引文格式:杨九元,许才军.InSAR观测揭示的2020年新疆于田Mw 6.3地震坡-坪状发震构造[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(5):928-936.DOI:10.13203/j.whugis20240482

Citation:YANG Jiuyuan,XU Caijun.Ramp-Flat Seismogenic Structure of the 2020 Yutian (Xinjiang,China) Mw 6.3 Earthquake Revealed by InSAR Observations[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2025, 50(5): 928-936. DOI: 10.13203/j.whugis20240482

InSAR观测揭示的2020年新疆于田Mw 6.3地震坡-坪状发震构造

杨九元[1] 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 地球空间环境与大地测量教育部重点实验室,湖北 武汉,430079

摘 要:2020-06-25,以左旋走滑运动为主要特征的青藏高原西北缘阿尔金断裂带西南部发生了一次Mw 6.3浅源正断地震,为深入理解该区域的发震构造及地震成因提供了宝贵机会。基于Sentinel-1A卫星的升、降轨合成孔径雷达影像提取了与此次地震有关的同震及震后3个月的地表形变。同震反演结果表明,该地震成核于一条倾角56°的埋深于地下3~11 km深度的正断层,而进一步的震后形变分析揭示震后余滑孕育于一条倾角76°的浅部断层结构。该地震浅部震后余滑和深部同震滑动精细刻画出一条坡-坪状发震断层结构。通过综合分析区域地形地貌、活动断裂分布与特性、历史地震和反演结果,推断此次于田地震的发生归因于走滑边界断裂控制的阶分区内拉张应变能的释放。

关键词:青藏高原西北缘;于田地震;InSAR观测;坡-坪状断层

中图分类号:P237 **文献标识码**:A **收稿日期**:2024-12-23

DOI:10.13203/j.whugis20240482 **文章编号**:1671-8860(2025)05-0928-09

Ramp-Flat Seismogenic Structure of the 2020 Yutian (Xinjiang, China) Mw 6.3 Earthquake Revealed by InSAR Observations

YANG Jiuyuan[1] *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 Key Laboratory of Geospace Environment and Geodesy, Ministry of Education, Wuhan 430079, China

Abstract: **Objectives**: On 25 June 2020, a shallow Mw 6.3 normal-faulting earthquake struck the southwestern segment of Altyn Tagh fault in the northwest margin of Qinghai-Tibet Plateau, which is characterized by left-lateral strike-slip motion. This earthquake offers a rare opportunity to understand the seismogenic structure and seismogenesis in the region. **Methods**: We first apply the ascending and descending synthetic aperture radar images of Sentinel-1A satellite to extract the coseismic and the first three months postseismic surface deformation related to the earthquake. Then, we utilize the coseismic and postseismic observations to invert for the detailed coseismic slip and postseismic afterslip of the earthquake, respectively. **Results and Conclusions**: Coseismic inversion result reveals that the earthquake nucleated on a moderate-angle (a dip of 56°) normal fault buried at a depth of 3 to 11 km while further postseismic analysis uncovers that afterslip propagates in the shallow fault structure with a dip of 76°. The shallow postseismic afterslip and deep coseismic slip of the earthquake finely image a ramp-flat seismogenic fault structure. According to a joint analysis of the regional geology geomorphology, active fault distribution and kinematics, historical

基金项目:国家自然科学基金(42304007, 42130101)。

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:许才军,博士,教授。cjxu@sgg.whu.edu.cn

earthquakes and the inversions, we conclude that the occurrence of the Yutian earthquake may be attributed to the release of extensional stress in a stepover zone controlled by the bounding strike-slip faults.

Key words: northwest margin of Tibetan Plateau; Yutian earthquake; InSAR observation; ramp-flat fault

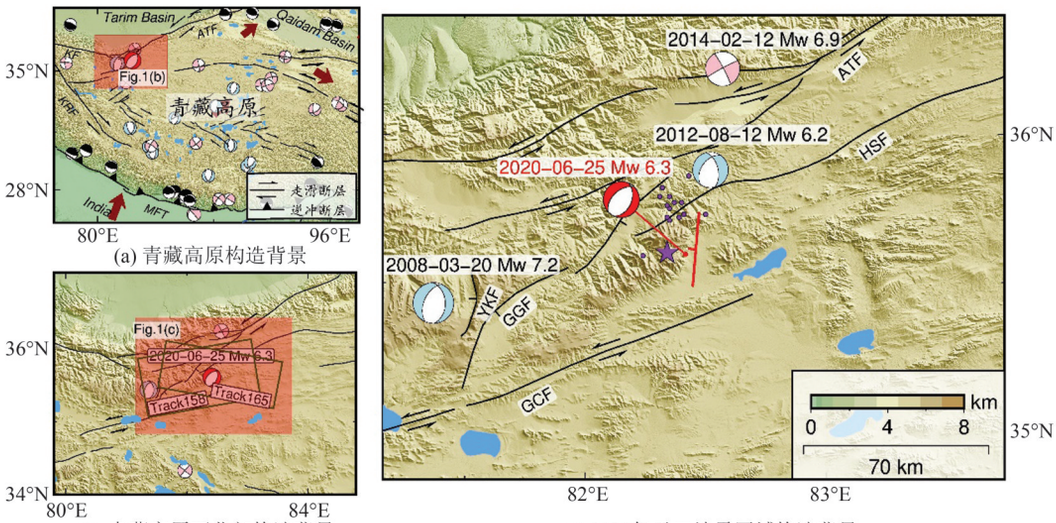
2020-06-25(世界时 21:05),据美国地质调查局(United States Geological Survey, USGS,https://www.usgs.gov/)报道,在中国新疆维吾尔自治区和田地区于田县发生了一次 Mw 6.3 浅源地震(震中深度 10 km),其位于青藏高原西北缘黑石北湖西侧约 20 km 处的盆地内(图 1)。震中附近区域海拔较高,活动构造分布复杂,地震活动性较强,孕育一些西南-东北走向的左旋走滑断裂,如阿尔金断裂、郭扎错断裂等,和近南北走向的正断裂,如玉龙-喀什断裂、贡嘎措断裂等,且 2008 年以来至 2020 年 6 月之间发生了 3 次 Mw>6.0 的地震,包括 2008 年 3 月 Mw 7.2 正断地震、2012 年 8 月 Mw 6.2 正断地震、2014 年 2 月 Mw 6.9 走滑地震(图 1(b)和 1(c))。作为 2008 年以来于田区域发生的第二大正断地震,2020 年 6 月 Mw 6.3 地震的出现为通过现代卫星大地测量观测来研究阿尔金断裂西南部发散构造部位的活动性及发震机制提供了重要机会(图 1(c))。据中国地震局台网中心(https://www.cenc.ac.cn/)报道,2020 年于田地震前发生一次 ML 4.6 前震,而地震发生后一个月内共发生了 14 次 ML>3.0 的余震,其中包含 5 次 ML>4.0 的余震,最大震级为 ML 4.7(图 1(c))。这些稀少的余震整体位于主震震中的北部(图 1(c)),似乎暗示此次地震同震破裂可能沿断层面向北传播。USGS 和全球矩心矩张量(Global Centroid-Moment-Tensor, GCMT, https://www.globalcmt.org/)公布的震源机制解(表 1)暗示此次地震可能破裂在一条西南偏南或近北走向的中等倾角的正断层,而早期的大地测量同震观测研究[1-4](表 1)推断 2020 年于田地震破裂于一条中等倾角的西南偏南走向的平面状正断层。此外,仅有的两项大地测量同震及震后观测的联合研究[5-6]认为,此次地震破裂于一条西南偏南走向的平面状正断层或两条西南偏南走向的中等倾角的主平面状正断层和高倾角的次级同向平面状正断层。这些早期的研究主要关注于田地震的同震形变及其相关的震源模型,且均将震源近似为单一的平面状简单断层,而针对此地震仅有的两项同震及震后形变的联合研究得到的结论也并未达成一致,这影响着对该区域地下精细发震断层结构及发震成因的准确认识。

本文首先基于 Sentinel-1A 卫星升、降轨合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)影像获取了 2020 年 Mw 6.3 于田地震同震及震后 3 个月的高精度地表形变;然后基于弹性半空间矩形位错理论,联合同震及震后地表形变,并顾及区域地形地貌、活动断层特性等地震相关资料,建立符合区域构造特征的逼真断层模型,揭示同震及震后滑动分布的细节,以精细识别此次地震的地下发震结构,改进此地震之前已公开的简化发震构造;最后综合分析区域地形地貌、活动断裂分布与特性、历史地震和反演结果,讨论了此次地震的发震成因。

1　InSAR 观测

1.1　同震观测

同震地表形变的位置、量级以及空间分布对准确探究发震断层结构至关重要。为精准探测 2020 年 6 月于田地震地下发震断层结构,本文首先利用 C 波段 Sentinel-1A 卫星 SAR 影像,基于 GAMMA 软件[7],采用两轨法获取了覆盖此次事件的升、降轨(轨道号 T158 和 T165)同震地表形变(图 2(a)和 2(b))。其中,升轨同震干涉对的主、副影像分别拍摄于 2020-06-22 和 2020-07-04,而降轨同震干涉对的主、副影像分别成像于 2020-06-17 和 2020-06-29。为提高同震干涉图的信噪比,将升、降轨 SAR 影像的距离向与方位向的多视比设为 10:2 进行多视处理。然后基于欧洲空间局提供的精密轨道数据改正轨道误差,并利用外部 30 m 空间分辨率的数字高程模型模拟地形相位,以排除差分干涉相位中地形相位分量。接着,利用功率频谱滤波方法[8]对干涉相位进行滤波,以抑制差分干涉相位中噪声相位分量,并采用枝切算法[9]进行相位解缠。此外,基于远场非主同震形变区的观测数据构建一个涵盖高程、位置和误差相位的线性函数,进一步消除可能存在的轨道残差和与地形相关的大气延迟误差[10]。最后,对解缠相位进行地理编码,归入 WGS84 地理坐标框架。升、降轨同震干涉结果(图 2(a)和 2(b))均揭示出两个椭圆状的主同震形变区(形变范围分别为 −20～7 cm 和 −19.5～8.6 cm),且升、降轨西侧形变条纹梯度均大于东侧,暗示此次于田地震破裂于西倾的发震断层。连续、清晰的形变条纹表示地震未破裂到地表,为一次隐伏事件。另外,升、降轨同震干涉(图 2)



注:Qaidam Basin:柴达木盆地;Tarim Basin:塔里木盆地;KF:康西瓦断裂;ATF:阿尔金断裂;KRF:喀喇昆仑断裂带;MFT:喜马拉雅主前缘逆冲带;HSF:黑石北湖断裂;YKF:玉龙-喀什断裂;GCF:郭扎错断裂;GGF:贡嘎措断裂。图1中的粉、浅蓝和黑色圆球分别代表来自GCMT的1976年1月至2020年6月Mw≥6.0走滑、正断和逆冲地震的震源机制解;紫色五角星为前震,而紫色小圆为余震;色标尺颜色代表区域地形的高度。

图1 2020年于田地震区域构造背景

Fig. 1 Tectonic Setting of the 2020 Yutian Earthquake

表1 2020年于田地震震源参数

Table 1 Source Parameters of the 2020 Yutian Earthquake

研究来源	经度/(°)	纬度/(°)	走向/(°)	倾角/(°)	滑动角/(°)	深度/km	震级(Mw)
GCMT	82.35	35.71	212/356	53/43	−67/−117	13.3	6.3
USGS	82.42	35.60	227/24	50/42	−74/−108	10	6.3
文献[1]	82.42	35.62	186.4	64.8	−99	10	6.2
文献[2]	82.46	35.57	210.1	63.8	−60.2	—	6.4
文献[3]	—	—	185.9	65	—	—	—
文献[4]	82.46	36.67	184.3	63.6	−116.7	—	—
文献[5]	—	—	185.1	58.7	−102	—	6.25
文献[6]	82.42	35.62	183.4	52.5	−92.4	—	6.23
断层模型	$82.47^{+0.04\,\mathrm{km}}_{-0.04\,\mathrm{km}}$	$35.61^{+0.03\,\mathrm{km}}_{-0.03\,\mathrm{km}}$	$184.4^{+0.5}_{-0.5}$	$56^{+1.5}_{-1.5}$	$-89.5^{+3.7}_{-3.7}$	$3.0^{+0.1}_{-0.1}$	6.2

注:断层模型中的深度为本文反演的破裂断层面上边界中点至地表的深度;经度和纬度为破裂断层地表迹线中点的位置。

表现出相当的形变量级与相似的形变空间分布,且均远离于卫星运动,表明此地震以正断运动为主。综上所述,推断2020年于田地震可能成核于一条之前未被识别的西倾隐伏正断层。

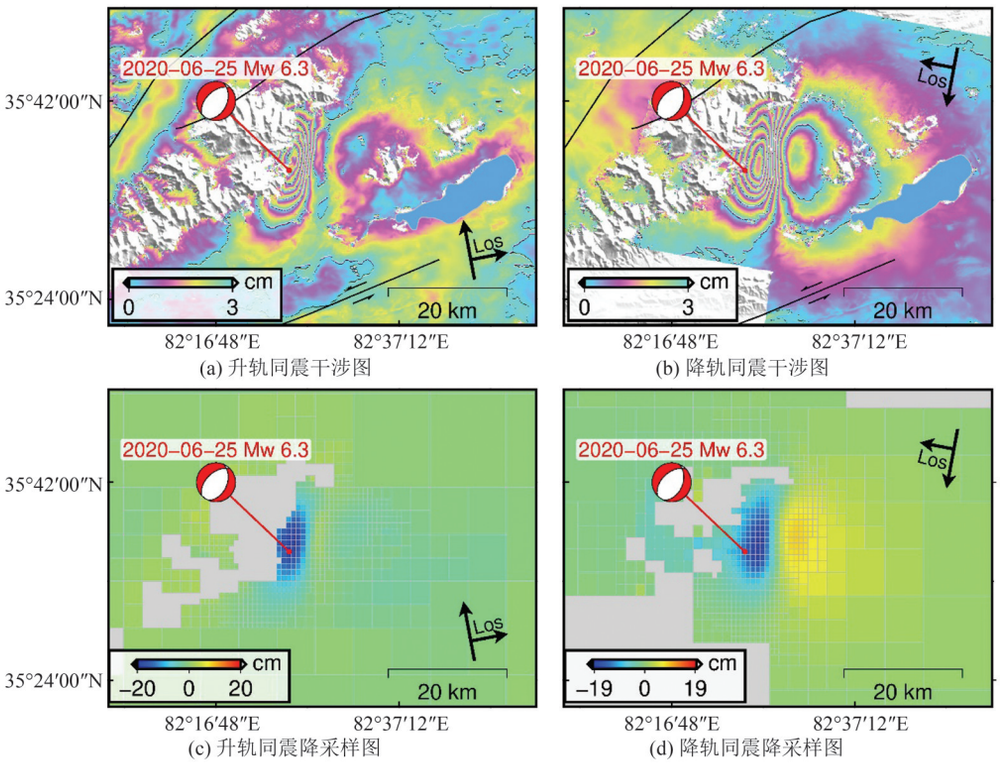
1.2 震后观测

为获取2020年于田地震震后地表形变,本文采用2020-06-29—2020-09-21(震后3个月)期间8幅Sentinel-1A卫星降轨SAR影像构建了21对震后干涉。其中,以2020-06-29获取的震后第一幅SAR影像为主参考影像,其余7幅影像均配准于此影像。每幅震后干涉对数据处理方法均与§1.1描述的同震干涉对处理方法一致。在震后差分干涉完成后,利用开源的Mintpy软件[11-13],基于小基线方法提取了于田地震震后3个月的地表形变时间序列。震后地表形变时间序列结果(图3)在发震断层上、下盘分别揭示出两个主要的形变区,破裂断层上盘地表形变最大为−2.7 cm,而断层下盘形变最大至4.0 cm。

2 大地测量观测反演

2.1 同震观测反演

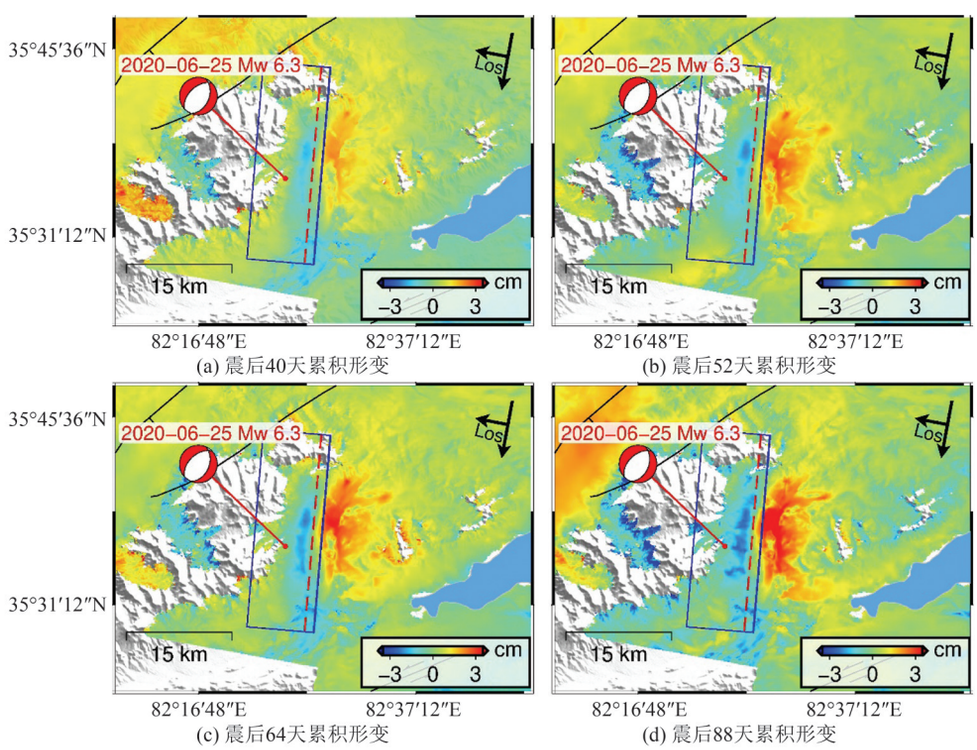
为提高反演计算效率,首先利用基于分辨率的降采样方法对2020年于田地震升、降轨同震地表形变进行重采样,分别获取673和810个升、降轨地表形变点(图2(c)、2(d))。然后基于弹性均匀各向同性的矩形位错理论[14],采用多峰粒子群



注:图(a)和(b)中的色标尺代表一个同震形变条纹的大小,而图(c)和(d)中的色标尺指同震形变的大小。

图 2　2020年于田地震同震观测和降采样数据

Fig. 2　Coseismic Observations and Downsampled Data of the 2020 Yutian Earthquake



注:蓝色矩形框为同震破裂断层面的地表投影;红色虚线为震后形变勾绘出的发震断层地表迹线;图中色标尺指震后形变的大小。

图 3　2020年于田地震震后地表形变时间序列

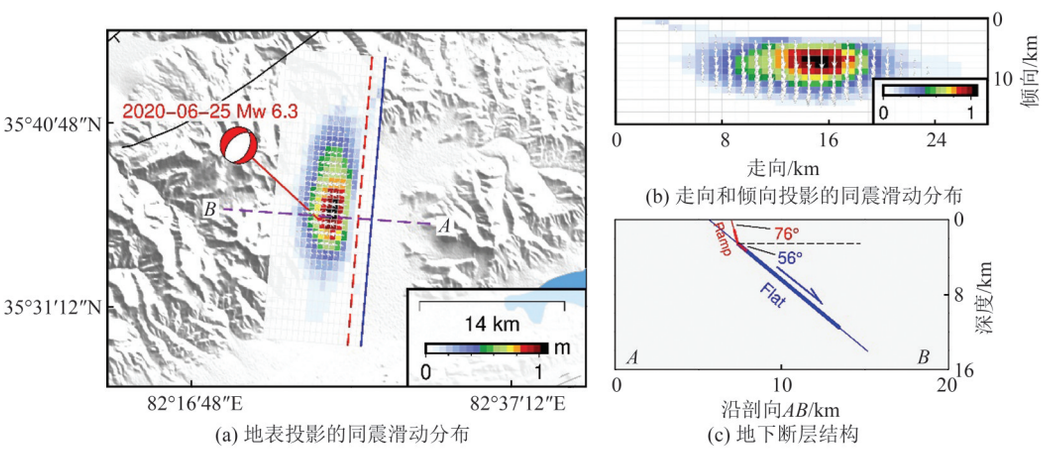
Fig. 3　Postseismic Surface Deformation Time Series of the 2020 Yutian Earthquake

优化算法[15]和非负最小二乘方法分别反演获取同震破裂断层几何参数与详细的滑动分布。

在执行均匀滑动断层模型反演时,采用多峰值粒子群方法,通过获取同震形变观测与模拟值

间的最小均平方根差来搜寻同震破裂断层走向、倾角、滑动角、位置、长度、宽度、埋深深度和滑动量[15-16]。基于§1.1描述的同震观测形变特点和USGS与GCMT公布的震源参数,推断2020年于田地震破裂于一条近西倾的正断层,进而在断层几何参数反演中分别设定断层滑动角与走向搜索区间为(-135°,-45°)和(180°,225°)。表1结果显示,此次地震破裂于一条走向184°、倾角56°的隐伏正断层(滑动角-89.5°),与早期的大地测量同震观测研究基本一致[1-6]。断层埋深于地下3 km,表明此次地震同震破裂未延伸至地表。为评估反演断层几何参数的可靠性,基于蒙特卡洛方法对同震升、降轨观测降采样数据添加随机噪声扰动,生成100组新观测数据进行非线性反演。100次反演结果(表1)显示断层几何参数分布较集中,误差范围较小,反演结果稳定。

为详细探究于田地震同震滑动地下分布,固定非线性反演中识别的破裂断层位置、走向及倾角,分别延伸断层面长度及宽度至28 km和17 km,并将断层面离散为476个长度和宽度均为1 km的子块体以进行线性反演。图4结果显示,同震破裂以正断运动为主,滑动主要集中于地下3~11 km深度,并在5.4 km深度滑动达至最大约1.1 m。破裂断层面上倾0~3 km区域存在明显的滑动亏损区,表明同震滑动未传播至地表。同震滑动分布模型产生约2.3×10^{18} N·m的地震矩,对应于Mw 6.2。总体上,同震滑动分布模型很好地恢复了升、降轨同震观测地表形变场(图5)。



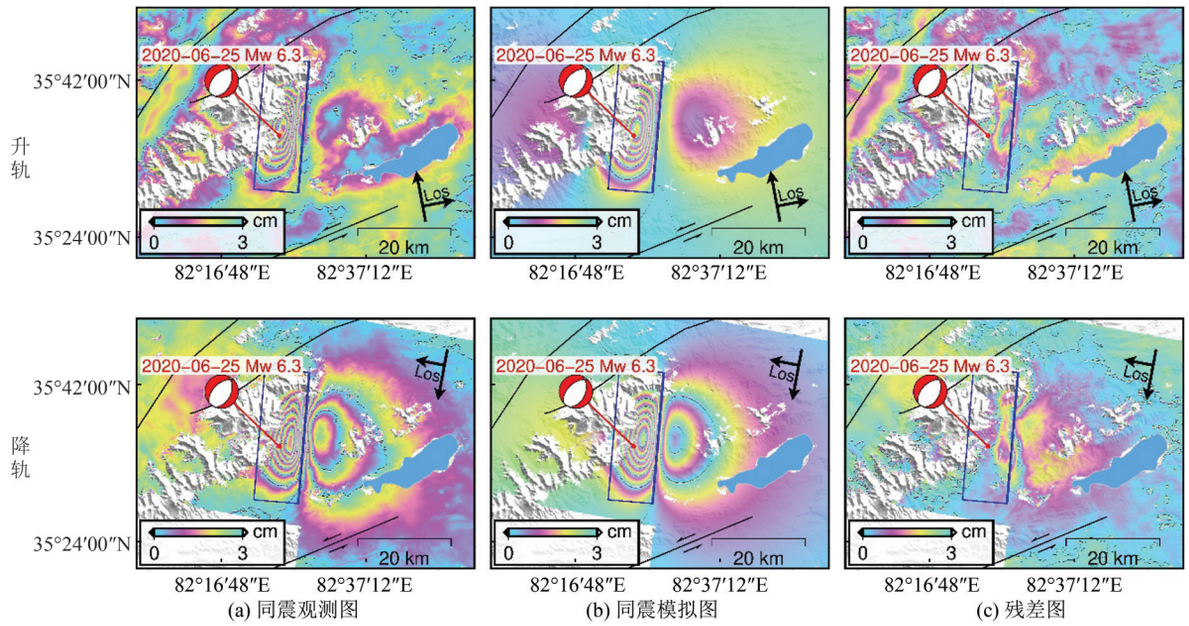
注:图中色标尺指同震滑动的大小。

图4 2020年于田地震同震滑动分布及地下断层结构

Fig. 4 Coseismic Slip Distribution and Subsurface Fault Structure of the 2020 Yutian Earthquake

2.2 震后观测反演

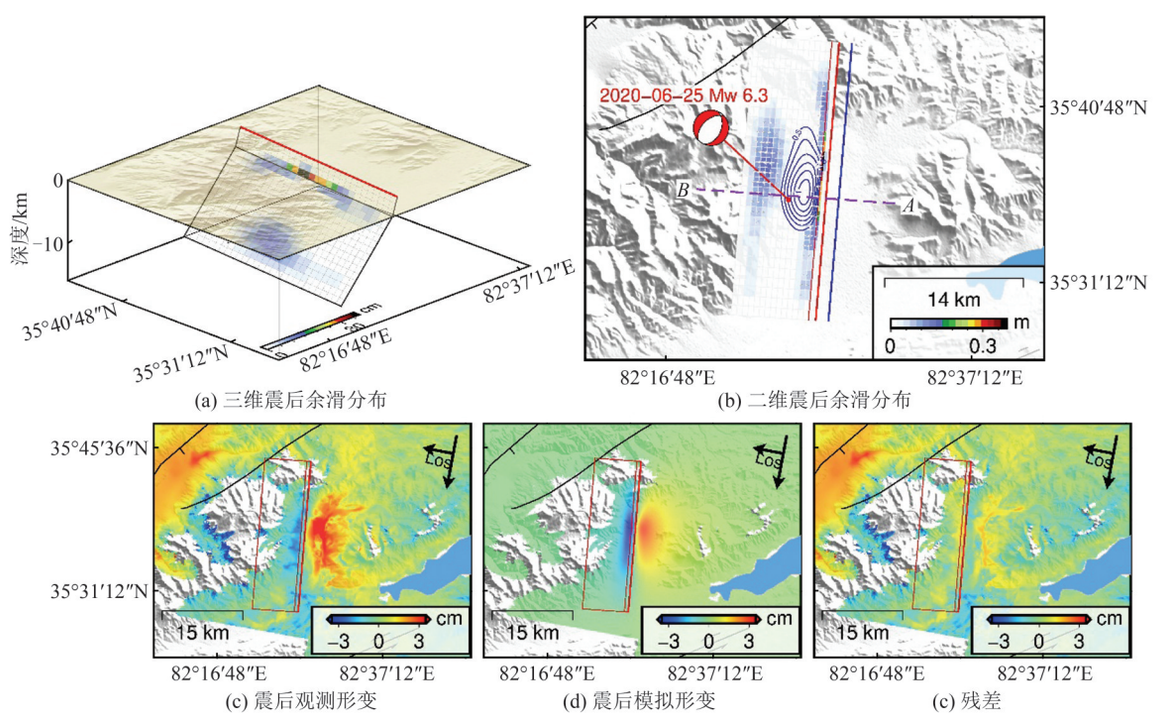
考虑到此次于田地震震源深度浅、震级较小且震后3个月内的累积地表形变主要分布于发震断层周围(图3),推断早期震后累积地表形变主要由震后余滑机制控制[17]。然而,降轨震后形变时间序列在东、西两侧呈现出两个主要的形变区,可清晰勾绘出一条震后断层地表迹线[18],且位于反演获取的同震破裂断层地表迹线西侧~1.3 km(图3)。若使用同震破裂断层地表迹线进行震后余滑反演,本该位于发震断层下盘东侧的震后地表形变将会被错误分配到发震断层上盘,从而导致较大的拟合残差[17]。此外,在裂谷、地堑及盆地等拉张构造区域,活动正断层通常呈现弯曲的地下几何结构,如铲状、坡-坪状[19],而2020年于田正断地震发生在以拉张形变为主的盆地(图1(c)),其极可能破裂于一个复杂的地下发震断层结构。因此,考虑到构造区域复杂的地下断层结构和震后形变识别的断层地表迹线与地下主要同震滑动(地壳浅部3 km以上存在同震滑动亏损区)的相对位置,修定同震破裂断层浅部的倾角,使深部破裂断层面向上延伸以匹配识别出的震后断层地表迹线,进而拟合观测的震后地表形变。构建的地下断层几何结构由两条平面断层构成:一条是位于地壳浅部3 km深度以上倾角76°的坡状构造;一条为位于地壳深度3 km以下倾角为56°(同震破裂断层倾角)的坪状构造。反演结果(图6(a)和6(b))揭示震后余滑以正断运动为主,且集中分布于地下1~3 km深度的高倾角断层段,在2.4 km深度处滑动达到最大~0.38 m。整体上,构建的坡-坪状断层余滑分布较好地拟合了观测的震后地表形变(图6(c)~6(e))。



注：图中的色标尺代表一个同震形变条纹的大小。

图 5　2020 年于田地震同震观测及模拟

Fig. 5　Coseismic Observation and Modelling of the 2020 Yutian Earthquake



注：图(a)和(b)中的色标尺代表震后余滑的大小；图(b)中蓝色曲线代表同震滑动等值线；图(c)～(e)中两红色矩形框分别代表坡状和坪状发震断层面；色标尺指震后形变的大小。

图 6　2020 年于田地震震后余滑分布及模拟

Fig. 6　Postseismic Afterslip Distribution and Modelling of the 2020 Yutian Earthquake

3　讨　论

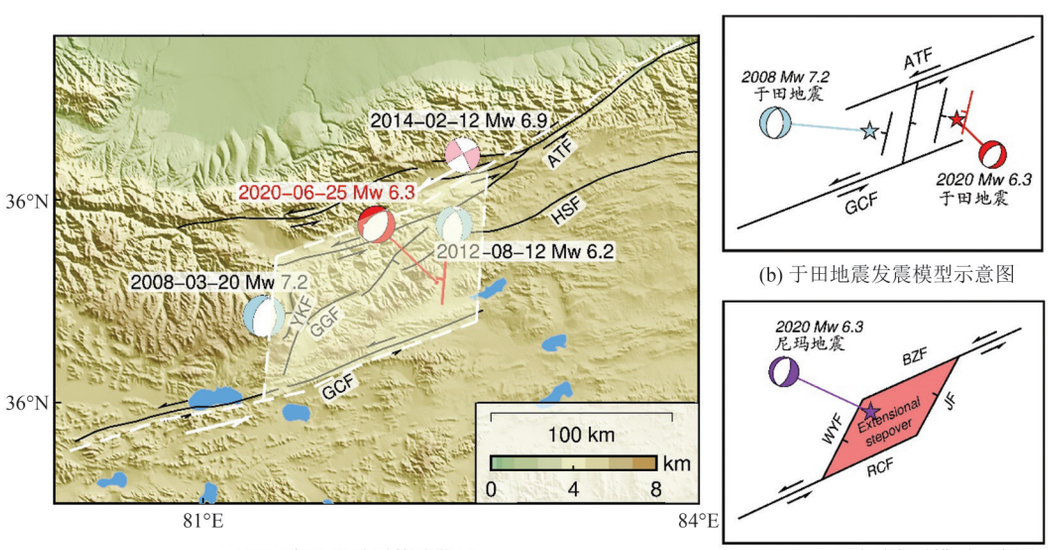
3.1　发震断层

精细识别地下发震断层结构对探究地震成因和评估震源近场区域地震灾害程度具有重要帮助，而地震周期过程不同阶段（震间、同震和震后）的大地测量形变探测，有助于揭示区域精细的地下发震构造，如 He 等[20]基于 2020 年 1 月 Kalpin 地震同震形变和区域震间形变揭示了柯坪地区低倾角的滑脱发震构造；Yang 等[18]联合同震及震后地表形变成功揭示出 2021 年 3 月希腊中部 Mw 6.3 蒂尔纳沃斯地震坡-坪状发震构造。作

为青藏高原复杂发震断层结构的重要代表,活动正断层往往以平面状、坡-坪状、铲状等几何结构在地壳广泛分布,同时会伴生次级同向或反向分支断层[17-18,21]。相比之前大多数学者仅利用同震InSAR观测来研究2020年于田地震发震构造,并一致认为该地震破裂于一条中等倾角的东倾平面状正断层[1-4],目前仅有少量的研究[5-6]联合同震及震后InSAR观测来深入探究此次地震的地下发震构造,但冯楚豪等[5]认为此次地震成核于一条东倾平面状正断层,Liu等[6]认为该地震破裂于两条中等倾角的平面状发震断层(主正断层及次级同向正断层),两项研究结论并不一致。同震InSAR观测反演(图4)揭示2020年于田地震同震滑动集中分布于倾角56°的破裂断层面下倾4~13 km区域(3~11 km深度)。由于主要的同震滑动仅存在于构建的平面状破裂断层面深部,其断层面浅部0~3 km深度(即同震滑动亏损区)的真实断层几何结构难以判定,仅利用同震InSAR观测判定该地震发震构造为单平面状断层结构并不合理[18]。本文获取的高精度震后视线向地表形变反演显示余滑主要分布于地壳浅部1~3 km深度一条倾角76°的陡立断层段,且少量余滑孕育于地壳3~4.5 km深度处的中等倾角(56°)的同震破裂断层段(图4(c)和6(a)、6(b))。震后余滑一定程度上填补了同震滑动上倾区域的滑动亏损(图4(c)和6(b)),且地壳深部的同震滑动与浅部的震后余滑近完整成像出一条坡-坪状正断型发震断层结构,此精细发震断层结构的识别对准确理解区域地震破裂行为及地震危险性评估提供重要参考。

3.2 发震机制

InSAR观测反演结果揭示,2020年于田Mw 6.3地震成核于青藏高原西北部一条之前未识别的近南北走向(走向角184°)的隐伏正断裂,震中区域平均海拔约5 000 m(图7(a))。这样一次发生于海拔极高且近东西向拉张型地震,重力扩散模型往往被用于解释其发震成因[22-23],但此模型通常适合于解释以拉张构造为主要特性区域发生的正断地震,且区域走滑断裂分布往往稀少[22,24]。然而,此次于田正断地震却发生于以左旋走滑运动为主要特性的构造区域。震中北部东北-西南走向的阿尔金分支断裂与南部东北-西南走向的郭扎错断裂构成了一条规模较大的雁状型左旋左阶走滑断裂带,其中间形成了一个拉张阶分区结构(图7(a)和7(b))。作为阶区结构的南、北边界,郭扎错断裂和阿尔金断裂分别表现出10 mm/a和5~10 mm/a的左旋走滑运动[25],其断层活动性均较强。对于该类型构造环境,位于左旋走滑的阿尔金分支断裂和郭扎错断裂之间的大陆(阶分区)必要经历强烈的拉张形变才能调节此大型活动断裂带上连续的左旋走滑运动[26],而阶分区内分布较多的正断层、地形较低的盆地分布,2008年3月于田Mw 7.2地震的发生也进一步证实了此推论(图7(a))。这种长期的运动过程会在阶分区产生大量的内部形变,从而积累足够的拉张应变能,最终会以正断型地震的形式释放[27]。作为一次典型的浅源正断地震,2020年于田地震的发生很可能归因于边界走



(a) 2020年于田地震构造背景

(b) 于田地震发震模型示意图

(c) 2020尼玛地震发震模型示意图

注:色标尺颜色代表区域地形的高度。

图7 2020年于田Mw 6.3地震和尼玛Mw 6.3地震发震模型示意图

Fig. 7 Schematic Map of the Seismogenic Models for the 2020 Mw 6.3 Yutian Earthquake and Nima Earthquake

滑断裂控制的阶分区内累积拉张应变能的释放。类似的构造背景在其他区域也普遍存在,例如位于青藏高原中部左旋走滑的依布茶卡断裂带中段的拉张阶分区(图7(c)),发生于该阶分区内2020年7月尼玛Mw 6.3正断地震也被认为由区域构造累积拉张应变能的释放所致[17]。

4　结　语

本文利用同震及震后InSAR观测研究了2020年于田地震的精细发震构造。同震InSAR观测反演结果揭示此地震同震滑动主要分布于一条埋深于地下3～11 km深度中等倾角的正断层段,而震后InSAR观测模拟结果显示余滑孕育于地壳浅部(1～3 km深度)一条高倾角的正断层段,且位于同震滑动上倾区。深部同震滑动和浅部震后余滑完整刻画出地下一条坡-坪状正断型发震断层结构。本研究证实了地震周期过程不同阶段的大地测量形变探测,有助于揭示区域精细的发震构造。此外,本文也探究了此次浅源正断地震的发震机制,认为此事件的发生归结于左旋走滑的阿尔金分支断裂与郭扎错断裂控制的阶分区内拉张应变能的释放。

参　考　文　献

[1] 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.

[2] JIANG X, LI W, WANG S J, et al. Coseismic Deformation of the 2020 Yutian Mw 6.4 Earthquake from Sentinel-1A and the Slip Inversion[J]. *Earthquake Research Advances*, 2021, 1(2): 100027.

[3] YU J S, WANG D Z, ZHAO B, et al. Normal Faulting Movement During the 2020 Mw 6.4 Yutian Earthquake: A Shallow Rupture in NW Tibet Revealed by Geodetic Measurements[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2021, 178(5): 1563-1578.

[4] LI Q, LI C T, TAN K, et al. Slip Model of the 2020 Yutian (Northwestern Tibetan Plateau) Earthquake Derived from Joint Inversion of InSAR and Teleseismic Data [J]. *Earth and Space Science*, 2021, 8(6): e2020EA001409.

[5] 冯楚豪, 严月天, 冯万鹏, 等. 利用InSAR观测揭示2020年新疆于田Mw 6.3地震发震构造及对藏北裂谷生长的启示[J]. 地球物理学报, 2022, 65(8): 2844-2856.
FENG Chuhao, YAN Yuetian, FENG Wanpeng, et al. Seismogenic Fault of the 2020 Mw 6.3 Yutian, Xinjiang Earthquake Revealed from InSAR Observations and Its Implications for the Growth of the Rift in the North Tibet[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2022, 65(8): 2844-2856.

[6] LIU Z J, YU C, LI Z H, et al. Co- and Post-Seismic Mechanisms of the 2020 Mw 6.3 Yutian Earthquake and Local Stress Evolution [J]. *Earth and Space Science*, 2023, 10(1): e2022EA002604.

[7] WERNER C, WEGMÜLLER U, WIESMANN A, et al. GAMMA SAR and Interferometric Processing Software [C]//The ERS-ENVISAT Symposium, Gothenburg, Sweden, 2000.

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

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

[10] 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.

[11] ZHANG Y J, FATTAHI H, AMELUNG F. Small Baseline InSAR Time Series Analysis: Unwrapping Error Correction and Noise Reduction[J]. *Computers and Geosciences*, 2019, 133: 104331.

[12] FATTAHI H, AMELUNG F. DEM Error Correction in InSAR Time Series[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51(7): 4249-4259.

[13] FATTAHI H, AMELUNG F. InSAR Observations of Strain Accumulation and Fault Creep Along the Chaman Fault System, Pakistan and Afghanistan [J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43(16): 8399-8406.

[14] 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.

[15] 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.

[16] 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.

[17] 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.

[18] YANG J Y, XU C J, WEN Y M, et al. Complex Coseismic and Postseismic Faulting During the 2021 Northern Thessaly (Greece) Earthquake Sequence Illuminated by InSAR Observations [J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, 49(8): e2022GL098545.

[19] FRIETSCH M, FERREIRA A M G, FUNNING G J. Data-Driven Two-Fault Modeling of the Mw 6.0 2008 Wells, Nevada Earthquake Suggests a Listric Fault Rupture [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2021, 126(4): e2020JB020263.

[20] HE P, WEN Y M, LI S P, et al. Present-Day Orogenic Processes in the Western Kalpin Nappe Explored by Interseismic GNSS Measurements and Coseismic InSAR Observations of the 2020 Mw 6.1 Kalpin Event[J]. *Geophysical Journal International*, 2021, 226(2): 928-940.

[21] REYNOLDS K, COPLEY A. Seismological Constraints on the Down-Dip Shape of Normal Faults [J]. *Geophysical Journal International*, 2018, 213(1): 534-560.

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

[23] 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.

[24] FURUYA M, YASUDA T. The 2008 Yutian Normal Faulting Earthquake (Mw 7.1), NW Tibet: Non-Planar Fault Modeling and Implications for the Karakax Fault[J]. *Tectonophysics*, 2011, 511(3/4): 125-133.

[25] WRIGHT T J, PARSONS B, ENGLAND P C, et al. InSAR Observations of Low Slip Rates on the Major Faults of Western Tibet[J]. *Science*, 2004, 305(5681): 236-239.

[26] HOLE J A. Rivers, Rifts and Ruptures[J]. *Nature Geoscience*, 2011, 4(7): 428-429.

[27] WANG S, XU C J, XU W B, et al. The 2017 Mw 6.6 Poso Earthquake: Implications for Extrusion Tectonics in Central Sulawesi[J]. *Seismological Research Letters*, 2019, 90(2A): 649-658.