



光学影像配准和相关性分析方法（COSI-Corr）在地表形变监测中的应用综述

寇俊阳，邹小波，毛磊

Co-registration of Optically Sensed Images and Correlation (COSI-Corr) applications in ground deformation measurement

Kou Junyang, Zou Xiaobo, and Mao Lei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19987/j.dzkxjz.2024-016>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

云南省双震与数字化定点形变同震阶变初探

Preliminary study on co-seismic deformation steps of digital fixed-point and double earthquakes in Yunnan Province
地震科学进展. 2020(2): 32–35

基于支持向量机上海地区土体物理力学指标相关性研究

Correlations between physical and mechanical property indexes of Shanghai soil based on support vector machine
地震科学进展. 2023, 53(2): 66–76

安康地区地形变资料同震形变波特征分析

Study on co-seismic deformation wave characteristics of crustal deformation observation records in Ankang area
地震科学进展. 2022(10): 487–494

兴安盟区域断裂带与地表温度场变化特征研究

Study on characteristics of regional fault zone and surface temperature change in Xing'an League
地震科学进展. 2023(9): 416–422

地震地形变观测系统的组成、发展及应用

The composition, development and application of crustal deformation observation system in earthquake monitoring and prediction
地震科学进展. 2020(10): 23–29

地面三维激光扫描仪在建（构）筑物测量分析中的应用综述

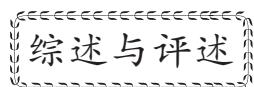
A review of application of terrestrial laser scanning in building seismic damage analysis
地震科学进展. 2023(7): 289–295



关注微信公众号，获得更多资讯信息

寇俊阳, 邹小波, 毛磊. 光学影像配准和相关性分析方法(COSI-Corr)在地表形变监测中的应用综述 [J]. 地震科学进展, 2025, 55(4): 187-196. doi:10.19987/j.dzqxjz.2024-016

Kou J Y, Zou X B, Mao L. Co-registration of Optically Sensed Images and Correlation (COSI-Corr) applications in ground deformation measurement[J]. Progress in Earthquake Sciences, 2025, 55(4): 187-196. doi:10.19987/j.dzqxjz.2024-016



光学影像配准和相关性分析方法(COSI-Corr) 在地表形变监测中的应用综述

寇俊阳 邹小波^{*} 毛 磊

(甘肃省地震局, 甘肃兰州 730000)

摘要 传统的光学遥感变化监测方法, 由于需要额外的数据支持, 无法消除观测系统和地形等的误差影响, 且相关分析存在偏差, 精度较低, 操作困难, 因而难以广泛应用于地表形变监测等方面。采用光学影像配准和相关性分析(Co-registration of Optically Sensed Images and Correlation, COSI-Corr)方法, 无需地面控制点, 可以实现影像的高精度配准和地表位移测量, 且由于其广泛的适用性与较高的精度, 已成为地表变形研究领域的一个热点, 引起了研究者的广泛关注。本文首先探讨了 COSI-Corr 的技术原理和分析流程, 并对该方法在大震同震位移测量、冰川变化监测、滑坡活动监测等方面的实际应用及其优点进行了详细介绍。最后讨论了该方法应用中的关键问题和发展前景。研究表明: 光学影像配准和相关性分析方法(COSI-Corr)操作简单、效率高、分辨率高达 1/10 像素, 可用的遥感影像数据多, 并且可以应用于 LiDAR 差分研究中, 与 InSAR 具有互补性, 该方法可以广泛地应用在地表形变监测当中。

关键词 COSI-Corr; 亚像元; 正射校正; 图像配准; 重采样; 相关分析; 地表形变监测

中图分类号: P315.72⁺⁵ **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-7780(2025)04-0187-10

doi: 10.19987/j.dzqxjz.2024-016

Co-registration of Optically Sensed Images and Correlation (COSI-Corr) applications in ground deformation measurement

Kou Junyang, Zou Xiaobo, Mao Lei

(Gansu Earthquake Agency, Gansu Lanzhou 730000, China)

Abstract Traditional optical remote sensing change detection methods can't eliminate the error induced by the imaging system and terrain, due to the need for external information from global positioning system (GPS) measurements. And these methods have low measuring precision, biased correlation techniques, implementation difficulties, cannot be applied to monitor surface deformation widely. Co-registration of Optically Sensed Images and Correlation (COSI-Corr) software accurately co-registers images, measures local displacements, and does not require ground control points. COSI-

收稿日期: 2024-01-20; 采用日期: 2024-08-26。

基金项目: 中国地震局兰州地震研究所地震科技发展基金(2020Q11), 甘肃省青年科技基金计划(23JRRA1569, 22JR11RA088)和中国地震局监测、预报、科研三结合课题(3JH-202401095)共同资助。

第一作者: 寇俊阳(1990-), 男, 工程师, 主要从事地震监测、活动构造与构造地貌研究。E-mail: koujunyang2008@163.com。

* 通信作者: 邹小波(1987-), 男, 高级工程师, 主要从事地震监测、活动构造与构造地貌研究。E-mail: nuzou@163.com。



COSI-Corr has become a hot spot in the field of surface deformation because of its wide applicability and high accuracy. We discuss the principles and process of analysis of COSI-Corr and introduce some applications of the technique, such as coseismic deformation measurement, the glacier change monitoring, monitoring of landslide activities. We describe the advantages of COSI-Corr. Finally, key problems with COSI-Corr application and its prospects are discussed. We show that COSI-Corr is an efficient and versatile tool. Its accuracy is higher than 1/10 of the pixel size. Additionally, the availability of high-quality optical satellite images is increasing. This approach can be applied to LiDAR and is complementary to InSAR. COSI-Corr method can be widely used to monitor surface deformation.

Keywords COSI-Corr; sub-pixel; orthorectification; co-registration; resample; correlation; ground deformation measurements

0 引言

在地震、滑坡、冰川等构造或地貌活动过程中，地壳浅表层会发生大范围的形变。地表形变的监测对这些地质过程的内在机理研究具有重要意义。目前，地表形变监测方法主要有野外实地测量、GNSS 全球导航卫星系统、合成孔径雷达干涉法 (InSAR) 测量等，但是这些方法都有其局限性。恶劣的环境会给野外测量工作带来很多困难，另外地表变化具有非常复杂的几何形态，并且分布范围大，而实地考察测量很难细致的分辨几何形态及分布范围。同时由于时间、人力和财力等的限制，测量的位移量点及位移精度也是有限的，从而影响对详细位移分布特征的判断；而 GNSS 全球导航卫星系统具有测量精度高、实时连续监测等优点，但由于是基于点的形变测量，其空间分辨率较低，这些都不可避免会给大区域的地表形变带来影响；虽然合成孔径雷达干涉法 (InSAR) 是基于面的形变监测，然而该方法也有其弱点：①对相位失相关很敏感，因此对于失相关严重地区无法提供形变细节；②为获得形变场必须进行相位解缠，需要进行大量计算；③只能监测到雷达视线方向上的一维形变量，不能完全反映监测地区的形变^[1]。

近年来随着空间对地观测、图像处理等技术的发展，在农业、森林采伐、城市建设等领域开始利用光学卫星影像和航片进行变化监测，而如果光学影像配准精度足够高，由于地质地貌过程而引起位移变化也可用该方法进行监测。借助于光学影像融合和相关性分析方法对地表形变进行监测，通过对变形前后光学影像(航片和卫片)进行高精度配准融合和相关性分析，可以直观地给出地表变形特征图像以及各种定量信息^[1-3]。基于该方法的理论基础，Leprince 等^[4]开发了软件包 COSI-Corr (Coregistration of Optically Sensed Images and Correlation)，该软件具有高精度、高效率、操作简单等优点。COSI-Corr 技术原理与 InSAR

类似，但有两个优势互补：①俯视图像三维，而不像 InSAR 技术那样受 Line of Sight 方向 (1~1.5 维) 的局限；②使用高精度的卫片 (如 2.5mSPOT) 和类似精度的航片，分辨率和精度远大于 InSAR 图像，尤其是在近断层变形，InSAR 干涉图像往往出现杂乱的、图像不相干的区域，COSI-Corr 显示强大优势，与 InSAR 具互补性，目前该技术已经可以移植到 LiDAR 差分研究中^[5-8]。

研究人员采用该方法，对 1992 年 Landers $M_w7.3$ 地震^[4, 9]、2005 年克什米尔 $M_w7.6$ 地震^[3]、1999 年 Izmit $M_w7.4$ 和 Duzce $M_w7.1$ 地震^[10]、1999 年 Hector Mine $M_w7.1$ 地震^[4]、La Valette 滑坡^[11]、Tasman 冰川^[12]等进行了相关研究，取得了很好的结果。光学影像配准和相关性分析方法 (COSI-Corr) 以其高精度、高效率、覆盖范围广、不受地面条件限制等独特优势，使其成为地表形变观测的一种重要工具，也是对其他测量手段的有益补充^[3, 9, 11, 13]。

1 COSI-Corr 技术原理

COSI-Corr 是 Jean-Philippe Avouac 研究组多年开发的一个独立计算分析软件^[4]，其原理是利用高精度卫星影像或航片像对，即使用同一地区变形前与变形后的影像通过高精度的正射校正和配准后，利用亚像元识别匹配算法，进行融合和相关性分析来提取像元群运动场，得到地表形变场。

COSI-Corr 软件最初是为了通过震前和震后的卫星影像或航片来提取同震形变场而开发的。利用该方法提取地表形变场仅需要地形 DEM (Digital Elevation Model) 数据以及观测平台的辅助数据，而不需要其他额外的数据如 GPS 控制点等，它不仅可以应用在地震地质中，也可以用来测量物体的移动或做精细校准。该技术方法可以达到比原图像像素大小还要小 10 倍的亚像素级别精度。

地表位移偏移量是通过不同时间的两幅光学影像之间进行相位相关性分析而得到, 精确的影像配准是该技术应用的关键。例如在同震位移监测中, 其精度要求达到1 m, 比一般PAN影像的10 m左右分辨率要小得多, 这就要求配准精度要小于像素大小, 达到亚像素级别。由于光学成像系统的成像机制、成像平台的不同、成像过程卫星平台运动以及姿态变化、地形影响、参考影像高程误差以及重采样误差等问题都会影响配准的精度, 使得光学影像需要进行精确的配准以消除轨道与地形、观测系统等误差的影响, 以使最后测量的精度达到要求。

为了对遥感影像进行高精度配准, 需要将遥感影像投影并重采样到同一参考系下。一种方法是将一幅影像定义为参考影像, 将另一幅投影并重采样到该参考影像的参考系下, 该方法主要应用在雷达干涉测量中。另一种方法为将遥感影像都投影并重采样到独立于卫星成像系统的地面参考系中。该方法适合于不同的成像系统, 并且地面投影影像更适合地表位移监测, 一般选用第2种方法对数据进行处理^[14-19]。

1.1 正射校正模型

推扫式成像系统的光学成像部分都是固定的, 通过遥感平台的运动对目标地物进行成像扫描。对遥感影像进行正射校正时需要构建物理模型来建立原始影像坐标与制图坐标之间的转换关系。正射校正时有2种校正模型。

直接正射校正模型是计算原始影像中每个像元的地理坐标, 需要将成像系统的焦平面投影到规定的格网上; 但重采样时会破坏原始影像中的亚像元信息, 在精度要求亚像元级别的应用中, 图像的重采样必须要保持来自原始数据中的亚像元信息^[4], 故该方法不适用。

由于视差与图像畸变的存在, 为了满足正射校正时严格的要求, 并保留亚像元信息。Leprince等^[4]采用了一种反变换模型预先在地面建立一个规则的格网, 然后利用卫星影像的辅助数据和DEM数据, 求地面格网每个点在原始像平面中的像元坐标, 该坐标值为实数。

其具体方法原理如下:

$\vec{u}_3(x, y), (x, y) \in \mathbf{R}^2$ 为卫星的视向矢量。 $M(x_M, y_M, z_M)$ 为地面已知点, 其高程 h 可通过DEM数据获得。要找出与已知点 M 相对应像素的像元坐标 (x, y) , 相当于计算出 (x, y) 使得函数 $\Phi(x, y)$ 取最

小值。

$$\Phi(x, y) = \left\| \overrightarrow{O_3M} - \overrightarrow{O_3M'} \right\|_2^2 \quad (1)$$

式中, M' 为视向矢量为 \vec{u}_3 时卫星的位置 P 在沿视向 \vec{u}_3 在投影平面 $P(M)$ 上的点。 O_3 为笛卡尔坐标系中地球的中心。投影平面 $P(M)$ 为过点 M 与 $\overrightarrow{O_3M}$ 垂直的平面(图1)。 $M(x_M, y_M, z_M)$ 和 $M'(\alpha, \beta, \gamma) \in P(M)$ 且满足 $\overrightarrow{O_3M} \cdot \overrightarrow{MM'} = 0$, 则有:

$$x_M\alpha + y_M\beta + z_M\gamma - (x_M^2 + y_M^2 + z_M^2) = 0 \quad (2)$$

由几何关系 $\overrightarrow{O_3M'}(x, y) = \overrightarrow{O_3P}(x, y) + t^* \cdot \vec{u}_3(x, y)$, 可得:

$$t^* = \frac{d - x_M P_x - y_M P_y - z_M P_z}{x_M u_{3x} + y_M u_{3y} + z_M u_{3z}} \quad (3)$$

其中, $d = x_M^2 + y_M^2 + z_M^2$, $\vec{u}_3 = (u_{3x}, u_{3y}, u_{3z})$, $\overrightarrow{O_3P} = (P_x, P_y, P_z)$ 。

通过公式(1)、(2)、(3)以及卫星影像的辅助数据确定像元坐标 (x, y) 与视向矢量 $\vec{u}_3(x, y)$ 关系, 计算出函数 $\Phi(x, y)$ 取最小值时, 原始像平面中像元坐标 (x, y) , 即为与已知点 M 相对应像素的像元坐标。计算出地表格网上每个点对应的像素的像元坐标。重采样时将利用这种反变换模型^[4]。

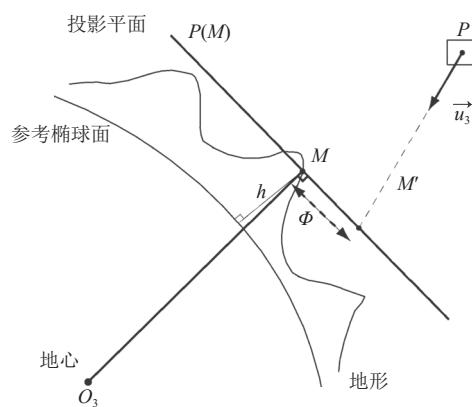


图1 反变换模型原理图^[4]

Fig. 1 Inverse orthorectification model^[4]

1.2 影像重采样

由于通过反变换模型计算出的像元坐标 (x, y) 一般不为整数, 即不在原图像像元的中心处, 需要进行插值处理。在重采样中最常用的方法有: 最邻近法、双向线性内插法、三次卷积内插法。但是这些内插值方法都会使重采样时产生混淆现象, 进而造成配准时相关分析的偏差, 降低配准的精度。为了保留亚像元的像元信息以及避免混淆现象, 提高配准精度, Leprince等^[4]在重采样时, 利用反变换正射校正

模型中生成的变换矩阵，选择辛格函数进行插值。

1.3 相关性分析

光学影像高精度配准时的控制点优化和两幅影像相同特征点的相对位移测量，均需要利用相关性分析来提取偏移量。Leprince 等^[4]利用相位相关方法来提取相对位移。该方法基于傅里叶相移理论，当两幅影像互相关达到最大时，即两幅影像高精度配准后。可以通过两幅影像的傅里叶变换的相位差来提取相对位移。 i_1 、 i_2 为两幅影像，他们之间的相对位移为 Δ_x 、 Δ_y 。则有：

$$i_2(x, y) = i_1(x - \Delta_x, y - \Delta_y) \quad (4)$$

由傅里叶相移理论可知：

$$I_2(\omega_x, \omega_y) = I_1(\omega_x, \omega_y) e^{-j(\omega_x \Delta_x + \omega_y \Delta_y)} \quad (5)$$

式中， I_1 、 I_2 为 i_1 、 i_2 的傅里叶变换， ω_x 、 ω_y 分别为影像中 x 、 y 方向的频率变量。则 i_1 、 i_2 归一化互功率谱为：

$$C_{i_1 i_2}(\omega_x, \omega_y) = \frac{I_1(\omega_x, \omega_y) I_2^*(\omega_x, \omega_y)}{|I_1(\omega_x, \omega_y) I_2^*(\omega_x, \omega_y)|} = e^{j(\omega_x \Delta_x + \omega_y \Delta_y)} \quad (6)$$

式中，*表示复共轭。则由傅里叶相移理论，当函数 ϕ 最小时，影像配准精度最高，相应的 Δ_x 、 Δ_y 即为 i_1 、 i_2 两幅影像的相对位移。

$$\phi(\Delta_x, \Delta_y) = \sum_{\omega_x=-\pi}^{\pi} \sum_{\omega_y=-\pi}^{\pi} W(\omega_x, \omega_y) |C_{i_1 i_2}(\omega_x, \omega_y) - e^{j(\omega_x \Delta_x + \omega_y \Delta_y)}|^2 \quad (7)$$

式中， $W(\omega_x, \omega_y)$ 为加权矩阵， $C_{i_1 i_2}(\omega_x, \omega_y)$ 为计算得到的 i_1 、 i_2 两幅影像归一化互功率谱， $e^{j(\omega_x \Delta_x + \omega_y \Delta_y)}$ 为理论的归一化互功率谱。

2 COSI-Corr 分析流程

光学影像配准和相关性分析方法(COSI-Corr)是一种无需地面控制点的自动化数据处理方法，利用影像采集时的遥感影像辅助数据(ancillary data)和经过投影和重采样的与影像分辨率相当的地形数据(DEM)，可以消除轨道与地形、观测平台等引起的误差影响。下面以提取1999年10月美国加利福尼亚州的赫克托矿区域的 $M_W 7.1$ 大地震的同震变形为例，来介绍其主要技术流程^[4]。图2为数据处理流程图。

2.1 定义地震前后两幅卫星影像的辅助数据

利用卫星影像的头文件生成通用文件格式(.anc)的卫星影像辅助数据(ancillary data)，对影像数据进

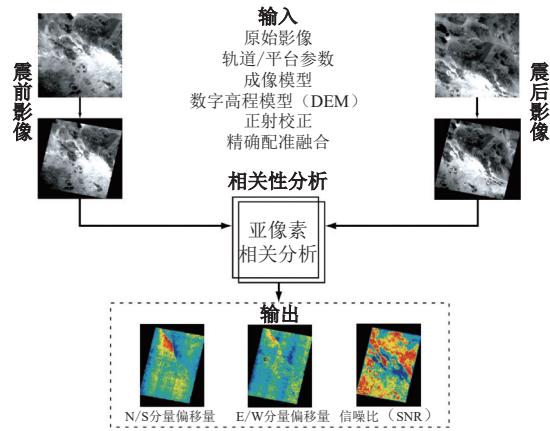


图2 数据处理流程图^[4]

Fig. 2 Flow chart of data procesing^[4]

行几何精校正。辅助数据有影像获取时卫星的轨道信息、视向、姿态、地面分辨率、行列数等信息。

2.2 正射校正震前影像

(1)利用精确正射校正过的遥感影像作为参考影像。如果没有正射校正过的参考影像，则利用DEM影像数据以及震前影像采集时的太阳高度角和太阳方位角信息生成地形晕渲图(shaded_DEM)，并将其作为参考影像对震前影像进行正射校正。

(2)构建地面控制点(Ground Control Points, GCPS)使震前影像与DEM数据精确的配准。GCPS可以是带有经纬度和高程的GPS点，也可以是通过与参考影像建立同名点(同名点尽量避开断层附近的形变区域，如果参考影像为地形晕渲图，同名点至少需要15个，以保证精度)，然后利用参考影像的地理参考系参数和DEM将同名点转换成为GCPS，再通过DEM和参考影像、影像辅助数据对控制点进行统计相关性(由于参考影像为DEM生成的，所以采用统计相关法)分析，进行多次迭代优化，得到精确地面控制点，以优化卫星视向参数。

(3)通过优化好的控制点、卫星影像辅助数据和DEM，对地震前的影像进行正射校正和重采样，重采样采用精度最高的辛格(SINC)算法。

2.3 正射校正震后影像

将得到的精确正射校正过的震前影像作为参考影像，重复步骤2的操作，对震后影像进行正射校正。由于参考影像为光学影像，采用频率相关法精度更高，所以对控制点进行迭代优化时，采用频率相关性分析。

2.4 经过正射校正后的震前影像和震后影像进行相关性分析

高精度的配准是COSI-Corr的先决条件，相关性

分析之前,不同的影像数据需要投影和重采样到相同的参考系中,对经过精确配准的两幅影像进行相位相关性分析,由傅里叶相移理论可知,可通过相位相关运算得到的相位差来推算地震引起的地表位移。将震前和震后经过正射校正和重采样后生成两幅影像进行相关分析,采用频率相关分析法,一般设置滑动窗口大小为 32×32 ,步长为8。输出为地表位移量文件,包含EW向及SN向的位移量及SNR值。

3 研究实例分析

Leprince等^[4]最初研制COSI-Corr方法是为了利用不同成像系统以及存在视差的影像来提取同震位移。由于其广泛的适用性,亚像元级别的测量精度,简单高效的操作流程,该方法的应用范围得到极大的拓展。在很多研究中都表现出了良好的效果,具有非常大的潜力。

3.1 同震位移

对大地震产生的地表破裂的研究,是弄清大地震发震机理的重要途径。以往对地震破裂带特征的研究,主要基于野外实地测量的数据,比如破裂带的几何展布及长度、位移量大小等。但是野外实地测量有很多局限性,如许多大地震发生在偏远地区,甚至无人烟的高海拔、地形起伏较大、自然环境恶劣的地区,给调查工作带来了很多困难。地震破裂带有时候具有非常复杂的几何形态,同震应变分布在整个构造带内,而实地考察测量很难细致地分辨断裂结构及应变分布范围;而且由于时间、人力和财力等的限制,测量的位移量点及位移精度也是有限的,从而影响对详细位移分布特征的判断。另外,虽然也可以使用合成孔径雷达干涉法(SAR)测量同震位移,但是在大位移量的近场区,由于图像相关性很差而往往使该方法失效。

近年来,由于遥感卫星、图像处理等技术的发展,研究人员可以借助于光学卫星影像克服实地测量的各种限制。利用光学影像配准和相关性分析技术,对震前和震后的光学影像(航片和卫片)对比,可以直观地给出整个地震破裂带变形特征图像以及各种定量信息^[1, 9]。例如,研究人员使用航片的融合和相关分析,精确绘制了1992年Landers地震的地表破裂带及沿断裂带的位移量^[2],并与以往野外详细测量结果相对比,结果发现两者破裂带几何展布非常吻合,使用航片测量的同震位移大小也和野外测量结果相符,但数量比后者多很多。对于相对较小的

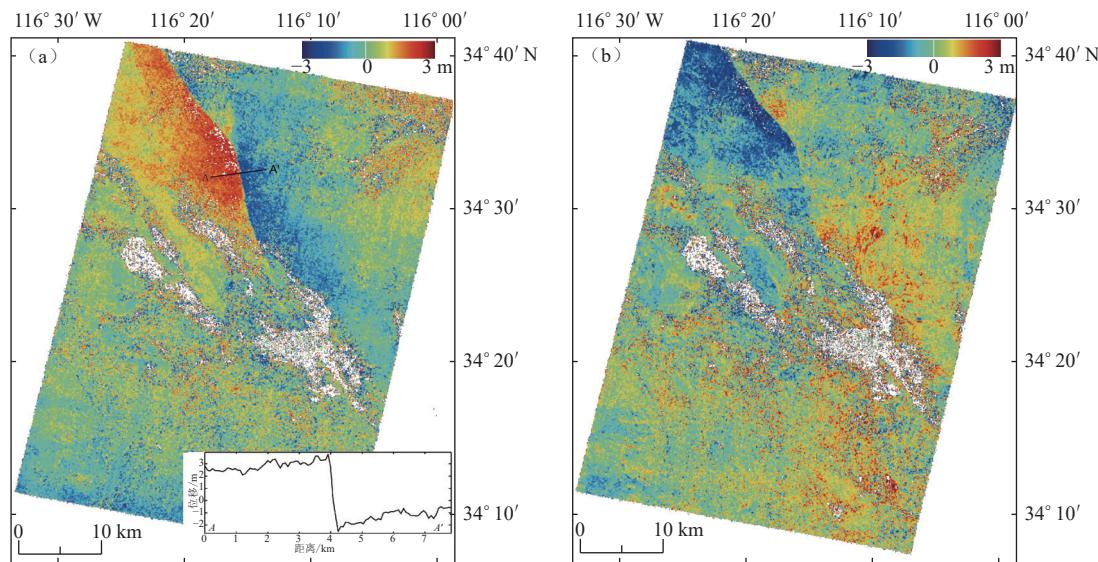
破裂,野外无法测量其位移,但利用该方法却可以精确测量。Michel等^[2]根据横跨断层的同震变形剖面,还发现研究区变形带多集中于50 m的宽度范围内,但在地表破裂空区的地方,变形带宽度却达2 km,反映了岩石应变分布特征与地表破裂出露之间的关系,从而有助于理解地震地表破裂带多不连续分布的特点。另外研究人员还通过该方法,对2005年克什米尔 $M_W7.6$ 地震^[3]、1999年Izmit $M_W7.4$ 和Duzce $M_W7.1$ 地震^[10]、1999年Hector Mine $M_W7.1$ 地震^[4]所产生的地表破裂带几何展布及位移分布等作了相关研究,在中强地震同震变形带分布特征等方面取得了新的研究成果。

Leprince等^[11]运用COSI-Corr方法对1999年10月美国Hector Mine $M_W7.1$ 大地震的震前和震后影像进行配准和相关性分析,得到同震位移场(图3)。选用1998年8月获取的SPOT4影像作为震前影像,2000年8月获取的SPOT2影像作为震后影像。选取研究区内的SRTM DEM数据,考虑到SRTM DEM数据的分辨率与SPOT影像差异较大,在进行数据处理之前,将DEM数据通过辛格函数插值到空间分辨率10 m。对数据进行正射校正、配准、融合和相关性分析后得到该地震的同震位移场。研究结果显示,在断层附近北南向和东西向的地表位移量均为3~4 m,在断层附近北南方向最大位错量达6 m。可以清晰看出断层迹线,并且断层的滑移矢量可以通过地表位移得到。次一级滑移量为1 m的右旋断层破裂也很明显。通过COSI-Corr方法,无需额外的控制点,存在视差的影像也可以达到亚像元级别的精度。其他学者也利用此方法对数次大地震的同震形变场进行了研究,都取得了比较好的结果。

需要特别指出的是,受传感器饱和以及洪积层变化的影响,COSI-Corr的测量结果中存在失相关区域。需要对这些失相关区域进行去除。另外,由于该方法原理决定了控制点选取时需要远离形变区域,否则会影响测量结果。

3.2 冰川变化监测

全球性气候变暖的持续和冰川消退的加剧,对一些依靠冰雪融水的中亚和南亚地区产生重大影响,使这些地区水资源更加紧张。大尺度范围的大陆冰川活动监测和冰川动力学特征研究,是了解这些气候相关的水文变化及其对社会发展影响的重要途径。在高山偏远地区,人烟稀少,很多区域难以到达,给冰川监测工作带来了困难。传统的监测仪器只



(a) 北南向位移量, 插图为沿 AA' 剖面北南分量同震位移量; (b) 东西向位移量

图 3 Hector Mine 同震水平位移场

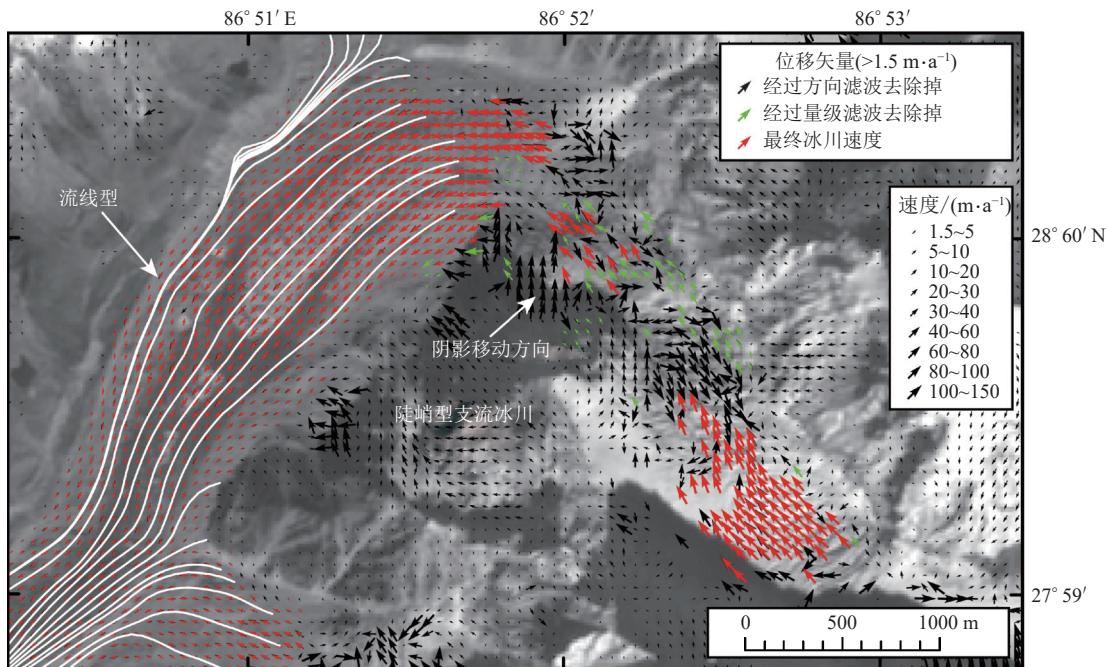
Fig. 3 Horizontal coseismic field of Hector Mine

能布设在人能够到达的一些非常有限的区域。监测的结果只代表这些覆盖非常稀疏的监测区域, 不能代表整个区域的结果。而运用遥感手段可以对大尺度的区域甚至整个研究区进行研究(图 4), 研究结果也更具代表性, 更具有科学价值。运用遥感手段可以追踪冰川几何学变化^[20-22]、分析检测冰面湖^[23]、确定冰川平衡线高度^[24]、估计冰川质量平衡^[25]、冰川运动

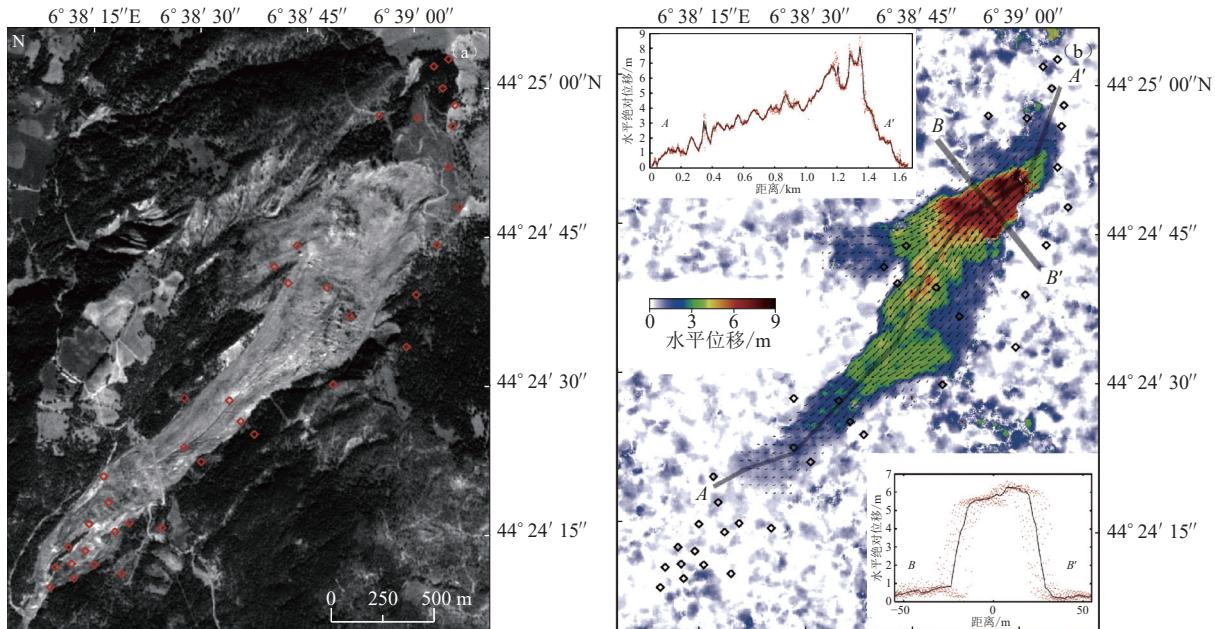
速度和流量损失^[26-29]等。

3.3 滑坡活动监测

滑坡是山区的一种常见的现象, 缓慢移动、深层滑坡是山区山坡侵蚀的主要机制。利用航片和卫片等遥感数据可以研究一些偏远地区难以接近的滑坡, 并且扩展了滑坡观测的时间尺度, 有助于滑坡和山坡地区地貌演化的研究。让滑坡三维动力学与土地

图 4 昆布冰川中心区域速度场^[11]Fig. 4 Velocity field of central Khumbu glacier^[11]

利用、构造地质、天气气候相结合的研究成为可能,从而更好地为滑坡预警和城市规划服务。Leprince 等^[4]利用 COSI-Corr 方法对法国 La Valette 滑坡的卫星影像进行相关性分析,得到间隔 11 个月的水平向绝对位移和位移矢量,其中最大的水平位移为 9 m。该结果显示的滑坡速度场与滑坡的地貌表现并不一致,并且具有更高的空间异质性(图 5)。



(a) La Valette 滑坡的正射校正 SPOT 影像,红色方块为野外大地测量基准点; (b) 水平绝对位移和位移矢量,沿 AA'纵剖面和 BB'横剖面绝对位移,黑色方块为野外大地测量基准点,可以看出有些活跃区域没有被大地测量注意到

图 5 La Valette 滑坡水平绝对位移和位移矢量图^[4]

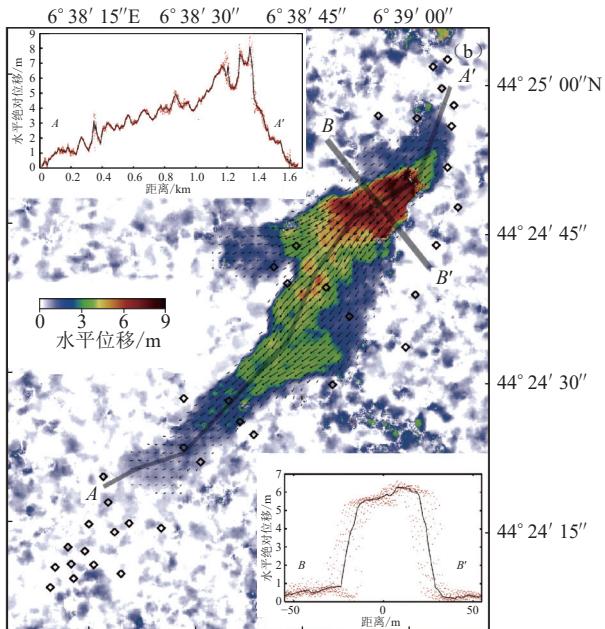
Fig. 5 Absolute horizontal displacement and displacement vectors of La Valette landslide^[4]

4 讨论与结论

本文根据前人研究结果,总结了光学影像配准和相关性分析方法(COSI-Corr)的技术原理以及数据处理流程,通过原理可知该方法的测量精度受到以下因素的限制:遥感影像分辨率、DEM 的有效精度、影像辅助数据的采样率和质量、辐射噪声、传感器饱和和混叠、影像间阴影长度和方位的差异、地物变化等。而数据结果的噪声主要来源有以下 3 个部分:①由于地物变化或者影像之间脉冲噪声造成结果中部分区域失相关产生的噪声;②地形数据误差、阴影差异、未修正的卫星姿态数据、传感器畸变造成的局部低频噪声;③地物微小变化、辐射噪声、传感器饱和和混淆等产生的高斯白噪声。

由于这些限制,在利用 COSI-Corr 方法进行研究时,要考虑卫星影像的成像日期和时间、卫星影像的分辨率、卫星影像陀螺仪的采样率和精度、是否需要

Booth 等^[15]对法国 La Clapière 滑坡的立体像对分析得到该滑坡地表移动速度和高程变化,利用重构的滑坡三维形变,反演得出滑坡的厚度、确定滑坡滑动面和滑坡体的体积(图 6)。此外根据反演得到滑坡厚度,利用基于切片的坡面稳定性分析方法^[30-31],可估算出库伦摩擦情况下,各滑动面上的摩擦强度。



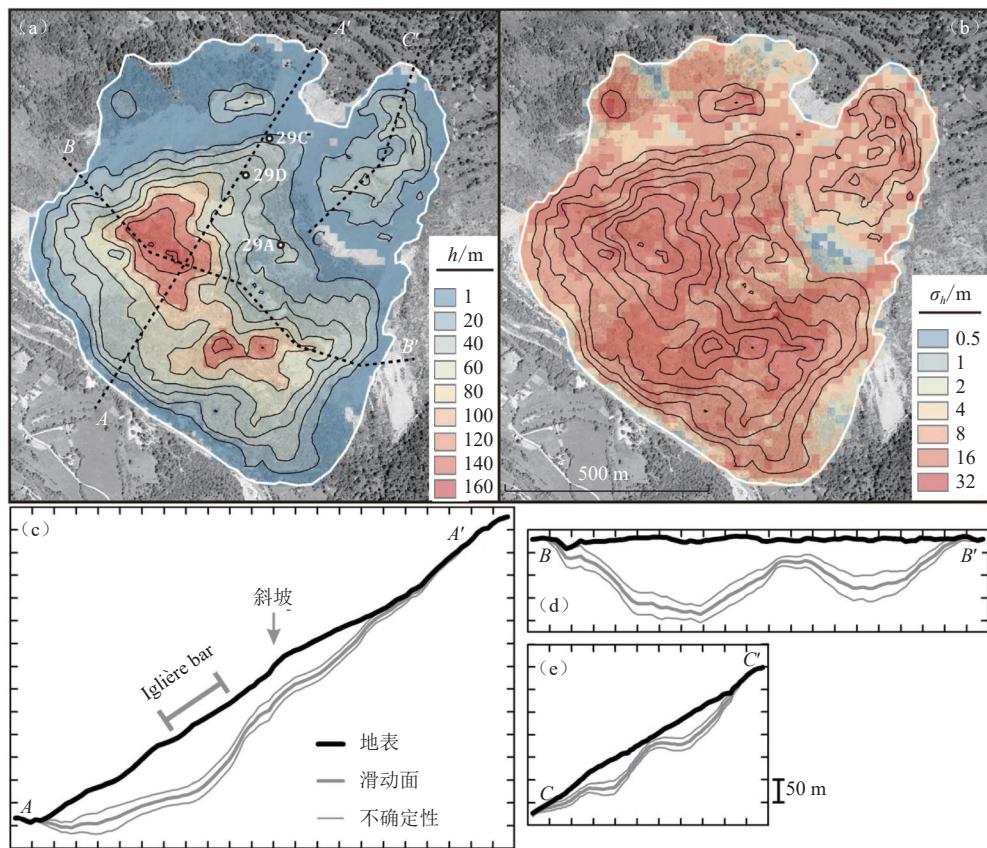
(a) La Valette 滑坡的正射校正 SPOT 影像,红色方块为野外大地测量基准点; (b) 水平绝对位移和位移矢量,沿 AA'纵剖面和 BB'横剖面绝对位移,黑色方块为野外大地测量基准点,可以看出有些活跃区域没有被大地测量注意到

图 5 La Valette 滑坡水平绝对位移和位移矢量图^[4]

Fig. 5 Absolute horizontal displacement and displacement vectors of La Valette landslide^[4]

立体像对、视差和地形数据误差等。如:在地震同震位移较小时,卫星影像的分辨率要足够高,以满足测量精度的需求;卫星影像的成像日期和时间也尽可能相同,以减弱地物变化和阴影差异的影响;在精度要求很高的应用中,尽量选取影像辅助数据采样率高、质量好的影像数据,并消除由于卫星姿态和轨道的不精确造成的误差;如需要进行垂向变化检测时,需要使用立体像对;尽量选取分辨率高的 DEM 数据,对 DEM 数据和视差引起的误差进行建模消除。此外,一定要选择无云覆盖重点研究区的遥感影像。

在进行数据处理时,控制点需要远离形变区域,控制点优化时要根据参考影像选择合适的相关分析方法(参考影像为光学影像,采用频率相关法;参考影像为地形晕渲图,采用统计相关法,且控制点个数至少需要 15 个)。重采样时,要选用精度更高的辛格(SINC)算法。



(a) 滑坡体厚度预测值 h ; (b) 滑坡体厚度预测值不确定性 σ_h 以及滑坡等厚线;
(c—e) AA'/BB'/CC' 垂向剖面图, 其中刻度为 50 m

图 6 滑坡体厚度预测图^[15]

Fig. 6 Predicted landslide thickness^[15]

尽管 COSI-Corr 的使用存在各种限制条件, 但由于其可以实现不同卫星系统的光学影像进行高精度配准, 减弱和消除了测量的不确定性, 不需要额外的控制点, 并且具有亚像元级别的高精度和广泛的适用性, 在地表形变监测中具有非常大的应用潜力, 这也从前人的研究中得到了印证。

随着技术的发展, 获取遥感影像越来越便捷, 成

本也会不断下降。遥感影像的分辨率会不断提高, 卫星辅助数据的采样精度、DEM 精度等也会得到提升, 影像的配准精度、变化监测精度也会随之提高。同时可以利用多时相立体像对提取地表水平以及垂向的位移变化。光学影像配准和相关性分析方法 (COSI-Corr) 将广泛的应用于自然灾害和环境变化等研究中。

参考文献

- [1] Van Puymbroeck N, Michel R, Binet R, et al. Measuring earthquakes from optical satellite images[J]. *Applied Optics*, 2000, 39(20): 3486-3494
- [2] Michel R, Avouac J P. Coseismic surface deformation from air photos: The Kickapoo step over in the 1992 Landers rupture[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2006, 111(B3): B03408
- [3] Avouac J P, Ayoub F, Leprince S, et al. The 2005, M_w 7.6 Kashmir earthquake: Sub-pixel correlation of ASTER images and seismic waveforms analysis[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 249(3/4): 514-528
- [4] Leprince S, Barbot S, Ayoub F, et al. Automatic and precise orthorectification, coregistration, and subpixel correlation of satellite images, application to ground deformation measurements[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(6): 1529-1558

- [5] 刘云华, 单新建, 屈春燕, 等. 亚像素相位相关法在获取汶川地震近场形变中的应用[J]. 地震地质, 2013, 35(1): 138-150
Liu Y H, Shan X J, Qu C Y, et al. Application of sub-pixel image correlation to near field ground deformation measurements of Wenchuan earthquake[J]. Seismology and Geology, 2013, 35(1): 138-150
- [6] 董晓燕. 基于影像匹配技术的地表形变监测研究[D]. 长沙: 中南大学, 2011: 45-61
Dong X Y. Coseismic deformation monitoring using image matching[D]. Changsha: Central South University, 2011: 45-61
- [7] 冯光财, 许兵, 单新建, 等. 基于 Landsat 8 光学影像的巴基斯坦 Awaran M_W 7.7 地震形变监测及参数反演研究 [J]. 地球物理学报, 2015, 58(5): 1634-1644
Feng G C, Xu B, Shan X J, et al. Coseismic deformation and source parameters of the 24 September 2013 Awaran, Pakistan M_W 7.7 earthquake derived from optical Landsat 8 satellite images[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(5): 1634-1644
- [8] 邓书斌. ENVI 遥感图像处理方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2010
Deng S B. ENVI remote sensing image processing method[M]. Beijing: Science Press, 2010
- [9] Ayoub F, Leprince S, Avouac J P. Co-registration and correlation of aerial photographs for ground deformation measurements[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2009, 64(6): 551-560
- [10] Konca A O, Leprince S, Avouac J P, et al. Rupture process of 1999, M_W 7.1 Duzce earthquake from joint analysis of SPOT, GPS, InSAR, strongmotion and teleseismic data[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2010, 100(1): 267-288
- [11] Leprince S, Berthier E, Ayoub F, et al. Monitoring earth surface dynamics with optical imagery[J]. Eos, Transactions American Geophysical Union, 2008, 89(1): 1-2
- [12] Herman F, Anderson B, Leprince S. Mountain glacier velocity variation during a retreat/advance cycle quantified using sub-pixel analysis of ASTER images[J]. Journal of Glaciology, 2011, 57(202): 197-207
- [13] Scherler D, Leprince S, Strecker M R. Glacier-surface velocities in alpine terrain from optical satellite imagery: Accuracy improvement and quality assessment[J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(10): 3806-3819
- [14] Tiwari R K, Gupta R P, Arora M K. Estimation of surface ice velocity of Chhota-Shigri glacier using sub-pixel ASTER image correlation[J]. Current Science, 2014, 106(6): 853-859
- [15] Booth A M, Lamb M P, Avouac J P, et al. Landslide velocity, thickness, and rheology from remote sensing: La Clapière landslide, France[J]. Geophysical Research Letters, 2013, 40(16): 4299-4304
- [16] 贺礼家, 冯光财, 冯志雄, 等. 哨兵-2号光学影像地表形变监测: 以 2016 年 M_W 7.8 新西兰凯库拉地震为例 [J]. 测绘学报, 2019, 48(3): 339-351
He L J, Feng G C, Feng Z X, et al. Coseismic displacements of 2016 M_W 7.8 Kaikoura, New Zealand earthquake, using Sentinel-2 optical images[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2019, 48(3): 339-351
- [17] 王乐洋, 邹阿健, 许光煜. 利用光学影像相关获取 2019 年 Ridgecrest 地震序列同震形变 [J]. 测绘工程, 2021, 30(4): 1-8, 13
Wang L Y, Zou A J, Xu G Y. Coseismic deformation of 2019 Ridgecrest earthquake sequence obtained by optical images correlation[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2021, 30(4): 1-8, 13
- [18] 王茗册, 何仲秋, 陈庭. 东安纳托利亚断裂带近期库仑应力演化及与 2020 年埃尔泽 M_W 6.8 地震的触发关系 [J]. 大地测量与地球动力学, 2022, 42(5): 526-532
Wang M C, He Z Q, Chen T. Recent coulomb stress evolution in the east Anatolian fault zone and its triggering relationship with the 2020 Elazığ M_W 6.8 earthquake[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2022, 42(5): 526-532
- [19] 康文君, 徐锡伟. 基于光学影像相关性匹配技术的 2023 年土耳其 M_W 7.8 与 M_W 7.5 双强震地表同震变形研究 [J]. 地质力学学报, 2024, 30(2): 289-297
Kang W J, Xu X W. Study on coseismic surface deformation of the 2023 Turkey M_W 7.8 and M_W 7.5 double strong earthquakes using optical image correlation method[J]. Journal of Geomechanics, 2024, 30(2): 289-297
- [20] Paul F, Käab A, Maisch M, et al. The new remote-sensing-derived swiss glacier inventory: I. Methods[J]. Annals of Glaciology, 2002, 34: 355-361
- [21] Singh S J, Dyurgerov M, Khromova T, et al. Space-based mapping of glacier changes using ASTER and GIS tools[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004, 42(19): 2177-2183
- [22] Aizen V B, Kuzmichenok V A, Surazakov A B, et al. Glacier changes in the Tien Shan as determined from topographic and remotely sensed data[J]. Global & Planetary Change, 2007, 56(3/4): 328-340
- [23] Wessels R L, Kargel J S, Kieffer H H. ASTER measurement of supraglacial lakes in the Mount Everest region of the Himalaya[J].

Annals of Glaciology, 2002, 34(1): 399-408

- [24] Rabatel A, Dedieu J P, Vincent C. Using remote-sensing data to determine equilibrium-line altitude and mass-balance time series: Validation on three French glaciers, 1994—2002[J]. Journal of Glaciology, 2005, 51(175): 539-546
- [25] Berthier E, Arnaud Y, Kumar R, et al. Remote sensing estimates of glacier mass balances in the Himachal Pradesh (Western Himalaya, India)[J]. Remote Sensing of Environment, 2007, 108(3): 327-338
- [26] Scambos T A, Dutkiewicz M J, Wilson J C, et al. Application of image cross-correlation to the measurement of glacier velocity using satellite image data[J]. Remote Sensing of Environment, 1992, 42(3): 177-186
- [27] Goldstein R M, Engelhardt H, Kamb B, et al. Satellite radar interferometry for monitoring ice sheet motion: Application to an Antarctic ice stream[J]. Science, 1993, 262(5139): 1525-1530
- [28] Joughin I, Abdalati W, Fahnestock M. Large fluctuations in speed on Greenland's Jakobshavn Isbrae glacier[J]. Nature, 2004, 432(7017): 608-610
- [29] Rignot E, Kanagaratnam P. Changes in the velocity structure of the Greenland ice sheet[J]. Science, 2006, 311(5763): 986-990
- [30] Fellenius W. Calculation of stability of earth dam[C]//Proceedings of the Second Congress on Large Dams. Washington, 1936: 445-462
- [31] Selby M J. Hillslope materials and processes[M]. New York: Oxford University Press, 1993