

# 基于PS-InSAR技术的断裂带近场变形特征提取

李凌婧<sup>1,2</sup>, 姚鑫<sup>1</sup>, 张永双<sup>1</sup>, 王桂杰<sup>3</sup>, 郭长宝<sup>1</sup>

LI Lingjing<sup>1,2</sup>, YAO Xin<sup>1</sup>, ZHANG Yongshuang<sup>1</sup>, WANG Guijie<sup>3</sup>, GUO Changbao<sup>1</sup>

1. 国土资源部新构造运动与地质灾害重点实验室 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;

2. 中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083;

3. 中国地质环境监测院, 北京 100086

1. Key Laboratory of Neotectonic Movement & Geohazard, Ministry of Land and Resources/Institute of Geomechanics,

2. College of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;

3. China Geological Environmental Monitoring Institute, Beijing 100086, China

**摘要:** 断裂带近场变形特征不仅对新构造研究、地震预测等具有重要意义, 对于直接服务于工程也具有很强的实用性。以鲜水河断裂八美—道孚段为研究区, 选用多期L波段的雷达数据, 采用永久散射体干涉测量技术(PS-InSAR, Persistent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar)进行了2007—2011年的变形测量, 结合其他资料综合分析了断裂带近场复杂的变形规律: ①断裂间震期变形以负值为主, 速率南段大于北段, 两侧LOS东向运动速率差有所区别, 南西侧速率大于北东侧速率, 远离断裂带速度差明显, 靠近断裂带速度差小, 反映了断裂的整体东向运动和左旋相对运动; ②断裂带附近, PS(Persistent Scatterer)点变形以较小的负值和正值为主, 反映了地表的抬升, 所在位置主要为湿地、山脚地下水出露点、河岸沟壑, 推测原因为气候变暖—冰川融化—地下水抬升使地表发生鼓胀变形, 季节性冻胀导致的湿地趋势抬升增长, 断裂带附近的破碎岩土体具有一定的膨胀性; ③断裂带中古—八美段表现出大范围的升高变形为断裂在近场的逆冲抬升作用, 以及宽大韧性剪切带的存在以此来吸收协调鲜水河断裂的整体变形; ④在斜坡带上高变形PS“点团”, 反映了斜坡的重力变形作用, 尤其在道孚—松林口段、乾宁盆地—龙灯坝段非常显著, 体现了活动断裂带的地质灾害效应; ⑤PS-InSAR高精度观测结果表明, 活动断裂的变形是复杂的, 在不同时期、不同分段、不同构造部位变形量和变形范围具有较大差异, 不能简单考虑以断裂带为界的整体平移或升降。

**关键词:** 鲜水河断裂; 活动断裂; 构造变形; 干涉雷达; 蠕滑型滑坡

**中图分类号:** P542+.3; TN959 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2015)01-0217-12

**Li L J, Yao X, Zhang Y S, Wang G J, Guo C B. The extraction of the near-field deformation features along the faulted zone based on PS-InSAR survey. *Geological Bulletin of China*, 2015, 34(1):217-228**

**Abstract:** The near-field deformation is not only important for earthquake forecast and Neotectonics study but also important for the service to engineering geology. Adopting PS-InSAR (Persistent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar) technology and using L band data, the authors conducted the survey of near-field deformation around Bamei-Daofu section of Xianshuihe active fault from 2007 to 2011 and, based on analysis in combination with other materials, inferred some complex fault near-field deformation information: ①the deformation velocity of the north section is larger than that of the north section, and velocities on the two sides of the fault are somewhat different from each other, the velocity of SW wall is large than that of NE wall, the velocity difference of the far-field is more significant, and the velocity of the near-field is feeble; ②in area close to the active faulted zone, the values of PS(Persistent Scatterer) points deformation velocities are mainly comparatively small negative and positive values, reflecting the sur-

收稿日期: 2014-01-23; 修订日期: 2014-02-26

资助项目: 国家科技支撑项目(编号: 2011BAK12B09)、国家自然科学基金项目(批准号: 40902059)和中铁二院科研计划项目(编号: 二院科学字201303)

作者简介: 李凌婧(1988-), 女, 在读硕士生, 从事地质灾害、遥感地质研究。E-mail: lilingjing123\_123@163.com

通讯作者: 姚鑫(1978-), 男, 博士, 副研究员, 从事新构造运动与地质灾害方面研究。E-mail: yaoxinphd@163.com

face ascent and suggesting that the location is composed mainly of wet land, exposed point of ground water, bank and gully. It is inferred that these phenomena are attributed to surface bulging and deformation caused by weather warming—glaciers melting—uplift of ground water level, the tendency uplift of wet land resulting from seasonal frost heaving, and certain expansibility of cataclastic rock and soil near the faulted zone; ③the uplift deformation around Zhonggu—Bamei section results from the thrust movement near Xianshuihe fault, and the ductile shear zone absorbs and coordinates the entire block deformation; ④high deformation PS blocks reflect the slope gravity deformation, especially in sections of Daofu—shonglinkou and Qianning basin—Longdengba, revealing the geohazard effects of the fault; ⑤the precise PS—InSAR results show that the deformation of the fault is complex and shows remarkable differences in different sections, different periods and different tectonic locations, so we can't simply consider the movement to be overall translation or elevation—subsidence with the faulted zone as the boundary.

**Key words:** Xianshuihe fault; active fault; tectonic deformation; InSAR; slow-moving landslide

断裂带变形速率既是反映断裂活动强度的标志,又是求取地震平均复发间隔的重要依据之一。以往对断裂带变形速率的研究侧重于地质学方法(年代学及地貌学相结合)<sup>[1-2]</sup>、地震矩张量反演法<sup>[3-4]</sup>、跨断层形变监测<sup>[5]</sup>、GPS监测等方法<sup>[6-8]</sup>,且在地质学和地震学上具有显著的效果,但对于工程研究则存在一定的局限性:①目前工程的设计寿命一般是50a,通过地质学方法反映的活动性是几百年以上时间尺度的平均结果,而且主要是基于同震变形的平均变形量;②地震矩张量反演法、跨断层形变监测及GPS监测反映的活动性现势性较强,但受现场工作条件、地震发生时间等因素制约,测点数量少,空间分布不均匀,测量重复周期长;③大型断裂的活动性复杂,具有分段性,各段不同部位还具有变形差异性,间震期的断裂变形微小,变形形式与地震时观测到的宏观变形存在差异;④近断裂带附近往往岩土体破碎,受侵蚀作用显著,多发育宽谷地貌,地下水丰富且运移复杂,受气候和季节影响的冻胀或膨胀土的变形明显。已有研究表明<sup>[5,9-13]</sup>,断层上的错断变形、断层近场变形、断层远场变形,以及不同时间段的变形,无论在方式上还是量值上都存在一定的差异,不能简单的用同震地表破裂的变形方式表达。针对这一问题,本文以鲜水河断裂八美一道孚段为研究区(图1),选用多期L波段的雷达数据,采用永久散射体干涉测量技术(PS—InSAR, Persistent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar)进行了2007—2011年的变形测量,获取了断裂带附近间震期的变形信息,结合其他资料综合分析,对断裂带近场变形规律给出进一步的认识。

## 1 研究区断裂活动

通常所说的鲜水河断裂带主要是指北起甘孜

东谷附近,向南经过炉霍县、道孚县、康定一线,至石棉县安顺场一带逐渐减弱消失,全长约350km,总体走向320~330°,呈略向NE方向凸出的弧形<sup>[14-15]</sup>。广义的鲜水河断裂带则包括鲜水河断裂和甘孜—玉树断裂<sup>[2,16]</sup>,二者在甘孜附近呈左阶羽斜列,区域上共同构成中国西南川滇活动地块的北边界和巴颜喀拉地块的西南边界(图1)<sup>[17]</sup>。

根据断裂的几何结构、构造特性、活动性、地震破裂展布等特征,鲜水河断裂以八美(老乾宁)为界,可划分为北西和南东两部分:北西部运动速率大,强震复发频率高,活动速率研究较深入,多种方法测量的手段较一致;但南西部分由于空间展布的复杂性、变形的多样性、变形量相对较低、地震数量较少,断裂活动速率研究程度相对较低,多种方法测量的变形速率存在较大的差异。依据地质学方法推算的鲜水河断裂带北西段滑动速率(10~20mm/a)明显高于南东段活动速率(约5mm/a),利用仪器监测得出鲜水河断裂带整体上全新世平均走滑速率约为10mm/a,垂向变形约2mm/a<sup>[11,18-27]</sup>①。

研究区地形和地表植被覆盖情况直接影响着干涉的效果。断裂带附近总体为NW—SE向的宽谷地貌,谷宽1000~2000m为主,沿断裂带可分为道孚盆地、松林口—龙灯坝狭长谷地段和八美草原段3个地貌分区,地表覆盖以低矮牧草和湿地为主;两侧地貌和植被差距较显著,北东侧为大雪山,海拔3500~5000m,地貌为较陡峭的高山,地表覆盖以冰雪、冰碛物和针叶乔木为主;南西侧为高原高丘地貌、局部为中高山,地表覆盖以低矮牧草和乔木被砍伐后的荒地为主。

## 2 InSAR 监测地表微小变形的原理

差分干涉雷达(D—InSAR, Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar)至少需要对同一区

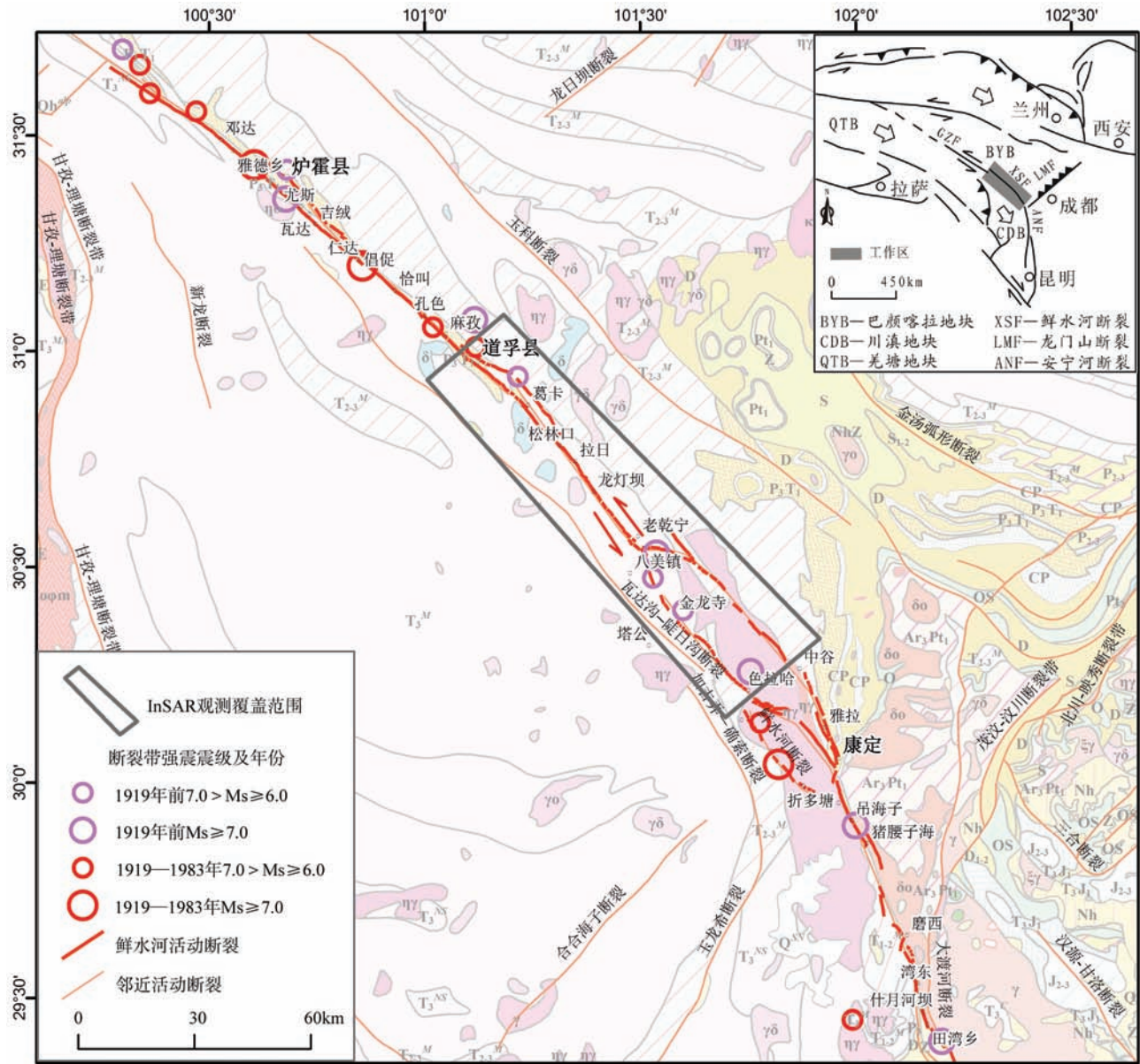


图1 工作区位置及地质条件

Fig. 1 Location and geological environment of the work area

域进行2次重复的雷达数据获取,如图2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(或两景以上)单视复数雷达影像( $\varphi_m, \varphi_s$ )的相位差生成干涉图 $\varphi_{int}$ ,该干涉图既包含了2次成像期间地表相对运动的相位信息( $\varphi_{def}$ ),也含有成像区域的地形信息( $\varphi_{topo}$ )、观测向斜距信息( $\varphi_{flat}$ ),还有地形误差( $\Delta\varphi_{dem}$ )、传感器轨道误差( $\Delta\varphi_{orbit}$ )、大气效应误差( $\Delta\varphi_{atmos}$ )和其他随机误差( $\Delta\varphi_{noise}$ )值,公式

表示为:

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

差分干涉的基本任务就是从干涉图中提取有用的 $\varphi_{def}$ 信息,公式(1)中的地形相位 $\varphi_{topo}$ 可以采用DEM或多轨观测方法去除,观测向斜距 $\varphi_{flat}$ 属于系统观测常量,通过卫星姿态参数校正去除,其它相位误差信息是影响D-InSAR测量精度的重要原因,需要采用一定的方法去除。处理后的地形变干

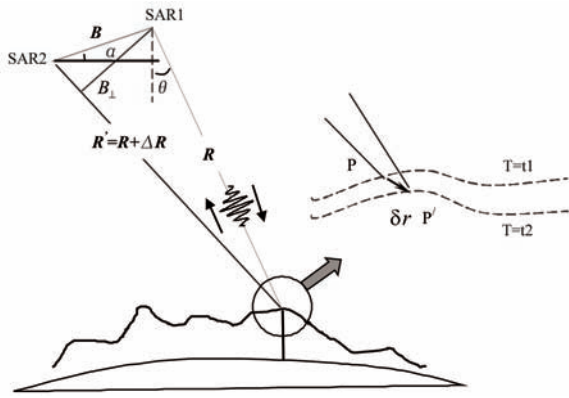


图2 干涉雷达测量原理

Fig. 2 Schematic diagram of InSAR

涉相位信息 ( $\varphi_{\text{def}}$ ) 与沿传感器视线向 (LOS, Line of Sight) 地表变形  $\Delta R$  的关系为:

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

其中  $\lambda$  为雷达波波长,  $\Delta R$  是雷达视线向变形量。利用两轨或三轨的 D-InSAR 测量在同震地表变形、采空区塌陷、冰川流动等大变形地质过程中取得了瞩目的成绩, 但 DEM 误差 ( $\Delta\varphi_{\text{dem}}$ )、大气误差 ( $\Delta\varphi_{\text{atm}}$ )、轨道误差 ( $\Delta\varphi_{\text{orb}}$ ) 和噪音 ( $\Delta\varphi_{\text{noise}}$ ) 极大影响了 D-InSAR 精度, 一般只能达到 dm 级, 地物变化造成的失相干导致甚至干涉无法进行。

为了解决精度问题, 前人提出多种改进技术, 其中永久散射点干涉测量 (PS-InSAR, Persistent Scatterer InSAR) 是最成功的方法, 测量精度最高可达毫米级, 一般条件下可达厘米级。PS-InSAR 技术不追求整幅影像的干涉质量, 而是通过 SAR 图像中后向散射特性稳定的高相干 PS (Persistent Scatterer) 点计算变形量。该算法在处理时首先从 N+1 幅 SAR 时间序列图像中选取一幅作为公共主图像, 其余的作为副图像; 将副图像分别和主图像配准、重采样、干涉形成 N 幅干涉图, 并利用已知的 DEM 和 N 幅干涉图进行差分处理; 然后同时结合幅度和相位信息设定阈值选择 PS 点, 并将这些点单独提取出来进行相位分析。PS-InSAR 处理方法采用多种技术消除误差影响: ① 利用多组干涉像对基线长度与 DEM 高程间的关系去除 DEM 误差; ② 根据多组干涉相位分量在空域和时域的频谱特性 (表 1), 通过方向性滤波、高低通滤波及其组合滤波去除轨道误差、大气误差和热噪音。PS-InSAR 监

表 1 PS 点相位特征  
Table 1 PS point features

符号	相位含义	空域特征	时域特征
$\varphi_{\text{def}}$	形变	低频	低频
$\Delta\varphi_{\text{dem}}$	DEM 残差	高频	与基线相关
$\Delta\varphi_{\text{atm}}$	大气影响	低频	高频
$\Delta\varphi_{\text{orb}}$	轨道误差	低频	高频
$\Delta\varphi_{\text{noise}}$	热噪音	高频	高频

测的高精度变形结果在地表沉降、断裂活动、火山观测、滑坡蠕变等多个领域已有成功的研究性应用, 证明其实用可信<sup>[28-30]</sup>。

### 3 数据处理过程及结果

#### 3.1 采用的数据及处理过程

采用的干涉雷达数据为日本 ALOS 卫星的 PALSAR 数据, L 波段, 波长 23.5cm, 升轨, 轨道号 (Path) 479 和幅号 (Frame) 600, 拍摄时间为 2007 年 1 月 9 日—2011 年 3 月 7 日, 共 18 景数据, 选择以 2010 年 3 月 4 日遥感影像为中心主影像, 其余数据为辅影像构成 17 对干涉像对, 其中绝大多数垂直基线位于 2000m 之内距, 最大基线长度 3084m, 最小基线长度 14m (图 3), 满足《干涉雷达数据处理技术规程》(试行) L 波段数据小于 6000m 的技术要求。使用美国 90m 分辨率的 SRTM DEM 消除地形相位, PS-InSAR 方法数据处理软件采用 Gamma 软件的 IPTA 模块完成。

$\theta$  为雷达波入射角, 即雷达波与垂直方向的夹角,  $\alpha$  为雷达波在水平面上投影方向与地表水平运动方向的夹角。由图 4 可知,  $d_{\text{los}}$  视线向变形量 (缩短量, 即: 地面向卫星方向运动为+, 远离为-),  $d_{\text{up}}$  垂直方向变形量 (上升为+, 下降为-),  $d_{\text{h}}$  水平方向运动变形量 ( $\alpha$  在  $\pm 90^\circ$  范围内时为-, 超过  $\pm 90^\circ$  为+)。

本文采用的 PALSAR 干涉雷达为升轨数据, 垂直入射角  $\theta$  为  $38.7^\circ$ , 雷达视线向  $\text{NE}79.7^\circ$ , 地面总体运动方向为  $\text{NE}118.3^\circ$ , 夹角  $\alpha$  为  $38.6^\circ$ , 带入公式 (1) 和 (2), 可得垂直向和水平向对 LOS 变形的敏感度如公式 (3) 所示。

$$d_{\text{los}} = [d_{\text{up}}, d_{\text{h}}] [0.7804, -0.4886]^T \quad (3)$$

PS-InSAR 所测结果为相对于参考点的变形量, 根据 GPS 和水准测量结果的综合分析, 参考点垂直

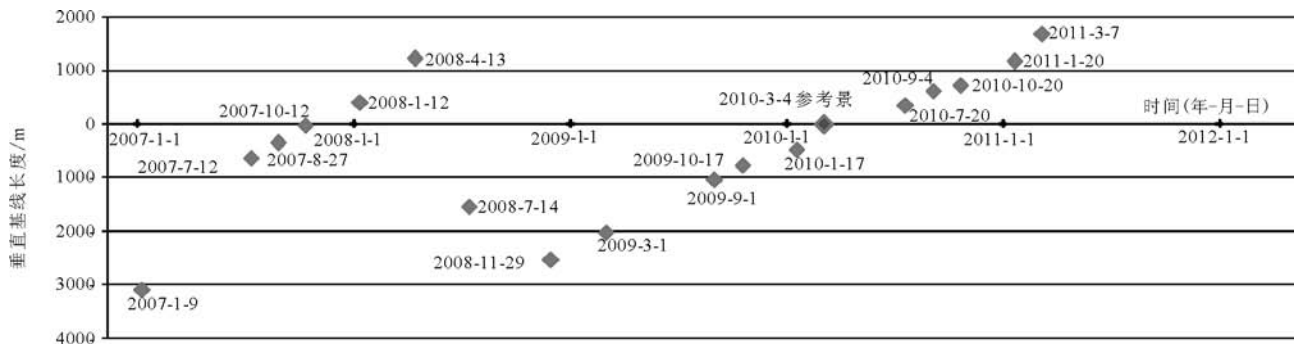


图 3 空间基线与时间基线长度

Fig. 3 Spatial perpendicular baseline and temporal baseline

变形速率取 2.0mm/a, 水平变形速率取 9.2mm/a, 按公式(1)、公式(2), 其投影在 LOS 方向上的变形量分别为 1.56mm/a 和 -4.50mm/a, 按公式(3)合成后的 LOS 方向运动速率为 -2.94mm/a, 据此对全部 PS 点进行 -2.94mm/a 的基准校正。

### 3.2 鲜水河断裂八美一道孚段近场变形特征

PS-InSAR 测量的鲜水河断裂带八美一道孚段 LOS 近场变形量介于 -26~+25mm/a 之间, 显示为近正态分布特征(图 5), 均值 -4.6mm/a, 方差 4.2mm/a。根据研究区新构造运动背景、GPS 和水准测量、公式(1)和(2)、PS 点直方图分布、PS 点误差等综合分析, 可将变形量分为四部分: -13~-4.6mm/a 的 LOS 运动速率主要反映较高的地表东向运动; -4.6~0.0mm/a 反映的是总体与大的构造背景运动速率相当的地表运动; 0.0~3.5mm/a 的 LOS 运动速率反映地表的抬升; 异常值 -26~-13mm/a 和 3.5~25mm/a 反映局部特征变形。

结合 PS-InSAR 测量结果(图 6)和具体的地质条件分析, 可以揭示出鲜水河断裂带附近的某些地质现象。

(1) 整个干涉范围内以 LOS 负变形速率为主导趋势。根据雷达参数和公式(1)~(3)发现, 区域上构造运动以整体的东向运动为主, 这与地质学方法和 GPS 观测结果一致, 反映了青藏高原东缘的东向挤出运动<sup>[16,34]</sup>。

(2) 关于研究区变形量与变形范围, 南段大于北段, 这与地质学方法的认识<sup>[15]</sup>相反, 但与同期的 GPS 和水准测量结果吻合, 反映了鲜水河断裂在同震与间震期变形的差别, 不同时间尺度上变形的差别。

(3) 断裂两侧 LOS 东向运动速率差略有区别, 垂直于断裂带南西侧的速率略大于北东侧, 远离断裂带差距明显, 靠近断裂带差距模糊, 反映了鲜水河断裂的整体左旋构造运动, 以及断裂带远场的走滑运动速度差大于近场走滑运动速度, 这与通过 GPS<sup>[24]</sup>、短基

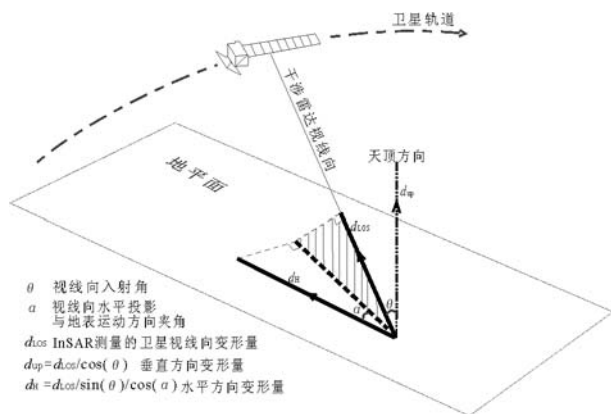


图 4 视线向变形与走滑变形和垂直变形的关系

Fig. 4 Relationship of LOS deformation to horizontal and vertical deformation

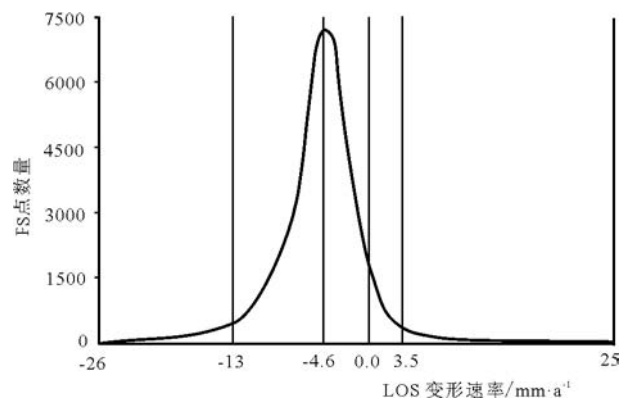


图 5 PS 点变形速率直方图

Fig. 5 Histogram of LOS velocity

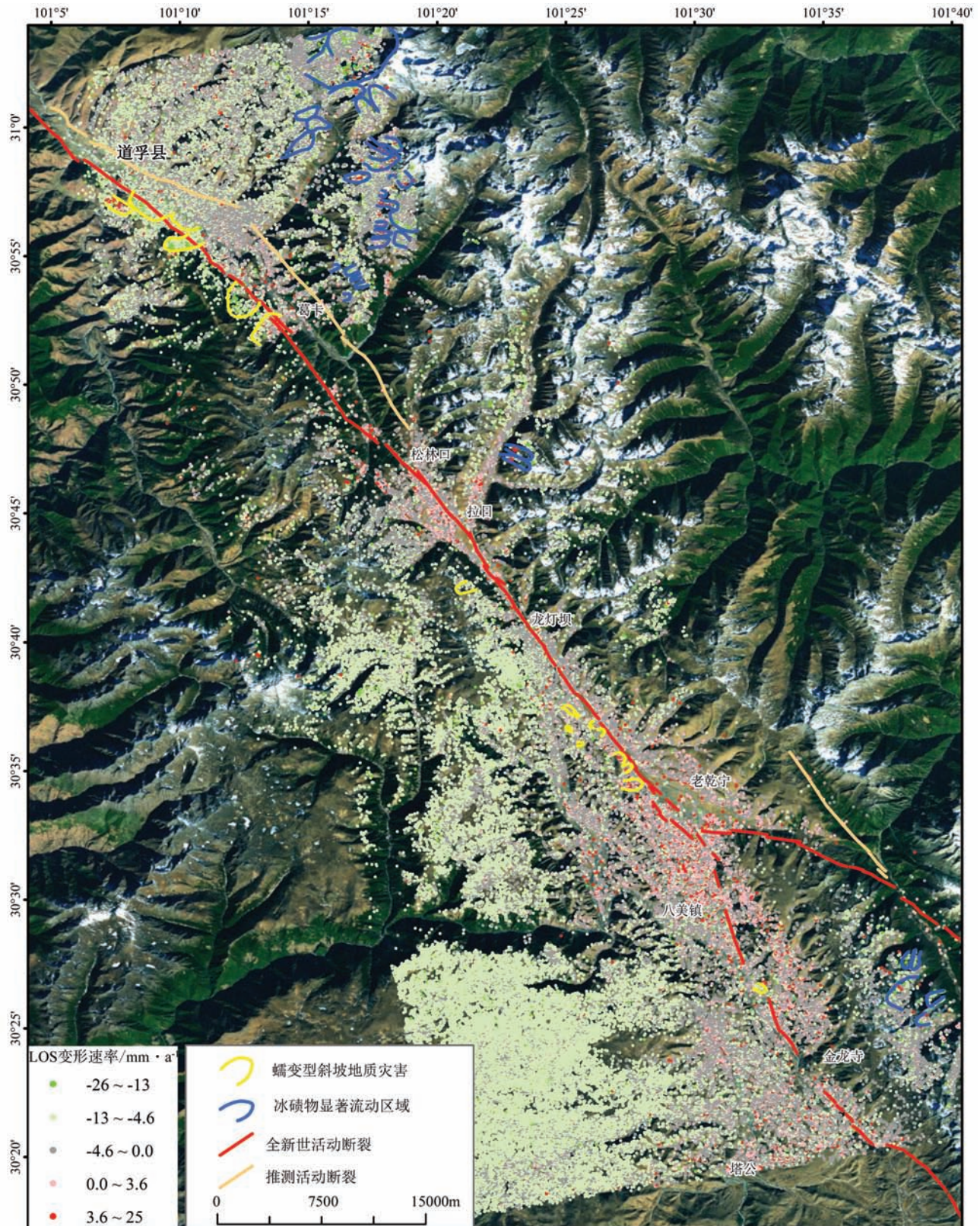


图6 鲜水河断裂八美—道孚段PS-InSAR点分布及变形量

Fig. 6 Distribution and velocities of PS-InSAR points along Bamei-Daofu section of Xianshuihe fault

线方法<sup>[5]</sup>测量的垂直断裂带不同距离的结果吻合。

(4)断裂带附近,尤其是道孚、龙灯坝和乾宁3个断裂带拉分盆地附近,PS点以较小的负值( $0.0 > V > -2.94\text{mm/a}$ )和正值为主导,这种变形量值反映地表有较大垂直上升位移。根据雷达参数和公式(1)、(2),垂直位移速率值超过 $6\text{mm/a}$ 。经遥感解译,较大升高速率的PS点其分布所在位置主要为湿地、山脚地下水出露点、河岸沟壑等(图7-a),据此推测岩土体应力应变特性是导致这种变形的主要原因,体现在3个方面:地下水抬升使地表发生鼓胀变形;季节性冻胀导致的湿地区趋势性抬升增长;断裂带附近的岩体破碎。风化土成份具有一定的膨胀性,Gabriel等<sup>[35]</sup>在利用D-InSAR观测膨胀土变形方面已经有成功先例。

(5)斜坡带上发育多处正负高变形值点“团块”,斜坡PS点的正负与坡向有关,正变形值反映滑坡向卫星方向的运动(主要是西、北西和南西向坡),负变形值反映了背离卫星方向的运动(主要是东、北东和南东向坡),但都是反映了斜坡的重力变形作用,即冰碛物缓慢流动(图7-b)、蠕滑型滑坡变形(图7-c)等。缓变冰碛物的分布与高程密切相关,位于冰川附近;蠕滑型滑坡则主要沿鲜水河断裂带分布,尤其是地形中等陡峭的道孚—松林口(图8)、乾宁盆地—龙灯坝(图9)一带非常集中,且规模巨大,体现了活动断裂带的地质灾害效应。

为了降低因不同类型地貌和地表覆盖物的差别对干涉测量数据处理精度的影响,沿断裂带道孚盆地、松林口—龙灯坝狭长谷地段和八美草原段3块分别独立进行PS-InSAR干涉处理,在各块内地形平缓开阔、位置大致居中的地带分别选取各自的参考点,根据干涉数据的相干性、DEM误差、垂直基线长度、轨道误差、大气误差和解缠误差6个阈值筛选,结果显示PS点在建筑物密集区、草原、冰碛物、沟壑地貌区覆盖较好,在冰雪覆盖区、高大乔木区和农业种植区基本无干涉点,受雷达入射角和入射方向影响,陡峭的北东向坡面由于阴影效应无法照射雷达波而没有形成PS点,最终确定了126321个PS点,并获取了其各时段的变形量、变形误差、多年的平均变形速率等变形信息。

### 3.3 PS-InSAR 测量的变形量

PS-InSAR测量结果显示的变形速率是卫星雷达视线向(LOS, Look of Sight)的变形结果,是一维

变形量,而构造地表变形三维变形量,要通过一个方向的PS-InSAR结果对构造地表变形进行分析,必须要进行一定的空间坐标变换,并引入一些已知的构造运动背景知识,以弥补观测数据空间维上的不足。

根据断裂带附近1999—2007年测量的4个和2009—2011年测量的3个GPS点变形矢量<sup>[31-32]</sup>统计,InSAR测量区地表运动方向总体为NE118.3°,速率介于 $6.9\sim 9.7\text{mm/a}$ 之间。根据沿与鲜水河断裂近平行的省道S303多年水准测量<sup>[33]</sup>,研究区处于上升状态,这与整个青藏高原处于隆升的大背景相吻合。上升速率在 $1.4\sim 4.4\text{mm/a}$ 之间,北低南高,其中北西段测点基本位于断裂带附近,变形速率为 $1.4\sim 2.6\text{mm/a}$ ;南东段测点处于断裂南西侧约9km的塔公草原上,变形速率为 $2.7\sim 4.4\text{mm/a}$ 。GPS与水准测量的结果显示,南东段的变形量略大于北西段,这与通过地质学方法和同震形变测量<sup>[1-2]</sup>的结论略有差别。

InSAR观测到的相位变化是地面各个方向变形在雷达视线向的投影,不同方向的变形贡献大小不同,成为干涉雷达的LOS向模糊问题(图2)。InSAR测量中垂直运动和水平运动方向形变与LOS形变的关系可以近似地用下面2个公式表示:

$$d_{\text{UP}} = d_{\text{LOS}} / \cos(\theta) \quad (4)$$

$$d_{\text{H}} = -d_{\text{LOS}} / \sin(\theta) / \cos(\alpha) \quad (5)$$

$\theta$ 为视线向入射角, $\alpha$ 为视线向水平投影与地表运动方向夹角, $d_{\text{LOS}}$ 为视线向变形量, $d_{\text{UP}}$ 为垂直方向变形量, $d_{\text{H}}$ 为水平方向变形量。

## 4 PS-InSAR 观测构造变形的精度和适用范围

已有的研究表明,PS点的LOS变形量与地面测量相比具有一定的系统偏差。这主要是因为不同测量方式的坐标参考系统不同造成的,但PS所覆盖区域内的相对变形是精确的,在应用过程中要注意相对变形所反映的地质信息,而不是刻意追求PS变形量与地面测量相比较的准确性。

按区域内最大垂直变形速率 $4.0\text{mm/a}$ ,最小水平变形速率 $6.0\text{mm/a}$ ,LOS方向的总合成量为 $0.19\text{mm/a}$ ;按区域内最小垂直变形速率 $1.825\text{mm/a}$ ,最大水平变形速率 $10.7\text{mm/a}$ ,LOS方向的总合成量为 $-3.80\text{mm/a}$ ;据此推算断裂带附近构造运动产

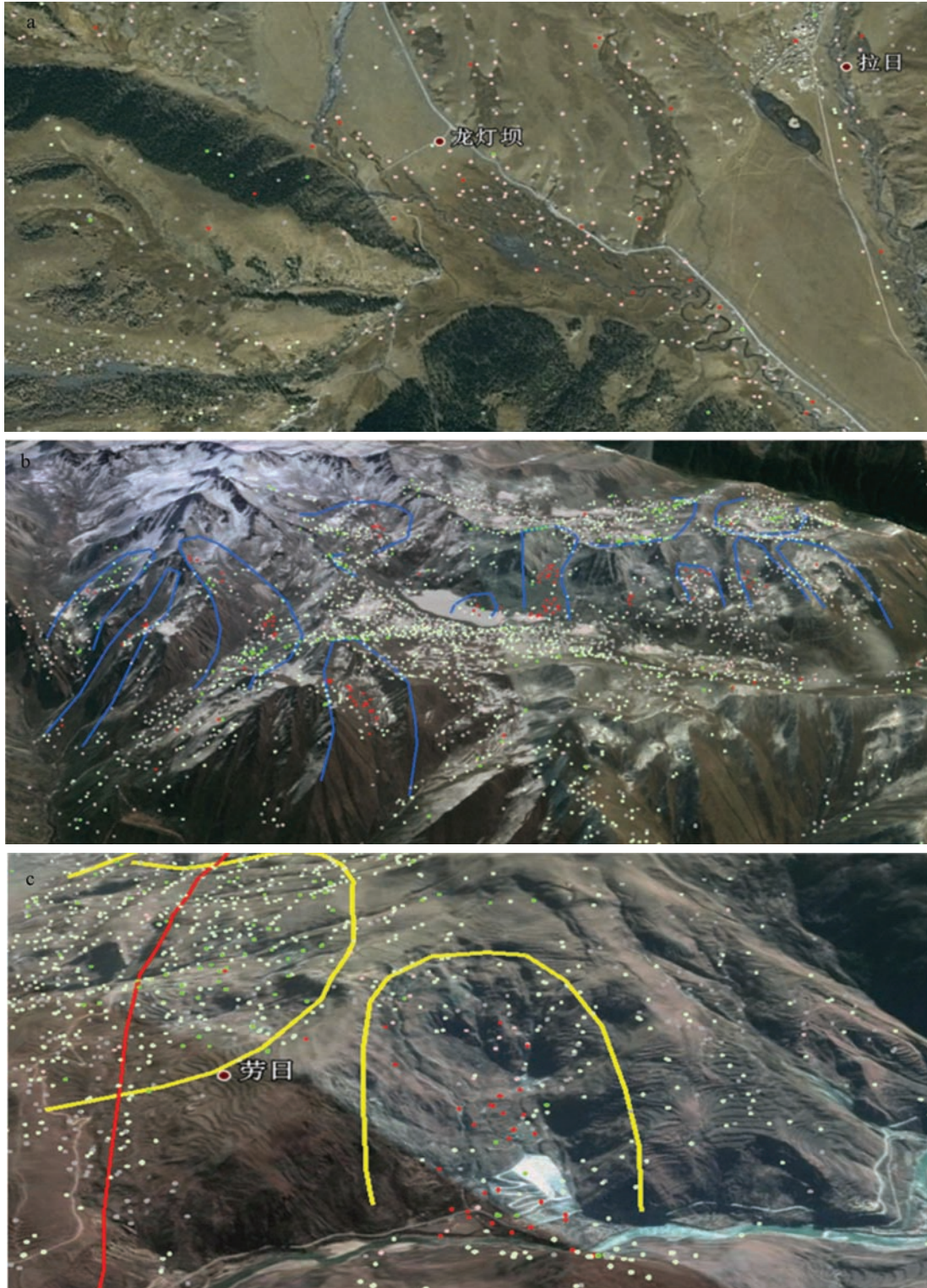


图 7 PS点变形速率所反映的地表运动特征  
 (以 Google Earth 3D 遥感影像为背景, 色标与速率关系见图 4)

Fig. 7 Surface deformation features reflected by PS  
 a—湿地区地 PS 点 (粉色、红色) 反映地表上升变形; b—冰碛物流动 PS-InSAR 变形速率 3D 图 (镜向 60°); c—PS-InSAR 观测到的道孚县劳日滑坡蠕滑变形 (红色点) (镜向 108°)



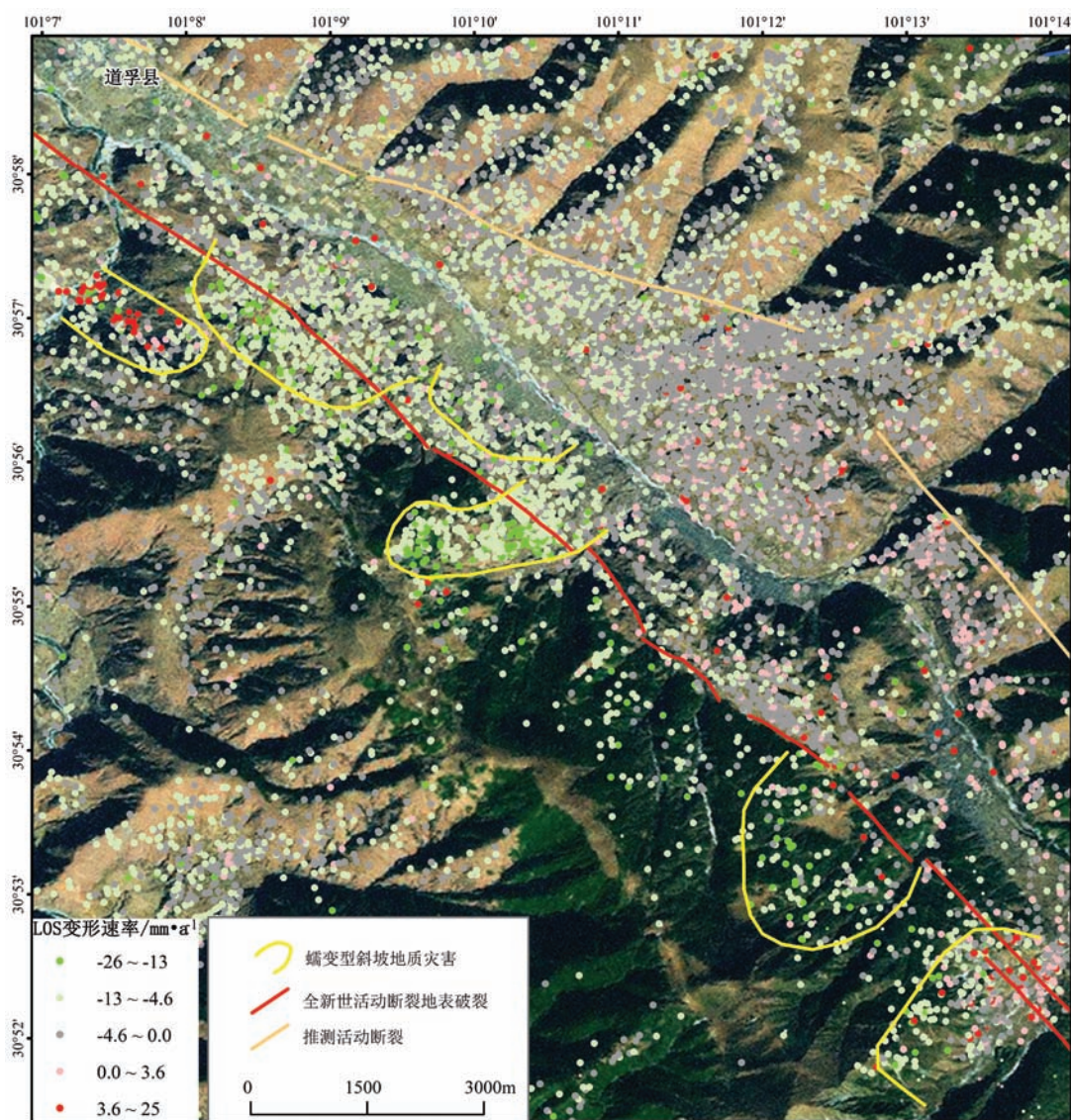


图8 PS-InSAR 探测到的沿断裂道孚段分布的蠕滑型滑坡  
Fig. 8 Slow-moving landslides detected by PS-InSAR distributed along Daofu section of Xianshuihe active fault

生的 LOS 变形速率范围在  $-3.80 \sim +0.19 \text{ mm/a}$  之间。超出这个量值范围的结果反映了部分其他地质运动的特征,也包含一部分 InSAR 测量误差和系统偏差。

PS-InSAR 分析断裂带上的拉分盆地区有速率大于  $6 \text{ mm/a}$  的上升,对于这个速率前人没有相关的报道。一方面变形量微小、其他观测手段难以大范围准确观测,另一方面本次观测值为 2006—2011 年的变形量,前人可能缺乏这个时间段的工作成果,更重要的是 GPS 和水准测量的变形点都是位于稳

定基岩上的构造点,反映区域上稳定的构造变形。而 PS 点在各种地质体表面都有分布,反映出不同地质体的运动量,因此 PS 变形量值范围也更大,包含了丰富的地质信息,可以发现一些新的地质运动现象,尤其是表层地质体的运动现象。

## 5 结 语

本文以鲜水河断裂八美—道孚段为研究区,选用 2007 年 1 月 9 日—2011 年 3 月 7 日间 18 景 L 波段的合成孔径雷达数据,采用 PS-InSAR 技术进行变

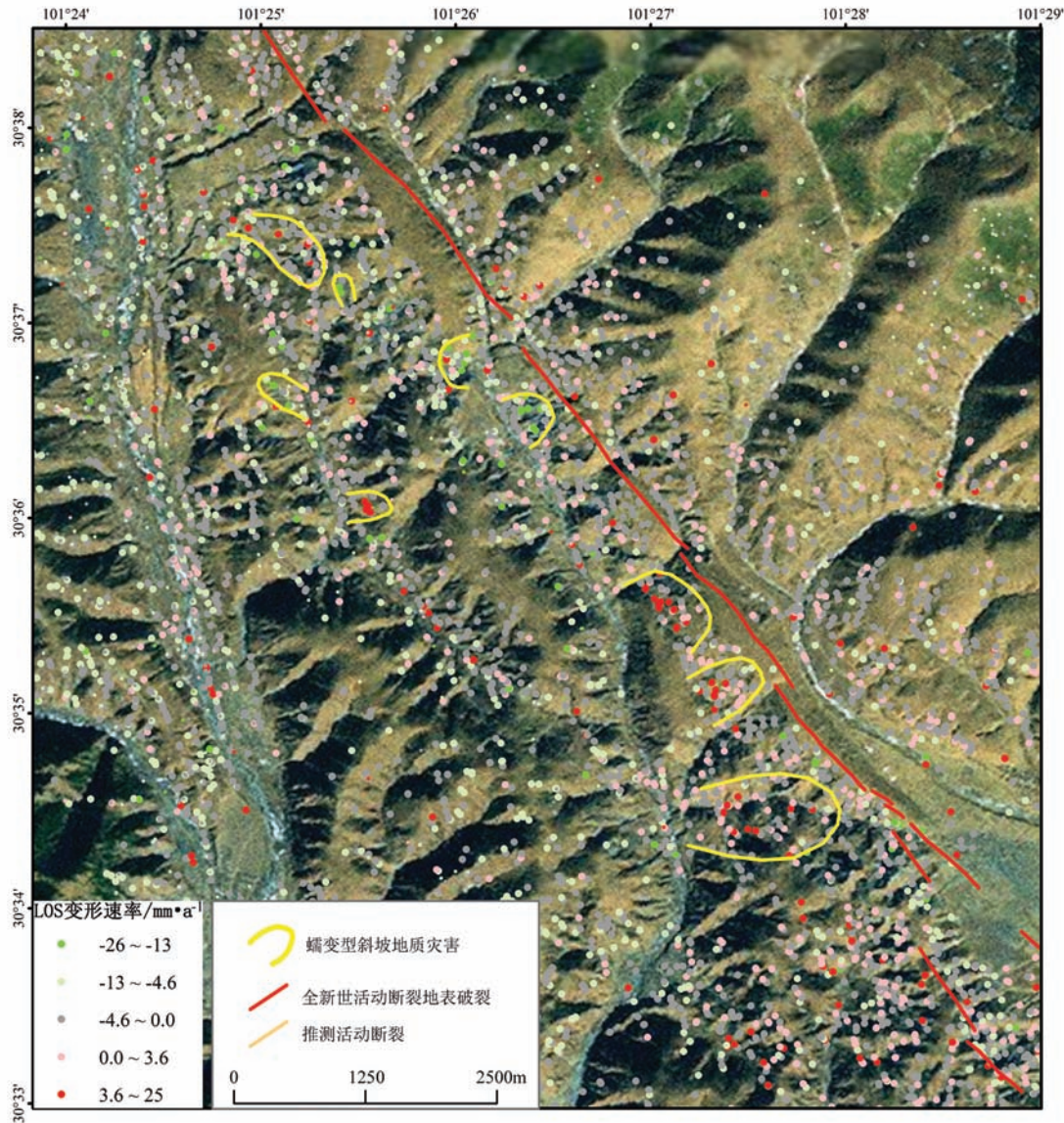


图9 PS-InSAR 探测到的沿断裂惠远寺—龙灯坝段分布的蠕滑型滑坡  
 Fig. 9 Slow-moving landslides detected by PS-InSAR distributed along Huiyuanshi-Longdengba section of Xianshuihe active fault

形速率测量, 获取了断裂带两侧约 30km 范围内的间震期相对变形信息, 结合其他资料综合分析, 揭示出一些活动断裂近场的变形规律。

(1) 鲜水河断裂带八美—道孚段附近永久散射点 (PS, Persistent Scatterer) 的视线向相对变形量 (LOS, Look of sight) 范围为  $-26 \sim +25 \text{ mm/a}$ ;  $-13 \sim -4.6 \text{ mm/a}$  的 LOS 运动速率主要反映的是较高的地表东向运动;  $-4.6 \sim 0.0 \text{ mm/a}$  反映的是总体与大的构造背景运动速率相当的地表运动;  $0.0 \sim 3.5 \text{ mm/a}$  的 LOS 运动

速率反映了部分地区大于  $6 \text{ mm/a}$  的抬升; 少量负异常值  $-26 \sim -13 \text{ mm/a}$  和正异常值  $3.5 \sim 25 \text{ mm/a}$  反映了局部斜坡变形。

(2) 断裂间震期变形速率南段大于北段, 两侧 LOS 东向运动速率差有所区别, 南西侧速率大于北东侧, 远离断裂带速度差明显, 靠近断裂带速度差模糊, 反映了鲜水河断裂整体的左旋构造运动, 以及断裂带远场的走滑运动速度差大于近场走滑运动速度的特征, 这与鲜水河断裂两侧刚性块体的运动性质有关。

(3)断裂带附近,PS点变形以较小的负值和正值为主,反映了地表的抬升,所在位置主要为湿地、山脚地下水出露点、河岸沟壑;推测升高的原因是气候变暖—冰川融化—地下水抬升使地表发生鼓胀变形,季节性冻胀导致的湿地趋势抬升增长,断裂带附近的破碎岩土体具有一定的膨胀性。

(4)鲜水河断裂中古—八美段表现出大范围的升高变形,分析为鲜水河断裂在近场的逆冲抬升作用,以及宽大韧性剪切带的存在,以此来吸收协调鲜水河断裂的整体变形。

(5)在斜坡带上高变形PS“点团”,反映了斜坡的重力变形作用,即蠕滑型滑坡变形、冰碛物缓慢流动等。其中PS点观测到的蠕滑型滑坡主要沿鲜水河断裂带分布,尤其在地形中等陡峭、岩体破碎、现今活动迹象明显的道孚—松林口段、乾宁盆地—龙灯坝段非常显著,体现了活动断裂带的地质灾害效应。

(6)PS-InSAR的高精度观测结果表明,活动断裂的变形复杂,在不同时期、不同分段、不同构造部位变形量和变形范围具有较大差异,不能简单地考虑以断裂带为界的整体平移或升降,这对于地震监测、构造应力场的数字模拟、地应力监测选址等研究具有重要意义。

**致谢:**感谢中国地质科学院地质力学研究所吴中海研究员在论文写作过程中的帮助和鼓励。

## 参考文献

- [1]李天招,等.鲜水河断裂带及强震危险性评估[M].四川:四川科学技术出版社,1997.
- [2]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,(2):115-124.
- [3]孙建中,施顺英,周硕愚.利用地震矩张量反演鲜水河断裂带现今运动学特征[J].地壳形变与测量,1994,14(4):9-14.
- [4]Rhie J D S, Dreger R, Bürgmann R B. Slip of the 2004 Sumatra-Andaman earthquake from joint inversion of long period global seismic waveforms and GPS static offsets[J]. Bull. Seismol. Soc. Amer., 2007, 97: S115-S127.
- [5]杜方,闻学泽,张培震.鲜水河断裂炉霍段的震后滑动与变形[J].中国地球物理,2010,10(2):766.
- [6]Banerjee P, Pollitz F, Bürgmann R. Implications of far-field static displacements for the size and duration of the Great 2004 Sumatra-Andaman earthquake[J]. Science, 2005, 308, doi: 10.1126/science.1113746.
- [7]唐文清,刘宇平,陈智梁.鲜水河断裂及两侧地块的GPS监测[J].西南交通大学学报,2005,40(3):313-317.
- [8]王敏,沈正康,牛之俊,等.现今中国大陆地壳运动与运动块体模型[J].中国科学(D辑),2003,33(增刊):21-32.
- [9]Plafker G. Tectonic deformation associated with the 1964 Alaskan earthquake[J]. Science, 1965, (148): 1675-1687.
- [10]Peltzer G, Crampe F, King G, et al. Evidence of nonlinear elasticity of the crust from the M<sub>w</sub>7.6 Mani (Tibet) earthquake[J]. Science, 1999, 286: 272-276.
- [11]Yao X, Zhang Y S, Dai F C, et al. Geohazard distribution and geological activity of Wenchuan earthquake surveyed by D-InSAR[J]. Geological Active - IAEG Congress 2010, CRC Press, Taylor&Francis Group, 2010: 871-880.
- [12]张永双,马寅生,胡道功,等.玉树地震地表破裂调查与灾后重建避让选址研究[J].地质学报,2010,84(5):593-605.
- [13]姚鑫,张永双,熊探宇.基于干涉雷达的玉树地震断裂运动模式与地震迁移趋势分析[J].吉林大学学报(地球科学版),2012,42(2):440-448.
- [14]钱洪.鲜水河断裂带上潜在震源区的地质学判定[J].四川地震,1988,2:20-28.
- [15]熊探宇,姚鑫,张永双.鲜水河断裂带全新世活动性研究进展综述[J].地质力学学报,2010,16(2):102-113.
- [16]Tapponnier P, Molnar P. Active faulting and tectonics of China [J]. J. Geophys. Res., 1977, (82): 2905-2930.
- [17]Wen X, Jia J K, Pan M, et al. Recent slip rates, earthquake recurrence intervals and strong seismic hazards on the northwestern segment of the Xianshuihe fault zone[J]. Earthquake Research in China, 1988, 2(4): 432-451.
- [18]钱洪,艾伦 C R,罗灼礼,等.全新世以来鲜水河断裂的活动特征[J].中国地震,1988,4(2):9-18.
- [19]闻学泽,艾伦 C R,罗灼礼,等.鲜水河全新世断裂带的分段性、几何特征及其地震构造意义[J].地震学报,1989,11(4):362-371.
- [20]Allen C R, Luo Z L, Qian H, et al. Field study of a highly active fault zone: The Xianshuihe fault of southwestern China[J]. Geol Soc Amer Bull, 1991, 1(103): 1178-1199.
- [21]程方正,杨永林.川滇地块边界构造带形变速率变化与成组强震[J].大地测量与地球动力学,2002,22(4):21-25.
- [22]乔学军,王琪,杜瑞林.川滇地区活动地块现今地壳形变特征[J].地球物理学报,2004,(5):805-811.
- [23]徐锡伟,闻学泽,郑荣章,等.川滇地区活动块体最新构造样式及动力学来源[J].中国科学(D辑),2003,33(s):151-162.
- [24]彭晋川,廖华,顾铁.基于GPS连续站观测资料的鲜水河断裂运动特征研究[J].四川地震,2007,(4):14-17.
- [25]唐荣昌,韩渭宾.四川活动断裂与地震[M].北京:地震出版社,1993.
- [26]四川省地震局.鲜水河活动断裂带[M].成都:四川科学技术出版社,1989.
- [27]周荣军,何玉林,黄祖智.鲜水河断裂带乾宁—康定段的滑动速率与强震复发间隔[J].地震学报,2001,23(3):22-29.
- [28]Massonnet D, Rossi M, Carmona C. The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry[J]. Nature, 1993, (364): 138-142.

[29] Zhou X B, Chang N B, Li S. Applications of SAR Interferometry in Earth and Environmental Science Research[J]. Sensors, 2009, (9): 1876-1912. doi: 10.3390/s90301876.

[30] 姚鑫, 张永双. 基于差分干涉雷达的汶川地震同震形变特点[J]. 地质力学学报, 2009, 15(2): 151-161.

[31] 国家重大科学工程“中国地壳运动观测网络”项目组. GPS 测定的 2008 年汶川 Ms 8.0 级地震的同震位移场[J]. 中国科学(D 辑), 2008, 38(10): 1195-1206.

[32] 中国地震局监测预报司. 汶川 8.0 级地震科学研究报告[M]. 地震出版社, 2009.

[33] 王庆良, 崔笃信, 王文萍, 等. 川西地区现今垂直地壳运动研究[J]. 中国科学(D 辑), 2008, 38(5): 598-610.

[34] Gan W, Zhang P Z, Shen Z K. Present-day crustal motion within the Tibetan Plateau inferred from GPS measurements[J]. J. Geophys. Res., 2007, 112: B08416. doi: 10.1029/2005JB004120.

[35] Gabriel A K, Goldstein R M, Zebker H A. Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry [J]. J. Geophys. Res., 1989, 94(B7): 9183-9191.

① 唐文清, 等. 青藏高原东缘地壳形变 GPS 监测. 中国地质调查局地质调查工作报告. 2013.



### 《地质通报》第 34 卷第 2~3 期要目预告

西藏班公湖—怒江新特提斯洋存在洋内俯冲作用  
——来自康穷蛇纹岩的证据 ..... 许伟等

西藏达如错地区晚侏罗世高镁安山岩:班公湖—怒江洋壳俯冲消减的证据 ..... 李小波等

龙木错—双湖古特提斯洋俯冲记录:羌塘中部日湾茶卡早石炭世岛弧火山岩 ..... 刘函等

松潘—甘孜造山带万里城花岗岩及其岩浆包体的岩石成因与地球动力学意义  
——来自岩相学和地球化学的证据 ..... 鄢圣武等

拉萨地块西段三叠纪古地磁结果及其构造意义 ..... 程鑫等

西藏罗布莎群中火山岩夹层 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其意义 ..... 孔明等

中北拉萨地体尕尔穷晚白垩世早期高镁闪长玢岩地球化学特征指示:加厚下地壳的拆沉? ..... 雷鸣等

西藏申扎地区下二叠统昂杰组地层及碳氧同位素 ..... 安显银等

西藏那曲地区嘎加组闪长玢岩锆石 U-Pb 年龄及地球化学特征 ..... 彭智敏等

全吉群内部发现区域性不整合 ..... 王超等

西准噶尔马拉苏早泥盆世火山岩的锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其大地构造意义 ..... 翁凯等

东准噶尔喀拉萨依高分异 A 型花岗岩岩石成因及地质意义 ..... 吴魏伟等

中国东北完达山早白垩世期间同构造岩浆侵位及其地质意义  
——对晚中生代左行走滑作用的响应 ..... 周丽云等

辽宁东部晚古生代本溪组煤系地层鳞木的发现及其意义 ..... 曲跃等

内蒙古北山地区月牙山蛇绿质构造混杂岩带地质特征、形成时代及大地构造意义 ..... 胡新苗等

内蒙古赤峰地区蒙古营子花岗闪长岩锆石 U-Pb 年龄及成因 ..... 刘珏等

浙西地区新元古代骆家门组锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及地质意义 ..... 张恒等

浙江景宁岩体的岩石地球化学特征与 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年 ..... 金庆花等

浙江雁荡山火山—侵入杂岩的岩浆混合作用:暗色包体中长石环带的证据 ..... 颜丽丽等

桂西巴马极高 Ti/Y 基性岩地球化学特征:来自峨眉山幔柱高 Ti 母岩浆? ..... 黄文龙等

大别造山带姚冲花岗岩岩石地球化学特征及其地质意义 ..... 刘清泉等

江西大湖塘超大型钨矿的初始岩浆流体出溶  
——来自似伟晶岩壳的记录 ..... 张智宇等

扬子西南缘拉拉 IOCG 矿床铅同位素特征及意义 ..... 黄从俊等

陕南风凰岭南缘变质镁铁质—超镁铁质侵入岩矿物学特征:对 Fe-Ti 成矿作用的指示 ..... 黄杰等

延边天宝山矿集区东风北山钨矿床流体包裹体特征与矿床成因 ..... 杨群等

江西相山矿田多金属成矿流体特征及成矿作用 ..... 聂江涛等

江西省朱溪铜钨多金属矿床矽卡岩矿物学特征及地质意义 ..... 赵苗等

皖南宁国大坞尖钨钼矿床成岩成矿年龄研究  
——以花岗闪长斑岩中锆石 U-Pb 和矿石中辉钼矿 Re-Os 年龄为依据 ..... 李斌等

风化矿物黄钾铁矾 <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 测年的基本方法  
——从样品采集到年龄测试 ..... 杨静等