

甘肃礼县至罗家堡断裂带沿线地质灾害 分布规律及断层效应研究

冯 卫^{1,2,3}, 毕银强⁴, 唐亚明^{2,3}, 张乐中^{2,3}, 李政国^{2,3}

(1. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710064; 2. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710054;
3. 西北地质科技创新中心, 陕西 西安 710054; 4. 机械工业勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710043)

摘 要: 甘肃礼县至罗家堡断裂带是西秦岭活动块体内部的一条相对活动断裂, 区内地震活动性强, 地质灾害较发育。通过资料搜集、遥感解译和野外调查, 总结了该断裂带沿线的地质灾害分布规律, 并基于 GIS 技术开展了地震地质灾害断层效应研究。结果表明, 礼县至罗家堡断裂带沿线的地质灾害在历史时间上绝大部分发生在 1654 年罗家堡地震同期及之后至今的时间范围内, 在水平空间上具有区域分布的不均衡性、沿沟谷的成带性和流域的集中性等特点, 在垂直空间上斜坡各部位发育的地质灾害数量相差不大, 但大部分地震滑坡的剪出口位于斜坡中部及上部。区内断层效应作用较明显, 距断裂带越近, 地震地质灾害发育数量和密度越大; 活动断裂的上盘比下盘地震地质灾害分布密度更大; 地震地质灾害的优势主滑方向近似垂直于法阵断裂走向; 越靠近极震区, 地震地质灾害点密度尽管有所增加, 但增加速率明显减小; 随着离极震区越来越近, 地震烈度越来越大, 尽管单位面积发育的地震地质灾害点数有增长缓慢的趋势, 但地震地质灾害面积增长速率却是直线上升的。

关键词: 分布规律; 断层效应; 地质灾害; 礼县至罗家堡断裂带; GIS

中图分类号: P315.2; X43

文献标识码: A

Research on the distribution law of geological disasters and fault effect along the Lixian-Luojiaabu fault zone in Gansu

FENG Wei^{1,2,3}, BI Yinqiang⁴, TANG Yaming^{2,3}, ZHANG Lezhong^{2,3}, LI Zhengguo^{2,3}

(1. School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Xi'an Center of Geological Survey, China Geology Survey, Xi'an 710054, China; 3. Northwest China Center for Geoscience Innovation, Xi'an 710054, China; 4. China JIKAN Research Institute of Engineering Investigations and Design, Co., Ltd., Xi'an 710043, China)

Abstract: Lixian-Luojiaabu fault zone in Gansu is a relatively active fault within the active block of the West Qinling Mountains. The seismic activity in the area is strong and the geological disasters are relatively developed. Through data collection, remote sensing interpretation and field investigation, the distribution law of geological disasters along the fault zone is summarized, and the fault effect of earthquake geological disasters is carried out based on GIS technology. The results show that most of the geological disasters along the Lixian-Luojiaabu fault zone occurred in the time range of the 1654 Luojiaabu earthquake in the same period and since then, and there is an uneven regional distribution in the horizontal space. The characteristics of the zoning along the valley and the concentration

收稿日期: 2020-08-22; 修回日期: 2020-10-09

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(12120114035701, DD20190642, DD20160276)

Supported by: Geological Survey Project of China Geological Survey(12120114035701, DD20190642, DD20160276)

作者简介: 冯 卫(1983-), 男, 高级工程师, 博士研究生, 主要从事地质灾害调查及风险管理研究. E-mail: fengwei0510@qq.com

通讯作者: 唐亚明(1973-), 女, 教授级高工, 博士, 主要从事地质灾害调查及风险管理研究. E-mail: tangyaming73@sohu.com

of the drainage basin, the number of geological disasters developed in each part of the slope in the vertical space is not much different, but most of the shear outlets of seismic landslides are located in the middle and upper parts of the slope. The fault effect in the area is obvious. The closer to the buffer zone, the greater the number and density of earthquake geological disasters. The hanging wall of active faults is more densely distributed than the foot wall of earthquake geological disasters. The dominant sliding direction of earthquake geological disasters is approximately perpendicular to the direction of the normal fault. The closer to the extreme earthquake zone, although the density of earthquake geological disasters increases, the increase rate decreases significantly. It is getting closer to the extreme earthquake zone, and the earthquake intensity is getting bigger and bigger. Although the number of earthquake geological disasters per unit area has a slow growth trend, the growth rate of the area of earthquake geological disasters has risen linearly.

Key words: distribution law; fault effect; geological disaster; lixian-luojiaabu fault zone; GIS

我国是地震频发国家,中国大陆分布有很多的活动断裂带与构造区,无论是板块间还是板块内活动构造都十分强烈,特别是活动断裂带或构造区附近最易于发生破坏性地震^[1]。因此,对活动断裂带沿线的地质灾害分布规律和断层效应开展研究具有较强的现实意义。

近些年来,关于活动断裂沿线的地质灾害分布规律及断层效应研究成为了地震研究的热点之一。国内外学者利用统计方法对地震地质灾害的分布与地震震级、地震烈度、距震中或发震断层距离、坡度、岩石类型的关系进行了深入分析和研究,形成了许多地震诱发地质灾害的统计规律^[2-12]。尤其是黄润秋等^[13]对汶川地震触发地质灾害的断层效应开展了深入分析,张永双等^[14]以汶川地震诱发的大型滑坡为例,系统分析了活动断裂带与大型滑坡之间的关系,许冲等^[15]对汶川地震滑坡的地层岩性、坡度、滑向、高程、所在烈度区、上下盘位置和距发震断裂的距离等7个参数进行了统计分析,他们的研究成果为查明活动断裂带地震地质灾害形成机制和总结地质灾害发育规律起到了明显的指导作用。

礼县至罗家堡断裂带是青藏高原东缘中段的一条重要断裂带,相关学者认为该断裂为1654年罗家堡8级地震的发震断裂^[16-17]。笔者通过资料搜集、遥感解译和野外调查,总结了该断裂带沿线的地质灾害分布规律,并基于GIS技术开展了地震地质灾害断层效应研究,以为类似断裂带沿线确定地质灾害的多发区域提供参考。

1 研究区概况

礼县至罗家堡断裂带平面上主要由3条斜列的次级断裂段组成,总长约150km,走向60°。西段从宕昌东到礼县东,长约90km;中段从礼县南到罗家堡东北,长约40km;东段从天水镇西到平南镇东,长约20km^[17]。本文以该断裂带的核心区(中段区)为研究区,沿线出露的主要地层有泥盆系、石炭系、三叠系、第三系及第四系,礼县至罗家堡断裂带沿线岩土体结构破碎,在地震、降雨等因素作用下,区内滑坡、崩塌等地质灾害较发育。通过资料收集、遥感解译和野外调查,礼县至罗家堡断裂带两侧发育有崩塌、滑坡等地质灾害点702处(区内泥石流发育程度很低,此处不含泥石流),其中地震地质灾害点396处(占总数的56.4%),地质灾害发育密度很大(图1)。

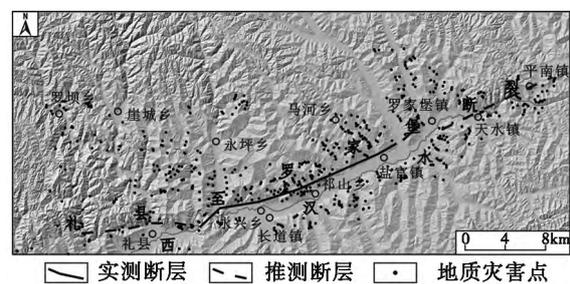


图1 研究区地理位置图

Fig. 1 Geographical location map of the study area

2 地质灾害分布规律

2.1 历史时间分布规律

将研究区地质灾害发生的年代由老到新划分为5期:(I)晚更新世以来的地质灾害(13万年~1万

年);(II)全新世以来的地质灾害(1万年~1654年);(III)罗家堡地震诱发的地质灾害(1654年);(IV)罗家堡地震以来的地质灾害(1654年~2000年);(V)2000年至今的地质灾害。

研究表明,绝大部分地质灾害(占总数的96.3%)发生在罗家堡地震同期及之后至今的时间范围内(由于罗家堡地震发生后研究区内未再次发生破坏性地震,因此该时期之后发生的地质灾害主要为降雨、人工开挖和流水侵蚀所致),而发生在晚更新世和全新世的地质灾害数量很少(仅占总数的3.7%)(图2)。初步分析认为,一是在该地区同时期发生地质灾害的数量确实很少;二是许多古滑坡或老滑坡由于发育在黄土覆盖层内,随着水土侵蚀的加剧而日益消亡,因此年龄越老的滑坡相对数量越少。

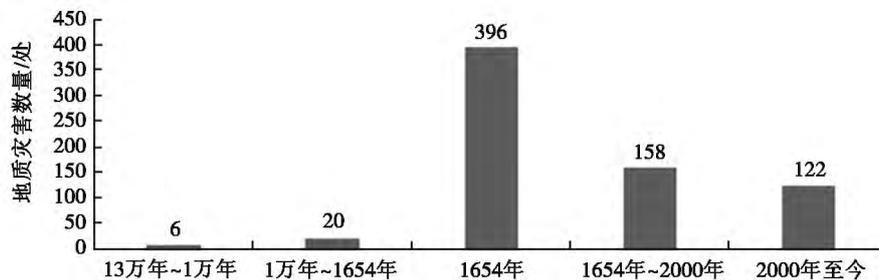


图2 不同期次的地质灾害发育数量对比图

Fig. 2 Comparison graph of the number of geological disasters in different stages

2.2 水平空间分布规律

(1) 区域分布的不均衡性

首先,不同地貌单元地质灾害发育程度不同。从整体上讲,研究区地质灾害主要分布在西汉水和燕子河流域,即中东部黄土梁峁地区,而礼县城区西南部低山丘陵和缓坡丘陵地带地质灾害不发育。其次,同一地貌单元内地质灾害的发育也不均衡,这既包括灾害数量的不均衡也包括灾害类型的均衡。数量方面,在黄土梁峁地带灾害数量自西向东逐渐增加,最终形成大部分地质灾害在研究区东北部集中分布的局面。类型方面,小型崩塌和滑坡集中分布在研究区西部,大中型崩塌和滑坡主要分布于研究区东部,形成了大中型地质灾害在黄土梁峁区东多西少的局面。这与黄土地层厚度和沟谷发育情况有关,研究区东部黄土地层厚度大于西部黄土地层厚度,且东部沟谷发育深度一般为50~150m,西部沟谷深度一般为30~100m,而厚度大的黄土地层和较深的沟壑都有利于较大型地质灾害的发育。此外,东部区域距离罗家堡地震震中更为接近。

(2) 沿沟谷的成带性和流域的集中性

研究区内地质灾害呈现“线一带一片状”的分布特征,具体表现为沿306和208省道及县级公路呈线状密集分布,沿西汉水、燕子河等河流或沟谷以及礼县至罗家堡活动断裂带呈带状分布,沿永兴、城关、祁山、盐官等4个乡镇以及高家村、陆家湾、李集寨、磨石村等村落呈片状分布。

2.3 垂直空间分布规律

以滑坡等地质灾害的剪出口位置为准,将研究区地质灾害发育部位分为斜坡上部、斜坡中部和斜坡下部。虽然各部位发育的地质灾害数量相差不大,但剪出口位置在斜坡中部和上部的地质灾害多由地震诱发,数量共计420处,占总数的60%,剪出口位置处于斜坡下部的地质灾害共计282处,占总数的40%,多为降雨、人工开挖和流水侵蚀所致(图3)。

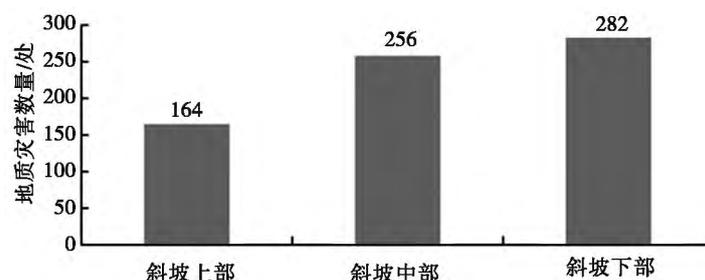


图3 不同发育部位的地质灾害发育数量对比图

Fig. 3 Comparison graph of the number of geological disasters in different development parts

3 断层效应研究

研究区地震地质灾害点共计 396 处(占灾害总数的 56.4%),分布面积较大(占灾害总面积的 84.6%),本节对统计的 396 处地震地质灾害点开展相应的断层效应研究。

3.1 距离效应

地震地质灾害的分布位置与距断裂带远近密切相关(图 4 和图 5),39.1% 的地震地质灾害发育于距断裂带 2.0 km 范围内,28.3% 的地震地质灾害发育于距断裂带 2.0~4.0 km 范围内,13.1% 的地震地质灾害发育于距断裂带 4.0~6.0 km 范围内,5.1% 的地震地质灾害发育于距断裂带 6.0~8.0 km 范围内,4.5% 的地震地质灾害发育于距断裂带 8.0~10.0 km 范围内,9.8% 的地震地质灾害发育于距断裂带 10 km 以外区域。总之,随着距断裂带越来越远,地震地质灾害发育的数量和密度逐渐减小。

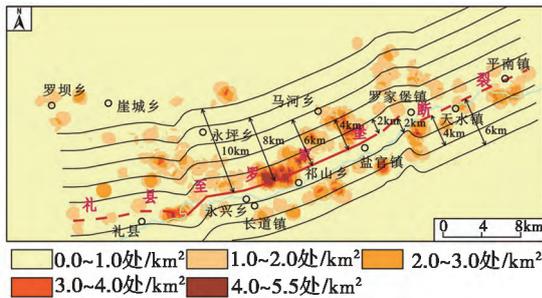


图 4 礼县至罗家堡断裂带两侧缓冲区地震地质灾害点密度分布图

Fig. 4 Distribution map of earthquake geological disaster points in the buffer zone on both sides of the Lixian-Luojiabu fault zone

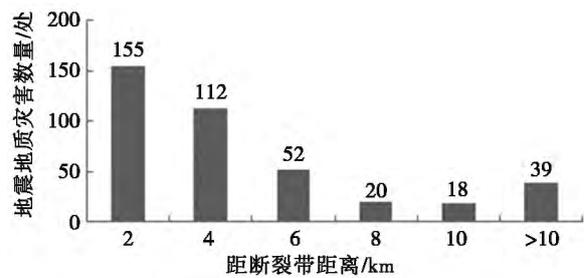


图 5 地震地质灾害发育数量与距断裂带远近的关系对比图

Fig. 5 Comparison graph of relationship between the number of earthquake geological disasters and the distance from the fault zone

3.2 上下盘效应

Abrahamson 等^[18]研究了 1994 年美国加利福尼亚州 Northridge 地震的近场强震记录和其他逆断层型地震的强震记录,首先提出了“上下盘效应”概念,认为断层上盘的加速度峰值普遍高于下盘的加速度峰值。黄润秋等^[19]在研究汶川地震地质灾害的分布规律时发现,不仅发震断层上盘较下盘地质灾害分布密度大,分布范围更广,而且上盘地质灾害的规模也远较下盘大。

对于礼县至罗家堡断裂而言,绝大多数区域的地震地质灾害分布基本符合上述规律,尤其是在永兴乡境内,地质灾害分布规律更为明显,其正断层的上盘(西汉水右岸)比下盘(西汉水左岸)更为发育(图 6)。其上盘灾点密度可达 4.0~5.5 个/km²,而下盘灾点密度最大为 2.0~3.0 个/km²。

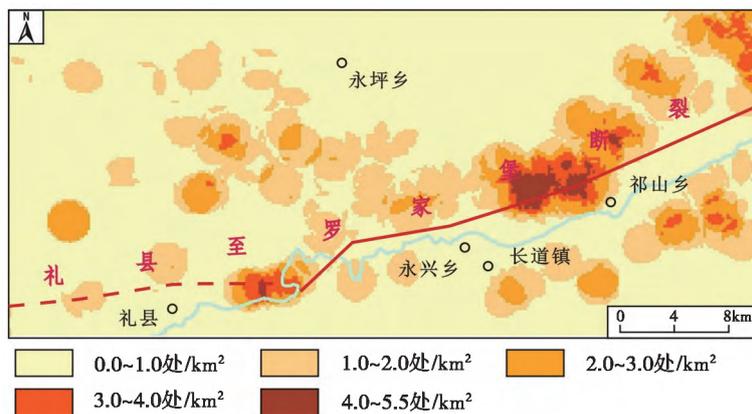


图 6 永兴乡段断裂上下盘地震地质灾害点密度分布图

Fig. 6 Distribution map of earthquake geological disaster points on the upper and lower walls of the Yongxingxiang segment fault (C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

3.3 方向效应

将研究区内滑坡等地震地质灾害的滑动方向按照 45° 进行分带,统计每个滑向区域的滑坡数量与滑坡面积(图7和图8)。结果表明,区内滑坡的优势主滑方向为北西—南东(NW-SE)向 $315^\circ \sim 360^\circ$,近似垂直于发震断裂走向,只有个别滑坡滑动方向接近断裂走向。这表明,在强震作用下,起控制作用的是强震地震波在垂直断裂方向的传播,正是由于地震波在垂直断裂方向具有最大的强度,从而将坡体在这个方向上震裂、滑移,出现一系列中大型滑坡、崩塌。这同时也表明,地震波和地面运动的强度具有显著的方向性,在垂直断裂方向最强。

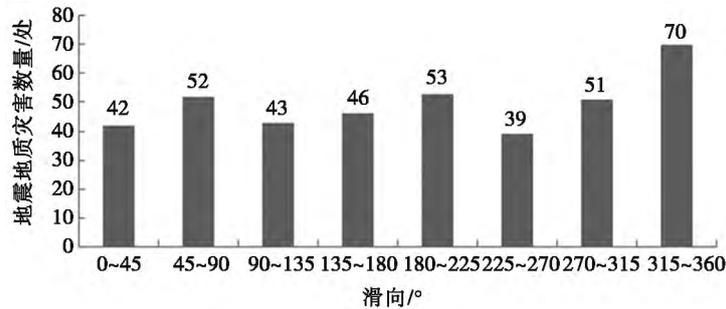


图7 不同滑向的地震滑坡发育数量对比图

Fig. 7 Comparison graph of the number of earthquake landslides in different sliding directions

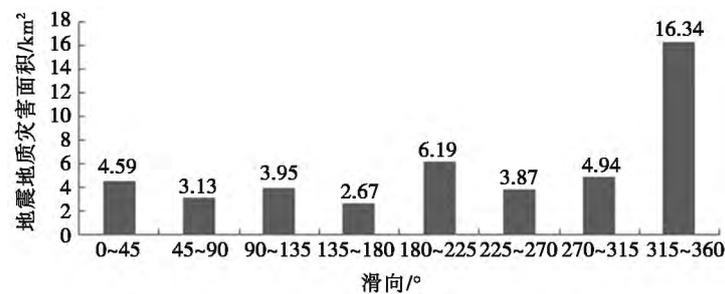


图8 不同滑向的地震滑坡发育面积对比图

Fig. 8 Comparison graph of developed areas of earthquake landslides in different sliding directions

3.4 烈度效应

研究区地处地震活动强烈的南北地震带北段,历史上曾发生过多强震,其中影响最大的地震为1654年罗家堡8级地震,其最大烈度达到XI度。本节围绕地震地质灾害点密度和面密度与地震烈度的关系开展分析。

3.4.1 地震地质灾害点密度与地震烈度关系

将地震地质灾害点与罗家堡8级地震烈度分区图叠加后可以看出,研究区主要位于VIII~XI烈度区内(图9)。从数量上来说,共有83处地震地质灾害点(占总数的21.0%)落在VIII度区,共有174处地震地质灾害点(占总数的43.9%)落在IX度区,共有103处(占总数的26.0%)地震地质灾害点落在X度区,共有36处地质灾害点(占总数的9.1%)落在XI度区(图10)。仅从数量来看,这并不符合地震烈度越大地质灾害发育数量越多的规律。为了进一步分析两者之间关系,本文引入地震地质灾害点密度的概念,即单位面积内地震地质灾害发育的数量,其量纲为处/ km^2 。以地震烈度值为横轴,地震地质灾害点密度为纵轴,得到地震地质灾害点密度随地震烈度变化的关系曲线(图11)。该曲线斜率为正,表明随着地震烈度的增加,相应地震地质灾害点密度逐渐增加,尤其从VIII度区到IX度区,点密度从0.18处/ km^2 增加到0.57处/ km^2 ,增加了3倍有余。但该曲线的递增速率并非直线上升,从IX度区到X度区以及X度区到XI度区,尽管灾点密度持续上升,但上升趋势明显变缓。这表明越靠近极震区,地震地质灾害点密度尽管有所增加,但增加速率明显减小。

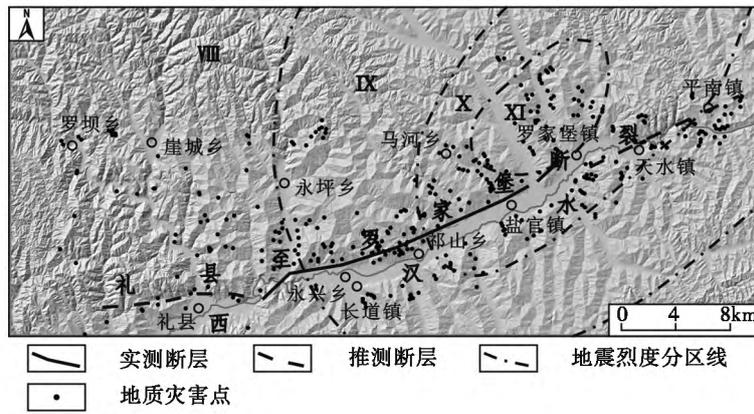


图9 地震地质灾害点与罗家堡8级地震烈度分区关系图

Fig. 9 Map of relationship between the earthquake geological distaster points and the intensity of the Luojiabu $M_s 8$ earthquake

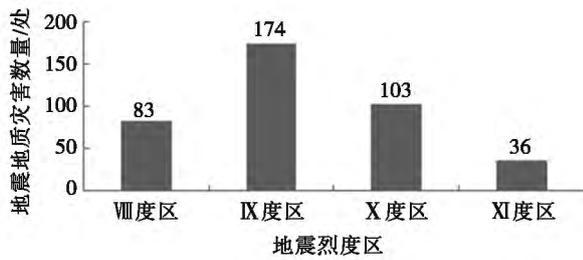


图10 不同地震烈度区内地震地质灾害数量统计图

Fig. 10 Statistical graph of the number of earthquake geological disasters in different earthquake intensity areas

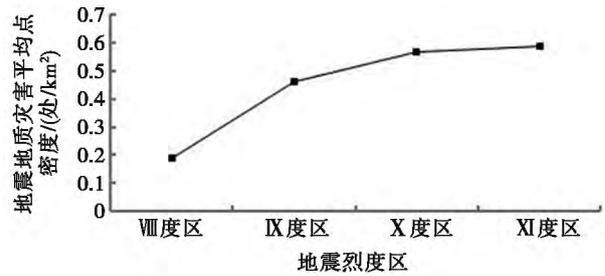


图11 地震地质灾害点密度与地震烈度区关系曲线图

Fig. 11 Graph of relationship between point density of earthquake geological disasters and earthquake intensity area

3.4.2 地震地质灾害面密度与地震烈度关系

将每处地震地质灾害的面积与罗家堡8级地震烈度分区图叠加后可以看出(图12),共有3.15 km²(占总面积的5.4%)落在了VIII度区,共有24.97 km²(占总面积的43.1%)落在了IX度区,共有20.40 km²(占总面积的35.2%)落在了X度区,共有9.42 km²(占总面积的16.3%)落在了XI度区(图13)。仅从面积来看,这并不符合地震烈度越大地震地质灾害发育面积越大的规律。为了进一步分析两者之间关系,本文引入地震地质灾害面密度的概念,即单位面积内地震地质灾害发育的面积,它是一个无量纲的量。以烈度值为横轴,地震地质灾害面密度为纵轴,得到地震地质灾害面密度随地震烈度变化曲线(图14)。该曲线斜率为正,

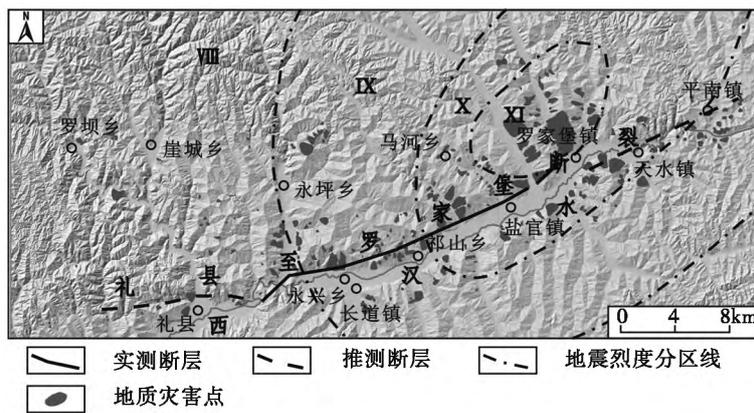


图12 地震地质灾害分布面积与罗家堡8级地震烈度分区关系图

Fig. 12 Map of relationship between the earthquake geological distaster distribution area and the intensity of the Luojiabu $M_s 8$ earthquake

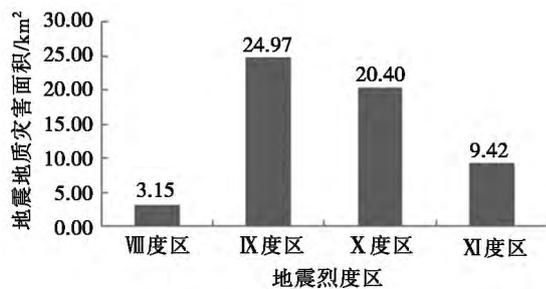


图13 不同地震烈度区内地震地质灾害面积统计图

Fig. 13 Statistical graph of the area of earthquake geological disasters in different earthquake intensity areas

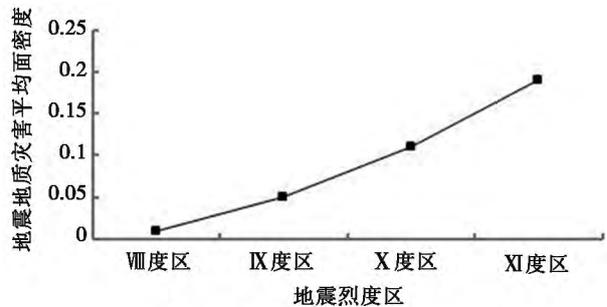


图14 地震地质灾害面密度与地震烈度区关系曲线图

Fig. 14 Graph of the relationship between area density of earthquake geological disasters and earthquake intensity area

但它与图11中的地震地质灾害点密度随地震烈度变化曲线不同,其递增速率是明显上升的,表明随着距离极震区越来越近,地震烈度越来越大,尽管单位面积上发育的地震地质灾害点数有增长缓慢的趋势,但地震地质灾害面积增长速率却是直线上升的。这说明距离震中越近的区域,越易发生大型或特大型滑坡,如海头村特大型滑坡就分布在距罗家堡地震震中1 km范围内。

4 结论

(1) 礼县至罗家堡断裂带沿线的地质灾害在历史时间上绝大部分发生在1654年罗家堡地震同期及之后至今的时间范围内,在水平空间上具有区域分布的不均衡性、沿沟谷的成带性和流域的集中性等特点,在垂直空间上斜坡各部位发育的地质灾害数量相差不大,但大部分地震滑坡的剪出口位于斜坡中部及上部。

(2) 礼县至罗家堡断裂带沿线地震地质灾害发育的断层效应作用较明显,距断裂带越近,地震地质灾害发育数量和密度越大;活动断裂的上盘比下盘地震地质灾害分布密度更大;地震地质灾害的优势主滑方向近似垂直于法阵断裂走向;越靠近极震区,地震地质灾害点密度尽管有所增加,但增加速率明显减小;随着离极震区越来越近,地震烈度越来越大,尽管单位面积发育的地震地质灾害点数有增长缓慢的趋势,但地震地质灾害面积增长速率却是直线上升的。

(3) 研究成果既为深入分析礼县至罗家堡断裂带沿线地质灾害的发育特征、形成机理及预测评价提供了较有价值的信息,也为类似活动断裂沿线地质灾害多发区域的划定提供了参考。

参考文献:

- [1] 王尧. 自然地震与断层带相关性分析研究[D]. 中国地质大学(北京), 2018.
WANG Yao. Analysis of Correlation between Natural Earthquakes and Fault Zones [D]. China University of Geosciences(Beijing), 2018. (in Chinese)
- [2] Keefer D V. Statistical analysis of an earthquake-induced landslide distribution—the 1989 Loma Prieta, California event [J]. Engineering Geology, 2000, 58(3/4): 231–249.
- [3] Jibson R W, Harp E L, Michael J A. A method for producing digital probabilistic seismic landslide hazard maps [J]. Engineering Geology, 2000, 58(3/4): 271–289.
- [4] Chigira Y. Geological and geomorphological characteristics of landslides triggered by the 2004 Mid Niigata prefecture earthquake in Japan [J]. Engineering Geology, 2006, 82: 202–221.
- [5] Kamp U, Growley B J, Khattak G A, et al. GIS-based landslide susceptibility mapping for the 2005 Kashmir earthquake region [J]. Geomorphology, 2008, 101: 631–642.
- [6] 李忠生. 国内外地震滑坡灾害研究综述 [J]. 灾害学, 2003, 18(4): 64–70.
LI Zhongsheng. The state of the art of the research on seismic landslide hazard at home and abroad [J]. Journal of Catastrophology, 2003, 18(4): 64–70. (in Chinese)
- [7] 鲍叶静, 高孟潭, 姜慧. 地震诱发滑坡的概率分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(1): 66–70.
BAO Yejing, GAO Mengtan, JIANG Hui. Probabilistic analysis of earthquake-induced landslides [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(1): 66–70. (in Chinese)
- [8] 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 geohazards triggered by 8.0 Wenchuan Earthquake, Sichuan [J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16 (4): 433-444. (in Chinese)
- [9] 许强, 李为乐. 汶川地震诱发滑坡方向效应研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2010, 42(增1): 7-14.
XU Qiang, LI Weile. Study on the direction effects of landslides triggered by Wenchuan Earthquake [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2010, 42(S1): 7-14. (in Chinese)
- [10] 彭亮, 马兴华, 金家琼, 等. “4.14”玉树地震断裂带对震后地质灾害影响作用分析[J]. 自然灾害学报, 2014, 23(5): 78-83.
PENG Liang, MA Xinghua, JIN Jiaqiong, et al. Analysis of influence of “4.14” Yushu earthquake fault zone on post-earthquake geological disasters [J]. Journal of Natural Disasters, 2014, 23(5): 78-83. (in Chinese)
- [11] 刘亢, 孙柏涛, 李亦纲, 等. 2015年尼泊尔 Ms8.1 地震震害分布与地质构造关系研究[J]. 自然灾害学报, 2019, 28(5): 59-65.
LIU Kang, SUN Baitao, LI Yigang, et al. Study on the relationship between the earthquake damage distribution and geological structure of the 2015 Ms8.1 Nepal earthquake [J]. Journal of Natural Disasters, 2019, 28(5): 59-65. (in Chinese)
- [12] 梁靖, 裴向军, 温勇, 等. 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, 2019, 28(5): 181-188.
LIANG Jing, PEI Xiangjun, WEN Yong, et al. Research on development and distribution rules of geohazards in Jiuzhaigou earthquake in 2017 [J]. Journal of Natural Disasters, 2019, 28(5): 181-188. (in Chinese)
- [13] 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 12nd May, 2008 [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(12): 2585-2592. (in Chinese)
- [14] 张永双, 苏生瑞, 吴树仁, 等. 强震区断裂活动与大型滑坡关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(增2): 3503-3513.
ZHANG Yongshuang, SU Shengrui, WU Shuren, et al. Research on relationship between fault movement and large-scale landslide in intensive earthquake region [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(S2): 3503-3513. (in Chinese)
- [15] 许冲, 戴福初, 肖建章. “5.12”汶川地震诱发滑坡特征参数统计分析[J]. 自然灾害学报, 2011, 20(4): 147-153.
XU Chong, DAI Fuchu, XIAO Jianzhang. Statistical analysis of characteristic parameters of landslides triggered by May 12, 2008 Wenchuan earthquake [J]. Journal of Natural Disasters, 2011, 20(4): 147-153. (in Chinese)
- [16] 韩竹军, 向宏发, 冉勇康. 青藏高原东缘礼县-罗家堡断裂带晚更新世以来的活动性分析[J]. 地震地质, 2001, 23(1): 43-48.
HAN Zhujun, XIANG Hongfa, RAN Yongkang. Activity analysis of Lixian-Luojiaabu fault zone in the east boundary of Tibetan plateau since the late-Pleistocene [J]. Seismology and Geology, 2001, 23(1): 43-48. (in Chinese)
- [17] 杨晓平, 冯希杰, 黄雄南, 等. 礼县-罗家堡断裂晚第四纪活动特征: 兼论1654年礼县8级地震孕震机制[J]. 地球物理学报, 2015, 58(2): 504-519.
YANG Xiaoping, FENG Xijie, HUANG Xiongnan, et al. The late quaternary activity characteristics of the Lixian-Luojiaabu fault: A discussion on the seismogenic mechanism of the Lixian $M_s 8$ earthquake in 1654 [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(2): 504-519. (in Chinese)
- [18] Abrahamson N A, Somerville PG. Effects of the hanging wall and foot wall on ground motions recorded during the Northridge earthquake [J]. Bull-Seism Soc Amer, 1996, 86(1B): S93-S99.
- [19] 黄润秋, 李为乐. 汶川大地震触发地质灾害的断层效应分析[J]. 工程地质学报, 2009, 17(1): 19-28.
HUANG Runqiu, LI Weile. Fault effect analysis of geo-hazard triggered by Wenchuan Earthquake [J]. Journal of Engineering Geology, 2009, 17(1): 19-28. (in Chinese)