最终获取不同降雨条件下积石山县域地质灾害危险性评价图(图 8)。

由图 8 可知,极高危险区主要分布在积石山东部黄土丘陵区山梁地带,影响最为严重的乡镇分别为大河家镇、刘集乡、石塬镇、柳沟乡、胡林家乡、寨子沟乡、徐扈家乡、郭干乡、中咀岭乡、小关乡;高危险区主要分布在积石山东部黄土丘陵区山梁地带,影响积石山县城东部大部分乡镇,主要影响大河家镇、

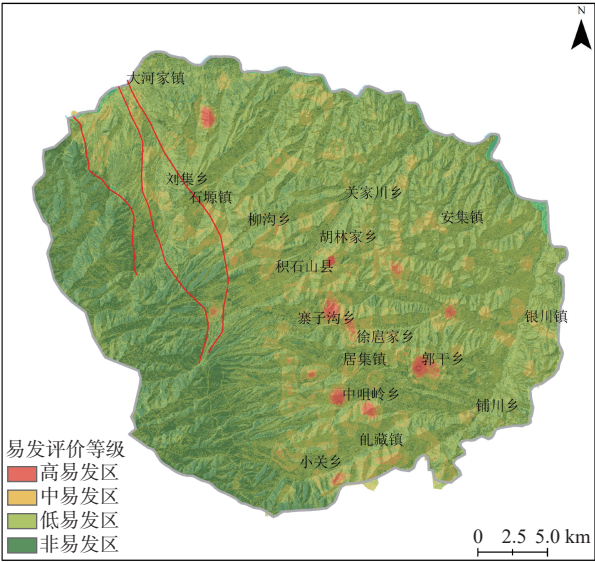


图 7 积石山县域地质灾害易发性评价图

Fig. 7 Assessment map of geological hazard susceptibility in Jishishan County

石塬镇、柳沟乡、关家川、安吉镇、银川镇、铺川乡、乜藏乡、居集镇、郭干乡、中咀岭乡、寨子沟乡、小关乡、徐扈家乡、刘集乡、胡林家乡;中危险区主要分布在积石山东部侵蚀剥蚀低山丘陵、侵蚀堆积河谷平原区;低危险区主要分布在积石山以西高、中侵蚀山地区。

由表 4、图 9 可知,100 年一遇极高危险区较 10

表 3 积石山地质灾害易发性分区说明表

Tab. 3 Explanation table for the susceptibility zoning of geological hazards in Jishi Mountain

易发区划	面积 (km ²)	百分比 (%)	分区说明
高易发区	49.54	5.45	主要分布在积石山东部黄土丘陵区山梁地带, 影响最为严重的乡镇分别为郭干乡、中咀岭乡、寨子沟乡、小关乡、徐扈家乡、刘集乡、胡林家乡
中易发区	89.34	9.83	主要分布在积石山东部黄土丘陵区山梁地带, 影响积石山县域东部大部分乡镇, 主要影响大河家镇、石塬镇、柳沟乡、关家川、安吉镇、银川镇、铺川乡、乱藏乡、居集镇、郭干乡、中咀岭乡、寨子沟乡、小关乡、徐扈家乡、刘集乡、胡林家乡
低易发区	297.24	32.70	主要分布在积石山东部侵蚀剥蚀低山丘陵、侵蚀堆积河谷平原区, 地质灾害发育较少
非易发区	472.88	52.02	主要分布在积石山以西高、中侵蚀山地区, 地质灾害不发育

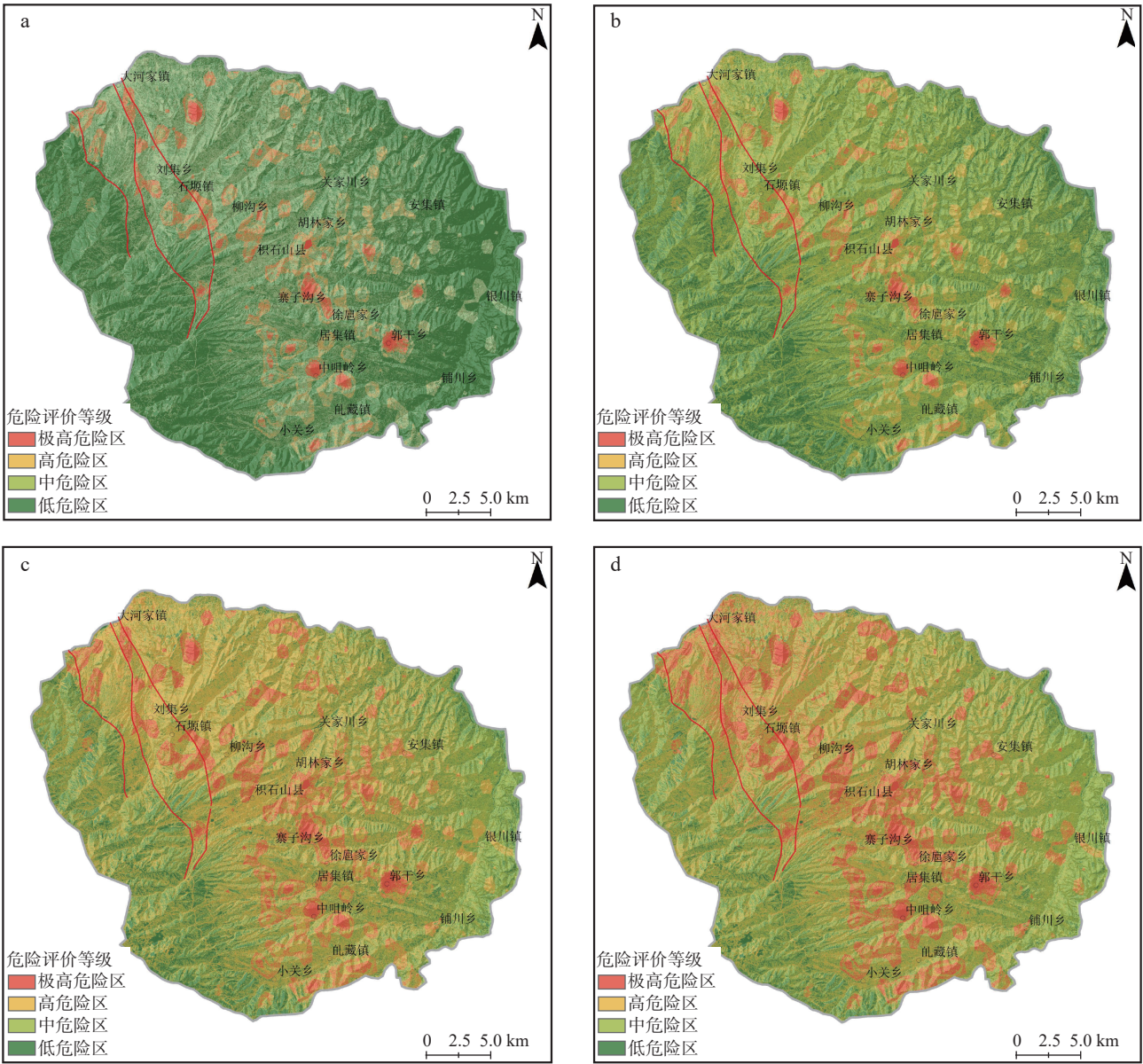


图8 积石山县域地质灾害危险性评价分区图

Fig. 8 Zoning map for geological hazard risk assessment in Jishishan County

表4 积石山地质灾害危险性分区面积及占比统计表

Tab. 4 Statistical table of the area and proportion of geological hazard zoning in Jishi Mountain

分区	10年一遇降雨		20年一遇降雨		50年一遇降雨		百年一遇降雨	
	面积 (km ²)	占比 (%)	面积 (km ²)	占比 (%)	面积 (km ²)	占比 (%)	面积 (km ²)	占比 (%)
极高危险区	42.57	4.68	56.73	6.24	109.45	12.04	208.56	22.94
高危险区	84.08	9.25	98.24	10.80	159.64	17.56	183.56	20.19
中危险区	283.44	31.18	306.89	33.76	349.53	38.45	389.31	42.83
低危险区	498.89	54.89	447.14	49.20	290.38	31.95	127.57	14.04

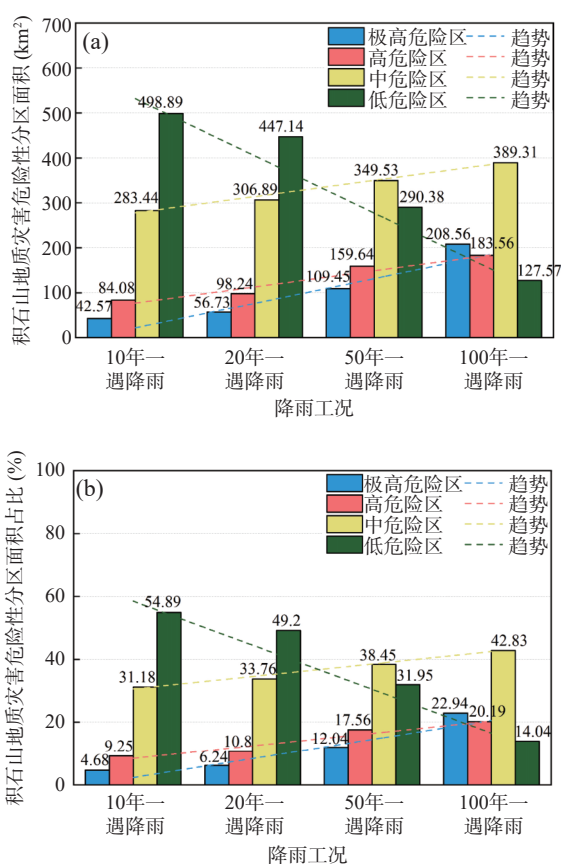


图9 积石山县域地质灾害危险性评价分区面积占比统计图

Fig. 9 Statistical chart of the proportion of geological hazard risk assessment zoning area in Jishishan County

年一遇极高危险区的增幅最大为 18.26%, 高风险区的增幅达到 10.94%; 中风险区增幅为 11.68%, 低风险区增幅为 -40.85%。说明未来区内遭遇极端降雨会显著提高区内地质灾害危险程度, 需高度重视。

5 结论

(1) 积石山县 Ms6.2 级地震诱发加剧了 127 处地

质灾害隐患点, 其中新增 64 处地质灾害, 加剧变形 63 处原有隐患点。新增及加剧变形点多分布在高烈度区, 总体发育程度不强, 规模以小型为主, 主要集中在黄土丘陵区, 以黄土陡坎地带切坡建房、切坡修路为主, 往往呈现出“切滑伴生、小灾大难”的特点, 灾后重建规划需重点关注。

(2) 受地震影响, 区域地质环境条件发生了改变, 需特别关注震后地质灾害后效应。预计未来崩塌、滑坡发生频次升高, 易于在降水、冻融条件下形成。

(3) 积石山县域地质灾害易发性评价结果显示高易发区、中易发区、低易发区、非易发区占比分别为: 5.45%、9.83%、32.70%、52.02%。其中高易发区主要分布在积石山东部黄土丘陵区山梁地带, 影响最为严重的乡镇分别为郭干乡、中咀岭乡、寨子沟乡、小关乡、徐扈家乡、刘集乡、胡林家乡。

(4) 积石山县域地质灾害危险性评价结果显示: 100 年一遇极高危险区较 10 年一遇极高危险区的增幅最大为 18.26%, 高风险区的增幅达到 10.94%; 中风险区增幅为 11.68%, 低风险区增幅为 -40.85%, 说明未来区内遭遇极端降雨会显著提高区内地质灾害危险程度, 汛期地质灾害防控需高度重视。

参考文献(References):

- 丛凯, 马宗源, 李瑞冬. 立节北山滑坡地震稳定性及破坏过程三维有限元分析[J]. 西北地质, 2023, 56(2): 283-291.
- CONG Kai, MA Zongyuan, LI Ruidong. Three-dimensional Analysis of Seismic Stability and Failure Process of Lijie Landslide in Gansu Province, China[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(2): 283-291.
- 戴岚欣, 许强, 范宣梅, 等. 2017 年 8 月 8 日四川九寨沟地震诱发地质灾害空间分布规律及易发性评价初步研究[J]. 工程地质学报, 2017, 25(4): 1151-1164.

- DAI Lanxin, XU Qiang, FAN Xuanmei, et al. A preliminary study on spatial distribution patterns of landslides triggered by Jizuhaigou earthquake in Sichuan on August 8th, 2017 and their susceptibility assessment[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2017, 25(4): 1151–1164.
- 冯卫, 唐亚明, 马红娜, 等. 基于层次分析法的咸阳市多灾种自然灾害综合风险评价[J]. *西北地质*, 2021, 54(2): 282–288.
- FENG Wei, TANG Yaming, MA Hongna, et al. Comprehensive Risk Assessment of Multi-hazard Natural Disasters in Xianyang City Based on AHP[J]. *Northwestern Geology*, 2021, 54(2): 282–288.
- 黄润秋, 李为乐. “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*, 2008, 27(12): 2585–2592.
- HUANG Runqiu, LI Weile. Research on development and distribution rules of geohazards induced by Wenchuan earthquake on 12th May, 2008[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(12): 2585–2592.
- 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.
- 贾丽娜, 陈世昌. 基于 AHP 和 GIS 的舟曲地质灾害易发性评价[J]. *西北地质*, 2024, 57(1): 23–33.
- JIA Lina, CHEN Shichang. Geological Hazard Susceptibility Evaluation Based on AHP and GIS in Zhouqu County, Gansu[J]. *Northwestern Geology*, 2024, 57(1): 23–33.
- 李秀珍, 孔纪名. 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*, 2014, 23(5): 11–18.
- LI Xiuzhen, KONG Jiming. Comparative analysis of development law and characteristics of secondary geo-hazard induced by Lushan and Wenchuan earthquakes[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2014, 23(5): 11–18.
- 李为乐, 许强, 李雨森, 等. 2023 年积石山 Ms6.2 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)*, 2024, 51(1): 33–45+90.
- LI Weile, XU Qiang, LI Yusen, et al. Preliminary Analysis of the Co-seismic Geohazards Induced by the 2023 Jishishan Ms 6.2 Earthquake[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2024, 51(1): 33–45+90.
- 马红娜, 刘江, 冯卫, 等. 地质灾害风险评估在国土空间规划中的应用以陕北榆林高西沟为例[J]. *西北地质*, 2023, 56(3): 223–231.
- MA Hongna, LIU Jiang, FENG Wei, et al. Application of Geological Hazard Risk Assessment in Territorial Space Planning: A Case Study of Gaoxigou Village in Yulin City of Northern Shaanxi Province[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(3): 223–231.
- 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. Characteristics analysis of the “April 20” Lushan earthquake geological disaster[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2013, 40(3): 257–263.
- 铁永波, 张宪政, 卢佳燕, 等. 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*, 2022, 49(6): 1–12.
- TIE Yongbo, ZHANG Xianzheng, LU Jiayan, et al. Characteristics of geological hazards and its mitigations of the Ms 6.8 earthquake in Luding County, Sichuan Province[J]. *Hydrogeology Engineering Geology*, 2022, 49(6): 1–12.
- 万飞鹏, 杨为民, 邱占林, 等. 甘肃岷县纳古呢沟滑坡-泥石流灾害链成灾机制及其演化[J]. *中国地质*, 2023, 50(3): 911–925.
- WAN Feipeng, YANG Weimin, QIU Zhanlin, et al. Disaster mechanism and evolution of Nagune Gully landslide-debris flow disaster chain in Minxian County, Gansu Province[J]. *Geology in China*, 2023, 50(3): 911–925.
- 王东坡, 何思明, 葛胜锦, 等. “9·07”彝良地震诱发次生山地灾害调查及减灾建议[J]. *山地学报*, 2013, 31(1): 101–107.
- WANG Dongpo, HE Siming, GE Shengjin, et al. Mountain Hazards Induced by the Earthquake of Sep 07, 2012 in Yiliang and the Suggestions of Disaster Reduction[J]. *Mountain Research*, 2013, 31(1): 101–107.
- 王兰民, 柴少峰, 薄景山, 等. 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*, 2023, 45(8): 1543–1554.
- WANG Lanmin, CHAI Shaofeng, BO Jingshan, et al. Triggering types, characteristics, and disaster mechanism of seismic loess landslides[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2023, 45(8): 1543–1554.
- 王运生, 赵波, 吉锋, 等. 2023 年甘肃积石山 Ms6.2 级地震震害异常的启示[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2024, 51(1): 1–8.
- WANG Yunsheng, ZHAO Bo, JI Feng, et al. Preliminary insights into hazards triggered by the 2023 Jishishan Ms 6.2 earthquake, Gansu Province[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2024, 51(1): 1–8.
- 吴常润, 赵冬梅, 刘澄静, 等. 基于 GIS 和信息量模型的陇川县滑坡易发性评价[J]. *西北地质*, 2020, 53(2): 308–320.
- WU Changrun, ZHAO Dongmei, LIU Chengjing, et al. Landslide Susceptibility Assessment of Longchuan County Based on GIS and Information Value Model[J]. *Northwestern Geology*, 2020, 53(2): 308–320.
- 许强, 李为乐. 汶川地震诱发大型滑坡分布规律研究[J]. *工程地质学报*, 2010, 18(6): 818–826.
- XU Qiang, LI Weile. Distribution of large-scale landslides induced by the Wenchuan earthquake[J]. *Journal of Engineering Geo-*

- logy, 2010, 18(6): 818–826.
- 许强, 彭大雷, 范宣梅, 等. 甘肃积石山6.2级地震触发青海中川乡液化型滑坡-泥流特征与成因机理[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024: 1–19.
- XU Qiang, PENG Dalei, FAN Xuanmei, et al. Preliminary Study on the Characteristics and Initiation Mechanism of Zhongchuan Town Flowslide Triggered by Jishishan Ms 6.2 Earthquake in Gansu Province[J/OL]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2024: 1–19.
- 徐敏, 裴向军, 张晓超. 强震触发石碑塬滑坡黄土动力特性[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2014, 41(4): 492–498.
- XU Min, PEI Xiangjun, ZHANG Xiaochao. Dynamic characteristics of loess from Ningxia Shibeiyuan landslide triggered by Haiyuan earthquake[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2014, 41(4): 492–498.
- 殷跃平, 张永双, 马寅生, 等. 青海玉树 Ms7.1 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 Yansheng, et al. Research on major characteristic of geohazards induced by the Yushu Ms7.1 earthquake[J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(3): 289–296.
- 殷志强, 徐永强, 陈红旗, 等. 2013年甘肃岷县—漳县 Ms6.6 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 Hongsheng, et al. Study on the distribution characteristics of geohazards and the causative tectonic of the Minxian-Zhangxian Ms6.6 Earthquake on 22 July, 2013, Gansu, China[J]. Quaternary Sciences, 2015, 35(1): 88–99.
- 杨博, 田文通, 孙军杰, 等. 海原大地震诱发石碑塬黄土滑坡机制探讨[J]. 地震工程学报, 2020, 42(5): 1165–1172.
- YANG Bo, TIAN Wentong, SUN Junjie, et al. Mechanism of SHIbeiyuan Loess Landslide Induced by the Haiyuan Earthquake[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(5): 1165–1172.
- 张宪政, 铁永波, 李光辉, 等. 四川泸定 Ms6.8 级地震区湾东河流域泥石流活动性预测[J]. 地质力学学报, 2022, 28(6): 1035–1045.
- ZHANG Xianzheng, TIE Yongbo, LI Guanghui, et al. Characteristics and risk assessment of debris flows in the Wandong catchment after the Ms 6.8 Luding earthquake[J]. Journal of Geomechanics, 2022, 28(6): 1035–1045.
- 中华人民共和国应急管理部. 应急管理部发布甘肃积石山6.2级地震烈度图[OL]. 中华人民共和国应急管理部. 2023-12-22. https://www.mem.gov.cn/xw/yjglbgzdt/202312/t20231222_472849.shtml
- 周洪福, 方甜, 韦玉婷. 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, 2023, 43(3): 615–628.
- ZHOU Hongfu, FANG Tian, WEI Yuting. Research situation and suggestions on earthquake-induced landslides[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2023, 43(3): 615–628.
- Dai F C, Xu C, Yao X, et al. Spatial distribution of land-slide triggered by the 2008 Ms 8.0 Wenchuan earthquake, China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2011, 40: 883–895.
- Tang C, Zhu J, Qi X, et al. Landslides induced by the Wenchuan earthquake and the subsequent strong rainfall event: A case study in the Beichuan area of China[J]. Engineering Geology, 2011, 122: 22–33.