

主动微波光谱影像对新疆天山山脉区域地表形变的监测研究

王志伟^{1,2,3}, 岳广阳^{1*}, 吴晓东¹, 张文², 王普昶², 宋雪莲², 吴佳海²

1. 中国科学院西北生态环境资源研究院, 冰冻圈科学国家重点实验室, 青藏高原冰冻圈观测研究站, 甘肃 兰州 730020
2. 贵州省农业科学院草业研究所, 贵州 贵阳 550006
3. Department of Geological Sciences, University of Texas at San Antonio, San Antonio 78249, USA

摘要 全球气候变暖已导致多年冻土发生严重的退化, 现已威胁到许多区域的生态安全, 特别是作为五大畜牧业生产基地的天山地区。当前区域内的研究多针对冰川进行分析, 较少对多年冻土深入挖掘。通过39景ENVISAT ASAR影像(覆盖时间从2003年6月17日到2010年6月15日), 利用SBAS-InSAR方法监测区域内多年冻土区的地表形变现状。详细介绍算法原理, 生成ASAR数据集单视复数影像的连接图时, 以空间和时间基线距分别小于500 m和550 d为原则, 生成126幅差分干涉图。其中因基线和多普勒质心差的原因, 6景ASAR影像没有进行配对。生成连接图后, 配合STRM V4版本的DEM数据, 经过干涉图去平、自适应滤波、相干系数图生成、相位解缠后, 再对这126对干涉图进行质量较差52对的移除。利用地面控制点, 进行轨道精炼和重去平等操作, 估算形变速率和残余地形, 经过相关系数阈值控制和奇异值分解(SVD)方法, 再结合空间低通滤波和时间高通滤波方法, 计算得到研究区时间序列地表形变反演。反演结果共包括33期形变影像, 涉及时间从2004年至2010年。根据研究区形变结果可知, 虽然区域内有不同程度的沉降和抬升, 但整体的形变速率在 $\pm 5 \text{ cm} \cdot \text{yr}^{-1}$ 之内, 平均形变速率为 $(-0.07 \pm 3.38) \text{ mm} \cdot \text{yr}^{-1}$, 说明研究区内地表存在轻微的沉降现象。此外以3000 m海拔为界, 分别探讨分布季节冻土和多年冻土的平原地区和山地区域形变规律发现, 平原地区的形变主要表现为抬升, 仅北方接近城市的区域表现出强烈的沉降现象。而山区的形变结果则较为零散, 整体形变基调以沉降为主, 大体上在西部和东部地区分别呈现出沉降和抬升现象。海拔高于3000 m的形变点存在15198个, 利用温度和降水数据, 探讨形变点不同形变间隔和总体样本的温度和降水年变化规律后得知, 总体和不同变形速率间隔的形变样本点基本都呈现出逐步变暖的趋势。并且研究区的山区地表形变速率小于 $-2.0 \text{ cm} \cdot \text{yr}^{-1}$ 、在 $-2.0 \sim 2.0 \text{ cm} \cdot \text{yr}^{-1}$ 之间和大于 $2.0 \text{ cm} \cdot \text{yr}^{-1}$ 的样本点数量依次为6364, 6449和2385个, 山区地表负值的区域多于正值的区域, 体现出该区域的沉降位置多于抬升位置, 也同全球变暖, 冻土退化, 地表发生沉降的规律相一致。利用主动微波波段谱段的ASAR数据, 成功反演了2004年至2010年间的研究区地表形变结果, 并从地表形变反演结果的空间角度、时间角度和冻土变化的时间滞后性进行了讨论和展望。以上研究结果期望能为天山区域多年冻土区的地表形变监测提供新的途径和参考。

关键词 短基线集合成孔径雷达干涉测量技术; 冰冻圈; 多年冻土; 全球变暖; 地面沉降

中图分类号: X87 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2020)08-2366-07

引言

相比可见光、红外和近红外光谱波段的遥感技术, 具有

全天时、全天候优势的合成孔径雷达干涉测量(interferometry synthetic aperture radar, InSAR)方法可以方便、快捷的实现大范围、无接触、面状的, 精度为mm级的地表形变监测。该技术方法已成熟地应用于如地下水开采、矿区沉降、

收稿日期: 2019-04-25, 修订日期: 2019-08-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(41571075, 41701077, 41861016), 贵州省科技计划项目黔科合支撑项目([2017]2594, [2018]2371)和国家公派留学基金项目(201808520022)资助

作者简介: 王志伟, 1983年生, 贵州省农业科学院草业研究所副研究员 e-mail: wzw1206@163.com

岳广阳, 1981年生, 中国科学院西北生态环境资源研究院助理研究员 e-mail: yuegy@lzb.ac.cn

王志伟, 岳广阳: 并列第一作者 * 通讯联系人 e-mail: yuegy@lzb.ac.cn

石油挖掘等人为因素引起^[1]的,以及冰川退化、冻土消融等全球气候变暖等自然因素导致^[2]的众多地表变化研究中。特别是随着 SBAS-InSAR (small baseline subset InSAR) 技术的发展,地表形变的反演精度和准确度得到了进一步提升,促使 InSAR 技术的应用得到更加广泛的推广^[3]。

多年冻土是冰冻圈的重要组成部分,指温度能够维持在零摄氏度以下状态两年及两年以上的近地表土壤或岩石层。近百年来全球气温持续升高,多年冻土也开始逐步退化,众多学者^[4]指出这种变暖现象在 21 世纪可能仍将持续。活动层是多年冻土区夏季融化、冬季冻结的土壤或岩石层,位于多年冻土之上。多年冻土退化会导致活动层厚度增加,从而改变土壤中的水、热环境。多年冻土的冻胀融沉过程不仅破坏铁路、公路,也会破坏建筑工程结构,甚至造成极大的生态、地质灾害。环境变暖多年冻土热融效应增加后,会促使大团聚体破碎成小团聚体,释放大量的有机碳、硝态氮等物质,进而改变土壤生物和微生物环境,引起高寒生态环境的恶化。同时因气候变暖土壤水、热状况发生改变,同样会使植被条件发生变化,进而影响到地表的一系列特征,如反照率、降水的渗透速度、土壤中的蒸腾和蒸散、以及土壤侵蚀等,从而打乱水文和气候系统的循环速率。上述近地表过程的变化,会在大气圈的下垫面底部对环境产生反作用,甚至影响多年冻土周边地区乃至全球的气候变化,进而影响到生态系统的发生、发展进程。

新疆地处我国西北干旱区生态脆弱带,是我国五大畜牧业生产基地之一,生态资源丰富。冰冻圈要素中的冰川、冻土是区域内水循环过程中不可或缺的重要因子。新疆地区的多年冻土分布可称为“两环”模式,多年冻土分布于阿尔泰山、天山和昆仑山构成的“两环”脊线上,“两环”内部的准格尔盆地和塔里木盆地均为季节冻土区。其中,天山深居内陆,分布于其上的多年冻土具有明显的垂直地带性^[5],为探讨新疆多年冻土区地表形变提供了天然的研究场地。

目前,利用 InSAR 技术针对天山地区的研究多集中于对冰川的讨论^[2],较少应用到对多年冻土的分析中,本工作试图利用 SBAS-InSAR 方法和 39 景 ENVISAT 影像(覆盖时间从 2003 年 6 月 17 日到 2010 年 6 月 15 日)对天山多年冻土区地表形变规律做出部分探讨,以期为后续的冰冻圈相关科学研究提供数据基础和方法借鉴。

1 研究区概况

研究区位于天山山脉中段,位于北纬 43.4°—44.7°,东经 83.9°—85.6°之间(图 1 所示),区域内北部主要为平原地区,南部基本为山区。天山山脉深居大陆内陆,属于典型的大陆性山地气候。根据早期研究可知^[5],天山山脉具有典型的冻土分布特征,区域内高寒草甸和沼泽草甸分布广泛。

2003 年至 2010 年期间,区域内年均温和年降水分别为 $(-2.7 \pm 8.27) ^\circ\text{C}$ 和 $(340 \pm 85) \text{ mL}$,如图 2 所示(依据《中国区域高时空分辨率地面气象要素驱动数据集》^[6-7]计算获取),其基本分布规律为北部平原地区温度高、降水少,南部山地温度低、降水多,以上雨、热分布特点为多年冻土的发育提

供了十分有利的条件。以 3 000 m 海拔为界,研究区的山地和平原地区 2003 年至 2010 年间的年均温和年降水分别为 $(-10.87 \pm 2.98) ^\circ\text{C}$ 、 $(420 \pm 38) \text{ mL}$ 和 $(0.54 \pm 7.34) ^\circ\text{C}$ 、 $(310 \pm 77) \text{ mL}$,具有明显的差异。

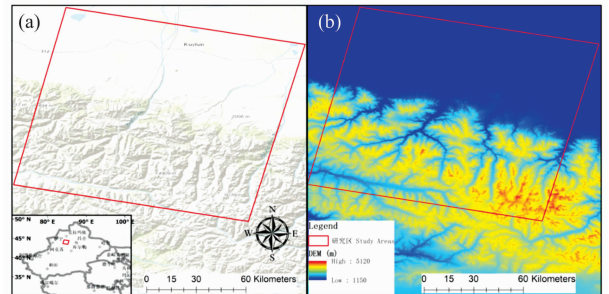


图 1 研究区概况

(a): 研究区地理位置; (b): 高程图

Fig. 1 Location of study areas

(a): Distribution of study area; (b): Digital elevation model

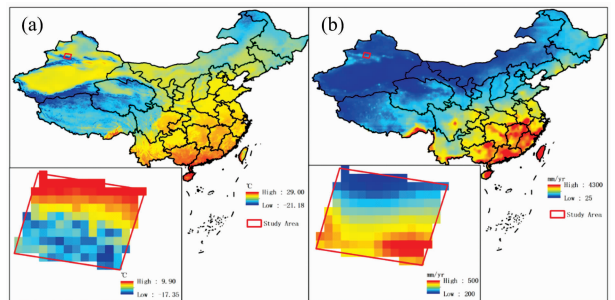


图 2 2003 年—2010 年间多年平均温度 ($^\circ\text{C}$) (a) 和降水 ($\text{mm} \cdot \text{yr}^{-1}$) (b) 分布图

Fig. 2 The spatial distribution of annual average temperature ($^\circ\text{C}$) (a) and annual average precipitation ($\text{mm} \cdot \text{yr}^{-1}$) (b) from 2003 to 2010

2 地表形变反演研究算法

2.1 研究数据

如表 1 所示,本研究中涉及的 ASAR (advanced synthetic aperture radar) 数据主要有 39 景。经初始处理^[8]后,因基线和多普勒质心差的原因,其中 6 景影像没有参与配对。该 ENVISAT ASAR 数据集属于单视复数影像 (single look complex, SLC),为 C 波段、IS2 模式遥感数据,入射角 23° 。研究数据获取方式为降轨,数据来源于欧空局 (European Space Agency, ESA)。方位向分辨率和距离向分辨率分别为 22.6 和 4.05 m。本文中所用 DEM 资料为 STRM V4 版本数据,该数据在赤道的分辨率约为 90 m^[9]。《中国区域高时空分辨率地面气象要素驱动数据集》^[6-7]下载于寒区旱区科学数据中心,覆盖时间范围为 2003 年 1 月 1 日到 2010 年 12 月 31 日,包括月、日、年三种时间尺度数据,其空间分辨率为 0.1° 。此外,文中所有地图投影方式均为 WGS84 坐标系。

2.2 算法原理介绍

星载 InSAR 技术在地表形变监测领域应用已经十分成

表 1 本研究中 ENVISAT ASAR 影像集的详细信息
(连接图生成时主影像为 20090106)

Table 1 ENVISAT ASAR datasets products applied in this study (The image of 20090106 was used as the super master-image generating a connected graph)

获取时间	垂直基线距/m	获取时间	垂直基线距/m
20030617	—	20070313	368
20030930	—	20071113	245
20031104	—	20080506	-74
20031209	—	20080819	147
20040113	306	20080923	-269
20040217	—	20081028	27
20040601	355	20081202	-230
20041123	-12	20090106	0
20041228	212	20090210	-228
20050308	199	20090317	520
20050412	54	20090421	-211
20050517	174	20090526	55
20050726	435	20090630	134
20050830	650	20090804	-120
20051108	598	20090908	370
20051213	80	20091013	-284
20060221	-206	20100126	182
20060919	—	20100302	-205
20061128	-48	20100615	202
20070206	-264		

熟,其工作原理主要是集成孔径雷达技术与干涉测量技术于一体,计算距离信息的经典干涉相位计算公式如式(1)^[5]

$$\varphi_{\text{int}} = \varphi_{\text{flat}} + \varphi_{\text{topo}} + \varphi_{\text{def}} + \varphi_{\text{atmo}} + \varphi_{\text{noise}} \quad (1)$$

式(1)中, φ_{flat} 指平地相位, φ_{topo} 指地形相位, φ_{def} 指地表形变相位; φ_{atmo} 指大气延迟相位; φ_{noise} 指噪声引起的相位。首次将该技术应用于厘米级地表形变的研究方法称为雷达差分干涉技术(D-InSAR)^[10-11]。在多年冻土区的研究指出早期 InSAR 方法的主要限制因素是时空失相关和冻土地表的非线性形变^[9, 12-13], 而 SBAS-InSAR 方法则因奇异值分解法(singular value decomposition, SVD)可以很好地克服上述问题^[14], SBAS-InSAR 方法的具体原理如式(2)所示^[15]。首先,生成差分干涉图。干涉图的数量如式(2)所示

$$(N+1)/2 \leq M \leq N(N+1)/2 \quad (2)$$

式(2)中, $N+1$ 景的 ASAR 研究区影像获取于具体的研究时期, M 对干涉图则需满足特定的时空基线阈值设置规则, 假设每期 ASAR 影像都至少有 1 景影像与之干涉, 则如式(2), $N+1$ 景的 ASAR 影像生成的 M 对干涉图数量应在 $(N+1)/2$ 至 $N(N+1)/2$ 之间。时空基线的阈值设置规则一般通过多普勒质心差来控制^[13]。之后, 通过 T_a 和 T_b 时刻获取的 ASAR 影像来计算像元上的解缠相位, 假设该像元在方位向和距离向的数值为 (x, r) , 则生成第 i 景的干涉图公式为

$$\Delta\phi_i(x, r) = \phi(T_b, x, r) - \phi(T_a, x, r) = \left(\frac{4\pi}{\lambda}\right) [d(T_b, x, r) - d(T_a, x, r)] + \Delta\phi^{i\text{-topo}}(x, r) + \Delta\phi^{i\text{-orb}} + \Delta\phi^{i\text{-res}}(x, r) \quad (3)$$

式(3)中, ϕ 是干涉相位信息; i 是干涉图的序号, $i \in (1, 2,$

$\dots, M)$; λ 是传输信号的中心波长(本研究中 ENVISAT ASAR 数据的中心波长是 5.67 cm); $d(T_b, x, r)$ 和 $d(T_a, x, r)$ 是雷达视线方向(line-of-sight, LOS)的积累量, T_a 和 T_b 时刻主要相比 T_0 时刻而言(T_0 时刻是参考影像的获取时间); $\Delta\phi^{i\text{-topo}}$ 是来自于 DEM 误差的相位信息; $\Delta\phi^{i\text{-orb}}$ 是来自于卫星轨道信息误差的相位信息; $\Delta\phi^{i\text{-res}}$ 是来自于残余相位数据的相位信息。

假设 v_j 是 p 到 q 时刻的平均相位速度, 则相位和时间满足如式(4)

$$v_j \times (T_p - T_q) = \Delta(\phi_p - \phi_q) \quad (4)$$

式(4)中, p 和 q 是获取 ASAR 影像的具体时刻, ϕ 是相位信息。考虑到不同的时间分段, T_0 到 T_j 时刻的第 j 幅干涉图的相位信息可以通过如式(5)计算得到

$$\Delta\phi_j = \sum_{j=0}^j (T_j - T_0)(v_j - v_0) \quad (5)$$

式(5)中, $\Delta\phi_j$ 是影响不同时间间隔的相位速度积分信息, 改写成矩阵表达式为

$$\mathbf{A}\mathbf{v} = \Delta\phi \quad (6)$$

式(6)中, \mathbf{A} 是系数矩阵; 速度 \mathbf{v} 是速度矢量, 可以通过系数矩阵 \mathbf{A} 计算获取。因为在 SBAS-InSAR 处理过程中会有多个主影像, 有可能导致系数矩阵 \mathbf{A} 秩亏。通常利用 SVD 方法来处理, 首先会生成一个逆矩阵, 然后获得速度矢量的最小范数解, 最终得到各个时间段的形变量^[14]。

2.3 数据处理流程

研究中的数据处理流程如图 3 所示。其中生成连接图时, 选取空间基线距小于 500 m 和时间基线距小于 550 d 的 ASAR 影像, 最终生成 M 幅(本研究中 M 为 126)差分干涉图, 图 4 显示结果为生成连接图时的时空基线图。

在生成连接图后, 配合 DEM 数据, 经过干涉图去平、自适应滤波、相干系数图生成、相位解缠后, 再对 M 对干涉图进行编辑, 保留处理较优的结果, 例如图 5(a, b)所示分别为 20090421 和 20081202 干涉的结果), 对处理较差的结果(例如图 6(a, b)所示分别为 20050308 和 20060221 干涉的结果)进行剔除处理, 此时移除的干涉图数量即为 L (本研究中剔除的 L 干涉图为 52 对)。

之后利用地面控制点, 进行轨道精炼和重去平处理, 然后估算形变速率和残余地形, 经过相关系数阈值控制和 SVD 方法计算, 再结合空间低通滤波和时间高通滤波方法, 完成最终的研究区时间序列地表形变反演, 如图 7 所示。

3 反演结果与分析

研究区反演结果共包括 33 期形变影像, 除第一景 20040113(参考影像)的所有数值为 0 外, 其余 32 期形变结果都是相对参考影像的数值^[14]。本文以其中 4 期形变量影像为例, 包括 20041228(与 20040113 相比, 季节接近)、20050726(与 20040113 相比, 季节相反)、20090106(与 20040113 相比, 季节接近)和 20100615(与 20040113 相比, 季节相反), 如图 7(a, b, c, d)所示。根据图 7 可知, 研究区内反演质量较佳区域为平原地区, 山区的地表形变反演稀少而

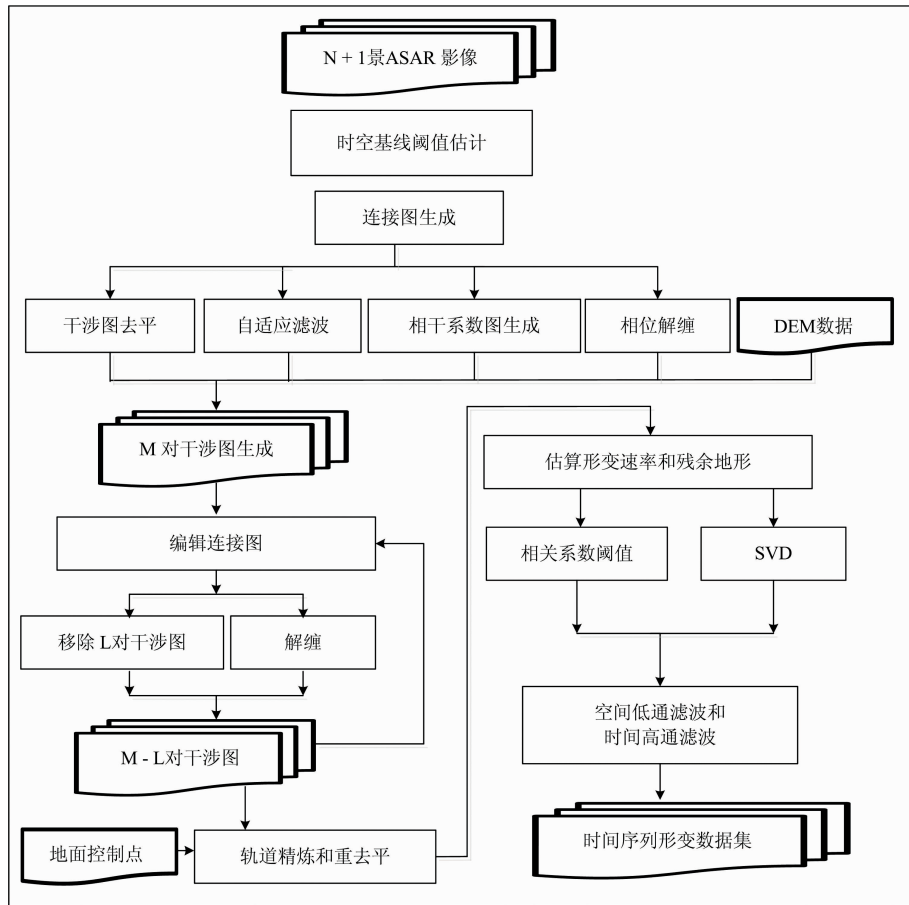


图 3 地表形变反演流程

Fig. 3 Processing of surface deformation calculation

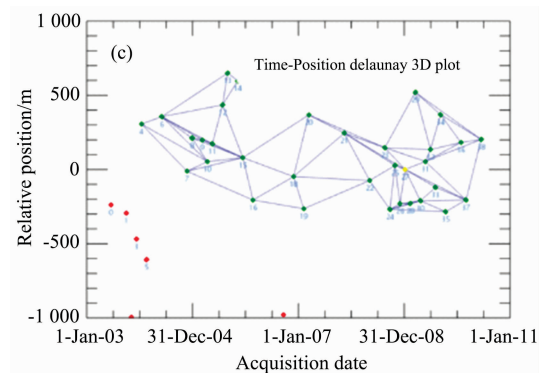
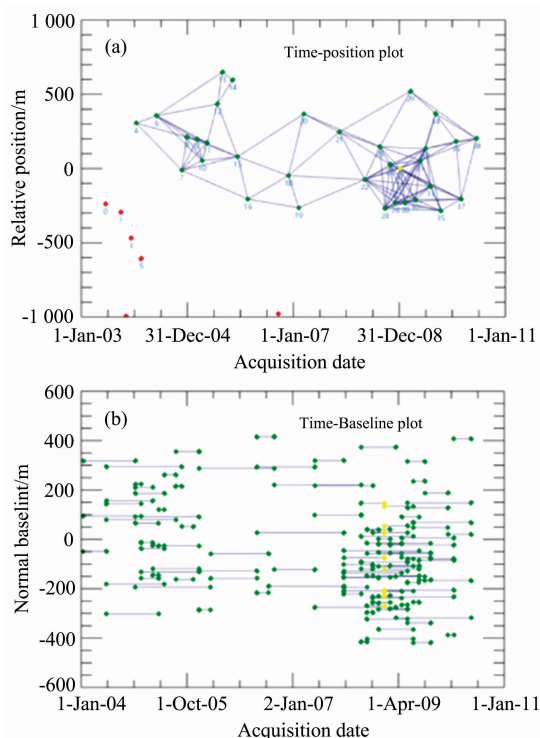


图 4 时空基线图

(a): 空间基线距; (b): 时间基线距; (c): 3D 空间基线距
黄色、绿色和红色点分别代表超级主影像、从影像及未参与配对影像

Fig. 4 Plots of space and time baselines

(a): Plot of position baseline; (b): Plot of time baseline distance; (c): Delaunay 3D plot of position baseline distance
Blue lines represent interferometric pairs; Yellow, green and red diamonds denote super-master, slave and no-matched images, respectively

零散。不过如有需要,可通过各种空间插值方法来获取完整的面状数据,从而用以评估感兴趣区域。为保证更准确地探

索地表形变与温度、降水的关系,不做插值处理。此外,仅通过从影像表现来看,20041228 和 20050726 在山区西部表现出地表抬升状况,而在 20090106 和 20100615 两期影像中则转变为沉降现象,四期影像在山区东部的区域基本都呈现出抬升的态势。而在平原地区,地表的沉降和抬升在 4 期影像中变化不明显,大部分表现为抬升,在接近城市的区域多

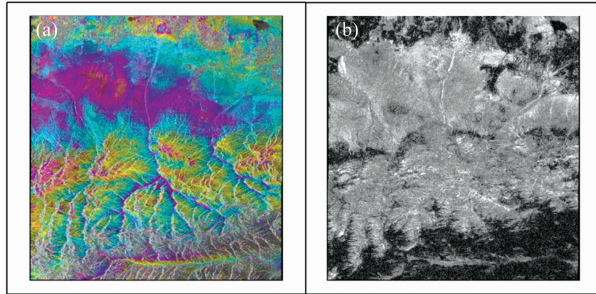


图 5 较优干涉结果

(a): 较优结果; (b): 较差结果

Fig. 5 High quality results of interferograms

(a): High quality result; (b): Low quality result

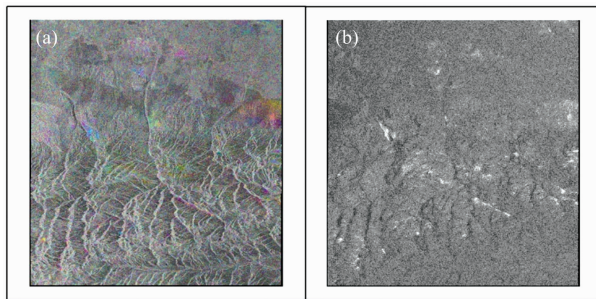


图 6 较差干涉结果

(a): 20050308; (b): 20060621

Fig. 6 Low quality results of interferograms

(a): 20050308; (b): 20060621

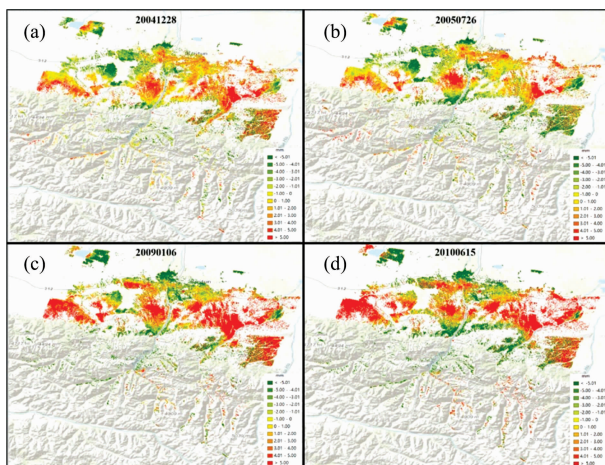


图 7 研究区 4 期示例形变结果

(a): 2004/12/28; (b): 2005/07/26; (c): 2009/01/06; (d): 2010/06/15

Fig. 7 Deformation results of 4 example imagines in the study area

(a): 2004/12/28; (b): 2005/07/26; (c): 2009/01/06; (d): 2010/06/15

表现为沉降。

在研究区监测范围内,2004 年至 2010 年的地表形变速率如图 8 所示。研究区内平原地区的形变主要表现为抬升,仅北方接近城市的区域表现出强烈的沉降现象。研究区内山区的形变结果较为零散,大体上在西部和东部地区分别呈现出沉降和抬升现象。尽管研究区范围内有不同程度的沉降和抬升,但研究期间内的形变速率基本在 $\pm 5 \text{ cm} \cdot \text{yr}^{-1}$ 之内,平均形变速率为 $(-0.07 \pm 3.38) \text{ mm} \cdot \text{yr}^{-1}$ 。虽然整体变形不是十分明显,但是均值体现出该区域内地表存在轻微的沉降现象,同全球气候变暖导致冻土退化的情形一致。此外,与北方西部湖泊附近沉降速率在 -6 和 $7 \text{ cm} \cdot \text{yr}^{-1}$ 之间相比,位于平原区北方中部的乌苏市地表沉降速率基本在 $-10 \text{ cm} \cdot \text{yr}^{-1}$ 以上。山区的整体形变基调以沉降为主,符合全球变暖冻土开始退化的规律。山区每一个有具体数值的形变点满足海拔大于 3000 m 的提取条件,其具体分布位置如图 9 所示。利用温度和降水数据,分析这些形变点的年变化规律如图 10 所示。总体和不同变形速率间隔的形变样本点都呈现出逐步变暖的趋势,而且同样受 2008 年末和 2009 年初的极端降温事情影响。不过除地表形变速率小于 $-2.0 \text{ cm} \cdot \text{yr}^{-1}$ 的样点在 2010 年温度仍然有所下降外,区域形变样本点在 2010 年都有继续变暖的趋势。研究区的山区地表形变速率小于 $-2.0 \text{ cm} \cdot \text{yr}^{-1}$ 、在 -2.0 到 $2.0 \text{ cm} \cdot \text{yr}^{-1}$ 之间和大于 $2.0 \text{ cm} \cdot \text{yr}^{-1}$ 的样本点数量依次为 6 364, 6 449 和 2 385 个。

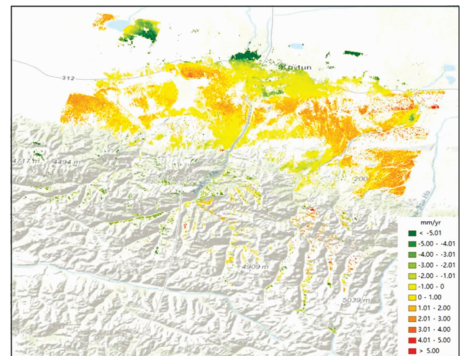


图 8 平均形变速率

Fig. 8 Average deformation rates

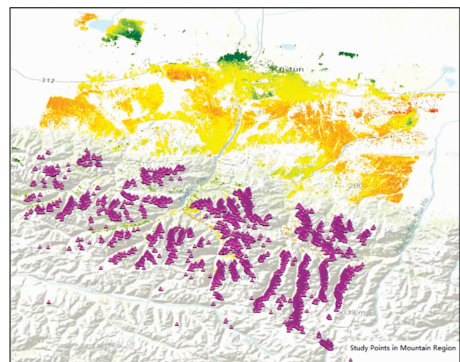


图 9 山区形变样点空间位置分布图

Fig. 9 Deformation points in mountain regions of study areas

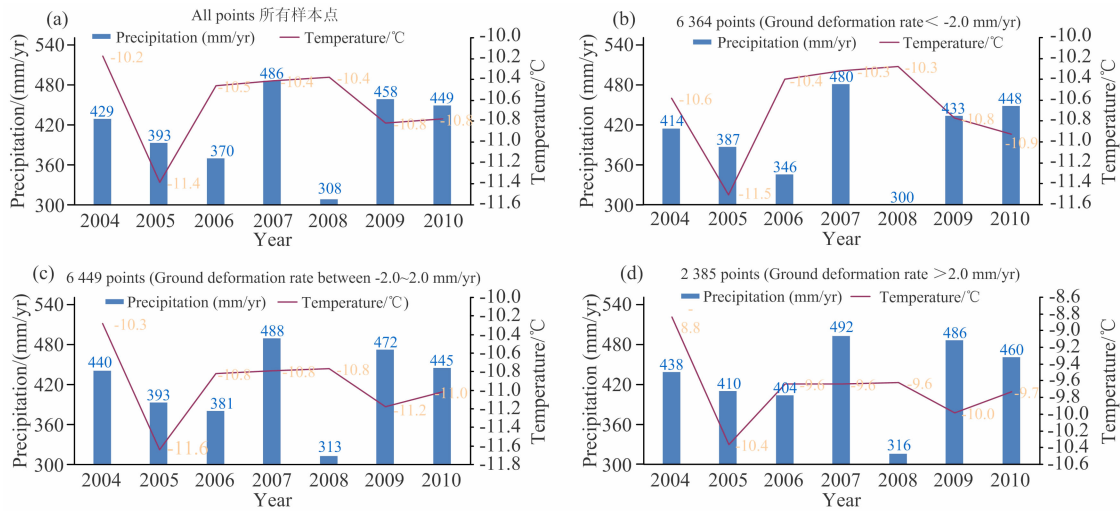


图 10 山区形变样点年均温度和降水曲线图

(a): 所有样本点; (b): 小于 $2 \text{ cm} \cdot \text{yr}^{-1}$ 样本点; (c): $-2 \sim 2 \text{ cm} \cdot \text{yr}^{-1}$ 样本点; (d): 大于 $2 \text{ cm} \cdot \text{yr}^{-1}$ 样本点

Fig. 10 Plots of annual precipitations and annual mean temperatures in mountain regions

(a): All points; (b): Ground deformation rate $< 2 \text{ cm} \cdot \text{yr}^{-1}$;

(c): Ground deformation rate between $-2 \sim 2 \text{ cm} \cdot \text{yr}^{-1}$; (d): Ground deformation rate $> 2 \text{ cm} \cdot \text{yr}^{-1}$

4 结 论

近年来,因人类活动的干扰和全球气候变暖的日益严重,不同区域的多年冻土开始出现退化现象,退化严重的地区甚至会发生强烈的水土流失,对草场、环境、建筑及工程设置造成威胁^[3]。特别是对于天山地区,不仅存在“全球气候变化指示器”的多年冻土,而且还是重要的畜牧业生产基地。无论是在环境保护,还是人类生产、生活方面,都需要着重监测。

下列的几方面需要重点关注:

(1) 地表形变反演结果从空间来分析,虽然在平原地区表现优良,但是在山区却较为稀少和零散。即使可以后期可以进行插值处理,却不一定能完全满足一些需要高精度形变数据的研究和应用。后期可以考虑利用其他软件 and 不同

InSAR方法进行反演对比。

(2) 从时间角度分析,难以反演不间断的长时间序列拟合形变结果。现有常用的 InSAR 数据,特别是开源数据反演结果基本上一年仅存在几期。当利用月尺度气象或其他科学数据集对比分析时(如本文中使用的温度和降水数据),难以实现一对一匹配。如果试图利用日或者小时尺度的数据集进行分析时,则存在更大的科学挑战,因此后期地表形变的研究需要重点关注更细时间尺度的长时间序列地表形变结果反演。

(3) 冻土变化的时间滞后性也需着重考虑。现有研究对时间滞后性的分析不是十分充足,但是冻土发生变化处于地表内部,自然因素对其的影响必然存在一个积累后再变化的过程。后期针对冻土变化的研究分析需要越来越多的关注时间滞后性对其影响,衡量温度或者降水等要素对其时间滞后尺度和周期的具体数值,正是一个亟需科学研究揭示的关键点。

References

[1] Zhang Y, Liu Y, Jin M, et al. Sensors, 2019, 19(3): 1.

[2] Wang Xiaowen, Liu Lin, Zhao Lin, et al. The Cryosphere, 2017, 11(2): 997.

[3] ZHU Jian-jun, LI Zhi-wei, HU Jun(朱建军,李志伟,胡俊). Acta Geodaetica et Cartographica Sinica(测绘学报), 2017, 46(10): 1717.

[4] Zhao L, Wu X, Wang Z, et al. Sci. Rep., 2018, 8(1): 3656.

[5] ZHAO Lin, LIU Guang-yue, JIAO Ke-qin, et al(赵林,刘广岳,焦克勤,等). Journal of Glaciology and Geocryology(冰川冻土), 2010, 32(2): 223.

[6] Yang Kun, He Jie, Tang Wenjun. Agricultural and Forest Meteorology, 2010, 150(1): 38.

[7] Chen Yingying, Yang Kun, He Jie, et al. Journal of Geophysical Research, 2011, 116(D20).

[8] Necsoiu Marius, Walter Gary R. Engineering Geology, 2015, 197: 267.

[9] Zhao Rong, Li Zhiwei, Feng Guangcai. Remote Sensing of Environment, 2016, 184: 276.

[10] Gabriele L, Andrew K, Goldstei N, et al. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1989, 94(B7): 9183.

[11] Jia Yuanyuan, Kim Jin-Woo, Shum C, et al. Remote Sensing, 2017, 9(1): 84.

[12] Chen Fulong, Lin Hui, Li Zhen, et al. Remote Sensing of Environment, 2012, 123: 532.

- [13] Chen Fulong, Lin Hui, Zhou Wei. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 138: 10.
- [14] SUN Xiao-peng, LU Xiao-ya, WEN Xue-hu, et al(孙晓鹏, 鲁小丫, 文学虎, 等). *Remote Sensing for Land & Resources(国土资源遥感)*, 2016, 28(3): 123.
- [15] Berardino P, Fornaro G, Lanari R, et al. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40(11): 2375.

A Study on Ground Deformations Monitoring in Tianshan Mountain of Xinjiang on Active Microwave Spectral Imagines

WANG Zhi-wei^{1,2,3}, YUE Guang-yang^{1*}, WU Xiao-dong¹, ZHANG Wen², WANG Pu-chang², SONG Xue-lian², WU Jia-hai²

1. Cryosphere Research Station on Qinghai-Xizang Plateau, State Key Laboratory of Cryospheric Science, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730020, China
2. Guizhou Institute of Prataculture, Guizhou Academy of Agricultural Sciences, Guiyang 550006, China
3. Department of Geological Sciences, University of Texas at San Antonio, San Antonio 78249, USA

Abstract As global warming, permafrost has degraded seriously. The ecological security of many regions has faced a serious threat to their ecological environment, especially the Tianshan mountain regions, which is one of the five major animal husbandry production bases. At present, in these regions, most studies focus on glacier analysis and few pieces of research about permafrost measure. According to 39 ENVISAT ASAR imagines, covered from 2003 June 17th to 2010 June 15th, surface deformation in permafrost region was monitored by SBAS-InSAR method. In this paper, the principles of deformation algorithm were introduced first. When generating the connection graph of the single look complex image of ASAR dataset, there was 126 differential interferogram based on 500 m and 550 days for temporal and spatial baseline respectively. Because of Spatio-temporal baselines and the Doppler centroid difference, 6 ASAR imagines were not generated the connection graph. Then using STRM V4 DEM, 52 low-quality pair of interferogram were eliminated, after the processes of interferograms flattening, adaptive filter, coherence generation and unwrapping. The ground deformation results of the study area were calculated by external ground control points, refinement and re-flattening, estimation of displacement velocity and residual deformation, coherence threshold control, SVD, spatially low-path filtering and temporally high-path filtering. There were 33 results of ground deformation, which covered from 2004 to 2010. According to the deformation results, there were different subsidence and uplift phenomenon in study areas. The deformation rate of the overall study area was no more than $\pm 5 \text{ cm} \cdot \text{yr}^{-1}$, and its average deformation rate was $(-0.07 \pm 3.38) \text{ mm} \cdot \text{yr}^{-1}$. It is indicating that there is a slight subsidence phenomenon in the study area. With the altitude of 3 000 m, the deformation changing mechanism were excavated for the plains and mountain areas distributed by seasonal frozen ground and permafrost respectively. From the research results, deformations in the plain region were uplift except for deformations in the area near cities were subsidence largely. In the mountainous region, the deformations were very scattered than them in the plain region. The overall trend of deformations of the mountain was dominated by subsidence, and subsidence and uplift in the western and eastern regions respectively. There were 15 198 deformation points, which altitude were more than 3 000 m. The annual variation mechanisms of temperature and precipitation about overall deformation points and different deformation intervals points were demonstrated by temperature and precipitation dataset. The results showed that both trends of them have a gradual warming phenomenon. The numbers of deformation rate points about different intervals were 6 364, 6 449 and 2 385 for rates lower than $-2.0 \text{ cm} \cdot \text{yr}^{-1}$, from -2.0 to $2.0 \text{ cm} \cdot \text{yr}^{-1}$ and higher than $2.0 \text{ cm} \cdot \text{yr}^{-1}$ in the study mountainous region respectively. Points with negative values were more than points with positive values in the mountainous region, which reflected that subsidence positions were more than uplift positions. This result was also consistent with that global warming cause permafrost degradation then ground subsided. In this paper, the ground deformation results of the study area were successfully calculated by ASAR dataset which was active microwave spectrum. Meanwhile, the deformation results were discussed and prospected in the respects of space, time and the time lag of the permafrost deformation. The study results could provide a new way and reference for the monitoring of permafrost deformation in the Tianshan mountain region.

Keywords SBAS-InSAR; Cryosphere; Permafrost; Global warming; Ground subsidence

(Received Apr. 25, 2019; accepted Aug. 12, 2019)

WANG Zhi-wei and YUE Guang-yang: joint first authors

* Corresponding author