

利用偏移量跟踪测定 Amery 冰架 冰流汇合区的冰流速

邓方慧^{1,2} 周春霞^{1,2} 王泽民^{1,2} 鄂栋臣^{1,2} 张辛³

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

3 长江勘测规划设计研究院,湖北 武汉,430010

摘要:利用 35 d 时间基线的 Envisat ASAR 数据对,采用偏移量跟踪方法对东南极 Amery 冰架冰流汇合区的冰流速进行了测定,并对流速结果进行了精度评定和对比分析,验证了本文结果的可靠性。结果显示,Lambert、Mellor 及 Fisher 冰川在 Amery 冰架后缘交汇处冰流速最大可达 800 m/a;汇合区接地线附近的冰流速存在一定的变化特征,该特征是辅助确定接地线位置的重要参考信息。

关键词:Amery 冰架;偏移量跟踪;冰流速;接地线

中图法分类号:P225

文献标志码:A

具有高动态性、快速流动的冰流是南极冰盖物质输出的主要形式,其对应的冰流速是冰盖动力学过程的重要参数,它衡量了冰盖物质从内陆流向海洋的速率以及冰盖的流动方式,同时反映了冰盖物质随时间的演变过程。量化评估这些冰流的大小、随时间的变化和引起变化的原因,是估计南极冰盖对全球海平面贡献的先决条件。Lambert 冰川-Amery 冰架系统(简称 LAS)是南极冰盖最大的冰流系统,东南极冰盖约 16% 的冰量经 Amery 冰架排泄入海,而其出口只占南极海岸线的 1.7%^[1-2],因此该地区的冰流速变化对整个南极冰盖物质平衡状态有着十分重要的影响。Amery 冰架后缘由多条冰川汇合而成,汇合区的冰流速对于整个 LAS 的冰架底部物质通量估算、动力学过程和物质平衡等研究提供重要参数。

基于 SAR 数据对的 DInSAR 和偏移量跟踪方法是南极地区冰流速测量的主要手段。Rignot 等 2011 年发布的全南极冰流速(本文简称 MEaSURES 冰流速),数据源全部为 SAR 影像,其大部分区域冰流速提取基于偏移量跟踪方法,一部分区域冰流速提取基于 DInSAR^[3]。DIn-

SAR 只能获取距离向位移值,且只有当 SAR 影像对有较高的相干性,解算结果才可靠。偏移量跟踪方法测量精度和结果分辨率不如 DInSAR,但其不仅能测量距离向位移值,还能测量方位向位移值,对相干性低的区域仍然适用^[4]。

文献[3, 5-8]在 LAS 开展了冰流速研究,Amery 冰架冰流速每年达数百米到一千多米。本文利用 35 d 时间基线的 Envisat ASAR 数据对,采用偏移量跟踪方法提取了 Lambert、Mellor 和 Fisher 冰川注入 Amery 冰架冰流汇合区的冰流速图。从影像配准精度、岩石区域流速统计、与 GPS 实测结果及 MEaSURES 冰流速比较等 4 个方面对结果精度进行了评定,说明了结果的可靠性。并初步探讨了汇合区接地线附近的冰流速变化特征,该特征可以辅助确定接地线的位置。

1 偏移量跟踪

偏移量跟踪方法通常先将两景 SAR 影像进行精确配准,再通过距离向和方位向的偏移量来估算地表位移,从而得到冰流速^[4, 9]。偏移量跟踪可以直接计算绝对位移量,不涉及 DInSAR 中

收稿日期:2013-11-06

项目来源:国家自然科学基金资助项目(41376187, 41076126, 41276188);国家 973 计划资助项目(2013CBA01804);国家海洋局南北极环境综合考察与评估专项资助项目(CHINARE2014-02-04)。

第一作者:邓方慧,博士生。主要从事雷达干涉测量、冰川动态变化研究。E-mail: dengaliu66@gmail.com

通讯作者:周春霞,博士,教授。E-mail: zhoucx@whu.edu.cn

相位解缠的问题,对于相干性低的 SAR 数据对同样适用。常用的偏移量跟踪方法有两种,即基于 SAR 强度影像的强度跟踪和基于相位信息的相干性跟踪^[4]。强度跟踪通过计算搜索窗口与目标窗口影像强度的互相关性,寻找互相关函数的峰值来确定搜索窗口与目标窗口的偏移量。这种方法依赖于 SAR 影像上的斑点特征,能够克服影像相干性低甚至不相干的问题。相干性跟踪通过计算搜索窗口与目标窗口复数影像的相干性,寻找相干性峰值来确定搜索窗口与目标窗口的偏移量。相干性跟踪对影像相干性要求高,是强度跟踪的一种互补。对于流速较大区域,35d 时间基线的 SAR 影像对相干性较低,因此本文采用强度跟踪方法提取冰流速,具体流程参见图 1。

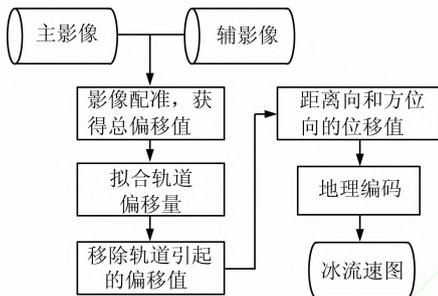


图 1 偏移量跟踪方法提取冰流速流程图

Fig. 1 Flowchart of Ice Velocity Derivation with Offset Tracking

在地形起伏不大、基线较小,且不考虑电离层影响的情况下,强度跟踪方法计算得到的总偏移量包含冰流引起的位移量和轨道偏移量,因此,必须从总偏移量中移除轨道偏移量,从而提取冰流速^[10-11]。轨道偏移量是主辅影像获取时卫星成像姿态和轨道差异导致的像素偏差。直接利用欧空局以及其他机构提供的轨道数据不足以精确估算轨道偏移量,在研究中利用双线性多项式函数拟合轨道平面^[10],即

$$\text{off}_R = a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy \quad (1)$$

$$\text{off}_A = b_0 + b_1x + b_2y + b_3xy \quad (2)$$

式中, off_R 、 off_A 分别表示距离向和方位向的轨道偏移量; x 、 y 表示控制点在单视复数影像中的行列号; a_i 、 b_i 分别为距离向和方位向的待求多项式系数。本文利用稳定的岩石点作为控制点,采用最小二乘方法确定系数 a_i 和 b_i 。

2 研究区域和实验数据

Amery 冰架是南极第三大冰架,位于东南极北查尔斯王子山和拉斯曼丘陵之间^[12],面积约

71 260 km²。Fisher、Mellor 及 Lambert 冰川是注入 Amery 冰架后缘的主要冰川,冰量常年向 Amery 冰架汇聚,通过狭窄的 Amery 冰架流向海洋,且 Amery 冰架入海口长度仅占南极海岸线长度的 1/60^[2],因而该地区在南极冰盖物质平衡研究中占有重要地位。图 2 中,灰色框为实验数据覆盖范围,黑色实线为接地线,黑色三角形为 GPS 实测点,可以看到明显的冰川流痕,并在 Amery 冰架后缘汇合后形成更大的冰流,而且新确定的接地线就位于这三条冰川的汇合处^[13]。我国已开展多次 Amery 冰架考察,包括冰流速 GPS 观测、冰雪物质平衡观测、冰面雷达探测等。但是受野外观测支撑条件和气候条件的限制,只能到达有限的位置。联合利用卫星遥感和地面数据是开展该区域物质平衡研究的有效手段。

高纬度地区,C 波段比 L 波段受电离层影响小^[14],本文采用 C 波段 Envisat ASAR 数据(表 1),波长为 5.6 cm,分辨率为 30 m,幅宽 100 km×100 km。影像获取时间均为 2010 年南极冬季,减小了重叠区域因年际和季节不同而产生的冰流速差异。研究区域分布有一定数量的岩石,为偏移量跟踪方法提取冰流速提供了可观的控制点。

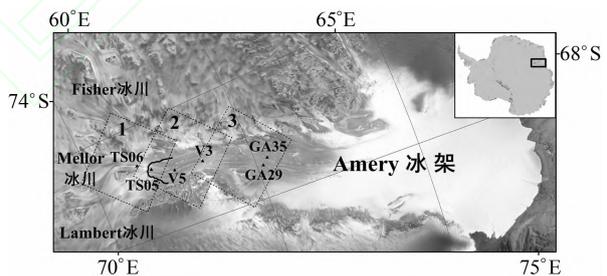


图 2 研究区域 Radarsat 拼接影像

Fig. 2 Radarsat Image Mosaic of Study Area

表 1 Envisat ASAR 数据参数

Tab. 1 Parameters of Envisat ASAR Data

ID	影像对获取时间	时间	平行	垂直
		基线/d	基线/m	基线/m
1	2010-05-27~2010-07-01		160	321
2	2010-05-21~2010-06-25	35	79	98
3	2010-05-15~2010-06-19		71	197

3 数据处理和结果分析

3.1 轨道偏移量的拟合

利用双线性多项式函数拟合轨道偏移量是数据处理中的关键步骤。对于岩石区域,“冰流速”为零,即可认为 SAR 主辅影像之间,岩石区域只

存在轨道偏移量。考虑到雷达影像存在透视收缩、阴影、叠掩等现象,本文选点时结合强度影像和光学影像,确保所选控制点都位于岩石上,且均匀分布(图 3)。3 组 SAR 影像对拟合的多项式系数如表 2 所示,其中,配准获取的与拟合求得的偏移量之间的标准差在 0.01~0.09 个像素之间,说明拟合结果较好。

3.2 冰流速结果

分别对 3 组数据采用偏移量跟踪方法提取冰流速并进行拼接,重叠区域因差异不大取平均值。图 4 为拼接后 Amery 冰架后缘冰流汇合处的冰流速图,分辨率为 200m,并提取了冰流运动方向。从冰流速图上可以看出,来自 Lambert、Mellor 以

及 Fisher 冰川的冰流向 Amery 冰架汇集,且汇集后的流速大于任一子冰流的流速,汇合处冰流速最大可达 800 m/a。从汇合处开始,沿着冰流方向,冰流速逐渐下降。



图 3 第 1 组数据控制点分布示意图
Fig. 3 Control Points Distribution of the First Data Pair

表 2 双线性多项式函数拟合的轨道偏移量系数及标准差

Tab. 2 Coefficients and RMSEs of the Bilinear Polynomial Function for Orbital Offsets

		1	2	3
距离向多项式系数	a_0	5.246	-10.277	17.494
	a_1	8.330×10^{-4}	1.723×10^{-4}	-3.728×10^{-4}
	a_2	7.2×10^{-6}	3.8×10^{-6}	2.3×10^{-6}
	a_3	1.64×10^{-9}	-4.8×10^{-10}	3.0×10^{-10}
标准差/像素		0.084	0.025	0.011
方位向多项式系数	b_0	-128.044	21.307	-69.126
	b_1	-1.08×10^{-5}	1.135×10^{-4}	-7.74×10^{-5}
	b_2	-1.88×10^{-5}	-2.59×10^{-5}	3.60×10^{-5}
	b_3	5×10^{-11}	-3.0×10^{-10}	5.6×10^{-10}
标准差/像素		0.041	0.013	0.016

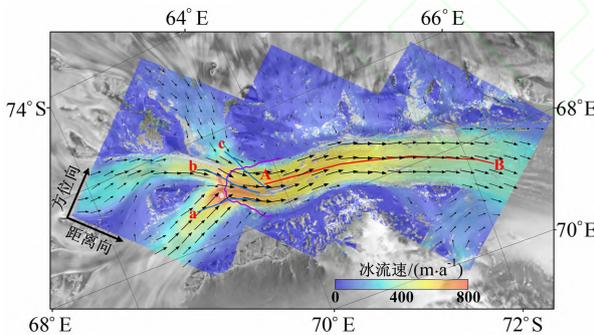


图 4 Amery 冰架后缘冰流汇合处冰流速图
Fig. 4 Ice Velocity Map of the Confluence Zone of the Amery Ice Shelf

3.3 结果精度分析

本文采用 3 种方法对冰流速结果的准确性进行验证,即统计岩石区域冰流速值,与 GPS 实测结果及 MEaSURES 冰流速结果进行对比分析。理论上岩石区域冰流速接近为零,3 组数据岩石区的冰流速均方根误差分别为 8 m/a、13 m/a 和 9 m/a,说明偏移量跟踪方法提取的结果有较好可靠性。

利用已有的 GPS 观测点^[7](图 2)对本文提取的冰流速结果进行精度分析,本文结果与 GPS 实测值吻合较好(表 3)。其中,本文提取冰流速值均小于 GPS 实测值,造成该差异主要有以下两种原因:(1) 已有研究表明,1968~1999 年期间 Amery 冰架冰流速存在稳定、微小的下降趋势,约 2.2 m/a^[15]。本文数据获取时间为 2010 年,晚于 GPS 观测时间,从 1999 年至 2010 年,Amery 冰架可能仍存在冰流速下降的趋势。(2) 研究发现北极格陵兰岛和南极冰川都存在冬季流速小于夏季流速的情况^[16-19]。本文采用的是南极冬季数据,Amery 冰架汇合区冰流速可能存在夏季高于冬季的季节性变化。由于本文数据有限,后续工作中将利用更多数据对 Amery 冰架地区冰流速的年际和季节变化进行研究。

MEaSURES 冰流速分辨率为 450 m,理论精度为 1~17 m/a^[3]。图 5 为本文结果与 MEaSURES 冰流速的剖面线对比。可以看出,本文结果与 MEaSURES 冰流速吻合较好,其中剖面线 AB 上的冰流速差值的均方根误差为 9 m/a。

表3 本文冰流速与GPS实测、MEaSURES结果的比较

Tab. 3 Comparison Between GPS, MEaSURES and Our Results

站点	观测时间	GPS 实测	MEaSURES	本文结果	本文结果与
		冰流速/(m·a ⁻¹)	冰流速/(m·a ⁻¹)	/(m·a ⁻¹)	实测差值/(m·a ⁻¹)
TS06	2000~2001	496	483	/	/
TS05	2000~2002	768	750	754	-14
V5	1997~1998	715	684	707	-8
V3	1997~1998	623	604	592	-31
GA29	1991	382	365	370	-12
GA35	1991	395	380	368	-27

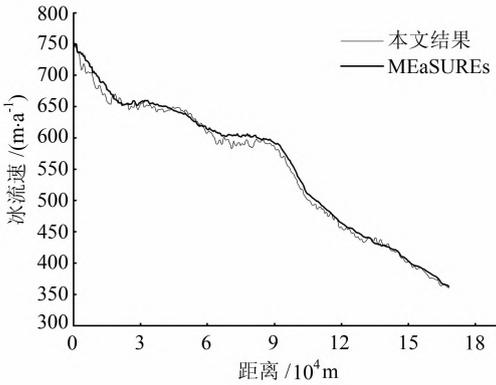


图5 沿剖面线AB本文结果与MEaSURES冰流速对比
Fig. 5 Ice Velocity Comparisons Between MEaSURES and our Results Along Profile AB

3.4 汇合处接地线附近冰流速变化特征

接地线是冰物质从冰床脱离后漂浮在海洋上

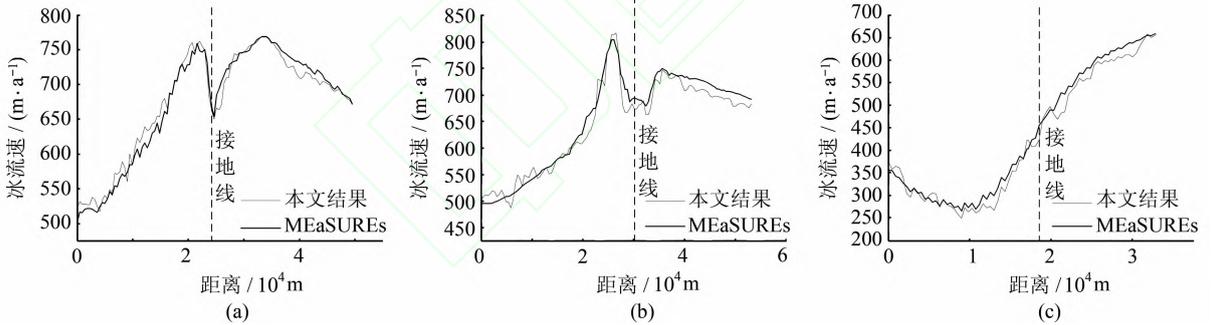


图6 接地线附近冰流速剖面线图
Fig. 6 Ice Velocity Along Profiles Near the Grounding Line

4 结语

本文 Amery 冰架冰流汇合区的冰流速研究表明,对于南极冰流速较大且有较好岩石分布的地区,偏移量跟踪方法是一种大范围、高效及高精度提取冰流速的方法,是常规地面测量方法所无法比拟的。来自 Lambert、Mellor 及 Fisher 冰川的冰物质注入 Amery 冰架,汇集后的流速大于任一子冰流的流速,汇合区最大冰流速可达 800 m/a;且接地线附近冰流速的变化特征可辅助确定接地线的位置。

的过渡边界,其对冰盖物质平衡计算、冰盖动力学数学模型、冰-海相互作用、海洋潮汐以及冰下环境等研究有着重要意义。2011 年 Rignot 等人利用 15 a 的雷达数据,采用差分干涉测量的方法,获得了南极完整、无缝、高分辨率的接地线位置图^[13]。图 6 标示了 Amery 冰架后缘冰川汇合区的接地线位置。对于剖面线 a、b,接地线附近冰流速出现较大幅度的下降,然后上升,笔者在极区记录冰川接地线附近也发现冰流速存在类似变化特征^[19];c 处接地线附近冰流速并未发生类似变化。接地线附近冰流速的这种变化可能是由接地线附近地形特征引起的,包括冰面地形和冰下地形。虽然冰流速在接地线附近出现上述变化特征不是绝对的,但利用冰流速的这种变化特征,可以辅助判读接地线的位置。

本文所测得的冰流速为某一时间段内的平均值,而冰盖表面的冰川、冰架的实际流动速度存在着一定的季节和年际变化;且本文研究区域内分布有岩石,但对于整个 Amery 冰架地区岩石分布并不均匀。后续研究将采用 DInSAR 结合偏移量跟踪方法、相邻影像联合处理^[20]等策略,提取整个 Amery 冰架的冰流速;并利用更多的数据研究该地区冰流速的季节和年际变化。另外结合地形数据等,进一步探讨接地线附近的冰流速的变化特征及其原因。

致谢:衷心感谢欧洲空间局(ESA)提供的 Envisat ASAR 数据,美国国家冰雪数据中心

(NSIDC)提供的 MEaSUREs 全南极冰流速数据和全南极 Radarsat 拼接影像。

参 考 文 献

- [1] Phillips H A. Applications of ERS Satellite Radar Altimetry in the Lambert Glacier-Amery Ice Shelf System, East Antarctica[D]. Hobart, Australia: University of Tasmania, 1999
- [2] Budd W F, Smith I L, Washart E. The Amery Ice Shelf Physics of Snow and Ice[C]. International Conference on Low Temperature Science, Sapporo, Japan, 1967
- [3] Rignot E, Mouginot J, Scheuchl B. Ice Flow of the Antarctic Ice Sheet[J]. *Science*, 2011, 333(6 048): 1 427-1 430
- [4] Strozzi T, Luckman A, Murray T, et al. Glacier Motion Estimation Using SAR Offset-tracking Procedures[J]. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 2002, 40(11): 2 384-2 391
- [5] Joughin I. Ice-sheet Velocity Mapping: A Combined Interferometric and Speckle-tracking Approach[J]. *Annals of Glaciology*, 2002, 34(1): 195-201
- [6] Liu H X, Yu J, Zhao Z, et al. Calibrating and Mosaicking Surface Velocity Measurements from Interferometric SAR Data with a Simultaneous Least-squares Adjustment Approach [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2007, 28(6): 1 217-1 230
- [7] Pittard M L, Roberts J L, Warner R C, et al. Flow of the Amery Ice Shelf and Its Tributary Glaciers [C]. The 18th Australasian Fluid Mechanics Conference, Launceston, Australia, 2012
- [8] Zhang Xiaohong, E Dongchen. Dynamic Parameters Determination of Amery Ice Shelf Using PPP[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2005, 30(10): 909-912(张小红, 鄂栋臣. 用 PPP 技术确定南极 Amery 冰架的三维运动速度 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2005, 30(10): 909-912)
- [9] Michel R, Rignot E. Flow of Glacier Moreno, Argentina, from Repeat-pass Shuttle Imaging Radar Images: Comparison of the Phase Correlation Method with Radar Interferometry[J]. *Journal of Glaciology*, 1999, 45(149): 93-100
- [10] GAMMA Documentation- user's Guide. Interferometric SAR Processor-ISP [R]. Version 1. 0, GAMMA Remote Sensing and Consulting AG, Switzerland, 2007
- [11] 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)
- [12] Fricker H A, Allison I, Craven M, et al. Redefinition of the Amery Ice Shelf, East Antarctica, Grounding Zone[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107 (B5), doi: 10. 1029/2001JB000383
- [13] Rignot E, Mouginot J, Scheuchl B. Antarctic Grounding Line Mapping from Differential Satellite Radar Interferometry[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38, L10504
- [14] Gray A L, Mattar K E, Sofko G. Influence of Ionospheric Electron Density Fluctuations on Satellite Radar Interferometry[J]. *Geophysical Research Letters*, 2000, 27(10): 1 451-1 454
- [15] King M A, Coleman R, Morgan P J, et al. Velocity Change of the Amery Ice Shelf, East Antarctica, During the Period 1968 - 1999[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112, F01013
- [16] Howat I M, Joughin I, Scambos T A. Rapid Changes in Ice Discharge from Greenland Outlet Glaciers [J]. *Science*, 2007, 315(5818): 1 559-1 561
- [17] Bartholomew I, Nienow P, Mair D, et al. Seasonal Evolution of Subglacial Drainage and Acceleration in a Greenland Outlet Glacier[J]. *Nature Geoscience*, 2010, 3(6): 408-411
- [18] Scambos T A, Bohlander J A, Shuman C A, et al. Glacier Acceleration and Thinning after Ice Shelf Collapse in the Larsen B Embayment, Antarctica [J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31, L18402
- [19] Zhou Chunxia, Zhou Yu, Deng Fanghui, et al. Seasonal and Interannual Ice Velocity Changes of Polar Record Glacier, East Antarctica [J]. *Annals of Glaciology*, 2014, 55(66): 45-51
- [20] Liu H X, Zhao Z Y, Yu J, et al. Simultaneous Least Squares Adjustment of Multiframe Velocities Derived from Interferometric and Speckle-Tracking Methods[J]. *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE*, 2008, 5(2): 289-293

Ice-flow Velocity Derivation of the Confluence Zone of the Amery Ice Shelf Using Offset-tracking Method

DENG Fanghui^{1,2} ZHOU Chunxia^{1,2} WANG Zemin^{1,2} E Dongchen^{1,2} ZHANG Xin³

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 430079, China

3 Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, Wuhan 430070, China

Abstract: Three pairs of Envisat ASAR images at a 35 days interval were utilized to map the ice velocity in the confluence zone of the Amery ice shelf in the East Antarctica using an offset-tracking method. Accuracy assessment and comparative analysis were conducted, which confirmed the reliability of our results. The ice velocity reached as high as 800 m/a at the confluence zone of the Lambert, Mellor, and Fisher Glaciers. There were certain variation characteristics of ice velocity near the grounding line, which provided important references when determining the position of the grounding line.

Key words: amery ice shelf; ice-flow velocity; offset tracking; grounding line

First author: DENG Fanghui, PhD candidate, specializes in InSAR and dynamic changes of glaciers. E-mail: dengaliu66@gmail.com

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

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41376187, 41076126, 41276188; the National Basic Research Program of China (973 Program), No. 2013CBA01804; the Chinese Polar Environment Comprehensive Investigation & Assessment Programme, No. CHINARE2014-02-04.