引文格式:毛鸿飞,谢磊,江坤,等.青藏高原中强地震InSAR震源参数反演及其与地震目录的比较[J].武汉大学学报(信息科学版),2026,51(2):260-274.DOI:10.13203/j.whugis20240124

Citation:MAO Hongfei,XIE Lei,JIANG Kun,et al.Source Parameter Inversion of Moderate to Strong Earthquakes and Its Comparison with Earthquake Catalogs in Tibetan Plateau Based on InSAR Observations[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2026,51(2):260-274.DOI:10.13203/j.whugis20240124

青藏高原中强地震InSAR震源参数反演及其与地震目录的比较

毛鸿飞[1] 谢 磊[1] 江 坤[1] 孙 凯[1] 王嘉庚[1] 许文斌[1]

1 中南大学地球科学与信息物理学院,湖南 长沙,410083

摘 要:合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar,InSAR)技术具有高空间分辨率和高形变监测精度的特点,为研究浅源中强震级地震的震源机制提供了有力约束。采用InSAR相位堆叠和贝叶斯反演方法,构建了2014年10月至2022年10月发生在青藏高原的42次中强震级(Mw 4.8~6.6)地震的震源参数目录,探讨其与地震目录的差异。结果显示,与通用地震目录确定的地震质心深度相比,InSAR深度定位结果更浅;全球质心矩张量目录的震中位置存在系统性偏差;InSAR反演结果能够更精细地表达断层的几何形态。研究结果可更新和完善青藏高原的地震目录,为改进区域经验标度关系提供了重要依据,可服务于区域地震危险性评估。

关键词:青藏高原;浅源中强地震;InSAR震源参数反演;地震目录;经验标度关系

中图分类号:P315 **文献标识码**:A **收稿日期**:2025-04-15

DOI:10.13203/j.whugis20240124 **文章编号**:1671-8860(2026)02-0260-15

Source Parameter Inversion of Moderate to Strong Earthquakes and Its Comparison with Earthquake Catalogs in Tibetan Plateau Based on InSAR Observations

MAO Hongfei[1] *XIE Lei*[1] *JIANG Kun*[1] *SUN Kai*[1] *WANG Jiageng*[1] *XU Wenbin*[1]

1 School of Geoscience and Info-Physics,Central South University,Changsha 410083,China

Abstract: **Objectives**: Source parameters in earthquake catalogs are commonly derived from inversions of seismic-wave observations, but their reliability is often limited by the number and spatial distribution of local seismic stations and uncertainties in crustal velocity models.Interferometry synthetic aperture radar (InSAR) provides high-spatial-resolution, centimeter-level coseismic deformation measurements, offering an effective way to better constrain the source parameters of shallow earthquakes. However, the most existing InSAR-based studies have focused on larger events (Mw>6.0), whereas moderate earthquakes, which occur more frequently, remain comparatively underexplored, and a comprehensive, systematic InSAR earthquake catalog has not yet been established. The Tibetan Plateau is an ideal region for developing an InSAR earthquake catalog, given its limited seismic-station density, commonly low seismic signal-to-noise ratios, and generally good InSAR coherence for coseismic deformation monitoring. Here, we develop and analyze an InSAR-based catalog of moderate earthquakes across the Tibetan Plateau and evaluate its differences from conventional earthquake catalogs. **Methods**: We constructed a catalog of source parameters for 42 moderate-to-strong shallow earthquakes (Mw 4.8-6.6) on the Tibetan Plateau from October 2014 to October 2022. We first assessed the quality of coseismic Sentinel-1 interferograms available from the Alas-

基金项目:国家自然科学基金(42174023,42304037);国家杰出青年基金项目(41925016);国家重点研发计划(2022YFB3903602);湖南省自然科学基金重点项目(2024JJ3031);中南大学前沿交叉研究项目(2023QYJC006)。

第一作者:毛鸿飞,硕士,主要从事中小地震同震形变场获取及参数反演研究。hongfei@csu.edu.cn

通信作者:许文斌,博士,教授。wenbin.xu@csu.edu.cn

ka Satellite Facility (ASF) platform. Depending on interferogram quality, we applied two processing strategies.For high-quality events, we utilize generic atmospheric correction online service for InSAR (GACOS) assisted differential InSAR (D-InSAR) approach. For low-quality events, we adopted a phase-stacking strategy. These procedures yielded coseismic deformation fields for all 42 earthquakes, which were then used to invert earthquake source parameters within a Bayesian framework. **Results:** The inverted events comprise 13 thrust, 10 normal, and 19 strike earthquakes. Overall, the model fits are good, with root mean square (RMS) misfits below 2 cm for the majority of events. Parameter reliability and uncertainty were further evaluated through comparisons with published studies and by examining the posterior credible intervals from the Bayesian inversions. Compare to conventional earthquake catalogs, the InSAR-derived catalog provides more accurate centroid depths and horizontal locations. Depth discrepancies reported in conventional catalogs can reach 4-11 km. Among the existing catalogs, the China Earthquake Networks Center (CENC) solutions show higher horizontal location accuracy than United States Geological Survey (USGS) and Global Centroid Moment Tensor (GCMT), with a mean offset of 7.4 km, whereas the GCMT locations exhibit a 11.9 km systematic bias and a distinct spatial pattern that correlates with topography, trending from high-elevation regions toward lower elevations. In contrast, fault-geometry parameters reported by conventional catalogs are broadly consistent with the InSAR solutions. The absolute differences are 10°-11° in dip and 9°-10° in strike. This study further integrates the InSAR-based catalog with previously published source datasets to derive empirical scale relationships for earthquakes over a broader magnitude range (Mw 4.8-8.03) on the Tibetan Plateau. **Conclusions:** The study shows that the InSAR-derived catalog significantly supplements the existing global catalog and can improve empirical scale relationships, facilitating scientific reference for regional seismic risk assessment.

Key words: Tibetan Plateau; shallow moderate to strong earthquake; InSAR source parameter inversion; earthquake catalogs; empirical scaling relationship

地震目录是对地震信息的编录和报告,为了解和研究地震产生机制与地壳性质提供了基本数据。国际上常用的地震目录包括:美国地质调查局(United States Geological Survey,USGS)目录[1]、全球质心矩张量(Global Centroid Moment Tensor,GCMT)目录[2]和中国地震台网(China Earthquake Networks Center,CENC)目录等[3-5]。地震目录中的震源参数通常基于地震波(P/S波)反演得到,反演结果受到局部地震台站的数量、空间分布及地壳速度模型等因素的限制[6-9],震源深度偏差可达十千米[10-11]。近年来,随着合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar,InSAR)技术的发展和数据的丰富,InSAR在地震周期形变研究中的应用越来越广泛[2,12-14]。利用InSAR技术获取的高精度(厘米级)同震形变场,为更精确的地震震源参数获取提供了可能[2,15-17]。

目前,已有许多学者开展了InSAR震源参数编目的相关研究。文献[18-19]通过比较57次全球地震事件(Mw 5.0~8.4)的InSAR震源参数与通用地震目录震源参数,发现两者确定的地震矩相互兼容,而非此前认为的基于InSAR观测反演得到更大的地震矩[20-21],且地壳结构的不确定性是InSAR反演震源位置误差的重要来源。文献[22]也对全球范围内地震目录和InSAR目录中的56次中大型地震(Mw>6.0)的震源参数进行了全面比较,讨论了地震台站分布、数据覆盖范围对震源参数不确定性的影响。文献[23]对中国西部33次中小地震InSAR震源参数与地震目录震源参数的对比研究表明,地震目录中矩张量解的非双力耦分量的比例关系是不确定性水平的一个重要影响因素。已有研究提供了对InSAR地震目录与通用地震目录之间差异的不确定性来源的重要见解。然而,这些已有研究大多面向震级较大的地震事件(Mw>6.0),对发生频率远高于强震的中强地震研究较少,且尚未形成完备的系统性InSAR地震编目[24-26]。

青藏高原受印度板块和欧亚板块碰撞的影响,地质构造活跃,地震频发,是国内外地学研究的热点区域[27-28],许多浅层中强震已经通过InSAR方法进行了研究[29-32]。然而,受限于青藏高原地震台站稀缺且数据信噪比低,利用地震波反演得到的浅源中强地震的震源参数无法被准确约束[33-34]。而文献[23]的研究已表明利用InSAR

堆叠方法可以显著抑制大气噪声并增强对中小震级地震的同震形变监测能力,且InSAR数据在青藏高原地区的同震形变监测中能保持较好的相干性,是开展InSAR地震目录研究比较理想的研究区域。

因此,为了深入分析中强地震InSAR地震目录及其与通用地震目录的差异,本文以USGS目录中2014年10月至2022年10月发生在浅层的中强地震作为研究对象,构建了青藏高原区域较为完整的InSAR地震目录。具体而言,首先判定阿拉斯加卫星设施(Alaska Satellite Facility,ASF)平台同震InSAR干涉图质量,随后分别对高质量和低质量的地震事件采用通用型大气改正在线服务(generic atmospheric correction online service for InSAR,GACOS)辅助的差分InSAR(differential InSAR ,D-InSAR)方法和相位堆叠方法对Sentinel-1干涉图进行数据处理,获取了42次地震的同震形变场并反演其震源参数;最后将InSAR反演震源参数与地震目录震源参数进行系统对比,并采用一般正交回归(general orthogonal regression, GOR)构建新经验标度关系[35]。

1 数据与方法

1.1 研究区域概况与研究数据

本研究根据USGS地震目录搜索到青藏高原地区的200余次浅源中强地震,然后基于InSAR技术得到了42次具有显著地表形变的地震事件,其余地震事件由于震级太小或深度太深无法得到可用形变场。使用数据源为地震发生前后的C波段Sentinel-1影像,收集每次地震事件相应的升降轨数据,以提高模型的分辨率并减少源参数的不确定性[36-38]。其中,2021-03-23拜城Mw 5.3地震,2018-09-08墨江Mw 5.7地震,2020-01-16库车Mw 5.2地震,2020-03-09洞措Mw 5.2地震只有升轨数据可用。

1.2 InSAR同震形变数据处理

本研究首先采用ASF干涉图在线生成云平台(https://search.asf.alaska.edu/)对从USGS地震目录中搜索到的200余次地震事件进行处理。选取地震事件发生前后最近的两景合成孔径雷达(synthetic aperture radar,SAR)影像组成干涉对,通过ASF云平台获得干涉图。从中选择了70次最有可能产生可测量地表变形的地震事件,根据干涉图的质量及形变场的显著水平选择不同的方法进行数据处理,整体流程如图1所示。

对于ASF平台处理干涉图质量良好的地震事件,其同震形变场量级显著高于噪声量级,采用D-InSAR方法结合GACOS[39]大气校正即可获取高精度同震形变场。首先,使用GAMMA软件处理主辅SAR影像,距离向和方位向的多视比设为10∶2,使用30 m分辨率的航天飞机雷达地形测绘数字高程模型(shuttle radar topography mission,SRTM)去除地形相位;然后,采用Goldstein自适应滤波进一步提高信噪比,选用最小费用流法完成相位解缠;最后,利用GACOS外部大气产品对解缠干涉图进行大气延迟改正,削弱对流层延迟误差。

对于ASF平台处理干涉图质量较差的地震事件,其同震形变场量级为厘米至亚厘米级,往往被厘米级的大气延迟信号掩盖,仅靠常规D-InSAR方法难以准确可靠地提取到同震形变场。采用GACOS辅助下的相位堆叠方法来削弱大气误差对此类地震事件的影响,并恢复同震形变场。收集地震前后10~25幅SAR影像,通过相位堆叠方法将GACOS校正后的干涉图进行相位平均,削弱在时域随机的大气延迟湍流分量,提高信噪比。考虑到中型震级地震的震后形变量远小于干涉图噪声,该研究认为多时相干涉图堆叠引入的震后形变可以忽略不计。

1.3 震源参数反演与经验标度模型建立

利用大地测量贝叶斯反演软件(geodetic Bayesian inversion software,GBIS)[40]反演升降轨同震形变图,获得震源参数。首先,利用半变异函数量化表征同震形变场中的残余误差,以实现对升降轨数据的定权,并采用基于变形梯度的自适应四叉树采样方法对同震形变场进行降采样[41]。基于Okada弹性半空间位错模型反演描述断层大小(宽度和长度)、几何形状(走向角和倾角)、三维位置(经度、纬度和深度)和均一滑动量(倾滑分量和走滑分量)的9个断层参数。反演过程中,假设泊松比为0.25,计算得到均匀弹性半空间中的静态格林函数。对于仅为厘米级地表形变的中小地震(Mw<5.5),InSAR观测不能提取到显著的地表形变,从而无法有效约束发震断层的走向角与倾角[42]。因此,根据通用地震目录(如GCMT)的震源机制解约束其初始走向和倾角,仅反演其最佳位置、深度和滑动矢量等参数。在进行震源参数反演时,扩大各参数初始范围,结合各参数收敛情况、数据拟合情况及区域地质构造背景选择合适的断裂面。

基于上述InSAR反演的断层模型数据,应用GOR推导青藏高原及其周边地区地震事件矩震级M与破裂宽度W、破裂长度L、破裂面积A($L\times W$)之间的经验标度关系。前人研究结果表明,InSAR反演得到的矩震级与地震目录所给出的矩震级差异很小,不会影响经验标度模型的建立,故在经验标度关系的建立中直接使用地震目录中给出的矩震级数值[43]。根据文献[44]的研究,在数据的整个范围内或者部分范围内,经验标度关系通常表现为双对数空间中的线性关系。由式(1)建立断层模型数据(L、W、A)和矩震级M之间的数学关系,进而估计出该线性关系中的截距a和斜率b参数,其计算式为:

$$\lg c = b\lg E + a \tag{1}$$

式中,E为地震矩;c为断层模型数据。

矩震级M与其地震矩E间为对数线性关系,其计算式为:

$$\lg E = 1.5M + 9.05 \tag{2}$$

结合式(1)和式(2),便可建立断层模型数据和矩震级之间的数学关系。

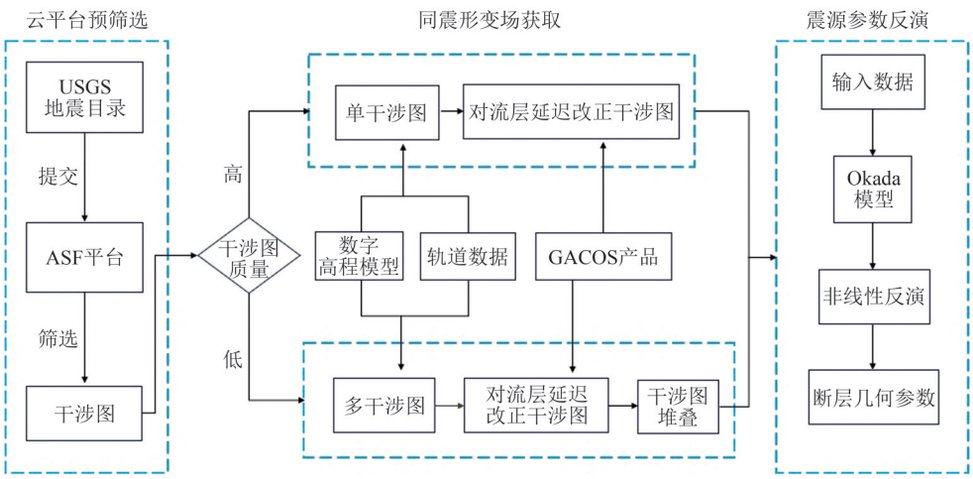


图1　InSAR地震目录数据处理流程图

Fig. 1　Schematic Diagram of Seismic Cataloging Process Using InSAR Data

2　反演结果及与地震目录的系统对比

2.1　InSAR同震形变场与震源参数反演结果

基于上述处理策略,本文共获取了覆盖青藏高原的42次具有显著地表形变的地震事件(表1),包含逆冲、正断和走滑事件的个数分别为13、10和19(图2)。为了评价InSAR同震形变场的质量,将每次地震升降轨的形变区域掩膜,计算非形变区域的标准差(standard deviation,STD)。Mw<5.5的地震事件STD基本均小于1 cm,Mw≥5.5的地震事件STD大多为1~2 cm,几次地质构造背景复杂的地震事件STD大于2 cm。结果表明,获取的InSAR同震形变场结果质量良好,信噪比高,可以作为输入参数用于后续反演。反演结果显示,拟合情况总体良好,地震事件正演模拟值与观测形变场之间的均方根误差(root mean square,RMS)小于2 cm;对于变形模式相对复杂的个别地震事件(2017-08-08九寨沟Mw 6.5地震,2016-11-25阿克陶Mw 6.6地震)正演模拟值与InSAR观测值的RMS为2~5 cm,考虑到这两次事件的发震断层不止一条[45-46],尽管采取的单断层建模反演策略精度有限,但模拟结果总体能较好地还原观测形变场。此外,2021-03-20双湖Mw 5.2地震在USGS和GCMT目录中缺乏震源机制解,无法约束其初始走向角与倾角,但由于其破裂尺寸较小、变形模型相对简单,反演结果良好,参数收敛,符合变形特征。

2.2　InSAR震源参数不确定性分析

为了进一步说明本文研究与文献[23]中反演结果的差异性,将两者之间相同的23次地震事件进行了对比(图3)。由图3可以看出,两个研究所产生的InSAR地震目录在质心深度、水平位置、倾角和走向的确定上整体一致。质心深度的平均差异为-0.3 km,水平位置的平均差异为2.3 km,上述差异可能来自于数据降采样的策略及参考点的选择。断层倾角的对比结果中有两次地震事件的差异较大(第3和21号事件),这是因为选取了不同节面的震源机制解。如果不考虑这两次地震事件,断层倾角的平均差异为-2.8°,断层走向的结果一致性很高,平均差异为-1.3°。

表1 本文构建的InSAR地震目录

Table 1 InSAR-Based Earthquake Catalog Constructed in This Study

序号	日期	地点	经度	纬度	深度/km	走向/(°)	倾角/(°)	倾向/(°)	矩震级
1	2019-01-03	珙县	104.85°E	28.22°N	1.47	169.1	58.9	47.3	4.8
2	2018-05-06	杂多	96.59°E	34.55°N	3.41	156.4	78.4	172.0	5.0
3	2019-09-07	威远	104.81°E	29.58°N	3.61	206.0	18.8	44.2	5.0
4	2017-02-01	仲巴	83.41°E	30.68°N	4.66	347.6	28.9	−65.3	5.1
5	2016-12-04	聂荣	92.18°E	32.36°N	5.58	238.5	76.4	167.2	5.2
6	2020-01-16	库车	83.65°E	41.22°N	2.86	254.0	42.1	−8.2	5.2
7	2020-03-09	洞措	85.57°E	32.84°N	6.46	49.6	77.1	−6.2	5.2
8	2021-03-20	双湖	98.91°E	33.04°N	3.63	28.1	51.0	−74.1	5.2
9	2021-03-23	拜城	81.06°E	41.78°N	1.57	74.5	83.6	−164.3	5.3
10	2016-05-22	定结	87.63°E	28.47°N	4.21	11.4	60.6	−56.0	5.4
11	2017-05-10	塔什库尔干	75.29°E	37.65°N	6.86	138.7	33.1	−100.3	5.4
12	2019-09-24	克什米尔	73.76°E	33.10°N	6.59	104.0	87.7	45.2	5.4
13	2020-04-01	石渠	87.71°E	34.38°N	4.70	34.7	76.5	0.3	5.4
14	2021-08-13	玛多	97.54°E	34.56°N	4.03	287.3	89.8	5.9	5.4
15	2021-09-15	威远	93.91°E	38.07°N	4.35	312.2	47.5	75.4	5.4
16	2021-03-29	西藏	83.50°E	34.74°N	5.58	219.9	47.1	−62.1	5.5
17	2021-06-16	青海	105.35°E	29.20°N	1.98	135.0	64.1	82.2	5.5
18	2021-11-30	尼玛	87.99°E	31.78°N	7.95	359.0	49.9	−89.5	5.5
19	2022-01-23	青海	97.36°E	38.46°N	5.08	350.0	62.9	−176.2	5.6
20	2015-04-25	定结	87.43°E	28.42°N	9.20	354.2	74.4	−125.8	5.7
21	2018-09-08	墨江	101.58°E	23.28°N	5.85	53.1	73.2	−20.8	5.7
22	2020-03-20	定结	87.41°E	28.67°N	3.80	142.1	58.8	−92.9	5.7
23	2021-03-19	那曲	92.87°E	31.92°N	8.21	57.0	63.5	−42.3	5.7
24	2022-03-25	青海	97.35°E	38.49°N	6.06	180.9	89.4	−14.1	5.7
25	2022-08-14	那曲	92.88°E	33.24°N	4.19	157.0	81.8	11.3	5.7
26	2018-12-23	谢通门	87.72°E	30.32°N	6.31	360.0	51.0	−71.6	5.8
27	2019-06-17	长宁	104.89°E	28.40°N	2.55	121.8	8.8	−5.6	5.8
28	2014-11-22	康定	101.68°E	30.28°N	8.80	323.6	69.8	−1.4	5.9
29	2016-01-20	门源	101.61°E	37.66°N	8.95	154.3	45.6	114.0	5.9
30	2016-12-08	呼图壁	86.32°E	43.81°N	10.98	89.0	57.9	124.3	6.0
31	2020-01-19	伽师	77.26°E	39.89°N	7.56	95.7	11.6	103.4	6.0
32	2021-05-21	漾濞	99.92°E	25.64°N	4.17	312.4	87.6	9.5	6.1
33	2017-08-08	精河	82.68°E	44.29°N	14.56	250.2	23.1	61.9	6.3
34	2020-06-25	于田	82.45°E	35.61°N	6.14	6.9	66.6	−95.2	6.3
35	2020-07-22	尼玛	86.89°E	33.19°N	7.24	211.6	51.1	−69.4	6.3
36	2015-07-03	皮山	78.03°E	37.57°N	9.94	292.0	22.9	87.8	6.4
37	2016-06-26	吉尔吉斯斯坦	73.62°E	39.44°N	10.60	268.5	17.7	83.9	6.4
38	2017-11-17	林芝	95.11°E	29.74°N	5.49	98.7	11.5	60.5	6.4
39	2017-08-08	九寨沟	103.85°E	33.22°N	6.01	328.8	59.2	−15.7	6.5
40	2016-11-25	阿克陶	74.24°E	39.22°N	5.73	285.0	80.3	−12.2	6.6
41	2022-01-07	门源	101.28°E	37.78°N	6.13	287.1	84.0	1.8	6.6
42	2022-09-05	泸定	102.16°E	29.55°N	6.08	167.4	73.7	178.5	6.6

以贝叶斯反演方法给出的参数最优值及其95%置信区间作为震源参数反演不确定性分析的依据。通过马尔可夫链蒙特卡罗(Markov chain Monte Carlo,MCMC)抽样方法进行抽样表征后验概率分布,使用Metropolis-Hastings算法控制采样,经过1×10^6次迭代后,样本密度近似于后验分布。本文地震目录中包含深度、水平位置东西向分量、走向和倾角的参数不确定性(图4、表2),但需要注意,部分参数不确定性区间越小不能直接代表反演的结果越准确,可能包含

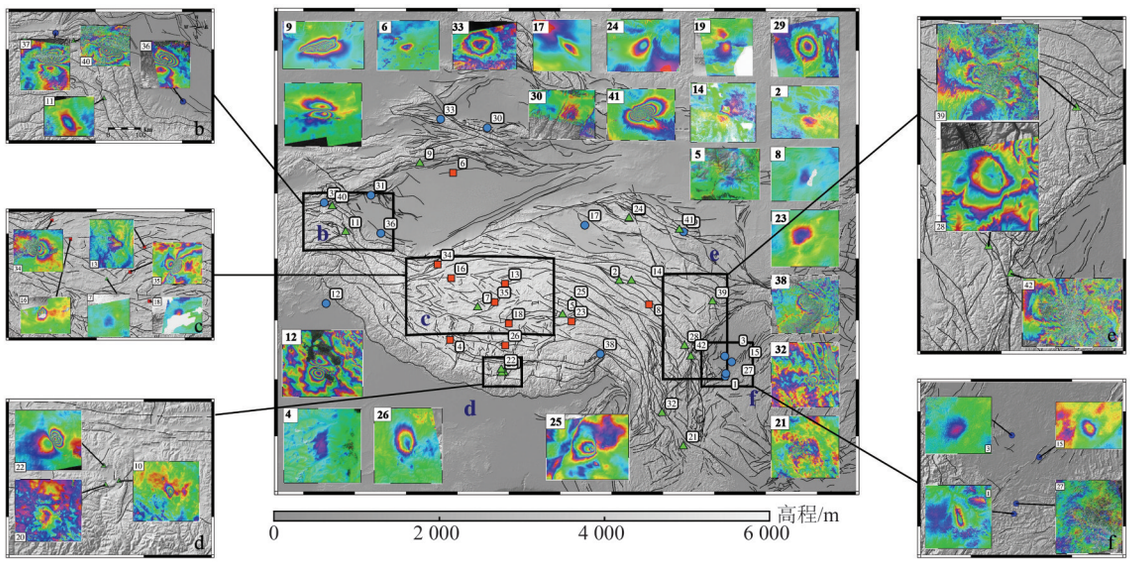


图 2　青藏高原 42 次地震的 InSAR 同震干涉图

Fig. 2　Compilation of Coseimic Deformation Maps in Tibetan Plateau

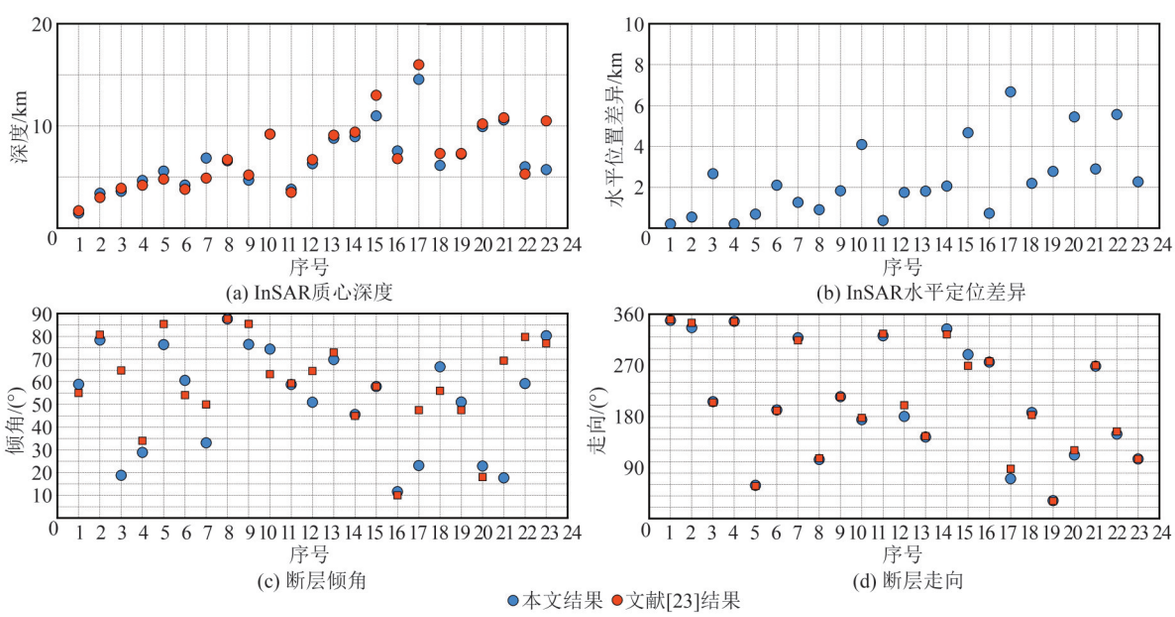


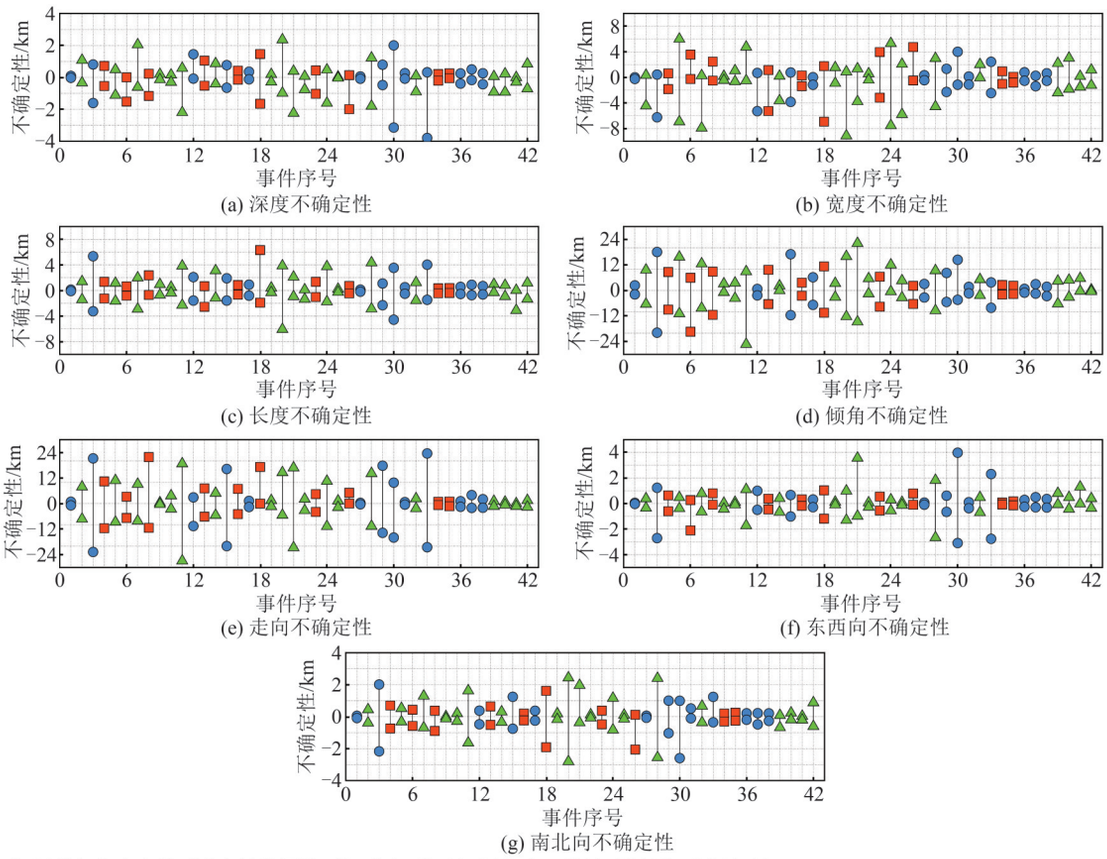
图 3　相同震例 InSAR 震源参数比较

Fig. 3　Comparison of InSAR Source Parameters in Same Earthquake Cases

数据处理及模型误差。本文将断层长度和宽度的不确定性也进行了展示,用于证明模型反演的可靠性。在断层位置确定方面,42 次地震事件的平均位置不确定性在东西、南北和深度均为 0.7 km。位置参数不确定性较大的地震事件与深度呈现出正相关关系而与震级无明显的相关性,深度较深的地震位置参数不确定性区间更大(表 1、图 4(f)~4(g)),这表明 InSAR 观测对深源地震参数的约束较差。对于断层产状参数,其不确定性呈现随震级的增大而减小的趋势(图 4(d)~4(e)),主要是大的地震事件其同震信号信噪比一般更高。不同震源机制下的断层产状不确定性差异较小,逆冲、正断、走滑机制的走向不确定性分别为 8.2°、6.2°、6.4°;倾角不确定性分别为 5.8°、6.9°、6.9°。文献[23]的 InSAR 地震目录显示走滑机制的断层产状不确定性相比于逆冲和正断机制的断层产状更小,可能是由于其收录的走滑地震较少且震级较大,而本文研究中包含较多震级较小的走滑地震,增加了其平均不确定性。

2.3　InSAR 震源机制目录与通用地震目录对比

1)质心深度差异对比。将非线性反演后归一化的质心深度与通用地震目录进行对比分析。对于 InSAR 非线性反演得到的均匀滑动模型,可利用断层几何信息(断层倾角、宽度以及断层上



注:误差条代表参数不确定性的置信区间,蓝色-逆冲机制,红色-正断机制,绿色-走滑机制。

图4 震源参数不确定性

Fig. 4 Uncertainty of Inverted Source Parameters

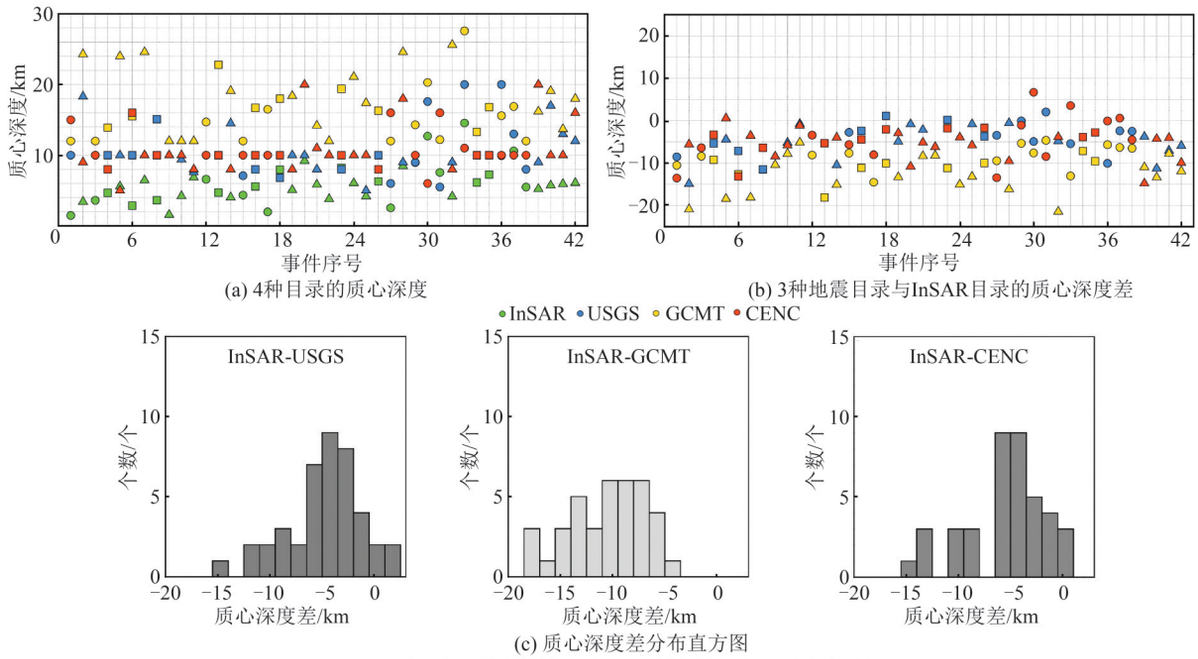
表2 震源参数平均不确定性

Table 2 Mean Uncertainties of Inverted Source Parameters

震源机制	深度/km	宽度/km	长度/km	倾角/(°)	走向/(°)	东西向/km	南北向/km
逆冲	0.73	1.48	1.54	5.81	8.23	0.92	0.67
正断	0.69	2.06	1.26	6.90	6.23	0.52	0.64
走滑	0.73	2.63	1.67	6.89	6.38	0.67	0.72
整体	0.72	2.14	1.53	6.56	6.91	0.71	0.69

边沿中点距离地表的深度)均一化后获取其质心深度,以此对地震事件的深度特征进行表征。质心深度对比结果表明,InSAR目录的质心深度与USGS、GCMT、CENC地震目录的质心深度差异均值分别为4.7 km、11.1 km、4.9 km(表3),其与USGS、CENC目录的质心深度之间的差异小于GCMT目录(图5(a)、5(b))。对于浅源中强地震而言,InSAR数据反演的深度理论上更接近实际质心深度,可作为参考值[47]。而通用地震目录中5~10 km左右的深度偏差可能与地震目录的采样偏差有关[23],且通用地震目录会为难以约束的小震级地震事件质心深度赋予一个固定值,其中USGS和CENC目录默认深度为10 km,GCMT目录默认深度为12 km。

2)水平位置差异对比。将InSAR数据反演的水平质心位置对比USGS、GCMT、CENC地震目录中水平位置参数。USGS和CENC目录中地震位置在距离InSAR位置15 km以内的事件占比分别为83%和85%,GCMT目录中有9个地震事件的位置差异达到了15~30 km(图6)。InSAR解与USGS、CENC的水平位置差异存在随震级增大而增大的趋势,与GCMT的水平位置差异则未发现这种趋势。InSAR解与CENC目录之间的偏差为7.4 km,小于其与USGS和GCMT目录之间的偏差(分别为8.8 km和11.9 km)(表4)。这是因为CENC目录在青藏高原及周边地区有更多的区域地震台站,具有近实时系统,可以自动处理波形数据获取更准确的地震位置[3,5]。



(a) 4种目录的质心深度　(b) 3种地震目录与InSAR目录的质心深度差

(c) 质心深度差分布直方图

注:圆形-逆冲机制,正方形-正断机制,三角形-走滑机制。

图 5　InSAR 解与地震目录质心深度比较

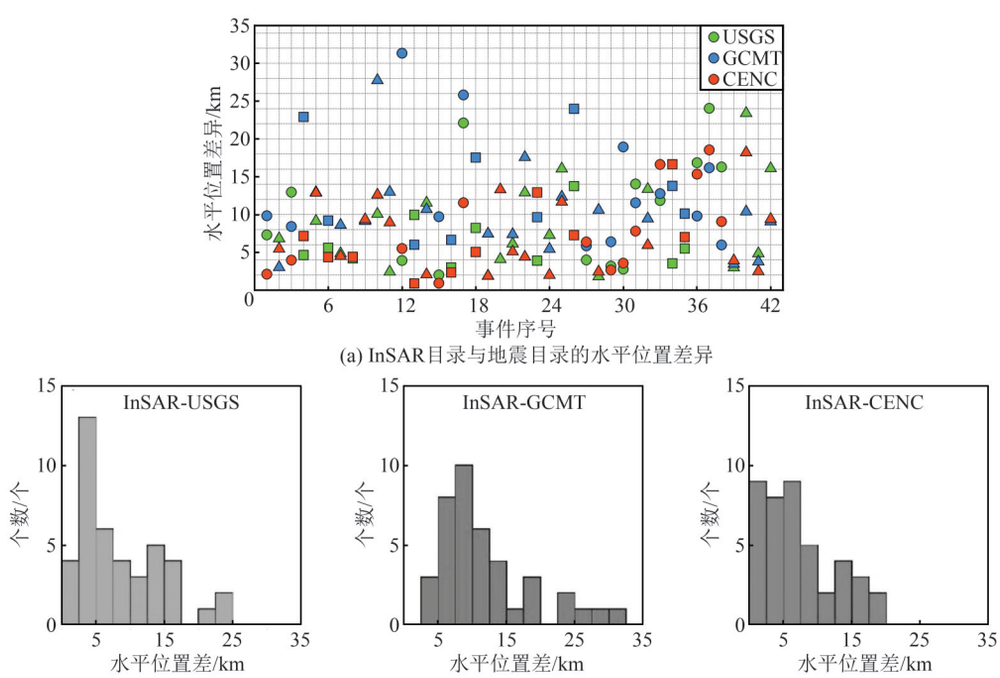
Fig. 5　Comparison of InSAR Solution and Seismic Catalogs on Centroid Depth

表 3　质心深度平均差异/km

Table 3　Mean Difference in Centroid Depth/km

目录	逆冲	正断	走滑	整体
USGS	4.3	4.06	5.26	4.67
GCMT	8.29	11.01	13.09	11.06
CENC	4.13	4.47	5.74	4.94

通过对比不同地震目录与 InSAR 解水平位置差异的地理分布发现,GCMT 目录中青藏高原南部地区地震事件的水平位置差异显著大于其他区域,达 20 km 以上,且在藏南地区 GCMT 目录定位均在 InSAR 解的南方,如图 7 所示。GCMT 目录与 InSAR 解定位差异矢量显示出比较



(a) InSAR目录与地震目录的水平位置差异

(b) 水平位置差分布直方图

注:圆形-逆冲机制,正方形-正断机制,三角形-走滑机制。

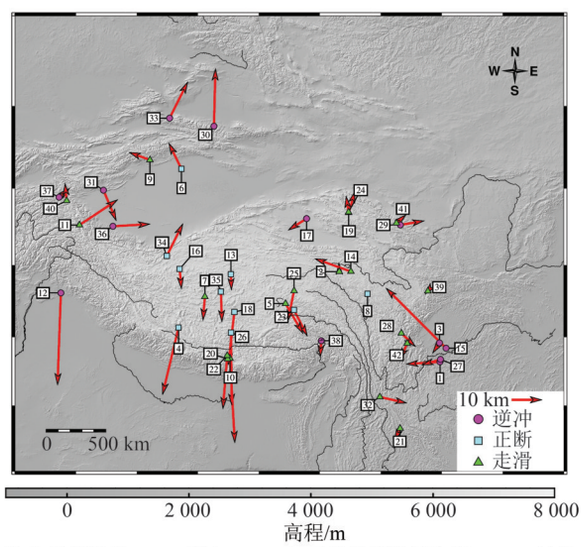
图 6　InSAR 解与地震目录之间的水平定位差异比较

Fig. 6　Horizontal Location Differences Between InSAR Solutions and Seismic Catalogs

表4 水平位置平均差异/km

Table 4 Mean Difference in Horizontal Location/km

目录	逆冲	正断	走滑	整体
USGS	10.88	6.24	8.69	8.79
GCMT	13.28	13.32	10.12	11.87
CENC	8.01	6.82	7.19	7.35



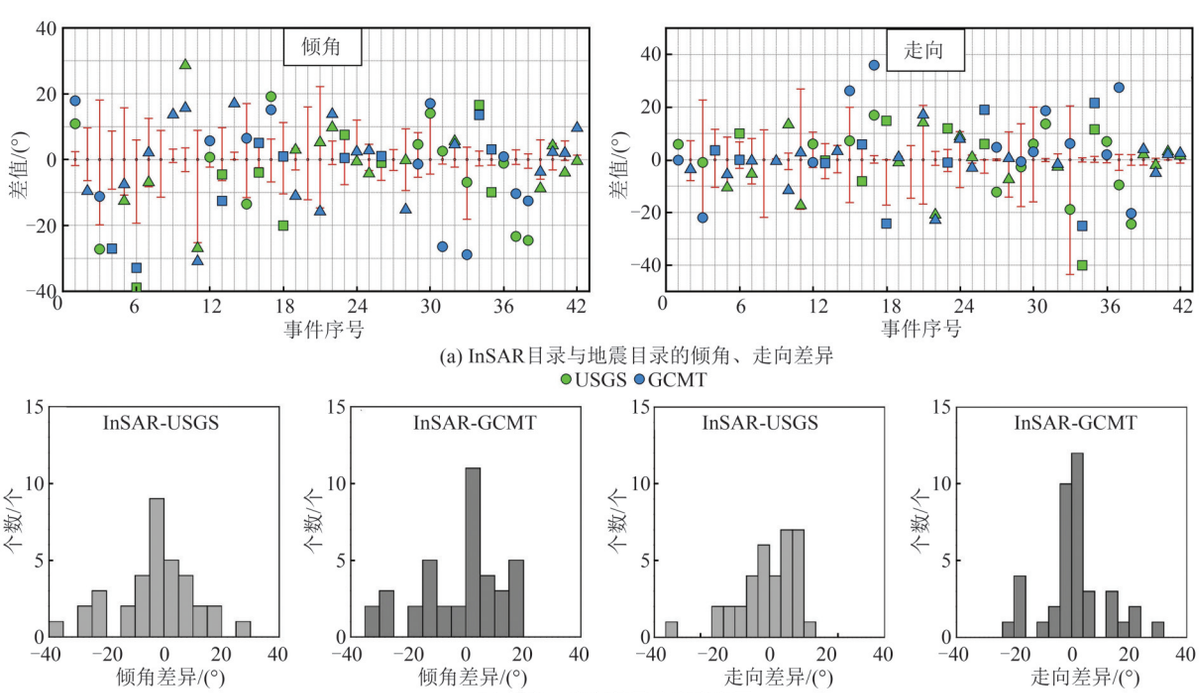
注:红色箭头为InSAR解与GCMT目录的位置差异矢量,GCMT地震目录中没有收录8号和20号事件。

图7 InSAR与GCMT位置差异矢量

Fig. 7 Horizontal Differences Between InSAR Solution and GCMT Catalogs

明显的指向性,即由高海拔地区指向低海拔地区,如藏南地区、准噶尔盆地(表1中30和33号事件)以及塔里木盆地周边的地震事件(表1中11、31、34和36号事件)。而在USGS和CENC目录中并没有发现此类空间分布特征。

3)断层几何参数对比。将InSAR解算出的断层几何参数(走向角和倾角)与USGS和GCMT目录震源机制解中报告的断层几何参数进行比较。其中,8号事件(2021-03-20双湖Mw 5.2)和20号事件(2015-04-25定结Mw 5.7)没有USGS和GCMT目录的震源机制解,将其剔除。结果表明,InSAR和通用地震目录中的震源机制解平均差异较小,InSAR解的不确定度覆盖了大部分地震事件地震目录解与InSAR解的差异,两者之间具有较高的一致性(图8)。震源机制解与地震震级之间没有发现明显的相关性,但倾角值在震级较小的几个地震事件中差异较大(图8(a)中1、3、6、10、11号地震事件),且没有出现系统性偏差。USGS目录与InSAR断层几何参数的走向值更接近,GCMT目录与InSAR断层几何参数的倾角值更接近,USGS与GCMT目录的倾角平均差异分别为-3.1°、-2.2°,走向角平均差异分别为-0.6°、1.6°。对于不同震源机制的地震事件,USGS和GCMT目录中记录的走滑地震事件与InSAR解差异最小,走向值差异比逆冲和正断机制小30%~0%(表5)。这表明对于中强震级地震,USGS和GCMT目录中走滑地震事件的断层几何参数比倾滑事件更加可靠。



(a) InSAR目录与地震目录的倾角、走向差异

(b) 倾角、走向差异分布直方图

注:圆形-逆冲机制,正方形-正断机制,三角形-走滑机制,部分地震事件无可用的USGS、GCMT地震目录解。

图8 InSAR解与地震目录的断层几何参数差异

Fig. 8 Geometric Differences Between InSAR Solutions and Seismic Catalogs

表 5　断层几何参数平均绝对值差异/(°)

Table 5　Mean Absolute Differences in Fault Strike and Dip Angles/(°)

震源机制	倾角		走向	
	USGS	GCMT	USGS	GCMT
逆冲	12.38	12.83	10.11	12.95
正断	12.80	10.74	12.86	11.29
走滑	8.07	9.98	7.41	5.30
整体	10.63	11.03	9.60	9.13

2.4　区域震源参数标度关系

本文中涵盖的中强地震事件(Mw 4.8～6.6)既包括天然地震也包括诱发地震,与强震的发震机制有一定的区别。根据已处理的 42 次地震推导了经验标度关系(图 9(a)、表 6),并采用 Lilliefors 假设检验对其进行正态性检验(图 10),其中图 10 中从上至下分别为 M-LgW、M-LgL、M-LgA 回归残差正态概率图。由图 10 可以看出,逆冲地震事件矩震级与宽度的标度关系、走滑地震事件矩震级与面积标度关系的残差不满足假设检验。这表明经验标度关系不能很好地约束小震级地震,但是计算出的断层尺寸在震源物理上仍然是合理的。因此本文结合已发表的不同震源机制的大震级地震事件的 30 个破裂模型作为补充[22],进一步推导研究区域内的经验标度关系(图 9(b)、表 7)。由图 11 可以看出,Lilliefors 检验显示除逆冲地震事件的宽度与矩震级间的标度关系的残差不满足假设检验外,其余标度关系的残差均符合正态分布,表明该标度关系模型更具合理性。

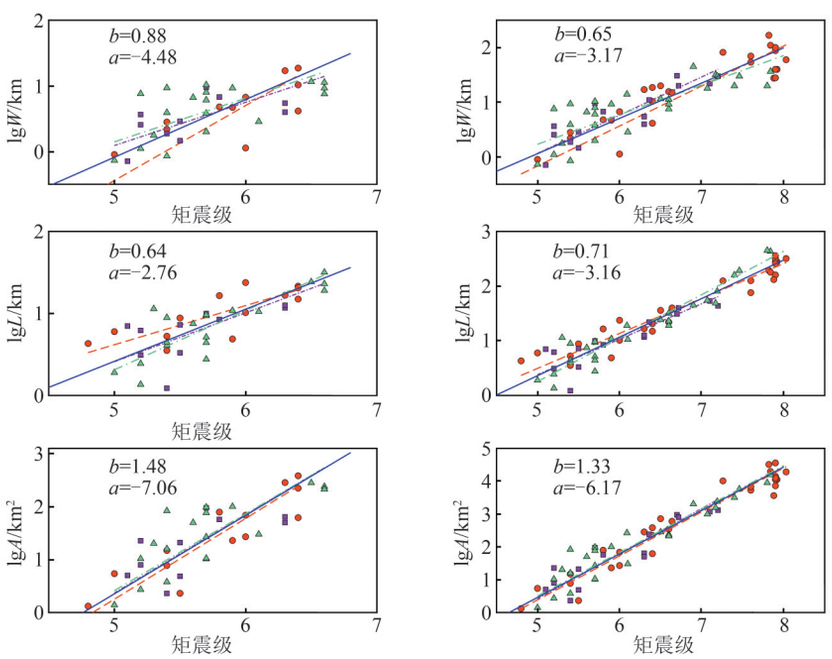


图 9　震源经验标度关系

Fig. 9　Experiential Scale Relation of Source

由表 6、表 7 可以看出,不论是该研究原始数据推导的经验标度关系,还是增加大地震破裂模型的经验标度关系,逆冲和正断机制中矩震级与宽度关系的斜率大于矩震级与长度关系的斜率,而走滑机制则是矩震级与长度关系的斜率大于矩震级与宽度关系的斜率,这是因为发生在近似垂直断层上的走滑事件会受到发震断层有限宽度的影响。相比于原始数据推导的经验标度关系,增加大地震后的经验标度关系决定系数 R^2 提高到 0.9 以上,进一步表明该标度关系更加合理。新的经验标度关系中不同震源机制的矩震级与面积之间的关系相较于原始数据,斜率 b 均减小,截距 a 均增大。这是因为大地震与中小地震的发震机制有一定的区别,其破裂长度与宽度之间可能相互制约,从而导致破裂面积关系的整体斜率减小。

本文推导出的新比例关系与以往研究有所差别:前人推导出的长度和宽度与矩震级经验关系的斜率多为 0.4～0.6,本文研究初始得到的斜率为 0.4～1 左右,加入补充大震级地震事件的经验关系斜率为 0.5～0.8 之间,不同震源机制的斜率系数差别较大。区域地壳特征和孕震环境的不同造成了这一差异,前人对于震源标度关系的

表6 原始数据的经验标度关系

Table 6 Empirical Scaling Relations Based on Original Data

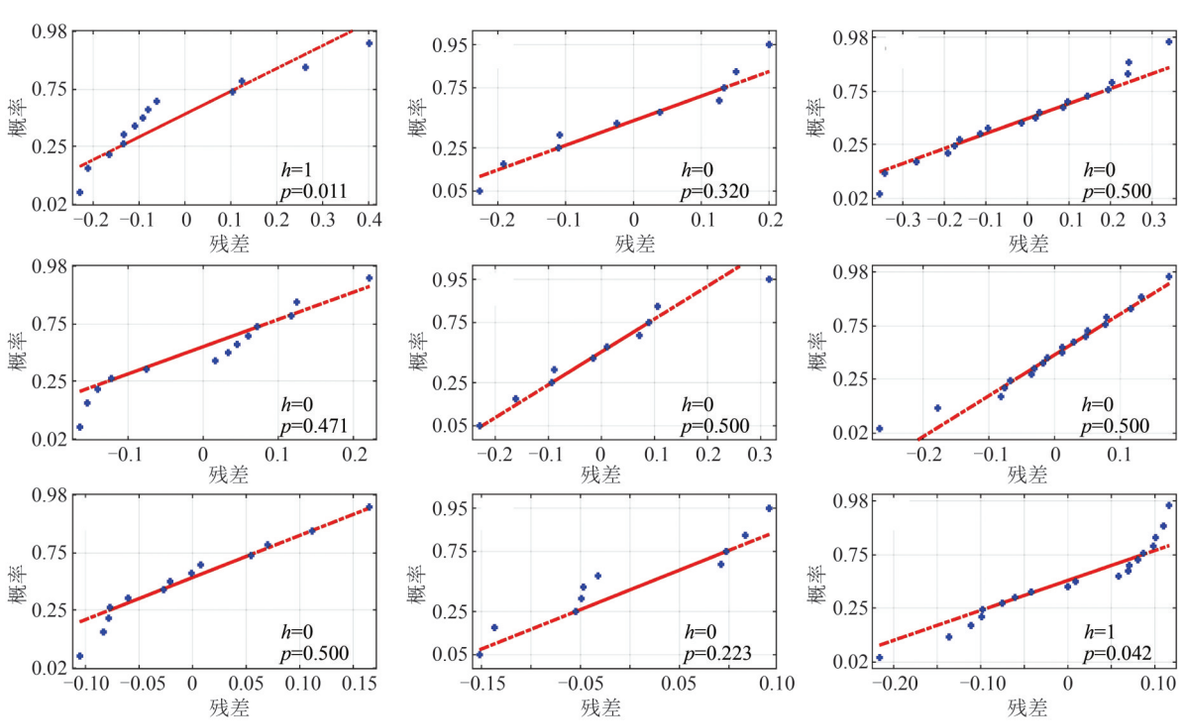
震源机制	关系式	b	a	R^2	STD
逆冲	$\lg W=a+bM$	1.14	−6.16	0.92	0.26
	$\lg L=a+bM$	0.48	−1.77	0.75	0.16
	$\lg A=a+bM$	1.52	−7.38	0.98	0.20
正断	$\lg W=a+bM$	0.66	−3.20	0.66	0.23
	$\lg L=a+bM$	0.60	−2.57	0.61	0.23
	$\lg A=a+bM$	1.48	−7.03	0.93	0.27
走滑	$\lg W=a+bM$	0.67	−3.19	0.67	0.28
	$\lg L=a+bM$	0.72	−3.30	0.87	0.17
	$\lg A=a+bM$	1.45	−6.84	0.96	0.25
整体	$\lg W=a+bM$	0.88	−4.48	0.79	0.27
	$\lg L=a+bM$	0.64	−2.76	0.78	0.19
	$\lg A=a+bM$	1.48	−7.06	0.96	0.24

研究是基于全球范围内的断层破裂模型,且选取的地震事件震级都很大,少有Mw<5.5的事件[3];而本文研究主要考虑青藏高原的地震事件,且主要为中强震级地震,推导的标度关系更符合青藏高原孕震环境,可为地震灾害分析和工程应用所需的区域性震源标度关系等研究提供重要更新。

3 讨 论

将本文与文献[23]中相同震例InSAR震源参数进行对比分析,并与通用地震目录震源参数进行比较研究,发现不同的数据处理方法及反演策略对与地震目录的差异性研究的影响很小。两种地震目录之间的差异性更多是由于实际地震案例的影响。

与USGS、GCMT和CENC地震目录相比,本文基于InSAR获取的震源参数目录,可显著提高震级Mw 4.8~6.6的中强地震震源参数估计的完善性。就深度参数而言,对于地震台站约束不够的浅层较小震级地震事件,通用地震目录会将质心深度简单固定为10 km或者12 km[2],影响对实际的发震断层和深度的判断。依据该研究质心深度平均偏差结果对地震目录的固定深度进行改正,可得到更加接近真值的深度参数。而对比GCMT目录近十几年来的水平位置差中位数变化,发现其差值存在逐渐减小的趋势,从20 km[48]、21 km[18]减少到文献[23]与本文结果中的11.9 km。这反映出区域和全球地震台站密度的增加提高了定位精度,也可能是全球分布和震级较大的地震事件对水平位置差中位数有较大贡献。关于水平位置的系统误差,文献[55]研究了发生在藏南地区的8次正断机制地震事件InSAR反演结果和GCMT目录之间的位置差异,发现了系统性的南向偏差。进一步将该系统偏差分析拓展到整个青藏高原及周边地区,结果表明,GCMT目录的水平位置差异并不完全是系统性的南向偏差,



(a) 逆冲机制回归残差正态概率 (b) 正断机制回归残差正态概率 (c) 走滑机制回归残差正态概率

图10 42个地震数据的经验标度关系回归残差正态概率图

Fig. 10 Normal Probability Plot of Regression Residuals for Empirical Scaling Relations Derived from 42 Earthquakes

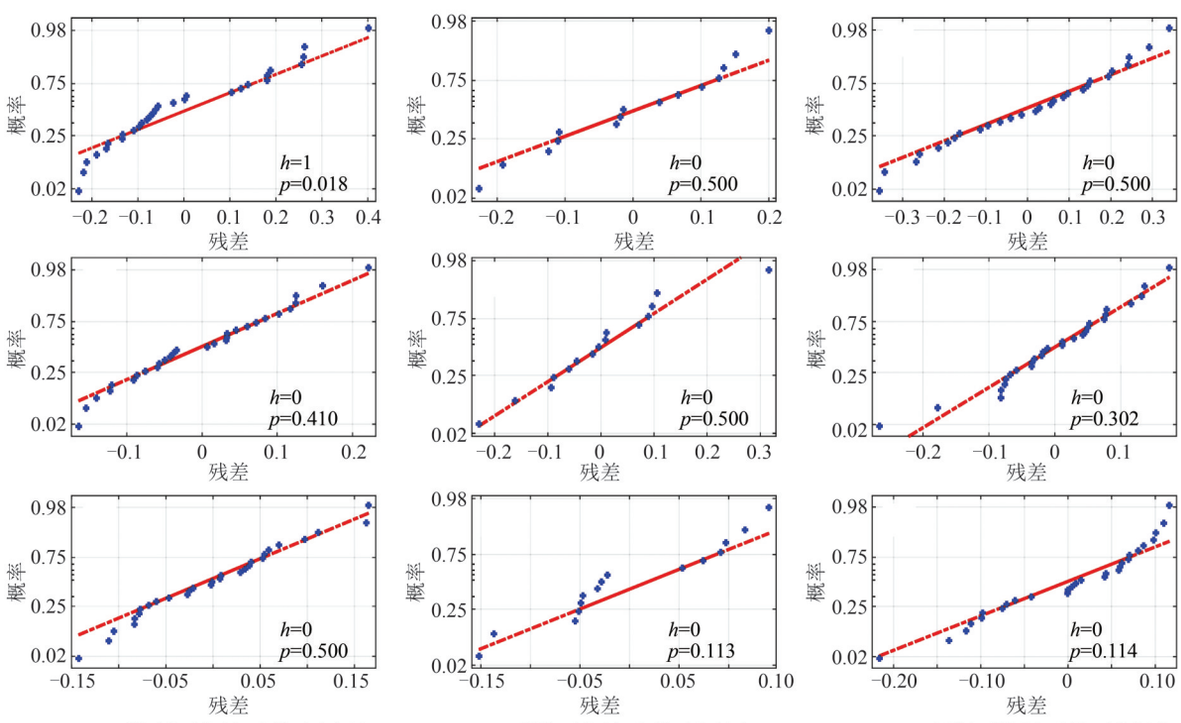
表 7　增加破裂模型的经验标度关系

Table 7　Empirical Scaling Relations with Additional Rupture Models

震源机制	关系式	b	a	R^2	STD
逆冲	$\lg W=a+bM$	0.73	−3.82	0.95	0.27
	$\lg L=a+bM$	0.64	−2.70	0.98	0.15
	$\lg A=a+bM$	1.34	−6.32	1.00	0.20
正断	$\lg W=a+bM$	0.70	−3.43	0.93	0.20
	$\lg L=a+bM$	0.65	−2.86	0.92	0.19
	$\lg A=a+bM$	1.37	−6.44	0.99	0.23
走滑	$\lg W=a+bM$	0.54	−2.47	0.84	0.26
	$\lg L=a+bM$	0.79	−3.72	0.98	0.16
	$\lg A=a+bM$	1.32	−6.12	0.99	0.22
整体	$\lg W=a+bM$	0.65	−3.17	0.92	0.26
	$\lg L=a+bM$	0.71	−3.16	0.97	0.17
	$\lg A=a+bM$	1.33	−6.17	1.00	0.21

而是存在明显的空间分布和地形特征,即由海拔较高的地方指向海拔较低的地方,由地壳厚度大的地方指向地壳厚度小的地方。GCMT 目录的此类偏差可能与在该区域所使用的地壳速度模型,以及该区域稀疏的地震台站有关。因此,基于 InSAR 数据解算出的震源参数具有可辅助地震台站反演建模及校准地壳速度模型的潜力,可为青藏高原及周边地区地震目录的校正和改进提供重要的数据支撑。

本文对地震目录系统性位置偏差的研究结果有助于在地震发生后根据地震目录进一步确定震中位置范围。此外,由于大多数中强震级地震都发生在块体内部小规模的活动断层、隐伏断层、次级断层和未知断层上,虽然震级较小,但仍然存在一定的危险性,而目前的地震危险性评估大多建立在主板块或块体边界断层上,因此中小规模地震所揭示的次级活动断层有助于进一步完善区域地震危险性评估。



(a) 逆冲机制回归残差正态概率　(b) 正断机制回归残差正态概率　(c) 走滑机制回归残差正态概率

图 11　补充大地震数据的经验标度关系回归残差正态概率图

Fig. 11　Normal Probability Plot of Regression Residuals for Empirical Scaling Relations Including Additional Large Earthquakes

4　结　语

该研究利用 Sentinel-1 数据获取了 2014 年 10 月至 2022 年 10 月青藏高原及其周边地区 42 次中强地震事件的 InSAR 同震形变场及震源参数,并以此构建 InSAR 地震目录和经验标度关系模型,得到以下结论:

1)相较于传统地震目录,InSAR 地震目录在质心深度和水平位置参数上更准确。传统地震目录报告的深度偏差可达 4～11 km;相比于 USGS 和 GCMT 地震目录,CENC 目录水平定位精度更高,平均偏差为 7.4 km;GCMT 地震目录

水平定位存在约11.9 km的系统误差,且存在明显的空间分布和地形特征,即由高海拔地区指向低海拔地区。

2)传统地震目录中报告的断层几何参数与InSAR目录较为一致,倾角的绝对值差异为10°~11°,走向角的绝对值差异为9°~10°。

3)不同于已有基于全球范围内较大震级地震事件破裂模型所推导的经验标度关系,本文结合InSAR目录及前人已发表的震源模型推导了青藏高原地区包含更小震级(Mw 4.8~8.03)地震事件的标度关系模型。

综上,本文通过建立中强地震InSAR地震目录、获取传统地震目录系统性偏差以及新的区域经验标度关系可为校正地壳速度模型、改进地震目录地震信息、评估区域地震危险性及进行灾害分析和工程应用等提供重要支撑。

致谢:感谢欧洲航天局提供的哨兵1A数据(http://asf.alaska.edu/),以及美国地质调查局、全球质心矩张量、中国地震台网中心提供的地震目录。本文中大部分图采用GMT绘制。

参 考 文 献

[1] DUPUTEL Z, RIVERA L, FUKAHATA Y, et al. Uncertainty Estimations for Seismic Source Inversions [J]. *Geophysical Journal International*, 2012, 190(2): 1243-1256.

[2] EKSTRÖM G, NETTLES M, DZIEWOŃSKI A M. The Global CMT Project 2004—2010: Centroid-Moment Tensors for Earthquakes[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2012, 200: 1-9.

[3] MIGNAN A, JIANG C, ZECHAR J D, et al. Completeness of China Earthquake Catalog and Implications for the Setup of the China Earthquake Forecast Testing Center[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2013, 103(2A): 845-859.

[4] 杨陈, 郭凯, 张素灵, 等. 中国地震台网现状及其预警能力分析[J]. 地震学报, 2015, 37(3): 508-515.
YANG Chen, GUO Kai, ZHANG Suling, et al. Status Quo of China Earthquake Networks and Analyses on Its Early Warning Capacity[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2015, 37(3): 508-515.

[5] ZHENG X F, YAO Z X, LIANG J H, et al. The Role Played and Opportunities Provided by IGP DMC of China National Seismic Network in Wenchuan Earthquake Disaster Relief and Researches [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2010, 100(5B): 2866-2872.

[6] BILLINGS S D, SAMBRIDGE M S, KENNETT B L N. Errors in Hypocenter Location: Picking, Model, and Magnitude Dependence[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1994, 84(6): 1978-1990.

[7] BONDÁR I, STORCHAK D. Improved Location Procedures at the International Seismological Centre [J]. *Geophysical Journal International*, 2011, 186(3): 1220-1244.

[8] BUEHLER J S, SHEARER P M. Characterizing Earthquake Location Uncertainty in North America Using Source - Receiver Reciprocity and Array[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2016, 106(5): 2395-2401.

[9] Pavlis G L. Appraising Earthquake Hypocenter Location Errors: A Complete, Practical Approach for Single-Event Locations[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1986, 76(6): 1699-1717.

[10] MAGGI A, JACKSON J A, PRIESTLEY K, et al. A Re-Assessment of Focal Depth Distributions in Southern Iran, the Tien Shan and Northern India: Do Earthquakes Really Occur in the Continental Mantle? [J]. *Geophysical Journal International*, 2000, 143(3): 629-661.

[11] KAGAN Y Y. Accuracy of Modern Global Earthquake Catalogs[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2003, 135(2/3): 173-209.

[12] JONSSON S. Fault Slip Distribution of the 1999 Mw 7.1 Hector Mine, California, Earthquake, Estimated from Satellite Radar and GPS Measurements [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2002, 92(4): 1377-1389.

[13] WRIGHT T J, LU Z, WICKS C. Source Model for the Mw 6.7, 23 October 2002, Nenana Mountain Earthquake (Alaska) from InSAR[J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(18): 2003GL018014.

[14] 韩炳权, 刘振江, 陈博, 等. 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), 2023, 48(1): 36-46.
HAN Bingquan, LIU Zhenjiang, CHEN Bo, et al. 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*, 2023, 48(1): 36-46.

[15] LUO H, WANG T, WEI S J, et al. Deriving Centimeter-Level Coseismic Deformation and Fault Geometries of Small-to-Moderate Earthquakes from Time-Series Sentinel-1 SAR Images[J]. *Frontiers*

in Earth Science, 2021, 9: 636398.

[16] LIU F, ELLIOTT J R, CRAIG T J, et al. Improving the Resolving Power of InSAR for Earthquakes Using Time Series: A Case Study in Iran [J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48(14): e2021GL093043.

[17] 吴雄骁, 冯光财, 贺礼家, 等. 基于时序 InSAR 分析的高精度同震形变监测方法[J]. 地球与行星物理论评(中英文), 2023, 54(6): 612-621.
WU Xiongxiao, FENG Guangcai, HE Lijia, et al. High Precision Coseismic Deformation Monitoring Method Based on Time-Series InSAR Analysis[J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 2023, 54(6): 612-621.

[18] WESTON J, FERREIRA A M G, FUNNING G J. Global Compilation of Interferometric Synthetic Aperture Radar Earthquake Source Models: 1. Comparisons with Seismic Catalogs[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2011, 116(B8):148-227.

[19] WESTON J, FERREIRA A M G, FUNNING G J. Systematic Comparisons of Earthquake Source Models Determined Using InSAR and Seismic Data [J]. *Tectonophysics*, 2012, 532: 61-81.

[20] WRIGHT T J, PARSONS B E, JACKSON J A, et al. Source Parameters of the 1 October 1995 Dinar (Turkey) Earthquake from SAR Interferometry and Seismic Bodywave Modelling [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1999, 172(1/2): 23-37.

[21] FEIGL K L. 37 Estimating Earthquake Source Parameters from Geodetic Measurements [M]//International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology. Amsterdam: Elsevier, 2002.

[22] ZHU C H, WANG C S, ZHANG B C, et al. Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar Data for more Accurate Earthquake Catalogs [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2021, 266: 112690.

[23] LUO H, WANG T, WEI S J. Systematic Comparison of InSAR and Seismic Source Models for Moderate-Size Earthquakes in Western China: Implication to the Seismogenic Capacity of the Shallow Crust[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2022, 127(10): e2022JB024794.

[24] WEI S J, AVOUAC J P, HUDNUT K W, et al. The 2012 Brawley Swarm Triggered by Injection-Induced Aseismic Slip [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2015, 422: 115-125.

[25] QIAN Y Y, CHEN X F, LUO H, et al. An Extremely Shallow Mw 4.1 Thrust Earthquake in the Eastern Sichuan Basin (China) Likely Triggered by Unloading During Infrastructure Construction [J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46 (23): 13775-13784.

[26] YANG H F, ZHOU P C, FANG N, et al. A Shallow Shock: The 25 February 2019 ML 4.9 Earthquake in the Weiyuan Shale Gas Field in Sichuan, China[J]. *Seismological Research Letters*, 2020, 91(6): 3182-3194.

[27] LIU H Z, XIE L, ZHAO G Q, et al. A Joint InSAR-GNSS Workflow for Correction and Selection of Interferograms to Estimate High-Resolution Interseismic Deformations [J]. *Satellite Navigation*, 2023, 4(1): 14.

[28] 许才军, 熊维, 刘传金. 利用大地测量观测资料研究青藏高原三维地壳形变及地震危险性评估进展[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(7): 997-1009.
XU Caijun, XIONG Wei, LIU Chuanjin. Progress in Studying of 3D Crustal Deformation and Seismic Risk Assessment of the Tibetan Plateau Using Geodetic Observations[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(7): 997-1009.

[29] HE Z L, XU W B, LI Z W, et al. Co and Postseismic Fault Slip Models of the 2022 Mw 6.7 Menyuan Earthquake Reveal Conjugated Faulting Tectonics at the Central Section of the Lenglongling Fault[J]. *Earthquake Science*, 2024, 37(4): 277-303.

[30] ZHAO L, XU W B, XIE L, et al. Fault Geometry and Low Frictional Control of the Near-Field Postseismic Deformation of the 2021 Mw 7.3 Maduo Earthquake[J]. *Tectonophysics*, 2023, 863: 230000.

[31] 余鹏飞, 陈威, 乔学军, 等. 基于多源 SAR 数据的 2022 年门源 Ms 6.9 地震同震破裂模型反演研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(6): 898-906.
YU Pengfei, CHEN Wei, QIAO Xuejun, et al. Slip Model of the 2022 Menyuan Ms 6.9 Earthquake Constrained by Mulit-source SAR Data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(6): 898-906.

[32] 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), 2025, 50(2): 333-343.
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*, 2025, 50(2): 333-343.

[33] FERREIRA A M G, WOODHOUSE J H. Long-Period Seismic Source Inversions Using Global Tomographic Models[J]. *Geophysical Journal International*, 2006, 166(3): 1178-1192.

[34] FERREIRA A M G, WESTON J, FUNNING G J. Global Compilation of Interferometric Synthetic Aperture Radar Earthquake Source Models: 2. Effects of 3D Earth Structure[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2011, 116(B8): 45-56.

[35] CASTELLARO S, MULARGIA F, KAGAN Y Y. Regression Problems for Magnitudes[J]. *Geophysical Journal International*, 2006, 165(3): 913-930.

[36] PRITCHARD M E, SIMONS M, ROSEN P A, et al. Co-seismic Slip from the 1995 July 30 Mw 8.1 Antofagasta, Chile, Earthquake as Constrained by InSAR and GPS Observations[J]. *Geophysical Journal International*, 2002, 150(2): 362-376.

[37] DAWSON J, TREGONING P. Uncertainty Analysis of Earthquake Source Parameters Determined from InSAR: A Simulation Study[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2007, 112(B9): 2007JB005209.

[38] 赵德政, 屈春燕, 张桂芳, 等. 基于InSAR技术的同震形变获取、地震应急监测和发震构造研究应用进展[J]. 地震地质, 2023, 45(2): 570-592.
ZHAO Dezheng, QU Chunyan, ZHANG Guifang, et al. Applications and Advances for the Coseismic Deformation Observations, Earthquake Emergency Response and Seismogenic Structure Investigation Using InSAR[J]. *Seismology and Geology*, 2023, 45(2): 570-592.

[39] YU C, PENNA N T, LI Z H. Generation of Real-Time Model High-Resolution Water Vapor Fields from GPS Observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2017, 122(3): 2008-2025.

[40] BAGNARDI M, HOOPER A. Inversion of Surface Deformation Data for Rapid Estimates of Source Parameters and Uncertainties: A Bayesian Approach[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2018, 19(7): 2194-2211.

[41] DECRIEM J, ÁRNADÓTTIR T, HOOPER A, et al. The 2008 May 29 Earthquake Doublet in SW Iceland[J]. *Geophysical Journal International*, 2010, 181(2): 1128-1146.

[42] WANG T, WEI S J, SHI X H, et al. The 2016 Kaikōura Earthquake: Simultaneous Rupture of the Subduction Interface and Overlying Faults[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2018, 482: 44-51.

[43] LEONARD M. Earthquake Fault Scaling: Self-Consistent Relating of Rupture Length, Width, Average Displacement, and Moment Release[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2010, 100(5A): 1971-1988.

[44] THINGBAIJAM K K S, MAI P M, GODA K. New Empirical Earthquake Source-Scaling Laws[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2017, 107(5): 2225-2246.

[45] ZHENG A, YU X W, XU W B, et al. A Hybrid Source Mechanism of the 2017 Mw 6.5 Jiuzhaigou Earthquake Revealed by the Joint Inversion of Strong-Motion, Teleseismic and InSAR Data[J]. *Tectonophysics*, 2020, 789: 228538.

[46] MA Y, QIAO X J, CHEN W, et al. Source Model of 2016 Mw 6.6 Aketao Earthquake, Xinjiang Derived from Sentinel-1 InSAR Observation[J]. *Geodesy and Geodynamics*, 2018, 9(5): 372-377.

[47] MELLORS R J. Comparison of Four Moderate-Size Earthquakes in Southern California Using Seismology and InSAR[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2004, 94(6): 2004-2014.

[48] ELLIOTT J R, WALTERS R J, ENGLAND P C, et al. Extension on the Tibetan Plateau: Recent Normal Faulting Measured by InSAR and Body Wave Seismology[J]. *Geophysical Journal International*, 2010, 183(2): 503-535.