

# 青藏高原鲜水河活动断裂带蠕变斜坡 地质灾害 InSAR 识别研究

姚鑫,张永双,李凌婧,凌盛,王宗盛,周振凯

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,北京,100086

**内容提要:**断裂带附近往往是蠕变斜坡地质灾害的多发区,微小变形是指示蠕变斜坡地质灾害的一项重要标志。本文以青藏高原鲜水河活动断裂带为研究区,选用多期 ALOS/PALSAR 合成孔径雷达数据进行时序干涉(InSAR)观测,获得了毫米级的地表变形量,结合现场调查、遥感解译和地质条件综合分析,揭示了该区域蠕变斜坡地质灾害的类别、变形特征和空间发育规律:①断裂沿线主要发育了蠕变滑坡、蠕变泥石流物源和冰碛物流动 3 种类型蠕变斜坡地质灾害;②蠕变滑坡具有“错乱的等高线状台阶”,凸凹不平的主滑方向地形剖面,舌状地貌,无基岩裸露滑床等特征;③鲜水河断裂北段古滑坡、历史地震滑坡和震裂斜坡发育,与断裂带直接相交的,大部分存在蠕变变形,未相交的往往无蠕变变形,体现了活动断裂对地质灾害发育的控制作用;④发育“土石林型”和“坡面松散堆积物型”两种泥石流,识别特征是物源区有分散的缓慢变形体,流域范围内变形体的数量和速率是重要标志;⑤鲜水河断裂带附近 4200 m 高程以上区域广泛存在现代冰碛物沿冰川槽谷滑动变形,其分布范围广、单体规模大、运动速率高,是现今研究区最主要的地表侵蚀形式之一。研究结果也表明,InSAR 技术结合地质条件能有效地识别蠕变斜坡地质灾害,适于山区地质灾害众多、调查不便的工作环境,是地质灾害调查技术未来重要发展方向。

**关键词:**鲜水河活动断裂;地质灾害识别;干涉雷达;蠕滑;斜坡变形;青藏高原

蠕变斜坡地质灾害是指斜坡体缓慢顺坡向下运动形成的灾害,包括蠕变滑坡(creep landslide)(Cruden et al., 1996)、泥石流的蠕变物源、危岩体等。变形速率一般在每年毫米至米级,变形时间能持续长达几十年甚至几个世纪(Kelsey, 1978; Bovis et al., 1992; Mackey et al., 2011),蠕变除对建筑物产生错断破坏外,在地震、降水等诱因下也易于转化成灾害性快速运动的斜坡地质灾害(Yao Xin et al., 2014)。由于活动断裂带附近构造变形强烈、地震多发、岩土体破碎,导致蠕变斜坡地质灾害多发(Wu Zhenhan et al., 2008; Yin Zhiqiang et al., 2014, 2016; Zhao Wuji et al., 2016),是地质灾害防控的重点区(Scheingross et al., 2013)。因此,如果能通过观测变形来识别活动断裂带附近蠕变斜坡地质灾害,分析其相关规律,这对减灾防灾具有重要意义。

差分干涉雷达(D-InSAR, Differential Interferometry Synthetic Aperture Radar, 简称

InSAR)技术具有大范围、高精度获取地表变形的优势。InSAR 技术不仅成功应用在地震、火山、活动断裂等大变形的地质研究领域(Massonnet et al., 1993; Shan Xinjian et al., 2001; Yao Xin et al., 2012),而且在地表沉降、采矿塌陷、地裂缝调查等平坦地区大范围的缓变地质灾害体调查方面已经取得了显著的成绩(Strozzi et al., 1999; Buckley, 2000; Ge Daqing et al., 2007; Zhao Chaoying et al., 2009),在斜坡地质灾害 InSAR 调查方面,也有学者进行了大量的可行性分析及实验探索(Fruneau et al., 1996; Yin Yueping et al., 2010; Zhao Chaoying et al., 2012; Scheingross et al., 2013),但由于斜坡地质灾害面积相对较小、坡度陡、表面植被发育、变形量值低,而且类型多样、地区差异显著,导致 InSAR 方法研究斜坡地质灾害通用性相对较差,需要结合特定地质条件有针对性地分析才能取得较好的效果。

为了评价 InSAR 技术在蠕变斜坡地质灾害识

注:本文为中国地质调查局工作项目(编号:DD20179282、DD20160272);院所基金项目(编号:DZLXJK201611);自然科学基金项目(编号:41672359)资助的成果。

收稿日期:2016-01-11;改回日期:2016-05-14。责任编辑:黄敏。

作者简介:姚鑫,1978年生,男,博士,教授级高工。主要从事新构造运动与地质灾害方面的研究工作。Email:yaoxinphd@163.com。

别的效果和揭示断裂活动对地质灾害的影响,本文以青藏高原鲜水河活动断裂沿线为研究区,选用 2007~2011 年 18 次观测的 SAR 数据,采用 InSAR 技术进行了地表微小变形观测,结合现场核实、遥感解译和地质分析,有效提取了蠕变斜坡地质灾害,进而总结了区域地质灾害特征、空间发育规律,以及 InSAR 在该领域应用的经验。本研究成果证明了 InSAR 技术在我国西部开展快速斜坡地质灾害调查的有效性。

### 1 鲜水河断裂活动性与孕灾条件

鲜水河断裂是中国西南山区一条现今活动强烈的大型左旋走滑断裂带,具有规模大、活动性强、地震频度高等特点。其北起甘孜东谷附近,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 350 km,总体走向  $320^{\circ}\sim 330^{\circ}$ ,呈略向东北凸出的弧形(Qian Hong et al., 1988)(图 1),是中国西南川滇活动地块和巴颜喀拉地块的分界(Wen Xuezhe et al., 1988)。自 1725 年有地震记载以来,沿鲜水河断裂带迄今共发生  $M_s \geq 7.0$  级的地震 8 次,  $M_s 6.0\sim 6.9$  的地震 14 次,约占整个川西地区地震总数的一半(Li Tiantiao, 1997)。

鲜水河断裂全新世平均走滑速率约为 10 mm/a 左右,垂向变形约 2 mm/a,但以八美(老乾宁)为界,北西和南东两部分运动速率差别较大:北西部断层空间呈单一直线延展,左旋走滑运动明确,多种方法测量的结果较一致,10~20 mm/a;南西部断层空间展布具有多分支,变形多样,量值相对较低,多种方法测量的变形速率存在较大的差异,平均约 5 mm/a(Li Tiantiao, 1997; Qian Hong et al., 1988; Allen et al., 1991; Xu Xiwei et al., 2003; Zhou Rongjun et al., 2001)。

地层岩性方面,鲜水河断裂的北西段(炉霍—道孚—八美—塔公)基岩以三叠系中上统砂板岩为主,鲜水河断裂的强烈活动在断裂附近形成宽大的挤压破碎带及强风化岩体,部分区段在侵蚀和淋滤作用下形成颇具特色的黑灰色“构造石林”,该段沿断裂还发育多个中酸性侵入岩体;南西段(塔公—康定—磨西)则以中生代以来多期侵入的大面积花岗岩出露为主;鲜水河断裂沿线存在多个断层阶区拉分盆地,发育冲洪积黏土和碎石土,断裂两侧 4000 m 高程以上的山地覆盖大面积现代冰碛物(图 1)。断裂带附近为 1000~2000 m 的宽谷地貌,地表覆盖以

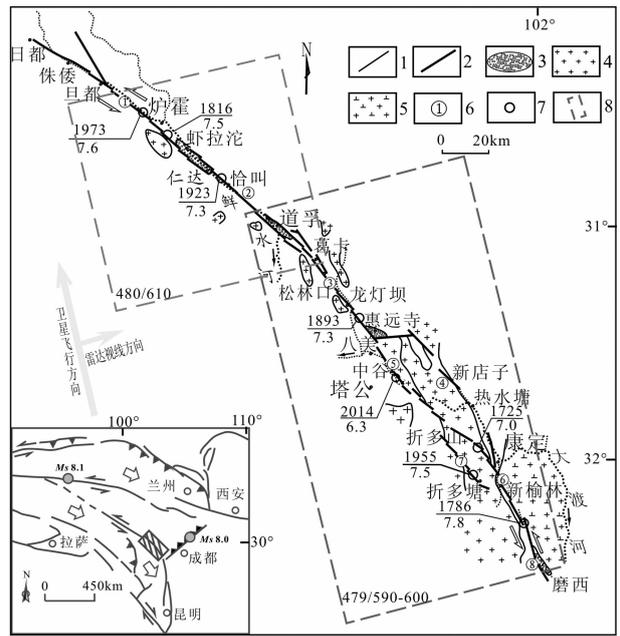


图 1 青藏高原鲜水河断裂带位置图、地质条件及 SAR 数据覆盖的图幅范围(地质条件据 Li Tiantiao, 1997 修编)  
Fig.1 Location, Xianshuihe fault geological environment map and area covered by SAR data (revised after Li Tiantiao, 1997)

1—活动断裂; 2—前第四纪活动断裂; 3—第四纪盆地; 4—晚中生代花岗岩; 5—晚元古代斜长花岗岩; 6—断裂编号: ①炉霍断裂; ②道孚断裂; ③乾宁断裂; ④雅拉河断裂; ⑤中谷断裂; ⑥色拉哈—康定断裂; ⑦折多塘断裂; ⑧磨西断裂; 7—7.0 级及以上地震震中和时间; 8—InSAR 观测范围

1—Active fault; 2—Pre-Quaternary active fault; 3—Quaternary basin; 4—Late Mesozoic granite; 5—Late Proterozoic plagiogranite; 6—active fault number: ①Luhuo Fault, ②Daofu fault, ③Qianning fault, ④Yalaha fault, ⑤Zhonggu fault, ⑥Yala-Kangding fault, ⑦Zheduotang fault, ⑧Moxi fault; 7—Epicenter and date of earthquake  $\geq M_s 7.0$ ; 8—region of InSAR observation

低矮牧草和湿地为主;断裂两侧地貌和植被差距较显著,NE 侧为较陡峭的大雪山,海拔 3500~5000 m,地表覆盖以冰雪、冰碛物和针叶乔木为主,SW 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,超过 4000 m 海拔以现代冰碛物覆盖为主。

由于地形陡峭,断层沿线多软弱松散覆盖层,在频繁强烈的地震、夏季短时强降雨、间震期断层持续高速运动,及其构造碎裂等作用下,鲜水河断裂沿线斜坡地质灾害非常发育,如 1973 年炉霍  $M_s 7.6$  地震诱发的滑坡沿断裂线性分布的特征十分突出,大多数集中分布于松林口—邓达之间长 75km,两侧各 2km 的范围内,断裂两侧滑坡的数量和规模不明

显区别,分布范围与地表破裂带高度重合(图2)。类似这样的滑坡现今稳定性如何;如果不稳定,主要受哪些外部因素影响;除了现有认识的灾害类型和数量之外,区域内是否还存在其他斜坡灾害体。已完成的工作(Guo Changbo et al., 2015)和传统的调查手段都还不能很好地回答这些问题。

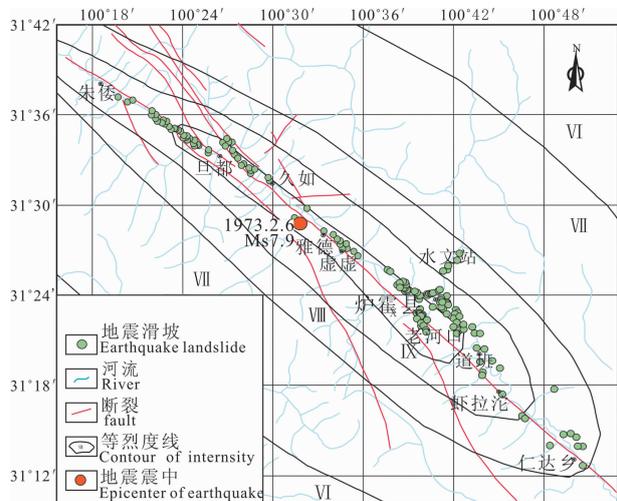


图2 1973年炉霍 Ms7.6 地震诱发的沿断裂地质灾害分布图  
Fig.2 Distribution of geohazards induced by Ms7.6 earthquake

## 2 InSAR 数据处理过程

InSAR 是利用卫星(或飞机)上微波合成孔径雷达(SAR, Synthetic Aperture Radar)对同一地区进行两次观测,根据反射雷达波间的相位差计算地表变形量(图3)。由于数字地面模型误差、大气延时误差、卫星轨道误差和信号热噪音误差,两次观测结果进行差分的精度一般只能达到分米级,地物变化造成的雷达相位失相干甚至导致干涉无法进行。为了提高环境适应性和观测精度,前人提出利用多

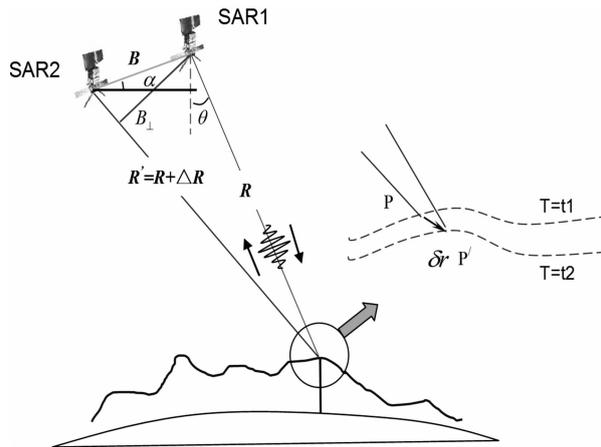


图3 干涉雷达测量原理示意图

Fig.3 Schematic map of InSAR principle

期重复拍摄的 SAR 数据进行计算的时序 InSAR 思想,其中永久散射点(PS, Persistent Scatter)干涉测量(PS-InSAR)(Ferretti et al., 2000, 2001)和小基线集(Small Baseline Subset)干涉测量(SBAS-InSAR)(Berardino et al., 2002)是其中最成功的两种方法,精度可达毫米、甚至亚毫米级(Ferretti et al., 2007)。相干永久目标分析干涉测量 IPTA-InSAR(Interferometric Persistent Target Analysis InSAR)(Werner et al., 2003; Wegmüller et al., 2004)吸收了二者的优点,拓展了 PS-InSAR 的适用性。本文将采用 IPTA-InSAR 方法进行数据处理。

选用的干涉雷达数据为日本 ALOS 卫星的 PALSAR 数据,3 个幅面,分布在 2 个轨道,分别是: 479 轨道上的 590 和 600 的连续 2 幅数据,拍摄时间为 2007 年 1 月 9 日~2011 年 3 月 7 日,共 18 期数据;480 轨道上的 610 幅,拍摄时间为 2006 年 12 月 11 日~2011 年 2 月 6 日,共 17 期数据(图 1,4)。数据为 L 波段,波长 23.5 cm,升轨右视,雷达水平

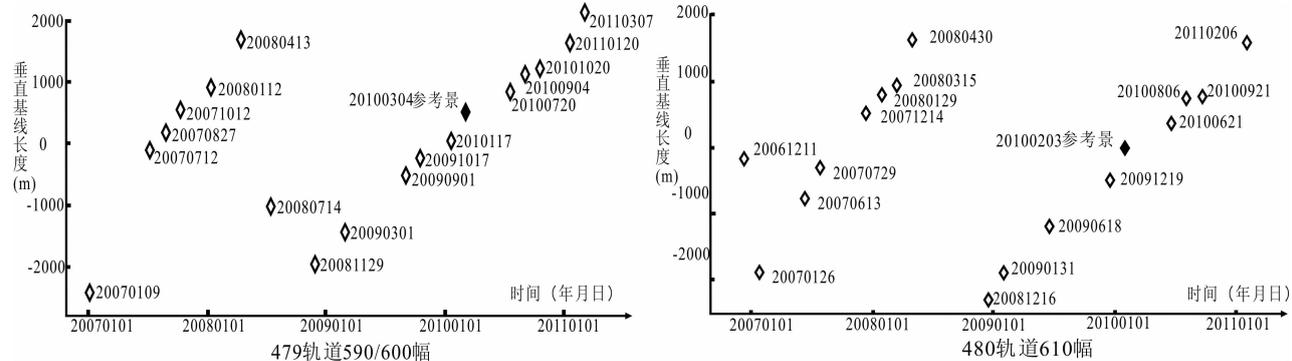


图4 PALSAR 数据空间基线与时序基线长度

Fig.4 PALSAR spatial perpendicular baseline and temporal baseline

视线向 NE79.7°,垂直入射角 38.7°。

IPTA-InSAR 测量为空间和时间上的相对变形测量。空间上以图幅内的参考点为基准点的变形速率,数据 480~610 和 479~600 两个图幅的具有一定重叠,参考点选在道孚县城稳定的阶地区,数据 479~590 图幅选在康定以北约 20 km 的稳定花岗岩体上,两个参考点都位于鲜水河主断裂带附近。479 轨道和 480 轨道上数据组分别以 2010 年 3 月 4 日和 2010 年 2 月 3 日数据为配准和干涉处理的中心主影像。绝大多数像对的垂直基线长度都位于 2000 m 之内,最大基线长度 2384 m,最小基线长度 14 m(图 4)。使用美国 90 m 分辨率的 SRTM DEM 消除干涉地形相位。

### 3 InSAR 观测的变形值

#### 3.1 变形速率

研究区共提取了 826100 个 PS 点,平均密度 82.6 点/km<sup>2</sup>,相对于参考点的视线向(Look of Sight, LOS)变形量主要位于 -29~29 mm/a 区间范围内(图 5a, 5b),均值 0.16 mm/a,方差 3.39 mm/a。PS 点主要分布在建筑物、草甸、冰碛物、沟壑等地物区,在冰雪覆盖区、高大乔木区和农业种植区基本无干涉点,受 PALSAR 雷达波入射角和入射方向影响,陡峭的 NE 向坡面由于阴影效应无法照射雷达波而没有形成 PS 点,SW 向坡面 PS 点分布最密集,其他坡向坡面次之。

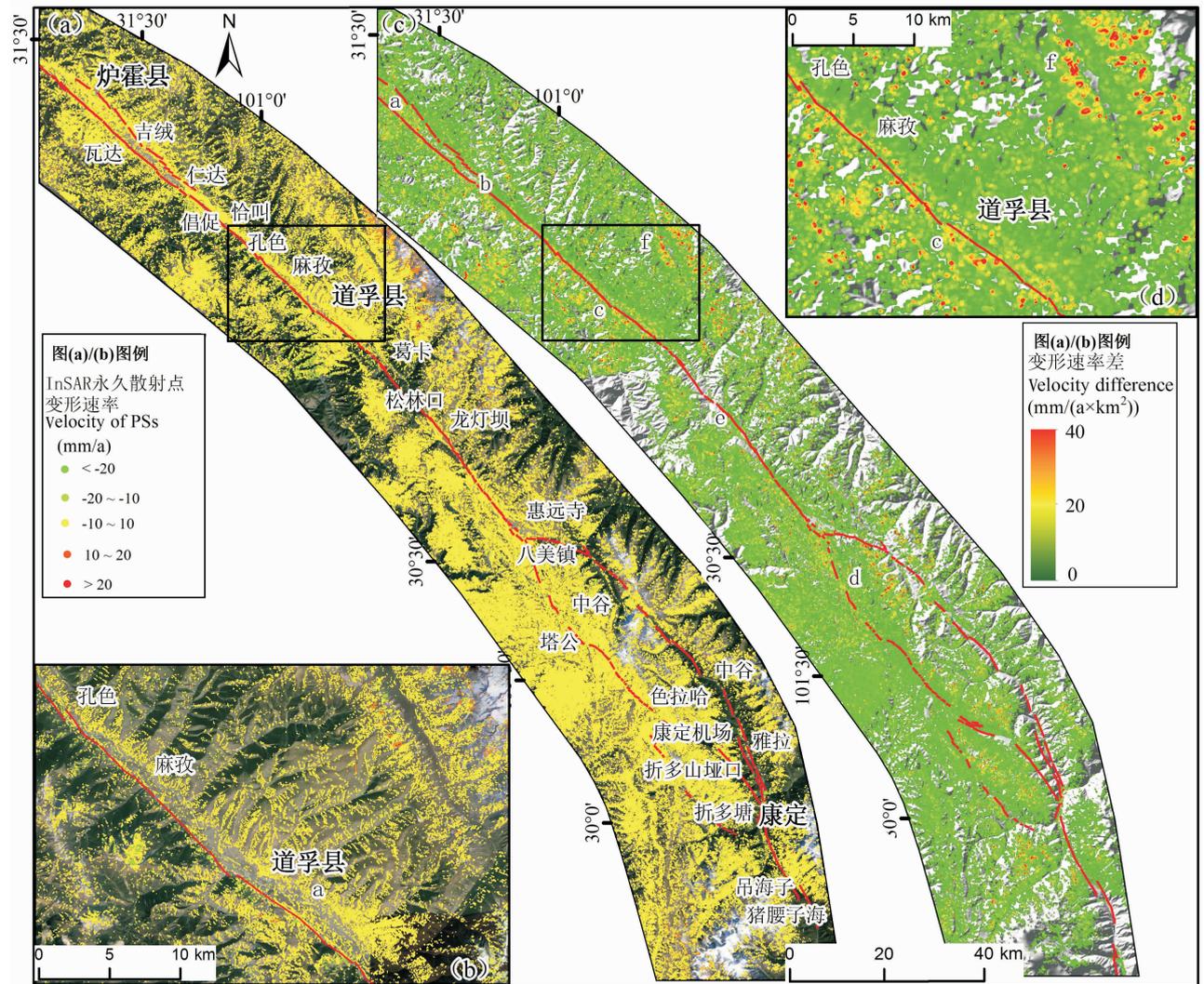


图 5 InSAR 观测的青藏高原地区鲜水河断裂带雷达视线向地表变形速率与变形速率差

Fig. 5 LOS velocity observed by InSAR and its difference map around the Xianshuihe fault

(a) 全区 PS 点变形速率;(b) 道孚段 PS 点变形速率;(c) 全区 PS 点变形速率差值;(d) 道孚段 PS 点点变形速率差值

(a) —Deformation velocity of PSs; (b) —deformation velocity of PSs along Daofo section; (c) —differential velocity of PSs;

(d) —differential velocity of PSs along Daofo section

根据研究区新构造运动背景、区域地质灾害特征和 PS 点误差等综合分析,可以将变形量分为 5 个区间,由于斜坡地质灾害地形坡向和雷达波入射角的原因,变形结果存在正负,但都反映斜坡变形,正变形值反映斜坡向卫星靠近的运动(主要是 W、NW 和 SW 向坡),负变形值反映了背离卫星方向的运动(主要是 E、NE 和 SE 向坡)。将同一变形速率绝对值放在一起可以划分 3 个区间:①  $-10 \sim 10$  mm/a 是相对参考点的无变形地区和非常缓慢的大区域整体变形;②  $-20 \sim -10$  mm/a 和  $10 \sim 20$  mm/a 的是本研究获取的主要变形区间值,反映局部变形,也就是蠕变斜坡地质灾害的长期微小变形;③  $< -20$  mm/a 和  $> 20$  mm/a 的变形速率是数量较少的点,反映了 InSAR 观测的变形速率较大的边缘值和极少的解缠错误。

### 3.2 变形速率差和局部变形速率

由于单个斜坡地质灾害变形区(一般小于  $1 \text{ km}^2$ )只占研究区的极小比例,反映斜坡变形的高速 PS 点被“淹没”在低速的 PS 点中,不利于目视解译;另一方面仅采用变形的绝对量值进行分析,不易分离大范围的区域构造运动变形与小范围的斜坡地质灾害变形。通过作一定范围内最大与最小速度差值,可以突出小范围变形与背景变形的差异。采用 ArcGIS 空间分析功能,对在  $0.1 \text{ km}^2$  范围内的 PS 点数量进行最高与最低速率差统计,然后进行 3 栅格 $\times$ 3 栅格的低通滤波,形成速度差值图(图 5c, 5d),这体现出了局部地质体活动与稳定地质背景间的差异,提升了蠕变斜坡灾害体的可识别度。

对于约 1 万多  $\text{km}^2$  的研究区,仅仅采用一个公共“0”值参考点及全局色标,局部变形所能利用的色域有限。针对特定斜坡地质灾害在附近选取参考点,灾害体变形可以获得较宽的变形色域,目视解译效果更直接,有利于突出斜坡地质灾害(图 6)。

## 4 蠕变斜坡地质灾害提取与验证

由 InSAR 变形速率值和差值图(图 5)、InSAR 局部变形速率图(图 6)结合现场调查(图 7)识别出研究区主要有蠕滑滑坡、泥石流和冰碛物流动三种类型蠕变斜坡地质灾害,并揭示了一些鲜水河断裂带斜坡地质灾害的特征和发育规律。

### 4.1 蠕变滑坡

蠕变滑坡具有明显的活动断裂地质灾害效应。与鲜水河活动断裂相交的古滑坡和同震滑坡,大部

分存在蠕滑变形(图 5b, 5d),图 6a~c,滑坡周缘裂缝模糊,坡体表明凹凸不平,滑体形态较明显(图 7a~7c),说明存在长期活动,如地形中陡的道孚—孔色段、炉霍段、乾宁盆地—龙灯坝段(图 5)、鲜水河水电站段(图 5a 仁达附近)等,缓慢变形都非常集中,且规模巨大。而未与断裂带相交的溃滑滑坡或“裂而未滑”的同震滑坡,如道孚盆地东北侧的斜坡(图 6c 中 c 点所在位置),斜坡震裂特征(地貌形态、后缘和侧缘拉裂缝)十分明显(图 7d),周缘同震损伤特征保持得较好,说明形成以来未再遭受外部扰动,没有蠕滑变形。这颠覆了以往对该区域已有滑坡现今危险性的认识,即震裂特征明显的坡体并不都是具有较高的危险性,这可以使我们更好地聚焦减灾防灾的对象。

图 6a 是鲜水河断裂炉霍段的 PS 变形点(图 5c 中 a 点所在位置),断裂槽谷地貌,1973 年炉霍 Ms7.6 地震曾在该段形成长达 70 km 的地表破裂,最大水平位错约 4 m,诱发断裂两侧上百处大型同震滑坡(图 2),震裂破裂特征至今十分清晰。高变形速率变形点主要分布在两个区域:一是鲜水河活动断层穿越的 SW 向斜坡,长约 4 km, LOS 向变形速率在  $10 \sim 20$  mm/a 的范围内,该斜坡区域表面具有明显的台阶状地貌(图 7a),是典型蠕滑变形现象(Highland et al., 2008);二是断裂西南侧流域高陡区域的高值杂乱(包括正负)变形 PS 点,是泥石流物源变形的结果,其总体以负值为主,显示了其顺主沟方向的趋势性运动,在冰雪快速融化、强降雨和地震扰动下,该流域存在发生泥石流灾害的危险。

图 6b 是鲜水河水电站库区(图 5c 中 b 点所在位置)滑坡的 InSAR 变形观测结果,显示一明显变形区域范围呈现半圆形,滑坡长和宽各约 500 m,推测平均厚度大于 15 m,方量约 300 万  $\text{m}^3$ 。整体 LOS 速率在 10 mm/a 以上,前缘部分变形超过 20 mm/a。其上游 2 km 处也存在一处类似规模和变形速率的蠕滑滑坡。根据水库建设期和 SAR 数据的观测时间分析,这 2 处滑坡在水库蓄水前就已经活动。现场调查已经发现斜坡表层不规则陡坎、拉裂缝密集发育,多条冲沟切割表面,圈椅状地貌特征显现,滑坡剖面凹形,是一处典型的深层基座型蠕变滑坡(图 7b)。

图 6c 是鲜水河断裂葛卡一道孚段(图 5c, 5d 中 c 点所在位置)附近的斜坡变形观测结果,沿断裂带多种形态和变形速率的大滑坡密集分布,图 6c 中 a 点处的大型蠕变滑坡已经严重威胁到坡脚的建筑

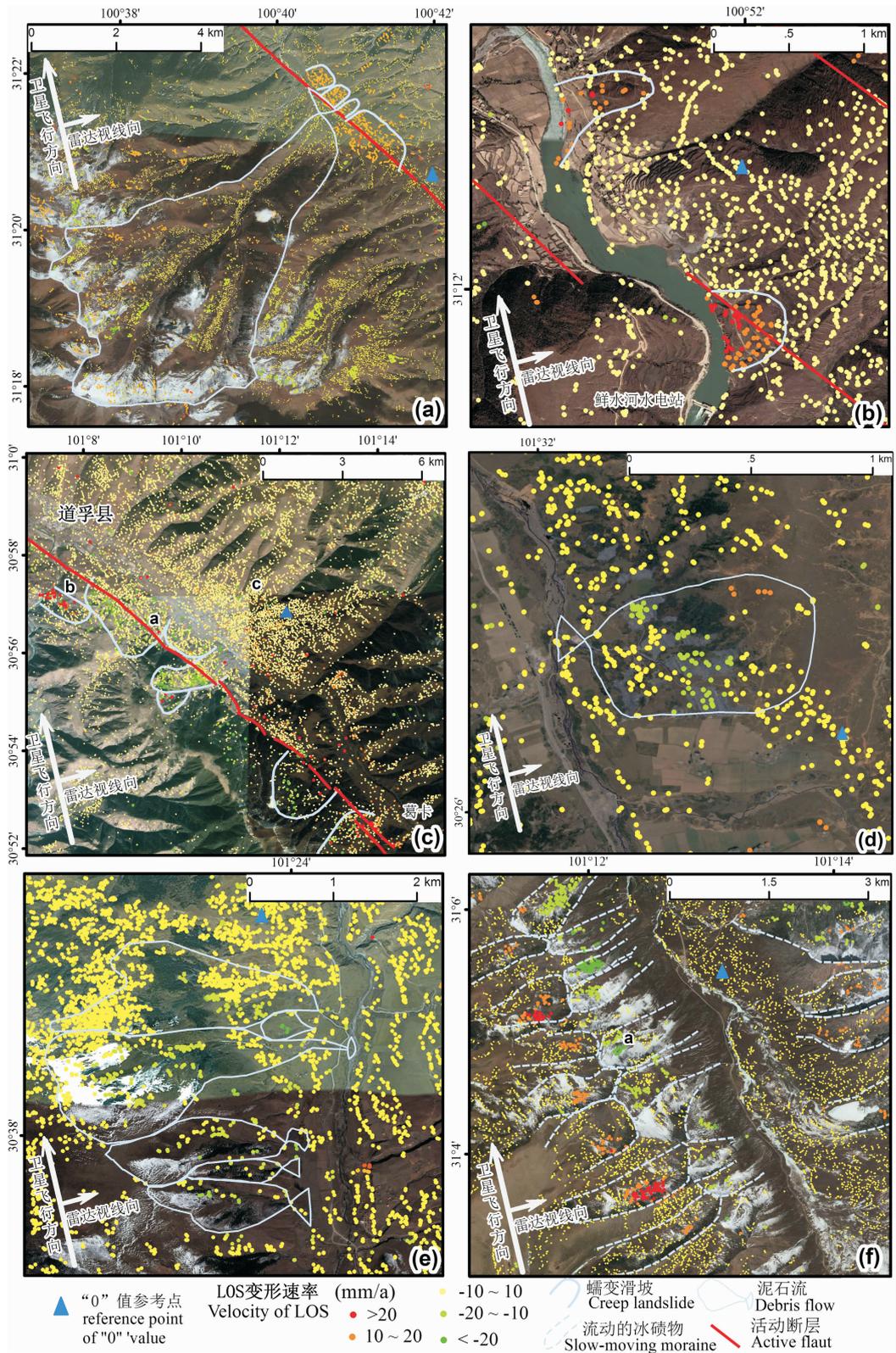


图 6 典型蠕变斜坡地质灾害的 PS 点变形特征

Fig. 6 Deformation feature of typical slop geo-disaster

(a) — 炉霍 SW 侧的蠕变滑坡和松散堆积物泥石流; (b) — 鲜水河水电站大坝附近的蠕变滑坡; (c) — 道孚盆地沿活动断裂发育的蠕变滑坡;  
 (d) — 八美附近的“土石林”泥石流; (e) — 八美 NW 附近的松散堆积物泥石流; (f) — 道孚 NE 侧大雪山发育的缓慢流动冰碛物  
 (a) — Creep landslides and alluvial debris flows on the SW side of Luhuo; (b) — creep landslides near the dam of Xianshuihe reservoir; (c) — creep landslides along the active fault in Daofu basin; (d) — “soil-forest” debris flow near Bamei; (e) — allu-deluvial debris flow on the NW of Bamei; (f) — slow-moving moraine in the “Big Snow Mountain” on the NE of Daofu



图7 鲜水河断裂带典型蠕滑斜坡地质灾害照片

Fig. 7 Photos of creeping slop geo-disaster along the Xianshuihe fault

(a) 一错乱“台阶状”表层蠕滑滑坡(镜向NW);(b)一鲜水河水库蠕变古滑坡(镜向NE);(c)一活动断裂穿越的蠕变斜坡(镜向W);(d)一未与断裂相交,稳定的震裂斜坡(PS点变形速率为0)(镜向NE);(e)一蠕变的“构造土石林”泥石流物源区(镜向N);(f)一蠕变的沟谷松散堆积物(镜向NW);(g)一冰蚀地貌及缓慢流动的冰碛物(镜向SW);(h)一高寒山地物理风化层表面蠕变(镜向S)

(a)—Creep landslide with garbled “footstep” surface (photo direction NW); (b)—creep Palaeo-landslide in Xianshuihe reservoir (photo direction NE); (c)—creep landslide intersected with active fault (photo direction W); (d)—current stable slope without intersected with active fault ever disturbed by earthquakes (velocity of PSs is about zero) (photo direction NE); (e)—creep tectonic “soil-rock forest” source of debris flow (photo direction N); (f)—creep alluvial deposit in ditch (Photo direction NW); (g)—erosion geomorphology and slow-moving moraines (Photo direction SW); (h)—creep of physical weathering materials in high and cold mountain area (photo direction S)

筑物安全(图 7c),图 6c 中 b 点的 NW 向滑坡 InSAR 监测的时程变形曲线(图 8a)表明 2007 年 1 月 9 日~2010 年 3 月 7 日间的累计 LOS 向变形达 107 mm,平均 LOS 变形速率 33 mm/a,根据几何关系换算,实际水平变形速率在 200 mm/a 以上,而道孚断陷谷地 NE 侧同震震裂斜坡确没有任何 PS 点缓慢变形的迹象(图 7d)。

#### 4.2 泥石流

基于一定区域范围内的斜坡 PS 点变形速率,结合流域划分、地貌特征和地表覆盖物情况综合分析,可以识别出泥石流。主要有两种类型:一种是颇具鲜水河断裂地方特色的“土石林”泥石流,土石林是断裂带的中上三叠统如各年组( $T_3r^2$ )变质砂岩、板岩在地质历史时期处于挤压状态,产生几十至近千千米宽的破碎带,岩体呈陡立、棱角,甚至糜棱岩化的粉末状,经风化和淋滤呈灰黑色“石林”状(图 7e)。由于岩土体软弱松散,在降水作用下易于被侵蚀,成为泥石流物源,在中古一八美—惠远寺附近区段(图 5c 中 d 点所在位置)这种现象比较明显。“土石林”地表植被稀疏,InSAR 观测往往可以获得较密集的 PS 监测点,其作为泥石流物源区可以计算出明显有别于周围区域的高变形速率(图 6d),根据流域分割,配合影像解译,可以判定为泥石流灾害。另一种是沟谷松散堆积物泥石流,高寒气候使鲜水河断裂带附近的物理风化严重,在坡面表层形成了大量松散的“溜砂”,在融雪、降水等作用下易于发育成为泥石流,松散堆积物表面的 PS 点密度、变形速率一定程度上可以作为泥石流灾害的判据,并反映泥石流物源的稳定性(图 6e,7f)。

#### 4.3 冰碛物流动

除以上两种斜坡地质灾害之外,一类面积广大而且分布广泛的斜坡蠕变是冰碛物缓慢流动,这在以往的调查中被忽略,或是技术原因没有发现。与地层岩性的叠加分析显示,在侵入岩区存在大量的高速变形 PS 点(图 5a,5b,6f)。侵入岩坚硬,抗风化侵蚀能力强,保持了高海拔,断裂谷地两侧高山分水岭高程大都在 4000 m 以上,更新世以来冰川发育,随着全球气候变暖,现今表层冰川消退严重,但遗留的松散冰碛物内部仍然具有较高含水率,使内聚力及摩擦角数值明显降低,加上冰碛物松散、赋存地形高陡,在陡坡重力、上部冰川推动及融水冲蚀等作用下顺冰蚀谷运动(图 7g,h),成为快速滑坡或泥石流的物源。这在 4200 m 以上高程区和道孚段东北部的大雪山地区分布较为集中,其中几个区域变

形尤其突出,例如道孚 NE 向约 20 km 的大雪山冰川与冰碛物覆盖区(图 5c 和 5d 中 f 点所在位置),山脉 NW 平直走向,山峰平均高程约 4700 m,山脚高程约 4200 m,沿重力梯度方向发育了大量的冰斗冰蚀槽,在山脊两侧呈现出明显的正负变形特征,变形速率绝对值大都在 20 mm/a 以上,如图 6 中 a 点处的变形速率(图 8b)。此外,炉霍县西侧的高山区,地形相对平缓的塔公草原高原区、康定—八美的雅拉山区、康定机场东侧等,都发育缓慢流动的冰碛物(具体位置详见图 5a 中地名)。

#### 4.4 InSAR 反映的研究区地质灾害特征

通过几个典型实例分析可见,鲜水河断裂带附近的斜坡地表变形首先是具有断裂控制的显著特点,明显的蠕滑变形绝大多数是发育在断裂带通过的坡体上;其次是根据一些离散的高速率 PS 点结合流域划分,可以识别泥石流灾害;高海拔(超过 4000m)处的冰碛物流动变形范围广、规模大、速率高,其本身不仅是大型斜坡灾害,从流域范围角度看,其也是泥石流的重要物源区。这些变形现象的发现提示我们在用 InSAR 方法研究活动断裂时,要注意断裂带附近的大范围斜坡地质灾害变形,对于高山冰碛物发育区,不要把斜坡变形误认为是构造运动隆升变形。

## 5 讨论

### 5.1 InSAR 观测数值的运用

已有研究证明,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 点变形量与地面测量相比较的绝对偏差。

### 5.2 构造变形对蠕变斜坡识别的影响

鲜水河断裂具有较高的左旋水平变形速率,在采用 InSAR 观测微小的斜坡地质灾害变形时,必须关注其构造变形的影响。本研究的观测结果并未显示出断裂两侧趋势性的变形差异,一方面是因为 InSAR 主要反映地表垂直变形,PALSAR 数据对垂直变形的几何敏感性 0.83,对水平变形仅有 0.49,二是采用的 PALSAR 数据的水平入射角与断层走向约  $70^\circ$  相交,监测结果对水平走滑运动不敏感,如果要采用降轨右视数据观测,构造运动变形就会比较突出(Wang Hua et al., 2009);三是蠕变斜坡地质灾害变形远大于构造运动变形。因此,构造运动

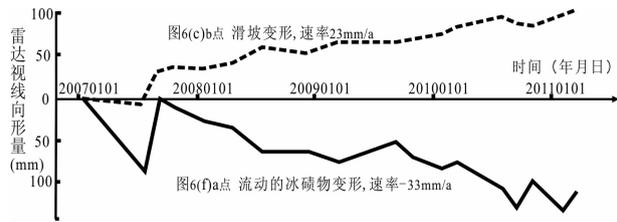


图8 典型蠕滑变形斜坡和冰碛物流动的时程曲线

Fig. 8 Time-deformation profiles of typical slow-moving landslide and slow-flow moraine

变形不会影响对斜坡地质灾害的识别。

### 5.3 蠕变斜坡 InSAR 识别存在的不足

蠕变斜坡发育区往往是经济落后地区, 灾害威胁的财产价值相对较低(与城市的地面沉降、矿区地表塌陷、火山活动等相比), SAR 卫星观测计划不予重点关注, 相应的历史存档 SAR 数据一般较少, 制约着识别精度的提高; 一些区域没能形成 PS 点, 无法观测变形, 这包括地表覆盖物变化较大的地区, 如冰雪区、森林覆盖区、农田等, 陡坡面向雷达和背向雷达形成的叠掩和阴影区等; 一些区域即使形成了 PS 点, 但由于其是非线性变形或周期性变形, 如季节性冻胀和融沉交替的地区, 而无法获得较高的长期线性变形速率; InSAR 观测结果是视线向一维变形, 因此地质灾害三维运动方向和变形量值无法直接判定, 用 PALSAR 数据观测的大变形区一般是 NE 和 SW 坡向, 其他坡向的变形观测效率会受到影响, 好在鲜水河断裂及附近的地形线以 NW 向为主, 其斜坡必然以 NE 和 SW 向发育为主, 本文选择的 SAR 数据对于该区域的斜坡地质灾害观测具有较好的观测效果。

以上问题都带来了后期地质分析的困难, 为了更全面地识别区域的斜坡地质灾害, 应该采用反方向 SAR 观测, 根据目前可获得的存档 SAR 数据情况分析, EnviSAT 卫星降轨右视 ASAR 数据是最理想的选择。因此, 基于 PS 点变形速率提取斜坡地质灾害的准确性还有很大的提升空间。

## 6 结论

(1) InSAR 观测结果显示鲜水河断裂沿线存在大量以往地面调查和光学遥感解译没有发现的蠕变斜坡地质灾害, 主要有蠕变滑坡、泥石流和冰碛物缓慢流动 3 种类型, 这为我们深入全面地进行该地区地质灾害防治提供了方向;

(2) InSAR 技术识别到的蠕滑型滑坡具有“错乱的等高线状台阶”, 凸或凹的主滑动方向地形剖

面, 舌状地貌, 无显著的基岩裸露滑床等特征, 可以作为野外调查和稳定性评价的标准;

(3) 断裂北段以古滑坡、历史地震滑坡和震裂斜坡为主, 与断裂带相交的, 大部分存在蠕滑变形, 现今稳定性差, 未相交的无变形现象, 稳定性较好, 体现了活动断裂的地质灾害效应;

(4) 在高陡泥石流的物源区往往发育分散的缓慢变形斜坡体, 依据高变形速率 PS 点数量和变形速率可以识别泥石流灾害, 也是泥石流危险性评价的一项重要内容, InSAR 观测结果显示鲜水河断裂沿线主要发育“土石林”泥石流和坡面松散堆积物泥石流 2 种类型;

(5) 鲜水河断裂带附近 4200 m 高程以上区域存在广泛的现代冰碛物斜坡变形, 该灾种分布范围广、单体规模大、运动速率高, 是现今鲜水河断裂带最主要的地表剥蚀形式;

(6) InSAR 技术结合地质条件分析可以高效地识别蠕变斜坡地质灾害, 适于山区地质灾害众多、调查不便的工作环境, 具有很大的发展潜力;

(7) 虽然本研究实例取得了一定的效果, 但在山区进行 InSAR 观测结果有着很强的噪音, 这主要受坡度、坡向、DEM 误差和地表覆盖多重反射等因素影响, 这是阻碍地质灾害 InSAR 识别和监测精度的重要因素之一, 需要不断通过地质灾害条件约束、多角度 InSAR 观测等方法的优化完善, 采用 EnviSAT 卫星降轨右视 ASAR 数据是目前高性价比的选择。

## References

- Allen C R, Lou Zhuoli, Qian Hong. 1991. Field study of a highly active fault zone: The Xianshuihe fault of southwestern China. *Geol Soc Amer Bull*, 1(103): 1178~1199.
- Berardino P, Fornaro G, Lanari R. 2002. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 40 (11): 2375~2380.
- Bovis M J. 1985. Earthflows in the interior plateau, southwest British Columbia. *Canadian Geotechnical Journal*, 22 (3): 313~334.
- Buckley M. 2000. Radar interferometry measurement of land subsidence [PhD Dissertation]. Austin: University of Texas at Austin.
- Cruden D M, Varnes D J. 1996. Landslide types and processes. In: Turner A K, Schuster R L (eds). *Landslides: Investigation and Mitigation*. Washington D C: National Academy Press, 36~71.

- Ferretti A, Prati C, Rocca F. 2000. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatters in differential SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(5): 2202~2212.
- Ferretti A, Prati C, Rocca F. 2001. Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(1): 8~20.
- Ferretti A, Savio G, Rocca F. 2007. Submillimeter accuracy of InSAR time series: Experimental validation *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(5): 1142~1153.
- Fruneau B, Achache J, Delacourt C. 1996. Observation and modelling of the Saint-Etienne-de-Tinee landslide using SAR interferometry. *Tectonophysics*, 265(3): 181~190.
- Ge Daqing, Wang Yan, Fan Jinghui. 2007. A study of surface deformation monitoring using differential sar interferometry technique and an analysis of its key problems. *Remote Sensing for Land & Resources*, (4): 14~23 (in Chinese with English abstract).
- Guo Changbao, Montgomery David R, Zhang Yongshuang, Wang Ke, Yang Zhihua. 2015. Quantitative assessment of landslide susceptibility along the Xianshuihe fault zone, Tibetan Plateau, China. *Geomorphology*, 248(2015): 93~110.
- Highland L P, Bobrowsky P. 2008. *The landslide handbook: A guide to understanding landslides*; Reston, Virginia, U. S. Geological Survey Circular 1325, 129 p, p25.
- Kelsey H M. 1978. Earthflows in Franciscan melange, Van Duzen River basin, California. *Geology*, 6(6): 361~364.
- Li Tiantiao. 1997. *The Xianshuihe fault zone and assessment of strong earthquake risk*. Sichuan: Science and Technology Press of Sichuan (in Chinese without English abstract).
- Mackey B H, Roering J J. 2011. Sediment yield, spatial characteristics, and the long-term evolution of active earthflows determined from airborne LiDAR and historical aerial photographs, Eel River, California. *Geological Society of America Bulletin*, 123 (7~8): 1560~1576.
- Massonnet D, Rossi M, Carmona C. 1993. The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry. *Nature*, 36(4): 138~142.
- Qian Hong, Allen C R, Luo Zhuoli. 1988. The active characteristics of xianshuihe fault in Holocene. *Earthquake research in China*, 4 (2): 9~18 (in Chinese with English abstract).
- Scheingross J S, Minchew B M, Mackey B H. 2013. Fault-zone controls on the spatial distribution of slow-moving landslides. *Geological Society of America Bulletin*, 12 (5): 473~489 (in Chinese with English abstract).
- Shan Xinjian, Liu Jiahang, Ma Chao. 2001. Preliminary analysis on characteristics of coseismic deformation associated with Ms=8.1 Western Kunlunshan Pass earthquake in 2001. *Acta Seismologica Sinica*, 26(5): 474~480 (in Chinese with English abstract).
- Strozzi T, Wegmuller U. 1999. Land subsidence in Mexico City mapped by ERS differential SAR interferometry. *IEEE 1999 International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Hamburg, 1999.
- Wen Xuezhe, Jia Jinkang, Pan Mao. 1988. Recent slip rates, earthquake recurrence intervals and strong seismic hazards on the northwestern segment of the Xianshuihe fault zone. *Earthquake Research in China*, 2(4): 432~451.
- Wang Hua, Wright T J, Biggs J. 2009. Interseismic slip rate of the northwestern Xianshuihe fault from InSAR data. *Geophys. Res. Lett.*, 36, L03302, doi:10.1029/2008GL036560.
- Werner C, Wegmüller U, Strozzi T, Wiesmann A. 2003. "Interferometric point target analysis for deformation mapping," in *Proc. IGARSS, Toulouse, France, Jul. 21 - 25*, pp. 4362~4364.
- Wegmüller U, Werner C, Strozzi T, Wiesmann A. 2004. "Multi-temporal interferometric point target analysis," in *Analysis of Multi-Temporal Remote Sensing Images*, vol. 3, P. Smits and L. Bruzzone, Eds. Singapore: World Scientific, ser. Series in Remote Sensing, pp. 136~144.
- Wu Zhenhan, Zhuang Zhuochen. 2008. Types of seismic and geological hazards caused by the Ms8.0 Wenchuan Earthquake. *Acta Geologica Sinica*, 82 (12): 1747~1757 (in Chinese with English abstract).
- Xu Xiwei, Wen Xueze, Zheng Rongzhang. 2003. Pattern of latest tectonic motion and dynamics of faulted blocks in Yunnan and Sichuan. *Science in China (Series D)*, 33(sup): 151~162 (in Chinese with English abstract).
- Yao Xin, Zhang Yongshuang, Xiong Tanyu, Sun Yue. 2012. Analysis of geoseismic faults movement and aftershocks migration for Yushu Earthquake based on InSAR co-seismic deformation. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 42(4): 440~4448 (in Chinese with English abstract).
- Yao Xin, Yu Kai, Zhang Yongshuang, Li Lingjing, Zhou Nengjuan. 2014. Mechanisms of catastrophic landslides on January 11, 2013, in Zhenxiong County: fluidization initiation and movement liquefaction of high porosity soil. *Chinese Journal of Rock Mechanism and Engineering*, 33 (5): 1047~1054, (in Chinese with English abstract).
- Yin Zhiqiang, Zhao Wuji, Chu Hongliang, Sun Wei. 2014. Basic characteristics of geohazards induced by LuShan Earthquake and compare to them of Wenchuan Earthquake. *Acta Geologica Sinica*, 88(6): 1145~1156 (in Chinese with English abstract).
- Yin Zhiqiang, Xu Yongqiang, Chen Hongqi, Sa Lanpeng, Jiang Xingwu. 2016. The Development and Distribution Characteristics of Geohazards Induced by August 3, 2014 Ludian

- Earthquake and Comparison with Jinggu and Yingjiang Earthquakes. *Acta Geologica Sinica*, 90(6):1086~1097.
- Yin Yueping, Zheng, W, Liu Y, Zhang J, Li X. 2010. Integration of GPS with InSAR to monitoring of the Jiayu landslide in Sichuan, China. *Landslides*, 7: 359~365.
- Zhao Chaoying, Zhang Qin, Ding Xiaoli, Peng Jianbing, Yang Chengsheng. 2009. *Journal of Engineering Geology*, 17(3): 389~393(in Chinese with English abstract).
- Zhao Chaoying, Lu Zhong, Zhang Qin, Juan de La Fuente. 2012. Large-area landslides detection and monitoring with ALOS/PALSAR imagery data over Northern California and Southern Oregon, USA, Remote sensing of environment, 124: 348~359 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Wuji, Yin Zhiqiang, Ma Jifu, Qin Xiaoguang. 2016. Multi-stage Development Characteristics and Geomorphic Evolution Process of the Xijitan Super Large Landslide in the Guide Basin, Upper Reaches of Yellow River. *Geological Review*, 62(3):709~721.
- Zhou Rongjun, He Yulin, Huang Zuzhi. 2001. The slip rate and strong earthquake recurrence interval on the Qianning-Kangding segment of the Xianshuihe fault zone. *Acta seismologica sinica*, 23(3): 22~29(in Chinese with English abstract).
- 钱洪, C. R. 艾伦, 罗灼礼. 1988. 全新世以来鲜水河断裂的活动特征. *中国地震*, 4(2): 9~18.
- 单新建, 柳稼航, 马超. 2001. 2001年昆仑山口西8.1级地震同震形变场特征的初步分析. *地震学报*, 26(5):474~480.
- 吴珍汉, 张作辰. 2008. 汶川8级地震地质灾害的类型及实例. *地质学报*, 82(12):1747~1757.
- 徐锡伟, 闻学泽, 郑荣章, 2003. 川滇地区活动块体最新构造样式及动力学来源. *中国科学(D辑)*, 33(s): 151~162.
- 姚鑫, 张永双, 熊探宇. 2012. 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. *吉林大学学报(地球科学版)*, 42(2): 440~448.
- 姚鑫, 余凯, 张永双, 李凌婧, 周能娟. 2014. 镇雄“1.11”灾难性滑坡机制——高孔隙度土流态化启动与滑动液化. *岩石力学与工程学报*, 33(5):1047~1054.
- 殷志强, 赵无忌, 褚宏亮, 孙巍. 2014. “4·20”芦山地震诱发地质灾害基本特征及与“5·12”汶川地震对比分析. *地质学报*, 88(6): 1145~1156.
- 殷志强, 徐永强, 陈红旗, 撒兰鹏, 姜兴武. 2016. 2014年云南鲁甸地震触发地质灾害发育分布规律及与景谷、盈江地震对比研究. *地质学报*, 90(6):1086~1097.
- 周荣军, 何玉林, 黄祖智. 2001. 鲜水河断裂带乾宁—康定段的滑动速率与强震复发间隔. *地震学报*, 23(3): 22~29.
- 赵无忌, 殷志强, 马吉福, 秦小光. 2016. 黄河上游贵德盆地席茨滩巨型滑坡发育特征及地貌演化. *地质论评*, 62(3):709~721.
- 赵超英, 张勤, 丁晓利, 彭建兵, 杨成生. 2009. 基于InSAR的西安地面沉降和地裂缝发育特征研究. *工程地质学报*, 17(3): 389~393.

### 参 考 文 献

葛大庆, 王艳, 范景辉. 2007. 地表形变 D-InSAR 监测方法及关键问题分析. *国土资源遥感*, (4): 14~23.

李天招主编. 鲜水河断裂带及强震危险性评估. 四川: 四川科学技术出版社, 1997.

## InSAR-based Recognition of Slow-moving Slop Disasters Along the Xianshuihe Active Fault in the Qinghai-Tibetan Plateau

YAO Xin, ZHANG Yongshuang, LI Lingjing, LING Sheng, WANG Zhongsheng, ZHOU Zhenkai

*Key Laboratory of Neotectonic Movement and Geohazards, Ministry of Land and Resource, Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100086*

### Abstract

The active fault zones and their nearby areas are liable to encounter the serious Slow-Moving Slop Disasters (SMSD), and small surface deformation is one of the important signs to recognize the SMSD. With the active Xianshuihe Fault (XSF) zone in the eastern Tibet Plateau as an objective, this study obtained the millimetric deformation through collecting multi-period ALOS/PALSAR data for time series InSAR process, along with field investigation, remote sensing interpretation and geological setting analysis. The results reveal types, deformation features and spatial distribution of the SMSDs. ① Along the active fault are developed three kinds of slope geohazards; creep landslides, debris flows and slow-moving moraines. ② Creep landslides have the geomorphic characteristics of garbled contour steps, which present rough, uneven longitudinal profiles, tough-shaped landscape, and no exposed batholiths, etc. ③ Paleo-landslides, coseismic landslides and shattering slopes are well developed within the Xianshuihe fault. Those geohazards directly intersected with the Xianshuihe fault show slow-moving deformation while those geohazards without crossing the the Xianshuihe fault show no slow-moving deformation, reflecting that active faulting has controlling role in geohazard development. ④ Two types of debris flows, "Soil-stone Forest" and "Loose Debris Slope", were found to occur in this area. The slow, disperse deformation in source areas and the amount and velocity of deformation are the important identification features. ⑤ In the areas (above 4200 m a. s. l.) nearby the Xianshuihe fault are widely distributed slope deformation of modern moraines along glacial troughs, which is characterized by huge single body and fast moving velocity and should be the main manifestation of denudation in the study area. The study results also show that combination of InSAR technology with geological settings can effectively identify SMSDs, and is suitable for geohazard investigation in the environment of mountainous areas with great amount of disasters. Therefore, it will be an important direction in geohazard investigation technology.

**Key words:** Xianshuihe active fault; recognition of geohazard; InSAR; creep landslide; slope deformation; Tibetan Plateau