

利用双差干涉测量方法提取 Jelbart 冰架接地线

常 沛^{1,2} 周春霞^{1,2} 墙 强^{1,2}

1 武汉大学中国南极测绘研究中心,湖北 武汉,430079
2 武汉大学极地测绘科学国家测绘地理信息局重点实验室,湖北 武汉,430079

摘 要:接地线是内陆固定冰盖和漂浮冰架的分界线,是冰川动力学研究的重要参数,其位置的准确界定影响到南极冰盖物质平衡计算以及冰川动力学数学建模。介绍了 DInSAR 提取接地线的基本原理,并利用 DDInSAR 的方法去除冰流相位对准确探测接地线位置的干扰,通过判读双差干涉图中由潮汐相位引起的密集条纹中靠近内陆一侧的分界线得到接地线提取结果。通过和已有的全南极接地线产品对比验证,充分说明了 DDInSAR 是大范围、连续以及高精度提取接地线的有效技术手段,为今后极区不同地区、不同季节和年份的接地线提取及动态变化研究奠定了基础。

关键词:接地线;接地区域;DDInSAR;Jelbart 冰架

中图法分类号:P343.62;P237.9;P728.2 **文献标志码:**A

接地线是内陆固定冰盖和漂浮冰架或冰川的分界线,是冰流从冰床脱离的地方。由于受到海洋潮汐的影响,接地线的位置会在接地区域的范围内不断发生变化。准确提取接地线的位置对于南极冰架的物质平衡计算十分关键,而且接地线也是冰川动力学建模的基本输入参数之一。接地线位置对冰流厚度变化、海平面和海洋温度的变化非常敏感,因此,它还是气候变化的一个重要指示器。

由于南极极端恶劣的气候和环境,加之接地线的位置一般位于冰盖与海洋交汇的底部,因此,实地探测接地线的位置具有很大难度。目前,提取接地线或接地区域的技术手段主要包括流体静力学平衡分析、基于可见光影像的坡度跟踪、基于测高数据的重复轨道分析和差分干涉测量(DInSAR)。文献[1,2]分别基于 MODIS 南极影像镶嵌图(mosaic of Antarctica, MOA)和 Landsat 影像镶嵌图(landsat image mosaic of Antarctica, LIMA)的冰架坡度变化特征提取并发布 MOA 以及 ASATD(Antarctic surface accumulation and ice discharge)接地线产品;文献[3,4]使用 ICE-Sat 数据采用重复轨道分析分别提取 Ronne 和

Ross 冰架的接地区域;Rignot 等通过使用 ERS、RADARSAT 以及 ALOS 数据,利用 DInSAR 和双差干涉测量(double differential SAR interferometry, DDInSAR)精确地获取南极冰盖接地线的位置,并发布 MEaSUREs(making earth system data records for use in research environments)南极接地线产品^[5];Han 等使用 X 波段 COSMO-SkyMed 4 颗卫星组成的干涉对,DDInSAR 方法对 Campbell 冰川的冰流速和接地线进行研究^[6,7]。但是国内对于接地线的研究甚少,王清华等通过 1977~1978 年俄罗斯南极考察队执行第 33 次南极考察任务期间得到的机载雷达测厚(radio echo sounding, RES)的冰厚度资料,根据流体静力学平衡理论,得出 Amery 冰架接地线位置最南到达 73.2 °S,距离冰架前端约 500 km^[8]。

差分干涉测量技术已经被成功应用于全南极接地线的准确提取,是大范围、连续以及高精度提取接地线的有效技术手段。1991 年发射的 ERS-1 卫星曾短暂执行过时间基线仅为 3 d 的飞行任务,在此期间获取的 SAR 数据对在南极地区年流速达数百米的冰川都可以保持很好的相干性。因

此,本文利用 3 景 ERS-1 数据所构成的两组时间基线为 3 d 的干涉对,采用 DDInSAR 去除冰流相位对接地线提取的干扰,通过判读双差干涉条纹图 (double differential SAR interferogram, DDSI) 中密集条纹区域靠近内陆一侧的分界线来提取接地线,并将提取结果和 MEaSURES 接地线进行对比来验证提取结果的精度。

1 接地区域和接地线

接地区域是从完全接地的固定冰到和海洋处于流体静力学平衡的漂浮冰的冰盖区域。如图 1 所示, F 点为受到潮汐影响的冰曲到陆地的极限点, G 点为接地线位置, I_b 为冰架坡度的陡变点, I_m 为冰架底部局部地形的最低点, 而 H 点为冰曲到海洋方向的极限点。在南极地区, 接地区域 $F \sim H$ 通常有数公里或十几公里的宽度。 F 、 G 、 I_b 、 I_m 和 H 之间的实际距离由实际冰层厚度和属性以及岩床地形和构造决定。

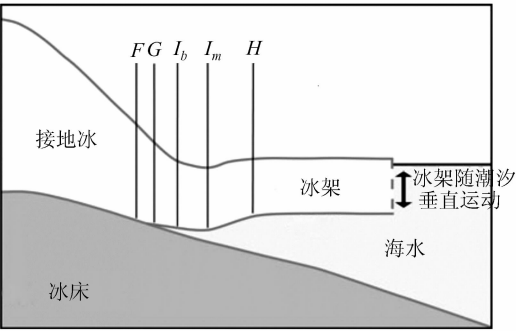


图 1 接地区域特征点剖面示意图^[9]
Fig. 1 Profiles Diagram of Grounding Zone Features

从内陆流来的冰在接地线 G 点开始漂浮在海面上, 在 H 点之后受海水浮力处于流体静力学平衡状态。对于任意一条冰流而言, 其接地线位置的精确确定比较困难, 因为它会随冰流底部的增厚或减薄而发生变化。研究发现在西南极 PIG (Pine Island Glacier) 地区由于冰流底部的消融所导致的接地线回退现象与 PIB (Pine Island Bay) 海洋温度的逐年上升呈正相关^[10,11]。

基于冰架随潮汐运动的特征, DInSAR 可以准确提取接地线点 (G)。基于光学影像的坡度跟踪方法实际探测的是接地区域中的坡度陡变点 (I_b), 因此相应的接地线产品精度较差。而基于测高数据采用重复轨道分析技术虽然可以探测接地区域多个特征点 (F 、 I_b 和 H), 但不包括 G 点, 且其提取结果不连续, 空间覆盖度较差^[3,4]。

2 DDInSAR 提取接地线原理

当不考虑大气、电离层影响和系统噪声时, 重复轨道雷达干涉测量得到的一幅干涉图 (single SAR interferogram, SSI) 的干涉相位可表示为^[12]:

$$\varphi = \varphi_{\text{ref}} + \varphi_{\text{topo}} + \varphi_{\text{def}} = -\frac{4\pi}{\lambda}(B_{\parallel} + \frac{B_{\perp}}{R\sin\theta}h - \Delta r) \tag{1}$$

式中, λ 为雷达波长; R 为天线到目标点的距离; θ 为第一副天线的参考视线角; h 为地形高程; Δr 为重轨观测期间目标点沿视线方向的形变。且有参考相位 $\varphi_{\text{ref}} = -\frac{4\pi}{\lambda}B_{\parallel}$ 、地形相位 $\varphi_{\text{topo}} = -\frac{4\pi}{\lambda}$

$\frac{B_{\perp}}{R\sin\theta}h$ 和形变相位 $\varphi_{\text{def}} = \frac{4\pi}{\lambda}\Delta r$ 。两幅 SSI 中 φ_{ref} 和 φ_{topo} 会存在因为基线不同引起的相位差异, 因此, 首先通过引入外部 DEM 采用两轨差分去除平地 and 地形相位得到差分干涉图 (differential SAR interferogram, DSI)。DSI 中只包含由冰流相位 φ_{flow} 和潮汐相位 φ_{tide} 引起的形变相位, 即

$$\Delta\varphi = \varphi_{\text{def}} = \varphi_{\text{flow}} + \varphi_{\text{tide}} \tag{2}$$

Rignot 等指出直接使用两轨差分提取接地线在绝大多数存在冰流的区域是不适用的^[13], 因为无法区分 DSI 中的冰流相位和潮汐相位。以 ERS-1 卫星 3 d 重访周期的数据为例, 3 景 SAR 数据可以组成两组时间基线为 3 d 的干涉对, 在配准两组干涉对时都选取数据获取日期在前的 SAR 影像作为参考影像, 保证冰流在两幅 DSI 产生的相位保持一致。因为两组干涉对的时间基线相同, 可以假定冰流速的大小在两幅 DSI 中保持不变, 则通过对两幅 DSI 再进行差分消除冰流相位的影响。故双差干涉条纹图 DDSI 包含的相位可表示为:

$$\Delta\varphi_{\text{double}} = \varphi_{\text{tide-1}} - \varphi_{\text{tide-2}} \tag{3}$$

DDSI 中内陆接地的固定冰盖不受潮汐影响, 而浮动冰架或冰川随潮汐运动, 因此, 浮动冰架或冰川和接地冰盖的交界处会在 DDSI 中产生密集条纹。接地线即为 DDSI 中密集条纹区域最靠近内陆一侧的分界线, 通过跟踪这个分界线进行接地线提取。

3 实验区域和数据

Jelbart 冰架位于毛德皇后地沿岸, 宽 70 km。Schytt 冰川为流入 Jelbart 冰架的主要冰流之一, 也是通过查找 ERS-1 卫星 3 d 时间基线的数据后

选定的实验数据所覆盖的区域。图 2 中黑色方框为 ERS-1 数据的覆盖范围;红色为 Scambos 等发布的线格式的 MOA 接地线^[1];蓝色为 Bindshcandler 等发布的 ASAID 接地线^[14];黄色为 Rignot 等发布的点格式的 MEaSUREs 接地线^[5];底图为全南极 Landsat 影像镶嵌图(LIMA)。

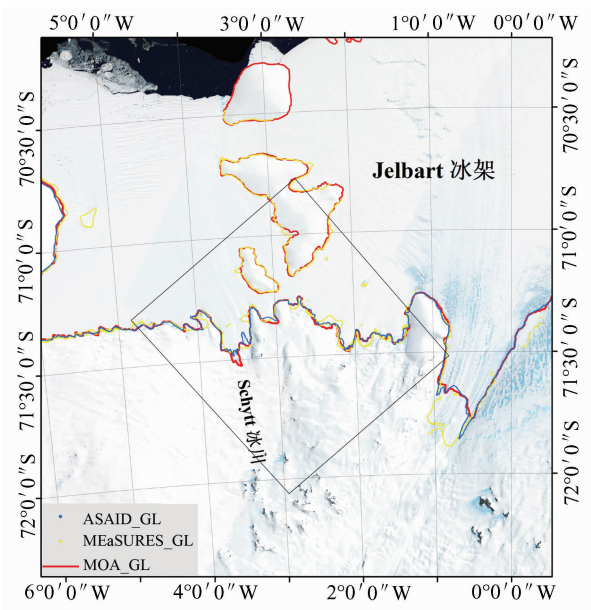


图 2 实验区示意图

Fig. 2 Schematic Diagram of Experimental Area

3 景 ERS-1 数据参数如表 1 所示,其中 SSI-1 和 SSI-2 组合分别以轨道号 13 761 和 13 804 的影像为参考影像。

表 1 实验区域 SAR 影像对信息

Tab. 1 Parameters of SAR Image Pairs

干涉对	获取时间	轨迹号	轨道号	平行基线/m	垂直基线/m
SSI-1	1994-03-04	2	13 761	21	55
	1994-03-07	2	13 804		
SSI-2	1996-03-07	2	13 804	10	29
	1996-03-10	2	14 847		

4 数据处理和结果分析

ERS-1 卫星 3d 短时间基线的数据保证了干涉对的相干性,短垂直基线则有利于高精度探测形变。通过配准两组 SAR 数据对得到两幅干涉图,并对两幅干涉图进行去平地相位和滤波处理。两轨差分过程中引入的 DEM 为 Bamber 等 2009 年发布的全南极 1 km 分辨率 DEM^[15],精度可达 10 cm,在地形起伏较大的地区精度也可达几米^[16]。对两幅 DSI 选取相同的解缠起点,采用相同的解缠方法枝切法进行解缠,地理编码 SSI-1 得

到包含冰流和潮汐相位的 DSI 如图 3 所示。图 3 中黑色曲线为截取的在 SAR 数据覆盖范围内的 MEaSUREs 接地线,黑色箭头表示的是冰流速的大小和方向,在冰流速较大的 Schytt 冰川上出现的密集条纹对准确提取接地线产生了干扰。

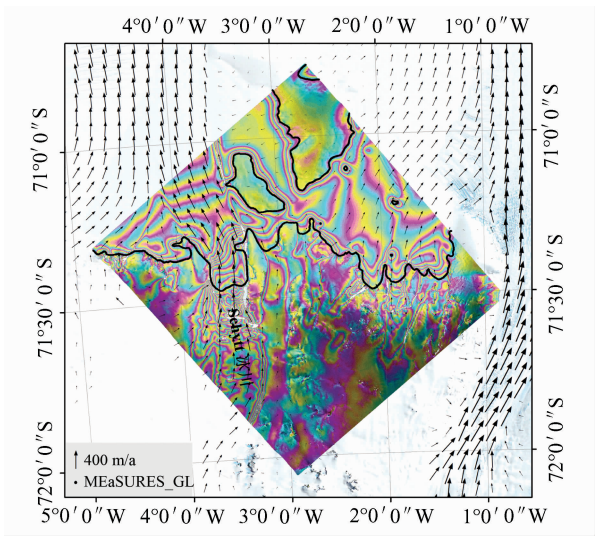


图 3 SSI-1 的差分干涉图

Fig. 3 Differential SAR Interferogram of SSI-1

为了消除冰流相位的干扰,利用两幅 DSI 参考影像的强度信息对两幅已解缠的 DSI 进行配准并差分得到 DDSI。在 DDSI 中浮动冰架的相位差主要是由潮汐引起的,而轨道和大气误差、冰架质量变化、粒雪压缩等引起的相位差通常较小^[9]。接地区域在 DDSI 上通常呈现为紧密相连的条纹密集区域,对应着由于海洋潮汐作用引起的浮动冰架的高程起伏。图 4 为地理编码后的 DDSI,白色曲线为人工跟踪接地区域密集条纹靠近内陆一侧的分界线得到接地线提取结果(GL_track),黑色曲线为 MEaSUREs 接地线。

图 4 中 a、b、c 和 d 等 4 处小岛屿周围的密集条纹靠近内侧的分界线和 MEaSUREs 接地线十分吻合。而基于可见光影像的两种接地线产品(图 2)在 a、b、c 和 d 等 4 处没有勾绘出小岛屿周围的接地线,这反映出利用差分干涉提取接地线与基于可见光影像的方法相比所具有的巨大优势。在平行于海岸线的方向,本文提取的接地线也和 MEaSUREs 接地线十分吻合,即使在年流速达到 400 m/a 的 Schytt 冰川和 Jelbart 冰架的交汇处,DDSI 上冰流相位对准确探测接地线的干扰被正确移除。

因为实验选取的 SAR 数据和 MEaSUREs 接地线使用的源数据相同,而且该产品精度达到 100 m,也是目前可信度最高的接地线产品^[5]。利

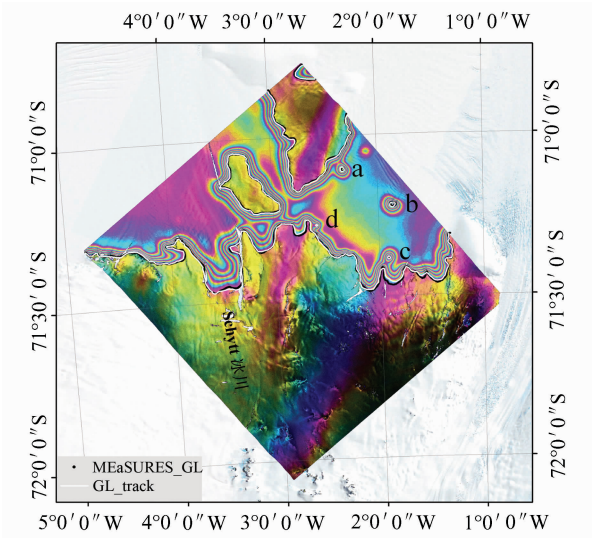


图 4 DDSI 接地线提取结果图

Fig. 4 Grounding Line Extraction Results Using DDSI

用 ArcToolbox 中的 Near 工具,分别统计分析本文提取结果(图 4 中 GL_track)、MOA 接地线和 ASAID 接地线到 MEaSURES 接地线最短垂直距离,得到的距离直方图如图 5 所示。三者到 MEaSURES 接地线垂直距离的均值分别为 190 m、560 m 和 631 m,标准差分别为 184 m、474 m 和 514 m。这说明采用差分干涉方法提取的接地线精度优于 MOA 和 ASAID 这两种接地线产品。

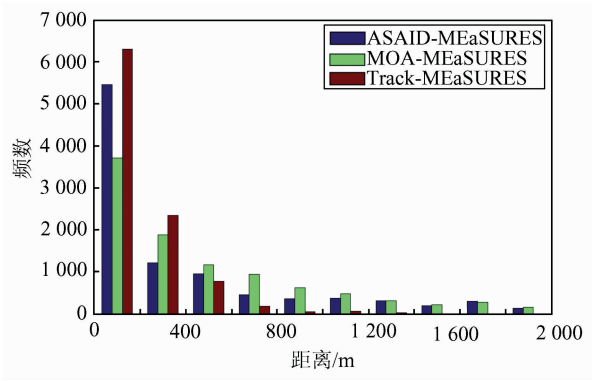


图 5 垂直距离统计直方图

Fig. 5 Statistics Histogram of Vertical Distance

5 结 语

本文利用 ERS-1 卫星 3 d 时间基线的两组干涉对,采用 DDInSAR 方法得到 DDSI,通过跟踪 DDSI 上密集条纹区域靠近内陆一侧的分界线来提取接地线,并统计和 MEaSURES 接地线产品的垂直距离标准差达到 184 m。实验结果表明,DDInSAR 可以去除冰流相位对探测接地线产生的干扰,并且由于 DDInSAR 对于垂直位移敏感

且分辨率高的特点,可以探测出基于可见光影像坡度跟踪无法分辨的面积较小的岛屿,而且提取的接地线精度优于 MOA 和 ASAID 接地线产品,充分证明 DDInSAR 是大范围、连续及高精度提取接地线的有效手段。

DDInSAR 虽然是目前最有效的接地线提取方法,但满足 DDInSAR 要求的数据源十分有限。ERS-1 卫星 3 d 时间基线的数据对很少,而 ERS tandem 任务虽然可以获得时间基线仅为 1 d 的干涉对,但是两幅干涉对的时间间隔也达到 35 d 或更长,这也给配准两幅干涉图带来困难。而使用 L 波段 SAR 卫星数据进行差分干涉也需要解决在冰流速较大地区其重访周期较长带来的失相关问题。X 波段的 COSMO-SkyMed 以及 C 波段的 Sentinel-1 可以提供满足 DDInSAR 数据要求的干涉对,因此,今后需要联合多源 SAR 数据组成时间序列,对 Jelbart 冰架或其他实验区域接地线的提取以及动态变化展开研究。

致谢:感谢欧洲空间局(ESA)提供的 ERS 数据,美国国家冰雪数据中心(NSIDC)提供的 BAMBER DEM 以及 MOA、ASAID 和 MEaSURES 接地线产品。

参 考 文 献

[1] Scambos T A, Haran T M, Fahnestock M A, et al. MODIS-based Mosaic of Antarctica (MOA) Data Sets: Continent-wide Surface Morphology and Snow Grain Size[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 111(2/3): 242-257

[2] Bindschadler R, Vornberger P, Fleming A, et al. The Landsat Image Mosaic of Antarctica[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(12): 4 214-4 226

[3] Fricker H A, Padman L. Ice Shelf Grounding Zone Structure from ICESat Laser Altimetry[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(15):161-177

[4] Brunt K M, Fricker H A, Padman L, et al. Mapping the Grounding Zone of the Ross Ice Shelf, Antarctica, Using ICESat Laser Altimetry[J]. *Annals of Glaciology*, 2010, 51(55): 71-79

[5] Rignot E, Mouginot J, Scheuchl B. Antarctic Grounding Line Mapping from Differential Satellite Radar Interferometry [J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(10):264-265

[6] Han H, Lee H. Tide Deflection of Campbell Glacier Tongue, Antarctica, Analyzed by Double-differential SAR Interferometry and Finite Element Method[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 141: 201-213

[7] Han H, Lee H. Tide-corrected Flow Velocity and

- Mass Balance of Campbell Glacier Tongue, East Antarctica, Derived from Interferometric SAR[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 160: 180-192
- [8] Wang Qinghua, Ning Jinsheng, Ren Jiawen, et al. Re-definition and Validation of the Grounding Line of Amery Ice Shelf, East Antarctica[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2002, 27(6): 591-597(王清华, 宁津生, 任贾文, 等. 东南极 Amery 冰架与陆地冰分界线的重新划定及验证[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2002, 27(6): 591-597)
- [9] Fricker H A, Coleman R, Padman L, et al. Mapping the Grounding Zone of the Amery Ice Shelf, East Antarctica Using InSAR, MODIS and ICESat [J]. *Antarctic Science*, 2009, 21(5): 515-532
- [10] Rignot E, Jacobs S S. Rapid Bottom Melting Widespread Near Antarctic Ice Sheet Grounding Lines [J]. *Science*, 2002, 296(5 575): 2 020-2 023
- [11] Park J W, Gourmelen N, Shepherd A, et al. Sustained Retreat of the Pine Island Glacier[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(10): 2 137-2 142
- [12] Zhou Chunxia, Deng Fanghui, Ai Songtao, et al. Determination of Ice-flow Velocity at the Polar Record Glacier and Dalk Glacier Using DInSAR[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(8): 940-944(周春霞, 邓方慧, 艾松涛, 等. 利用 DInSAR 的东南极极记录 and 达尔克冰川冰流速提取与分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2014, 39(8): 940-944)
- [13] Rignot E. Radar Interferometry Detection of Hinge-line Migration on Rutford Ice Stream and Carlson Inlet, Antarctica[M]. USA: *Annals of Glaciology*, 1998: 27: 25-32
- [14] Bindenschadler R, Choi H, Wichlacz A, et al. Getting Around Antarctica: New High-resolution Mappings of the Grounded and Freely-floating Boundaries of the Antarctic Ice Sheet Created for the International Polar Year [J]. *The Cryosphere*, 2011, 5(3): 569-588
- [15] Bamber J L, Gomez-Dans J L, Griggs J A. A New 1 km Digital Elevation Model of the Antarctic Derived from Combined Satellite Radar and Laser Data—Part 1: Data and Methods [J]. *The Cryosphere*, 2009, 3(1): 101-111
- [16] Griggs J A, Bamber J L. A New 1 km Digital Elevation Model of Antarctica Derived from Combined Radar and Laser Data—Part 2: Validation and Error Estimates[J]. *The Cryosphere*, 2009, 3(1): 113-123

Grounding Line Extraction of Jelbart Ice Shelf Using DDInSAR

CHANG Pei^{1,2} ZHOU Chunxia^{1,2} QIANG Qiang^{1,2}

1 Chinese Antarctic Center of Surveying and Mapping, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 Key Laboratory of Polar Surveying and Mapping, National Administration of Surveying, Mapping and Geoinformation, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: A grounding line is the boundary between inland grounded ice sheet and a floating ice shelf and an important parameter in glacier dynamics. Precise extraction of the grounding line has a great impact on the Antarctic ice sheet mass balance and mathematical modeling of glacier dynamics. In this paper, the basic principles of grounding line extraction using DInSAR are introduced. The interference of ice flow on extraction of grounding line is removed by double differential SAR interferometry (DDInSAR) and the grounding line is detected through an interpretation of the inner of dense fringes induced by ocean tide in double differential SAR interferogram images. The mapping result is verified by comparing it to the Antarctic grounding line product, demonstrating that DDInSAR is an effective technique suitable for large-scale, continuous and high-precision grounding line extraction, thus laying a foundation for grounding line extraction and understanding of the dynamic changes in polar region.

Key words: grounding line; grounding zone; DDInSAR; Jelbart ice shelf

First author: CHANG Pei, master, specializes in InSAR and glacier change monitoring. E-mail: changpei@whu.edu.cn

Corresponding author: ZHOU Chunxia, PhD, professor. E-mail: zhoucxc@whu.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41376187, 41531069; the National Basic Research Program of China (973 Program), No. 2013CBA01804; the Chinese Polar Environment Comprehensive Investigation & Assessment Program, No. CHINARE2016-02-04; the Public Science and Technology Research Fund Project of Surveying, Mapping and Geoinformation, No. 201412009.