



武汉大学学报(信息科学版)

Geomatics and Information Science of Wuhan University

ISSN 1671-8860,CN 42-1676/TN

## 《武汉大学学报(信息科学版)》网络首发论文

题目: 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  
作者: 毛鸿飞, 谢磊, 江坤, 孙凯, 王嘉庚, 许文斌  
DOI: 10.13203/j.whugis20240124  
收稿日期: 2024-06-03  
网络首发日期: 2024-06-24  
引用格式: 毛鸿飞, 谢磊, 江坤, 孙凯, 王嘉庚, 许文斌. 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/OL]. 武汉大学学报(信息科学版).  
<https://doi.org/10.13203/j.whugis20240124>



**网络首发:** 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认:** 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.13203/j.whugis20240124

### 引用格式：

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), 2024, DOI: 10.13203/j.whugis20240124 (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, 2024, 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<sup>1</sup> 谢磊<sup>1</sup> 江坤<sup>1</sup> 孙凯<sup>1</sup> 王嘉庚<sup>1</sup> 许文斌<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 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技术 (Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR) 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。该研究采用 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 (Global Centroid Moment Tensor, GCMT) 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。该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

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

MAO Hongfei<sup>1</sup> XIE Lei<sup>1</sup> JIANG Kun<sup>1</sup> SUN Kai<sup>1</sup> WANG Jiageng<sup>1</sup> XU Wenbin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Geoscience and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China

**Abstract:** Objectives: Synthetic aperture radar interferometry (InSAR) is capable of high spatial

**收稿日期：**2024-06-03

**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); 国家重点研发计划课题 (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, 硕士生, 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

**通讯作者：**许文斌, 博士, 教授。Wenbin.xu@csu.edu.cn

resolution and deformation monitoring accuracy. It can effectively constrain the source parameter of moderate shallow earthquakes. Methods: In this study, using InSAR phase stacking and the Bayesian inversion methods, we construct the source parameters catalog for 42 moderate to strong (Mw 4.8–6.6) earthquakes that occurred in the shallow crust of the Tibetan Plateau from October 2014 to October 2022. Results: The results demonstrate that the InSAR-derived depth location is shallower than the centroid depth recorded in general seismic catalogs. The location of the epicenter of the Global Centroid Moment Tensor (GCMT) catalog is systematically biased. It also reveals the result of InSAR inversion can express the geometry of fault more precisely. Conclusions: The study shows that the InSAR-derived catalog is a significant supplement to the existing global catalog and can improve empirical scale relationships, facilitating scientific reference for regional seismic risk assessment.

**Key Words:** Qinghai-Tibet 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的数据。国际上常用的地震目录包括:美国地质调查局(USGS)目录<sup>[1]</sup>、全球质心矩张量(GCMT)目录<sup>[2]</sup>和中国地震台网(CENC)目录等<sup>[3-5]</sup>。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<sup>[6-9]</sup>,震源深度偏差可达十公里<sup>[10-11]</sup>。近几十年来,随着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<sup>[2,12-14]</sup>。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<sup>[2,15-17]</sup>。

目前,已有相关学者开展了InSAR震源参数编目的相关研究。Weston等人<sup>[18-19]</sup>通过比较57次全球地震事件(Mw5.0~8.4)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<sup>[20-21]</sup>,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。Zhu等人<sup>[22]</sup>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。Luo等人<sup>[23]</sup>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<sup>[24-26]</sup>。

青藏高原受印度板块和欧亚板块的碰撞地质构造活跃,地震频发,是国内外地学研究的热点区域<sup>[27-28]</sup>,许多浅层中强震已经通过InSAR方法进行了研究<sup>[29-32]</sup>。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<sup>[33-34]</sup>。而Luo等人<sup>[23]</sup>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,该研究选取

青藏高原（东经  $70^{\circ} \sim 115^{\circ}$ ，北纬  $20^{\circ} \sim 50^{\circ}$ ）作为研究区域，以 USGS 目录中 2014 年 10 月至 2022 年 10 月发生在浅层（震源深度小于 20 km）的中强地震（ $4.8 < M_w < 6.6$ ）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（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 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了其震源参数；最后将 InSAR 反演震源参数与地震目录震源参数进行了系统对比，并采用一般正交回归（General Orthogonal Regression, GOR）构建了新的经验标度关系<sup>[35]</sup>。

## 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（时间为 2014 年 10 月至 2022 年 10 月，震级  $M_w$  4.8–6.6，深度 0–20 km）。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，均收集每次地震事件相应的升降轨数据，以提高模型分辨率并减少源参数的不确定性<sup>[36–38]</sup>。其中，2021 年 3 月 23 日拜城  $M_w$  5.3 地震，2018 年 9 月 8 日墨江  $M_w$  5.7 地震，2020 年 1 月 16 日库车  $M_w$  5.2 地震，2020 年 3 月 9 日洞措  $M_w$  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 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。

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<sup>[39]</sup> 大气校正即可获取高精度同震形变场：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（SRTM）去除地形相位。并采用 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 方法难以准确可靠的提取到同震形变场。该研究采用 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，削弱在时间上较为随机的大气延迟湍流分量，提高信噪比。考虑到中型及以下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

该研究基于贝叶斯反演方法<sup>[40]</sup>利用 GBIS (Geodetic Bayesian Inversion Software, GBIS, <https://comet.nerc.ac.uk/gbis/>) 软件<sup>[41-42]</sup>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，以实现升降轨数据的定权，并采用基于变形梯度的自适应二叉树采样方法对同震形变场进行降采样<sup>[43]</sup>。基于 Okada 弹性半空间位错模型<sup>[44]</sup>，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）的九个断层参数。反演过程中，假设泊松比为 0.25 计算得到的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 ( $M_w < 5.5$ )，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<sup>[45]</sup>。因此，该研究根据通用地震目录（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，该研究应用 GOR 推导青藏高原及其周边地区地震事件矩震级 ( $M_w$ ) 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，故该研究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<sup>[46-48]</sup>。根据 Thingbaijam 等人的研究<sup>[49]</sup>，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（式 1）。由式 1 建立断层模型数据（长度  $L$ 、宽度  $W$ 、面积  $A$ ）和矩震级  $M_w$  之间的数学关系，进而估计出该线性关系中的截距和斜率参数 ( $a$  和  $b$ )。

$$\log_{10}(y) = b \log_{10}(x) + a \quad (1)$$

其中， $x$  代表自变量，此处为地震矩  $M_0$ ； $y$  为因变量，此处为断层模型数据（长度  $L$ 、宽度  $W$ 、面积  $A$ ）； $a$  为截距， $b$  为斜率。

对于矩震级  $M_w$ ，其与地震矩  $M_0$  之间为对数线性的函数关系，计算公式为式 2：

$$\log_{10}(M_0) = 1.5(M_w) + 9.05 \quad (2)$$

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。

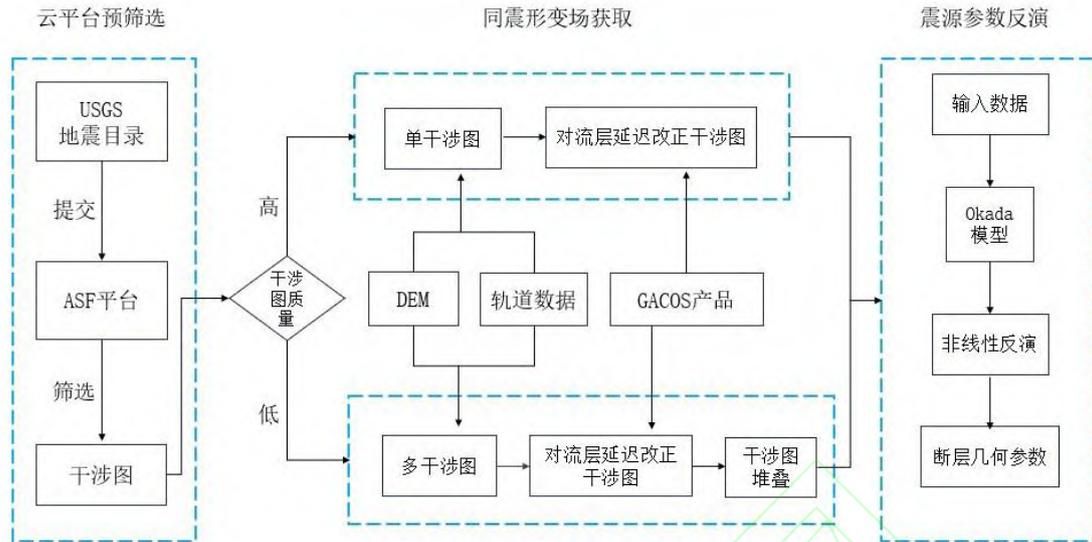


图 1 InSAR 地震目录数据处理流程图

Fig.1 The 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，该研究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 A2），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，该研究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（STD）。具体的 STD 值如表 A1 中所示，震级  $M_w < 5.5$  的地震事件 STD 值基本均小于 1 cm，震级  $M_w > 5.5$  的地震事件 STD 值大多数为 1~2 cm 之间，几次地质构造背景复杂的地震事件 STD 值大于 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中。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（RMS）小于 2 cm；对于变形模式相对复杂的个别地震事件（如 2017 年 8 月 8 日九寨沟  $M_w 6.5$  地震，2016 年 11 月 25 日阿克陶  $M_w 6.6$  地震）正演模拟值与 InSAR 观测值 RMS 在 2~5 cm，考虑到这两次事件的发震断层不止一条<sup>[50-51]</sup>，尽管该研究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 年 3 月 20 日双湖  $M_w 5.2$  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。

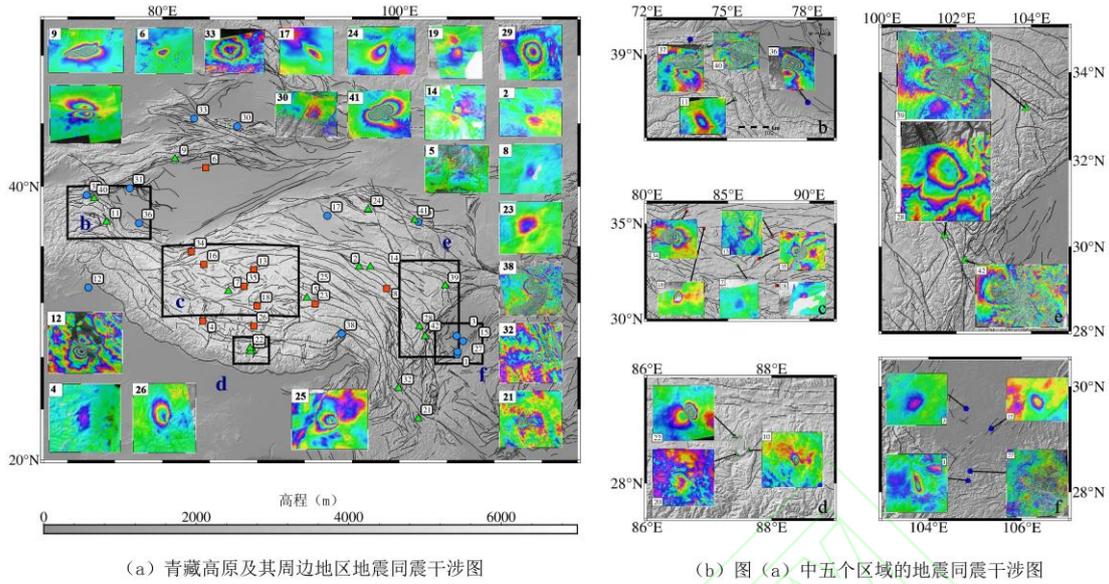


图2 青藏高原42次地震的InSAR同震干涉图

Fig.2 Compilation of Coseismic Deformation Maps in the Study Area.

## 2.2 InSAR 震源参数不确定性分析

为了进一步说明该研究与Luo等(2022)研究中反演结果的差异性,该研究将两者之间的相同的23次地震事件进行了对比(图3)。结果显示,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 $-2.8^\circ$ ,断层走向的结果一致性很高,平均差异为 $-1.3^\circ$ 。

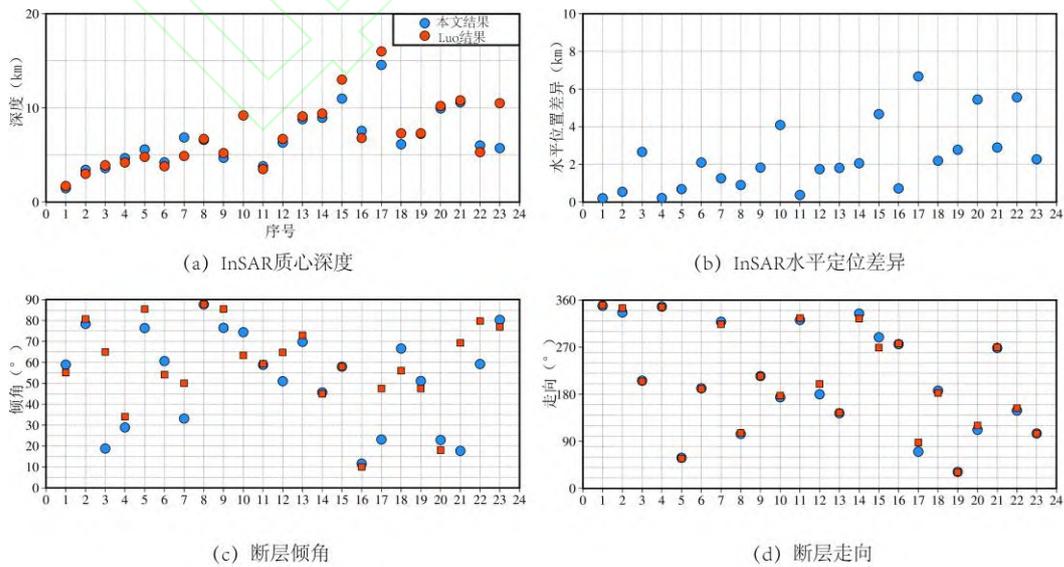
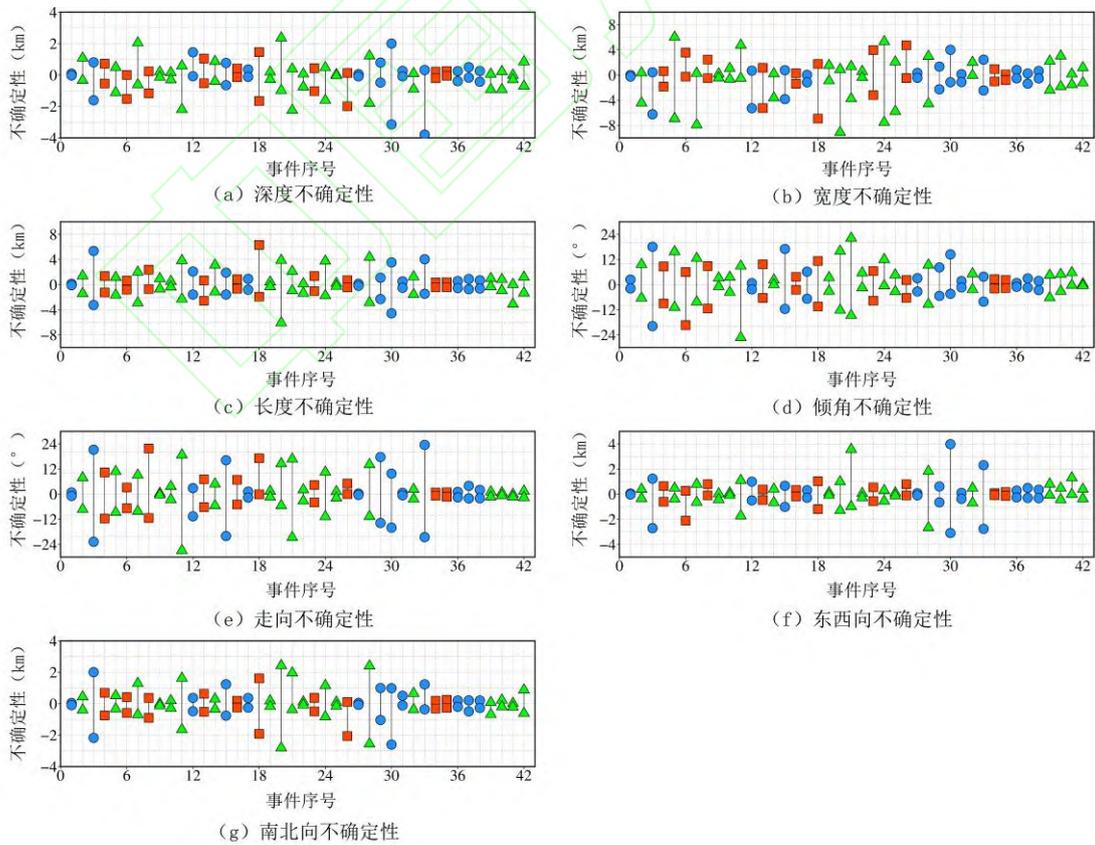


图3 相同震例InSAR震源参数比较

Fig.3 Same earthquake cases InSAR source parameter comparison

该研究以贝叶斯反演方法给出的参数最优值和 95%置信区间作为震源参数反演不确定性分析的依据。通过 MCMC (Markov Chain Monte Carlo) 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  $10^6$  次迭代后, 样本密度近似于后验分布。该研究中给出地震目录中包含的深度、水平位置东西向分量、走向和倾角的参数不确定性(图 4, 表 A3), 但需要注意的是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, 可能包含数据处理及模型误差。该研究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 A2; 图 4f, 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 4d, e), 主要是大的地震事件其同震信号信噪比一般更高。该研究中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  $8.2^\circ$ 、 $6.2^\circ$ 、 $6.4^\circ$ ; 倾角不确定性分别为  $5.8^\circ$ 、 $6.9^\circ$ 、 $6.9^\circ$ 。Luo 等人<sup>[23]</sup>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。



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。

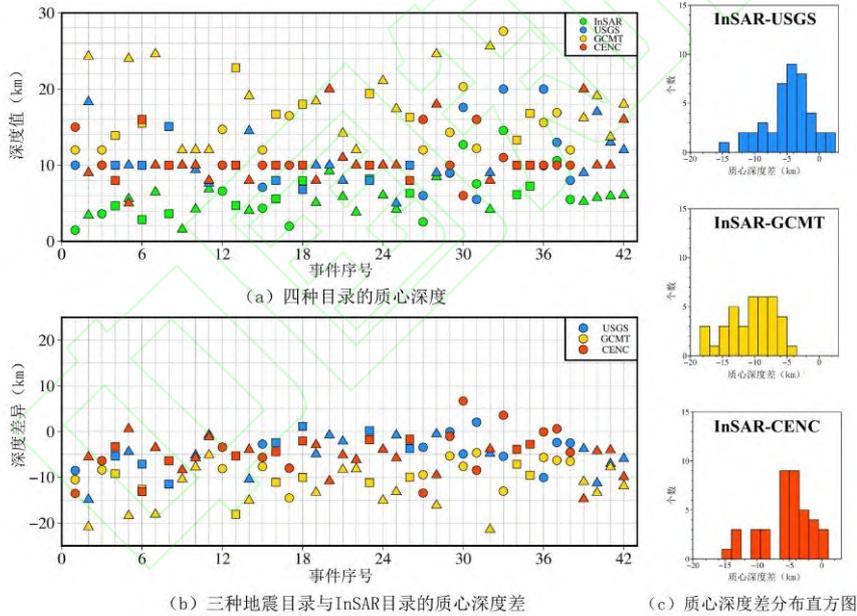
图 4 震源参数不确定性

Fig.4 The Uncertainty of Inverted Source Parameters

### 2.3 InSAR 震源机制目录与通用地震目录对比

#### 2.3.1 质心深度差异对比

该研究首先就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。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 A4），其与 USGS、CENC 目录的质心深度之间的差异小于 GCMT 目录（图 5a, 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<sup>[52-54]</sup>。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<sup>[23]</sup>，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（USGS 和 CENC 目录默认深度为 10 km，GCMT 目录默认深度为 12 km）。



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

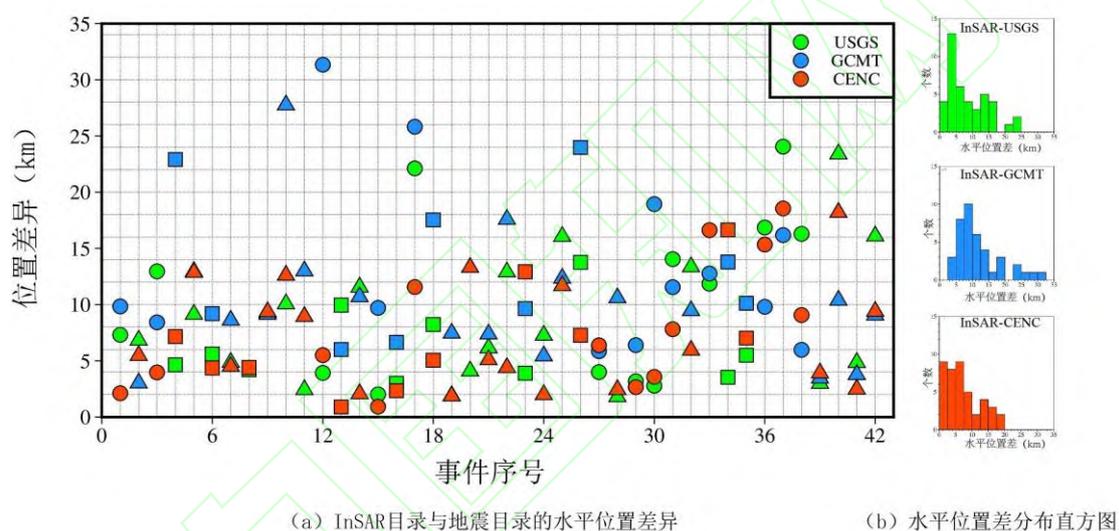
Fig.5 Comparison of InSAR Solution and Seismic Catalog On Centroid Depth

#### 2.3.2 水平位置差异对比

该研究将 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 地震目录中报告的地震位置在距离 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着震级的增大而增大的趋势，与 GCMT 的水平位置差异则未发现这种趋势。InSAR 解与 CENC 目录之间的定位偏差为 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 A5）。这是因为 CENC 地震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<sup>[3,5]</sup>。

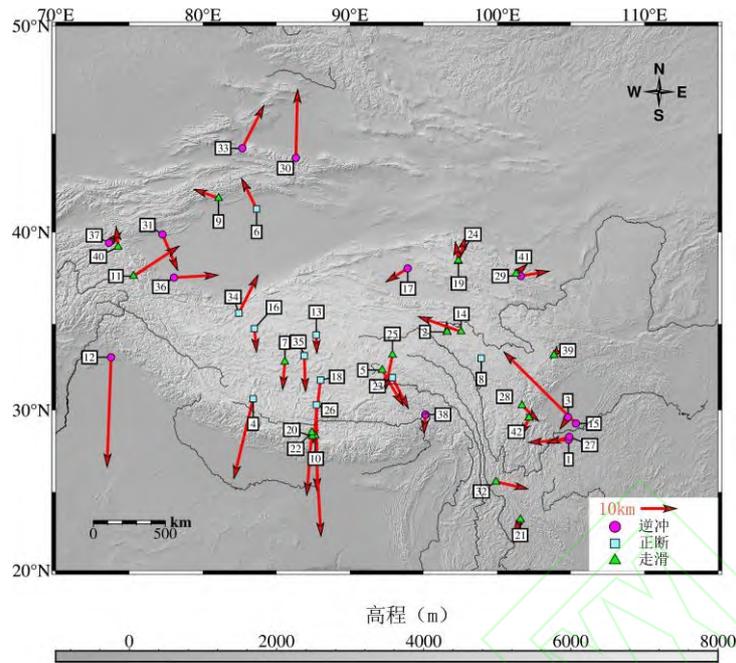
该研究通过对比不同地震目录与 InSAR 解水平位置差异的地理分布发现 GCMT 目录中青藏高原南部地区地震事件的水平位置差异显著大于其它区域，达 20 km 以上，且在藏南地区 GCMT 目录定位均在 InSAR 解的南方（图 7，藏南地区箭头向下）；GCMT 目录与 InSAR 解定位差异矢量显示出比较明显的指向性，即由高海拔地区指向低海拔地区，如藏南地区，准噶尔盆地（表 A2 中 30 和 33 号事件）以及塔里木盆地周边的地震事件（表 A2 中 11、31、34 和 36 号事件）。而在 USGS 和 CENC 目录中并没有发现此类空间分布特征。



圆形-逆冲机制，方形-正断机制，三角-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



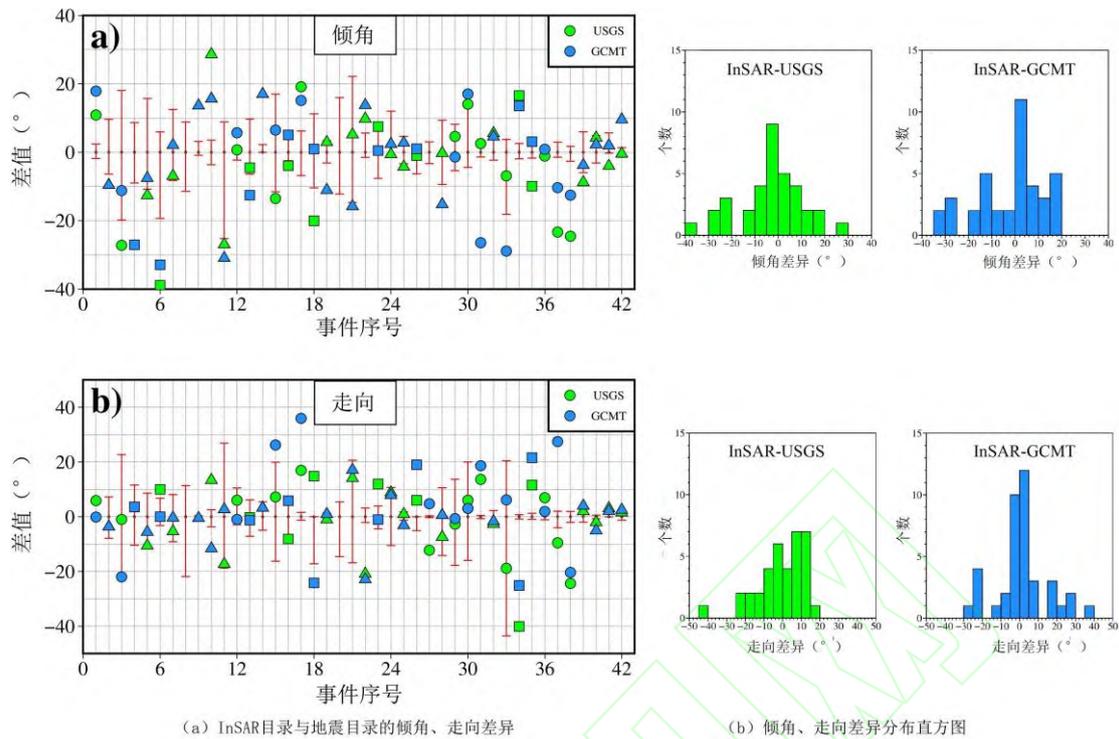
红色箭头为 InSAR 解与 GCMT 目录的位置差异矢量。注：GCMT 地震目录中没有收录 8 号和 20 号事件。

图 7 InSAR 与 GCMT 位置差异矢量 (InSAR-GCMT)

Fig.7 Horizontal Differences between InSAR Solution and GCMT Catalog

### 2. 3. 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 年 3 月 20 日双湖 Mw5.2）和 20 号事件（2015 年 4 月 25 日定结 Mw5.7）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（图 8），两者之间具有较高的一致性。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 8a 中 1、3、6、10、11 号地震事件），且没有出现系统性偏差。GCMT 目录与 InSAR 断层几何参数的倾角值更接近，USGS 目录与 InSAR 断层几何参数的走向值更接近，倾角平均差异分别为 $-3.1^{\circ}$ （USGS）和 $-2.2^{\circ}$ （GCMT），走向角平均差异分别为 $-0.6^{\circ}$ （USGS）和 $1.6^{\circ}$ （GCMT）。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（表 A6），走向值差异比逆冲和正断机制小 30%-50%。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

圆形-逆冲机制，方形-正断机制，三角形-走滑机制

注：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

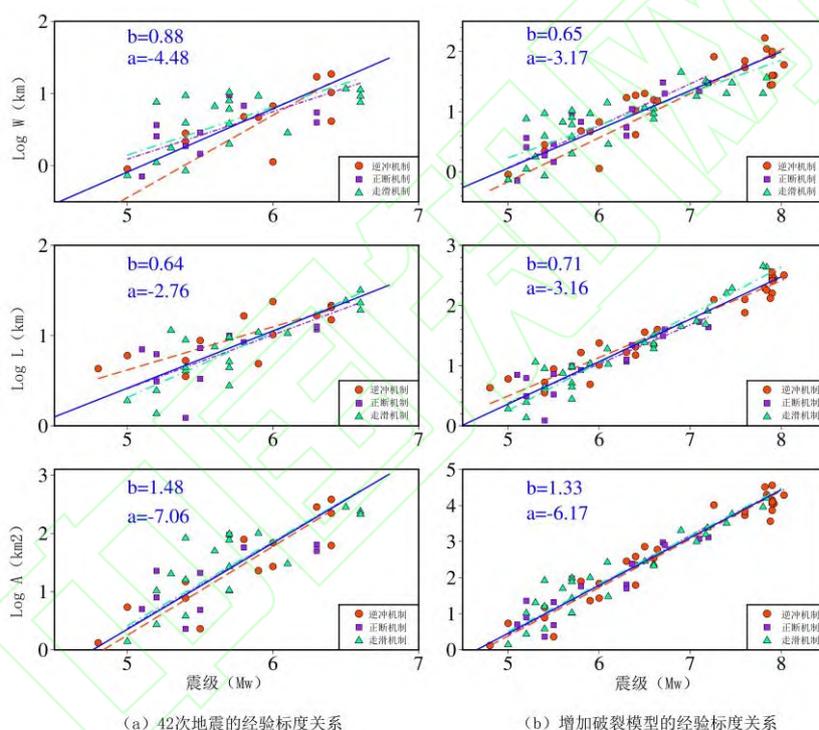
## 2.4 区域震源参数标度关系

该研究中涵盖的中强地震事件 ( $M_w 4.8 \sim 6.6$ ) 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。该研究根据已处理的42次地震推导了经验标度关系 (图9a, 表A7), 并采用Lilliefors假设检验<sup>[55]</sup>对其进行正态性检验 (图10)。结果显示逆冲地震事件矩震级 ( $M_w$ ) 与宽度的标度关系、走滑地震事件矩震级 ( $M_w$ ) 与面积标度关系的残差不满足假设检验 (图10 a上, c下)。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。因此该研究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 ( $M_w 6.09 \sim 8.03$ ) 作为补充<sup>[22,56]</sup>, 进一步推导研究区域内的经验标度关系 (图9b, 表A8)。Lilliefors检验显示除逆冲地震事件的宽度与矩震级 ( $M_w$ ) 间的标度关系的残差不满足假设检验外 (图11 a上), 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。

通过表A7和表A8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  $b$  值均减小，截距  $a$  值均增大。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。

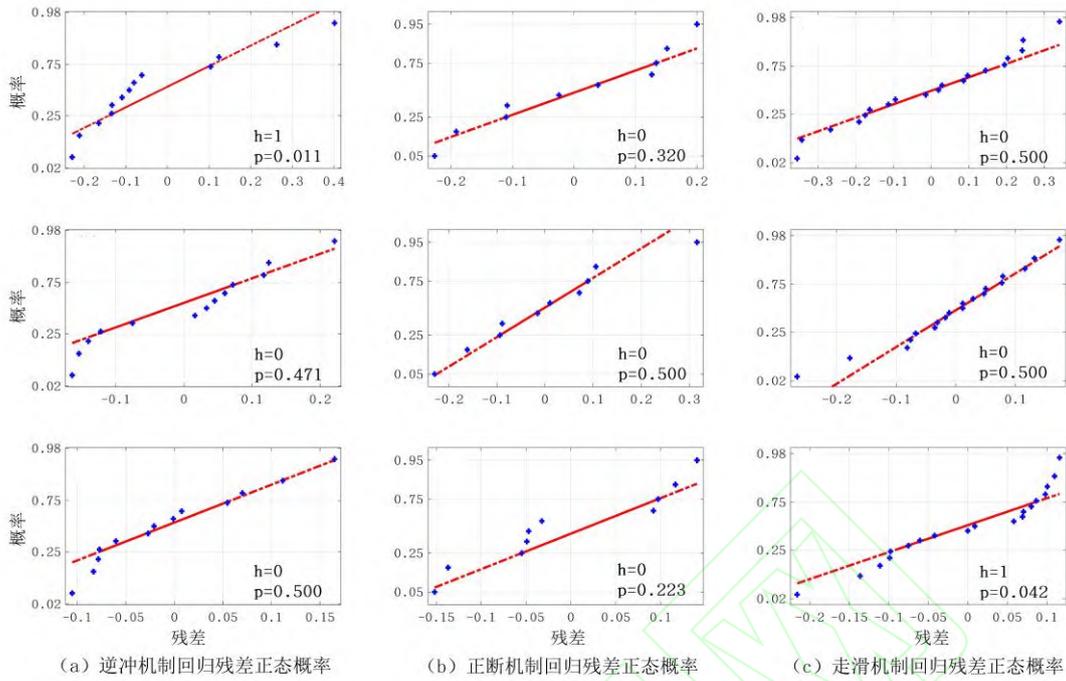
该研究推导出的新比例关系与以往研究有所差别：前人推导出的长度和宽度与矩震级经验关系的斜率多为  $0.4 \sim 0.6$ ，本研究初始得到的斜率为  $0.4 \sim 1$  左右，加入补充大震级地震事件的经验关系斜率为  $0.5 \sim 0.8$  之间，不同震源机制的斜率系数差别较大。区域地壳特征和孕震环境的不同造成了这一差异，前人对于震源标度关系的研究是基于全球范围内的断层破裂模型，且选取的地震事件震级都很大，少有  $M_w < 5.5$  的事件<sup>[3, 57]</sup>；而该研究主要考虑青藏高原的地震事件，且主要为中强震级地震。该研究所推导的标度关系更符合青藏高原的孕震环境，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的更新。



对应颜色的虚线表示对应震源机制的拟合结果。深蓝色实线表示整体拟合结果， $a$ 、 $b$  分别为整体拟合关系的截距、斜率。

图9 震源经验标度关系

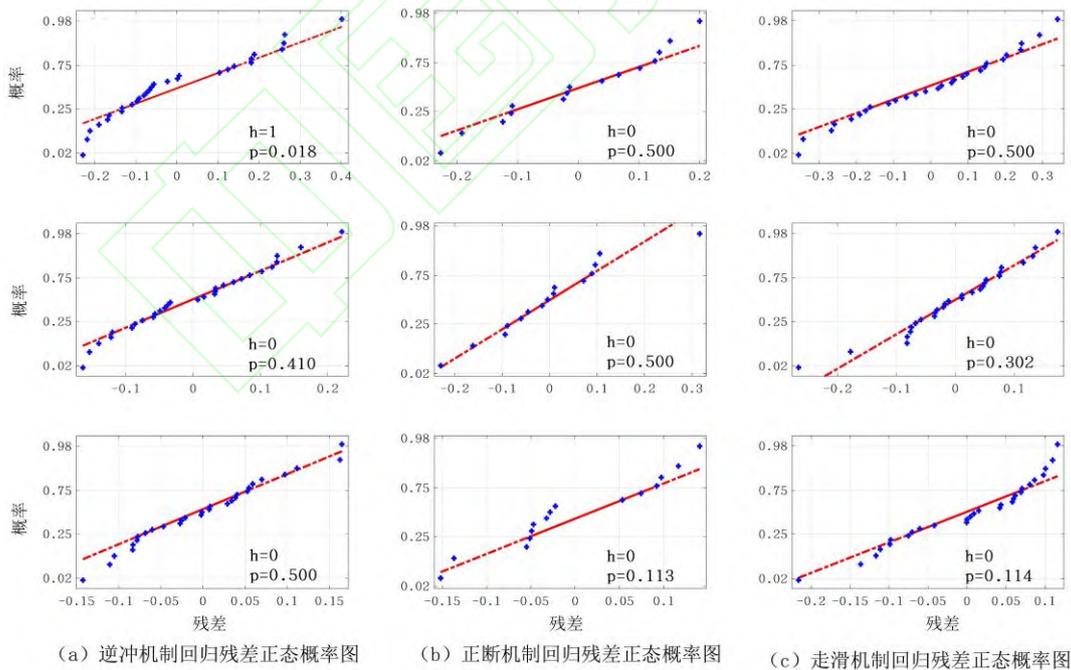
Fig.9 Experimental Scale Relation of Source



从上至下分别为 Mw-LogW、Mw-LogL、Mw-LogA 回归残差正态概率图。

图 10 该研究 42 个地震数据的经验标度关系回归残差正态概率图

Fig.10 Regression Residual Normal Probability of the Data of 42 Earthquakes in this paper



从上至下分别为 Mw-LogW、Mw-LogL、Mw-LogA 回归残差正态概率图。

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 Regression Residual Normal Probability of Supplement Large Earthquakes Data

### 3. 讨论

通过该研究与 Luo 等 (2022) 研究中相同震例 InSAR 震源参数的对比分析, 以及与通用地震目录震源参数的比较研究, 可以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, 该研究基于 InSAR 获取的震源参数目录, 可显著提高震级 Mw4.8~6.6 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<sup>[2]</sup>, 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<sup>[58]</sup>、21 km<sup>[18]</sup>减少到 Luo<sup>[23]</sup>等人与该研究结果中的 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, Elliott 等<sup>[58]</sup>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。该研究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, 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。

该研究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<sup>[59]</sup>, 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。

### 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, 该研究结合 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 (Mw4.8~8.03) 地震事件的标度关系模型。

综上, 该研究通过建立中强地震 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/>), 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。该研究中大部分图采用 GMT 绘制<sup>[60]</sup>。

## 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. The global CMT project 2004-2010: centroid-moment tensors for 13,017 earthquakes[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2012, 200: 1-9.
- [3] Mignan A C, Jiang J, Zechar S, et al. Completeness of the China's 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] Yang C, Guo K, Zhang S, et al. Status quo of China earthquake networks and analyses on its early warning capacity (in Chinese)[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2015, 37(3): 508-515.
- [5] Zheng X, Yao Z, Liang J, 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, Sambridge M, Kennett B. Errors in hypocenter location: picking, model, and magnitude dependence[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1994, 84: 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 USArray[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, 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: 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 O, H Zebker, P Segall, et al. Fault slip distribution of the 1999 Mw7.1 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, Z Lu, C Wicks. Source model for the Mw 6.7, 23 October 2002, Nenana Mountain Earthquake (Alaska) from InSAR[J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(18).
- [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.
- [15] Luo H, Wang T, Wei S J, Liao M S, 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(32).
- [16] Liu F, Elliott J, Craig T, 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).
- [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*, 2022, 53(0): 1-10.
- [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): 0148-0227.
- [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, 532-535: 61-81.
- [20] Wright T J, Parsons B E, Jackson T A, et al. Source parameters of the 1 October 1995 Dinar (Turkey) earthquake from SAR interferometry and seismic bodywave modelling, *Earth & Planetary Science Letters*, 1999, 172: 23-37.
- [21] Feigl K L. 37-Estimating earthquake source parameters from geodetic measurements[J]. *International Geophysics*, 2002, 81(A): 607-620
- [22] Zhu C, Wang C, Zhang B, 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. 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: e2022JB024794.
- [24] Wei S, 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, Chen X, Luo H, et al. An extremely shallow Mw4.1 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, Zhou P, 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, Xie L, Zhao G, 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.
- [29] He Z, Xu W, Li Z, et al. Co and postseismic fault slip models of the 2022 W 6.7 Menyuan earthquake reveal conjugated faulting tectonics at the central section of the Lenglongling fault[J]. *Earthquake Science*, 2024, 37(0): 1-25.

- [30] Zhao L, Xu W, 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: 0040-1951.
- [31] 余鹏飞, 陈威, 乔学军, 等. 基于多源 SAR 数据的 2022 年门源 Ms6.9 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.
- [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 Ms6.2 地震震源时空破裂过程[J]. *武汉大学学报 (信息科学版)*.
- [33] Ferreira A M, and Woodhouse J H. Long-period seismic source inversions using global tomographic models[J]. *Geophysical Journal International*, 2006, 166(3): 1178-1192.
- [34] Ferreira A, Weston J, Funning J. Global compilation of interferometric synthetic aperture radar earthquake source models: 2. Effects of 3 - D Earth structure[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2011, 116(B8).
- [35] Castellaro S, Mulargia F, Kagan Y Y. Regression problems for magnitudes[J]. *Geophysical Journal International*, 2006, 165: 913-930.
- [36] Pritchard M, Simons M, Rosen P, et al. Coseismic 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).
- [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.
- [39] Yu C, Penna N T, Li Z H. Generation of RealTime Mode 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] Govorcin M, Wdowinski S, Matos B, et al. Geodetic source modeling of the 2019 Mw 6.3 Durrës, Albania, Earthquake: partial rupture of a blind reverse fault. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47.
- [42] Wang C, Wang X, Xiu W, et al. Characteristics of the seismogenic faults in the 2018 Lombok, Indonesia, earthquake sequence as revealed by inversion of InSAR measurements[J]. *Seismological Research Letters*, 2020, 91(2A): 733-744.
- [43] Deciem 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.
- [44] Okada Y. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1985, 75(4): 1135-1154.
- [45] Wang T, Wei S, Shi X, et al. The 2016 Kaikōura earthquake: Simultaneous rupture of the subduction interface and overlying faults[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 2018, 482: 44-51.
- [46] Somerville P G, Irikura K, Graves R, et al. Characterizing crustal earthquake slip models for the prediction of strong ground motion[J]. *Seismological Research Letters*, 1999, 70(1): 59-80.
- [47] Hanks T C, Bakun W H. A bilinear source-scaling model for M-log A observations of continental earthquakes[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2002, 92(5): 1841-1846.

- [48] Leonard M. Earthquake fault scaling: Relating rupture length, width, average displacement, and moment release[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2010, 100(5A): 1971-1988.
- [49] 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.
- [50] 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: 0040-1951.
- [51] Ma Y, Qiao X J, Chen W, et al. Source model of 2016 Mw6.6 Aketao earthquake, Xinjiang derived from Sentinel-1 InSAR observation[J]. *Geodesy and Geodynamics*, 2018, 9(5): 372-377.
- [52] Funning G J. Source Parameters of Large Shallow Earthquakes in the Alpine Himalayan Belt from InSAR and Waveform Modelling. *University of Oxford*, 2005.
- [53] Kwong K B, DeShon H R, Kim J W, et al. Resolving teleseismic earthquake catalog and InSAR data discrepancies in absolute space to explore rupture complexity along the Ecuadorian megathrust fault[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2019, 124(7): 6703-6719.
- [54] Robert J M, Harold M, Paul E, et al. 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.
- [55] Lilliefors H W. On the Kolmogorov-Smirnov Test for Normality with Mean and Variance Unknown[J]. *Journal of the American Statistical Association*, 1967, 62(318): 399-402.
- [56] Mai P M, Thingbaijam K K S. SRCMOD: An online database of finite-fault rupture models[J]. *Seismological Research Letters*, 2014, 85(6): 1348-1357.
- [57] Wells D L, Coppersmith k J. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1994, 84(4): 974-1002.
- [58] 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.
- [59] 郑文俊, 袁道阳, 张培震, 等. 青藏高原东北缘活动构造几何图像、运动转换与高原扩展 [J]. *第四纪研究*, 2016, 36(4): 775-788.
- [60] Wessel P, Luis J F, Uieda L, et al. The Generic Mapping Tools Version 6[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2019, 20(11): 5556-5564.

#### 网络首发:

标题: 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

作者: 毛鸿飞, 谢磊, 江坤, 孙凯, 王嘉庚, 许文斌

收稿日期: 2024-06-03

DOI:10.13203/j.whugis20240124

#### 引用格式:

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)*, 2024, DOI: 10.13203/j.whugis20240124 (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,2024,DOI: 10.13203/j.whugis20240124)

网络首发文章内容和格式与正式出版会有细微差别，请以正式出版文件为准！

---

您感兴趣的其他相关论文：

**InSAR 数据约束下的 2023 年赫拉特地震序列发震断层探讨及其建筑物损毁评估**

刘振江, 韩炳权, 刘海辉, 李振洪, 能懿菡, 陈博, 彭建兵

武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(5): 722-733.

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20230382>

**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**

李振洪, 韩炳权, 刘振江, 张苗苗, 余琛, 陈博, 刘海辉, 杜静, 张双成, 朱武, 张勤, 彭建兵

武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(6): 887-897.

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20220037>

**2016 年意大利阿马特里切 Mw 6.2 地震震源机制 InSAR 反演**

张庆云, 李永生, 罗毅, 张景发, 杨建钦

武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(1): 118-124.

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20170252>

## 附录 A

表 A1. InSAR 同震形变场远场形变标准差

序号	日期	地点	矩震级	标准差 (STD/cm)	
				升轨	降轨
1	20190103	珙县	4.8	0.80	0.55
2	20180506	杂多	5.0	0.60	0.61
3	20190907	威远	5.0	1.13	1.05
4	20170201	仲巴	5.1	0.32	0.35
5	20161204	聂荣	5.2	0.34	0.61
6	20200116	库车	5.2	0.67	
7	20200309	洞措	5.2	0.32	
8	20210320	双湖	5.2	0.32	0.16
9	20210323	拜城	5.3	0.56	
10	20160522	定结	5.4	1.14	1.29
11	20170510	塔什库尔干	5.4	0.94	1.13
12	20190924	克什米尔	5.4	2.28	2.01
13	20200401	石渠	5.4	0.78	0.40
14	20210813	玛多	5.4	1.72	0.60
15	20210915	威远	5.4	0.99	1.34

16	20210329	西藏	5.5	0.93	0.55
17	20210616	青海	5.5	0.60	0.77
18	20211130	尼玛	5.5	0.72	0.51
19	20220123	青海	5.6	0.51	0.55
20	20150425	定结	5.7	1.24	0.62
21	20180908	墨江	5.7	1.73	
22	20200320	定结	5.7	0.84	0.76
23	20210319	那曲	5.7	0.55	1.01
24	20220325	青海	5.7	1.18	1.32
25	20220814	那曲	5.7	1.07	0.93
26	20181223	谢通门	5.8	0.35	0.33
27	20190617	长宁	5.8	1.67	2.01
28	20141122	康定	5.9	2.24	2.46
29	20160120	门源	5.9	0.81	0.82
30	20161208	呼图壁	6.0	1.00	0.66
31	20200119	伽师	6.0	0.51	0.70
32	20210521	漾濞	6.1	2.18	2.68
33	20170808	精河	6.3	1.13	1.81
34	20200625	于田	6.3	2.10	2.29
35	20200722	尼玛	6.3	2.08	2.66
36	20150703	皮山	6.4	1.32	1.19
37	20160626	吉尔吉斯斯坦	6.4	1.91	1.13

38	20171117	林芝	6.4	2.71	2.52
39	20170808	九寨沟	6.5	1.96	1.65
40	20161125	阿克陶	6.6	1.23	2.07
41	20220107	门源	6.6	1.14	0.99
42	20220905	泸定	6.6	2.20	2.18

表 A2. 该研究构建的 InSAR 地震目录

序号	日期	地点	经度 (° E)	纬度 (° N)	深度 (km)	走向 (° )	倾角 (° )	倾向 (° )	矩震级
1	20190103	珙县	104.85	28.22	1.47	169.1	58.9	47.3	4.8
2	20180506	杂多	96.59	34.55	3.41	156.4	78.4	172.0	5.0
3	20190907	威远	104.81	29.58	3.61	206.0	18.8	44.2	5.0
4	20170201	仲巴	83.41	30.68	4.66	347.6	28.9	-65.3	5.1
5	20161204	聂荣	92.18	32.36	5.58	238.5	76.4	167.2	5.2
6	20200116	库车	83.65	41.22	2.86	254.0	42.1	-8.2	5.2
7	20200309	洞措	85.57	32.84	6.46	49.6	77.1	-6.2	5.2
8	20210320	双湖	98.91	33.04	3.63	28.1	51.0	-74.1	5.2
9	20210323	拜城	81.06	41.78	1.57	74.5	83.6	-164.3	5.3
10	20160522	定结	87.63	28.47	4.21	11.4	60.6	-56.0	5.4
11	20170510	塔什库尔干	75.29	37.65	6.86	138.7	33.1	-100.3	5.4

12	20190924	克什米尔	73.76	33.10	6.59	104.0	87.7	45.2	5.4
13	20200401	石渠	87.71	34.38	4.70	34.7	76.5	0.3	5.4
14	20210813	玛多	97.54	34.56	4.03	287.3	89.8	5.9	5.4
15	20210915	威远	93.91	38.07	4.35	312.2	47.5	75.4	5.4
16	20210329	西藏	83.50	34.74	5.58	219.9	47.1	-62.1	5.5
17	20210616	青海	105.35	29.20	1.98	135.0	64.1	82.2	5.5
18	20211130	尼玛	87.99	31.78	7.95	359.0	49.9	-89.5	5.5
19	20220123	青海	97.36	38.46	5.08	350.0	62.9	-176.2	5.6
20	20150425	定结	87.43	28.42	9.20	354.2	74.4	-125.8	5.7
21	20180908	墨江	101.58	23.28	5.85	53.1	73.2	-20.8	5.7
22	20200320	定结	87.41	28.67	3.80	142.1	58.8	-92.9	5.7
23	20210319	那曲	92.87	31.92	8.21	57.0	63.5	-42.3	5.7
24	20220325	青海	97.35	38.49	6.06	180.9	89.4	-14.1	5.7
25	20220814	那曲	92.88	33.24	4.19	157.0	81.8	11.3	5.7
26	20181223	谢通门	87.72	30.32	6.31	360.0	51.0	-71.6	5.8
27	20190617	长宁	104.89	28.40	2.55	121.8	8.8	-5.6	5.8
28	20141122	康定	101.68	30.28	8.80	323.6	69.8	-1.4	5.9
29	20160120	门源	101.61	37.66	8.95	154.3	45.6	114.0	5.9
30	20161208	呼图壁	86.32	43.81	10.98	89.0	57.9	124.3	6.0
31	20200119	伽师	77.26	39.89	7.56	95.7	11.6	103.4	6.0
32	20210521	漾濞	99.92	25.64	4.17	312.4	87.6	9.5	6.1
33	20170808	精河	82.68	44.29	14.56	250.2	23.1	61.9	6.3

34	20200625	于田	82.45	35.61	6.14	6.9	66.6	-95.2	6.3
35	20200722	尼玛	86.89	33.19	7.24	211.6	51.1	-69.4	6.3
36	20150703	皮山	78.03	37.57	9.94	292.0	22.9	87.8	6.4
37	20160626	吉尔吉斯斯坦	73.62	39.44	10.60	268.5	17.7	83.9	6.4
38	20171117	林芝	95.11	29.74	5.49	98.7	11.5	60.5	6.4
39	20170808	九寨沟	103.85	33.22	6.01	328.8	59.2	-15.7	6.5
40	20161125	阿克陶	74.24	39.22	5.73	285.0	80.3	-12.2	6.6
41	20220107	门源	101.28	37.78	6.13	287.1	84.0	1.8	6.6
42	20220905	泸定	102.16	29.55	6.08	167.4	73.7	178.5	6.6

表 A3 震源参数平均不确定性

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

表 A4 质心深度平均差异

震源机制	USGS	GCMT	CENC
逆冲	4.3	8.29	4.13

正断	4.06	11.01	4.47
走滑	5.26	13.09	5.74
整体	4.67	11.06	4.94

表 A5 水平位置平均差异

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

表 A6 断层几何参数平均绝对值差异

震源机制	倾角		走向	
	USGS	GCMT	USGS	GCMT
逆冲	12.38	12.83	10.11	12.95
正断	12.8	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

表 A7 经验标度关系（原始数据）

震源机制	关系式	b	a	决定系数 ( $R^2$ )	标准差
逆冲	$\log_{10}W=a+bM_w$	1.14	-6.16	0.92	0.26

	$\log_{10}L=a+bM_w$	0.48	-1.77	0.75	0.16
	$\log_{10}A=a+bM_w$	1.52	-7.38	0.98	0.20
正断	$\log_{10}W=a+bM_w$	0.66	-3.20	0.66	0.23
	$\log_{10}L=a+bM_w$	0.60	-2.57	0.61	0.23
	$\log_{10}A=a+bM_w$	1.48	-7.03	0.93	0.27
走滑	$\log_{10}W=a+bM_w$	0.67	-3.19	0.67	0.28
	$\log_{10}L=a+bM_w$	0.72	-3.30	0.87	0.17
	$\log_{10}A=a+bM_w$	1.45	-6.84	0.96	0.25
整体	$\log_{10}W=a+bM_w$	0.88	-4.48	0.79	0.27
	$\log_{10}L=a+bM_w$	0.64	-2.76	0.78	0.19
	$\log_{10}A=a+bM_w$	1.48	-7.06	0.96	0.24

表 A8 经验标度关系 (增加破裂模型)

震源机制	关系式	b	a	决定系数 ( $R^2$ )	标准差
逆冲	$\log_{10}W=a+bM_w$	0.73	-3.82	0.95	0.27
	$\log_{10}L=a+bM_w$	0.64	-2.70	0.98	0.15
	$\log_{10}A=a+bM_w$	1.34	-6.32	1.00	0.20
正断	$\log_{10}W=a+bM_w$	0.70	-3.43	0.93	0.20
	$\log_{10}L=a+bM_w$	0.65	-2.86	0.92	0.19
	$\log_{10}A=a+bM_w$	1.37	-6.44	0.99	0.23
走滑	$\log_{10}W=a+bM_w$	0.54	-2.47	0.84	0.26
	$\log_{10}L=a+bM_w$	0.79	-3.72	0.98	0.16
	$\log_{10}A=a+bM_w$	1.32	-6.12	0.99	0.22
整体	$\log_{10}W=a+bM_w$	0.65	-3.17	0.92	0.26

$\log_{10}L=a+bM_w$	0.71	-3.16	0.97	0.17
$\log_{10}A=a+bM_w$	1.33	-6.17	1.00	0.21

表 A9. 构建经验标度关系中强震震源参数 ( $M_w \geq 6$ )

时间	地点	震源机制	震级 ( $M_w$ )	纬度 (°)	经度 (°)	深度 (km)	长度 (km)	宽度 (km)	参考文献
20011114	青海	走滑	7.84	35.95	90.54	10.0	432	37	Hayes, 2015
20011114	青海	走滑	7.80	35.92	90.541	13.5	450	20	Lasserre et al., 2005
20051008	巴基斯坦	逆冲	7.60	34.49	73.63	10.9	76	70	Konca, 2005
20051008	巴基斯坦	逆冲	7.60	34.48	73.63	10.5	126	54	Shao and Ji, 2005
20080320	新疆于田	正断	7.10	35.48	81.51	4.1	54	22	Elliott et al., 2010
20080320	新疆于田	正断	7.20	35.55	81.54	22.9	44	30	Zhu et al., 2022
20080512	四川汶川	逆冲	7.92	30.86	103.24	10.8	280	40	Fielding et al., 2013
20080512	四川汶川	逆冲	7.90	30.86	103.24	10.8	280	40	Fielding et al., 2013
20080512	四川汶川	逆冲	7.88	30.99	103.36	14.0	132	28	Hayes, 2017
20080512	四川汶川	逆冲	7.90	31.10	103.32	9.5	315	40	Ji and Hayes, 2008
20080512	四川汶川	逆冲	7.90	30.87	103.2	13.2	360	100	Qi et al., 2011
20080512	四川汶川	逆冲	7.90	30.99	103.46	9.3	260	28	Sladen, 2008
20080512	四川汶川	逆冲	8.03	30.99	103.36	16.0	320	60	Yagi et al., 2012
20080825	西藏	正断	6.70	30.77	83.48	7.6	31	30	Elliott et al., 2010

20110918	印度锡金邦	走滑	6.90	27.80	88.15	45.0	45	45	Sunilkumar et al., 2019
20150425	尼泊尔	逆冲	7.82	28.13	84.65	15.0	193	168	Hayes, 2017
20150425	尼泊尔	逆冲	7.84	28.15	84.71	15.0	180	110	Kobayashi et al., 2016
20150425	尼泊尔	逆冲	7.90	28.15	84.71	15.0	160	88	Yagi and Okuwaki, 2015
20150512	尼泊尔	逆冲	7.26	27.84	86.15	15.0	125	82	Hayes, 2017
20150703	新疆皮山	逆冲	6.64	37.51	78.01	7.4	40	15	Wen et al., 2016
20150703	新疆皮山	逆冲	6.50	29.79	95.00	7.4	36	20	Wen et al., 2016
20151207	塔吉克斯坦	走滑	7.17	38.26	72.77	10.0	49	32	Hayes, 2017
20151207	塔吉克斯坦	走滑	7.19	38.21	72.78	22.0	80	30	Sangha et al., 2017
20151207	塔吉克斯坦	走滑	7.07	38.51	73.09	17.5	55	18	Sangha et al., 2017
20170808	九寨沟	正断	6.72	33.28	103.75	19.5	40	20	Zhu et al., 2022
20200722	西藏	正断	6.36	33.18	86.88	12.5	22	11	Zhu et al., 2022
20210521	青海玛多	走滑	7.40	34.59	98.26	10.0	160	20	Lyu et al., 2022
20210521	青海玛多	走滑	7.46	34.59	98.26	10.0	192	30	Wang et al., 2022a
20210521	云南漾濞	走滑	6.09	25.63	99.95	13.5	19	14	Zhu et al., 2022