

DOI:10.13203/j.whugis20160031



文章编号:1671-8860(2018)06-0847-07

尼泊尔地震触发滑坡识别和雪崩形变分析

丁超¹ 冯光财¹ 周玉杉¹ 王会强¹ 杜亚男¹ 陈晨月¹

¹ 中南大学测绘与遥感科学系,湖南长沙,410083

摘要:2015-04-25 尼泊尔 Gorkha 附近发生了 Mw 7.8 级强震,引发尼泊尔及中国西藏地区大量的山体滑坡和雪崩灾害,造成了严重的人员伤亡与经济损失。基于 Landsat 8 影像和亚像素相关性匹配技术识别形变失相关区域,并结合目视解译提取震害滑坡与雪崩沉积区域,统计分析了所提取的滑坡数目、面积等与地形因子的关系,同时对珠峰雪崩高发区的冰川形变进行了定量分析。实验结果表明,提取形变场中的形变失相关区域并结合目视解译验证是一种识别震害滑坡与雪崩沉积区域的有效方法;统计结果显示滑坡体随坡度分布呈现高斯特性,多发生在坡度大于 30° 的地形,易发于河谷两侧,且高坡度更容易触发单体面积大的滑坡体。该研究为利用 Landsat 8 影像数据进行震害滑坡与雪崩沉积区域提取、雪崩高发区的冰川流速监测预警工作提供了新视角。

关键词:尼泊尔 Gorkha 地震;亚像素相关性匹配;滑坡;雪崩;冰川流速

中图分类号:P315

文献标志码:A

2015-04-25T14:11:00(北京时间)尼泊尔 Gorkha 附近发生了 Mw 7.8 级强震。截止 2015-05-28,尼泊尔及周边国家已有 8 964 人丧生,21 952 人受伤,300 余万人口无家可归^[1]。该地震所触发的大量山体滑坡、雪崩等次生灾害已造成了严重的人员伤亡与经济损失^[1-2]。

快速实现对震后山体滑坡、雪崩分布的监测对震后救灾和次生灾害的预防非常关键,遥感技术是滑坡等灾害监测的重要手段^[3-6]。目前,高分辨率光学影像已被广泛应用于震后滑坡的监测研究中,主要采取目视解译方法^[3]。该方法可以准确提取滑坡信息,为灾害救援工作提供详实的技术支持,已成功应用于多个地震案例^[3-4],但需要判读者具备丰富的遥感影像判读经验。除了目视解译的方法,遥感领域也发展了基于多波段分类与差值等自动化判读方法^[3,6]。近年来发展起来的影像亚像素相关性匹配技术^[7-9](sub-pixel correlation,SPC)已广泛应用于地震形变场的提取,如 2003 年 Bam 地震^[10]、2005 年 Kashmir 地震^[11]和 2013 年的巴基斯坦地震^[9,12]等。该技术的研 究 主 要 侧 重 形 变 信 息 的 获 取,失 相 关 信 息 一 般 只 作 为 噪 声 进 行 掩 膜 清 除。由于尼泊尔震区特

殊的地质和地势特点,本次震害滑坡、雪崩造成震害滑坡分布广泛,形变场存在较大比例的失相关噪声。基于研究现状与震区实际情况,本文以 Landsat 8 影像为主,综合遥感影像目视解译与 SPC 技术探讨从形变场失相关信息中提取震害滑坡与雪崩沉积区域的流程方法。

1 数据处理与分析

1.1 影像数据

Landsat 8 由美国国家航空航天局(NASA)在 2013-02-11 发射升空,全名为地球资源卫星数据连续性任务(Landsat Data Continuity Mission,LDCM)。与之前的系列卫星相比,Landsat 8 的全色波段(Band 8)的空间分辨率更高(15 m),能更好地监测地表地物变化,在气象条件允许的情况下非常适合大范围形变监测^[9,12]。此外,Landsat 8 影像具有丰富的多波谱信息,通过合成多波段影像,可凸显出相应的地表变化,有利于震害滑坡的识别。本文收集了覆盖地震区域的震前和震后的 Landsat 8 数据 4 对,轨道号为 141、140;分幅号为 40、41(如表 1 和图 1 所示)。

收稿日期:2016-01-28

项目资助:中南大学升华育英计划基金;地震动力学国家重点实验室开放基金(LED2014B02)。

第一作者:丁超,硕士生,主要从事地震形变监测研究。dingchao_csu@csu.edu.cn

通讯作者:冯光财,博士,副教授。fredgps@csu.edu.cn

由于震后影像普遍受云层影响严重,本文选择了含云量较少的震前影像,以保证震前、震后数据的相关性。USGS提供的 Landsat 8 数据是已经做过正射校正的 L1T 产品,校正精度可满足 SPC 技术要求。

如图 1 所示,右上方小图浅蓝色方框为 Landsat 8 影像覆盖区域,红色方框为大图所显示的区域,下方大图中洋红色方框为本文所选取的吉隆、郎塘、聂拉木和珠峰 4 个实验区,红色五角星分别显示的是 2015-04-26 Mw 6.7 级余震与 2015-05-12 Mw 7.3 级余震的震中位置,绿色点表示地震一个月内的余震分布。

表 1 本文实验所采用的 Landsat 8 影像信息

Tab.1 Information of Landsat 8 Images Used in This Study

影像对	时段	轨道号	分幅号	获取时间	云量/%
影像对 1	震前	141	41	2014-03-26	2.4
	震后	141	41	2015-04-30	30.2
影像对 2	震前	141	40	2014-01-05	4.4
	震后	141	40	2015-04-30	30.2
影像对 3	震前	140	41	2015-03-22	11.8
	震后	140	41	2015-05-25	25.6
影像对 4	震前	140	41	2014-03-19	17.4
	震后	140	41	2015-05-22	13.1

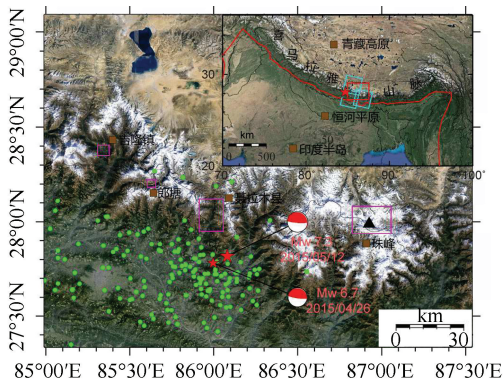


图 1 震区构造背景与 Landsat 8 影像覆盖图

Fig.1 Background Setting and Coverage of Landsat 8 for the 2015 Nepal Earthquake

1.2 数据处理方法与流程

本文采用的 SPC 技术是基于窗口的影像纹理匹配,任何因素导致的纹理破坏、模糊、缺失都会造成匹配失败,进而产生失相关噪声。对该地震而言,本文将失相关噪声分为 3 类:一是时相失相关,例如云层、植被生长变化、人工设施拆建以及太阳角度变化在地形复杂区域所引起的地表辐射量变化等;二是辐射失相关,例如白雪、沙地、严重的地形阴影与大面积水域等辐射量过高或过低或为常数,造成匹配算法无法识别影像纹理;三是

形变失相关,如震害滑坡、雪崩引起地表剧烈变化,造成影像纹理缺失或变化,进而无法匹配引入失相关噪声。根据相关研究^[13-14],尼泊尔强震在震源中心附近造成 2 m 左右的水平同震形变。故本文假定,SPC 技术获取的形变量绝对值小于等于 2 m,认为是可靠测量值;否则认为是离群值。本文将离群值分为趋势性离群值与随机性离群值。趋势性离群值排除形变误差区域,可获得反映真实地表形变趋势的信息,可用于冰川形变提取;随机性离群值由 SPC 算法在匹配失败后对计算窗口的随机赋值得到,即失相关噪声,多对应低信噪比(signal noise ratio, SNR),本文从随机性离群值与低 SNR 中提取滑坡与雪崩沉积区域。利用震前、震后影像进行亚像素相关性匹配,提取震害滑坡体、雪崩沉积区域与雪崩区形变的具体流程如下。

1)影像预处理。选取震前、震后覆盖相同区域的影像做几何校正,并圈定云、阴影区域,以分析形变场中的失相关区域。

2)计算影像的偏移量。利用频域相关性算法对震前、震后的数据进行 SPC 计算,获取偏移量;窗口大小为 32 像素×32 像素,步长为 4 像素,稳健迭代 2 次,频率掩膜阈值为 0.9。

3)后处理。经过相关性计算后的结果中包含着许多误差,利用一阶多项式去除形变图中轨道趋势误差,通过均值滤波进一步降低形变图中其他噪声水平。

4)失相关区域。圈定同震形变场中的失相关区域,即低 SNR 与随机性离群值区域。

5)形变失相关区域。本文将失相关区域减去已确定的噪声失相关区域,初步确定形变失相关区域,再利用多源遥感影像目视解译方法对这些区域进行验证,进一步确定震害滑坡与雪崩沉积区域。

6)雪崩区形变。从同震形变场中的趋势性离群值中提取雪崩区形变场并进行分析。

2 滑坡体、雪崩沉积区提取与分析

本文选取中国的吉隆和聂拉木两个典型滑坡受灾区,以及尼泊尔受雪崩危害严重的郎塘,利用 § 1.2 方法提取出实验区内震害山体滑坡与雪崩沉积区。另外统计滑坡中心点位置、高程、坡度、坡向和对应的滑坡面积等信息,以此来分析震害滑坡与地形因子之间的关联性。

2.1 滑坡识别与提取

吉隆是中尼边境的口岸城镇,位于尼泊尔强震中心的东北方向,距离约 66 km。在本次强震与随后的余震中,该镇发生了严重的山体滑坡灾害。图 2 中黑色矩形方框表示滑坡区域,椭圆圈出部分表示植被覆盖、人工建筑、阴影等因素导致的失相干噪声区域。图 2(c)中,黑色表示失相关区域。图 2(d)~2(g)分别对应图 2(c)相应绿色矩形方框的震前震后多波段(SWIR2/SWIR1/NIR)合成影像对比图,滑坡体在震后影像图中呈现亮色区域(白线圈出)。

通过分析低 SNR 与随机性离群值区域快速确定形变失相干,即山体滑坡区域,并通过高分影像目视解译的方法对以上结果进行验证。Landsat 8 影像的空间分辨率 15 m,实验获取的形变图空间分辨率为 60 m×60 m,难以实现对小滑坡区域的监测,导致 SPC 技术无法监测出微小滑坡体。值得注意的是,震前震后影像的太阳高度角、方位角偏差也会造成趋势性离群值产生。此外,人工建筑设施的拆建、植被变化、云层覆盖等会造成时相失相关。这些误差的识别与去除也会一定程度影响本文方法提取滑坡体的精度。

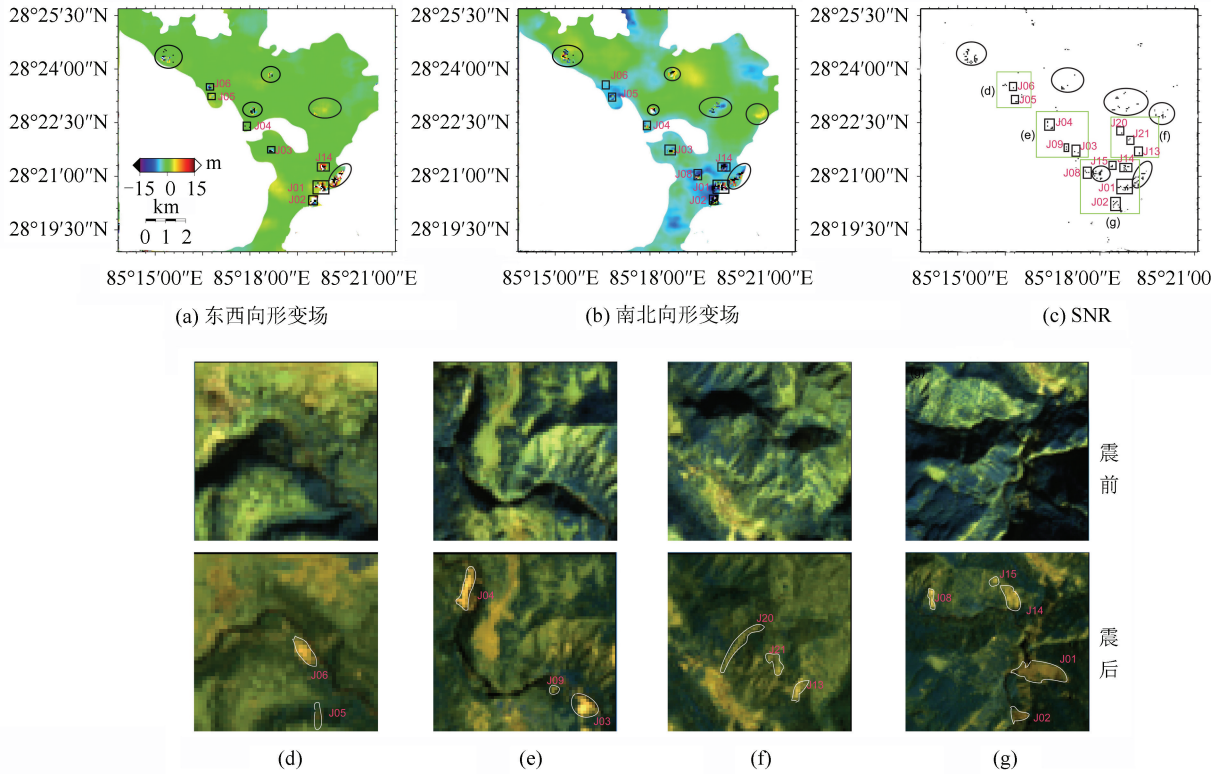


图 2 吉隆形变场和滑坡体提取图

Fig.2 Extraction of Deformation Fields and Landslides of Jilong

利用目视解译方法在吉隆镇识别了 21 处滑坡体(见图 3)。其中 J01 为该区的最大滑坡体,位于冲色村附近河谷,该滑坡堵塞河道造成上游堰塞湖的生成,专家分析结果^[14]对该滑坡体进行了确认。失相关区域能够较好地涵盖该区域的大滑坡体(大于 3 600 m²),涵盖率为 85.7%。该技术对大滑坡体的监测涵盖率未达到 100%,主要是因为一部分滑坡体呈线状分布,直径幅宽低于本文设计的测量精度 60 m,无法识别。除此之外,本文设定的窗口可能过大,漏检了部分滑坡区域。表 2 列出了该区域 21 个滑坡体的参数与地形信息。

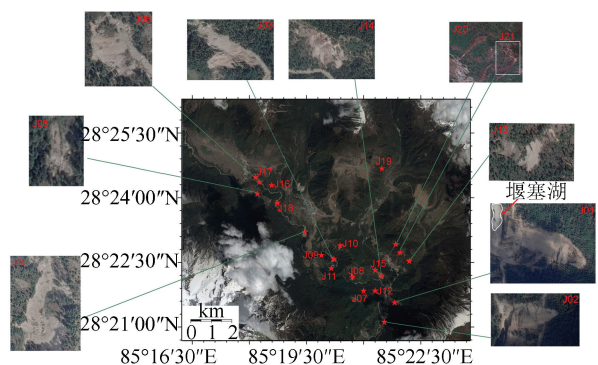


图 3 吉隆滑坡分布图

Fig.3 Landslides Distribution of Jilong

表2 吉隆山体滑坡编目表
Tab.2 Landslides Catalog of Jilong

Table with 9 columns: 序号, 滑坡位置 (东经, 北纬), 滑坡面积, 技术监测手段 (SPC, 目视判读), 高程, 坡向, 坡度. Rows J01 to J21.

注:√表示可以监测到对应滑坡体,×表示无法监测到对应滑坡体。

聂拉木区域大部分滑坡体在影像中被云层覆盖,形变失相关区域不够明显,为增加参与后面滑坡因子分析的数据量,本文只采用高分辨率影像目视解译方法获取该区域的10处山体滑坡(如图4和表3所示)。

表3 聂拉木山体滑坡编目表

Tab.3 Landslides Catalog of Nyalam

Table with 7 columns: 序号, 滑坡位置 (东经, 北纬), 滑坡体面积, 高程, 坡向, 坡度. Rows N01 to N10.

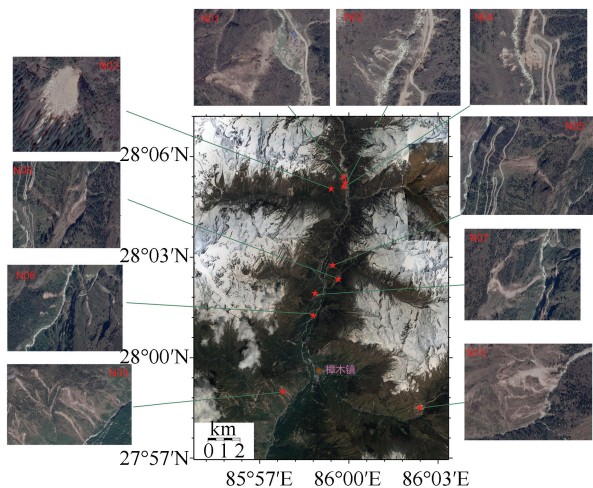


图4 聂拉木滑坡分布图

Fig.4 Landslides Distribution of Nyalam

2.2 滑坡分布统计分析

本文对吉隆与聂拉木滑坡体数目、滑坡面积、滑坡平均面积(共31处)与地形坡度的关系做简单的统计分析,结果如图5所示。即每5°作为一个区间范围,通过计算范围内的滑坡个数与滑坡总个数的商,计算其所占百分比统计结果,同时统

计区间范围内的滑坡总面积与平均面积。发现滑坡体分布呈现近似高斯正态分布,且主要分布在坡度大于30°(90%以上)的地形,坡度40°~45°为中型滑坡体(面积大于半个窗口)多发的坡度范围,且总体滑坡面积最大。同时发现单体(平均)滑坡面积随坡度的增大呈上升趋势,这说明坡度越高越容易触发单体面积大的滑坡,这类震后滑坡危害更为严重,需要重点监测。此外,滑坡体多沿河谷两侧分布,与坡向无明显关系。汶川地震等案例中的震害滑坡分布也得出了类似的统计特性[3,6]。

2.3 雪崩沉积区识别与提取

尼泊尔郎塘在此次地震中受灾严重[14-15],该

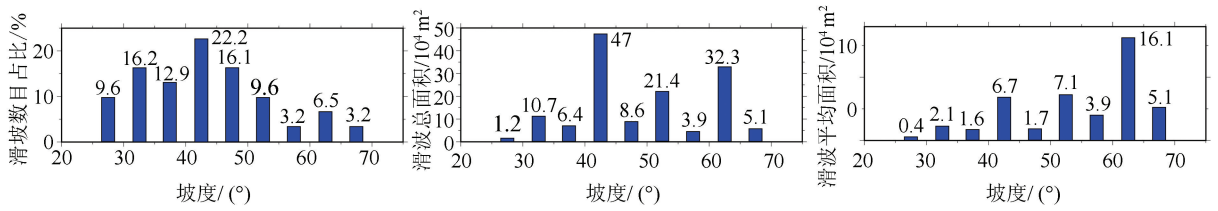


图 5 吉隆、聂拉木地区不同坡度水平滑坡体数目、总面积与平均面积分布直方图

Fig.5 Landslides' Quantity, Gross and Average Area Distribution Histogram of Jilong and Nyalam in Different Slope Levels

区域海拔高度在 3 000 m 以上,地势起伏很大,周边冰川广泛发育。与滑坡体不同,雪崩实际发育区域多为辐射亮度较高的冰雪区域,纹理特征变化不明显,难以识别。而雪崩碎屑沉积区多为海拔较低区域,当地的地面纹理特征一般会遭到严重破坏,因此用本文 § 2.1 中滑坡体识别方法来识别雪崩沉积区域。

图 6(a)~6(c)中黑线圈出的 A、B、C、D 为

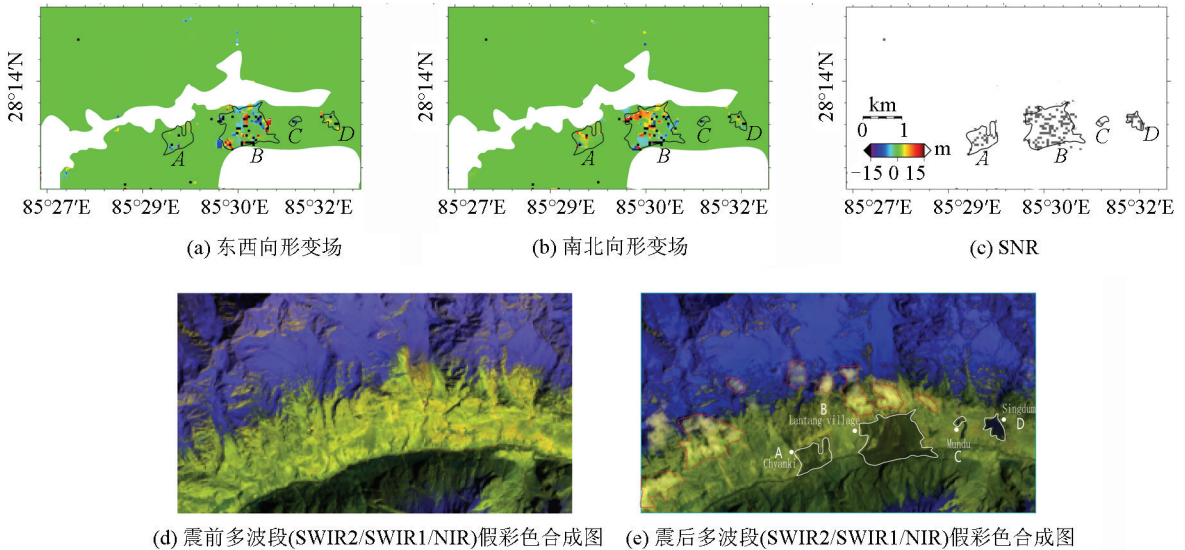


图 6 郎塘形变场和雪崩沉积区提取图

Fig.6 Extraction of Deformation Fields and Avalanches' Debris Areas in Langtang

3 雪崩区形变分析

随着全球气候变暖,冰川消退速度加快,解冻岩层与冰川融水等因素本身就削弱了局部地质的稳定性。这时如果再发生此类大型地震,引发雪崩滑坡灾害的机率与风险会更大。本文对珠峰附近 20 km×20 km 区域进行形变监测(表 1 中的影像对 3),其中昆布冰川 5 300 m 海拔高度冰瀑区发生大型雪崩,本文重点对其进行形变监测,同时分析了东绒布冰川的疑似雪崩区。如图 7 所示,对应冰川区有较为明显的形变量。冰川运动一般由自身重力引起,但是地震导致的大范围雪

排除云噪声后识别出的失相关区域。图 6(e)中红色虚线圈出部分为云噪声,白线圈出部分为目视解译出的雪崩碎屑物质覆盖区域,分别对应 6(a)、6(b)、6(c)中的 A (Chyamki)、B (Langtang Village)、C (Mundu)、D (Singdum)所圈出的失相关区域,本文所获得的结论与 Kargel 等^[14]通过 0.5 m 分辨率 WorldView2 目视解译的结果基本吻合。

崩会对冰川局部运动产生影响。本文分别对昆布冰川与东绒布冰川选取了 E、F 两个区域,提取并分析了 E、F 两个典型冰川的水平形变场。

图 8(a)中红色箭头表示 E 区域的冰川运动方向与大小,图 8(b)分别表示东西向与南北向形变,黑线圈定区域为昆布冰川的雪崩高发区。对应区域冰川运动了约 22~77 m(平均运动 39 m,时间基线 64 d)。而 Scherler 等^[16]研究表明昆布冰川相应区域的水平运动速率约为 20~130 m/a,换算到对应的时间段约为 3~21 m,很有可能是由地震触发的雪崩造成的。

图 9(a)对应图 7 中的 F 实验区,图 9(b)显示图 9(a)中红色虚线方框区域的震前(2014-03-

19—2014-05-22,64 d)、震后(2015-03-22—2015-05-25,64 d)近似时间间隔的东西向与南北向形变场。鉴于两个影像对成像时间基本一致,认为其误差水平相同,而相同区域在地震发生前表现为5~20 m的形变量,地震发生后表现为失相关,说明该区域地表发生了剧烈变化,本文将该区域圈定为疑似雪崩区域。

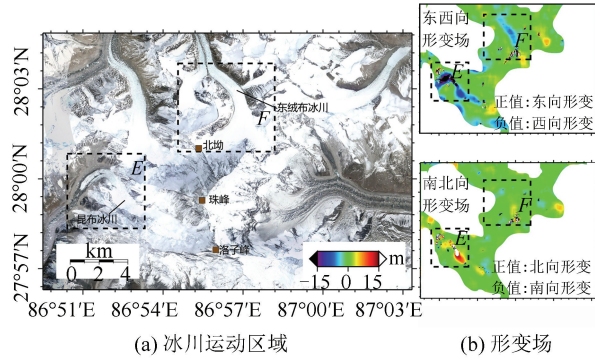


图7 珠峰研究区域及形变场
Fig.7 Everest Mount Region and Its Deformation Fields

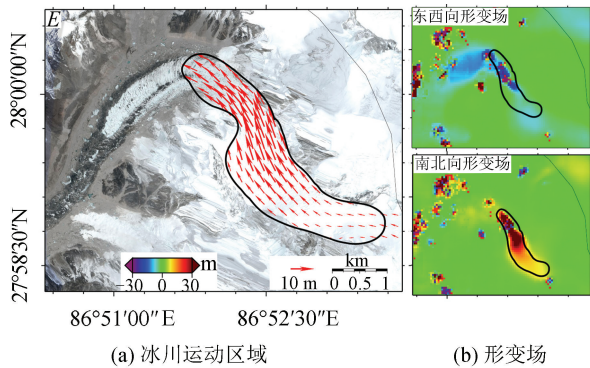


图8 昆布冰川区影像与形变场
Fig.8 Image and Deformation Fields of the Khumbu Glacier

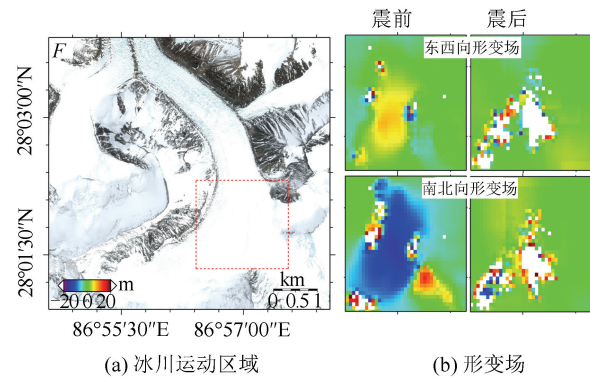


图9 东绒布冰川区影像与形变场
Fig.9 Image and Deformation Fields of the East Rongbuk Glacier

4 结 语

震后滑坡灾害的识别与提取对地震触发滑坡机理的探讨和防灾减灾具有重要的理论意义和应用价值。本文从 Landsat 8 影像所获得形变场中的失相干噪声中提取震害滑坡体与雪崩沉积区。实验结果表明本文方法可行,结果可靠。同时滑坡体与地形因子的统计分析结果表明,实验区内震后山体滑坡分布与坡度呈近似高斯分布,多发生于坡度大于 30°、海拔为2 500~3 500 m 的区域,集中沿河谷两侧分布,且高坡度更容易触发单体面积大的山体滑坡,统计结果与其他研究成果^[14]较为吻合。另外,本文对昆布冰川与东绒布冰川雪崩区形变进行量化分析,为该技术应用用于雪崩监测预警提供参考。因遥感数据源有限及成像条件不佳,本文只能对某些离散区域进行滑坡、冰川监测,同时影像分辨率与匹配窗口的设置也限制了本文方法对一些小型滑坡体的提取。如果条件允许,SPC 技术可以获取整个震区的同震形变与震害滑坡分布,将有助于分析震后滑坡分布与地震机制的关系。此外,综合多源遥感影像提取震害滑坡、雪崩沉积区也值得做进一步研究。

参 考 文 献

[1] Wikipedia. April 2015 Nepal Earthquake [OL]. https://en.wikipedia.org/wiki/April_2015_Nepal_earthquake,2016

[2] Feng G C, Li Z W, Shan X J, et al. Geodetic Model of the 2015 April 25 Mw 7.8 Gorkha Nepal Earthquake and Mw 7.3 Aftershock Estimated from InSAR and GPS Data[J]. *Geophysical Journal International*, 2015, 203(2):896-900

[3] Tao Shu. Information Extraction of Landslides Induced by the Wenchuan Earthquake and Susceptibility Assessment Using Remotely Sensed Data [D]. Beijing: Capital Normal University, 2009(陶舒.汶川地震滑坡遥感信息提取及灾害危险性评价研究[D].北京:首都师范大学,2009)

[4] Xu Chong, Xu Xiwei, Shen Lingling, et al. Inventory of Landslides Triggered by the 2014 MS 6.5 Ludian Earthquake and Its Implications on Several Earthquake Parameters [J].*Seismology and Geology*, 2014, 36(4): 1 186-1 203 (许冲,徐锡伟,沈玲玲,等.2014年鲁甸MS 6.5地震触发滑坡编录及其对一些地震参数的指示[J].地震地质,2014,36(4):1 186-1 203)

- [5] Wu Xueling, Shen Shaoqing, Niu Ruiqing. Landslide Susceptibility Prediction Using GIS and PSO-SVM [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2016, 41(5): 665-671(武雪玲, 沈少青, 牛瑞卿. GIS 支持下应用 PSO-SVM 模型预测滑坡易发性 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2016, 41(5): 665-671)
- [6] Lacroix P, Zavala B, Berthier E, et al. Supervised Method of Landslide Inventory Using Panchromatic SPOT5 Images and Application to the Earthquake-Triggered Landslides of Pisco (Peru, 2007, Mw 8.0) [J]. *Remote Sensing*, 2013, 5(6): 2 590-2 616
- [7] Leprince S, Barbot S, Ayoub F, et al. Automatic and Precise Orthorectification, Co-registration and Sub-pixel Correlation of Satellite Images, Application to Ground Deformation Measurements [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(6): 1 529-1 558
- [8] Dong Xiaoyan, Ding Xiaoli, Li Zhiwei, et al. A New Chain for SAR Pixel Offset Estimation and Its Application in Co-seismic Deformation Measurement [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(7): 789-792(董晓燕, 丁晓利, 李志伟, 等. 一种新的 SAR 像素偏移量估计流程及其在同震形变监测中的应用 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2011, 36(7): 789-792)
- [9] Ding C, Feng G C, Li Z W, et al. Spatio-Temporal Error Sources Analysis and Accuracy Improvement in Landsat 8 Image Ground Displacement Measurements [J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(11): 937-958
- [10] Binet R, Bollinger L. Horizontal Coseismic Deformation of the 2003 Bam (Iran) Earthquake Measured from SPOT-5 THR Satellite Imagery [J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 320(2): 287-294
- [11] Leung T K P, Admas J. The 2005, Mw 7.6 Kashmir Earthquake, Rupture Kinematics from Sub-pixel Correlation of ASTER Images and Seismic Waveforms Analysis [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 249(3): 514-528
- [12] Feng Guangcai, Xu Bing, Shan Xinjian, et al. Co-seismic Deformation and Source Parameters of the 24 September 2013 Awaran, Pakistan Mw7.7 Earthquake Derived from Optical Landsat 8 Satellite Images [J]. *Chinese Journal Geophysics*, 2015, 58(5): 1 634-1 644 (冯光财, 许兵, 单新建, 等. 基于 Landsat 8 光学影像的巴基斯坦 Awaran Mw7.7 地震形变监测及参数反演研究 [J]. 地球物理学报, 2015, 58(5): 1 634-1 644)
- [13] Avouac J P, Meng L, Wei S, et al. Lower Edge of Locked Main Himalayan Thrust Unzipped by the 2015 Gorkha Earthquake [J]. *Nature Geoscience*, 2015, 8(9): 1-6
- [14] Kargel J S, Leonard G J, Shugar D H, et al. Geomorphic and Geologic Controls of Geohazards Induced by Nepal's 2015 Gorkha Earthquake [J]. *Science*, 2016, 351(6 269): 1-12
- [15] Jane Q. Killer Landslides: The Lasting Legacy of Nepal's Quake [OL]. <http://www.nature.com/news/killer-landslides-the-lasting-legacy-of-nepal-quake-1.19803>, 2016
- [16] 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): 3 806-3 819

Nepal Earthquake Triggered Landslides Recognition and Deformation Analysis of Avalanches' Region

DING Chao¹ FENG Guangcai¹ ZHOU Yushan¹ WANG Huiqiang¹ DU Ya'nan¹ CHEN Chenyue¹

¹ Department of Surveying, Mapping and Remote Sensing, Central South University, Changsha 410083, China

Abstract: On April 25th 2015, an Mw 7.8 earthquake occurred near Gorkha, Nepal, which triggered substantial landslides and avalanches in Tibet and Nepal causing severe casualties and economic losses. In this study, based on Landsat 8 images and sub-pixel correlation technology, we acquire horizontal deformation fields of the earthquake region. Combined with the visual interpretation method, we detected the landslides and debris deposition areas of avalanches by extracting the corresponding decorrelation noises. We determined the correlation between the landslides and topography factors. Experimental results show that the extraction of decorrelation noises caused by geohazards from the defor-

[24] Xu Yaming, Xing Cheng, Chen Xiaodong. A Mosaicking Method for UAV Sequence Images Based on Seam Line [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(11): 1 265-1 269

(徐亚明, 邢诚, 陈晓东. 一种基于拼接线的无人机序列影像拼接方法[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2011, 36(11): 1 265-1 269)

A Mosaic Method for UAV Images Based on Filtering

LI Wan¹ ZHAO Shuangming¹ ZHANG Weilong² LIU Xiao³ YU Guorong¹

1 School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China

3 School of Information Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: This paper proposes a mosaic method for UAV images based on filtering, which can eliminate ghosting and seams in the mosaicking process. The UAV images are decomposed into high-frequency components and low-frequency components by a Gaussian low-pass filter. Various mosaic schemes are designed to accomplish the stitching process. For the low-frequency components, weighted blending rule is utilized to achieve smoothing transition. An improved optimal seam searching strategy based on dynamic programming is introduced to guide the stitching of high-frequency components. The mosaic result is produced by linearly composing all stitching results from different components. Experimental results demonstrate the effectiveness of the proposed method in avoiding visible stitching seams and ghosting effects, especially in the cases of intensity differences.

Key words: UAV image mosaic; Gaussian low-pass filter; weighted blending; dynamic programming; optimal stitching seam

First author: LI Wan, master, specializes in remote sensing image processing. E-mail: liwan_S142@whu.edu.cn

Corresponding author: ZHAO Shuangming, PhD, professor. E-mail: smzhao@whu.edu.cn

(上接第 853 页)

mation field, when combined with validation of visual interpretation method, is an effective method for locating the regions effected by landslides and avalanches. Furthermore, results show that landslides are more likely to occur at slope $> 30^\circ$ terrain, both sides of the valley, and high slope is more easily trigger larger single landslides. This study provides a new perspective on detection of earthquake-triggered landslides and debris deposition areas of avalanches, monitoring and early warning of glaciers' velocity based on the Landsat 8 satellite imagery.

Key words: Nepal Gorkha earthquake; sub-pixel correlation; landslides; avalanches; glacier velocity

First author: DING Chao, postgraduate, specializes in the earthquake deformation monitoring. E-mail: dingchao_csu@csu.edu.cn

Corresponding author: FENG Guangcai, PhD, associate professor. E-mail: fredgps@csu.edu.cn

Foundation support: Shenghua Yuying Fund of Central South University; the Open Foundation of the State Key Laboratory of Earthquake Dynamics, No. LED2014B02.