

文章编号: 1006-6616 (2017) 04-0507-08

2017 年四川九寨沟 M_s 7.0 地震 InSAR 同震形变场及发震构造探讨

姚 鑫^{1,2}, 周振凯^{1,2}, 李凌婧^{1,2}, 刘星洪^{1,2,3}, 姚佳明⁴

- (1. 国土资源部新构造运动与地质灾害重点实验室, 北京 100081;
2. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;
3. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083;
4. 中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083)

摘要: 2017 年 8 月 8 日四川省九寨沟县发生 M_s 7.0 级地震, 构造部位处于青藏高原东缘的巴颜喀拉地块东北角, 震中位置是岷江断裂、塔藏断裂、虎牙断裂和雪山梁子断裂围闭的空震区。哪条断裂发震, 如何界定其与周边活动断裂的关系, 与青藏高原东缘近年来发生的大地震是否有成因联系等问题对于理解该区域现今构造活动模式、预测地震发展趋势和部署地震地质灾害防控等工作具有重要意义。利用地震前后两期 Sentinel-1 合成孔径雷达数据对地表同震形变场进行了 InSAR 测量, 获取了极震区约 2000 km² 范围内的雷达视线向变形 (-13 ~ 28 cm) 和运动方向, 为主动盘单侧走滑兼逆冲的变形模式, 结合震源机制、断裂展布、构造背景和近年地震迁移的分析, 揭示了控震构造是巴颜喀拉地块北缘边界断裂弧形旋转体系的尾端构造, 发震断层是该断裂系中塔藏断裂的南段, 并有与虎牙断裂贯通的趋势, 因此, 应重视本次地震与虎牙断裂之间的空震区未来的强震危险性; 从区域上看, 此次九寨沟地震可能与汶川地震具有一定的时空成因联系, 因在巴颜喀拉地块南北边界断裂破裂基本贯通的条件下, 2008 年汶川地震诱发的东缘中部锁固破裂导致块体加速向东挤出, 2013 年鲁甸地震又释放了东缘南段挤压构造应力, 从而进一步加剧了东北角的应力集中, 促使九寨沟地震的发生。

关键词: 九寨沟地震; 干涉雷达; 巴颜喀拉地块; 塔藏断裂

中图分类号: P315.2

文献标识码: A

0 引言

2017 年 8 月 8 日 21 时 19 分四川省九寨沟县发生 M_s 7.0 级地震, 中心坐标 33.2°N、103.82°E, 震源深度 14 km, 断层破裂性质为高倾角左旋走滑型地震。虽然震害损失并不十分严重, 但由于位于九寨沟世界自然遗产保护区, 受到了极大的关注。发震的二级构造部位处于青藏高原东部巴颜喀拉地块东北角, 震中是岷江断裂、塔藏断裂、虎牙断裂、雪山梁子断裂等活动断裂围闭的空震区, 且余震展布与南侧的虎牙断裂北北西向延伸

方向一致(据中国地震局地质所网站)。这一地区是历史地震多发区, 东侧 1879 年 8 月 1 日武都南 8.0 级地震, 南侧 1976 年 8 月 16、23 日松潘、平武间两次 7.6 级地震, 西侧岷江断裂北段 1748 年 5 月 2 日松潘漳腊北 6 $\frac{1}{4}$ 级和 1960 年 11 月 9 日松潘漳腊 6 $\frac{3}{4}$ 级地震, 岷江断裂南段发生过 1731 年 9 月 4 日茂县叠溪 7 级和 1933 年叠溪 7 $\frac{1}{2}$ 地震。此外, 由于震级不是特别大、地形陡峭和植被茂密的限制, 野外未观测到地表破裂, 余震的分布与地震烈度的相关性也比较低, 这些观察调查结果都很难全面的约束发震断层的几何和运动特征。这自然让人产生疑问, 本次地震是哪条断裂发震?

收稿日期: 2017-08-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(41672359); 中国地质调查局工作项目(DD20179282, DD20160272); 中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(DZLXJK201611)

作者简介: 姚鑫(1978-), 男, 教授级高工, 主要从事地质灾害与 InSAR 研究。E-mail: yaoxinphd@163.com

如何界定其与周边活动断裂的关系?与历史地震及青藏高原东缘近年来发生的大地震是否有成因联系?这些问题对于理解青藏高原东缘的现今构造活动性、预判地震发展趋势和部署地震地质灾害防控等工作具有重要意义。

差分干涉雷达(D-InSAR),一般简称干涉雷达(InSAR),可以大范围、高灵敏度、无接触的观测同震地表变形,反演发震断层几何参数和滑动参数^[1-2],结合其他多种数据源的联合反演可提供更加准确的地震构造信息,对深入理解地震发生机制和未来地震迁移趋势提供重要的科学依据和决策支持^[3],如2008年汶川地震的干涉雷达监测显示出龙门山断裂两侧约4万km²的变形范围,以及南段变形范围大北段小,上盘近场逆冲抬升远场松弛下沉等地表变形特征,为从区域上全面认识汶川地震的动力学机制及灾害评估提供了重要的监测数据^[4]。

本文利用地震前后两期 Sentinel-1 合成孔径雷达(SAR)数据对九寨沟同震形变场开展了 InSAR 测量,并结合震源机制解、断裂展布、近期地震迁移和大区域构造背景等因素对本次地震的成因、运动模式及未来发震趋势进行了分析。

1 干涉雷达观测同震形变原理

同震形变 InSAR 观测至少需要对同一区域进行两次重复的雷达数据获取,如图1所示,雷达传感器的回波信号携带了地物后向散射体的相位和强度信息,计算同一区域不同时间获取的两景单视复数雷达影像(φ_m, φ_s)的相位差生成干涉图 $\Delta\varphi$,该干涉图中既包含了两次成像期间地表相对运动的相位信息(φ_{def}),也含有成像区域的地形信息(φ_{topo})、观测向斜距信息(φ_{flat})、传感器轨道误差(φ_{orbit})、大气效应(φ_{atmos})和其他去相干因素的相位(φ_{noise})值,公式表示为:

$$\Delta\varphi = \varphi_m - \varphi_s = \varphi_{def} + \varphi_{topo} + \varphi_{flat} + \varphi_{orbit} + \varphi_{atmos} + \varphi_{noise} \quad (1)$$

差分干涉的基本任务就是从干涉图中提取有用的 φ_{def} 信息,公式(1)中的 φ_{topo} 可以采用数字高程模型或多轨观测方法去除, φ_{flat} 属于系统观测常量,通过卫星姿态参数校正,其它相位信息引起的测量误差为厘米级,是阻碍 InSAR 测量精度提高的主要因素,目前尚未有完善的解决手段。处理后的 φ_{def} 与沿传感器视线向(LOS, Line of Sight)地表变形 ΔR 的关系为:

$$\varphi_{def} = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R \quad (2)$$

其中 λ 为雷达波波长,可见对于相同的地表变形 ΔR ,雷达波长与干涉条纹的密度成反比。采用 InSAR 技术研究地质学问题具有如下优势:(1) SAR 图像自主发射和接收微波雷达信号,不受时相和气象条件限制,可以全天候、全天时的观测地表;(2) 观测精度高,相对变形速率精度可达 mm/a;(3) 覆盖范围广,一景 SAR 数据面积在上千平方千米以上;(4) 获取变形值密度大(点观测很容易实现大于 1000 点/km²,面观测空间连续);(5) 以存档卫星 SAR 数据(最早 1992 年)为数据源,可以回溯历史变形,弥补历史监测数据空白或缺失的情况,及时满足获取长期变形的需求;(6) 无接触观测,方便在交通不便、环境恶劣、人员不易到达地区开展工作,弥补地面工作不足。

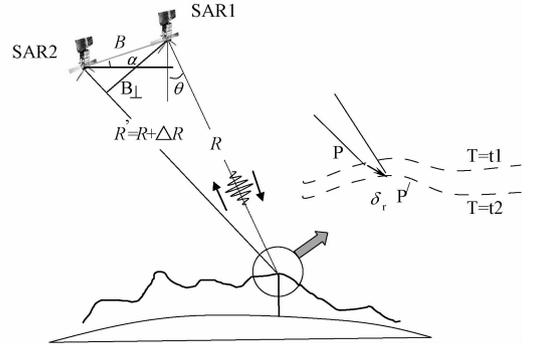


图1 干涉雷达测量原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of InSAR measurement

干涉雷达技术始于对地质体变形问题的研究始于1988年, Gabriel 及 Goldstein 等人利用 Seasat 卫星提供的三次观察数据进行了实验,产生了差分干涉图,图上清楚地显示了由于岩土体吸水膨胀后引起的相位变化。该方法理论上可检测到微波波长量级(即厘米量级)的变化,但当时并没有受到重视。直到1993年 Massonnet 等人利用 ERS-1 SAR 数据获取了1992年的美国加利福尼亚 Landers 地震的形变场,并将干涉雷达的测量结果与其它类型的测量数据进行了比较,结果相当的吻合,并将其研究成果发表在《Nature》杂志上,引起了国际地震界的震惊^[5],人们也认识到 D-InSAR 在监测地表形变方面的优势,开始了广泛的研究。在构造运动研究相关的研究进展主要体现在以下四个方面:(1) 监测地震同震形变,以此为基础进行发震断裂的空间展布与位错分析;(2) 定位发震断层,探测隐伏活动断裂;(3) 采用多

期 InSAR 进行活动异常区监测, 分析地下动力过程; (4) 采用 InSAR 技术反演构造应力场和岩体力学参数的探索。

2 地质概况与发震断裂

本次地震位于地震活动强烈的巴颜喀拉地块

东北角, 是活动构造分布较集中的区域。巴颜喀拉块体北东缘位于青藏高原北东部的川甘交界地区, 其在大的构造单元上处于扬子地块、巴颜喀拉地块和柴达木地块的交汇地带, 是青藏高原隆升发展的前缘地带, 也是我国南北地震带的中段, 构造变形极其复杂, 断裂活动强烈, 控制着一系列强震的发生^[6] (见图2)。

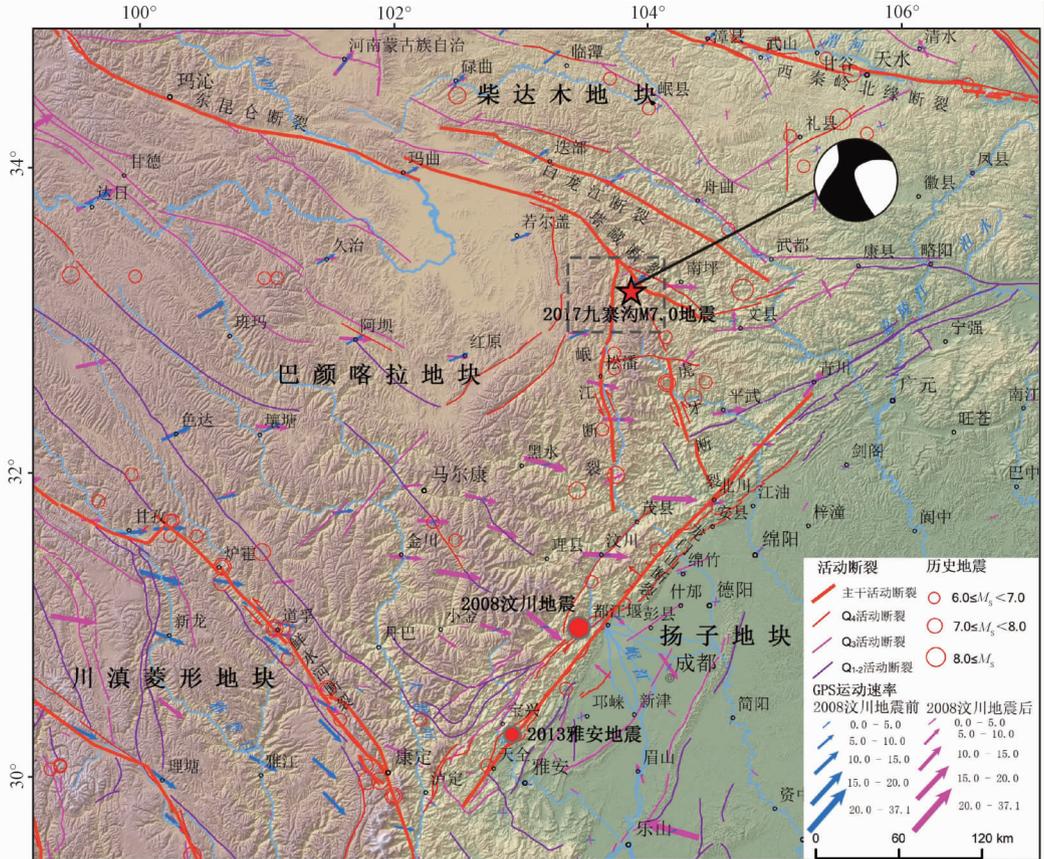


图2 九寨沟地震及活动构造背景

Fig. 2 Jiuzhaigou earthquake and active tectonic setting

九寨沟震中附近主要的活动断裂有龙门山断裂带、岷江断裂、虎牙断裂、塔藏断裂等。龙门山断裂带是一条深大、复杂的地块边界构造带, 由十几条断层组成, 可概括分为龙门山主边界断裂带 (即灌县-江油断裂)、龙门山主中央断裂带 (即映秀-北川断裂) 和龙门山后山断裂带 (即汶川-茂县断裂), 总体走向北西向, 逆冲兼具走滑运动性质, 是巴颜喀拉地块东向逸出的应力和应变累计计变带^[3-4,6-7], 易于诱发强震, 2008年中北段发生汶川 $M_s 8.0$ 级地震, 2013年南段发生雅安 7.0 级地震。

岷江断裂分北段和南段, 总长可达 170 km。位于松潘县以北的北段研究程度较深, 该段主要

沿岷江河谷平行展布, 北起九寨沟县, 向南经川主寺, 南达松潘县以南。断层总体走向为 $20^\circ \sim 25^\circ$, 倾向北西, 倾角 $60^\circ \sim 70^\circ$ 。断裂呈现压性特征外, 左旋和右旋扭动兼有, 以左旋为主, 显示断裂的多期运动现象。松潘县以南的南段研究程度较浅, 在较场附近发现了可能属岷江断裂南延部分的南北向断裂, 其规模大致与松潘以北的岷江断裂相当, 断裂在岷江东岸出露, 断续延伸长达 50 km 以上, 为断面西倾的逆冲断层^[7-8]。

虎牙断裂处于龙门山断裂北西侧, 北端始于松潘县龙滴水, 向南经虎牙关, 达平武县的银厂附近, 断层地表出露全长 60 km。断裂大致以小河为中心分南、北两段; 北段走向由北北西转南北

向, 倾向东, 倾角 80° 左右; 南段走向由南北转南东, 倾向西, 倾角由北往南, 从 70° 变为 30° 。断裂总体走向为北北西向, 是一枢纽性断裂, 应力易于集中^[8-9]。

塔藏断裂位于东昆仑断裂带东段, 属于“玛沁—玛曲空震区”范围。塔藏断裂自西向东可分为青藏高原内部的罗叉段、青藏高原边缘的东北村段和马家磨段, 各段走向依次为 113° 、 142° 、 130° , 逐渐向南偏转, 晚第四纪的活动表现为分段性和多期性。罗叉段全新世以左旋剪切走滑为主兼挤压活动, 左旋走滑速率为 $2.43 \sim 2.89 \text{ mm/a}$ 左右, 最新地表断错事件发生在 $0.66 \pm 0.04 \text{ ka BP}$ 以来, 断层面表现出走滑断层的近垂直和张裂并发育充填楔的典型特征, 塔藏断裂为东昆仑断裂系东延的主要断裂之一; 马家磨段也为全新世活动断层, 距今 $9.0 \pm 0.8 \text{ Ka}$ 的地层被断错, 而且断层面北倾达 58° 。因此, 对比分析塔藏断裂各段活动特征可见, 西部以水平剪切运动为主, 而东部走滑运动分量逐渐变弱, 断面北倾、北盘上升导致的垂向分量逐渐变大^[9]。

大范围上, 北侧东昆仑—塔藏断裂、东侧龙门山断裂及南侧的鲜水河断裂作为板块的边界, 围闭巴颜喀拉地块作为一个整体向东逸出 (见图 2)。其构造运动速度的快慢与边界断裂带上大地震的发生具有耦合关系。

3 同震形变场及构造运动分析

3.1 干涉雷达数据处理过程及结果

研究采用的雷达数据为两景 Sentinel-1 SAR (C 波段, 5.6 cm 波长) 数据, 拍摄时间分别为地震前的 2017 年 7 月 30 日和地震后的 2017 年 8 月 11 日。雷达波入射角 43.8° , 水平照射方位北西 12.9° , 垂直基线距 $+35.7 \text{ m}$ 。利用两路差分干涉方法, 使用 30 m 分辨率的 SRTM 数字高程模型数据消除地形相位, 用最小费用流法进行解缠。其优点是充分利用已知地形信息, 通过最少的雷达观测在震后快速获得同震形变场, 其数据处理流程见图 3 所示。

获取的九寨沟地震同震形变干涉图像是缠绕在一个相位周期 ($-\pi \sim \pi$ 弧度) 内的观测结果 (见图 4), 相当于卫星视线 (LOS, Look of Sight) 向变形的等值线, 根据公式 (2) 换算, 每个条纹代表 2.8 cm 的 LOS 变形。图中的黑色区域代表地

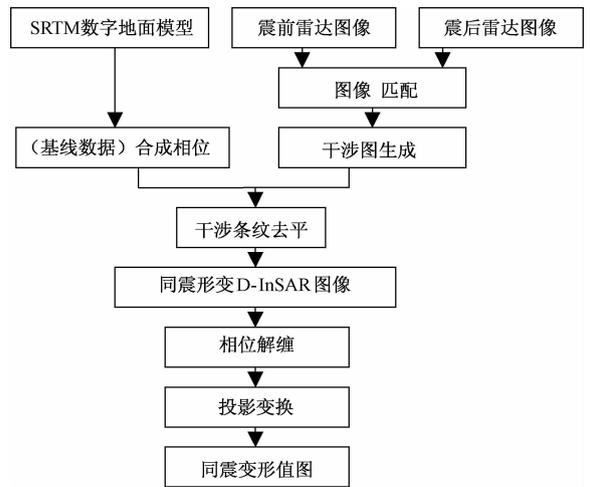


图 3 两轨干涉 + DEM 差分干涉处理流程图
Fig. 3 Flowchart of InSAR process with two orbits + DEM

质灾害或是植被变化导致的失相干, 白色区域代表地形起伏造成的雷达波阴影和叠掩, 两个区域均无法获得变形量值。

3.2 变形矢量分析

参考已有的同震形变 InSAR 观测研究^[2,4-5], 从图 4 中可以较好的识别出本次地震的同震形变场, 其是以北东侧的塔藏断裂为约束边界, 向南西侧发散的密集条纹区, 总体呈“果仁状”, 长轴方向北西向, 长约 60 km 、宽约 30 km , 中间密集, 外部稀疏。该区域以外的微弱条纹变化是由大气延迟效应引发。从 SAR 干涉条纹的分布格局可以看出, 以震中为分界点的北西和南东两部分的干涉条纹顺序和密度明显不同: 北西部分条纹干涉相位从外围至震中方向为“蓝—红—黄”的周期变化, 有 10 个周期; 南东部分干涉条纹由外围向震中方向经历了相反的颜色顺序, 为“红—蓝—黄”周期变化, 以 2 个周期为主, 这显示出两部分不同的运动方向和运动幅度。将干涉雷达条纹图像解算为同震地表变形的 LOS 绝对量值 (见图 5), 变形量值在 $-13 \sim 28 \text{ cm}$ 之间, 这一量值是水平变形与垂直变形在视线向投影的结果, 负值代表远离卫星, 正值代表地表靠近卫星。

3.3 发震断裂定位与构造运动模式分析

本次地震未发现同震地表破裂, 中国地震局地质研究所的余震定位在空间显示上与虎牙断裂有很好的线性关系, 并被限定在岷江活动断裂以东, 据此本次地震被认为是虎牙断裂北北西向延展活动的结果。

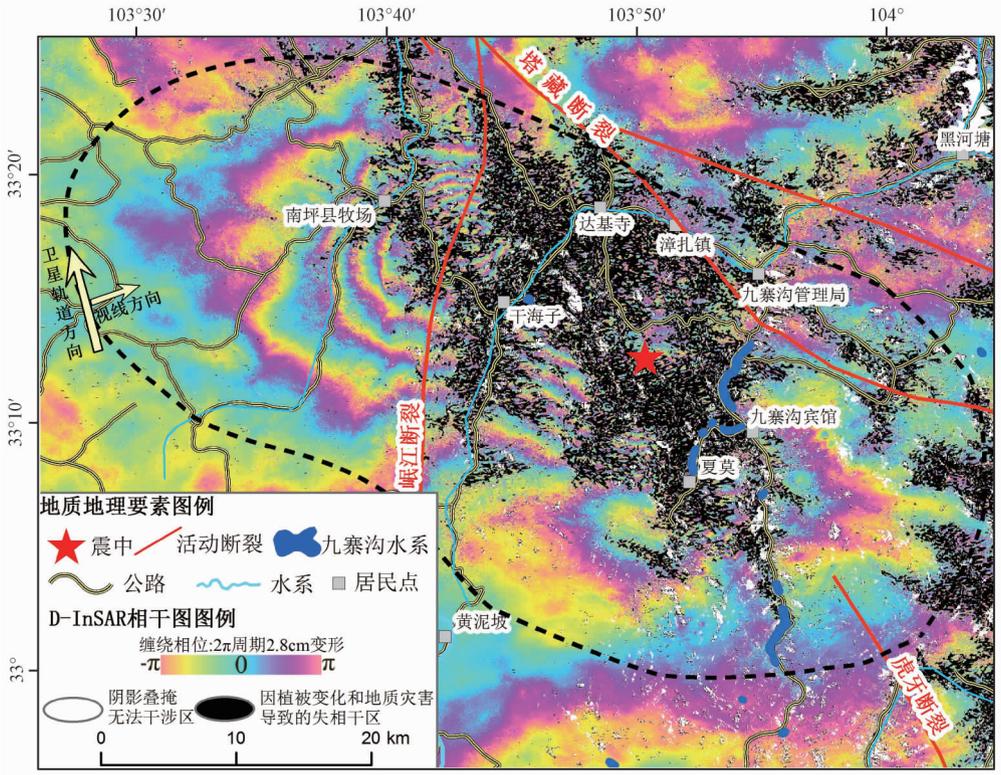


图 4 九寨沟地震同震形变 InSAR 缠绕条纹图

Fig. 4 Wrapped InSAR strip image of Jiuzhaigou earthquake co-seismic deformation

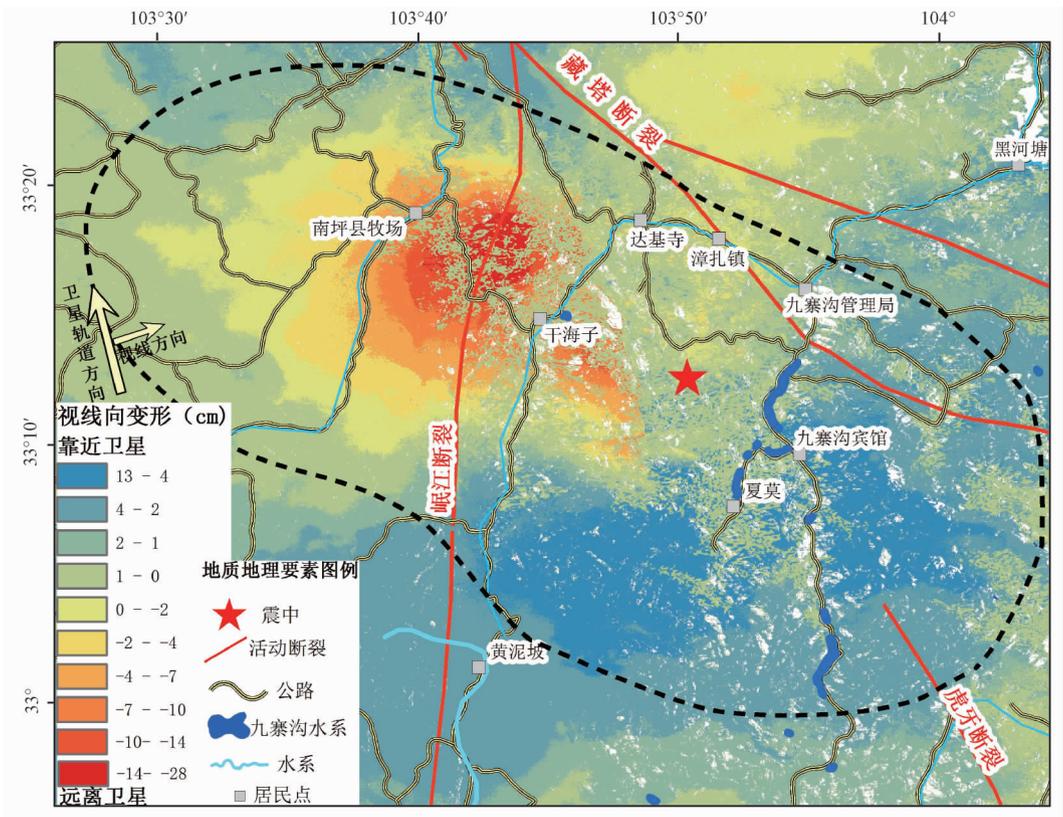


图 5 解缠后的九寨沟地震干涉雷达视线向绝对变形量

Fig. 5 Unwrapped InSAR LOS Deformation of Jiuzhaigou earthquake

地震波解析的震源结果为地下几千米至十几千米深度的位置,而对于减灾防灾来讲发震断裂在地表的上断点行迹和地表的运动模式更为重要,基于 InSAR 变形场可以进行发震断裂定位与构造运动模式分析。首先,本次地表变形空间过渡连续,未出现明显的陡变带,表明发震断层错断未延伸到地表。其次,变形场条纹在北西方向自然光滑的覆盖了岷江断裂,虎牙断裂的延展方向上未发生密集且反方向的畸变条纹,北东侧在塔藏断裂附近产生了变形突变。基于震源机制解,走滑断裂四象限变形场和逆冲型断裂构造变形场的图像,可以定性的解析变形矢量:北西部分变形量为负值,代表地面与雷达视线间的距离增长,意味着地表下沉(远离卫星)及大致向东北的水平运动(远离卫星),其中干海子—南坪县牧场附近的区域变形量最大,达 14~28 cm,为本次地震的宏观震中;南东部分变形量为负值,且变形量较小,代表以上升(靠近卫星)为主的变形与南东向水平运动(远离卫星)为辅的变形有相互的抵消。

综上所述可以确定,该变形场是塔藏断裂西南盘单侧逆冲走滑的结果(见图6)。

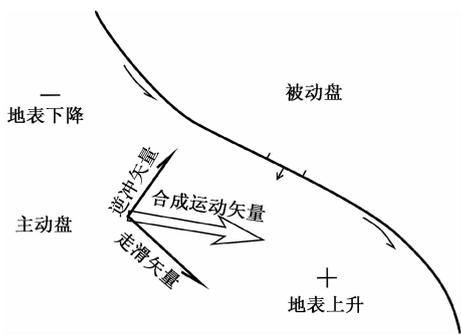


图6 单侧走滑兼逆冲型断裂活动地表变形模式

Fig. 6 Single wall strike-slipping and thrust fault as well as corresponding ground surface deformation

4 九寨沟地震发育机制的探讨

综合分析巴颜喀拉地块活动构造背景和九寨沟地震的发生机制(见图7),对于认识青藏高原东缘地震的发展趋势具有重要意义。

首先,从大区域构造变形上,基于2008年汶川地震前后的中国地壳运动观测网络的GPS观测结果^[10]可以看出巴颜喀拉地块运动矢量发生了很大的变化。汶川地震前(1999—2007年),地块东

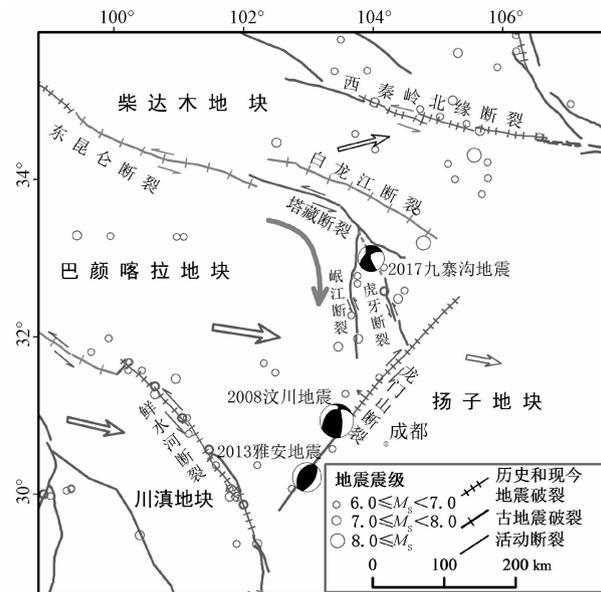


图7 巴颜喀拉地块活动诱发九寨沟地震机制示意图

Fig. 7 Schematic diagram of Jiuzhaigou earthquake triggered by Bayan-Har block activity

部的变形量以 0~10 mm/a 为主,并且量值上由西向东递减,方向上以北东和南西向为主,这是东向逸出运动在龙门山被扬子地块阻挡而锁固的结果。震后(2009—2011年)巴颜喀拉东缘中段的变形量上升到 5~20 mm/a,而且是由西向东递增,方向也变为近东向,而东缘南北两端基本保持原态(见图2),这一变化是由于2008年汶川地震引发龙门山断裂带发生破裂,地块东向逸出的中段锁固解除,而南北两端仍处于锁闭状态,成为未来强震的发展区域。

其次,活动块体边界破裂的时空序列方面,巴颜喀拉地块南部边界鲜水河断裂是我国现今最活跃的断裂之一,1725年来发生7.0级以上地震8次,6.0~6.9级地震14次,现今270 km的地表破裂已经多次贯通,北西向延展与其左阶排列的甘孜—玉树断裂也发育古破裂遗迹^[11]。北部边界东昆仑断裂西段曾经于2001年发生8.1级地震产生了350 km的地表破裂^[12-13],东段也具有清晰的古地震破裂;东部边界2008年汶川8.0级地震275 km的地表破裂和后续2013年雅安7.0级逆冲地震使龙门山边界断裂现今应力得到充分释放;作为构造应力集中的东北角,北北西向的岷江断裂和虎牙断裂的南段于现代和当代多次发生了系列足以解除断裂深部锁固的大地震。唯有东北角塔

藏断裂南东东向南北转折段缺乏破裂和历史地震记录,地应力水平已经积累到使地壳浅部断层产生滑动失稳的临界条件,成为现今地震的高危区^[14]。

再次,从弧形旋转构造体系角度分析,强活动走滑断裂在受到阻挡后,为协调物质体积平衡,会产生压剪型应力环境,几何形态上发育一套弧形旋转走滑活动构造体系^[15]。对比分析塔藏断裂各段活动特征可见,西部以水平剪切运动为主,而东部走滑运动分量逐渐变弱,断面北倾、北盘上升导致的垂向分量逐渐变大。东昆仑断裂带及塔藏断裂晚第四纪走滑速率向东规则减小,并转化为横向逆冲作用和高原隆升,符合“叠瓦状逆冲转换—有限挤出模型”的特征^[9]。这与鲜水河—安宁河—则木河断裂体系有相似之处。InSAR变形强度图的范围和矢量值上也符合塔藏断裂末端弧形旋转活动的认识。本次地震与虎牙断裂之间的空震区尚未发现地表破裂和古地震,成为未来地震防控的重点。

综上,根据活动构造条件及近年的地震时空分布分析,本次地震动力机制是在巴颜喀拉地块东向逸出和南北边界断裂基本破裂完成的背景下,2008年汶川地震的东缘中部锁固破裂促使块体整体加速向东部挤出,导致南北两端应力集中,2013年鲁甸逆冲型地震又解除了南部的应力积累,进一步加强了东北角的应力,促进了塔藏断裂、岷江断裂、虎牙断裂这一边界逆冲旋转构造体系的贯通,最终导致了本次九寨沟地震的发生。

5 结论

(1) InSAR观测表明九寨沟地震在约2000 km²的极震区内发生了-13~28 cm的雷达视线向变形,呈现主动盘单侧走滑兼逆冲的变形模式。结合震源机制解、周边断裂展布、构造背景和近年地震迁移的分析,可以揭示出发震断层是巴颜喀拉地块北缘边界断裂弧形旋转体系的塔藏断裂南段,并与虎牙断裂趋于贯通,因此,应重视本次地震与虎牙断裂之间的空震区未来的强震危险性问题。

(2) 九寨沟地震与汶川地震具有一定的成因联系,在巴颜喀拉地块南北边界断裂基本破裂完成的条件下,2008年汶川地震诱发的东缘中部锁固破裂诱发巴颜喀拉块体加速向东部挤出,促使其东北部应力进一步集中,导致了本次走滑兼逆冲

的大地震。

参考文献/References

- [1] Zhang Y S, Yao X, Xiong T Y, et al. Rapid identification and emergency investigation of surface ruptures and geohazards induced by the $M_s7.1$ Yushu earthquake [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2010, 84 (6): 1315 ~ 1327.
- [2] 姚鑫,张永双,杨农,等.玉树地震地表变形InSAR观测及初步分析[J].*地质力学学报*,2010,16(2):129~136. YAO Xin, ZHANG Yongshuang, YANG Nong, et al. D-inSAR observation of earth surface deformation in the $M_s7.1$ Yushu earthquake [J]. *Journal of Geomechanics*, 2010, 16 (2): 129 ~ 136.
- [3] 滕吉文,刘韩,韩立国,等.汶川—映秀 $M_s8.0$ 地震的介质破裂与深部物质运移的动力机制[J].*吉林大学学报(地球科学版)*,2009,39(4):559~583. TENG Jiwen, LIU Cai, HAN Ligu, et al. The dynamical mechanism for medium rapture and motion of deep matler on Wenchuan—Yingxiu $M_s8.0$ earthquake, 2008 [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2009, 39 (4): 559 ~ 583.
- [4] Yao X, Zhang Y S, Dai F C, et al. Geohazard distribution and geological activity of Wenchuan earthquake surveyed by D-InSAR [C] // *Geological Active-International Association for Engineering Geology and Environment (IAEG) Congress 2010*. [S. l.] Holand: CRC Press, 2010, 871 ~ 880.
- [5] Massonnet D, Rossi M, Carmona C, et al. The displacement field of the landers earthquake mapped by radar interferometry [J]. *Nature*, 1993, 364 (6433): 138 ~ 142.
- [6] 张岳桥,杨农,施炜,等.青藏高原东缘新构造及其对汶川地震的控制作用[J].*地质学报*,2008,82(12):1668~1678. ZHANG Yueqiao, YANG Nong, SHI Wei, et al. Neotectonics of eastern Tibet and its control on the Wenchuan earthquake [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2008, 82 (12): 1668 ~ 1678.
- [7] 单斌,熊熊,金笔凯,等.松潘—甘孜块体东北端强震间相互作用及地震危险性研究[J].*地球物理学报*,2012,55(7):2329~2340, doi: 10. 6038/j. issn. 001 ~ 5733. 2012. 07. 018. SHAN Bin, XIONG Xiong, JIN Bikai, et al. Earthquake stress interaction in the northeastern Songpan-Garzê block and its implication for earthquake hazard [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, 55 (7): 2329 ~ 2340, doi: 10. 6038/j. issn. 001 ~ 5733. 2012. 07. 018.
- [8] 杜方,苏有锦,龙锋,等.芦山7.0级、汶川8.0级地震与巴颜喀拉地块东缘区域历史地震[J].*地球物理学进展*,2015,30(4):1569~1579, doi: 10. 6038/pg20150411. DU fang, SU Youjin, LONG Feng, et al. The $M7.0$ Lusha, the $M8.0$ Wenchuan earthquake and the history earthquakes in the eastern border area of the Bayan Har block [J]. *Progress in Geophysics*, 2015, 30 (4): 1569 ~ 1579, doi: 10. 6038/pg20150411.
- [9] 胡朝忠,任金卫,杨攀新,等.东昆仑断裂东端塔藏断裂压剪活动与高原隆升作用讨论[J].*地质学报*,2017,91(7):1401~1415. HU Chaozhong, REN Jinwei, YANG Panxin, et al. Discussion

- on the Compression-shear activity of the Tazang fault in East Kunlun and Uplift of Plateau [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2017, 91 (7): 1401 ~ 1415.
- [10] 陈长云, 任金卫, 孟国杰, 等. 巴颜喀拉块体北东缘主要断裂现今活动性分析 [J]. *大地测量与地球动力学*, 2012, 32 (3): 27 ~ 30.
CHEN Changyun, REN Jinwei, MENG Guojie, et al. Analysis of modern activity of major faults in northeast margin of Bayan-Har block [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2012, 32 (3): 27 ~ 30.
- [11] 周荣军, 闻学泽, 蔡长星, 等. 甘孜-玉树断裂带的近代地震与未来地震趋势估计 [J]. *地震地质*, 1997, 19 (2): 115 ~ 124.
ZHOU Rongjun, WEN Xueze, Cai Changxing, et al. Recent earthquakes and assessment of seismic tendency on the Ganzi-Yushu fault zone [J]. *Seismology and Geology*, 1997, 19 (2): 115 ~ 124.
- [12] 陈杰, 陈宇坤, 丁国瑜, 等. 2001年昆仑山口西8.1级地震地表破裂带 [J]. *第四纪研究*, 2003, 23 (6): 629 ~ 639.
CHEN Jie, CHEN Yukun, DING Guoyu, et al. Surface rupture zones of the 2001 earthquake $M_s 8.1$ West of Kunlun pass, northern Qinghai-Xizang Plateau [J]. *Quaternary Sciences*, 2003, 23 (6): 629 ~ 639.
- [13] 徐锡伟, 陈文彬, 于贵华, 等. 2001年11月14日昆仑山库赛湖地震 ($M_s 8.1$) 地表破裂带的基本特征 [J]. *地震地质*, 2002, 24 (1): 1 ~ 13.
XU Xiwei, CHEN Wenbin, YU Guihua, et al. Characteristic features of the surface ruptures of the Hoh Sai Hu (Kunlunshan) earthquake ($M_s 8.1$), northern Tibetan Plateau, China [J]. *Seismology and Geology*, 2002, 24 (1): 1 ~ 13.
- [14] 戚帮申, 张鹏, 丰成君, 等. 川甘陕交汇地区现今地应力环境与地震危险性 [J]. *中国地质*, 2016, 43 (5): 1814 ~ 1827.
QI Bangshen, ZHANG Peng, FENG Chengjun, et al. Current in-situ stress state and seismic risk in Sichuan-Gansu-Shaanxi border area [J]. *Geology in China*, 2016, 43 (5): 1814 ~ 1827.
- [15] 闻学泽. 四川西部鲜水河—安宁河—则木河断裂带的地震破裂分段特征 [J]. *地震地质*, 2000, 22 (3): 239 ~ 249.
WEN Xueze. Character of rupture segmentation of the Xianshuihe-Anninghe-Zemuhe fault zone, western Sichuan [J]. *Seismology and Geology*, 2000, 22 (3): 239 ~ 249.

INSAR CO-SEISMIC DEFORMATION OF 2017 $M_s 7.0$ JIUZHAIGOU EARTHQUAKE AND DISCUSSIONS ON SEISMOGENIC TECTONICS

YAO Xin^{1,2}, ZHANG Zhenkai^{1,2}, LI Lingjing^{1,2}, LIU Xinghong^{1,2,3}, YAO Jiaming³

(1. Key Laboratory of Neotectonic Movement & Geohazards, Ministry of Land and Mineral Resources, Beijing 100081, China;

2. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;

3. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

4. School of Engineering and Technology, Chinese University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: An $M_s 7.0$ earthquake occurred in Jiuzhaigou county on Aug. 8, 2017. Tectonic location is the NE part of Bayan-Har block, with epicenter in the earthquake-free zone surrounded by Minjiang fault, Tazang fault, Huya fault as well as Xueshanliangzi fault, and where is of free earthquake zone. Which is the seismogenic fault? How to define the relationship between this earthquake and the neighbor faults? Does it have the causal association with huge earthquakes in recent years? The answers to those questions are of great significance to understand the current tectonic activity pattern, predict seismic development trend and deploy earthquake geological disaster prevention and control. Using two periods of Sentinel-1 SAR data to carry out InSAR survey, co-seismic deformation (- 13 ~ 28 cm) and movement direction within 2000 km² in meizoseismal area were measured, showing passive single wall strike-slip and thrust ground deformation. Based on analysis of focal mechanism solution, fault distribution, tectonic background and recent seismic migration, conclusions are made as follows. The seismogenic structure is the end structure of an arc rotation system in northeastern boundary of Bayan-Har block, and the seismogenic fault is the southern branch of Tazang fault, with the trend to connect with Huya fault, therefore, the section between them should be paid more attention to in the future. There are certain spatio-temporal genetic relation between Jiuzhaigou earthquake and Wenchuan earthquake; in condition of ruptures existed in north and south boundary of Bayan-Har block, the 2008 Wenchuan earthquake induced new rupture in east edge to accelerate block eastward extrusion, and 2013 Ludian earthquake released tectonic stress in southern section, further exacerbating stress concentration in northeastern angle, which led to the 2017 Jiuzhaigou earthquake.

Key words: Jiuzhaigou earthquake; InSAR; Bayan-Har block; Tazang fault