**引文格式**:杨九元,温扬茂,许才军.InSAR观测揭示的2024年西藏尼玛Mw 6.0地震同震破裂行为[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(8):1599-1607.DOI:10.13203/j.whugis20240243

**Citation**: YANG Jiuyuan, WEN Yangmao, XU Caijun. Coseismic Rupture Behavior of the 2024 Nima (Xizang, China) Mw 6.0 Earthquake Revealed by InSAR Observations[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2025, 50(8): 1599-1607.DOI:10.13203/j.whugis20240243

# InSAR观测揭示的2024年西藏尼玛Mw 6.0地震同震破裂行为

杨九元[1,2] 温扬茂[2,3] 许才军[2,3]

1 华北水利水电大学测绘与地理信息学院,河南 郑州,450046

2 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079

3 湖北珞珈实验室,湖北 武汉,430079

**摘 要**:2024-06-01,青藏高原中北部尼玛县发生了一次Mw 6.0浅源地震。作为拉雄错-嘎尔孔茶卡断裂带附近发生的最大地震,此地震的发生为深入理解该研究程度较低区域的发震构造分布及运动特性提供了重要机会。利用Sentinel-1A卫星的升、降轨合成孔径雷达影像获取了该事件的同震地表形变,并探究了其发震构造。尽管合成孔径雷达干涉测量观测反演获取的东北倾和西北倾破裂断层模型均较好地拟合同震形变,但综合分析反演结果、历史地震、区域活动断裂分布及运动特性,推断该地震成核于东北倾(走向325°)倾角83°的右旋走滑断层,可能为拉雄错-嘎尔孔茶卡断裂带的一个隐伏分支断裂。同震滑动最大为0.67 m,主要分布于2.0~12.0 km深度。此外,同震库仑应力变化揭示向阳湖-布若错中分支断裂西段浅部应力可达0.11 bar,具有较高的地震破裂危险。

**关键词**:青藏高原中北部;尼玛地震;InSAR观测;库仑应力变化

**中图分类号**:P228 **文献标识码**:A **收稿日期**:2024-09-11

**DOI**:10.13203/j.whugis20240243 **文章编号**:1671-8860(2025)08-1599-09

# Coseismic Rupture Behavior of the 2024 Nima (Xizang, China) Mw 6.0 Earthquake Revealed by InSAR Observations

*YANG Jiuyuan*[1,2] *WEN Yangmao*[2,3] *XU Caijun*[2,3]

1 College of Surveying and Geo-informatics, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China

2 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

3 Hubei Luojia Laboratory, Wuhan 430079, China

**Abstract**: **Objectives**: On 1 June 2024, a shallow Mw 6.0 earthquake struck the Nima County in the north-central Tibetan Plateau. As the largest earthquake to occur around the Laxiongcuo-Gaerkong fault(LGF) zone, the occurrence of the 2024 Nima earthquake offers an important chance to further understand the distribution and kinetic characteristic of the seismogenic structures in this little studied region. **Methods**: In this paper, we use the ascending and descending synthetic aperture radar (SAR) images of the Sentinel-1A satellite to acquire the coseismic surface deformation related to this event and investigate the seismogenic fault structure. **Results and Conclusions**: Though both the NE-dipping and NW-dipping rupture fault models acquired by interferometric SAR observations can fit the coseismic deformation well, we conclude that this earthquake nucleated a NE-dipping (a strike angle of 325°) right-lateral strike-slip fault with a dip of 83°, which may be a blind branch fault belonging to the LGF, according to the integrated analysis of the inversions, historical earthquakes, regional fault distributions and kinematics. In addition, coseismic Coulomb stress changes reveal that the stress at the shallow part of the western segment of the middle branch fault of

**基金项目**:国家自然科学基金(42304007, 42374003)。

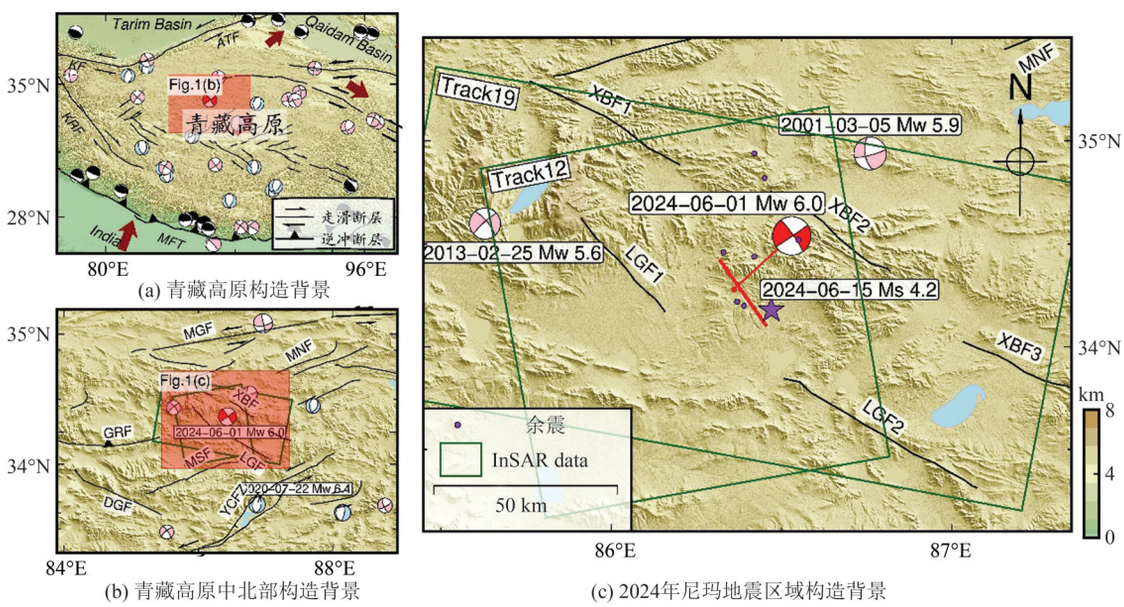
**第一作者**:杨九元,博士,讲师,主要从事大地测量反演与构造形变研究。jyyang@whu.edu.cn

**通信作者**:温扬茂,博士,教授。ymwen@sgg.whu.edu.cn

the Xiangyanghu-Buruocuo fault can reach 0.11 bar, indicating a high rupture risk.

**Key words**: north-central Tibetan Plateau; Nima earthquake; InSAR observations; Coulomb stress change

由于新生代印度-欧亚板块间的长期挤压和碰撞，青藏高原构造变形强烈、地震分布广、发震频繁，是中国大陆地震活动的主要地区，其周边发育有一些大型走滑断裂带与逆冲推覆构造，而内部存在一系列近南北走向的地堑及V型共轭走滑断裂带[1-2]（图1(a)）。该共轭走滑断裂由班公湖-怒江缝合带以北的东北-西南走向的左旋走滑断层和以南的西北-东南走向的右旋走滑断层构成，包括埃永错断裂带、别错断裂带、洞错断裂带等，调节了高原中部的东西向伸展和南北向挤压形变[3]（图1(a)）。然而，相较于高原中部共轭走滑断层带较高的研究程度，位于其北部的活动断裂分布及运动特性研究程度较低，如拉雄错-嘎尔孔茶卡断裂、向阳湖-布若错断裂、玛尔盖茶卡断裂等（图1(b)和1(c)）。




注：深红色箭头代表板块相对运动[4]；Tarim Basin：塔里木盆地；Qaidam Basin：柴达木盆地；BNS：班公怒江缝合带；IYS：雅鲁藏布江缝合带；JS：金沙江缝合带；AKMS：阿尼玛卿-昆仑-麻扎塔格缝合带；KRF：喀喇昆仑断裂带；ATF：阿尔金断裂；MFT：喜马拉雅主前缘逆冲带；MGF：玛尔盖茶卡断裂；GRF：冈玛日断裂；DGF：丁固断裂；MNF：玛尼断裂；MSF：玛依岗日山断裂；YCFZ：依布茶卡断裂带；LGF：拉雄错-嘎尔孔茶卡断裂；XBF：向阳湖-布若错断裂；紫色星为最大余震；图(a)中的浅蓝、黑和粉色沙滩球分别为来自GCMT的Mw≥6.0历史正断、逆冲和走滑地震的震源机制解，图(b)和(c)中的彩色沙滩球为对应的Mw≥5.5历史地震的震源机制解。

图1 青藏高原及其中北部和2024年尼玛地震区域构造背景

Fig. 1 Tectonic Setting of the Tibetan Plateau, Its North-Central Region and the 2024 Nima Earthquake

2024-06-01（北京时间08:46），据中国地震台网中心（China Earthquake Networks Center，CENC，https://news.ceic.ac.cn）报道，中国西藏自治区那曲市尼玛县发生了一次Ms 5.9地震，震中深度8 km。此次地震震中位于洞错共轭走滑断裂带北部的拉雄错-嘎尔孔茶卡断裂附近（图1(b)和1(c)），是自1976年全球矩心矩张量（Global Centroid-Moment-Tensor，GCMT，https://www.globalcmt.org/）记录以来该断裂带附近发生的最大地震。拉雄错-嘎尔孔茶卡断裂带总体呈西北-东南走向分布，目前初步判断由已填图的西分支断层段（LGF1）和东分支断层段（LGF2）构成（图1(b)和1(c)），但由于地形较陡，难以到达，该区域研究程度较低，其具体的构造分布及运动特性仍未知。2024年尼玛地震的出现为利用卫星大地测量数据深入研究拉雄错-嘎尔孔茶卡断裂带区域发震构造分布及运动特性提供了重要机会。此次地震发生在无人区，距离尼玛县275 km，未造成人员伤亡和财产损失；震后余震稀疏，截至2024-06-15，CENC共记录8次Ms>3.0的余震，最大余震为Ms 4.2（图1(c)）。根据GCMT公布的震源机制解（表1），此次尼玛地震可能破裂于一条东北倾向的高角度右旋走滑断层或西北倾向的近陡立左旋走滑断层，均位于拉雄错-嘎尔孔茶卡断裂带附近，暗示该地震的发震断层或与拉雄错-嘎尔孔茶卡断裂带有关。

本文首先基于Sentinel-1A卫星的升、降轨合成孔径雷达（synthetic aperture radar，SAR）影像数据，利用差分InSAR（interferometric SAR）技术

**表 1　2024 年尼玛地震震源参数**

Table 1　Source Parameters of the 2024 Nima Earthquake

| 研究来源 | 经度/(°) | 纬度/(°) | 走向/(°) | 倾角/(°) | 滑动角/(°) | 深度/km | 震级 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| GCMT | 86.35 | 34.07 | 325/234 | 83/88 | −178/−7 | 21.5 | Mw 6.0 |
| CENC | 86.36 | 34.14 | — | — | — | 8 | Ms 5.9 |
| 模型 1 | $86.39^{+0.2\,\mathrm{km}}_{-0.2\,\mathrm{km}}$ | $34.13^{+0.21\,\mathrm{km}}_{-0.21\,\mathrm{km}}$ | $324.9^{+1.5}_{-1.5}$ | $83^{+2.1}_{-2.1}$ | $179.5^{+2.4}_{-2.4}$ | $2.8^{+0.5}_{-0.5}$ | Mw 6.0 |
| 模型 2 | $86.39^{+0.18\,\mathrm{km}}_{-0.18\,\mathrm{km}}$ | $34.14^{+0.20\,\mathrm{km}}_{-0.20\,\mathrm{km}}$ | $234.6^{+1.6}_{-1.6}$ | $88^{+0}_{-0}$ | $-6.3^{+1.9}_{-1.9}$ | $3.3^{+0.5}_{-0.5}$ | Mw 6.0 |

注：模型 1 指东北倾均匀断层滑动模型；模型 2 指西北倾均匀断层滑动模型；模型 1 和模型 2 的经纬度代表破裂断层面上边界中点沿上倾方向至地表的位置；深度代表破裂断层面上边界中点至地表的深度。

提取了 2024 年 Mw 6.0 尼玛地震的高精度同震地表形变；其次，基于均匀弹性半空间矩形位错理论反演了此次地震的同震破裂断层几何及其详细的滑动分布；然后，综合考虑历史地震、区域活动断层分布及运动特性和反演结果，分析了该地震的真实发震断层面；最后，计算了周围活动断裂不同深度处的同震库仑应力变化，以评估区域未来地震破裂的风险。

## 1　InSAR 数据处理

作为 1976 年以来在拉雄错-嘎尔孔茶卡和向阳湖-布若错断裂带附近发生的最大地震，获取 2024 年 Mw 6.0 尼玛地震高精度同震地表形变对探究区域活动断层特性及地下发震构造具有重要指导作用。本文基于 C 波段 Sentinel-1A 卫星 SAR 影像数据，利用 GAMMA 软件[5]和两轨法提取了此次尼玛地震的升、降轨同震视线向（line of sight，LOS）形变（表 2、图 2）。为有效抑制噪声并保持一定的相干性，对升、降轨影像均进行多视处理，设定其距离向与方位向的多视比为 20∶4。其中，采用欧洲空间局提供的高精度精密轨道数据进行轨道改正，并使用 30 m 空间分辨率的数字高程模型模拟地形相位，以消除同震干涉图中的地形相位。然后，利用多功率频谱滤波法和枝切法分别对干涉图进行滤波[6]和解缠[7]。此外，利用非主形变区的远场观测数据拟合了一个涉及误差相位、高程和位置的线性函数，以最大程度剔除可能遗留的轨道残差及与地形相关的大气延迟误差[8]。最后，将改正后的解缠相位进行地理编码，将其归入 WGS84 坐标系。升轨干涉图（图 2(a)～2(c)）揭示出 3 个椭圆状的主形变区，且西侧的一个主形变区朝向于卫星运动（抬升），而东侧的两个主形变区远离于卫星运动（沉降）。类似地，降轨干涉图（图 2(d)～2(f)）同样揭示出 3 个椭圆状的主形变区，但其东侧的一个主形变区朝向于卫星运动（抬升），而西侧的两个主形变区远离于卫星运动（沉降）。升、降轨同震干涉图揭示的主形变区分别位于震中区域的近西、北、南和东南 4 个方向处，呈四象限分布，揭示此次地震为一次走滑型破裂事件。连续且平滑的同震形变条纹暗示该地震未破裂至地表，为一次隐伏型事件。升、降轨同震形变范围分别为 −2.6～2.9 cm 和 −2.1～4.0 cm。

**表 2　生成同震干涉图的 SAR 数据信息**

Table 2　Details of SAR Data Applied for Coseismic Interferograms

| 卫星 | 轨道 | 参考日期 | 重复日期 | 垂直基线/m | 入射角/(°) | 方位角/(°) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Sentinel-1A | 升轨 12 | 2024-05-22 | 2024-06-03 | −135.3 | 39.7 | −10.1 |
| | 降轨 19 | 2024-05-23 | 2024-06-04 | 84.4 | 37.1 | −169.6 |

## 2　InSAR 观测数据反演

一幅 InSAR 影像通常包含数百万个观测点，为提高反演计算效率，本文首先使用基于分辨率的降采样方法[9]对 2024 年尼玛地震升、降轨同震地表形变进行重采样，最终分别获取 355 和 399 个升、降轨形变观测点（图 2(c)和 2(f)）；然后，基于均匀弹性半空间矩形位错理论[10]，分别利用多峰粒子群优化算法[11]和非负最小二乘方法执行非线性和线性反演，以获取尼玛地震同震破裂断层几何及空间滑动分布。

### 2.1　均匀滑动断层模型反演

均匀滑动断层模型反演时，首先采用多峰值粒子群方法，通过搜索同震降采样观测和模拟地表形变间的最小均方根差来求取破裂断层位置、长度、宽度、埋深深度、倾角、滑动角、走向角和滑动量[11-12]；

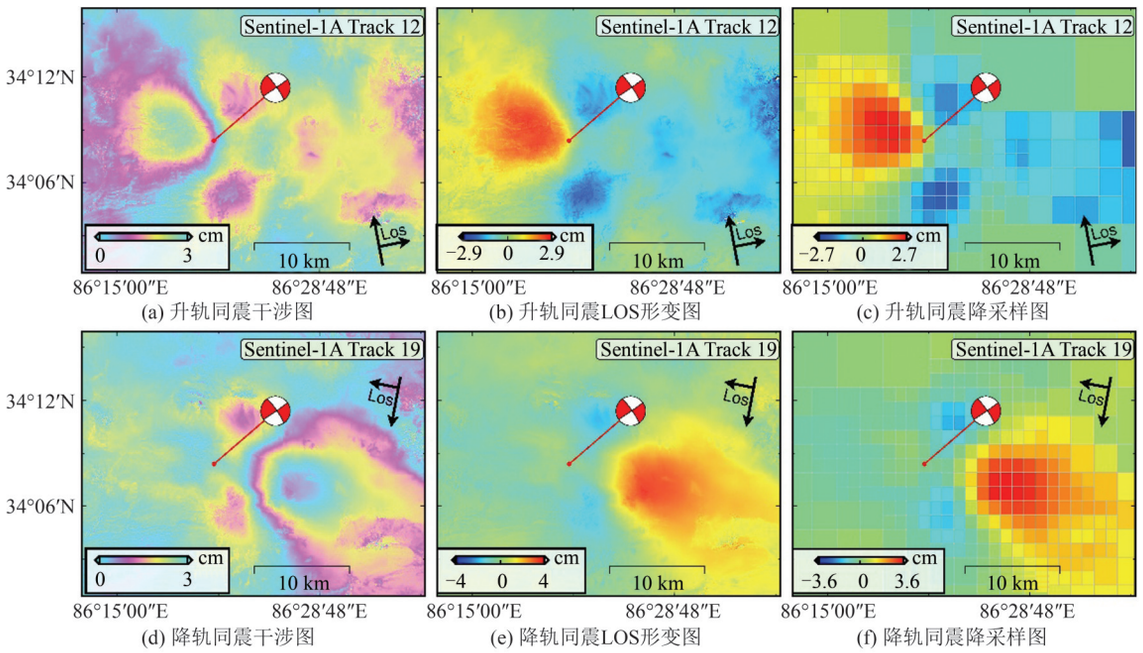



图2 2024年尼玛地震升、降轨同震干涉条纹、LOS形变及降采样数据图

Fig. 2 Ascending and Descending Coseismic Interferograms, LOS Deformation and Downsampled Data Maps of the 2024 Nima Earthquake

然后,采用蒙特卡洛方法[13]对原始同震降采样观测数据添加随机噪声扰动,生成100组观测数据以进行100次非线性反演,从而估算断层几何参数的不确定性(表1)。由于同震干涉形变条纹(图2(a)和2(d))未探测到与2024年尼玛地震有关的地表破裂信息,且震后余震稀疏并呈离散状分布(图1(c)),因而此次事件的发震断层面难以直接判定。另外,GCMT公布的震源机制解(表1)也暗示此次尼玛地震可能成核于一条西南走向(倾向西北)的左旋走滑断层或西北走向(倾向东北)的右旋走滑断层。因此,为识别真实的发震断层面,分别构建东北倾和西北倾断层模型执行大地测量数据反演。

对于东北倾断层模型,综合考虑同震干涉形变条纹分布模式及特性、GCMT提供的震源机制解及地震震级,反演过程中设定断层走向、倾角和滑动角的搜索区间分别为[271°,359°]、[50°,89°]和[135°,245°],而断层长度、宽度、埋深深度的搜索区域均设为[0,20] km。表1结果显示,地震成核于一条西北走向(走向324.9°)高倾角(83°)的纯右旋走滑断层(滑动角−179.5°),滑动量达~0.41 m。发震断层埋深于~2.8 km深度意味此次地震未破裂至地表。

对于西北倾断层模型,参考同震干涉形变条纹、GCMT震源机制解和地震震级,反演过程初始设定断层走向、倾角和滑动角的搜索区间分别为[181°,269°]、[50°,90°]和[−45°,45°],而断层长度、宽度、埋深深度的搜索区域均设为[0,20] km。反演结果显示,在其他断层几何参数收敛到唯一解时,断层倾角总达到搜索范围极大值。因此,根据GCMT公布的倾角,固定断层倾角为88°,在保持其他断层几何参数搜索区间不变的情况下,再次进行非线性反演。表1结果揭示,地震破裂于一条西南走向(走向234.6°)近陡立(倾角88°)的左旋走滑断层(滑动角−6.3°),断层埋深于~3.3 km深度,揭示同震滑动未传播至地表。总体上,东北倾和西北倾均匀滑动断层模型均能较好地拟合同震观测数据(图3)。

### 2.2 同震滑动分布反演

对于东北倾同震滑动分布模型,固定均匀滑动断层模型中获取的破裂断层位置、倾角和走向,同时分别沿倾向和走向方向延伸断层宽度和长度至17 km和22 km,并将其离散为374个边长1 km的小正方体,以详细探究地下同震滑动分布。其中,在同震滑动分布反演时,通过观察滑动粗糙度与观测数据标准差间的折中曲线,选取最优平滑因子应用于反演,以防止子块体间滑动的陡变。图4反演结果显示,破裂断层表现为右旋走滑运动,滑动主要集中于2.0~12.0 km深度,并在6.0 km深度处滑动达到峰值为0.67 m。破裂断层面浅部0~2 km深度范围未出现明显滑动,暗示此次地震未破裂至地表,为一次隐伏型事件。东北倾同震滑动分布模型释放了~$1.10\times10^{18}$ N·m的地震矩,相当于矩震级Mw 6.0。图5正演模拟结果显示,该模型很好地恢复

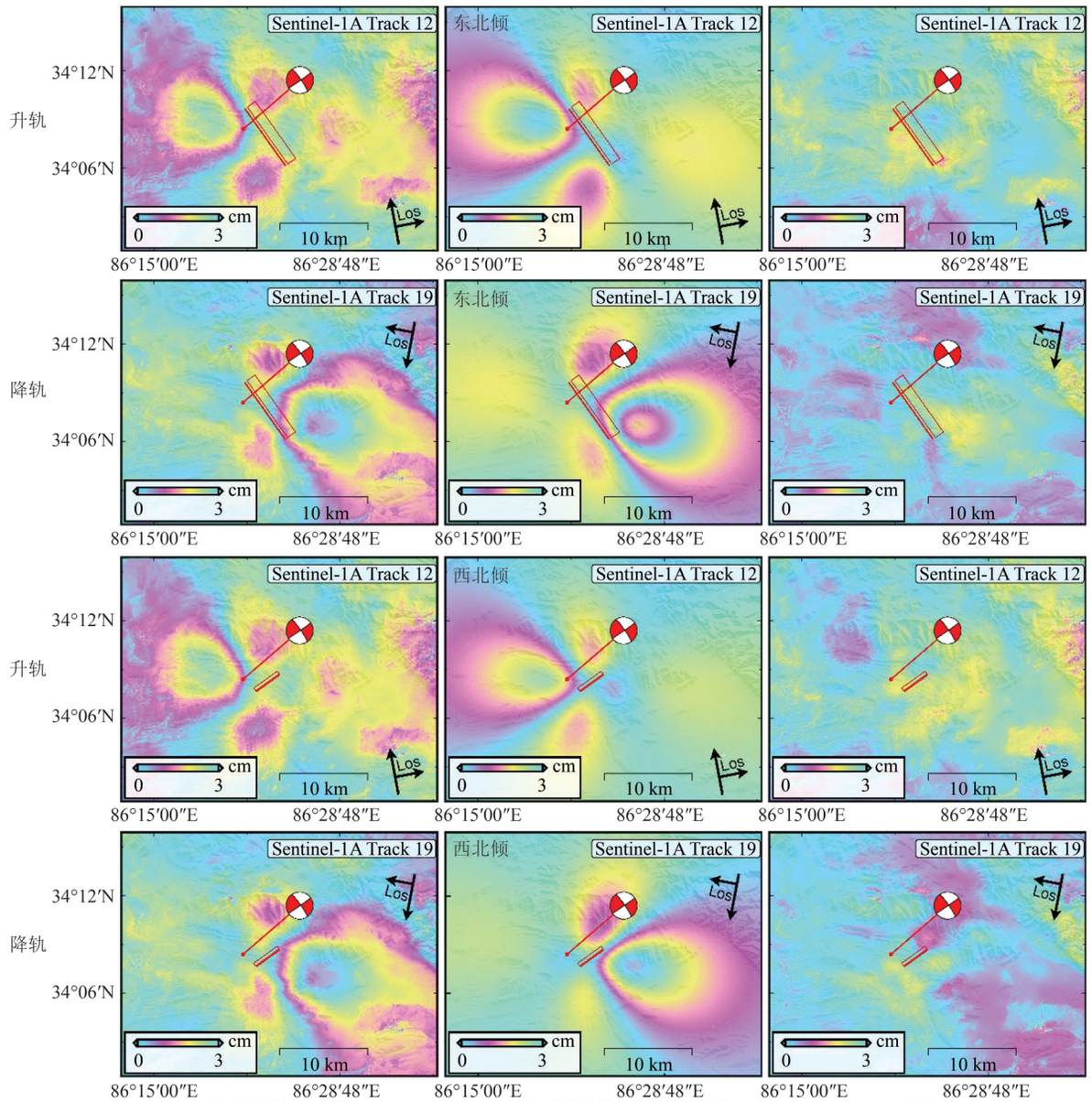



图 3　同震观测、均匀滑动断层模型模拟及残差图

Fig. 3　Maps of the Coseismic Observation, Modelling by the Uniform Slip Fault Model and Residuals

了升、降轨同震观测形变模式及量级，均方根差分别为 3.7 mm 和 3.2 mm。

对于西北倾同震滑动分布模型，固定均匀滑动断层模型中识别的破裂断层位置、倾角和走向，同时分别沿倾向和走向方向延伸断层宽度和长度至 17 km 和 16 km，并将其离散为 272 个边长为 1 km 的小正方体。另外，同震滑动分布反演时添加最优平滑因子。图 6 结果显示，破裂断层主要表现为左旋走滑运动，且兼有少量的正断分量；滑动主要分布于 2.0～15.0 km 深度，并在 7.0 km 深度处滑动达到最大为 0.79 m。破裂断层面浅部 0～2 km 深度范围缺失明显的滑动表明此次地震未破裂至地表。西北倾同震滑动分布模型释放了～$1.06\times10^{18}$ N·m 的地震矩，对应于矩震级 Mw 6.0。图 5 正演模拟结果显示，该模型很好地复现了升、降轨同震观测形变模式及量级，均方根差分别为 4.2 mm 和 4.4 mm。

整体上，东北倾和西北倾同震滑动分布模型均能较好地拟合同震形变，但东北倾同震滑动分布模型模拟的形变在破裂断层附近的残差相对于西北倾同震滑动分布模型较小（图 5）。

## 3　讨　论

### 3.1　发震断层倾向的确定

判定中强量级地震的真实发震断层面对准确理解区域活动构造分布及评估未来地震危险

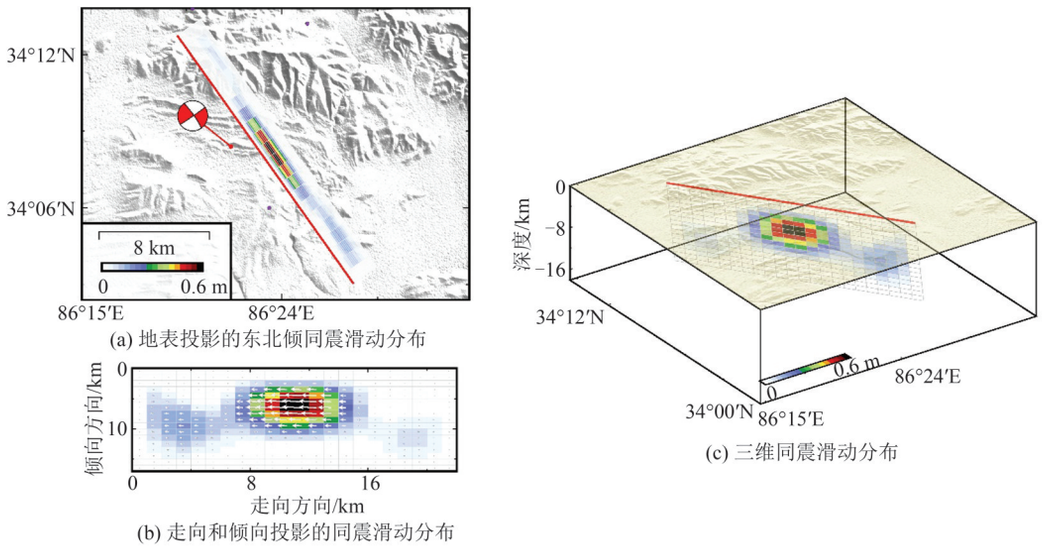



图4 2024年尼玛地震东北倾同震滑动分布模型

Fig. 4 NE-Dipping Coseismic Slip Distribution Model of the 2024 Nima Earthquake

性具有重要参考[14]。反演结果表明(表1、图4和图6),2024年尼玛地震为一次隐伏型走滑事件,其可能破裂于一条倾向东北的右旋走滑断层或倾向西北的左旋走滑断层。相比于西北倾同震滑动分布模型,东北倾同震滑动分布模型整体上能更好地拟合同震干涉形变条纹(同震观测与模拟形变值间的均方根差较小),可仅凭较小的残差(图5)来判定东北倾破裂断层为此次地震的真实发震断层似乎说服力并不强。

为进一步确定尼玛地震的发震断层面,搜集了震中区域的历史地震、余震、地质地貌和活动断层分布资料,但稀疏的余震序列空间分布并不能勾勒出此次尼玛地震的发震断层面(图1(c))。在震中附近,两条西北-东南走向的拉雄错-嘎尔孔茶卡和向阳湖-布若错断裂带近平行分布(图1(c))。高精度InSAR观测反演获取的东北倾破裂断层位于拉雄错-嘎尔孔茶卡和向阳湖-布若错断裂带之间,且与这两条已填图的断层带平行(图1(c)和图4),而反演获取的西北倾破裂断层却切割拉雄错-嘎尔孔茶卡和向阳湖-布若错断裂带,与区域活动断层分布特征不一致(图1(c)和图6)。另外,由于受印度板块与欧亚板块的挤压,青藏高原中部孕育着多条V型的共轭走滑断裂带,而这些共轭走滑断裂带通常由西南-东北走向的左旋走滑断层和西北-东南走向的右旋走滑断层构成,以调节东西向拉张和南北向挤压[3]。2024年尼玛地震发生在青藏高原中部洞错断裂带的左旋走滑依布茶卡断裂北部,在震中北部孕育着一条西南-东北走向左旋走滑的玛尔盖茶卡断裂(图1(b))。考虑到拉雄错-嘎尔孔茶卡和向阳湖-布若错断裂带呈西北-东南走向分布,且发生于这两条断裂带的2001年3月Mw 5.9地震和2013年2月Mw 5.6地震均表现位右旋走滑特性(图1(c)),推断这两条断裂构成的断裂带可能表现为右旋走滑特性,且可能与北部紧邻的左旋走滑的玛尔盖茶卡断裂共同构成一条共轭走滑断裂带(图1(b))。反演的东北倾发震断层表现为右旋走滑特性,与推断的区域构造运动特性较一致,而西北倾发震断层则表现出左旋走滑特性,与区域构造运动特性明显不符(图4和图6)。因此,综合考虑同震拟合残差、历史地震、区域活动断层分布及运动特性,认为东北倾发震断层面为2024年尼玛地震的真实破裂断层,且可能隶属于拉雄错-嘎尔孔茶卡断裂带的一个隐伏分支断层。

### 3.2 附近断裂带地震危险性评估

中强量级地震的同震破裂往往会造成附近构造应力场的显著变化,从而影响周边活动断裂的应力状态,导致未来潜在地震的提前或延迟[15-17]。作为自1976年GCMT地震机构记录以来拉雄错-嘎尔孔茶卡和向阳湖-布若错断裂带附近发生的最大地震,2024年尼玛地震对评估附近活动断裂的潜在地震风险具有重要作用。

为准确量化此地震对周边断层的应力影响,基于PSGRN/PSCMP软件[18],使用典型摩擦系数0.4[19],以反演获取的东北倾同震滑动分布模型为源模型(图4),首先计算了周边~70 km区域已填图活动断裂的同震库仑应力变化。由于震中附近区域研究程度较低,未收集到拉雄错-嘎尔孔茶卡和向阳湖-布若错断裂带的断层几何参数(如倾角)与活动特性资料,参考拉雄错-嘎尔孔茶卡(LGF1和LGF2)和向阳湖-布若错断裂带(XBF1、XBF2和XBF3)总体的走向分布和历史

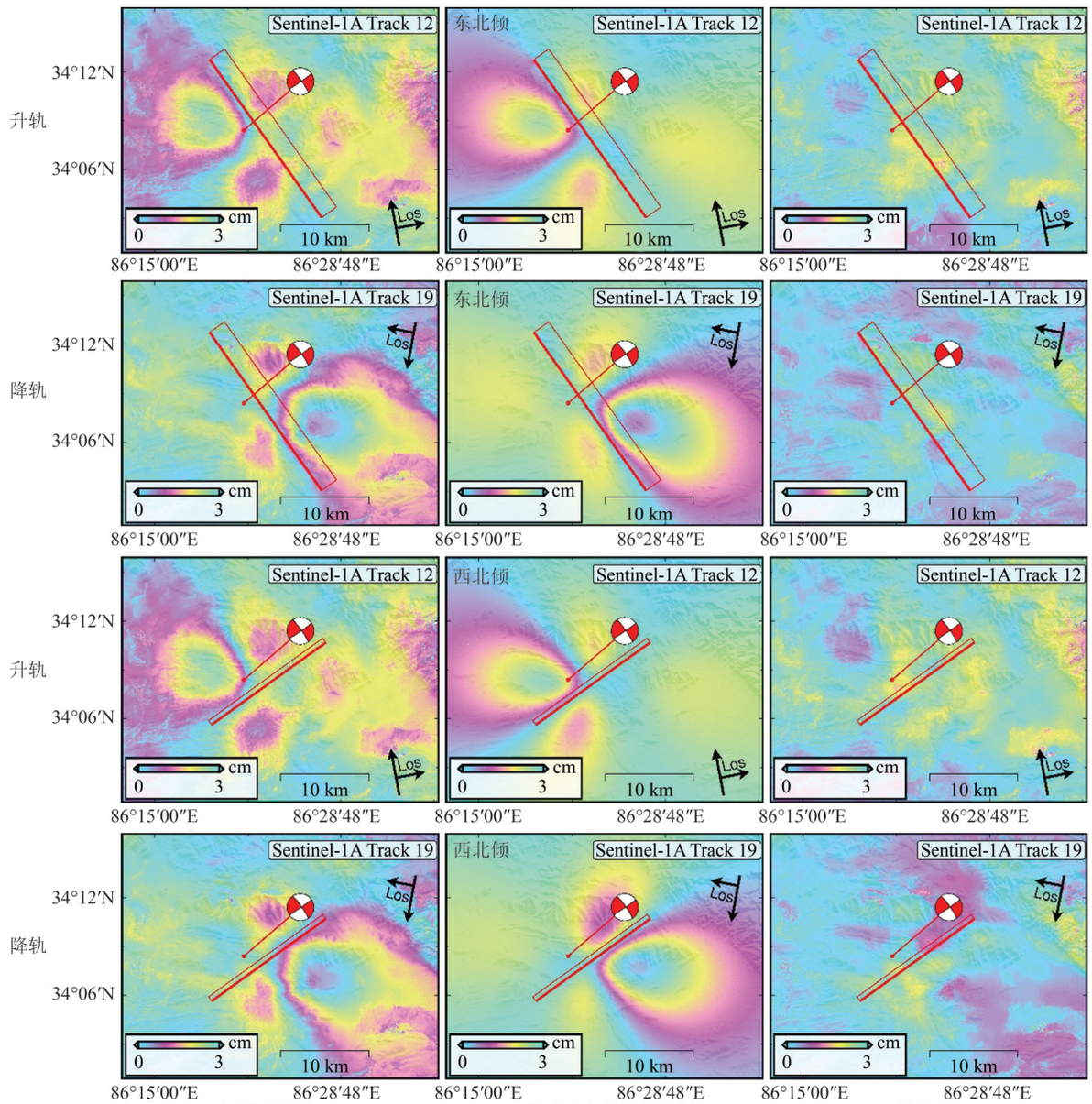
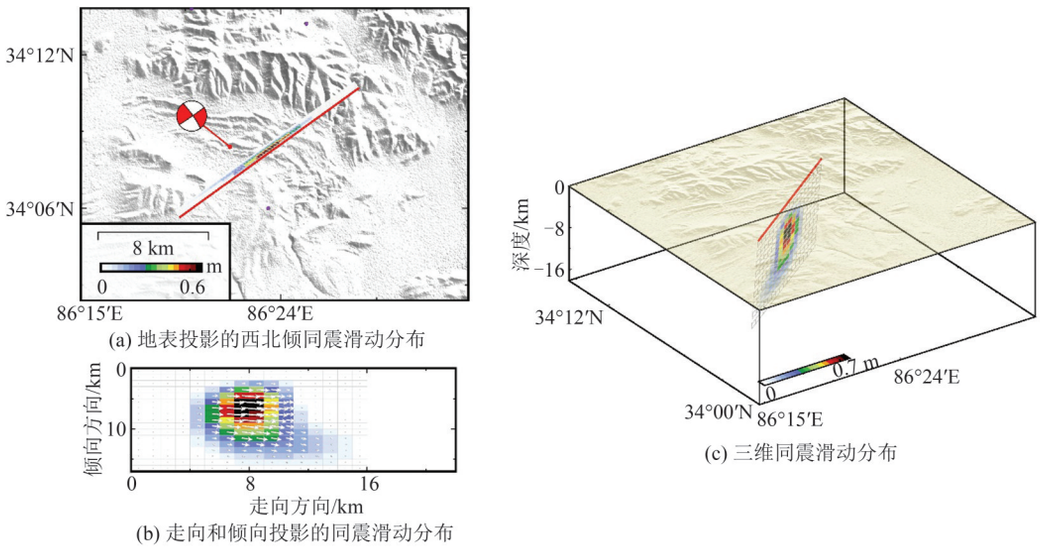



图 5　同震观测、同震滑动分布模型模拟及残差图

Fig. 5　Maps of the Coseismic Observation, Modelling by the Coseismic Slip Distribution Model and Residuals

地震震源参数(2001 年 3 月 Mw 5.9 地震和 2013 年 2 月 Mw 5.6 地震的走向、倾角和滑动角分别为 320°、75°、−172°和 170°、64°、−170°)，设定拉雄错-嘎尔孔茶卡断裂带的平均走向、倾角和滑动角分别为 300°、75°和−172°，而向阳湖-布若错断裂带的平均走向、倾角和滑动角分别为 135°、64°和−170°，以作为各分支断裂的接收机制。然后，分别以 5 km、10 km 和 15 km 为应力计算深度。结果(图 7)显示，拉雄错-嘎尔孔茶卡西分支断裂(LGF1)(在深度 5 km、10 km 和 15 km 处应力值分别约为−0.52 bar、−0.50 bar 和−0.33 bar)和向阳湖-布若错东分支断裂(XBF3)(在深度 5 km、10 km 和 15 km 处应力值分别约为−0.027 bar、−0.026 bar 和−0.025 bar)表现出应力卸载状态，而拉雄错-嘎尔孔茶卡东分支断裂(LGF2)中西段(在深度 5 km、10 km 和 15 km 处应力值分别约为 0.017 bar、0.009 bar 和 0.003 bar)、向阳湖-布若错西分支断裂东段(XBF1)(在深度 5 km、10 km 和 15 km 处应力值分别约为 0.014 bar、0.012 bar 和 0.010 bar)和向阳湖-布若错中分支断裂(XBF2)西段(在深度 5 km、10 km 和 15 km 处应力值分别约为 0.11 bar、0.10 bar 和 0.08 bar)表现出应力加载状态，且 XBF2 西段在 5 km 和 10 km 深度处应力累积均达到地震触发阈值 0.1 bar[20]。

自地震记录以来，由于未收集到 XBF2 上发生的地震，且该区域研究程度较低，未获取到与 XBF2 有关的震间研究，其震间滑动速率未知，因此，考虑



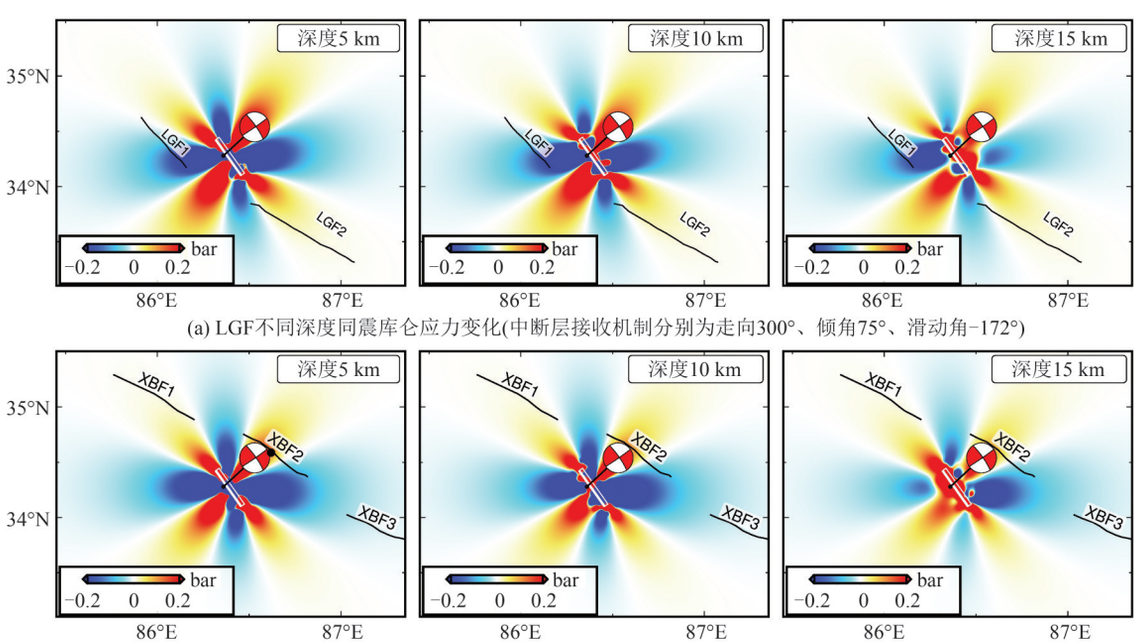

(a) 地表投影的西北倾同震滑动分布

(b) 走向和倾向投影的同震滑动分布

(c) 三维同震滑动分布

图6 2024年尼玛地震西北倾同震滑动分布模型

Fig. 6 NW-Dipping Coseismic Slip Distribution Model of the 2024 Nima Earthquake




(a) LGF不同深度同震库仑应力变化(中断层接收机制分别为走向300°、倾角75°、滑动角-172°)

(b) XBF不同深度同震库仑应力变化(中断层接收机制分别为走向135°、倾角64°、滑动角-170°)

图7 2024年尼玛地震引起的附近活动断裂同震库仑应力变化

Fig. 7 Coseismic Coulomb Stress Changes Around the Nearby Active Faults Caused by the 2024 Nima Earthquake

到XBF2西段浅部较大的库仑应力,且在地震同震及震后期间断裂附近较低的地震活动性(图1(c)),推断其存在一定的破裂风险。

## 4 结 语

本文利用InSAR同震观测获取了2024年西藏尼玛地震的发震断层几何及其详细的同震滑动空间分布。通过对反演结果、历史地震、区域活动断层分布及运动特性的综合分析,认为尼玛地震成核于东北倾向高角度的右旋走滑断层上,可能为拉雄错-嘎尔孔茶卡断裂带的一个隐伏分支断层。同震滑动主要集中于2.0~12.0 km深度,在6.0 km深度处达到滑动峰值为0.67 m,并释放了~$1.10\times10^{18}$ N·m的地震矩,对应于矩震级Mw 6.0。考虑到向阳湖-布若错中分支断裂西段浅部较大的应力加载,应着重关注其地震破裂的危险。

致谢:感谢欧洲航天局提供的Sentinel-1A数据。

## 参 考 文 献

[1] 邓起东,程绍平,马冀,等. 青藏高原地震活动特征及当前地震活动形势[J]. 地球物理学报,2014,57(7):2025-2042.
DENG Qidong, CHENG Shaoping, MA Ji, et al.

Seismic Activities and Earthquake Potential in the Tibetan Plateau[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, 57(7): 2025-2042.

[2] 张培震, 沈正康, 王敏, 等. 青藏高原及周边现今构造变形的运动学[J]. 地震地质, 2004, 26(3): 367-377.
ZHANG Peizhen, SHEN Zhengkang, WANG Min, et al. Kinematics of Present-Day Tectonic Deformation of the Tibetan Plateau and Its Vicinities[J]. *Seismology and Geology*, 2004, 26(3): 367-377.

[3] TAYLOR M, PELTZER G. Current Slip Rates on Conjugate Strike-Slip Faults in Central Tibet Using Synthetic Aperture Radar Interferometry[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2006, 111(B12): B12402.

[4] XU X W, TAN X B, YU G H, et al. Normal- and Oblique-Slip of the 2008 Yutian Earthquake: Evidence for Eastward Block Motion, Northern Tibetan Plateau[J]. *Tectonophysics*, 2013, 584: 152-165.

[5] WERNER C, WEGMÜLLER U, STROZZI T, et al. Gamma SAR and Interferometric Processing Software[C]//The ERS-ENVISAT Symposium, Gothenburg, Sweden, 2000.

[6] GOLDSTEIN R M, WERNER C L. Radar Interferogram Filtering for Geophysical Applications[J]. *Geophysical Research Letters*, 1998, 25(21): 4035-4038.

[7] GOLDSTEIN R M, ZEBKER H A, WERNER C L. Satellite Radar Interferometry: Two-Dimensional Phase Unwrapping[J]. *Radio Science*, 1988, 23(4): 713-720.

[8] CAVALIÉ O, DOIN M P, LASSERRE C, et al. Ground Motion Measurement in the Lake Mead Area, Nevada, by Differential Synthetic Aperture Radar Interferometry Time Series Analysis: Probing the Lithosphere Rheological Structure[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2007, 112(B3): B03403.

[9] LOHMAN R B, SIMONS M. Some Thoughts on the Use of InSAR Data to Constrain Models of Surface Deformation: Noise Structure and Data Downsampling[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2005, 6(1): Q01007.

[10] 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.

[11] FENG W P, LI Z H, ELLIOTT J R, et al. The 2011 Mw 6.8 Burma Earthquake: Fault Constraints Provided by Multiple SAR Techniques[J]. *Geophysical Journal International*, 2013, 195(1): 650-660.

[12] 张庆云, 李永生, 罗毅, 等. 2016 年意大利阿马特里切 Mw 6.2 地震震源机制 InSAR 反演[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(1): 118-124.
ZHANG Qingyun, LI Yongsheng, LUO Yi, et al. Source Parameters for the 2016 Mw 6.2 Italy Amatrice Earthquake Revealed by InSAR Observations[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(1): 118-124.

[13] PARSONS B, WRIGHT T, ROWE P, et al. The 1994 Sefidabeh (Eastern Iran) Earthquakes Revisited: New Evidence from Satellite Radar Interferometry and Carbonate Dating About the Growth of an Active Fold Above a Blind Thrust Fault[J]. *Geophysical Journal International*, 2006, 164(1): 202-217.

[14] 杨九元, 温扬茂, 许才军. InSAR 观测揭示的 2023 年甘肃积石山 Ms 6.2 地震发震构造[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2025, 50(2): 313-321.
YANG Jiuyuan, WEN Yangmao, XU Caijun. Seismogenic Fault Structure of the 2023 Ms 6.2 Jishishan (Gansu, China) Earthquake Revealed by InSAR Observations[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2025, 50(2): 313-321.

[15] SYMITHE S J, CALAIS E, HAASE J S, et al. Coseismic Slip Distribution of the 2010 M 7.0 Haiti Earthquake and Resulting Stress Changes on Regional Faults[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2013, 103(4): 2326-2343.

[16] 汪建军, 许才军, 申文斌. 2010 年 Mw 6.9 级玉树地震同震库仑应力变化研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2012, 37(10): 1207-1211.
WANG Jianjun, XU Caijun, SHEN Wenbin. The Coseismic Coulomb Stress Changes Induced by the 2010 Mw 6.9 Yushu Earthquake, China and Its Implication to Earthquake Hazards[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(10): 1207-1211.

[17] 许才军, 汪建军, 熊维. 地震应力触发回顾与展望[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(12): 2085-2092.
XU Caijun, WANG Jianjun, XIONG Wei. Retrospection and Perspective for Earthquake Stress Triggering[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(12): 2085-2092.

[18] WANG R J, LORENZO-MARTÍN F, ROTH F. PSGRN/PSCMP — A New Code for Calculating Co- and Post-Seismic Deformation, Geoid and Gravity Changes Based on the Viscoelastic-Gravitational Dislocation Theory[J]. *Computers & Geosciences*, 2006, 32(4): 527-541.

[19] FREED A M. Earthquake Triggering by Static, Dynamic, and Postseismic Stress Transfer[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2005, 33: 335-367.

[20] ZIV A, RUBIN A M. Static Stress Transfer and Earthquake Triggering: No Lower Threshold in Sight?[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2000, 105(B6): 13631-13642.