



引文格式: 林明明, 赵勇, 王坤, 等. 基于多源时序 InSAR 技术的滑坡隐患早期识别[J]. 西北地质, 2024, 57(6): 268–277. DOI: 10.12401/j.nwg.2024083

Citation: LIN Mingming, ZHAO Yong, WANG Kun, et al. Early Identification of Potential Dangers of Loess Landslide Based on Multi-Source and Time Series InSAR[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(6): 268–277. DOI: 10.12401/j.nwg.2024083

基于多源时序 InSAR 技术的滑坡隐患早期识别

林明明¹, 赵勇¹, 王坤¹, 张帆², 刘晓蕾¹, 李金鑫¹

(1. 新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局第六地质大队, 新疆 哈密 839000; 2. 西安煤航遥感信息有限公司, 陕西 西安 710100)

摘要: 中国山区滑坡灾害频发且分布广泛, 尤其是地处高位的隐蔽型灾害及隐患, 传统的技术对其识别监测效果较差。InSAR 技术作为一种基于广域面范围的对地观测技术, 可以快速获取地表大范围的微小缓慢形变, 相对于点监测技术来说, 具有先天的优势, 在滑坡隐患识别工作中起到了重要的作用。笔者以新疆叶城为研究区, 收集 10 景 ALOS-2 数据和 98 景 Sentinel-1 数据, 基于 SBAS-InSAR 技术对滑坡地质灾害及隐患进行识别与监测。基于形变结果, 结合光学遥感影像, 建立遥感解译标准, 共解译出 22 处有形变特征的滑坡隐患, 进行了野外验证, 确定滑坡隐患点 20 处, 识别准确率达 91%。基于形变特征和野外验证结果对两处典型隐患点的时间序列形变情况及形变原因进行了详细的分析。结果显示, 两处滑坡整体呈现缓慢蠕变的状态, 但遇降雨或融雪可能会发生加速变形。研究表明, 多源 InSAR 技术可以有效的识别叶城地区的滑坡隐患, 为后续的滑坡灾害防治提供了可靠的数据支撑。

关键词: 滑坡; SBAS-InSAR; 早期识别; 野外验证; 新疆叶城

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2024)06-0268-10

Early Identification of Potential Dangers of Loess Landslide Based on Multi-Source and Time Series InSAR

LIN Mingming¹, ZHAO Yong¹, WANG Kun¹, ZHANG Fan², LIU Xiaolei¹, LI Jinxin¹

(1. Xinjiang Bureau of Geo-exploration & Mineral development the sixth geological group, Hami 839000, Xinjiang, China; 2. Xi'an Meihang Remote Sensing Information Co. Ltd, Xi'an 710100, Shanxi, China)

Abstract: Landslide disasters are frequent and widespread in mountainous areas of China, especially those potential disasters and dangers at high altitudes, where traditional technologies are less effective in identification and monitoring. Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) technology, as a ground observation technique based on a wide-area surface, can rapidly acquire minor and slow ground deformations over large areas, offering innate advantages over point monitoring techniques and playing a significant role in the identification of landslide risks. This study focuses on the Yecheng area of Xinjiang, utilizing 10 scenes of ALOS-2 data and 98

收稿日期: 2024-04-22; 修回日期: 2024-08-20; 责任编辑: 贾晓丹

基金项目: 新疆维吾尔自治区自然资源厅项目“新疆昆仑山北坡莎车县-叶城县地质灾害重点区域精细化调查”(XJDZDC2019G-2-02)资助。

作者简介: 林明明(1984-), 男, 工程师, 主要研究方向为地质灾害防治技术。E-mail: 405482253@qq.com。

scenes of Sentinel-1 data. Based on the SBAS-InSAR method, identification and monitoring of geological hazards and potential landslide risks were conducted. By interpreting the deformation results in conjunction with optical remote sensing images, a remote sensing interpretation standard was established, revealing 22 potential landslide sites with deformation characteristics. Field verification confirmed 20 of these sites, achieving an identification accuracy rate of 91%. Detailed analysis of the time series deformation and causes at two typical risk sites based on deformation characteristics and field verification results showed a general trend of slow creep, with the potential for accelerated deformation in the event of rainfall or snowmelt. The results indicate that multi-source InSAR technology effectively identifies potential landslide risks in the Yecheng area, providing reliable data support for subsequent landslide disaster prevention and control measures.

Keywords: landslide; SBAS-InSAR; early identification; field verification; Yecheng of Xinjiang

滑坡作为一种斜坡体上的不稳定岩土受自身重力作用沿滑动面运动的高危险性的物理现象(黄润秋, 2007; 孙萍萍等, 2022), 每年因滑坡灾害引起的财产损失和人员伤亡数不胜数。据统计, 在近 20 年间, 全国地质灾害已发生超过 386 000 起, 其中, 滑坡灾害作为主控灾型占比超过 65%(杨迁等, 2020)。新疆滑坡发育较多, 长期以来对城镇重要工程设施、居民生命财产安全造成了较大的影响。因此, 如何发现和有效识别出重大地质灾害的潜在隐患并加以主动防治, 是地质灾害防治领域研究的重点和热点(许强等, 2019)。

合成孔径雷达技术(Synthetic Aperture Radar, SAR)技术作为重要的识别监测技术, 可以全天候、不受云层干扰、高时空分辨率对地表进行监测(廖明生等, 2014), 并取得了较多的成果案例(Zebker et al., 2002; Feng et al., 2010; 张路等, 2018; 栗明明等, 2021; 李万林等, 2021; 李晓恩等, 2021), 在滑坡识别监测领域也发挥了重大的作用。

目前, InSAR 技术对滑坡隐患的研究已经较为成熟, 可以快速获取大范围的形变靶区以及时间序列形变特征。但此技术对典型区域的大型滑坡研究居多。例如, 许强等(2018)对金沙江白格两次滑坡引起的堰塞堵江事件进行了分析, 对滑坡区斜坡体变形历史和滑坡基本特征有了充分的认识, 并通过现场监测预警工作, 保证了堰塞体导洪槽施工的安全。杨成生等(2023)对辛杜帕尔乔克地区进行了滑坡 InSAR 监测与研究, 结合不同时期的干涉对形变, 最终发现该地区的滑坡的运动受到了尼泊尔大地震与降雨共同作用的影响。朱建军等(2022)对 InSAR 滑坡监测研究进行了综述, 从 SAR 数据的发展、InSAR 监测的精度、滑坡三维形变监测问题, 到目前限制 InSAR 滑坡监测的主要问题、可能解决的途径以及未来的发展

方向进行了探讨。InSAR 技术对新疆的滑坡隐患研究相对较少, 尤其是在乡镇一级区域。杨明远等(2021)对西合休乡西合休村的崩塌泥石流灾害特征进行了详细的描述, 并未涉及到采用多源 InSAR 技术对滑坡隐患的识别。因此, 笔者收集了 Sentinel-1 和 ALOS-2 数据, 基于时序 InSAR 技术对新疆叶城西合休乡的滑坡隐患进行了识别研究分析。

1 区域地质背景

研究区位于西昆仑山北麓新疆喀什地区叶城县西合休乡, E 76°24'24"~76°54'27", N 36°46'21"~37°14'7"。区域海拔为 2 100~5 500 m, 地势西南高、东北低, 以冰川作用侵蚀高山、侵蚀-剥蚀高山中高山及堆积河谷地貌为主(图 1、图 2)。

工作区属典型的暖温带大陆性干旱气候, 北部平原区年平均气温 12.2 °C, 年平均降水量 66.7 mm, 降水主要集中在每年 5~9 月, 占全年降水量的 55%~65%, 冬季略长, 风小, 降雪少, 低温持续时间长。大地构造上, 属于昆仑山 EW 向构造带的北翼, 发育 NW—SE 向的复式剧烈挤压褶皱和逆掩断裂, 受喜山构造运动影响, 表现为强烈的隆升。区内岩性以岩浆岩为主, 上覆第四系黄土, 仅在东北角分布有元古界片麻岩、片岩。人类工程活动以农牧业为主, 集中在河谷阶地区。滑坡灾害发育, 多为坡脚堆积层中的土质滑坡, 受降雨、地震、人类工程活动影响。

2 数据源及研究方法

2.1 数据源

采用 10 景 L 波段的 ALOS-2/PALSAR-2 升轨数



图1 研究区地貌图

Fig. 1 Geomorphologic map in study area

据,时间跨度为2016年7月29日~2019年5月31日,98景C波段的Sentinel-1升轨数据,时间跨度为2017年3月20日~2020年5月27日。ALOS-2卫星搭载的PALSAR-2传感器能够克服恶劣天气对成像的影响,并拥有较强的植被穿透能力,其主要应用于测绘、灾害监测、环境和资源调查等领域。Sentinel-1数据是欧洲航天局“哥白尼计划”(GMES)中的地球观测卫星,重访周期为12天,空前的成图能力足以满足大区域多时相InSAR处理和应用需求分析。影像覆盖范围见图2,主要参数及成像日期见表1。采用30 m分辨率的航天飞机雷达地形测量任务(SRTM)获取的数字高程模型进行InSAR差分处理。

2.2 研究方法

小基线集(SBAS)(Berardino et al., 2002)技术最初由Berardino等人提出,基本思想是通过设定时空基线阈值,选取高质量干涉图组成一个或多个短基线子集,通过对高相干区的干涉相位进行最小二乘或奇异值分解来获取地表形变速率和时间序列。假设 N 幅SAR影像在一定时空基线阈值内随意组合,得到 M 个

干涉对,其中第 j 个干涉对是由 t_A 和 t_B 两个时刻的SAR影像组合得到,且 $t_B > t_A$,则干涉图中像元 x 处的差分相位 $\Delta\varphi_j(x)$ 就可以表示为:

$$\Delta\varphi_j(x) \approx \phi(t_B, x) - \phi(t_A, x) = \frac{4\pi}{\lambda} [d(t_B, x) - d(t_A, x)] \quad (1)$$

式中: λ 表示波长, $d(t_A, x)$ 和 $d(t_B, x)$ 分别表示 t_A 和 t_B 时刻相对于起始时刻的形变量, $\phi(t_A, x)$ 和 $\phi(t_B, x)$ 分别为对应的形变相位, M 个干涉对可写为矩阵形式:

$$A\phi = \Delta\varphi \quad (2)$$

式中: ϕ 为待求的形变相位, $A[M \times N]$ 为设计矩阵,其中行和列分别代表对应的干涉对和SAR影像, $\Delta\varphi$ 为干涉图的差分干涉相位矩阵;当小基线集合数 $L = 1$ 时,矩阵 A 的秩为 N ,通过最小二乘法即可求出累积形变量的估值:

$$\hat{\phi} = (A^T A)^{-1} A^T \Delta\varphi \quad (3)$$

当基线集 $L > 1$ 时,设计矩阵 A 秩亏,秩亏数为 $N - L + 1$,此时对设计矩阵 A 进行奇异值分解,即可求出累积形变量 ϕ 的最小二乘最小范数解。

数据处理基于GAMMA软件,按上述方法对10景

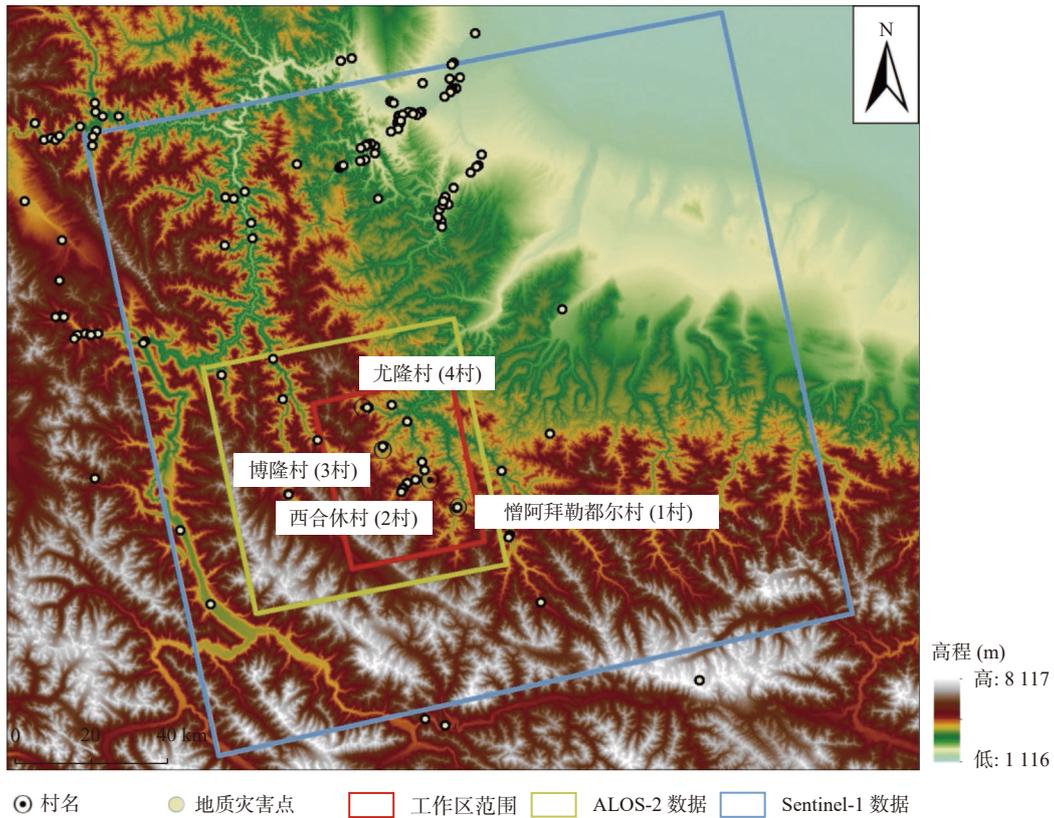


图2 研究区高程图

Fig. 2 Topographic map in study area

表 1 ALOS-2 和 Sentinel-1 数据基本参数表

Tab. 1 Basic parameters table of ALOS-2 and Sentinel-1A data

数据源	波段	轨道方向	入射角(°)	航向角(°)	分辨率(m)	影像数量(个)
ALOS-2	L	升轨	33.4	-12.8	6	10
Sentinel-1	C	升轨	39.7	-13.2	25	98

ALOS-2 数据进行小基线干涉处理, 最终获取研究区的年平均形变速率和时序结果。处理关键步骤如下:

(1) 影像差分干涉: 对单视复数影像(SLC)多视处理, Sentinel-1 和 ALOS-2 数据的多视比分别为 10 : 2 和 1 : 2, 多视后的地面分辨率约为 30 m×30 m 和 8 m×8 m; 对影像进行全组合, 采用外部 DEM 数据模拟并去除地形相位; 为提高干涉图相干性, 对干涉图进行滤波处理; 挑选高质量干涉图, 采用最小费用流算法进行相位解缠。

(2) 相位回归分析: 构建高相干像元的形变速率和高程改正模型对点目标的差分相位进行回归分析, 通过多次迭代分离出线性形变和 DEM 误差, 而残余相位中包含非线性形变、大气延迟相位和噪声相位, 根据残余相位中 3 个分量的不同时空特性, 通过设置一定的窗口对残余相位进行滤波处理就可以将大气

延迟相位和噪声相位去除, 剩余的即为非线性形变, 将其与线性形变叠加就可以获得高相干点的最终形变结果。

3 解译标准

造成地表变形的因素众多, 为剔除非相关形变和背景形变影响, 获取与地质灾害相关的形变, 更精确的判识、评价地灾隐患, 需要进行地质灾害隐患形变阈值划分、综合判识、野外核查等工作, 具体技术流程见图 3。

(1) 阈值划分: 以“形变范围、整体形变速率、最大形变量”为阈值划分依据, 依据前人研究成果和野外调查资料, 当区内斜坡的 LOS 方向形变速率绝对值大于 30 mm/y 时, 认为该斜坡处于不稳定状态, 以此

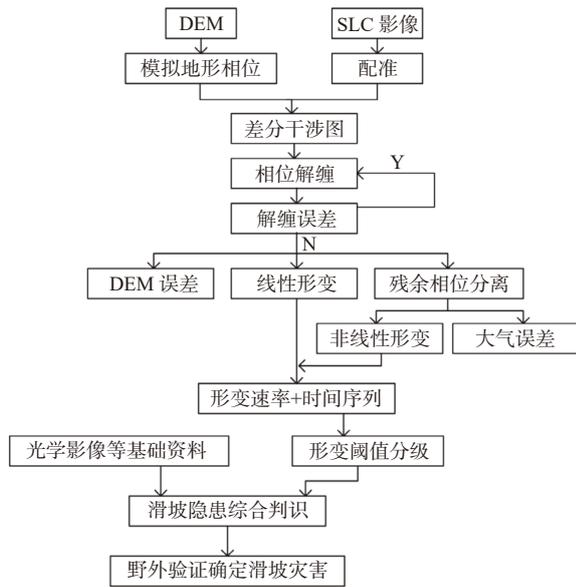


图3 InSAR技术解译流程图

Fig. 3 Interpretive flow charts of InSAR technology

提取出的形变区与野外调查地质灾害分布最为相符。统计分析提取形变区年平均形变速率,将研究区形变程度分为5级(表2)。

表2 形变程度划分

Tab. 2 Deformation level division

类别	年平均形变速率绝对值 (mm/a)				
	4~10	10~20	20~30	30~50	>50
形变程度	微小	小	明显	很明显	极明显

(2)综合判识:在上述提取的形变区基础上,结合二维、三维影像地图、基础地理信息、三调数据等,根据形变区所处地形地貌、地层岩性、斜坡形态、地面坡度、相对高度,以及“村镇、学校、居民点、重要水利、交通干线、主要河流”等地质灾害重点威胁对象,进行形变区筛查,剔除明显人工活动、无威胁对象等非地灾隐患形变异常。

(3)野外核验证:在室内综合判识的基础上,形成外业核查形变隐患分布图进行验证。重点核查形变范围、形变量大小及变化趋势,确定地质灾害发育特征和危害程度。

4 结果与分析

4.1 InSAR形变监测结果

采用时间序列形变技术分别计算出 Sentinel-1 和

ALOS-2 数据的形变速率结果,如图4和图5所示。图中红色代表形变方向为沿视线方向远离卫星,蓝色代表沿视线方向靠近卫星。由于雷达侧视成像特点导致山体叠掩、阴影及积雪失相干的影响,部分区域的相干像元分布密度较低,尽管如此,从速率图中仍能看到大量的形变信号。Sentinel-1 数据的形变速率集中在 $-240\sim 30$ mm/a, ALOS-2 数据的形变速率集中在 $-100\sim 35$ mm/a,均主要体现为负形变,由于时间跨度不同,形变速率量值存在差异,但是整体的形变分布较为吻合。Sentinel-1 数据的形变结果相比 ALOS-2 数据的形变结果的像元覆盖度更高。造成该现象的原因归结为以下两点:①Sentinel-1 数据量较大,两景数据的重访周期为12天,而收集到的 ALOS-2 数据只有10景,且每两景数据的重访周期最短为一个半月,最长为8个月。②由于工作区的植被稀少,L波段相较C波段数据的优势未完全体现出来。因此,本研究的两种数据源主要是互相补充的作用,ALOS-2 数据的分辨率高,可以更细致的体现滑坡隐患的空间形变特征。

采用光学遥感影像作为辅助数据,剔除人为开挖、积雪消融等因素引起的形变,分别通过 Sentinel-1 和 ALOS-2 数据的形变结果识别出20处和11处滑坡隐患,其中,有9处隐患点相重合,最终共识别出22处滑坡隐患(图6),基本位于2村和3村。Sentinel-1 数据和 ALOS-2 数据共同识别的形变较为明显的9处滑坡隐患点(图7)。

通过野外现场调查并结合以往地质资料综合分析,研究区地表变形主要受地形地貌、地层构造、降雨、融雪、人类工程活动等因素控制。侵蚀剥蚀中高山区大面积覆盖薄层黄土,盖层滑动引起的地表形变发育,多形成滑坡。受麻扎、康西瓦等活动断裂影响,岩体破碎,风化厚度大,残坡层发育,易产生滑坡,形成地表形变。降水入渗在减小岩土体抗剪强度的同时也减小了岩土体层内、层间的摩擦阻力,增加了岩土体重度和内部的动水压力,诱发地表形变的发生,是其形成的主导影响因素。人类工程活动加剧了地表形变的发生,人工切坡修路、建房,不仅使斜坡坡度变陡,岩体破碎,节理裂隙发育,危岩突出,还会改变斜坡固有的应力状态,易发生崩滑。

4.2 野外验证结果

研究区滑坡均为松散层土质滑坡,集中分布在中部黄土覆盖中高山区的沟谷两侧,属西河休乡2村、

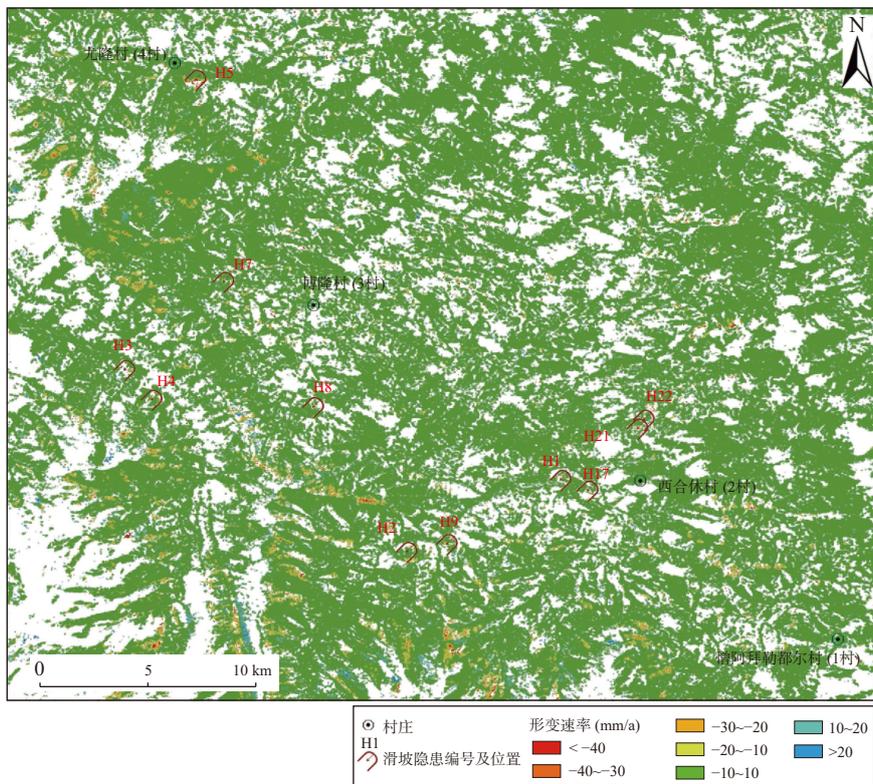


图4 ALOS-2 数据年平均形变速率
Fig. 4 Deformation rate diagram of ALOS-2 data

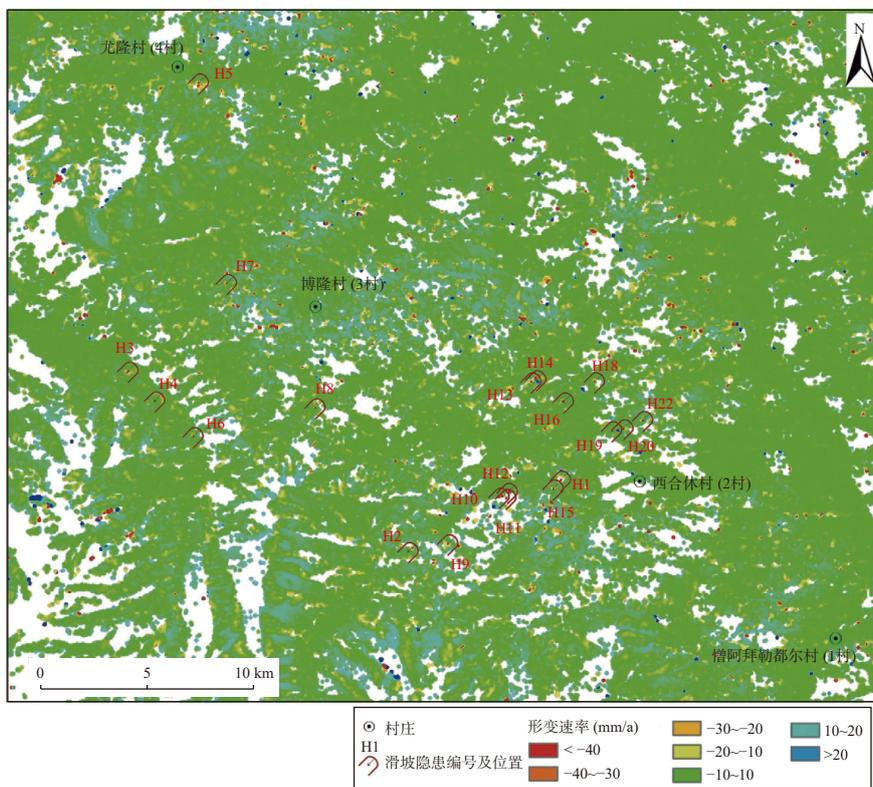


图5 Sentinel-1 数据年平均形变速率
Fig. 5 Deformation rate diagram of Sentinel-1 data

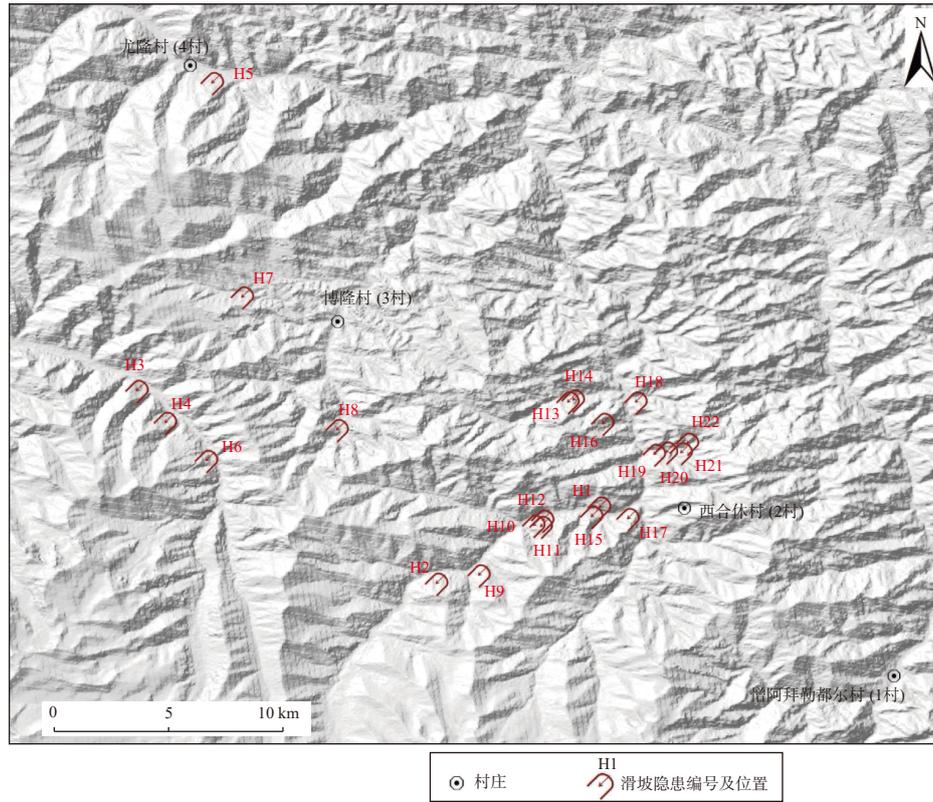


图6 滑坡隐患分布图

Fig. 6 Landslide hazard distribution map

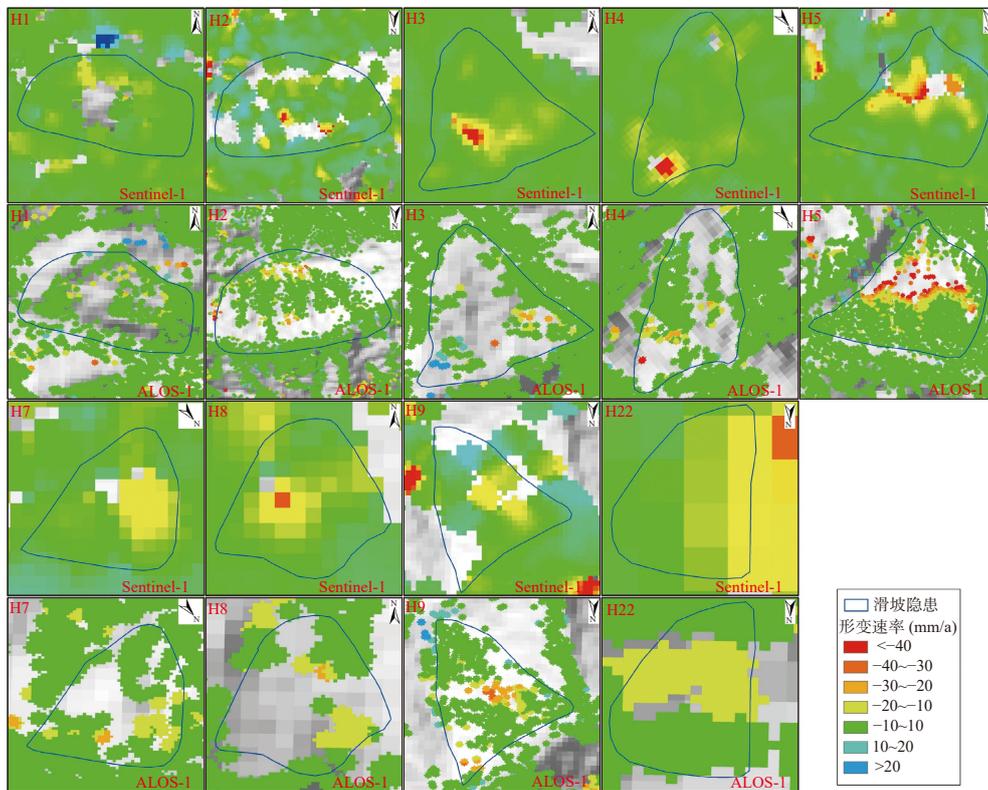


图7 滑坡隐患形变图

Fig. 7 deformation map of landslide potential danger

3 村, 由暴雨、放牧或人为坡脚开挖引起, 威胁对象以移民安置点、房屋、道路、羊圈、输电线、草场、农田为主。滑坡平面形态以半圆形为主, 剖面形态以直线型和凹型为主, 占滑坡总数 80% 以上。滑坡后壁壁面总体上较平直, 坡度一般较大, 在 $50^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 间, 坡向与原始坡向基本一致, 坡度明显大于原始坡面坡度。坡面上植被不发育, 与周边斜坡区别较明显。滑坡两侧边界大多较为清晰, 与原始坡面可明显区分, 有明显的拉张裂缝及台坎, 滑坡后缘两侧多呈陡坎状, 至滑

坡前缘与滑体重合, 多以裂缝形式展布。滑坡前缘多形成鼓丘, 并伴有裂缝, 土体松散, 经水流冲刷形成小型坍塌, 而滑动后趋于稳定的滑坡其前缘一般较平缓。区内滑坡整体形变特征明显, 活动性强, 危害性大, 危险性高。

根据实地调查验证, 22 处隐患区均具有形变迹象, 其中明显形变 12 处, 小形变 10 处。隐患点 H3 和 H15 无威胁对象, 最终确定滑坡隐患点 20 处, 识别准确率达 91%(表 3)。

表 3 滑坡隐患野外验证

Tab. 3 Field verification table of landslide potential danger

编号	经度	纬度	规模	位置	是否在册点	滑坡类型	威胁对象
H1	E 76°42'56.424"	N 36°58'57.201"	小型	2村	否	黄土滑坡	草场、河道
H2	E 76°39'4.603"	N 36°57'8.427"	中型	2村	是	黄土滑坡	房屋、羊圈、牧道、草场
H3	E 76°32'0.010"	N 37°1'43.857"	小型	2村	否	黄土滑坡	无威胁对象
H4	E 76°32'40.881"	N 37°0'58.652"	小型	2村	否	黄土滑坡	草场、牧道
H5	E 76°33'47.075"	N 37°9'3.708"	中型	4村	否	黄土滑坡	房屋、羊圈、草场、牧道
H6	E 76°33'38.630"	N 37°0'3.964"	小型	2村	否	黄土滑坡	居民地、道路、草场
H7	E 76°34'29.319"	N 37°3'57.313"	小型	3村	否	黄土滑坡	草场、林场、道路
H8	E 76°36'44.062"	N 37°0'48.035"	小型	3村	否	黄土滑坡	房屋、草场、牧道、羊圈
H9	E 76°40'5.238"	N 36°57'20.338"	中型	2村	否	黄土滑坡	居民地、牧道、草场
H10	E 76°41'23.271"	N 36°58'31.672"	中型	2村	否	黄土滑坡	房屋、公路、草场、羊圈
H11	E 76°41'33.202"	N 36°58'29.882"	小型	2村	否	黄土滑坡	牧道、草场
H12	E 76°41'35.577"	N 36°58'38.621"	小型	2村	否	黄土滑坡	牧道、草场
H13	E 76°42'11.812"	N 37°1'27.407"	小型	2村	否	黄土滑坡	牧道、草场、羊圈、房屋
H14	E 76°42'19.082"	N 37°1'30.652"	小型	3村	否	黄土滑坡	草场、羊圈
H15	E 76°42'45.054"	N 36°58'44.400"	小型	2村	否	黄土滑坡	无威胁对象
H16	E 76°43'0.560"	N 37°0'57.006"	小型	2村	否	黄土滑坡	草场、548县道、羊圈
H17	E 76°43'36.918"	N 36°58'40.910"	小型	2村	否	黄土滑坡	草场、548县道
H18	E 76°43'47.959"	N 37°1'27.517"	小型	3村	否	黄土滑坡	草场、林场、道路
H19	E 76°44'14.263"	N 37°0'12.923"	小型	2村	否	黄土滑坡	草场、548县道
H20	E 76°44'31.332"	N 37°0'16.100"	小型	2村	否	黄土滑坡	548县道、草场
H21	E 76°44'52.247"	N 37°0'14.915"	小型	2村	否	黄土滑坡	羊圈、草场
H22	E 76°45'1.308"	N 37°0'28.603"	小型	2村	否	黄土滑坡	草场、河道

4.3 典型区域形变分析

将典型中型滑坡隐患 H5 和 H9 的 ALOS-2 形变点叠加到光学影像上, 并分别在其坡体上选择特征点进行监测期内的时间序列分析, 获得两处滑坡隐患的形变速率图(图 8)。

滑坡隐患 H5 位于工作区南部西合休乡优隆村(4 村), 地理坐标为 E 76°33'47.075", N 37°9'3.708" (图 8a)。隐患坡体呈圈椅状, 纵长约为 950 m, 横宽约为 950 m, 滑向 19° , 为中型土质滑坡隐患。变形区域主要位于坡体中部, 上部区域基本均表现为失相干状态, 形变速率区间为 $-36\sim 11$ mm/a, 在坡体中部形变区选择 4 个特征点进行时间序列分析(图 9a)。P1 和

P3 点的累积形变量较高, 约为 -186 mm 和 -208 mm, 整体上呈现匀速变形状态。P2 和 P4 点在监测前期同样呈现速率较缓的匀速变形运动, 到监测后期开始呈现较为稳定的趋势。

滑坡隐患 H9 位于作业区南部西合休乡西合休村(2 村), 地理坐标为 E 76°39'4.603", N 36°57'8.427" (图 8b)。隐患坡体呈不规则三角形, 纵长约为 750 m, 横宽约为 450 m, 滑向 326° , 为中型土质滑坡隐患。形变区位于滑坡体中下部, 在滑体上部也有部分形变区域, 形变速率区间为 $-34\sim 9$ mm/a, 在滑坡体的中下部和后部分别选择两个特征点(图 9b)。P5 点的累积形变量最大, 约为 -105 mm, P6~P8 点的形变量相差较小。

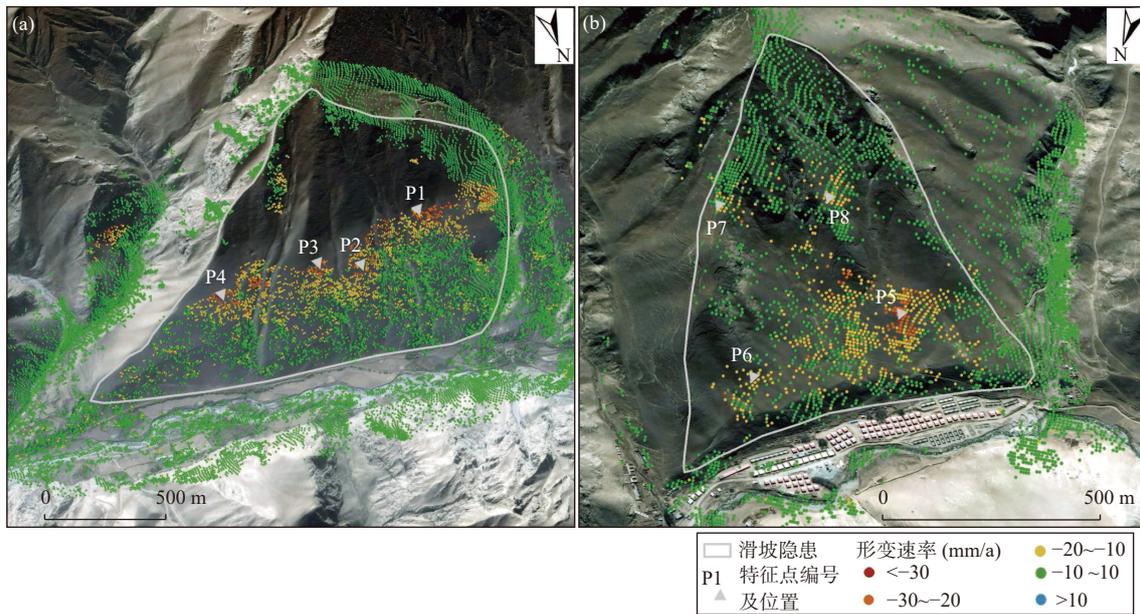


图8 典型滑坡隐患点形变图

Fig. 8 Deformation map of typical landslide potential dangers

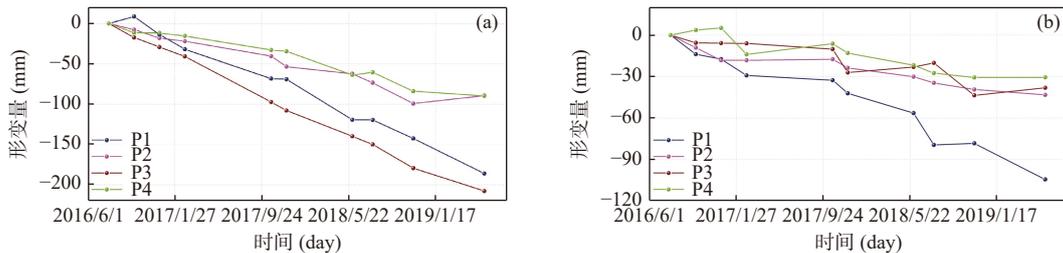


图9 特征点时间序列形变图

Fig. 9 Time series deformation diagram of feature points

4个特征点在整个监测周期内基本呈现缓慢变形,但也出现了几次加速波动,在2016.12.16~2017.2.24、2017.10.20~2017.12.1和2018.6.1~2018.11.16时间段内,P5、P7和P8均先后出现相对较大的加速波动,这3个时间段基本属于雨季和雪季,推测受降雨或融雪因素的影响,发生加速变形现象。

H5和H9均为中型滑坡隐患,通过野外调查验证,两处滑坡隐患的覆盖层均较薄,多以浅层表土移动为主,滑坡中部、下部覆盖黄土层变厚,遇降雨或融雪,雨水下渗后发生变形,变形以蠕变为主。预测滑坡隐患后期仍以缓慢蠕变为主,遇地震叠加降雨或融雪因素可能会发生剧烈变形破坏,发生滑坡地质灾害。

5 结论

(1)采用10景L波段ALOS-2数据和98景C波段

Sentinel-1数据,基于SBAS-InSAR技术获取到叶城县西合休乡的地表形变速率结果,共识别出22处滑坡隐患。通过野外验证,其中20处滑坡隐患有明确的威胁对象,定义为滑坡隐患点,验证准确率为91%。InSAR监测结果与实际的情况较为吻合,证明了多源InSAR技术在大尺度范围内识别滑坡隐患的准确性和有效性。

(2)基于ALOS-2数据形变及野外验证结果显示,两处典型滑坡隐患H5和H9的形变区主要均分布于滑坡体的中下部区域,H5隐患点的形变范围及形变量级整体比H9隐患点的大,P3点的累积形变量较高,约为-208 mm。两处滑坡隐患整体上呈现匀速变形状态,但也出现了几次加速波动,基本位于雨季和雪季,推测受降雨或融雪因素的影响,发生加速变形现象。

(3)研究区地表变形主要受地表薄层黄土地貌,麻扎、康西瓦等活动断裂的影响,降水入渗导致抗剪强度以及岩土体层内、层间的摩擦阻力的变化的主导

作用的影响, 以及人类工程活动的加剧作用的影响等, 多种自然因素和人为因素的共同作用最终导致研究区滑坡灾害频发。

针对本次的研究结果, 可应用到更大的范围内, 进行广域的滑坡隐患的识别与监测, 获取其更长时间的动态形变特征, 也可进行滑坡失稳机理的研究, 为叶城地区的地质灾害识别、监测与防治, 甚至预警提供数据支持。

参考文献(References):

- 黄润秋. 20世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 433-454.
- HUANG Runqiu. Large-scale Landslides and Their Sliding Mechanisms in China Since the 20th Century[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(3): 433-454.
- 廖明生, 王腾. 时间序列 InSAR 技术与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- LIAO Mingsheng, WANG Teng. Time Series InSAR Technology and Applications[M]. Beijing: Science Press, 2014.
- 栗明明, 王艳利. 基于时序 InSAR 技术的地表形变监测技术研究[J]. 工程勘察, 2021, 49(7): 60-67.
- LI Mingming, WANG Yanli. Research on Ground Deformation Monitoring Based on Time Series InSAR[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2021, 49(7): 60-67.
- 李万林, 周英帅. 基于 D-InSAR 技术的地质灾害和监测预警[J]. 测绘工程, 2021, 30(1): 66-70.
- LI Wanlin, ZHOU Yingshuai. Early Warning and Monitoring of Geohazards Based on D-InSAR Technology[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2021, 30(1): 66-70.
- 李晓恩, 周亮, 苏奋振, 等. InSAR 技术在滑坡灾害中的应用研究进展[J]. 遥感学报, 2021, 25(2): 614-629.
- LI Xiao'en, ZHOU Liang, SU Fenzhen, et al. Application of InSAR Technology in Landslide Hazard: Progress and Prospects[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2021, 25(2): 614-629.
- 孙萍萍, 张茂省, 贾俊, 等. 中国西部黄土区地质灾害调查研究进展[J]. 西北地质, 2022, 55(3): 96-107.
- SUN Pingping, ZHANG Maosheng, JIA Jun, et al. Progress in Geological Hazard Investigation and Research in Loess Regions of Western China[J]. Northwestern Geology, 2022, 55(3): 96-107.
- 许强, 董秀军, 李为乐. 基于天-空-地一体化的重大地质灾害隐患早期识别与监测预警[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2019, 44(7): 957-966.
- XU Qiang, DONG Xiujun, LI Weile. Integrated Space-Air-Ground Early Detection, Monitoring and Warning System for Potential Catastrophic Geohazards[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, 44(7): 957-966.
- 许强, 郑光, 李为乐, 等. 2018年10月和11月金沙江白格两次滑坡-堰塞堵江事件分析研究[J]. 工程地质学报, 2018, 26(6): 1534-1551.
- XU Qiang, ZHENG Guang, LI Weile, et al. Study on Successive Landslide Damming Events of Jinsha River in Baige Village on October 11 and November 3, 2018[J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(6): 1534-1551.
- 杨迁, 王雁林, 马园园. 2001~2019年中国地质灾害分布规律及引发因素分析[J]. 地质灾害与环境保护, 2020, 31(4): 43-48.
- YANG Qian, WANG Yanlin, MA Yuanyuan. Distribution Rule and Influencing Factors of Geological Disasters from 2001 to 2019 in China[J]. Geological Hazards and Environmental Protection, 2020, 31(4): 43-48.
- 杨成生, 李晓阳, 张勤, 等. 基于 InSAR 技术的尼泊尔辛杜帕尔乔克区震后滑坡监测与分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(10): 1684-1696.
- YANG Chengsheng, LI Xiaoyang, ZHANG Qin, et al. Monitoring and Analysis of Post-Earthquake Landslide in Sindhu-palchowk District, Nepal Based on InSAR Technology[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2023, 48(10): 1684-1696.
- 杨明远, 李鑫, 徐登峰. 新疆叶城县西合休乡西合休村崩塌泥石流地质灾害特征[J]. 中国金属通报, 2021, (5): 212-213.
- YANG Mingyuan, LI Xin, XU Dengfeng. Geological Disaster Characteristics of Collapse and Debris Flow in Xihexiu Village, Xihexiu Township, Yecheng Country, Xinjiang[J]. China Metal Bulletin, 2021(9): 212-213.
- 张路, 廖明生, 董杰, 等. 基于时间序列 InSAR 分析的西部山区滑坡灾害隐患早期识别-以四川丹巴为例[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2018, 43(12): 2039-2049.
- ZHANG Lu, LIAO Mingsheng, DONG Jie, et al. Early Identification of Landslide Hazards in Western Mountainous Areas Based on Time Series InSAR Analysis: A case study of Danba, Sichuan[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2018, 43(12): 2039-2049.
- 朱建军, 胡俊, 李志伟, 等. InSAR 滑坡监测研究进展[J]. 测绘学报, 2022, 51(10): 2001-2019.
- ZHU Jianjun, HU Jun, LI Zhiwei, et al. Recent Progress in Landslide Monitoring with InSAR[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2022, 51(10): 2001-2019.
- Berardino P, Fornaro G, Lanari R. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferometry[J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 2002, 40(11): 2375-2383.
- Feng G C, Hetland E A, Ding X L, et al. Coseismic fault slip of the 2008 Mw 7.9 Wenchuan earthquake estimated from InSAR and GPS measurements[J]. Geophysical Research Letters, 2010, 37(1).
- Zebker H A, Rosen P A, Goldstein R M, et al. On the derivation of coseismic displacement fields using differential radar interferometry: The Landers earthquake[J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 2002, 99(B10): 19617-19634.