引文格式:王悦翔,王腾.InSAR观测的2024年阿里地区日土县Mw 5.6地震同震模型及其在地形塑造中的作用[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(8):1631-1638.DOI:10.13203/j.whugis20240453

Citation: WANG Yuexiang, WANG Teng. InSAR-Derived Coseismic Slip Model of the 2024 Ali Mw 5.6 Earthquake and Its Role on Landscape Evolution[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2025,50(8):1631-1638.DOI:10.13203/j.whugis20240453

InSAR观测的2024年阿里地区日土县Mw 5.6地震同震模型及其在地形塑造中的作用

王悦翔[1] 王 腾[1]

1 北京大学地球与空间科学学院,北京,100871

摘 要:2024-04-13阿里地区日土县Mw 5.6地震发生于青藏高原中西部的羌塘板块内部的鲁玛江冬错断裂附近,经测定其发震震中(81.884°E,33.585°N)位于当地一座海拔5 500 m左右的无名山峰附近。利用Sentinel-1合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar,InSAR)数据量测了地震造成的同震地表形变场,联合使用非线性以及线性反演的方式确定了震源位置、几何参数,以及有限断层滑移模型。反演结果显示,这一次地震的发震断层走向约为336°,向东倾约66°,滑移分布矩心位置海拔超过5 435 m,是青藏高原内部近20年以来InSAR研究过的正断层地震中海拔最高的。通过滑移分布模拟的地表形变与当地地形的对比,发现这一处地震同震形变中的沉降集中在当地峰顶位置,呈现平整地貌的特征(即减小地形梯度),在一定程度上限制了山脉以及青藏高原继续隆起的趋势。这一次地震对于帮助人们认识正断层地震在高原地貌演化中的作用具有一定意义。

关键词:阿里地区日土县地震;InSAR;有限断层模型;地貌演化

中图分类号:P237 **文献标识码**:A **收稿日期**:2024-11-29

DOI:10.13203/j.whugis20240453 **文章编号**:1671-8860(2025)08-1631-08

InSAR-Derived Coseismic Slip Model of the 2024 Ali Mw 5.6 Earthquake and Its Role on Landscape Evolution

WANG Yuexiang[1] *WANG Teng*[1]

1 School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

Abstract: **Objectives**: This study aims to investigate the landscape evolution effects of the 2024 Mw 5.6 earthquake that occurred in Ritu County, Ali region, on the Tibetan Plateau using interferometric synthetic aperture radar (InSAR) observations. The research seeks to explore the geodynamic processes and the role of normal faulting earthquakes in the topographic development of the Tibetan Plateau. **Methods**: We utilized Sentinel-1 synthetic aperture radar data to capture the coseismic deformation field. Nonlinear and linear inversion methods were applied to determine the source location, geometric parameters, and finite fault slip distribution. The Okada model was used to calculate the three-dimensional coseismic deformation field, which was then compared with the local topography. **Results**: The inversion results revealed that the Ritu earthquake had a strike of 336°, a dip of 66° to the east, and a predominantly normal slip component with a minor right-lateral component. The centroid of the slip distribution was located at an altitude of over 5 435 m, making it the highest-altitude normal faulting earthquake recorded by InSAR in the Tibetan Plateau interior over the past 20 years. The comparison between the coseismic deformation field and the local topography indicated that the subsidence was concentrated at the summit, flatten local topography by reducing the gradient, thereby limiting the continuous uplift of the Tibetan Plateau. **Conclusions**: The study concludes that the 2024 Ali earthquake, with its

基金项目:国家自然科学基金创新群体项目(42021003)。

第一作者:王悦翔,博士生,研究方向为雷达影像大地测量。wangyx418@pku.edu.cn

通信作者:王腾,博士,助理教授。wang.teng@pku.edu.cn

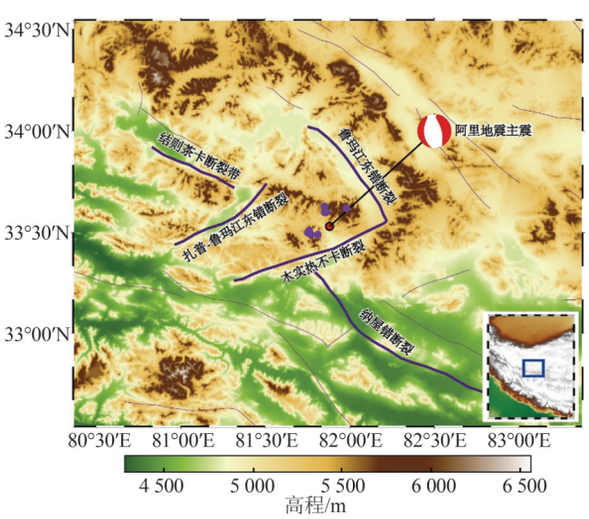
high epicentral elevation, played a significant role in restraining the further uplift of the Tibetan Plateau. The findings, to some extent, support the gravitational collapse theory of normal faulting earthquakes within the plateau and provide insights into the intrinsic mechanisms that prevent the Tibetan Plateau from continually uplifting. This research highlights the importance of high-altitude normal faulting earthquakes in shaping the landscape of the Tibetan Plateau.

Key words: Ali earthquake; InSAR; finite fault slip model; landscape evolution

青藏高原内部构造背景复杂,其内部的地球动力学特性和地震发震机制一直是广泛讨论的焦点。普遍观点认为,自约5 500万年前,青藏高原开始受到印度板块的碰撞,引发了持续的抬升。当前的观测结果指出青藏高原正遭受印度板块以约40 mm/a的速度向北挤压,且后期呈现出物质受压向东流出的趋势[1-4]。受到印度板块俯冲的影响,高原内部形成了大量南北走向的正断层[5-6]。关于青藏高原内部正断层地震的发震机制,有研究指出它们可能由重力垮塌引起[7]。这一学说指在高海拔区域,由于重力均衡的限制,地形无法无限增长,而正断层地震的发生便是这一限制的具体体现之一。大地测量学的观测研究也揭示了高原的整体运动趋势,有研究指出青藏高原可能已经停止生长,正进入一个海拔逐渐降低的阶段[8]。

随着合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)技术的迅速发展,合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)卫星对于青藏高原大地震的空间覆盖程度、精度以及分辨率等方面都有了显著提升。InSAR观测技术的进步使得对于青藏高原内部震例的研究变得更加深入和丰富[9-13]。例如,文献[14]通过分析统计青藏高原上不同类型地震的位置与高程数据,得出了一项重要结论:青藏高原上正断层地震普遍发生于海拔4 200 m以上的地区,且重力垮塌可能是这些地震发生的一个重要原因。

阿里地区的日土县坐落于班公-怒江缝合带以北的羌塘地块,整体海拔超过4 000 m,最高点的海拔达到6 200 m。羌塘地块是青藏高原内部的一大地质构造单元,这一区域主要以侏罗纪时期以及石炭系二叠系形成的超基性火成岩或蛇绿岩构成。根据全球矩张量数据库(global centroid moment tensor, GCMT)的统计数据,在2014—2024年间,此地区并未记录到矩震级Mw>5.0的地震。最近一次的Mw>5.0的地震时间发生于2012年,为一走滑型地震,而在这一地区上一次Mw>5.0的正断层地震则发生于2009年,2007年在阿里地区发生的Mw 6.1正断层地震也曾引起关注与研究[15]。本文关注的地震发生于2024-04-13,发震地点位于阿里地区的日土县,较2007年地震位置靠南,是一起Mw 5.6正断层地震。中国地震台网的数据显示,此次地震发生的前一天记录到了一次前震,而发震后的一周之内,共监测到了6次,且最大震级达到4.5级的余震(图1)。中国地震台网确定的震中坐标为81.84°E,33.56°N,海拔高度为5 515 m处,这是自2020年以来,通过InSAR技术观测到的所有青藏高原内部正断层地震中海拔最高的震中位置。因此,2024年阿里地震为研究高海拔正断层地震及其所在的青藏高原地形塑造中的作用提供了难得的机遇。借助欧洲空间局Sentinel-1 InSAR开源的观测数据以及成熟的反演技术,人们能够精确地重新确定阿里地震的震中位置、震源机制以及滑移分布,并深入研究此次地震的发震构造及其对地形塑造的影响。



注:图中紫色线为震中附近的几条主要断层[16];紫色点为中国地震台网监测到的余震;沙滩球代表从GCMT获取的震源机制。

图1 2024年阿里地震区域构造背景图

Fig. 1 Tectonic Background of the 2024 Ali Earthquake Region

1 研究数据

本文利用开源Sentinel-1 SAR数据,针对2024

年阿里地震事件，获取了相应的同震形变场数据（https://search.asf.alaska.edu/）。数据的影像干涉与解缠步骤是通过哨兵 1 号干涉处理器自动化处理完成的（http://sarimggeodesy.github.io/software）。该处理器能够高效自动地处理 Sentinel-1 SAR 数据并生成干涉图。本文收集了覆盖发震区域的升、降轨主辅影像数据（表 1）。在干涉处理过程中，选取方位向 6、距离向 23 的多视数进行了多视处理，并应用窗口大小 32、$\alpha=0.5$ 的 Goldstein 滤波器进行滤波。此外，使用了 90 m 精度的航天飞机地形雷达测绘任务数据对干涉图进行地形校正。解缠采用了开源的 SNAPHU 算法。

表 1　本文研究使用的 SAR 影像信息

Table 1　SAR Image Information Used in This Study

轨道编号	主影像获取日期	辅影像获取日期
AT158	2024-03-21	2024-04-26
DT165	2024-03-22	2024-04-15

2　研究方法

在获得干涉图后，通过手动设置相干性阈值 0.3 排除了相干性差以及失相干的数据点。经过干涉处理后，得到了两幅覆盖震中区域的升降轨干涉图（图 2）。

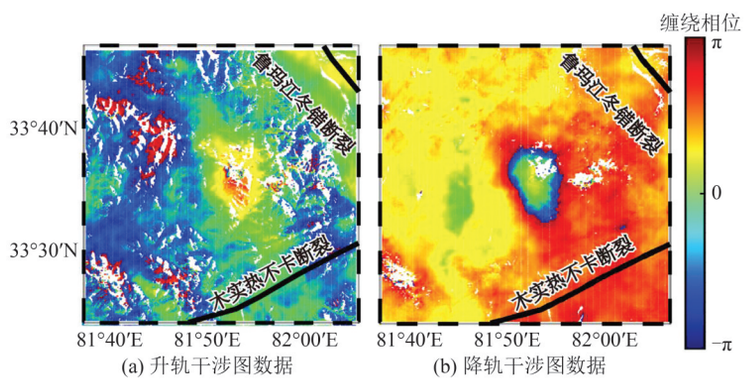


图 2　2024 年阿里地震同震 InSAR 干涉图，每个整周的干涉条纹代表 2.8 cm 的雷达视线向形变

Fig. 2　Coseismic InSAR Interferogram of the 2024 Ali Earthquake, Each Complete Fringe Represents 2.8 cm of Deformation in the Radar Line-of-Sight Direction

鉴于此次地震的震级相对较小，因此地表形变量也相对较小，没有超过一个周期的相位变化。从升轨形变场的特征可以判断这一处地震断层走向呈现西北-东南向。发震断层倾向可能向东或向西，需要进一步的反演处理才能够确定。在震中附近，可能与此次地震事件相关联的断裂为鲁玛江冬错断裂。此外，升、降轨干涉图的相位均为增加，表明地表位移以垂向形变为主，且远离卫星，即地表形变以沉降主导（图 2）。

以解缠并转化为雷达视线向形变后的干涉图作为输入数据，对于两组数据实施自适应四叉树降采样处理[17]。该方法首先将形变影像等分为 4 个子矩形，并计算每个子矩形内部数据的方差，若子矩形内数据的方差超过设定阈值，则该子矩形将被进一步等分为 4 个更小的子矩形；若子矩形内数据的方差低于设定阈值，则停止划分。划分过程完成后，每个矩形的中心点坐标及其内部所有数据点的平均值被用作该矩形的采样结果。这一自适应的四叉树降采样方法在减少数据点数量、提高后续反演计算效率的同时，确保了震中附近形变梯度较大的区域能够保留更多的数据点供反演计算使用，同时确保了反演结果的可靠性。通过设置升、降轨数据集降采样的方差阈值分别为 0.15 cm^2 和 0.12 cm^2，在经过降采样处理后，原始数据合计约 60 万个数据点减少至约 2 000 个（升、降轨分别为 996 个和 828 个数据点）。

降采样处理完成后，使用开源程序测地学贝叶斯反演软件[18]对 2024 年阿里地震的震源机制以及几何参数进行反演分析。鉴于地表形变与有限断层的尺寸、深度、滑移量等参数之间存在基于弹性半空间位错理论下的非线性关系[19]，此反演程序采用了基于蒙特卡洛马尔可夫链的非线性反演方法。在反演过程中，首先根据 GCMT 提供的震源机制解为震源的 9 个几何参数（长度、宽度、深度、经度、纬度、走向、倾角、走向方向滑动量、倾向方向滑动量）设定了初始值，并设置非震源性的变量的初始值为 0。这一非震源性的变量由解缠时选取的零形变参考点导致的图像系统性偏移导致。随后，这些参数被限定在一定的范围内进行搜索。在基于马尔可夫的搜索过程中，每次迭代会对这些参数进行一定步长的调

整,系统会根据当前参数正演计算的地表形变与实际数据进行比较并计算残差。如果调整后的参数组合使得残差减小,则在保留调整的基础上继续迭代,否则这一调整仅以一定的几率进行保留(此几率由残差的增加量决定)。如果参数调整没有被保留,则此次调整迭代视作无效,且不计入总迭代次数的统计。这种设计有助于避免参数在搜索过程中落入局部最优,确保了这一反演过程的准确性。

3 研究结果

在本研究中,选取了1×10^6作为总的反演迭代次数。在反演迭代过程结束后,绘制反映所有参数出现频率的直方图,以此通过分析直方图的形态判定各个参数是否在一定范围内收敛。该反演方法的一大显著优势在于能为获得的参数提供对应的置信区间,从而有助于分析模型对不同参数的敏感程度。图3展示了有限断层每一项几何参数反演结果的分布直方图。可以观察到,在均一滑动模型下,地震的几何参数,如长度、走向、倾向、位置、走向方向上的滑动量在反演过程中表现出了良好的收敛性,集中在峰值附近,并呈现正态分布的趋势,但是断层的倾向方向的滑移量约束相对较弱,且断层宽度的反演结果约为2 000 m,这与基于地震震级以及经验模型[20]预测的断层尺度(长、宽分别应为7 km以及5.4 km)存在较大差异。这一差异与本文在当前反演步骤中假定地震滑移均一,以及部分参数间存在的强耦合效应相关。此外,反演结果还表明解缠过程导致的非震源常数偏移小于1 mm,系统性线性趋势5 mm左右(升轨:5.7 mm;降轨:6.1 mm),这对于反演结果以及误差分析没有显著贡献。

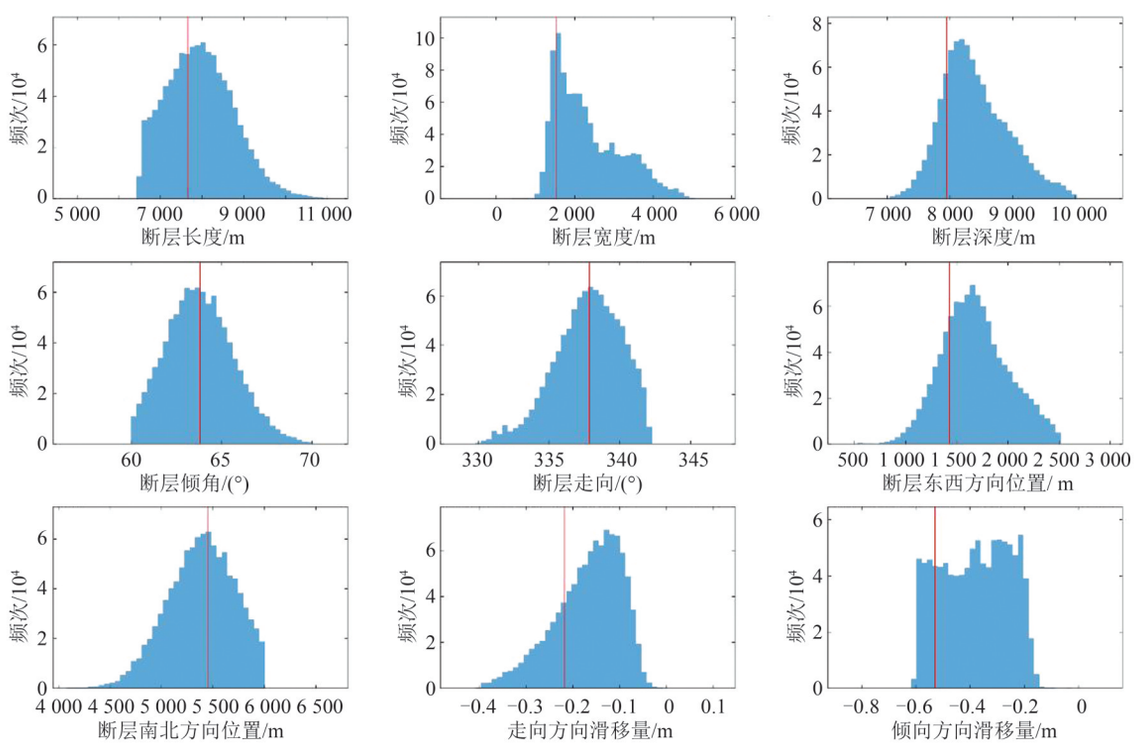


图3 非线性反演获取的有限断层几何参数分布直方图,纵坐标表示马尔可夫链转移过程中各参数出现的次数

Fig. 3 Histogram of Finite Fault Geometry Parameters from Nonlinear Inversion, the Vertical Axis Shows the Number of Occurrences of Each Parameter During the Markov Chain Transition Process

本文反演结果显示的震源机制解与美国地质调查局(United States Geological Survey, USGS)、GCMT等机构提供的震源机制解的对比见表2。对比分析显示,本文的震源机制解在深度上更浅、倾角上更大,而其余参数与机构解基本一致。利用本研究反演确定的模型参数正演模拟地表形变,结果表明,在断层均匀滑动的假设下,反演的结果能够在很大程度上解释地表的形变观测(图4)。为了使断层宽度以及滑移分布更接近实际情况,在现有的均匀滑动有限断层模型基础上进一步对断层上的滑移分布进行了精细反演。

非线性反演的步骤中采用了断层滑移均一的假设。这一简化处理有助于节约计算资源,提

表 2　2024 年阿里 Mw 5.6 地震震源参数

Table 2　Source Parameters of the 2024 Mw 5.6 Ali Earthquake

研究来源	震中位置			震源机制			矩震级(Mw)
	经度/(°)	纬度/(°)	深度/km	走向/(°)	倾角/(°)	滑动角/(°)	
USGS	81.867	33.548	10	156	39	−103	5.47
				352	52	−80	
GCMT	81.88	33.53	17.8	182	37	−73	5.6
				342	55	−102	
本文研究	81.87	33.54	8	338	64	−112	5.47

注：本文研究中的震源参数由基于马尔可夫链的蒙特卡洛模拟给出。

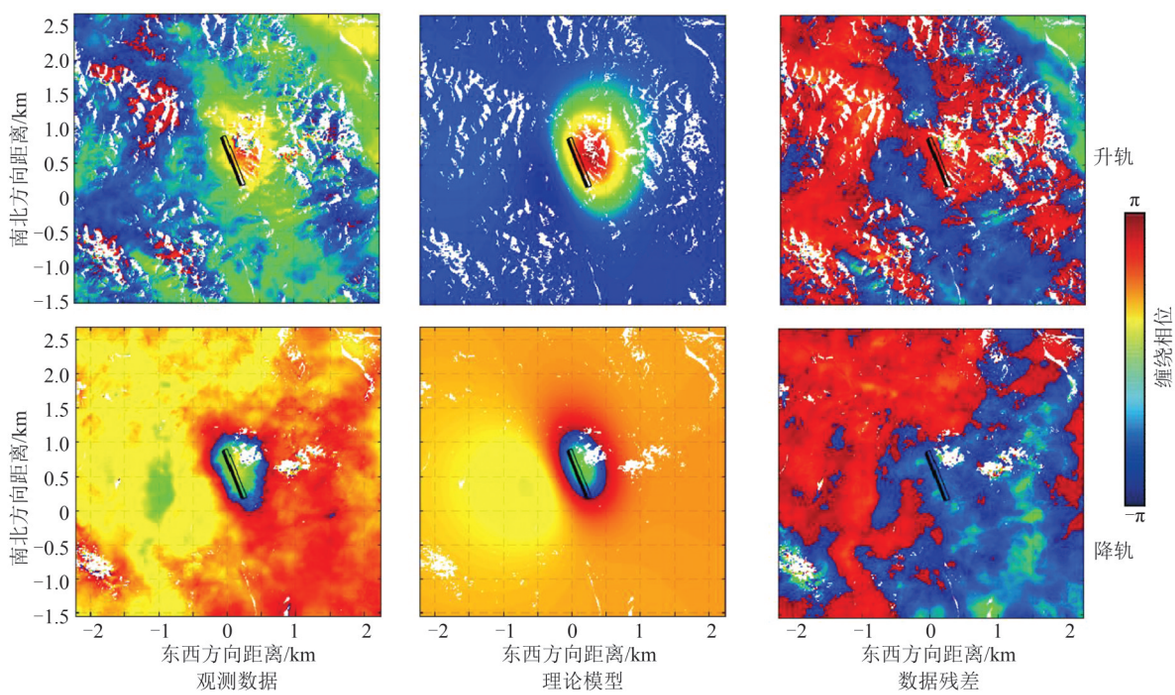


图 4　升、降轨干涉图的观测、模拟以及残差展示

Fig. 4　Observation, Model and Residual of Ascending and Descending Orbits

升计算效率。然而，通过这一假设反演得到的断层模型无法精确地反映地震发生时断层面上的滑移分布，同时部分参数收敛效果并不理想。为了解决这些问题，采取了进一步的线性反演方法。在这一阶段，基于前一步反演确定的断层几何参数，固定断层面的位置。在适度扩大断层的面积后，将其均匀分割为若干尺寸为 1 km×1 km 的子断层进行反演。在这一步骤中，扩大断层面的目的是更准确地确定滑移分布的范围，以便真实还原地震发生时的断层运动特征，且每个子断层上的滑移分量与地表形变之间存在线性组合关系[19]，可以采用更为高效的线性反演算法对每个子断层上的滑移分量进行反演。在反演过程中，本文的目标是最小化以下函数：

$$f(\boldsymbol{x})=\left|\left|\boldsymbol{y}-M\boldsymbol{x}\right|\right|^2+\beta^2\left|\left|\nabla\boldsymbol{x}\right|\right|^2 \quad (1)$$

式中，$\boldsymbol{y}$ 代表实际观测的数据，此处依然使用四叉树方法降采样得到的数据集；$\boldsymbol{x}$ 代表每个子断层上的滑移分布；M 为线性算子，它是基于弹性解[19]描述的子断层滑移量与地表位移的关系；β 为平滑因子。在实际操作中，采取了最陡下降法[21-23]来解决这一线性反演问题。在反演过程中，通过限定断层上滑移量的平滑程度，获取了不同约束条件下的滑移模型，并根据这些条件下计算得到的应力降与平滑因子 β 进行权衡，以最终选取合适的平滑因子与滑移模型（图 5）。通过实验，最终选择了 $\beta=0.05$ 对应的有限断层滑移模型作为最终的结果，该断层滑移模型以及其在三维空间中的形态如图 6 所示。此外，通过滑移量分布反演得到的滑移集中区域，相比均一滑动假设下所得到的模型更接近统计模型中的尺度特征。

对于西倾断层面的可能性，本文也相应进行了反演分析。然而，在采用均匀滑动模型反演的

步骤中,有限断层模型倾角收敛至约27°,而常见的正断层地震倾角多大于45°。基于这一反演结果,最终认定前文确定的东倾断层为本次地震的真实发震断层。

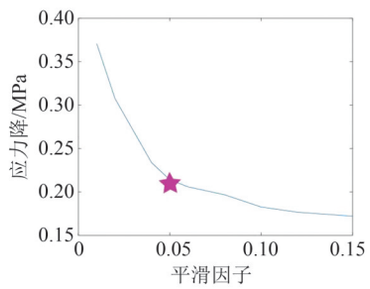
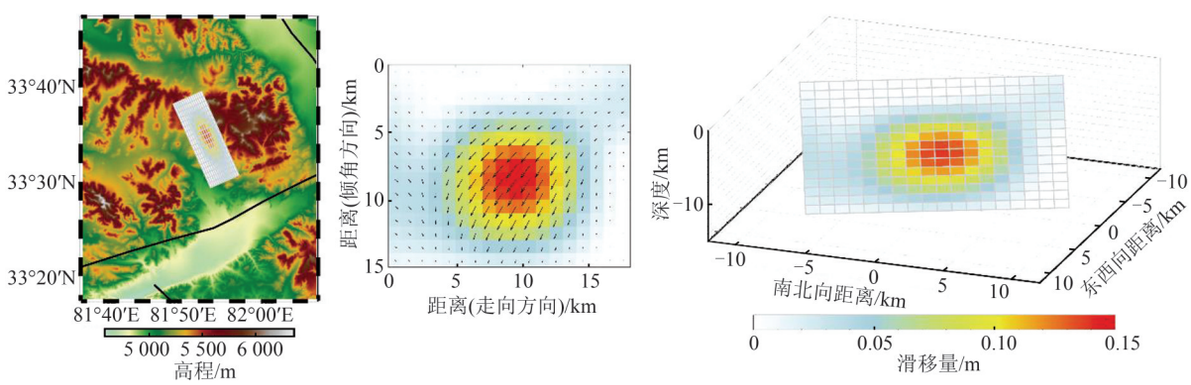


图5 线性反演中不同平滑因子与模型计算的应力降的关系

Fig. 5 Smoothing Factor and Stress Drop Relationship in Linear Inversion

利用InSAR技术反演得到的震源机制相比USGS、GCMT等机构利用传统地震学手段得到的震源机制,在位置上更加准确[24],且能够反映详细的滑移分布以及深度信息。本文的反演结果显示,2024年阿里地震的发震断层走向约为北偏西约30°,倾角约64°,与机构解相比更大,呈现出典型的正断层地震特点。该发震断层平行于鲁玛江冬错断裂,但是空间上并不完全重合,不排除其发生于一未发现的次级断层上。此外,该地震的平均滑动角(受每个子断层滑移量加权)约为−117°,地震滑移主要呈现正断层地震特征,走滑分量所占比例相对较小。滑移集中于断层倾向方向上6~10 km处,考虑到断层倾角,实际滑移约在地下7 km附近分布,深度较浅,对于当地地貌的塑造具有显著影响。



(a) 断层及划分后的各子断层在地表相应的投影位置 (b) 二维滑移分布大小以及方向 (c) 三维断层几何和滑移分布大小分布

图6 阿里地震的滑移分布反演结果

Fig. 6 Inversion Results of the Slip Distribution for the Ali Earthquake

4 讨 论

文献[14]的研究结果显示,青藏高原上的正断层地震主要发生于海拔超过4 200 m的区域,这一海拔阈值显著高于逆冲以及走滑两种类型地震的发震海拔。此外,关于青藏高原生长过程的一些研究[1,5]也指出,在印度-青藏-塔里木-西伯利亚这一系列南北向排列的板块体系中,青藏高原板块相对软弱,从而集中了形变与抬升作用,并在重力均衡的作用下倾向于因重力垮塌而产生正断层地震事件。本研究旨在从形变分布特征方面分析,重力均衡以及重力垮塌因素如何导致的正断层地震发生,如何进一步限制青藏高原内部生长的趋势。

2024年阿里地震发生于青藏高原内部的羌塘块体西部的山脉区域,此地人烟稀少,山脉也没有得以系统命名。此地震震中海拔高度超过5 200 m。InSAR数据反演得到的滑移分布矩心(81.884 3°E,33.574 5°N)对应的海拔高度进一步达到了5 435 m。本文收集并分析了目前已经发表的、利用InSAR技术研究的青藏高原内部正断层地震模型[14,24],对包括2024年阿里地震在内的10处青藏高原内部正断层地震滑移的矩心坐标对应的海拔高度进行了统计分析,如表3所示。

分析结果显示,2024年阿里地震在这些地震中拥有最高的滑移矩心对应海拔。这一地震也有可能是目前InSAR能够观测到的最高海拔的地震,此地震事件的正断层机制表明了其削弱当地山脉继续隆起过程中所起的作用。本文反演结果得到的地震位置与机构解基本一致。虽然考虑到地形因素可以使反演结果更加精确,但是引入地形变量的算法(如有限元法)会显著增加计算成本,因此在反演中一般仅将这一部分可能引起的差异纳入误差考量之中[18],本文认为地形因素不会对反演得到的

模型造成显著影响。

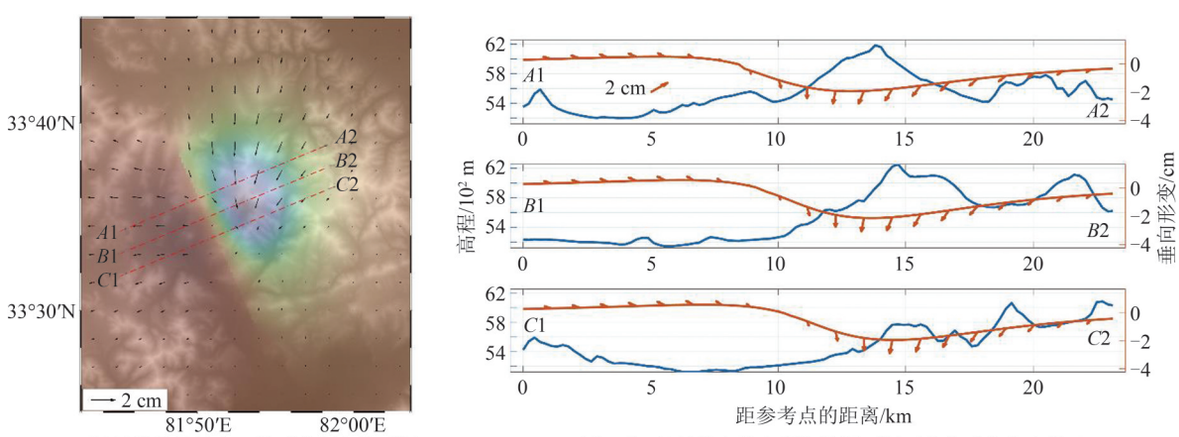
表 3　青藏高原上其他正断层地震矩心位置高程分布

Table 3　Distribution of Epicenter of Normal Fault Earthquakes Studied with InSAR in the Tibetan Plateau

地震名称	矩心海拔/m	矩心深度/m	发震时间
改则[a][14]	4 980	8 800	2008-01
改则[b][14]	5 027	3 300	2008-01
当雄[14]	4 957	7 400	2008-10
仲巴[14]	5 396	8 900	2008-08
定日[a][24]	4 872	3 971	2015-04
定青[24]	5 004	9 422	2016-05
定日[b][24]	5 046	9 124	2020-03
尼玛[25]	4 914	7 460	2020-07
双湖	5 042	5 320	2021-03
阿里（本文研究）	5 435	7 761	2024-03

注：双湖和阿里来源于本文研究利用 InSAR 自行确定。

为了深入探讨正断层地震同震期间产生的地表形变与地形之间的关系，基于反演过程确定的有限断层滑移分布模型正演计算了 2024 年阿里地震的地表三维形变场，并将地表形变与当地地形数据[26]进行对比分析。分析结果显示，地震同震形变的沉降分量主要集中于震中所在的山峰附近，且这一山峰最高点的海拔接近 6 200 m（图 7(a)），且同震垂直形变与地形呈现出显著的负相关。这一发现表明阿里地震在一定程度上抑制了这处山脉的进一步抬升。这与 Tapponnier 团队[1-2,5]的论点相吻合，他们认为青藏高原内部可能因印度板块的南北向挤压与重力均衡共同作用产生了东西向的拉张，进而诱发正断层地震。本文的研究不仅支持了这一结论，而且进一步指出，在极高海拔地区发生的正断层地震中，重力垮塌的效应可能更直接地影响山脉的生长，本文绘制的垂直于走向方向的剖线上垂向形变-地形图（图 7(b)）直观地展示了这一点。以 2024 年阿里地震为案例，本文认为青藏高原上的正断层地震产生的同震垂直形变场与地貌之间存在密切的联系：随着海拔的升高，受重力均衡以及岩体强度的共同影响，正断层地震更容易发生，正断层地震的发生也相应地限制了高原的无限抬升，将高原的海拔维持在一定的范围内。期待后续研究能够利用更多震例，进一步验证及深化这一论点。



(a) 阿里地震的地表三维形变场与地形图　(b) 图(a)中3条剖线上的高程与投影至剖面上的形变分布情况

图 7　正断层地震同震期间产生的地表形变与地形之间的关系

Fig. 7　Relationship Between Surface Deformation Generated During the Coseismic Period of a Normal Fault Earthquake and Topography

5　结　语

本文利用 InSAR 技术获取了 2024 年阿里地震的视线向形变干涉图，并基于干涉图反演了断层几何参数和滑移模型。相比地震机构提供的震源机制解，本文利用 InSAR 技术反演得到的模型在空间位置上更加精确，且能够反映地下破裂分布情况。研究结果显示，阿里地震震源矩心位置的海拔高度是目前使用 InSAR 研究的青藏高原内部地震中最高的。通过最优模型正演模拟的同震形变与地貌之间的剖线分析，发现 2024 年阿里地震对震中区域高海拔山峰具有明显的削弱作用，呈现出使地形梯度减小的平整作用，且限制了青藏高原的进一步抬升。基于阿里地震同震形变场的分布特征，对青藏高原的隆升变形机制进行了深入的解译，推测 2024 年阿里地震对

于高原抬升以及地形梯度均具有约束作用。期待未来能有更多研究聚焦于青藏高原上类似的震例,以进一步验证、补充、扩展本研究的结论。

参 考 文 献

[1] MOLNAR P, TAPPONNIER P. Cenozoic Tectonics of Asia: Effects of a Continental Collision: Features of Recent Continental Tectonics in Asia Can Be Interpreted as Results of the India-Eurasia Collision[J]. *Science*, 1975, 189(4201): 419-426.

[2] TAPPONNIER P, XU Z Q, ROGER F, et al. Oblique Stepwise Rise and Growth of the Tibet Plateau[J]. *Science*, 2001, 294(5547): 1671-1677.

[3] ZHANG P Z, SHEN Z K, WANG M, et al. Continuous Deformation of the Tibetan Plateau from Global Positioning System Data [J]. *Geology*, 2004, 32(9): 809.

[4] LI K, TAPPONNIER P, XU X W, et al. Holocene Slip Rate Along the Beng Co Fault and Dextral Strike-Slip Extrusion of Central Eastern Tibet[J]. *Tectonics*, 2022, 41(8): e2022TC007230.

[5] ARMIJO R, TAPPONNIER P, HAN T L. Late Cenozoic Right-Lateral Strike-Slip Faulting in Southern Tibet [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1989, 94(B3): 2787-2838.

[6] TAYLOR M, YIN A, RYERSON F J, et al. Conjugate Strike-Slip Faulting Along the Bangong-Nujiang Suture Zone Accommodates Coeval East-West Extension and North-South Shortening in the Interior of the Tibetan Plateau[J]. *Tectonics*, 2003, 22(4): 1044.

[7] MOLNAR P, TAPPONNIER P. Active Tectonics of Tibet[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1978, 83(B11): 5361-5375.

[8] GE W P, MOLNAR P, SHEN Z K, et al. Present-Day Crustal Thinning in the Southern and Northern Tibetan Plateau Revealed by GPS Measurements[J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(13): 5227-5235.

[9] HE P, WEN Y M, DING K H, et al. Normal Faulting in the 2020 Mw 6.2 Yutian Event: Implications for Ongoing E - W Thinning in Northern Tibet [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(18): 3012.

[10] YANG J Y, XU C J, WEN Y M, et al. The July 2020 Mw 6.3 Nima Earthquake, Central Tibet: A Shallow Normal-Faulting Event Rupturing in a Stepover Zone [J]. *Seismological Research Letters*, 2022, 93(1): 45-55.

[11] 冯万鹏,何骁慧,张逸鹏,等.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,2023,68(2-3):254-270.
FENG Wanpeng, HE Xiaohui, ZHANG Yipeng, et al. Seismic Faults of the 2022 Mw 6.6 Menyuan, Qinghai Earthquake and Their Implication for the Regional Seismogenic Structures [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2023,68(2-3): 254-270.

[12] 路珍,王丽凤,黄伟亮,等.2022年门源Ms 6.9地震的同震滑动分布:联合InSAR、GPS和地表位错的贝叶斯建模[J].地球物理学报,2024,67(5):1781-1796.
LU Zhen, WANG Lifeng, HUANG Weiliang, et al. Coseismic Slip Distribution of the 2022 Menyuan Ms 6.9: Bayesian Modeling Based on Joint InSAR, GPS and Surface Dislocation Observations[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2024, 67(5): 1781-1796.

[13] LI K, LI Y S, TAPPONNIER P, et al. Joint InSAR and Field Constraints on Faulting During the Mw 6.4, July 23, 2020, Nima/Rongma Earthquake in Central Tibet[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2021, 126(9): e2021JB022212.

[14] 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.

[15] 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.

[16] 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.

[17] OKADA Y. Surface Deformation Due to Shear and Tensile Faults in a Half-Space [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1986, 23(4): 128.

[18] WELLS D L, COPPERSMITH K J. New Empirical Relationships Among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement[J]. *The Bulletin of the Seismological Society of America*, 1994, 84(4): 974-1002.

[19] WANG L, WANG R, ROTH F, et al. Afterslip and Viscoelastic Relaxation Following the 1999 M 7.4 İzmit Earthquake from GPS Measurements[J]. *Geophysical Journal International*, 2009, 178(3): 1220-1237.

(下转第1656页)