引文格式:李伟,杜锦辰,张超,等.融合多源数据研究积石山地震灾害及人口伤亡时空演化[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(2):271-283.DOI:10.13203/j.whugis20240094

Citation: LI Wei, DU Jinchen, ZHANG Chao, et al. Spatiotemporal Evolution of Disaster and Population Casualties in Jishishan Earthquake by Fusing Multi-source Data[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2025, 50(2):271-283.DOI:10.13203/j.whugis20240094

融合多源数据研究积石山地震灾害及人口伤亡时空演化

李 伟[1,2,3] 杜锦辰[1,2,3] 张 超[4] 颉旭康[1,2,3] 张超越[1,2,3]
刘 东[5] 刘美琳[6] 张丽琼[7] 杨建华[8] 闫浩文[1,2,3]

1 兰州交通大学测绘与地理信息学院,甘肃 兰州,730070
2 地理国情监测技术应用国家地方联合工程研究中心,甘肃 兰州,730070
3 甘肃省测绘科学与技术重点实验室,甘肃 兰州,730070
4 中国地震局第一监测中心,天津,300180
5 云南省地震局,云南 昆明,650224
6 甘肃省测绘工程院,甘肃 兰州,730050
7 甘肃省地震局,甘肃 兰州,730000
8 兰州市城市建设设计研究院有限公司,甘肃 兰州,730000

摘 要:2023-12-18甘肃积石山县发生Ms 6.2地震,这是继2022年四川泸定Ms 6.8地震后在青藏高原东缘-东北缘地区发生的又一次强震事件。为研究此次地震灾害信息,利用Sentinel-1卫星升、降轨雷达影像确定同震形变场,结果表明,本次地震具有逆冲特性,为逆冲型地震,其中升、降轨同震形变场沿视线向形变都以抬升为主,分别为7.51 cm和7.91 cm;余震精定位结果显示,本次地震可能发生在一个西北或东南走向的发震断层;同时,分析余震精定位和近场测站时序信号,地震台站(N0028)加速度表明地震造成了持续性的破坏;全球导航卫星系统测站(LXJS)时序指出,地震在北和东方向上分别产生了1.986 cm和1.377 cm的永久位移;银川、大武以及固原连续重力观测台站发现本次地震对积石山区域的断裂活动引起了显著的地表同震重力变化。为确定此次震灾人口伤亡情况,探究此次震灾的"同震重灾"特征,融合多源数据构建震灾人口伤亡时空演化模型,将积石山震例参数作为模型的输入因子,预测得到主震死亡149人,准确率为98.45%。通过余震时序预测余震死亡3人,共计死亡152人,与实报151人相差1人,表明该模型能很好地进行人口伤亡预测。开展山区复杂环境下的积石山地震灾区灾害及人口伤亡时空演化研究,既能为灾后救援和灾后重建提供科学的指导和支持,又能为今后同类型灾害防范和监灾减灾工作提供宝贵的参考信息。

关键词:积石山地震;震灾人口伤亡;时空演化;多源数据
中图分类号:P237 **文献标识码**:A **收稿日期**:2024-03-20
DOI:10.13203/j.whugis20240094 **文章编号**:1671-8860(2025)02-0271-13

Spatiotemporal Evolution of Disaster and Population Casualties in Jishishan Earthquake by Fusing Multi-source Data

LI Wei[1,2,3] *DU Jinchen*[1,2,3] *ZHANG Chao*[4] *XIE Xukang*[1,2,3] *ZHANG Chaoyue*[1,2,3]
LIU Dong[5] *LIU Meilin*[6] *ZHANG Liqiong*[7] *YANG Jianhua*[8] *YAN Haowen*[1,2,3]

1 Faculty of Geomatics, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China
2 National Engineering Research Center of Geospatial Information Technology, Lanzhou 730070, China
3 Key Laboratory of Science and Technology in Surveying & Mapping, Gansu Province, Lanzhou 730070, China
4 The First Monitoring and Application Center, Tianjin 300180, China
5 Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650224, China
6 Surveying and Mapping Engineering Institute of Gansu Province, Lanzhou 730050, China
7 Gansu Earthquake Agency, Lanzhou 730000, China
8 Lanzhou Urban Construction Design & Research Institute Co. Ltd, Lanzhou 730000, China

Abstract: **Objectives**: On December 18, 2023, an Ms 6.2 earthquake occured in Jishishan County, Gansu

基金项目:国家自然科学基金(41930101);中国博士后科学基金(2019M660091XB);甘肃省自然科学基金(23JRRA857,23JRRG0015,21JR7RA317);甘肃省高等学校青年博士支持项目;国家冰川冻土沙漠科学数据中心开放基金(E01Z790201/2021kf07);兰州市人才创新创业资助项目(2022-RC-73);兰州交通大学实验教学改革项目(2024SYJGZD01);甘肃省"青年科技人才托举工程"项目(李伟);中国地震局第一监测中心主任基金重点资助项目(FMC202302);武汉引力与固体潮国家野外科学观测研究站开放基金(WHYWZ202403);甘肃省科技计划(重点研发计划)(24YFFA054);甘肃省教育厅青年博士支持(2024QB-046);兰州交通大学本科教学改革项目(JGY202416);兰州交通大学实验教学改革项目(重点项目)(2024002)。

共同第一作者:李伟,博士,副教授,主要从事地球物理大地测量研究。geosci.wli@lzjtu.edu.cn
杜锦辰,硕士,主要从事地震地质灾害评估研究。11220870@stu.lzjtu.edu.cn
通信作者:张超,硕士,工程师。zhangchao@fmac.ac.cn

Province, China. The purpose of this study was to construct a spatiotemporal evolution model of population casualties in Jishishan by integrating multi-source data, and to estimate the casualties in Jishishan area in the complex environment of Jishishan by combining the spatiotemporal distribution characteristics of Jishi-shan. **Methods**: This study developed a spatiotemporal model for predicting population casualties in earthquake disasters using multi-source data. By integrating the coseismic deformation field obtained from Sentinel-1 satellite's ascending and descending radar images with time series records from various near-field stations (N0028, LXJS, Yinchuan, Dawu, and Guyuan) as well as accurate positioning results of aftershocks, we were able to analyze the spatiotemporal distribution characteristics of the Jishishan area and predict population casualties resulting from the earthquake. **Results**: The results show that the earthquake has the characteristics of thrusting. The deformation of the ascending and descending coseismic deformation fields along the line of sight is mainly uplift, which is 7.51 cm and 7.91 cm respectively. The precise location of aftershocks shows that the earthquake may have occurred on an NW or SE striking fault. At the same time, after analyzing the precise location of the aftershock and the time series signal of the near-field station, the acceleration of the seismic station (N0028) indicates that the earthquake has caused sustained damage. The time series of global navigation satellite system station (LXJS) indicates that the permanent displacement of 1.986 cm and 1.377 cm in the north and east directions is produced by the earthquake. The Yinchuan, Dawu and Guyuan stations have found that the fault activity in the Jishishan region caused significant coseismic gravity variation. To determine the casualties of the earthquake disaster and explore the characteristics of the "coseismic severe disaster". The spatiotemporal evolution model of earthquake casualty is constructed by multi-source data, and the parameters of the Jishishan earthquake case are used as input factors of the model. The predicted result is 149 people died in the main earthquake, and the accuracy is 98.45%. Through the aftershock time series prediction, 3 people died in the aftershock, 152 people died in total, which is 1 person more than the actual 151 people, which shows that the model can predict the population casualties very well. **Conclusions**: It can be found that the study on the spatiotemporal evolution of the population casualties in the Jishishan earthquake disaster area under the complex mountain environment can not only provide scientific guidance and support for post-disaster rescue and reconstruction, but also provide valuable reference information for the prevention, monitoring, and mitigation of similar disasters in the future.

Key words: Jishishan earthquake; earthquake casualties; spatiotemporal evolution; multi-source data

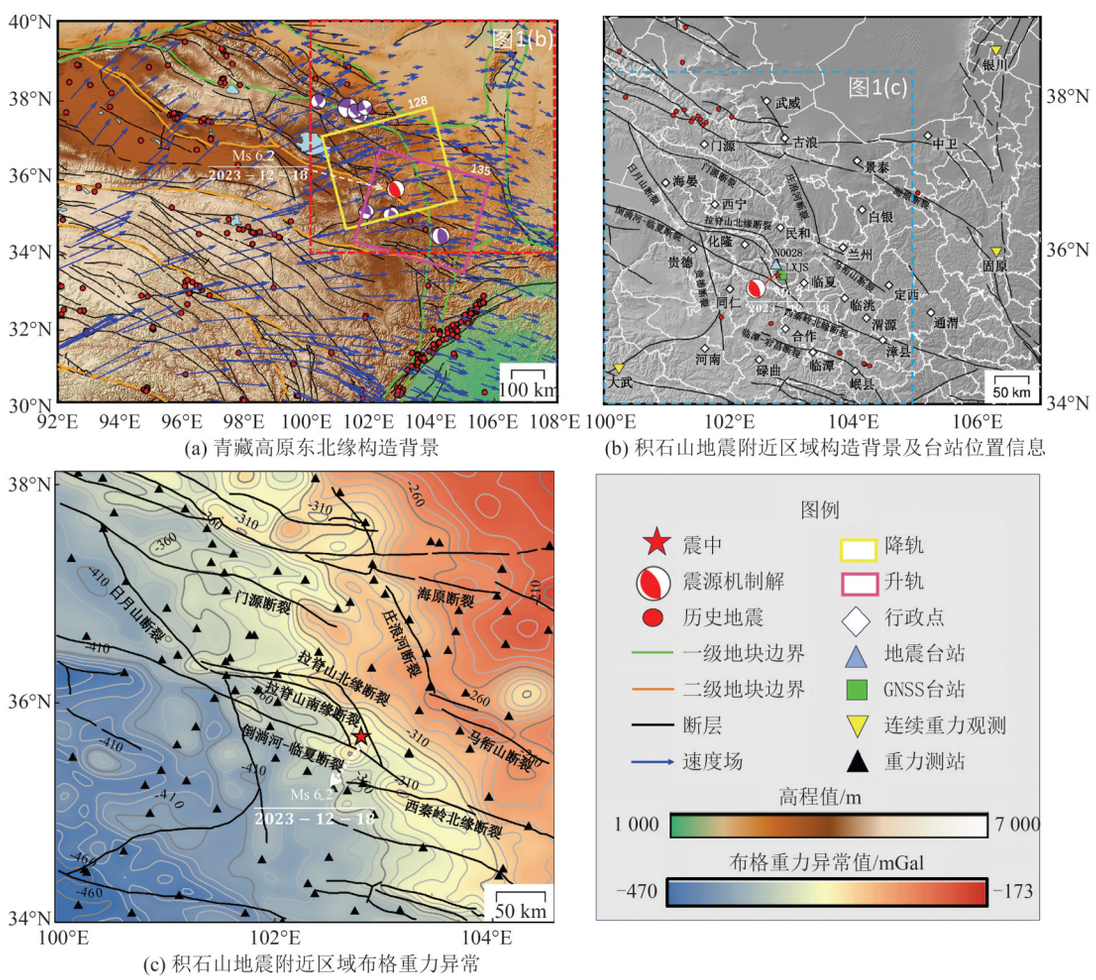
据中国地震台网中心报道,2023-12-18T23:59:30,甘肃省临夏回族自治州积石山县(35.70°N, 102.79°E)发生Ms 6.2地震,震源深度为10 km,最高烈度可达Ⅷ度。截至2023-12-31凌晨1时16分,地震造成青海省海东市34人遇难、198人受伤,超过15万间房屋损毁[1]。由于本次积石山地震为浅源地震,造成地表破坏严重,且震区内土层较厚造成地震动能量放大效应极为明显,导致此次地震影响范围较广[2-4],灾害损失显著高于同震级地震,具有"同震重灾"的特征。据统计,本次人员伤亡数量显著高于2013年岷县Ms 6.6、2017年九寨沟Ms 7.0和2022年泸定Ms 6.9地震[5]。

地震灾害发生时间短、破坏力巨大,导致大量的人员伤亡,因此人员伤亡是评价地震灾害程度的一个关键指标[6]。本文针对积石山震例,融合同震形变、地震台站加速度、高频全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)观测以及重力观测等数据,构建基于人口分布、物理地貌和地震参数等要素的震灾人口伤亡时空演化模型,对积石山震灾人口伤亡进行时空演化并分析,使用并验证模型在震灾人口伤亡评估方面的准确性和可行性,尝试探索各类数据融合方法在该模型中的应用,力求提升震灾人口伤亡评估的时效性和可靠性。本研究可以为区域规划、灾后选址重建、房屋建筑选材等方面的决策和管理提供科学的依据和支持。

1 研究区概况

积石山县位于甘肃省西南部,行政面积为909.97 km^2,地势高低起伏,总体呈西南高、东北

低的特点;辖 17 个乡(镇)、145 个行政村和 7 个社区居委会(图 1(b))。截至 2022 年年末,全县常住人口为 23.89 万人,其中城镇人口为 5.51 万人、乡村人口为 18.38 万人,占全县常住人口的比重为 76.94%。如图 1(a)所示,积石山地震震源区域断裂分布复杂,地震发生在甘肃省和青海省的交界处、青藏高原的东北缘,这一地区在历史上曾经发生过超过 20 次 5.0 级以上的破坏性地震,而该研究区内发育了拉脊山断裂、倒淌河-临夏断裂、西秦岭北缘断裂等,其中拉脊山断裂为贯穿积石山县的主要断裂,呈现典型的逆冲构造特征。全球定位系统速度场研究结果表明[7],青藏高原东北部的运动特征为 NE 向的侧向挤压和地壳缩短,属于地震孕育敏感部位,本次地震的成因可能是受到了青藏高原 NE 向扩展的挤压作用[7-9]。由于震源区断层结构复杂,且缺少精细的活动断层基础调查工作,因此本文利用中国地震局第二形变监测中心提供的地面重力数据,结合 ICGEM(international centre for global earth models)重力场数据解算了该区域布格重力异常(图 1(c)),刻画积石山区域构造特性。可以看出,区域布格重力异常与区域构造密切相关,沿门源断裂、拉脊山断裂、西秦岭北缘断裂、马衔山断裂海原断裂等形成多个重力变化梯度带,反映出该区域断裂活动存在显著的地表重力变化[10]。积石山处重力异常值变化较为平缓,显示积石山主断裂带在震中区域连续展布,并未出现明显阶区,且区域应力较易聚集[11],是典型的孕震构造区域。



(a) 青藏高原东北缘构造背景　(b) 积石山地震附近区域构造背景及台站位置信息

(c) 积石山地震附近区域布格重力异常

注:(a)图中紫色沙滩球为历史地震震源机制解;(a)图和(b)图中红色沙滩球为本次地震震源机制解;震源机制解结果均来自美国地质调查局(http://www.usgs.gov)。

图 1　研究区构造简图

Fig. 1　Structural Sketch of the Study Area

2　研究数据与方法

2023 年积石山 Ms 6.2 地震是自地震记录以来,在拉脊山断裂带附近发生的最大地震,因此提取此次地震的同震形变场对深入理解区域震灾危害及人口空间演化过程具有重要意义。为确定积石山地震灾害和人口伤亡情况,本文基于 Sentinel-1 卫星升、降轨雷达影像同震形变、余震

精定位和近场测站时序信号,确定此次地震同震形变场和人口伤亡时空演化过程。本文提出一种结合粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)、双向长短时记忆网络(bidirectional long short-term memory, BiLSTM)以及注意力机制(attention)的神经网络模型(PSO-BiLSTM-Attention),力争快速高效地预测此次积石山地震伤亡人数。

2.1 形变场确定

基于ENVI 5.6与SARscape 5.6.2,本文利用哨兵(Sentinel)1A卫星的升、降轨影像数据获取了2023年积石山地震的同震形变场。使用的Sentinel-1雷达卫星参数见表1,通过二轨法获取了此次地震的升、降轨同震视线向(line of sight, LOS)形变。

表1 哨兵一号雷达卫星参数

Table 1 Parameters of the Sentinel-1 Radar Satellite

轨道方向	轨道号	时间	时间基线/d	幅宽/km	极化方式	数据模式	空间分辨率
升轨	128	2023-10-27 2023-12-26	60	250	VV	IW	5 m×20 m
降轨	135	2023-12-14 2023-12-26	12	250	VV	IW	5 m×20 m

注:VV:垂直-垂直极化;IW(interferometric wide swath):干涉宽幅。

2.2 多源观测时序

强震引发的余震在主震发生之后密集发生,并随着时间的推移余震发生频次逐渐降低,且小震级余震数量较多而大地震余震数量较少。相比合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)等基于地表信息的研究,通过余震序列能够提供深部的信息,余震的时空分布特征也可以对后续地震的分析研判以及震后人员伤亡时空演化提供重要参考价值。双差定位法利用相邻地震事件到同一台站的走时差数据进行定位,从而能够有效地消除震源区外共同传播路径上速度结构的影响,即对初始速度模型有较小的依赖性,因此能够获取更精确的相对震源位置。通过波形互相关技术构建精准的走时差数据,使走时差数据满足每次地震事件中对至少6个互相关系数大于0.7,然后采用双差定位方法对地震序列进行重定位[12]。除主震外,获取到424个余震的精定位结果,时间跨度约4 d,即96 h。

为了分析同震地质灾害的时间演化规律,本文从N0028地震台站(距震中13.6 km)获取了震时东(E)、北(N)、垂直(U)3个方向的加速度波形数据[13-16],通过GNSS监测站LXJS测站(距震中5 km)收集了震时E、N、U 3个方向的同震形变位移序列[17],同时还采用了银川(距震中439 km)、大武(距震中269 km)和固原(距震中318 km)3个重力观测站台的连续重力观测序列,基于模态分解方法对非平稳、非线性信号进行自适应的分解,以此识别并提取同震响应信息。台站位置信息如图1(b)所示。

2.3 人口伤亡模型构建

根据地震伤亡人数数据呈现出的非线性、高维化等特点,本文构建的PSO-BiLSTM-Attention模型原理如图2所示。

对于地震伤亡预测类的非线性预测问题,本文获取了1949—2021年的历史地震数据并进行空缺值补充,将该期间历史地震样本分别作为训练样本与测试样本。选取7个地震发生时影响伤亡人数较大的参数作为PSO-BiLSTM-Attention预测模型的输入因子,分别是地震时间、地震震级、震源深度、震中烈度、抗震防设等级、人口密度以及伤亡人数[17]。其中对地震时间做如下处理:将6时至13时、13时至21时、21时至次日6时划分为3个时间间隔,分别赋值为1、2、3进行输入[18];同时由于地震的不连续性、强弱差异性,伤亡人数数量存有较大差异,因此在归一化时单独处理后再进行输入,减少对模型预测造成的影响。

模型以4∶1的比例分配训练集与测试集进行模型训练,如图3(a)、3(b)所示,预测结果整体趋势较为平稳,但有部分峰值较大的结果出现,原因是输入样本中含有地震破坏较大、伤亡人口较多的震例,导致输出人口伤亡预测量有一个急增的趋势,不影响模型准确性。测试集与训练集预测结果R^2分别为0.963 87和0.989 80;均方根误差(root mean square error, RMSE)分别为0.830 86和0.583 54;平均绝对误差(mean absolute error, MAE)分别为0.559 77和0.337 42,模型训练效果较好,将本次积石山地震的相关因子输入训练后的PSO-BiLSTM-Attention模型中进行预测,得到积石山地震预估死亡人数为148.673人,约149人,实际值为151人,准确率为98.45%,偏差率为−1.54%。

为验证模型准确性,本文选取尼泊尔地震、唐

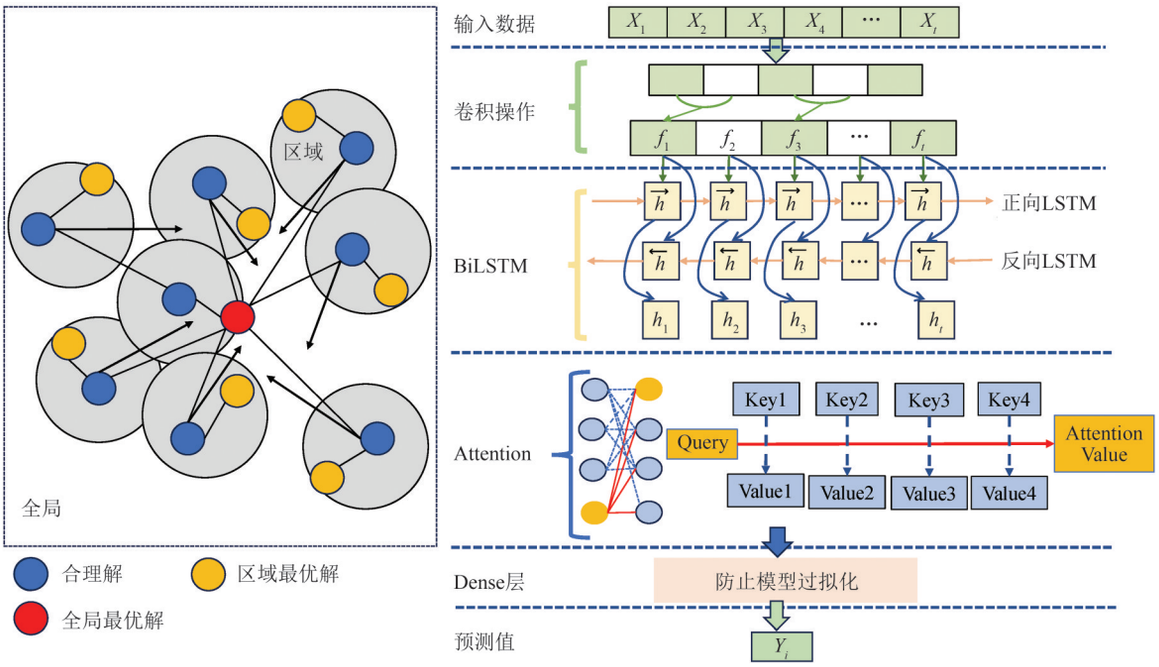
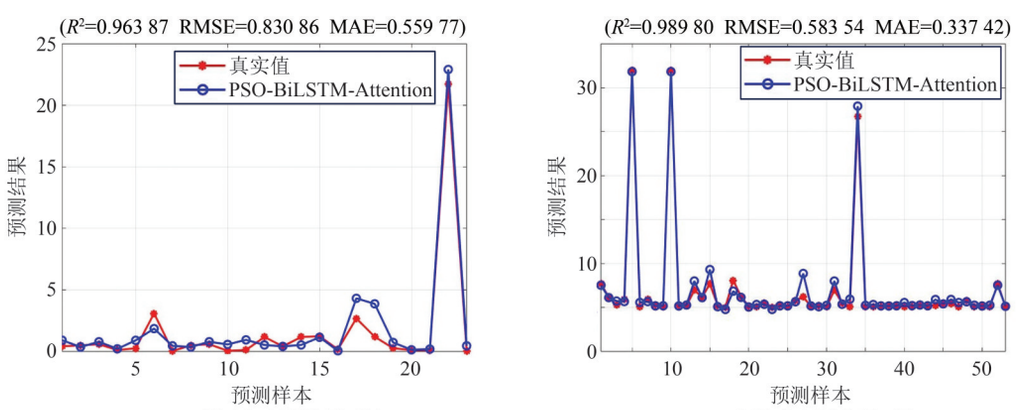


图 2　PSO-BiLSTM-Attention模型原理图

Fig. 2　Schematic Diagram of PSO-BiLSTM-Attention Model



(a) 测试集预测结果对比　　(b) 训练集预测结果对比

图 3　本文模型预测结果

Fig. 3　Prediction Results of the PSO-BiLSTM-Attention Model

山地震、邢台地震、炉霍地震和汶川地震为验证集。由表 2 可知,偏差分布在－6.10%～4.21%,平均偏差为－1.405%,说明该模型能够很好地估计灾后死亡人数,可以用于灾后的死亡人口评估。另外,获取本次积石山地震附近村庄的人口密度及抗震防设烈度等信息,对石塬乡、峡口村、官亭镇、关家川乡、刘集乡、柳沟乡、前岭村、吹麻滩镇和中咀岭乡的参数分别输入模型,得到震中周边村庄人口伤亡预测结果如表 3 所示。

表 2　震例验证集结果

Table 2　Model Validation Set Results

震例	输出结果/人	实际值/人	偏差值/人	偏差率/%
M 8.1 尼泊尔地震	8 250.005	8 786	－535.995	－6.10
M 7.8 唐山地震	240 842.687	242 000	－1 157.31	－0.48
M 7.2 邢台地震	7 982.808	8 064	－81.192	－1.01
M 7.6 炉霍地震	15 073.029	15 621	－547.971	－3.51
M 8.0 汶川地震	72 139.598	69 227	2 912.598	4.21
Ms 6.2 积石山地震	148.673	151	－2.327	－1.54

3　结果分析

3.1　同震地表形变描述

在生成同震形变场输入参数时,升、降轨的飞行方位角与雷达入射角分别为－12.9°、39.7°和－167.0°、39.7°。由图 4 可以看出,升轨和降轨的同震形变场均呈现出一个耳垂状,形变趋势与拉脊山断裂走向基本平行。结果表明,本次地震引

表3 震中周边村庄人口伤亡预测/人

Table 3 Population Casualty Projections in Villages Around the Epicenter/Person

统计项	石堰乡	峡口村	官亭镇	关家川乡	刘集乡	柳沟乡	前岭村	吹麻滩镇	中咀岭乡
受伤人数	8	4	18	14	30	27	17	29	4
死亡人数	7	4	17	12	7	9	6	7	4

起了明显的地表同震位移,升、降轨同震形变场均以抬升形变为主,没有观测到清晰明显的地表沉降信息[19]。根据升轨影像得到的同震形变场沿LOS向最大抬升值约7.51 cm,最大沉降值为5.11 cm;降轨影像得到的同震形变场沿LOS向最大抬升值约为7.91 cm,最大沉降值约为6.71 cm[20]。这些形变特征反映了本次地震具有逆断层特征,推测发生在一条NNW走向的东倾逆冲盲断层[21-22]。

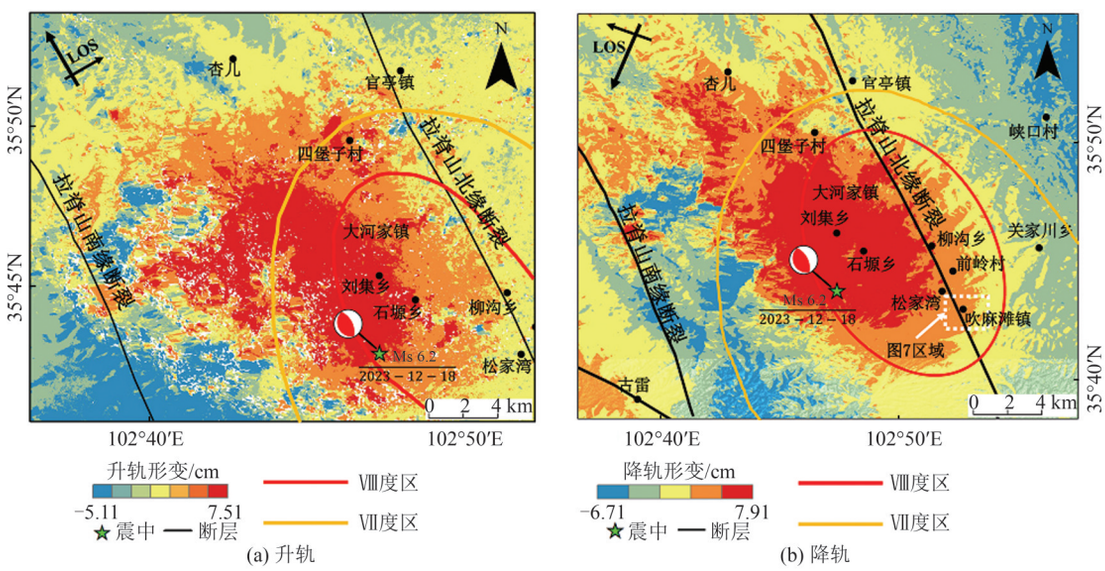


图4 积石山地震同震形变场

Fig. 4 Coseismic Deformation Field of the Jishishan Earthquake

3.2 多源时序分析

余震序列大部分集中在主震西侧,呈NW向延展,而北侧余震相对较少,呈NNW向延展。图5结果显示,震后4天内共发生8次Ms>4.0余震,1月19日6次,1月20日与1月21日分别一次;发生16次3.0<Ms<4.0余震,1月19日12次,1月20日1次,1月21日2次,1月22日1次,均分布于主震北段。余震深度主要集中在6~21 km断层下盘,且产生聚促现象,而发震断层位于拉脊山南缘断裂的隐伏断裂,逆冲挤压并兼具左旋走滑型[13]。结合震中北西侧地震台站(N0028)[23]和高频GNSS监测站(LXJS)[17,24]记录(图1(b))可知,此次地震的震源破裂过程应该是由SE向NW方向扩展的[13]。如图5中的红色箭头分布所示,余震的时空演化过程也正好在SE向NW方向上。

分析图6中的近场测站时序信号,积石山地震发生时,地震台站(N0028)观测到的加速度波动不明显,P波到达后N、E、U 3方向上加速度开始出现显著的同震波动,持续12 s后达到峰值,分别达到−0.73 m/s²、0.76 m/s²和0.79 m/s²,而后逐渐趋于稳定,约40 s无明显波动,但加速度信号在震后趋于稳定后仍显著高于震前,说明本次地震产生了持续性的破坏[25-26]。据计算,该站最高仪器烈度为9.5度[27],且由于震源深度较浅,地震能量主要在浅层释放,与同样大小地震相比,在近场会产生强烈震感。同时,GNSS测站(LXJS)在地震发生后产生了显著的变形,在N方向上产生44 mm的波动,于震后25 s和26 s处达到峰值,分别为−31.85 mm和11.99 mm,且产生了1.986 cm的永久位移;在E方向上产生了33 mm的波动,于震后8 s和24 s处达到峰值,分别为−9.70 mm和23.47 mm,产生1.377 cm的永久位移;而U方向上在震前10 s已经开始出现明显波动,在震后1 s和13 s处达到峰值,分别为−23.38 mm和23.86 mm,共产生了47 mm的波动,即形成了0.048 cm的不显著形变[17]。根据银川、固原、大武3个连续重力观测台站重力时序的结果显示,P波到达后,重力值开始产生连续的显著波动,说明本次地震对积石山区域的断裂活动引起了显著的地表同震重力变化。

3.3 人口伤亡时间演化描述

积石山地震震源机制解表明[28],此次地震为

逆冲型破裂和主震-余震型地震,余震衰减基本正常。本文通过对424个余震精定位的记录进行处理,以4 h为间隔进行时间切片,切分为24组,并对每组切片的余震走向趋势进行拟合。如图5所

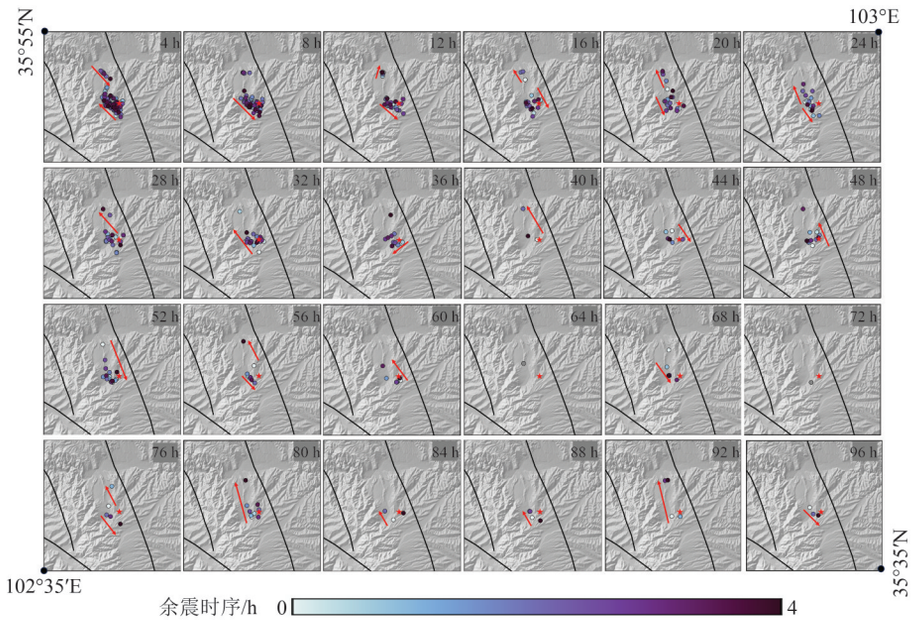


图 5　余震时空演化过程

Fig. 5　Spatiotemporal Evolution Process of Aftershocks

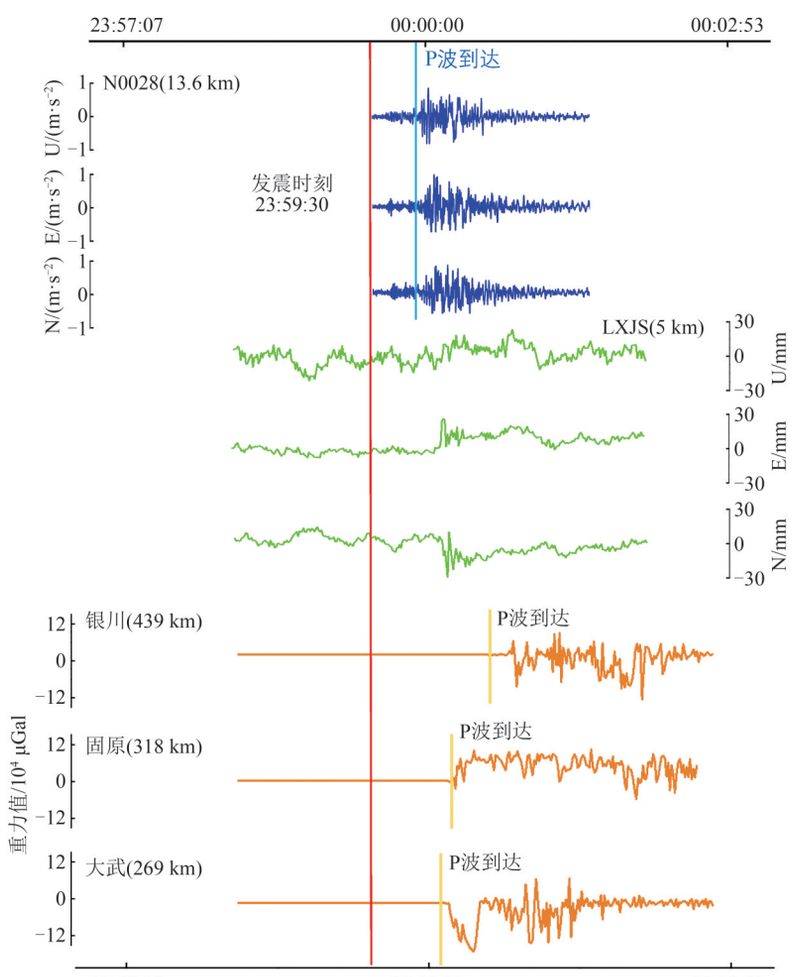


图 6　近场测站时序信号记录

Fig. 6　Timing Signal Recording at the Near-Field Station

示,该地震的余震分布总体呈北西偏北、东南偏南向的线性走向(红色箭头趋势),总体趋势与拉脊山断裂走向平行,正好印证了§2.3.2的假设,地震发生在西北走向或东南走向的发震断层。为了进一步完善本次地震人口伤亡的准确度,本文对424次余震结果也进行人员伤亡的预测。

据已有成果表明,伤亡人数随时间变化具有一定的规律性[29-34]。从图7中可以看出,死亡人数基本在0~10人的范围内波动,其中出现超过10的较大值是由于余震期间出现8次Ms>4.0的地震、16次3.0<Ms<4.0的地震。对余震的人员伤亡预测结果表明(表4),积石山余震期间平均伤亡3.375人,约3人。结合§2.2实验结果中积石山主震的149人,即本次主震-余震共死亡152人,与真实死亡人数151人仅差1人,说明在对地震人口伤亡预测时不能只靠震时的瞬时参数,还应结合人口分布、物理地貌、地震参数等要素来完善时空演化模型。因此,对积石山震灾人口时空演化过程进行分析,也验证了该模型在震灾人口伤亡评估方面的可行性。

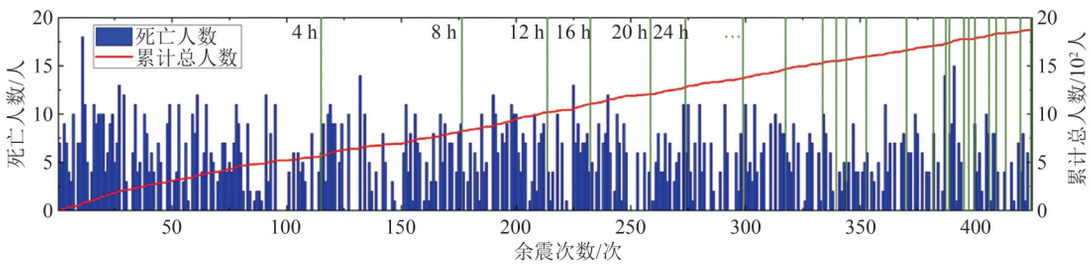


图7 余震序列死亡人数预估

Fig. 7 Predicted Aftershock Sequence Deaths Numbe

表4 余震序列的死亡人数预测

Table 4 Death Toll Projections for Aftershock Sequences

时间/h	样本数/个	有效值/人	平均值/人	时间/h	样本数/个	有效值/人	平均值/人
4	115	579	5	52	17	65	3
8	63	270	4	56	9	39	4
12	34	196	5	60	7	29	4
16	22	98	4	64	1	0	0
20	23	95	4	68	6	45	7
24	16	73	4	72	1	0	0
28	23	89	3	76	5	9	1
32	22	115	5	80	9	49	5
36	14	55	3	84	3	4	1
40	3	20	6	88	4	9	2
44	6	12	2	92	5	21	4
48	13	48	3	96	3	7	2

4 讨 论

4.1 震灾严重性

§3.1拟合了本次地震烈度区域,地震烈度分布区等震线长轴呈北西向线性走向,涵盖了吹麻滩镇、大河家镇、刘集乡、石塬乡、柳沟乡等村镇。由图4(b)可以看出,本次地震的升、降轨同震形变场均以抬升形变为主,集中在震中附近,没有观测到明显的地表沉降,表明此次积石山地震可能为逆冲型地震。距震中较近的刘集乡、石塬乡、柳沟乡和吹麻滩镇建筑物存在不同程度损毁。经调查发现,损失严重的主要原因为震区居民房屋相对集中、房屋抗震性能差、黄土区场地震源浅以及叠加松散覆盖层产生的地震波放大效应等。据统计,甘肃积石山地震Ⅷ度区域面积为331 km^2,Ⅶ度区域面积为1 514 km^2,Ⅵ度区域为6 519 km^2。一部分主要包含甘肃省临夏回族自治州积石山县柳沟乡、中川乡等,震感强烈,强震动使得房屋大量倒塌[5],受损严重;另一部分主要为青海民和县甘沟乡西南侧,主要灾害形成了“地震-液化-滑坡-泥流”地质灾害链,房屋开裂或倒塌,受灾严重[3,5,24]。从空间特征上看,积石山地震Ⅵ度以上影响范围内地质灾害主要沿水系呈线状分布,受灾范围较广,面积约8 364 km^2,受灾程度严重[27]。

地震发生时,建筑物崩塌损毁是导致人员伤亡最主要的因素之一[35]。本研究根据陈晋等[36]总结的各类建筑物遥感影像解译标志对本次地震获取的遥感影像进行解译(表5),结合在线地图与已发表成果相对照,主要将建筑物结构类型分为框架结构、砖混结构以及土木结构3部分。图8中所示区域为积石山县吹麻滩镇,处于本次地震Ⅷ度区,通过使用ArcGIS叠加同震形变场发现该区域形变以抬升为主,抬升范围在1.9~

3.7 cm。吹麻滩镇中心区域以砖混结构为主(图8中蓝色圈定区域),承重构件主要为砌筑类砖墙,整体抗震性能中等,不会出现大量人口伤亡;镇域周边区域多为农村,以土木结构为主(图8中粉色圈定区域),主要以夯土墙或土坯墙为受灾承载体,抗震条件极差,因此在地震作用下极易出现倒塌并导致大量人口伤亡;剩余部分即为框架结构,主要是政府、学校、医院或工厂等公共建筑,抗震性能强,一般不会出现倒塌,较少出现人口伤亡。

表 5　建筑物遥感影像解译标志

Table 5　Interpretation Mark of Building Remote Sensing Image

房屋类型	遥感影像解译标志
框架结构	屋顶颜色多样,架构较大,多为多层或高层,大多分布在城区,农村地区较少。
砖混结构	屋顶灰色或白色,平顶较多;农村及城区低于 6 层楼房多为此类结构。
土木结构	屋顶灰黑色,房屋面积小,排列乱,多分布于山区。

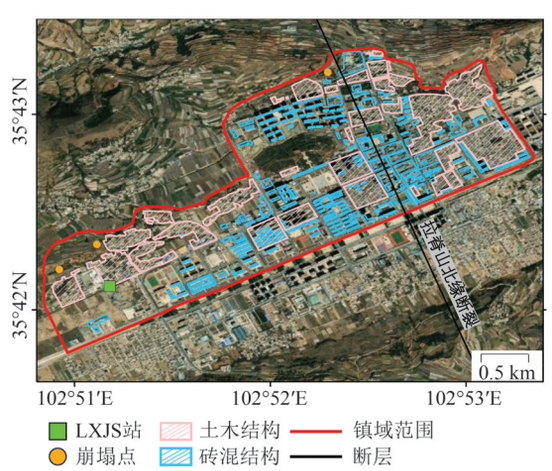


图 8　建筑物结构与灾害分布

Fig. 8　Building Structure and Hazard Distribution

由自然资源系统省部联合排查组结果显示,本次地震造成吹麻滩镇3处崩塌[37]。考虑地形地质的条件差异性和复杂性,镇域范围中心区域存在砖混结构与土木结构并存的现象,导致房屋抗震设防能力缺乏统一,无法保证震后救灾的便捷性。有两处崩塌位于镇域西部边缘土木结构房屋处(图8中黄色点位区域),由于抗震效果较差,崩塌会造成房屋倒塌甚至严重破坏;另一处位于镇域内北部区域,处在砖混结构与土木结构交杂的区域并临近拉脊山北缘断裂,也容易出现房屋倒塌甚至严重破坏等情况,从而造成一定的人员伤亡。据报道,本次积石山地震在2023-12-18T23:59:59初步统计造成吹麻滩镇死亡人数1人,由于余震的发生,不能保证本次地震造成伤亡上限为1人,所以通过表3的结果,预测吹麻滩镇受伤29人、死亡7人有一定的可靠性,实际死亡人数有待佐证。

因此利用ArcGIS技术,通过识别建筑物类型估测抗震能力,判断建筑是否达标也是一项比较重要的工作,能够总结地震空间分布规律与潜在隐患位置,对地震受灾区域进行一定的易损评价,能对灾后重建或搬迁等决策提供科学参考,也有利于震灾人口伤亡时空演化模型的优化。

4.2　与其他类似地震结果对比

积石山地震与历史同震级不同地震的房屋破坏程度、人员伤亡数量和地表加速度峰值分布对比,表现出“同震重灾”的特征,并引发特殊地震液化、泥流和滑坡等次生地质灾害[3-4]。由于震区人口相对密集且地震发生在深夜,人员来不及逃生被建筑物砸压或泥流掩埋成为本次同震重灾和人员伤亡的主要因素。道路掩埋堵塞、气温寒冷、台塬地貌等导致应急救援出现迟缓[16]。

通过已发表研究成果、震害调查和搜集地质资料,本次积石山强震观测记录地表加速度明显大于2021年漾濞Ms 6.4地震[38-39],烈度Ⅵ、Ⅶ、Ⅷ区面积分别为2022年芦山Ms 6.1地震的2.3、1.5、2.5倍,Ⅵ度区面积甚至超过Ms 6.8泸定地震[6,27,40]。积石山地震尽管震级不大,但此次地震产生的人员伤亡明显比2017年九寨沟Ms 7.0地震(19人死亡、6人失联、525人受伤)[5]和2022年泸定Ms 6.9地震(93人死亡、25人失联、400余人受伤)[5,27,40]都要严重。因此,本次地震同震重灾的结果也凸显出提升乡村房屋抗震性能的必要性和紧迫性,且需要多方努力。要进一步普及、提升居民建房抗震意识,加强农房抗震的技术指导和建设管理,推广使用抗震性能更好的建筑材料,培训合格的乡村建筑工匠,掌握基本的、必要的房屋抗震、构造知识和技能。建议农村房屋质量安全提升工程中,加大对偏远地区农房抗震改造的支持力度,持续提高农房抗震能力。

5　结　语

对于本文展开的融合多源数据研究积石山地震灾害及人口伤亡时空演化,得到以下认识:

1) 本次同震形变场处在拉脊山南缘北缘之间,主要抬升区域为15 km×15 km,集中在震中

附近。本次升、降轨同震形变场沿LOS向最大抬升值分别约为7.51 cm和7.91 cm。该地震的余震分布总体呈北西偏北,东南偏南向的线性走向,总体趋势与拉脊山断裂走向平行,可以推测本次地震发生在一个西北偏北或东南偏南走向的发震断层。结合近场测站信号特征,说明此次地震除了存在走滑分量,也出现了逆冲信号,再次印证本次地震符合逆冲型地震的运动特征,且与已有结果保持一致。

2)通过构建PSO-BiLSTM-Attention预测模型,对积石山地震进行死亡人数预测,预测结果为149人,准确率为98.45%,偏差为-1.54%。并利用历史震例进行模型可行性验证,平均偏差为-1.405%,余震预测结果为3人,共计152人,与实际结果仅差1人,说明所构建的时空演化模型能够结合时空分布特征更好地预测人员伤亡,可以用于灾后的死亡人口评估。

3)通过结合多源监测数据研究震灾严重性及人口伤亡时空演化,对区域灾后选址重建、建筑物材质选取、区域设施及部署规划、决策建议等提供科学依据。当遇到同类型地震时,能够对防灾薄弱区进行快速排查、险情评估和应急处置等工作提供科学参考。后期也可以继续深入研究震灾人口伤亡时空演化模型,探索各类数据在模型应用中的适用性。

致谢:感谢欧洲航天局提供的Sentinel-1A哨兵数据(https://asf.alaska.edu/);本研究使用的区域地震波形数据来自于中国地震局地球物理研究所国家数字测震台网数据备份中心,区域地震重力数据来自于中国地震局第二监测中心赵云峰研究员团队,此次地震序列精定位结果来源于中国地震局地震预测研究所赵翠萍研究员团队,在此表示感谢。本文中绝大部分图件采用GMT绘制[41]。

参 考 文 献

[1] 王立朝,侯圣山,董英,等. 甘肃积石山Ms 6.2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 Coseismic Geological Hazards Induced by Ms 6.2 Jishishan Earthquake and Suggestions for Their Risk Control[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2024,35(3): 108-118.

[2] 王勤彩, 罗钧, 陈翰林, 等. 2023年12月18日甘肃积石山Ms 6.2地震震源机制解[J]. 地震, 2024, 44(1): 185-188.
WANG Qincai, LUO Jun, CHEN Hanlin, et al. Focal Mechanism for the December 18, 2023, Jishishan Ms 6.2 Earthquake in Gansu Province[J]. *Earthquake*, 2024, 44(1): 185-188.

[3] 许强, 彭大雷, 范宣梅,等. 甘肃积石山Ms 6.2地震触发青海中川乡液化型滑坡-泥流特征与成因机理[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2024, DOI: 10.13203/j.whugis20240007.
XU Qiang, PENG Dalei, FAN Xuanmei, et al. Preliminary Study on the Characteristics and Initiation Mechanism of Zhongchuan Town Flowslide Triggered by the Ms 6.2 Jishishan Earthquake in Gansu Province[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, DOI: 10.13203/j.whugis20240007.

[4] 陈博,宋闯,陈毅,等. 2023年甘肃积石山Ms 6.2地震同震滑坡和建筑物损毁情况应急识别与影响因素研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), DOI: 10.13203/J.whugis20230497.
CHEN Bo, SONG Chuang, CHEN Yi, et al. Emergency Identification and Influencing Factor Analysis of Coseismic Landslides and Building Damages Induced by the 2023 Ms 6.2 Jishishan (Gansu, China) Earthquake[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, DOI: 10.13203/J.whugis20230497.

[5] 王运生, 赵波, 吉锋, 等. 2023年甘肃积石山Ms 6.2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 the Hazards Triggered by the 2023 Ms 6.2 Jishishan Earthquake in Gansu Province[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2024, 51(1): 1-8.

[6] 许娟, 赵雪慧, 周琪, 等. 2022年四川泸定Ms 6.8地震人员震亡特征分析[J]. 地震研究, 2023, 46(4): 603-610.
XU Juan, ZHAO Xuehui, ZHOU Qi, et al. Features of the Casualty by the 2022 Luding, Sichuan Ms 6.8 Earthquake[J]. *Journal of Seismological Research*, 2023, 46(4): 603-610.

[7] ZHUANG W Q, CUI D X, HAO M, et al. Geodetic Constraints on Contemporary Three-Dimensional Crustal Deformation in the Laji Shan - Jishishan Tectonic Belt[J]. *Geodesy and Geodynamics*, 2023, 14(6): 589-596.

[8] 袁道阳. 青藏高原东北缘晚新生代以来的构造变形

特征与时空演化[D]. 北京:中国地震局地质研究所, 2003.
YUAN Daoyang. Tectonic Deformation Features and Space-Time Evolution in Northeastern Margin of the Qinghai-Tibetan Plateau Since the Late Cenozoic Time[D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration, 2003.

[9] 周琳, 王庆良, 李长军, 等. 基于GPS和水准资料的拉脊山断裂带西段地壳形变研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2016, 36(12): 1056-1059.
ZHOU Lin, WANG Qingliang, LI Zhangjun, et al. The Study of Crustal Deformation on Western End of Lajishan Fault Based on GPS and Leveling Data [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2016, 36(12): 1056-1059.

[10] 庞琪沛, 吴云龙, 徐景田, 等. 甘肃积石山 Ms 6.2 地震深部构造特征和动力学过程[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, DOI: 10.13203/j.whugis20240085.
PANG Qipei, WU Yunlong, XU Jingtian, et al. Deep Structural Characteristics and Dynamic Processes of the Ms 6.2 Jishishan Earthquake and Its Adjacent Areas[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, DOI: 10.13203/j.whugis20240085.

[11] 周明月, 王永革, 关兆萱, 等. 2023年甘肃积石山 Ms 6.2地震对周围断层的应力影响及对余震的触发作用[J]. 地震工程学报, 2024, 4: 942-948, 964.
ZHOU Mingyue, WANG Yongge, GUAN Zhaoxuan, et al. Stress Change on Surrounding Faults and Triggering of Aftershocks by the 2023 Jishishan Ms 6.2 Earthquake in Gansu, China [J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2024, 4: 942-948, 964.

[12] 左可桢, 赵翠萍. 2023年甘肃积石山6.2级地震序列精定位[J]. 地震, 2024, 44(01): 204-208.
ZUO Kezhen, ZHAO Cuiping. Relocation of the 2023 Ms 6.2 Jishishan Earthquake Sequence in Gansu Province[J]. *Earthquake*, 2024, 44(01): 204-208.

[13] 高原, 李心怡, 李抒予, 等. 2023年12月18日积石山6.2级地震的深浅变形构造分析[J]. 地震, 2024, 44(1):160-166.
GAO Yuan, LI Xinyi, LI Shuyu, et al. Deep and Shallow Deformation Tectonics of Jishishan Ms 6.2 Earthquake on 18 December 2023 in China [J]. *Earthquake*, 2024,44(1):160-166.

[14] 王安简, 高原. 利用远场记录反演2023年甘肃积石山M 6.2地震破裂过程[J]. 地震, 2024, 44(1): 195-203.
WANG Anjian, GAO Yuan. Inversion of the Rupture Process of the 2023 Jishishan M 6.2 Earthquake in Gansu by Teleseismic Data [J]. *Earthquake*, 2024, 44(1): 195-203.

[15] 罗艳, 朱音杰, 高原. 区域地震记录揭示的2023年甘肃积石山6.2级地震震源破裂过程[J]. 地震, 2024, 44(1):189-194.
LUO Yan, ZHU Yinjie, GAO Yuan. Source Rupture Process of the 2023 Ms 6.2 Jishishan, Gansu Earthquake Using the Regional Seismic Data [J]. *Earthquake*, 2024, 44(1):189-194.

[16] 蒋伟, 王永志, 袁晓铭, 等. 2023年甘肃积石山 Ms 6.2地震宏观灾害特征与若干思考[J]. 防灾减灾工程学报, 2024, 44(1): 1-11.
JIANG Wei, WANG Yongzhi, YUAN Xiaoming, et al. Macroscopic Hazard Characteristics of the 2023 Gansu Jishishan Ms 6.2 Earthquake and Some Proposals [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2024, 44(1): 1-11.

[17] 李志才, 陈智, 武军郦, 等. 基于高频GNSS观测的甘肃积石山Ms 6.2地震同震形变[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, DOI: 10.13203/j.whugis20240004.
LI Zhicai, CHEN Zhi, WU Junli, et al. Coseismic Deformation of the Ms 6.2 Jishishan Earthquake in Gansu Province Based on High-Frequency GNSS Observation[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, DOI: 10.13203/j.whugis20240004.

[18] 周德红, 冯豪, 程乐棋, 等. 遗传算法优化的BP神经网络在地震死亡人数评估中的应用[J]. 安全与环境学报, 2017, 17(6): 2267-2272.
ZHOU Dehong, FENG Hao, CHENG Leqi, et al. Earthquake Casualty Assessment Based on the BP Neural Network of the Optimized Genetic Algorithm [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2017, 17(6): 2267-2272.

[19] 刘振江, 韩炳权, 能懿菡, 等. InSAR观测约束下的2023年甘肃积石山地震震源参数及其滑动分布[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, DOI: 10.13203/j.whugis20240008.
LIU Zhenjiang, HAN Bingquan, NAI Yihan, et al. Source Parameters and Slip Distribution of the 2023 Mw 6.0 Jishishan (Gansu, China) Earthquake Constrained by InSAR Observations[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, DOI: 10.13203/j.whugis20240008.

[20] 李雨森, 李为乐, 许强, 等. 2023年积石山Ms 6.2地震InSAR同震形变探测与断层滑动分布反演[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2024, 51

(1):22-32.
LI Yusen, LI Weile, XU Qiang, et al. Coseismic Deformation and Slip Distribution of the 2023 Ms 6.2 Jishishan Earthquake Revealed by InSAR Observations[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2024, 51(1): 22-32.

[21] 杨九元, 温扬茂, 许才军. InSAR观测揭示的2023年甘肃积石山Ms 6.2地震发震构造[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, DOI: 10.13203/j.whugis20230501.
YANG Jiuyuan, WEN Yangmao, XU Caijun. Seismogenic Fault Structure of the 2023 Ms 6.2 Jishishan (Gausu, China) Earthquake Revealed by InSAR Observations[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, DOI: 10.13203/j.whugis20230501.

[22] 李为乐, 许强, 李雨森, 等. 2023年积石山Ms 6.2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.
LI Weile, XU Qiang, LI Yusen, et al. Preliminary Analysis of the Coseismic Geohazards Induced by the 2023 Ms 6.2 Jishishan Earthquake[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2024, 51(1):33-45.

[23] 郭祥云, 韩立波, 张旭, 等. 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, 2024, 54(1): 75-85.
GUO Xiangyun, HAN Libo, ZHANG Xu, et al. Source Parameters and Rupture Characteristics of the Ms 6.2 Jishishan Earthquake in Gansu Province on December 18, 2023[J]. *Progress in Earthquake Sciences*, 2024, 54(1): 75-85.

[24] TANG X W, GUO R M, ZHANG Y J, et al. Rapid Rupture Characterization for the 2023 Ms 6.2 Jishishan Earthquake[J]. *Earthquake Research Advances*, 2024, 4(2): 100288.

[25] 黄观文, 景策, 李东旭, 等. 甘肃积石山Ms 6.2地震对滑坡易发区的变形影响分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, DOI: 10.13203/j.whugis20230490.
HUANG Guanwen, JING Ce, LI Dongxu, et al. Deformation Analysis of the Ms 6.2 Jishishan Earthquake on the Landslide Hazard Areas[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, DOI: 10.13203/j.whugis20230490.

[26] 陆诗铭, 吴中海, 李智超. 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, 2024, 54(1): 86-93.
LU Shiming, WU Zhonghai, LI Zhichao. Seismic Structure Characteristics of the 18 December 2023 M 6.2 Jishishan Earthquake, Gansu Province[J]. *Progress in Earthquake Sciences*, 2024, 54(1): 86-93.

[27] 铁永波, 张宪政, 曹佳文, 等. 积石山Ms 6.2和泸定Ms 6.8地震地质灾害发育规律对比[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2024, 51(1): 9-21.
TIE Yongbo, ZHANG Xianzheng, CAO Jiawen, et al. Comparative Research of the Characteristics of Geological Hazards Induced by the Jishishan(Ms 6.2) and Luding (Ms 6.8) Earthquakes[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2024, 51(1): 9-21.

[28] 方楠, 孙凯, 黄传超, 等. 联合InSAR和地震波数据反演甘肃积石山Ms 6.2地震震源时空破裂过程[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, DOI: 10.13203/J.whugis20240036.
FANG Nan, SUN Kai, HUANG Chuanchao, et al. Joint Inversion of InSAR and Seismic Data for the Kinematic Rupture Process of the 2023 Ms 6.2 Jishishan (Gansu, China) Earthquake[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, DOI: 10.13203/J.whugis20240036.

[29] 洪时中. 对日本兵库县南部地震震灾统计时程曲线的初步分析[J]. 国际地震动态, 1995, 25(5): 10-14.
HONG Shizhong. Preliminary Analysis of the Time Curve of Disaster Statistics of the Earthquake Occurring in the South of Hyogo Prefecture, Japan[J]. *Recent Developments in World Seismology*, 1995, 25(5): 10-14.

[30] 陈韶金, 刘子维, 周浩, 等. 基于PCA-PSO-ELM模型预测地震死亡人数研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2024, 44(1): 105-110.
CHEN Shaojin, LIU Ziwei, ZHOU Hao, et al. Research on Prediction of Earthquake Death Toll Based on PCA-PSO-ELM Model[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2024, 44(1): 105-110.

[31] 王景来, 杨子汉. 地震灾害时间进程法[J]. 地震研究, 1997, 20(4): 84-90.
WANG Jinglai, YANG Zihan. Time History Method to Estimate Seismic Disasters[J]. *Journal of Seismological Research*, 1997, 20(4): 84-90.

[32] 王艳茹, 王宝光, 戴君武, 等. "5·12"汶川大地震人员伤亡的时空分布特点[J]. 自然灾害学报, 2009, 18(6): 52-56.
WANG Yanru, WANG Baoguang, DAI Junwu, et al. Spatiotemporal Distribution Characteristics of Casualties in Great "5·12" Wenchuan Earthquake[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2009, 18(6): 52-56.

[33] 董曼, 杨天青, 陈通, 等. 地震报道中死亡人数估

计方法的适用性分析[J]. 地震, 2014, 34(3): 140-148.
DONG Man, YANG Tianqing, CHEN Tong, et al. Applicability Analysis of Estimation Methods for Reported Casualties After Earthquakes[J]. *Earthquake*, 2014, 34(3): 140-148.

[34] 吴新燕, 吴昊昱, 路尧, 等. 地震新闻报道中中国地震死亡人数时间序列特征研究[J]. 灾害学, 2019, 34(1): 34-37.
WU Xinyan, WU Haoyu, LU Yao, et al. Time Series Characteristics of Earthquake Deaths in China News Reports[J]. *Journal of Catastrophology*, 2019, 34(1): 34-37.

[35] 杨哲飚. 城市多尺度地震灾害情境模拟及可视化[D]. 北京: 清华大学, 2020.
YANG Zhebiao. Multi-scale Scenario Simulation and 3D Visualization of Urban Earthquake Disaster[D]. Beijing: Tsinghua University, 2020.

[36] 陈晋, 习聪望, 陈文凯, 等. 基于无人机、高分卫星遥感影像的甘肃省陇南市建筑物空间化研究[J]. 地震研究, 2018, 41(2): 192-200.
CHEN Jin, XI Congwang, CHEN Wenkai, et al. Research on Spatialization of Buildings in Longnan City, Gansu Province Based on Miniature Unmanned Aerial Vehicle and High Resolution Satellite Images[J]. *Journal of Seismological Research*, 2018, 41(2): 192-200.

[37] 刘帅, 何斌, 王涛, 等. 甘肃积石山县Ms 6.2级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, 2024, 30(2): 314-331.
LIU Shuai, HE Bin, WANG Tao, et al. Development Characteristics and Susceptibility Assessment of Coseismic Geological Hazards in Jishishan Ms 6.2 Earthquake, Gansu Province[J]. *Journal of Geomechanics*, 2024, 30(2): 314-331.

[38] 戴必辉, 陶忠, 徐国林, 等. 云南漾濞Ms 6.4地震震中区农房震害调查[J]. 世界地震工程, 2021, 37(3): 9-18.
DAI Bihui, TAO Zhong, XU Guolin, et al. Investigation of Seismic Damage to Rural Houses in the Epicenter Area of Yangbi Ms 6.4 Earthquake in Yunnan[J]. *World Earthquake Engineering*, 2021, 37(3): 9-18.

[39] LI W, HUANG Y T, WANG X H, et al. Source Model and Seismogenic Environment of the Ms 6.4 Yangbi Earthquake in Yunnan, China—Based on InSAR Observation[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(12): 5908.

[40] 蔡妍, 吴建平, 房立华, 等. 2022年芦山Ms 6.1地震: 发生在隐伏反冲断层上的一次中强地震[J]. 地震学报, 2023, 45(5): 823-835.
CAI Yan, WU Jianping, FANG Lihua, et al. The 2022 Lushan Ms 6.1 Earthquake: A Moderately Strong Earthquake on a Blind back Thrust Fault[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2023, 45(5): 823-835.

[41] WESSEL P, LUIS J F, UIEDA L, et al. The Generic Mapping Tools Version 6[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2019, 20(11): 5556-5564.