

2023 年积石山 Ms 6.2 级地震 InSAR 同震形变探测 与断层滑动分布反演

李雨森¹, 李为乐^{1,2}, 许强^{1,2}, 许善淼¹, 王运生¹

(1. 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室(成都理工大学), 成都 610059;

2. 应急管理部滑坡灾害风险预警与防控实验室, 成都 610059)

[摘要] 2023 年 12 月 18 日, 甘肃省临夏回族自治州积石山县发生了 Ms 6.2 级地震, 地震灾害损失显著高于同震级地震, 查明其同震形变场与断层滑动分布特征, 有助于揭示此次地震灾害损失严重的原因。利用 Sentinel-1 卫星升、降轨雷达影像, 采用合成孔径雷达干涉技术获取了本次地震的同震形变场, 进而基于 Okada 弹性位错模型, 确定了本次地震的震源参数, 并基于分布式滑动模型反演了本次地震断层面上的滑动分布。结果表明, 积石山地震为逆冲型地震, 升、降轨同震形变场沿视线向最大形变量分别为 7.1 cm 和 7.8 cm, 断层最大滑动量为 0.31 m, 主要集中在地下 0~8 km。与 2019 年 6 月 17 日四川长宁 Ms 6.0 级地震对比发现, 长宁地震地表最大形变量为 8 cm, 断层最大滑动量为 0.38 m, 均大于积石山地震, 推测积石山地震灾害损失严重的主要原因为震区居民房屋相对集中、房屋抗震性能差和黄土区场地地震波放大效应等。

[关键词] 积石山地震; 合成孔径雷达干涉测量; 同震形变; 断层滑动; 震源机制反演

[分类号] P237

[文献标志码] A

Coseismic deformation and slip distribution of the 2023 Jishishan Ms 6.2 earthquake revealed by InSAR observations

LI Yusen¹, LI Weile^{1,2}, XU Qiang^{1,2}, XU Shanmiao¹, WANG Yunsheng¹

1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. Laboratory of Landslide Risk Early-Warning and Control, Chengdu 610059, China

Abstract: On December 18, 2023, an Ms 6.2 earthquake occurred in Jishishan County, Linxia Hui Autonomous Prefecture, Gansu Province. The seismic losses were significantly higher than those of earthquakes of the same magnitude. Identifying the coseismic deformation field and fault slip

[收稿日期] 2024-01-01。

[基金项目] 国家重点研发计划(2021YFC3000401); 四川省重点研发项目(2023YFS0435); 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室自主研究课题(SKLG2022Z007)。

[第一作者] 李雨森(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 地质灾害预测评价, E-mail: aysdliyusen@foxmail.com。

[通信作者] 李为乐(1982—), 男, 教授, 研究方向: 地质灾害预测评价, E-mail: liweile08@mail.cdut.edu.cn。

[引用格式] 李雨森, 李为乐, 许强, 等, 2024. 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), 51(1): 22-32+75.

Li Y S, Li W L, Xu Q, et al., 2024. Coseismic deformation and slip distribution of the 2023 Jieshishan Ms 6.2 earthquake revealed by InSAR observations[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 51(1): 22-32+75.

distribution characteristics will help reveal the reasons for the severe losses caused by this earthquake disaster. The coseismic deformation field of this earthquake is obtained using ascending and descending orbit radar images obtained with the Sentinel-1 satellite and synthetic aperture radar interferometry. Based on the Okada elastic dislocation model, the source parameters of this earthquake are determined, and the sliding distribution on the fault plane of this earthquake is inverted using a distributed sliding model. The results indicate that the Jishishan earthquake was a thrust-type earthquake, with maximum deformation fields along the line of sight for the ascending and descending tracks of 7.1 cm and 7.8 cm, respectively. The maximum sliding amount of the fault was 0.31 m, mainly concentrated 0-8 km underground. In comparison, the Changning Ms 6.0 earthquake in Sichuan on June 17, 2019 had a maximum surface deformation of 8 cm and the maximum slip of the fault was 0.38 m, both larger than inferred for the Jishishan earthquake. It is speculated that the main reasons for the severe damage caused by the Jishishan earthquake are the relative concentration of residential buildings in the seismic area, the poor seismic performance of the buildings, and the amplification effect of seismic waves in the loss area.

Key words: Jishihuan earthquake; synthetic aperture radar interferometry; coseismic deformation; seismic fault slip; seismic-source mechanism inversion

2023 年 12 月 18 日 23 时 59 分,甘肃省临夏回族自治州积石山石县发生 Ms 6.2 级地震,震中位于北纬 35.74°、东经 102.79°,震源深度约 10 km(中国地震台网中心,2023),发震断裂为拉脊山北缘断裂东段(王运生等,2024),为一次逆冲型事件(表 1),地震最大烈度达Ⅷ度(王立朝等,2024)。本次地震打破了甘肃省自 2013 年 7 月 22 日岷县 Ms 6.6 级地震以来持续 10 年的 Ms 6.0 级以上地震平静期。截至 2023 年 12 月 25 日 0 时,地震共造成 149 人遇难,2 人失联,超过 15 万间房屋损毁(王立朝等,2024),地震还诱发了 1 处大型地震液化滑坡泥流和至少 800 余处小型崩滑次生灾害(王运生等,2024)。此次地震造成的人员伤亡要显著高于 2013 年岷县 Ms 6.6 级、2017 年四川九寨沟 Ms 7.0 级和 2022 年四川泸定 Ms 6.9 级地震(王运生等,2024),其原因值得深入研究(铁永波等,2024)。

通过对地震震源机制进行反演可以厘定震中位置、震源深度、发震断层性质、滑动位移分布等震源参数,深化人类对地震本质的认知,进一步完善地震灾害预防措施,降低地震灾害损失(毛燕等,2008)。主要方法包括基于区域地震台网数据的反演方法(王勤彩等,2024)和基于合成孔径雷达干涉测量技术(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)同震形变场数据的反演方法(张国宏等,2011)。自 Massonnet et al. (1993)利用 ERS-1 雷达卫星数据成功获取了 1992 年 Landers Ms 7.2 级地震的同震形变场以来,InSAR

技术已逐渐发展为同震形变场探测和震源机制反演的主要技术手段。尤其是 2014 年欧洲空间局(欧空局)免费提供覆盖全球范围的 Sentinel-1 雷达卫星数据以来,几乎每次强震后不同学者都迅速利用 InSAR 技术获取同震形变场并基于弹性半空间的位错模型进行震源机制反演(刘云华等,2014;李奇等,2015;卢倩云等,2015;左荣虎等,2016;杨亚夫等,2017;单新建等,2017;邱江涛等,2018;刘洋等,2019;温少妍等,2020;王绍俊等,2021;刘计洪等,2022;张双成等,2024)。本文首先利用地震前后 Sentinel-1 卫星升、降轨雷达影像,基于 InSAR 技术获取本次地震的同震形变场;进而以 InSAR 形变场为约束,利用 Okada 弹性半空间位错模型,确定此次发震断层的几何参数(Okada,1992);最后基于分布式滑动模型反演发震断层面的滑动分布,为此次地震的发震机制认识和震害分析提供参考。

1 研究区地质构造背景

本次地震发震断裂为拉脊山北缘断裂,拉脊山脉位于青藏高原东北边缘地带,是青藏高原一级地貌阶梯向黄土高原二级地貌阶梯过渡的分界线。历史上拉脊山断裂带南北两侧发生 5.0 级以上的破坏性地震超过 20 次。该区域活动断裂发育且构造活动强烈,北部发育有祁连山北断裂带、托莱山断裂带,西侧发育有共和盆地断裂,地震频发。拉脊山断裂带分为北缘断裂和南缘断裂 2 条

表 1 不同机构公布的发震断层参数

Table 1 Parameters of seismogenic faults published by different organizations

研究来源	震中位置	深度/km	走向/°	倾角/°	滑动角/°	长度/km	宽度/km	震级/Mw
USGS	102.82°E,35.74°N	10	333	62	88	—	—	5.9
GCMT	102.81°E,35.83°N	18.9	303	52	62	—	—	6.1
CEA	102.78°E,35.68°N	10	307	50	71	—	—	6.0
本文研究	102.77°E,35.78°N	2.7	310.29	56.62	90.36	14.36	8.29	6.0

注:USGS(United States Geological Survey):美国地质调查局;GCMT(global centroid-moment-tensor):全球矩张量;CEA(China Earthquake Administration):中国地震局

断裂,是形成于加里东期的逆冲断裂,经历过多次挤压变形、构造抬升的过程,晚新生代再次复活,形成再生造山带,是东侧临夏盆地、南侧循化—贵

德盆地和北侧西宁—民和盆地的边界断裂(张波, 2012)。本次地震震中位于拉脊山南、北缘断裂与南部青海南山—循化南山断裂之间(图 1)。

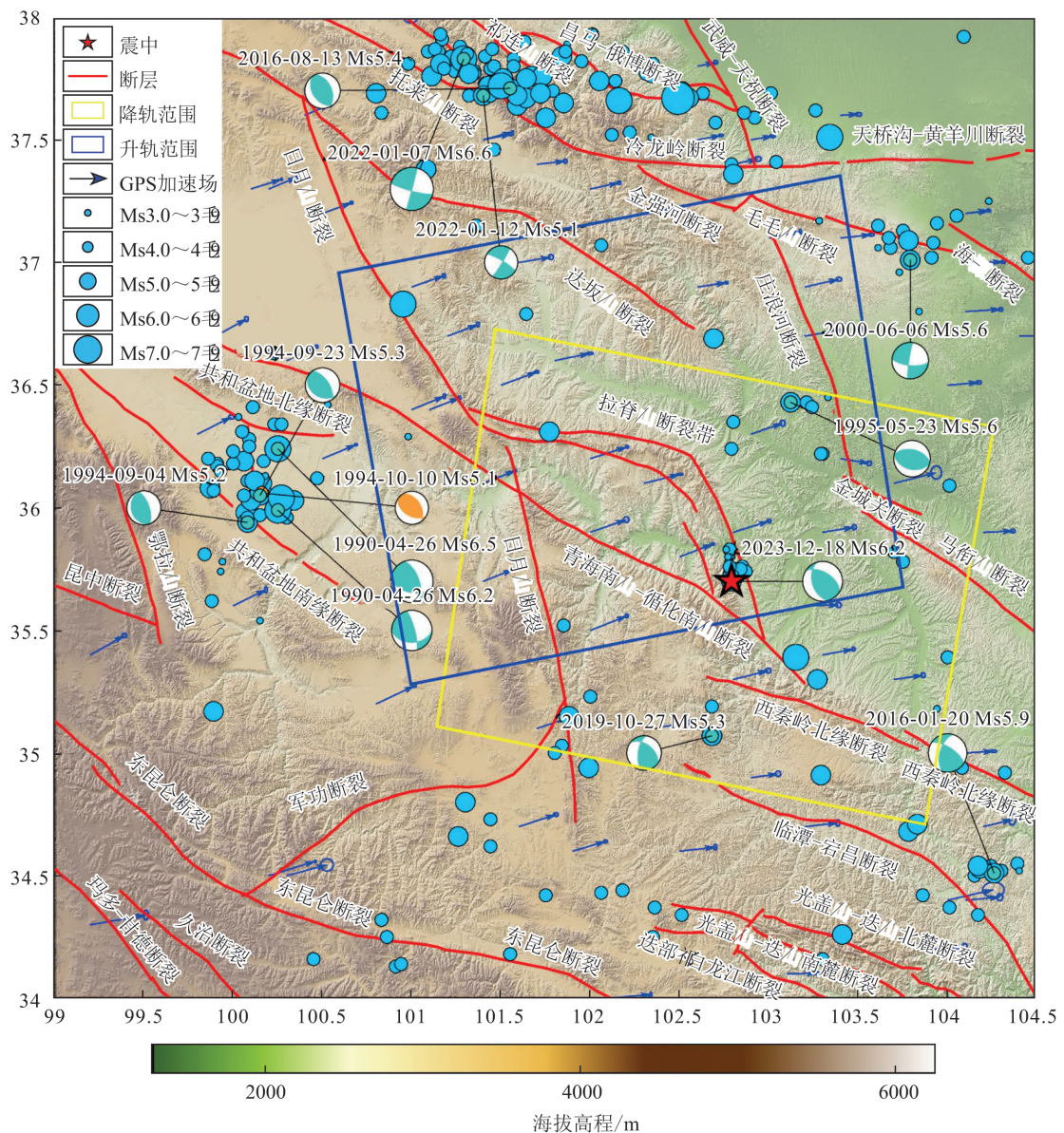


图 1 积石山地震构造背景图 (历史地震信息及震源机制解来自 USGS)

Fig. 1 Tectonic background map of the Jishishan earthquake. (The historical earthquake information and source mechanism data are from the USGS)

2 同震形变场探测

2.1 InSAR 数据处理

本研究收集了覆盖此次地震震中区域的震前和震后 Sentinel-1 雷达卫星升、降轨影像数据(表 2),基于 GAMMA 软件,采用 InSAR 技术获取了同震干涉形变图(Massonet et al., 1998; Wright et al., 2004)。为了消除地形相位的影响,使用 ALOS World 30 m 分辨率的数字高程模型以及欧洲空间局的临时轨道数据,采用 10 : 2 的比率进行多视处理;同时使用 Goldstein 滤波来抑制

差分干涉图中的噪声,滤波窗口设置为 128×128 ;使用基于 Delaunay 三角网的最小费用流算法(Eineder et al., 1998)进行相位解缠,从而将相位转化为地表形变场;利用通用型 InSAR 大气改正系统(generic atmospheric correction online service for InSAR, GACOS)去除大气信号对最终形变场精度产生的不利影响(Yu, 2018; Yu, 2020; Xiao, 2021);随后使用二阶多项式来消除卫星轨道不准确导致的趋势性误差。Sentinel-1 卫星升、降轨影像得到的差分干涉条纹图连续、清晰,仅在发震断层附近有不连续(图 2)。

表 2 本次研究采用的 Sentinel-1 雷达卫星数据
Table 2 The Sentinel-1 SAR satellite images used in this study

卫星轨道	轨道号	主影像时间	辅影像时间	极化方式	干涉模式	时间基线/d
升轨	128	2023-10-27	2023-12-26	VV	IW	60
降轨	135	2023-12-14	2023-12-26	VV	IW	12

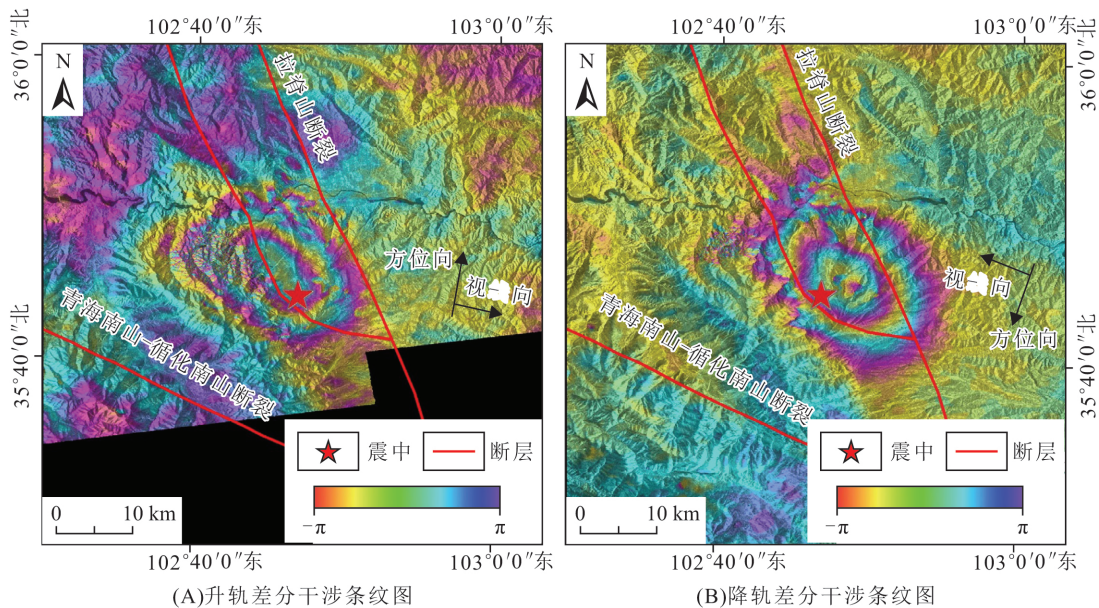


图 2 Sentinel-1 卫星影像升、降轨差分干涉条纹图
Fig. 2 Differential interference fringes of the ascending and descending Sentinel-1 images

2.2 同震形变场

对图 2 中干涉条纹图进行解缠处理后得到相应的同震视线向(line of sight, LOS)地表形变场(图 3)。由图 3 可知,形变场呈椭圆形,长轴延北西—南东走向,与 GCMT、USGS 等机构公布的震源参数走向基本一致,与拉脊山断裂走向基本平行。地震同震地表形变区范围约 $25 \text{ km} \times 15 \text{ km}$ 。Sentinel-1 降轨影像得到的同震形变

场沿 LOS 向最大抬升值约 7.8 cm,升轨影像得到的同震形变场沿 LOS 向最大抬升值约 7.1 cm。升、降轨同震形变场结构相对单一,且震中区域同震形变场形变值符号相同,都显示由地表向卫星方向靠近,说明本次地震产生的形变以垂直方向为主,并且表现为地表抬升,符合逆冲型地震的运动特征。结合形变场形状,可以判定本次发震断层走向沿北西—南东向延

伸。为了分析本次地震形变空间特征,本文绘制与断层走向垂直的 A-A'剖面线,如图 4 所示。由于升轨影像时间基线较长,时间去相干导致形变场西部区域少量信号丢失。结合升、降轨形变

曲线,有明显的抬升中心,且形变区之间的位移基本连续,没有出现大面积因形变梯度过大出现跳跃性位移间断,说明本次活动断层未破裂至地表。

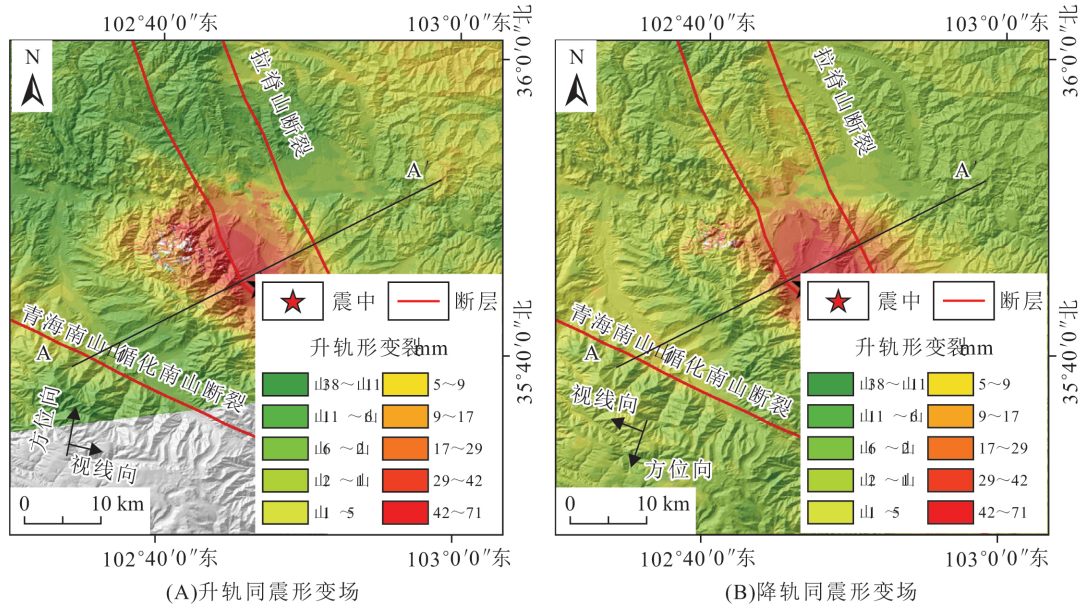


图 3 积石山地震同震地表形变场
Fig. 3 Coseismic surface deformation field of the Jishishan earthquake

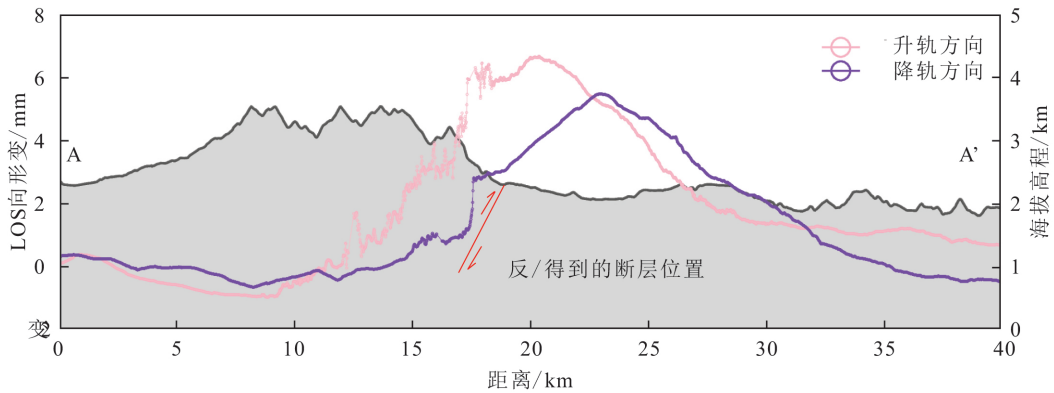


图 4 A-A'剖面升、降轨 LOS 向同震形变曲线图
Fig. 4 Coseismic deformation curves of the ascending and descending orbits of the A-A' profile in the line-of-sight direction

3 断层滑动分布反演

在获得地震同震形变场后,可以根据其结果获取震源参数,并进行地球物理学解释。根据前文获取的同震形变场进行发震断层滑动反演,从而获取震源参数和发震断层滑动分布模型。本研究首先进行均匀滑动反演,得到发震断层集合参数以及均匀滑动参数,进而利用得到的参数进行

分布式滑动反演,得到断层精细化滑动量分布情况(冯万鹏等,2010;李永生等,2015;Song et al., 2019)。

3.1 断层几何参数反演

本次反演在 GCMT 公布的震源参数区间,将断层长度变化设置为 4~25 km,宽度变化设置为 2~15 km,倾角变化设置为 30°~70°,断层滑动角变化设置为 40°~100°。基于 Okada 弹性

位错模型,选取均匀采样方法对形变场进行降采样处理,用来抑制噪声影响、提高反演效率,得到保留形变场特征以及能够支撑反演数量的采样点。利用 L-M(Levenberg-Marquardt) 最小二乘优化算法进行迭代计算,获取断层参数的最优拟合解,红色点以及红色直线为最大概率后验解(图 5)。表 3 为均匀滑动反演得到的具

体参数,图 6 和图 7 分别为均匀滑动反演得到的升、降轨模拟形变场以及模拟形变场与实际形变场的残差图。

3.2 断层几何参数反演

在上述均匀滑动反演确定发震断层几何参数的基础上,对本次发震断层进行分布式滑动反演。首先对断层面进行适当扩展并利用矩形分割方法

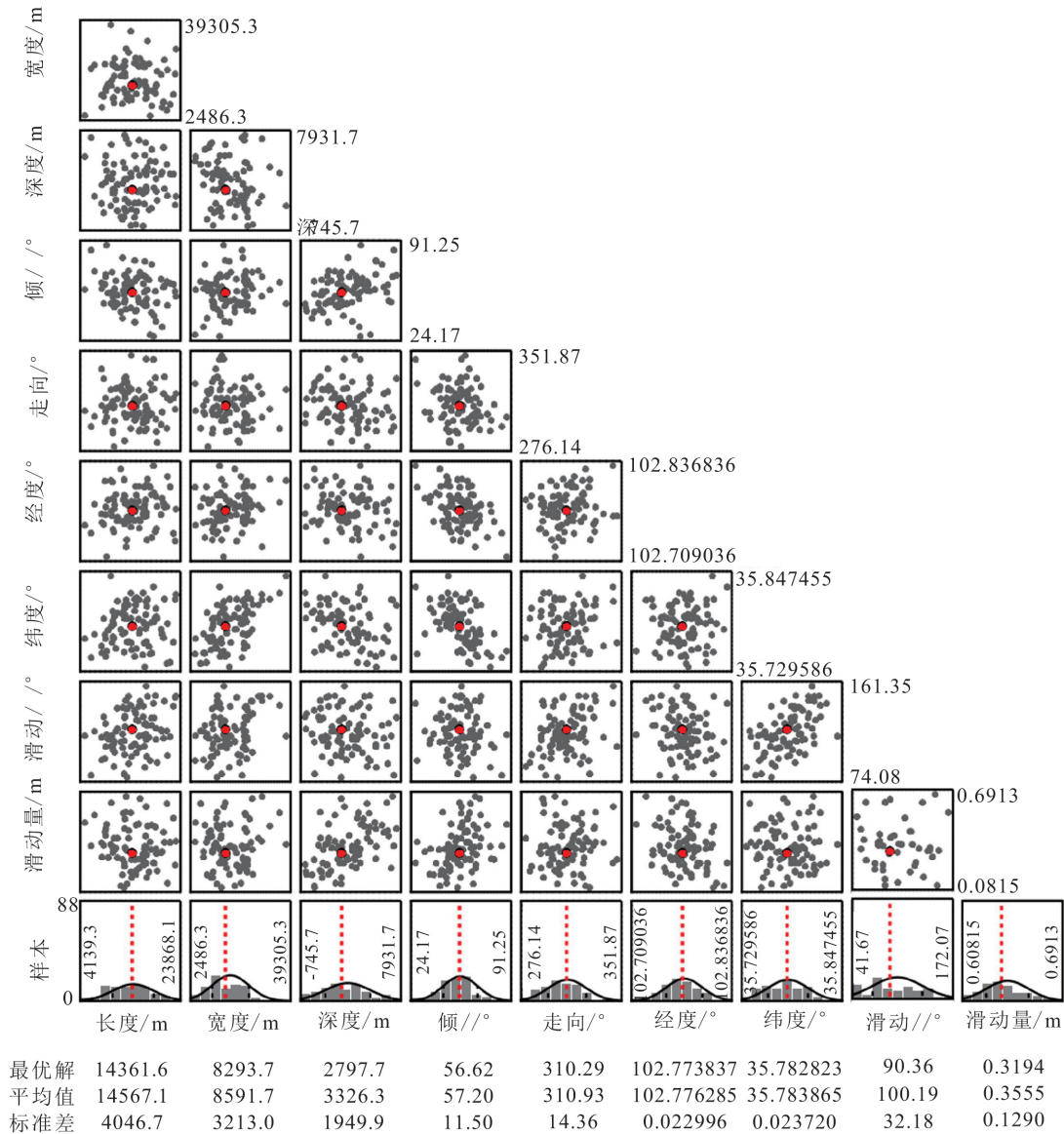


图 5 发震断层参数的边缘后验概率分布
Fig. 5 Marginal a posteriori probability distribution of the parameters of the originating faults

表 3 本次断层反演得到的具体参数

Table 3 Parameters obtained from the fault inversion

长度/m	宽度/m	深度/m	倾角/°	走向/°	经度/°	纬度/°	滑动角/°	滑动量/m
14361.6	8293.7	2797.7	56.62	310.29	102.77	35.78	90.36	0.3194

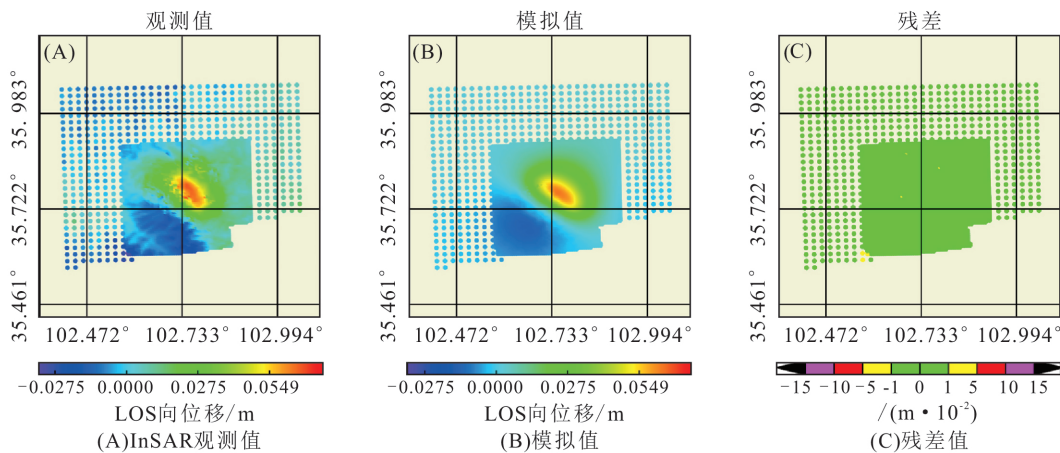


图 6 积石山地震升轨均匀滑动模拟

Fig. 6 Simulation of uniform sliding of the ascending orbit for the Jishishan earthquake

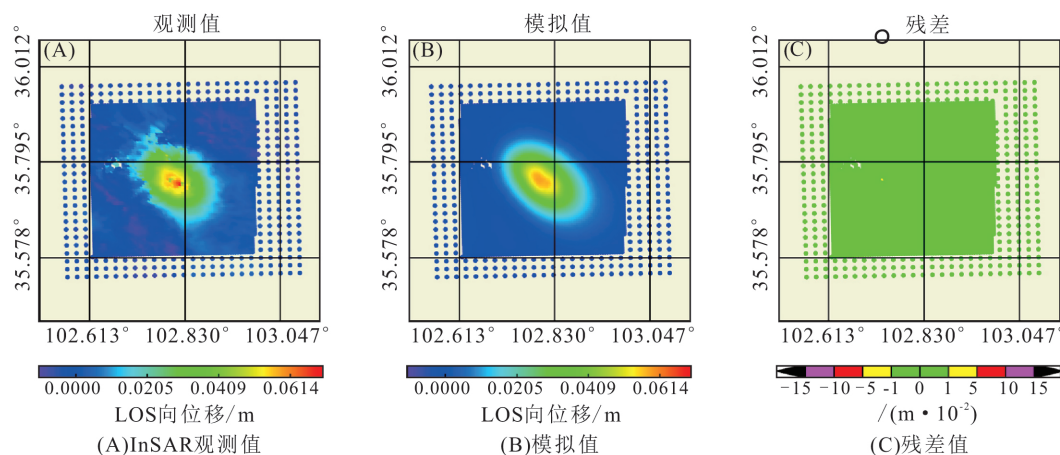


图 7 积石山地震降轨均匀滑动模拟

Fig. 7 Simulation of uniform sliding of the descending orbit for the Jishishan earthquake

进行离散化处理,沿断层走向将断层面长度设置为 30 km,沿断层倾向向下将断层宽度设置为 15 km,将发震断层面均匀划分为 450 个 1 km × 1 km 的子滑块,并对 InSAR 升、降轨采样后的观测值设置相同的权重,共同反演断层的同震滑动分布(图 8)。采用附加约束条件的最小二乘法以及最速下降法解出目标函数的最小解。根据断层滑动结果,可知此次地震是以逆冲为主的地震,断层最大滑动量为 0.31 m,位于地下 2 km 左右,滑动主要集中在地下 0~8 km 处(图 8)。由图 9 和图 10 可以看出,本次 InSAR 技术获得的形变场与反演形变场基本一致,验证了本次地震发震断层反演结果的可靠性。

3.3 与其他类似地震反演结果对比

为探讨本次地震相对于类似震级地震人员伤

亡和房屋损毁相对严重的原因,本研究将本次地震与 2019 年 6 月 17 日四川长宁 Ms 6.0 级地震(导致 13 人遇难,9532 户农房受损)InSAR 同震形变反演结果进行对比分析(余祥伟等,2022;于书媛等,2022)。四川长宁 Ms 6.0 级地震为逆冲型地震,震源深度约 10 km,未产生地表破裂,与本次地震具较好的可比性。四川长宁 Ms 6.0 级地震 InSAR 同震形变反演结果显示,LOS 向地表最大形变量为 8 cm,断层最大滑动量约为 0.38 m(余祥伟等,2022),均大于积石山地震,而其导致的人员伤亡和房屋损毁均远小于积石山地震。由此推测,积石山地震灾害损失严重的主要原因为震区居民房屋相对集中、房屋抗震性能差和黄土区场地地震波放大效应(王运生等,2024)。

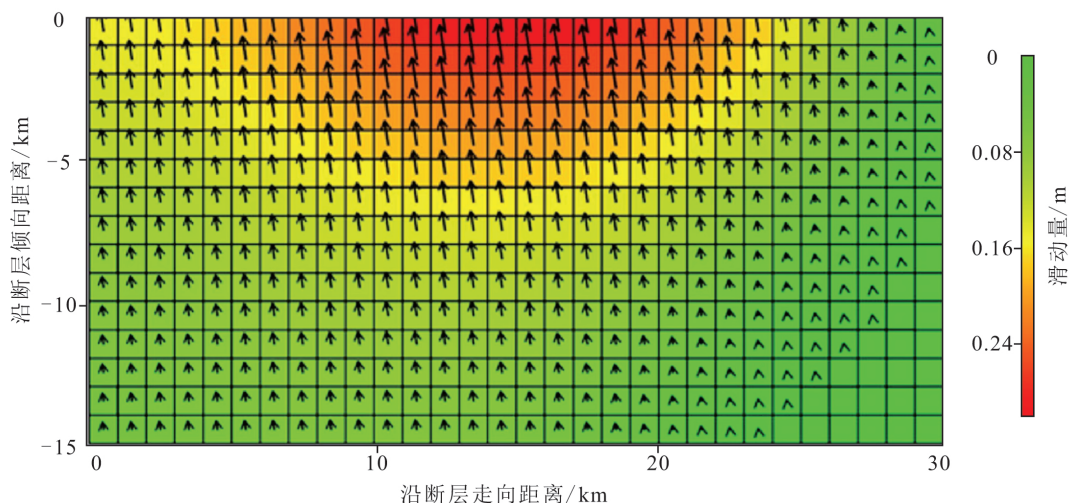


图 8 积石山地震发震断层同震滑动分布

Fig. 8 Distribution of coseismic sliding along the seismogenic fault of the Jishishan earthquake

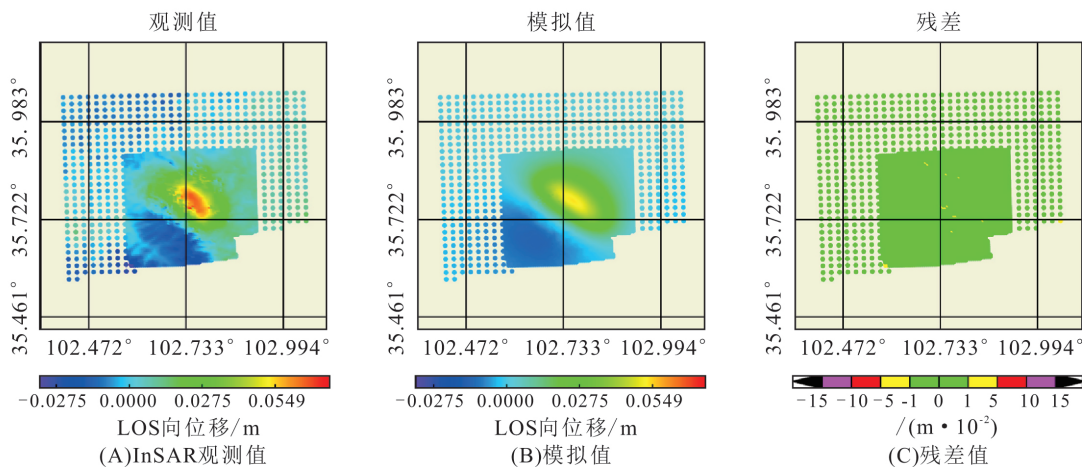


图 9 积石山地震升轨分布式滑动模拟

Fig. 9 Distributed sliding simulation of the ascending orbit for the Jishishan earthquake

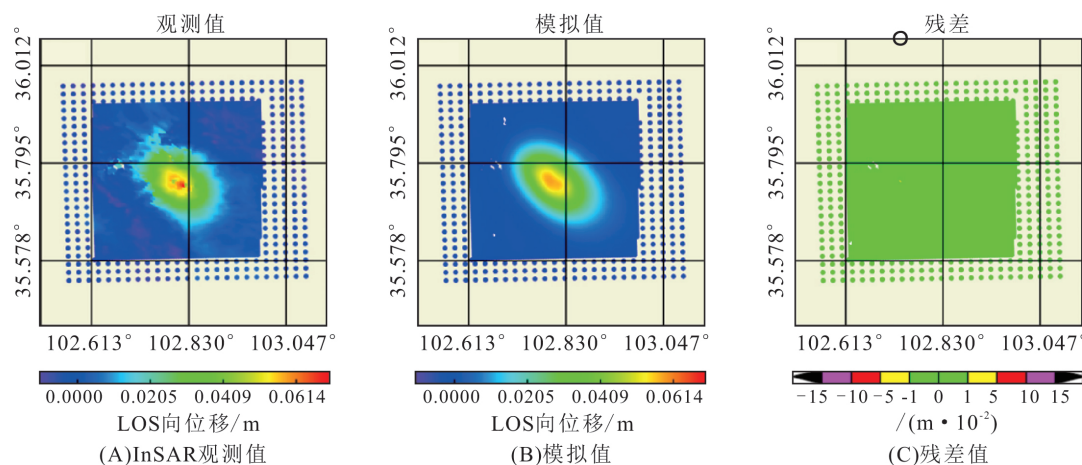


图 10 积石山地震降轨分布式滑动模拟

Fig. 10 Distributed sliding simulation of the descending orbit for the Jishishan earthquake

4 结论

本文利用 Sentinel-1 雷达卫星升、降轨影像, 基于 InSAR 技术获取了积石山 Ms 6.2 级地震的同震地表形变场, 以此为约束, 基于 Okada 弹性位错模型, 反演了本次地震的断层几何构造以及断层滑动分布, 得到以下主要认识。

a. 升、降轨 InSAR 干涉图均展示积石山地震序列清晰连续的同震形变场, 且形变场发生在拉脊山北缘与南缘断裂带之间, 主要形变区域范围达 25 km×15 km。升轨同震形变场沿雷达卫星 LOS 向最大抬升约 7.3 cm, 最大沉降约 3.8 cm; 降轨同震形变场沿雷达卫星 LOS 向最大抬升约 7.8 cm, 最大下沉约 3.4 cm。升、降轨同震形变场较为连续, 没有造成地表破裂, 符合逆冲型地震的运动特征。

b. 以 InSAR 数据为约束, 反演结果表明积石山地震为一次逆冲型地震, 发震断层长约 14.36 km, 宽 8.29 km, 断层破裂主要集中分布于地下 0~8 km, 断层倾角约 56.63°, 走向 310.29°, 最大滑动量约 0.31 m。

c. 与 2019 年 6 月 17 日四川长宁 Ms 6.0 级地震 InSAR 同震形变反演结果对比分析发现, 长宁地震 LOS 向地表最大形变量和断层最大滑动量均大于积石山地震, 但其导致的人员伤亡和房屋损毁均远小于积石山地震。推测积石山地震灾害损失严重的主要原因为震区居民房屋相对集中、房屋抗震性能差和黄土区场地地震波放大效应等。

致谢: 感谢欧空局提供 Sentinel-1 雷达卫星影像数据。

[参 考 文 献]

冯万鹏, 何晓慧, 张逸鹏, 等, 2023. 2022 年青海门源 Mw 6.6 地震的发震断层及孕震构造模式[J]. 科学通报, 68(Z1): 254—270.

Feng W P, He X H, Zhang Y P, *et al.*, 2023. Seismic faults of the 2022 Mw 6.6 Menyuan, Qinghai earthquake and their implication for the regional seismogenic structures[J]. Chinese Science Bulletin, 68 (Z1): 254—270. (in Chinese)

冯万鹏, 李振洪, 2010. InSAR 资料约束下震源参数的 PSO 混合算法反演策略[J]. 地球物理学进展, 25 (4): 1189—1196

Feng W P, Li Z H, 2010. A novel hybrid PSO/simplex algorithm for determining earthquake source parameters using InSAR data[J]. Progress in Geophysics, 25 (4): 1189—1196. (in Chinese)

韩炳权, 刘振江, 陈博, 等, 2023. 2022 年泸定 Mw 6.6 地震 InSAR 同震形变与滑动分布[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 48(01): 36—46.

Han B Q, Liu Z J, Chen B, *et al.*, 2023. Coseismic Deformation and Slip Distribution of the 2022 Luding Mw 6.6 Earthquake Revealed by InSAR Observations[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 48(01): 36—46. (in Chinese)

李振洪, 韩炳权, 刘振江, 等, 2022. InSAR 数据约束下 2016 年和 2022 年青海门源地震震源参数及其滑动分布[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 47(6): 887—897.

Li Z H, Han B Q, Liu Z J, *et al.*, 2022. Source parameters and slip distribution of the 2016 and 2022 Qinghai Menyuan earthquakes constrained by InSAR data Seismic Source Parameters and Slide Distribution[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 47(6): 887—897. (in Chinese)

李永生, 冯万鹏, 张景发, 等, 2015. 2014 年美国加州纳帕 Mw6.1 地震断层参数的 Sentinel-1A InSAR 反演[J]. 地球物理学报, 58(07): 2339—2349.

Li Y S, Feng W P, Zhang J S, *et al.*, 2015. 2014 Coseismic slip of the 2014 Mw6.1 Napa, California Earthquake revealed by Sentinel-1A InSAR [J]. Chinese Journal of Geophysics, 58(07): 2339—2349. (in Chinese)

刘云华, 汪驰升, 单新建, 等, 2014. 芦山 Ms7.0 级地震 InSAR 形变观测及震源参数反演[J]. 地球物理学报, 57(08): 2495—2506.

Liu Y S, Wang C S, Shan X J, *et al.*, 2014. 2014 Result of SAR differential interferometry for the co-seismic deformation and source parameter of the Ms7.0 Lushan Earthquake[J]. Chinese Journal of Geophysics, 57(08): 2495—2506. (in Chinese)

李奇, 孟国杰, 张奎, 等, 2015. 基于分区解缠方式研究 2010 年玉树 Mw6.9 地震同震形变[J]. 地震, 35 (03): 22—30.

Li Q, Meng G J, Zhang K, *et al.*, 2015. Coseismic Deformation of the 2010 Yushu Mw6.9 Earthquake Derived from Subregion Phase Unwrapping[J]. Earthquake, 35(03): 22—30. (in Chinese)

卢倩云, 郑茜, 孙建宝, 等, 2015. 基于新一代雷达卫星 InSAR 数据检测 2015 年尼泊尔 Mw7.8 级地震的同震

- 形变场[J]. 地球物理学进展,30(06):2505—2510.
- LU Q Y, Zheng Q, Sun J B, *et al.*, 2015, Coseismic deformation field of 2015 Nepal earthquake (Mw7.8) detected by new generation satellite radar interferometry data[J]. Progress in Geophysics,30(06):2505—2510. (in Chinese)
- 刘洋,许才军,温扬茂,2019. 门源 Mw5.9 级地震形变 InSAR 观测及区域断裂带深部几何形态[J]. 武汉大学学报(信息科学版),44(7):1035—1042.
- Liu Y, Xu C J, Wen Y M, 2019. InSAR Observation of Menyuan Mw5.9 Earthquake Deformation and Deep Geometry of Regional Fault Zone[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 44(7):1035—1042. (in Chinese)
- 刘计洪,胡俊,李志伟,等,2022. 融合哨兵 1 号和 ALOS-2 数据的 2021 年青海玛多地震高精度三维同震形变场研究[J]. 中国科学:地球科学,52(5):882—892.
- Liu J H, Hu J, Li Z W, *et al.*, 2022. Research on high-precision three-dimensional coseismic deformation field of the 2021 Maduo earthquake in Qinghai province by integrating Sentinel-1 and ALOS-2 data[J]. Scientia Sinica (Terrae), 52(5):882—892. (in Chinese)
- 毛燕,刘娜,段洪杰,等,2008. 震源破裂过程反演研究综述[J]. 地震研究,31(S2):642—645.
- Mao Y, Liu N, Duan H J, *et al.*, 2008. Summary of Inversion Study of Source Rupture Process[J]. Journal of Seismological Research, 31(S2):642—645. (in Chinese)
- 邱江涛,赵强,林鹏,2018. 2016 年新疆阿克陶 Ms6.7 地震 InSAR 同震形变与滑动分布特征[J]. 地震研究 41(3):415—422+489.
- Qiu J T, Zhao Q, Lin P, 2018. Characterization of InSAR coseismic deformation and sliding distribution of the 2016 Xinjiang Aketao MS 6.7 earthquake[J]. Journal of Seismological Research,41(3):415—422+489. (in Chinese)
- 单新建,屈春燕,龚文瑜,等,2017. 2017 年 8 月 8 日四川九寨沟 7.0 级地震 InSAR 同震形变场及断层滑动分布反演[J]. 地球物理学报,60(12):4527—4536.
- Shan X J, Qu C Y, Gong W Y, *et al.*, 2017. Coseismic deformation field of the Jiuzhaigou Ms 7.0 earthquake from Sentinel-1A InSAR data and fault slip inversion [J]. Chinese Journal of Geophysics, 60(12):4527—4536. (in Chinese)
- 铁永波,张宪政,曹佳文,等,2024. 积石山 Ms6.2 级和泸定 Ms6.8 级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),51(1):9—21+59.
- Tie Y B, Zhang X Z, Cao J W, *et al.*, 2024. Comparative research of characteristics of geological hazards induced by Jishishan (Ms 6.2) and Luding (Ms 6.8) earthquakes[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition),51(1):9—21+59(in Chinese)
- 温少妍,李成龙,李金,2020. 2020 年 1 月 19 日新疆伽师 Ms 6.4 地震 InSAR 同震形变场特征及发震构造初步探讨[J]. 内陆地震,34(1):1—9.
- Wen S Y, Li C L, Li J, 2020. Preliminary discussion on characteristics of coseismic deformation field and InSAR seismogenic structure for Xinjiang Jiashi Ms 6.4 earthquake on January 19th,2019[J]. Inland Earthquake,34(1):1—9. (in Chinese)
- 王绍俊,刘云华,单新建,等,2021. 2021 年云南漾濞 Ms 6.4 地震同震地表形变与断层滑动分布[J]. 地震地质,43(3):692—705.
- Wang S J, Liu Y H, Shan X J, *et al.*, 2021. Coseismic surface deformation and slip models of the 2021 Ms 6.4 Yangbi (Yunnan, China) earthquake[J]. Seismology and Geology,43(3):692—705. (in Chinese)
- 王立朝,侯圣山,董英,等,2024. 甘肃积石山 Ms 6.2 级地震的同震地质灾害基本特征及风险防控建议[J/OL]. 中国地质灾害与防治学报,1—11 [2024—01—02] <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2852.P.20231228.1352.002.html>.
- Wang L C, Hou S S, Dong Y, *et al.*, 2024. Basic characteristics of co-seismic geological hazards induced by Jishishan Ms 6.2 earthquake and suggestions for their risk control[J/OL]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control. 1—11 [2024—01—02] (in Chinese)
- 王勤彩,罗钧,陈翰林,等,2024. 2023 年 12 月 18 日甘肃积石山 6.2 级地震震源机制解[J/OL]. 地震,1—4 [2024—01—02]
- Wang Q C, Luo J, Chen H L, *et al.*, 2024. Focal Mechanism for the December 18, 2023, Jishishan Ms 6.2 Earthquake in Gansu Province[J/OL]. Earthquake. 1—4 [2024—01—02](in Chinese)
- 王运生,赵波,吉锋,等,2024. 2023 年甘肃积石山 Ms 6.2 级地震震害异常的启示 [J]. 成都理工大学学报(自然科学版). 51(1):1—8.
- Wang Y S, Zhao B, Ji F, *et al.*, 2024. Preliminary insights into some hazards triggered by the 2023 Jishishan Ms

6. 2 earthquake, Gansu Province [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 51(1):1-8. (in Chinese)
- 余祥伟,薛东剑,王海方,2020. 基于 D-InSAR 的长宁地震形变场提取与模拟[J]. 测绘通报,2020(5):59-63.
- Yu X W, Xue D J, Wang H F, 2020. Deformation field extraction and simulation of Changning earthquake based on D-InSAR [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2020(5):59-63. (in Chinese)
- 于书媛,方良好,宴金旭,等,2022. 运用 InSAR 技术解算四川长宁 Ms 6.0 地震三维形变场及时间序列形变分析[J]. 地震工程学报,44(6):1469-1477+1488.
- Yu S Y, Fang L H, Yan J X, *et al.*, 2022. Calculation of 3D deformation field and time series deformation of Changning M6.0 earthquake in Sichuan Province using InSAR[J]. China Earthquake Engineering Journal, 44(6):1469-1477+1488. (in Chinese)
- 杨亚夫,朱建军,王哲哲,等,2017. 利用 Sentinel-1A 数据、D-InSAR 和沿轨干涉技术获取 2016 年高雄 Ms6.7 地震三维形变场[J]. 大地测量与地球动力学,37(4):339-343.
- Yang Y F, Zhu J J, Wang Y Z, *et al.*, 2017. 3D Displacement Field of 2016 Kaohsiung Ms 6.7 Earthquake from D-InSAR and Along-track Interferometry with Ascending and Descending Sentinel-1A Images [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 37(4):339-343. (in Chinese)
- 中国地震台网中心. 12 月 18 日 23 时 59 分在甘肃临夏州积石山县发生 6.2 级地震[EB/OL]. [2023-12-27]. <https://www.cenc.ac.cn/cenc/dzxx/409064/index.html>.
- 张庆云,2019. InSAR 同震形变提取关键技术研究及其应用[D]. 中国地震局工程力学研究所,2019.
- Zhang Q Y, 2019. Research and Application of Key Technologies for InSAR Coseismic Deformation Extraction[D]. Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration. (in Chinese)
- 张波,2012. 西秦岭北缘断裂西段与拉脊山断裂新活动特征研究[D]. 中国地震局兰州地震研究所,2012.
- Zhang B, 2012. The study of new activities on western segment of northern margin of western Qinling fault and Lajihan fault [D]. Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Administration. (in Chinese)
- 张国宏,屈春燕,单新建,等,2011. 2008 年 Ms 7.1 于田地震 InSAR 同震形变场及其震源滑动反演[J]. 地球物理学报,54(11):2753-2760.
- Zhang G H, Qu C Y, Shan X J, *et al.*, 2011. The coseismic InSAR measurements of 2008 Yutian earthquake and its inversion for source parameters [J]. Chinese Journal of Geophysics, 54(11):2753-2760. (in Chinese)
- 左荣虎,屈春燕,张国宏,等,2016. 基于 Sentinel-1A 数据获取美国纳帕 Mw 6.1 地震同震形变场及断层滑动反演[J]. 地震地质,2016,38(2):278-289.
- Zuo R H, Qu C Y, Zhang G H, *et al.*, 2016. Coseismic displacement and fault slip of the Mw 6.1 napa earthquake in America revealed by Sentinel-1A InSAR data [J]. Seismology and Geology, 38(2):278-289. (in Chinese)
- 张双成,赵颖,张成龙,等,2024. 联合光学遥感和 SAR 影像青海玛多 Ms 7.4 级地震同震形变场分析[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版),1-20[2024-01-02]. (in Chinese)
- Zhang S C, Zhao Y, Zhang C L, *et al.*, 2024. Co-seismic Deformation Analysis of Qinghai Maduo Ms 7.4 Earthquake Based on Optical Remote Sensing and SAR Images [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 1-20[2024-01-02].
- Eineder M, Hubig M, Milcke B, 1998. Unwrapping Large Interferograms Using the Minimum Cost Flow Algorithm [C]//IGARSS'98. Sensing and Managing the Environment. 1998 IEEE International Geoscience and Remote Sensing, Seattle, USA, 1998, 83-87.
- Massonnet D, Feigl K L, 1998. Radar Interferometry and Its Application to Changes in the Earth's Surface [J]. Reviews of Geophysics, 36(4):441-500.
- Massonnet D, Rossi M, Carmona C, *et al.*, 1993. The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry [J]. Nature, 364(6433):138-142.
- Okada Y, 1992. Internal Deformation Due to Shear and Tensile Faults in a Half-Space [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 82(2):1018-1040.
- Song C, Yu C, Li Z H, *et al.*, 2019. Coseismic Slip Distribution of the 2019 Mw 7.5 New Ireland Earthquake from the Integration of Multiple Remote Sensing Techniques [J]. Remote Sensing, 2019, 11(23):2767.
- Wright T J, Parsons B E, Lu Z, 2004. Toward Mapping Surface Deformation in Three Dimensions Using InSAR [J]. Geophysical Research Letters, 31(1):L01607.

- Chinese)
- 熊亮,衡勇,2022. 中江沙溪庙组致密砂岩气藏气水分布及主控因素[J]. 西南石油大学学报(自然科学版),44(3):47—58.
- Xiong L, Heng Y, 2022. Gas and water distribution and main controlling factors of tight sandstone gas reservoirs in Shaximiao Formation, Zhongjiang[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Natural Science Edition), 44(03): 47—58. (in Chinese)
- 徐晓燕,刘畅,路媛媛,等,2021. L 区块上古生界致密砂岩气地层水特征及气水分布规律[J]. 石化技术, 28(06):151—152+172.
- Xu X Y, Liu C, Lu Y Y, *et al.*, 2021. Formation water characteristics and gas water distribution of Upper Paleozoic tight sandstone gas in block L [J]. Petrochemical Technology, 28(6): 151—152+172. (in Chinese)
- 曾凡成,张昌民,魏兆胜,等,2021. 火山活动影响下的致密砂岩气储层特征及气藏富集主控因素[J]. 地质学报, 95(3):895—912.
- Zeng F C, Zhang C M, Wei Z S, *et al.*, 2021. Characteristics of tight sandstone gas reservoirs under the influence of volcanic activity and main controlling factors for gas reservoir enrichment[J]. Acta Geologica Sinica, 95(3): 895—912. (in Chinese)
- 周翔,于世泉,张大智,等,2019. 松辽盆地徐深气田致密火山岩气藏气水分布特征及主控因素[J]. 石油与天然气地质, 40(5):1038—1047.
- Zhou X, Yu S Q, Zhang D Z, *et al.*, 2019. Characteristics and major controlling factors of gas-water distribution in tight volcanic gas reservoir in Xushen gas field, Songliao Basin [J]. Oil & Gas Geology, 40(5): 1038—1047. (in Chinese)
- 朱华银,徐轩,安来志,等,2016. 致密气藏孔隙水赋存状态与流动性实验[J]. 石油学报, 37(2): 230—236.
- Zhu H Y, Xu X, An L Z, *et al.*, 2016. An experimental on occurrence and mobility of pore water in tight gas reservoirs [J]. Acta Petrolei Sinica, 37(2): 230—236. (in Chinese)
- Liu G F, Xie S T, Tian W, *et al.*, 2022. Effect of pore-throat structure on gas-water seepage behaviour in a tight sandstone gas reservoir[J]. Fuel, 310(PB).
- Xie Z Y, Yang C L, Li J, *et al.*, 2021. Accumulation characteristics and large-medium gas reservoir-forming mechanism of tight sandstone gas reservoir in Sichuan Basin, China: Case study of the upper triassic Xujiahe formation gas reservoir[J]. Journal of Natural Gas Geoscience, 6(5).

(责任编辑:魏 巍)



(上接第 32 页)

- Wessel P, Luis J F, Uieda L, *et al.*, 2019. The Generic Mapping Tools version 6. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 20, 5556—5564.
- Xiao R Y, Yu C, Li Z H, *et al.*, 2021. Statistical Assessment Metrics for InSAR Atmospheric Correction: Applications to Generic Atmospheric Correction On-line Service for InSAR(GACOS) in Eastern China [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2021, 96: 102289.
- Yu C, Li Z H, Penna N T, 2018. Interferometric Synthetic Aperture Radar Atmospheric Correction Using a GPS-Based Iterative Tropospheric Decomposition Model[J]. Remote Sensing of Environment, 204: 109—121.
- Yu C, Li Z H, Penna N T, 2020. Triggered After-slip on the Southern Hikurangi Subduction Interface Following the 2016 Kaikoura Earthquake from InSAR Time Series with Atmospheric Corrections[J]. Remote Sensing of Environment, 251: 112097.
- Yu C, Li Z H, Penna N T, *et al.*, 2018. Generic Atmospheric Correction Model for Interferometric Synthetic Aperture Radar Observations[J]. Journal of Geophysical Research; Solid Earth, 123(10): 9202—9222.

(责任编辑:魏 巍)