

基于REMA数据的东南极达尔克冰川表面塌陷研究

刘婷婷, 丁锐, 艾松涛, 张保军, 王泽民

中国南极测绘研究中心 武汉大学, 武汉 430079

摘要: 全球气候变暖严重影响冰川的稳定性, 南极多条冰川表面发生塌陷。由于缺少高空间和高时间分辨率的南极地表高程模型DEM (Digital Elevation Model), 目前单支冰川表面时空变化的研究不充分。利用2011年—2016年11期南极参考高程模型REMA (The Reference Elevation Model of Antarctica) 数据, 开展东南极达尔克冰川表面塌陷区域的高程变化监测, 并利用Landsat 7/8和Worldview-2光学影像等数据分析塌陷过程和原因。结果表明, 达尔克冰川在2013年发生了一起严重的塌陷事件, 塌陷深度最大约45.29 m, 造成了约 $26.29 \times 10^6 \text{ m}^3$ 的水体损失; 塌陷发生后, 该区表面高程不断增加, 于2016年恢复至塌陷前的高程。塌陷区具有明显的整体性沉降特征, 并存在融水聚集, 推测塌陷和达尔克冰川冰下湖的排水过程存在密切的联系。本研究证明达尔克冰川存在较大的不稳定性, 同时验证了REMA数据监测冰川表面塌陷的可行性, 为未来精细化监测南极冰盖/冰架响应气候变化提供技术参考。

关键词: 南极, 达尔克冰川, 表面塌陷, 气候变化, REMA Digital Elevation Model, 遥感, Landsat数据, Worldview数据

中图分类号: TP701/P2

引用格式: 刘婷婷, 丁锐, 艾松涛, 张保军, 王泽民. 2023. 基于REMA数据的东南极达尔克冰川表面塌陷研究. 遥感学报, 27(9): 2114–2126
Liu T T, Ding R, Ai S T, Zhang B J and Wang Z M. 2023. Monitoring and analyzing of the depression on Dalk Glacier, East Antarctica by REMA. National Remote Sensing Bulletin, 27 (9) : 2114–2126 [DOI: 10.11834/jrs.20221804]

1 引言

在冰川动力学研究中, 冰川表面塌陷是空间尺度较小、突发性较强的地貌变化过程 (张宝钢等, 2019)。塌陷周围通常发生表面融水或冰下湖融水的汇聚与排泄, 导致冰川受到强烈的弯曲应力而塌陷 (Mellor, 1960; MacAyeal 和 Sergienko, 2013), 这表明塌陷与冰川的水文过程存在密切的联系 (Moore, 1993; Howat 等, 2015; Popov 等, 2017)。塌陷后形成的冰坑 (ice doline) 可能成为冰川表面融水快速排入海洋的入口 (Fricker 等, 2002; Glasser 和 Scambos, 2008), 引起冰流速加快 (Tuckett 等, 2019)、冰川表面物质损失加剧 (Bevan 等, 2015)。因此, 监测塌陷的形成与演化对于研究冰川物质平衡、评估冰川稳定性具有重要意义 (Warner 等, 2021)。

自1940年有文献详细记载南极半岛格雷厄姆地的表面塌陷以来 (Stephenson 和 Fleming, 1940; Reynolds, 1983), 南北极冰盖均发生了多次不同程度的表面塌陷, 包括拉森冰架 (Williams 和 Ferrigno, 1988; Bindshadler 等, 2002)、罗斯冰架 (Fricker 等, 2007) 和埃默里冰架 (Mellor, 1960; Warner 等, 2021) 等。由于塌陷发生的时间和位置具有不确定性, 难以开展塌陷的现场实时观测, 多数是在塌陷发生后观测。高空间分辨率遥感对地观测技术的出现为冰面精细观测提供了新的手段 (秦大河 等, 2017; 车涛 等, 2020)。Bindshadler 等 (2002) 采用1 m分辨率的IKONOS卫星数据和现场观测数据分析拉森B冰架表面塌陷的过程与成因。Howat 等 (2015) 利用Landsat 7、Worldview-1 和ICESat 等数据研究格陵兰冰盖一处深度70 m、直径1.5—2 km的圆形塌陷, 并展示了

收稿日期: 2021-12-07; 预印本: 2022-03-23

基金项目: 国家自然科学基金(编号:41941010)

第一作者简介: 刘婷婷, 研究方向为极地遥感应用、遥感图像处理。E-mail: ttliu23@whu.edu.cn

通信作者简介: 丁锐, 研究方向为冰川动力学。E-mail: dingruilxm@whu.edu.cn

表面融水汇聚后突然排放引起塌陷的观测证据。张宝钢等(2019)和Popov等(2017)分别利用无人机影像监测东南极达尔克冰川附近的塌陷和冰面水系,指出冰面和冰下水文过程对塌陷发生的驱动作用。近年,Warner等(2021)利用2期Worldview卫星数据生成的地表数字高程模型DEM(Digital Elevation Model)和ICESat-2测高数据观测埃默里冰架一处塌陷,结果显示塌陷中央的深度达80 m,水体损失体积达 $600 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。这项研究表明,利用DEM数据研究冰表面塌陷的演化过程具有可行性。

高空间分辨率的南极DEM产品较少,且现有产品的大多数数据在坡度陡峭区或冰盖边缘区的精度较低(肖峰等,2017;陈昊楠等,2020)。激光测高卫星(如ICESat、ICESat-2)和航空平台(如冰桥计划)能获得局部地区的高精度表面高程数据,但无法覆盖全南极(冯准准等,2013)。南极参考高程模型REMA(The Reference Elevation Model of Antarctica)是基于多种高空间分辨率光学影像(包括GeoEye-1和Worldview系列)采用光学立体测图技术生成的南极地表时序高程模型。REMA数据的时间范围为2011年—2017年,最高空间分辨率为2 m,高程绝对精度优于1 m(Howat等,2019)。Dunmire等(2020)利用2期REMA监测毛德皇后地一处冰下湖排水引起的表面高程变化,结果显示表面高程平均降低了 $2.56 \pm 0.53 \text{ m}$,与探地雷达观测的冰下湖平均水深(2.2 m)一致。Indrigo等(2021)基于流体静力学平衡假设,利用5期REMA数据推导得到了罗斯海德里加尔斯基冰舌的冰厚数据,并分析冰舌表面裂隙的传播过程。Cheng等(2021)利用2期REMA监测威德尔海布伦特冰架1号裂隙在2012年—2017年的空间结构特征,结果显示1号裂隙宽度增大了0.25 km但深度仅变化了0.4—0.7 m。因此,以上研究均证明REMA数据不仅可以用于长期精细化地监测南极冰架冰川的表面高程变化,还可以用于观测冰架冰川的小尺度表面地形特征。

达尔克冰川是一支位于东南极拉斯曼丘陵附近的溢出冰川,在2000年—2020年发生了多次前缘崩解(Chen等,2020b),其中2016年的崩解面积达到 2.19 km^2 。达尔克冰川在2013年和2017年发生了两次表面塌陷,张宝钢等(2019)和Popov等(2017)对2017年的表面塌陷进行了

监测,而2013年的表面塌陷目前还没有相关研究。围绕东南极达尔克冰川在2013年发生的表面塌陷(图1-Ⅱ区),利用11期REMA数据研究塌陷区域在2011年—2016年的高程变化,并利用Landsat 7/8和Worldview-2影像分析塌陷区域的表面特征,最后结合海水温度数据、自动气象站观测资料和南极地表冻融数据集对塌陷形成的可能原因进行讨论和分析。

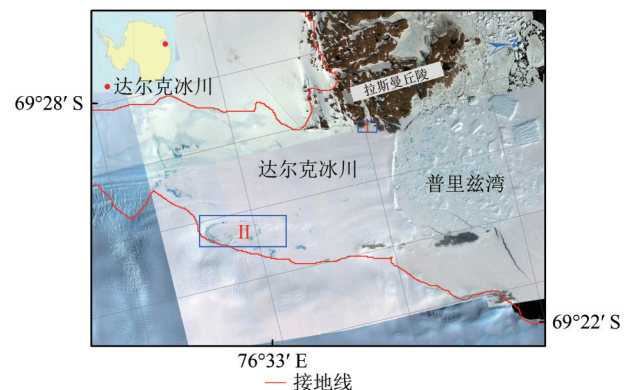


图1 研究区域(底图为快鸟影像,获取时间为2011年1月4日。蓝框Ⅰ和Ⅱ分别表示2017年、2013年表面塌陷发生的位置。红线为基于MODIS的南极接地线产品([https://nsidc.org/data/moa/\[2021-12-07\]](https://nsidc.org/data/moa/[2021-12-07])))

Fig. 1 Study area (The blue box I and II show the locations of surface depression in 2017 and 2013, respectively. The red line denotes the grounding line acquired from the Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Mosaic of Antarctica 2003–2004 ([https://nsidc.org/data/moa/\[2021-12-07\]](https://nsidc.org/data/moa/[2021-12-07])))

2 研究区域与数据

2.1 研究区域

达尔克冰川位于东南极拉斯曼丘陵东侧,距离中山站不足5 km,汇入普里兹湾(图1)。达尔克冰川是一条典型的溢出冰川,宽约3.3 km,长约15 km,冰川前缘年平均冰流速为 $150\text{--}250 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ (Chen等,2020b)。达尔克冰川分别在1988年、2006年、2009年、2016年发生了大规模崩解,引起冰川末端冰流速加快约12%(Chen等,2020b)。2017年1月29日,达尔克冰川西侧(图1中Ⅰ区)发生塌陷,塌陷深度达到43 m,塌陷面积为 40260 m^2 。多次的前缘崩解和表面塌陷表明,达尔克冰川存在局部不稳定性。通过目视判读达尔克冰川时序遥感影像,发现该冰川在2013年也发生了一次表面塌陷(图1中Ⅱ区),塌陷区域位于达

尔克冰川东侧接地线附近, 距离冰川前缘约 5 km, 冰流速约为 $130 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$, 冰厚约为 209 m (Fretwell 等, 2013)。2011 年的快鸟影像显示, 该区域存在椭圆形状的边界特征, 并且周围分布着大量的冰裂隙和冰褶皱。

2.2 数据

2.2.1 REMA 数据

REMA 是由美国明尼苏达大学的极地地球空间中心和俄亥俄州立大学的伯德极地和气候研究中心联合发布的全南极 DEM。该数据主要利用 Worldview 和 GeoEye 等亚米级分辨率的商业卫星影像作为立体像对, 采用光学立体测图技术制成南极 DEM (耿通 等, 2021)。REMA 可以达到 2 m 或 8 m 的空间分辨率, 是目前公开发布的空间分辨率最高的南极 DEM 产品。Howat 等 (2019) 利用冰桥计划中的高程数据验证了 REMA 的精度, 高差中位数、68% 线性误差和 90% 线性误差分别为 -0.16 m 、 0.77 m 和 1.25 m 。除了全南极 DEM 产品, REMA 还根据经纬度和成像时间发布了南极的条带 DEM。由于卫星重访周期、南极极夜和云层遮挡等的影响, REMA 在达尔克冰川区域 II 共有 11 期可用的条带 DEM (表 1), 集中在每年的 9 月至次年的 4 月, 空间分辨率均为 2 m。

表 1 覆盖达尔克冰川的 REMA 数据 (2011 年—2016 年)
Table 1 REMA strip DEMs used on Dalk Glacier surface depression during 2011—2016

期数	时间	立体像对数据源	空间分辨率/m
1	2011-02-09	Worldview-2	2
2	2011-10-04	Worldview-1	
3	2012-01-01	Worldview-1	
4	2012-10-20	Worldview-2	
5	2013-11-07	Worldview-1	
6	2013-11-15	Worldview-1	
7	2013-12-22	Worldview-2	
8	2014-09-14	Worldview-2	
9	2015-04-16	Worldview-1	
10	2015-10-06	Worldview-1	
11	2016-09-14	Worldview-1	

由于 REMA 的条带 DEM 产品没有进行绝对高程控制 (Cheng 等, 2021), 利用第 22 次中国南极考察队在达尔克冰川花杆观测时布设的控制点, 对该数据进行绝对高程校正。在 18 期花杆观测中,

有 3 期观测与 REMA 的时间接近, 分别相差 1 d、5 d、19 d, 每期分别有 6 支花杆的高精度点位数据 (Ai 等, 2019)。因此, 利用这 3 期花杆的点位数据对部分 REMA 在达尔克冰川的高程精度进行评估。表 2 显示 REMA 数据的绝对高程误差小于 1 m, 且标准差在 1 m 左右。Zhang 等 (2012) 和 Zhang 等 (2020) 指出, 南极冰流速较快的人海冰川 (如松岛冰川、托腾冰川和兰伯特冰川) 表面高程变薄速率大于 $1 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$, 表明 REMA 具有监测南极地表微小起伏变化的能力, 可以用于监测达尔克冰川塌陷区域的演化过程。

表 2 基于花杆实测高程的 REMA 绝对高程精度
Table 2 Accuracy statistics of REMA based on in-situ stakes' elevations

序号	T_{REMA}	T_{Stake}	A/m	$\pm\sigma/\text{m}$
1	2011-02-09	2011-02-10	0.001	0.82
2	2012-01-01	2011-12-26	0.487	0.77
3	2012-01-01	2012-01-20	0.767	1.12

注: T_{REMA} 是 REMA 数据时间, T_{Stake} 是花杆观测时间, A 和 $\pm\sigma$ 分别表示误差的均值和标准差。

2.2.2 光学遥感影像数据

利用 2013 年—2017 年南半球夏季的 11 幅 Landsat 系列卫星影像 (表 3), 分析达尔克冰川的表面特征及变化, 例如水文特征和边缘特征等。Landsat 系列卫星是由美国地质调查局发射的对地观测卫星, 其中 Landsat 7 (1999 年 4 月 15 日发射) 和 Landsat 8 (2013 年 2 月 11 日发射) 均可提供 30 m 空间分辨率的多光谱影像, 重访周期为 16 d (Roy 等, 2014)。Landsat 7 搭载的增强型专题制图仪 ETM+ (Enhanced Thematic Mapper) 在 2003 年发生扫描线校正器故障, 之后获取的光学影像存在数据条带丢失。受到云影遮挡的影响, 部分 Landsat 影像亮度较暗, 但不影响表面特征的识别。综合利用 Landsat 系列卫星影像, 可以跟踪研究塌陷区域的演化、变形以及冰面水系的发育过程 (Warner 等, 2021)。

此外, 选取了表面塌陷发生前后的 2 幅 Worldview-2 卫星影像, 用于塌陷区域内冰面地形的解译和判读 (表 3)。Worldview-2 是由美国 DigitalGlobe 公司在 2009 年 10 月 6 日发射的高空间分辨率商业遥感卫星, 提供 0.5 m 空间分辨率的全色图像和 2 m 空间分辨率的多光谱图像。将全色波

段与多光谱波段进行波段融合,可以得到空间分辨率为0.5 m的真彩色影像。针对Worldview-2影像存在的色彩失真问题,以2012年10月20日的Worldview-2影像为参考,对2013年9月18日的Worldview-2影像进行直方图匹配。利用色彩调整后的高空间分辨率光学影像,可以准确识别冰川表面的地貌特征和边界范围。

表3 光学卫星影像数据列表

Table 3 Optical satellite images used in this study

卫星	影像标识号	观测时间	空间分辨率/m
Landsat 7	LE07_L1GT_124109_20130119_01_T2	2013-01-19	30
	LE07_L1GT_124109_20130220_01_T2	2013-02-20	
	LC08_L1GT_125109_20131102_01_T2	2013-11-02	
	LC08_L1GT_124109_20140114_01_T2	2014-01-14	
Landsat 8	LC08_L1GT_124109_20140215_01_T2	2014-02-15	30
	LC08_L1GT_126109_20150131_01_T2	2015-01-31	
	LC08_L1GT_124109_20150306_01_T2	2015-03-06	
	LC08_L1GT_126109_20160106_01_T2	2016-01-06	
	LC08_L1GT_126109_20160203_01_T2	2016-02-03	
	LC08_L1GT_126109_20170104_01_T2	2017-01-04	
	LC08_L1GT_125109_20170129_01_T2	2017-01-29	
	12OCT20034504-P2AS	2012-10-20	0.5
Worldview-2	13SEP18041333-P2AS	2013-09-18	

3 结 果

利用校正后的11期REMA数据监测2011年—2016年达尔克冰川塌陷区域的表面高程及变化(图2)。在塌陷发生前,塌陷区域中部(图2(b)的浅绿色区域)的高程范围是80—90 m,平均高程为84.69 m。REMA数据显示中部表面高程比四周低,而且中部没有等高线,南侧等高线密集,北侧等高线稀疏。这表明相比于四周,中部是底部地形较为平坦的盆地。对比2012年10月20日和

2013年11月7日的表面高程可知,表面高程在2012年—2013年突然降低,最大降幅为45.29 m,平均降幅为15.09 m。塌陷发生时,冰坑的高程变化具有较大的空间差异性:冰坑中部(图2(j)的浅色区域,平均高程为43.90 m)是高程降幅最大的区域,平均降幅为38.71 m,高程降幅的标准差为1.49 m,表明冰坑中部在空间上具有均匀的高程变化特征;冰坑南侧和西侧的高程变化呈梯度分布,高程减小值分布在0—35 m,西侧冰面高程的坡度大于南侧;冰坑东侧的坡度最大,表面高程由45 m快速增加至90 m。在冰坑外围,冰川表面高程反而有一定的增加,最大增幅为11.60 m,平均增幅为3.93 m,高程增加区域围绕着冰坑呈环状分布,这与Warner等(2021)观测的埃默里冰架上冰坑外侧的地形隆起特征类似。

在塌陷发生前的2011年—2012年,表面高程变化很小,而且中部(图2(d)的浅绿色区域)较为平坦,中部的地势低于四周,融水容易在此汇聚。在塌陷发生后的2013年—2016年,冰坑的表面高程不断增加,但增幅逐年减小,2013年—2014年高程最大增幅为40.05 m,高程平均增幅为6.78 m,冰坑外的表面高程的变化幅度很小,高程平均降幅为0.20 m。与塌陷前(时间取2011年10月4日)对比,2016年9月14日的塌陷区域中部高程的平均降幅为2.21 m,其余区域高程的平均增幅为2.62 m,整个区域高程的平均变化仅为0.21 m,表明在2016年冬季表面高程与塌陷前基本一致。

进一步分析塌陷区域沿冰川运动方向和垂直运动方向(图2(a)断面AB和CD)的高程变化(图3)。由图3可知,断面AB和CD分别有一段“平台(floor)”区,平台区即冰坑内表面坡度较小的区域。断面AB的平台区距离A点1000—2000 m,平均坡度为 0.06° ;断面CD的平台区距离C点500—700 m,平均坡度为 0.17° 。表面塌陷发生后,AB平台区的表面坡度变化仍然较小,这表明平台区可能发生了均匀的沉降。2012年10月—2013年11月,塌陷发生后断面AB平台区的平均高程减少了39.17 m。随后,平台区的表面高程逐渐回升,分别增加23.98 m(2013年11月—2014年9月)、7.82 m(2014年9月—2015年4月)、2.35 m(2015年4月—2015年10月)和2.07 m(2015年10月—2016年9月)。由于缺少REMA数据,2016年9月后,该区域高程的变化情况未知。

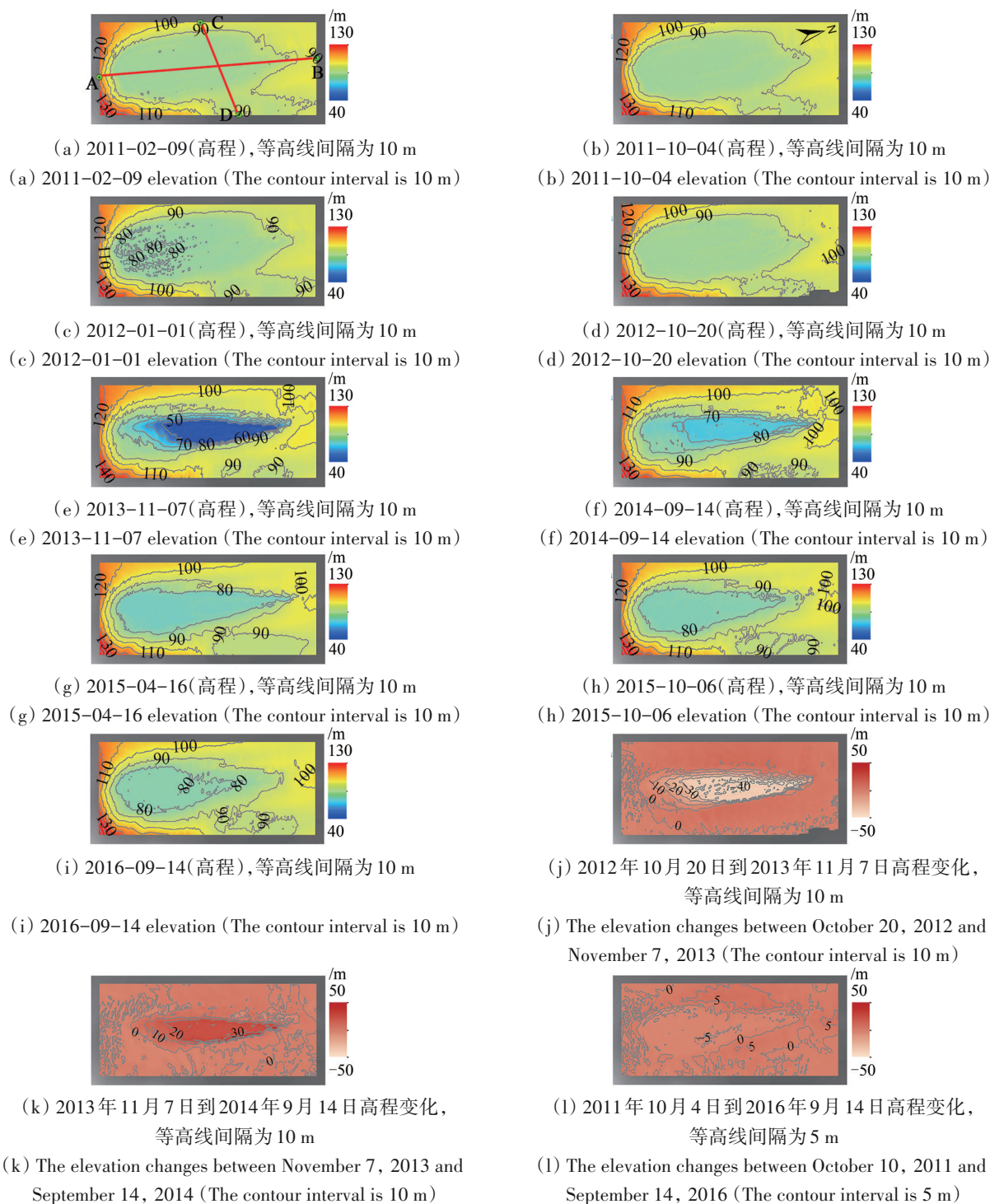


图2 研究区域(图1中Ⅱ区)的表面高程及变化(2011年2月9日—2016年12月21日)

Fig. 2 Surface elevations and changes in study area from February 9, 2011 to December 21, 2016

断面AB和CD在冰坑内非平台区的表面坡度变化较大,尤其在距离C点700—800 m,冰川表面在塌陷后形成了高约45 m、最大坡度约53°的冰坡(图3(c))。塌陷过程中,断面AB在冰坑外的高程变化较小,平均增加了0.73 m(图3(a)),断面CD在冰坑外的高程变化较大,平均增加了5.56 m(图3(c))。综合上述冰坑平台区、冰坑边缘区、

冰坑外的表面高程变化特征,说明达尔克冰川表面塌陷的三层嵌套结构:冰坑中部发生均匀沉降、冰坑边缘区形成冰坡,冰坑外东西侧地形隆起大而南北侧地形隆起小。此外,塌陷发生后,断面AB和CD在冰坑内的表面高程不断增加,但是在冰坑外却保持稳定(图3(b)、(d))。

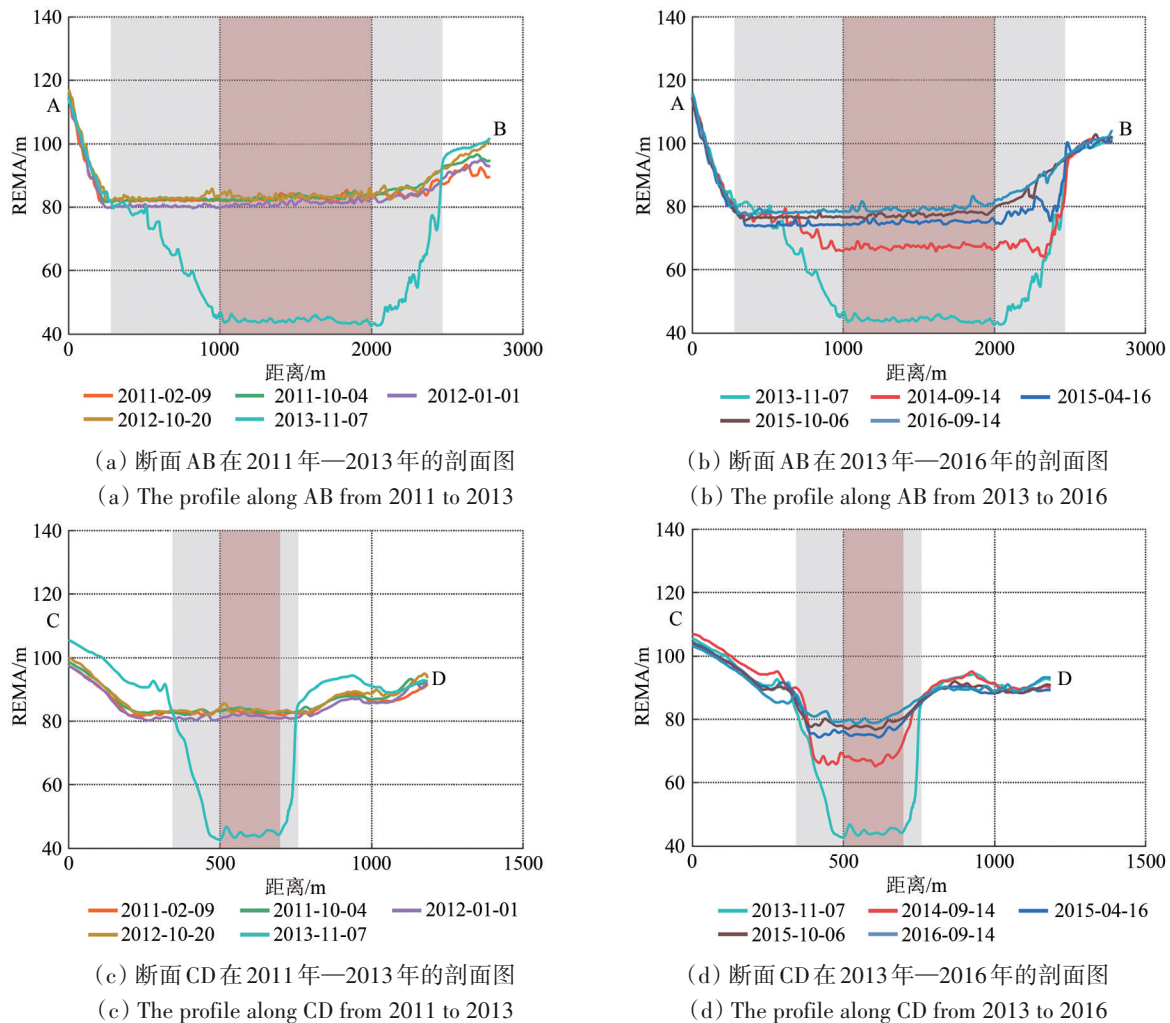


图3 塌陷区域表面高程剖面图(灰色表示断面上的冰坑,粉色表示冰坑内的平台区,断面AB和CD的位置见图2(a))

Fig. 3 The profiles of surface elevation in the depression (Gray areas represent ice doline in the profiles, and pink areas represent the floor in ice doline. The profiles AB and CD are shown in Fig. 2(a))

4 讨论和分析

4.1 塌陷过程分析

利用2013年—2017年南半球夏季的Landsat系列光学影像展示塌陷过程中的表面特征,如图4所示。2013年1月19日,西侧和南侧存在表层融水聚集(moat),融水分布范围比其他年份大,说明2013年1月发生了相对强烈的表面融化。2013年2月20日,表层融水消失,表面纹理没有发生显著变化,说明此时研究区域保持稳定。2013年11月—2014年2月,影像中冰坑的东北侧存在狭长的阴影条带。该阴影是由东北方向、低太阳高度角的太阳光照射在冰坑东侧冰坡形成的(康婧等, 2017),同时证实了2013年11月冰川表面塌陷已经

发生。遥感影像显示,冰川表面在塌陷发生后一直存在相似度很高的线状边缘特征,直至2016年1月线状边缘和阴影特征都不明显,这也再次证明冰坑持续存在了4年。通过对后续Landsat 8影像的目视判读可知,该区域再未发生塌陷事件。

2013年—2016年,达尔克冰川冰坑内的表面高程逐年增加,并恢复至塌陷前的高度,表明冰坑在此期间获得了持续的物质补给。由REMA数据可知,2015年4月16日至10月6日冰坑内的高程增幅平均为1522.1 mm。根据沈辉等(2017)的研究,达尔克冰川同期的降水量约为126.9 mm。利用冰雪热力学模式HIGHTSI中降水量与积雪深度的关系(尹豪等, 2021),反演出降雪引起的积雪深度为 492.8 ± 57 mm。由此可见,降雪仅占冰坑物质补给的32.38%。根据Zwally等(2015)、Engel

等 (2018) 和 Mallinson 等 (2019) 的研究, 其余物质补给可能来源于冰川表面融水汇聚、风吹雪导致的雪迁移和冰下水文过程等。

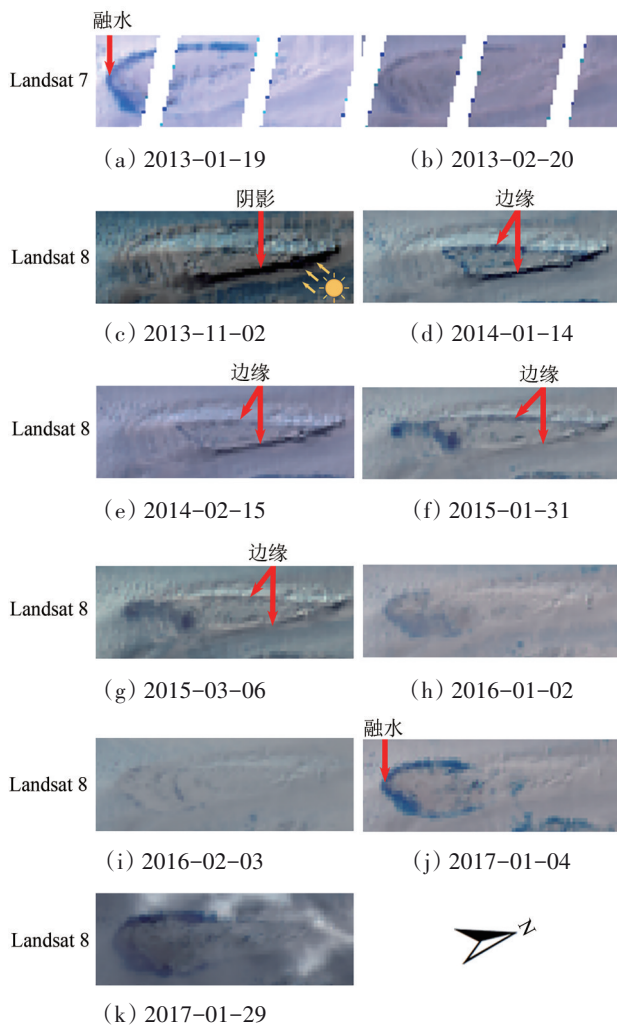
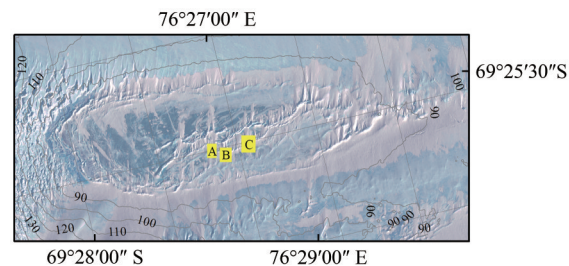


图4 研究区域的表面特征(2013年—2017年南半球夏季)(Landsat 7影像,白色部分为扫描条带故障造成的数据丢失区;Landsat 8影像,由于受到了云影的影响而比较暗)

Fig. 4 Surface features in study area during each austral summer between 2013 and 2017 (Landsat 7 images over the depression. The white areas are data gaps due to the Scan Line Corrector failure. Landsat 8 images over the depression. The image is a little dark due to cloud shadows)

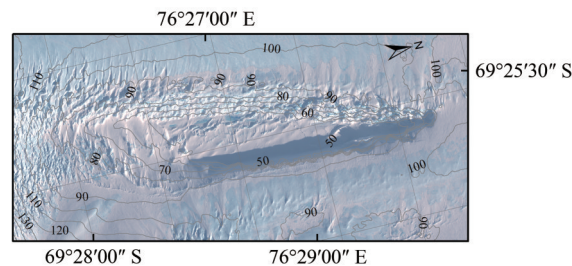
利用两景 Worldview-2 真彩色合成影像 (获取时间为2012年10月20日和2013年9月18日), 分析塌陷发生前后的冰川表面纹理特征, 如图5所示。塌陷发生前, 塌陷区域像元亮度比周围的冰雪像元偏暗, 表明塌陷区域表面分布着岩石 (Burton-Johnson 等, 2016)。但是塌陷区域内的岩石像元表面有透明的薄冰特征 (图5(a)), 不同于常见的裸

岩像元 (Lu 等, 2018)。这可能是由于塌陷区域的融水再次冻结后形成了一层冰被 (ice lid) 覆盖在岩石上 (Bindshadler 等, 2002)。塌陷发生后, 冰坑被积雪和冰体覆盖, 原有的岩石和冰被已经不可见 (图5(b))。局部上, 冰坑东侧和南侧是冰坡, 表面整齐光滑; 西侧是冰瀑 (icefall), 表面纹理破碎不连续、沿南北方向延伸。这表明, 表面塌陷发生后, 东侧和南侧冰体虽然发生了弯曲但并没有断裂, 而西侧冰体可能不仅出现断裂, 而且受重力作用剥落、堆积形成了冰瀑 (Petlicki, 2018)。此外, 结合 Landsat 7 影像的融水特征和 Worldview-2 影像的阴影条带可知, 冰川表面塌陷是在表面融水消失后发生的, 具体时间在2013年2月—2013年9月, 即南半球的夏季末至冬季。



(a) Worldview-2 影像 (观测时间为2012年10月20日, 等高线由2012年10月20日的REMA生成)

(a) Worldview-2 image acquired on October 20, 2012 (The contour map was derived from contemporaneous REMA)



(b) Worldview-2 影像 (观测时间为2013年9月18日, 等高线由2013年11月7日的REMA生成)

(b) Worldview-2 image acquired on September 18, 2013 (The contour map was derived from REMA on November 7, 2013)

图5 研究区域的表面地形特征((a)(b)均融合了Worldview-2的全色波段和多光谱波段,空间分辨率为0.5 m)

Fig. 5 Surface topographic feature in study area ((a)(b) are fusion images of the Worldview-2 multi-spectral data and panchromatic band data with the spatial resolution of 0.5 m)

通过目视判别, 识别出两幅 Worldview-2 影像中在形态特征和空间分布上相似度较高的3处冰坑

表面(图5(a)中A、B和C区域),如图6所示。这种相似的形态和结构再次表明,在表面塌陷过程中冰面没有发生明显的变形,冰表面结构保持稳定。因此,A、B和C所在的冰坑平台区在2013年的南半球夏季没有发生剧烈的表面融化,由此推测表面融化并不是塌陷时物质损失的主要途径。

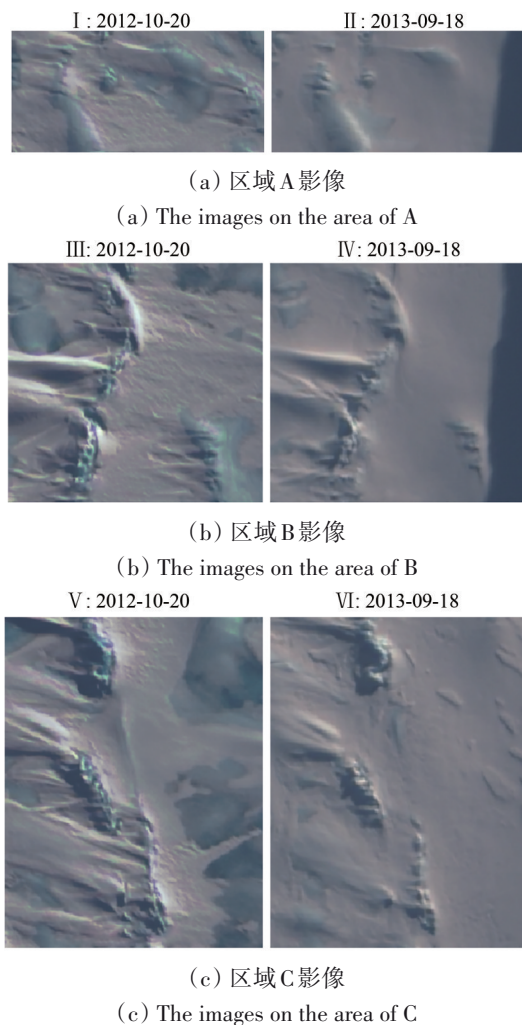


图6 3处相似的冰坑平台区表面特征((I、III、V)和(II、IV、VI)分别为2012年10月20日、2013年9月18日的Worldview-2影像)

Fig. 6 Three similar surface feature in ice floor ((I, III, V) and (II, IV, VI) are Worldview-2 images acquired on October 20, 2012 and September 18, 2013, respectively)

4.2 塌陷原因分析

Howat等(2015)和Warner等(2021)认为,冰下湖(ice-covered lake)排水形成空腔是塌陷的直接原因。由于目前缺少达尔克冰川的冰下数据,只能从塌陷区域的表面特征推断出研究区域下方

存在空腔。Bindshadler等(2002)认为当冰下湖排水后仍然有残留时,冰坑就会漂浮在冰下湖上形成平台区。由图3可知,在2013年发生表面塌陷后始终存在平台区,并且平台区高程不断增加,这说明冰坑下方较大可能存在冰下湖,而且可以推测在此次塌陷中冰下湖的水没有排尽。塌陷发生前存在明显的椭圆形边界特征(图1),椭圆形区域的表面纹理与周围存在较大的差异(图5),其表面高程低于四周、坡度很小(图3(a))。以上特征说明,在2011年2月9日研究区域也具有平台区的特征,而且面积比塌陷后的平台区大。

图7显示,在研究区域北侧1 km有一处面积较小的塌陷,该塌陷主要存在两个特征:(1)塌陷区域表面没有断裂和弯曲,表面纹理与周围一致,具备整体沉降的特征;(2)塌陷区域边界存在差异,即塌陷西侧冰体比较破碎,而其余侧塌陷边界清晰稳定。由于该处塌陷的表面纹理没有发生巨大变化,没有冰面湖特征,说明该处小塌陷是整块冰体向下降落造成的,反映了表面塌陷的主要原因来自达尔克冰川内部。结合研究区域类似的塌陷特征可以说明,塌陷前达尔克冰川内部存在冰下湖,冰下湖的深度大于40 m,且冰下湖底部(basin)的高程在40 m以下。结合Bedmap2冰厚数据(Fretwell等,2013),该冰坑的冰厚约为209 m,表明冰坑底部在海平面以下169 m。普里兹湾的温盐深剖面仪CTD(Conductance Temperature Depth)实测数据(图8)显示,达尔克冰川前缘的海水温度在2013年2月7日超过0℃,分别在水深23 m(0.55℃)和79 m(0.23℃)处。因此,由于普里兹湾在南半球夏季的海水温度较高,达尔克冰川前端可能在2013年的南半球夏季发生了相比其他年份更为剧烈的内部或底部融化,并形成了通往达尔克冰川底部或普里兹湾的融水通道。在2013年的南半球夏季末到冬季,冰下湖水沿着通道排水后形成空腔,造成了达尔克冰川表面塌陷。

2013年的表面塌陷表明,达尔克冰川以冰川内融水排走的方式发生了较大的物质损失。根据研究区域在2012年和2013年的高程变化,塌陷区域(subsidence)面积约为1.26 km²,排走的水体积约为19.08×10⁶ m³;非塌陷区域(即隆起区域,uplift)面积约为2.01 km²,其隆起需要补充体积约

为 $7.21 \times 10^6 \text{ m}^3$ 的水 (冰的密度取 910 kg/m^3)。因此, 塌陷共损失了约 $26.29 \times 10^6 \text{ m}^3$ 的水, 是埃默里冰架 2019 年 6 月塌陷水损失体积的 4.38% (Warner

等, 2021), 按照罗斯冰架冰下湖 Engelhardt 在 2003 年—2005 年排水速度 ($40 \text{ m}^3/\text{s}$) 需要持续排放 8 d (Fricker 等, 2007)。

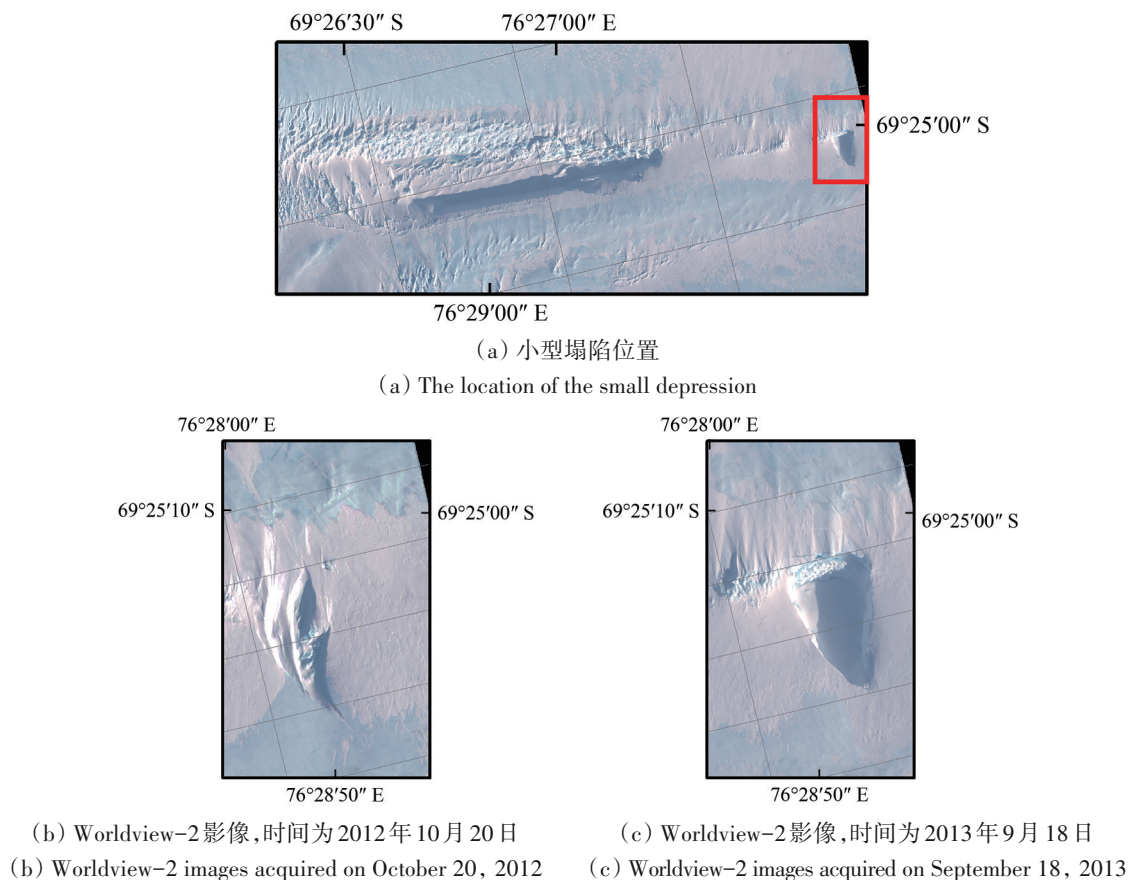


图 7 塌陷区域北侧 1 km 处的小型塌陷

Fig. 7 A small depression located 1 km north of study area

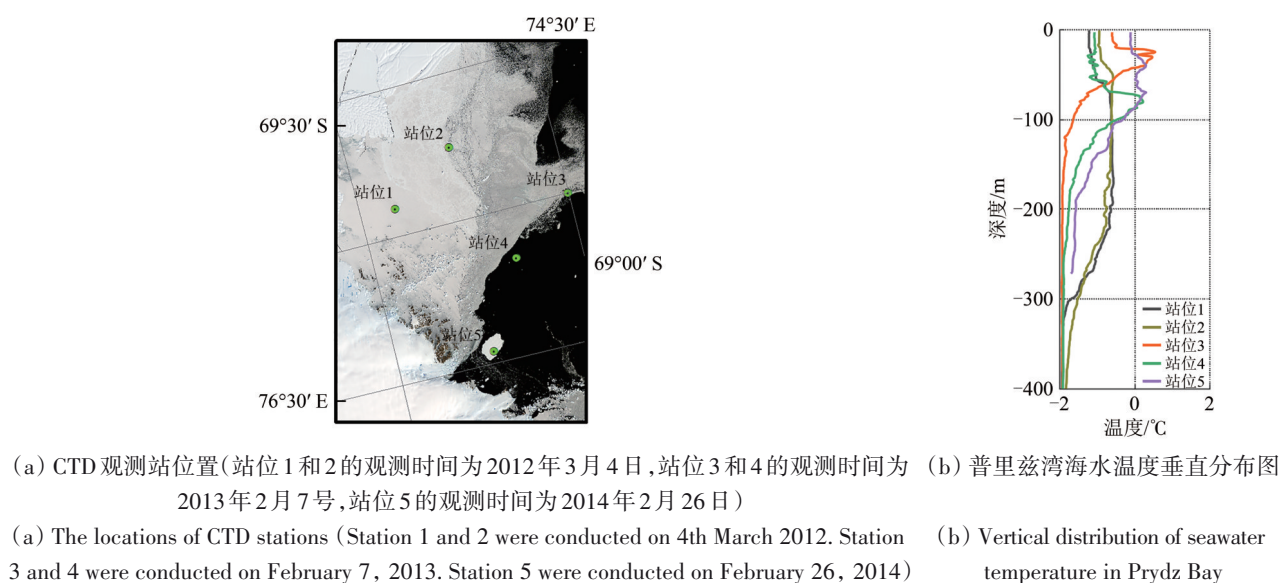


图 8 普里兹湾实测海水温度 (数据来源: 国家极地科学数据中心)

Fig. 8 In-situ seawater temperature in Prydz Bay (Data source: National Arctic and Antarctic Data Center)

冰盖(冰架)表面融化引起的融水积累和排放会导致冰川冰架表面发生弯曲和断裂,是表面塌陷的可能原因之一(Tedesco等,2013;Banwell等,2019)。利用1999年—2019年南极冰盖每日冻融数据集(刘勇等,2020)和南极中山站自动气象站观测记录(数据来源:国家极地科学数据中心),统计了2012年—2017年南半球夏季达尔克冰川表面融化天数和日均正积温(表4)。在2013年南半球夏季,达尔克冰川表面融化持续41 d,气温大于0℃有44 d,是2012年—2016年融化天数和正气温天数最多的年份。这说明相比于其他年份,达尔克冰川在2013年南半球夏季发生了较为强烈的表面融化。图4(a)显示,塌陷区域的西南侧存在融水聚集,提高了太阳辐射的吸收效率,从而加快融水附近冰体的融化速率(Leeson等,2015)。此外,塌陷区域存在岩石(图5(a)),岩石的比辐射率较冰雪低,使得岩石吸收更多的太阳辐射,进一步加剧周围冰面的融化(Tedesco等,2016)。因此,塌陷区域在塌陷过程中伴随着达尔克冰川相对剧烈的表面融化。Landsat 7和Worldview-2光学影像均显示,塌陷区域融水发生了汇聚,但是在冰坑平台区没有发生明显的表面融化。2017年南半球夏季,达尔克冰川的融化天数、正气温天数比2013年南半球夏季多,说明达尔克冰川的表面融化在2017年南半球夏季比2013年南半球夏天剧烈。但是,光学影像显示2017年—2020年塌陷区域并没有再次发生塌陷,这也表明表面融化并不是达尔克冰川2013年塌陷的关键诱因。

表4 达尔克冰川气象资料和融化数据集统计
(2012年—2017年)

Table 4 Statistics of meteorological data and freeze thawing data between 2012 and 2017

年份/年	2012	2013	2014	2015	2016	2017
融化天数/d	1	41	31	21	13	44
天数(气温>0℃)/d	17	44	32	41	35	63
正积温/℃	17.538	50.679	65.576	56.938	36.879	97.463
日均正积温/℃	1.032	1.152	2.049	1.389	1.053	1.547

注:正积温是指日平均温度高于0℃的气温总和;日均正积温是正积温除以日平均温度高于0℃的天数。

5 结 论

本文利用11期REMA数据监测了2011年—

2016年达尔克冰川表面塌陷的演化过程,并采用花杆实测高程数据对REMA在达尔克冰川的高程精度进行评估,同时利用Landsat 7和8光学影像分析塌陷过程的阴影和边缘等特征,利用Worldview-2高分辨率光学影像进一步分析了塌陷区域的地形地貌特征,最后结合普里兹湾CTD观测记录、中山站气象观测资料和冻融数据集对塌陷的可能原因进行了讨论,主要结论如下:

(1) 达尔克冰川在2013年发生了严重的表面塌陷,冰坑最大深度达到45.29 m,造成了约 $26.29 \times 10^6 \text{ m}^3$ 的水物质损失。表面塌陷改变了地表形态,形成了平台、冰坡、冰瀑和隆起4种地形特征。2013年—2016年,冰坑获得了持续的物质补给,冰面高程逐步恢复至塌陷前的相似水平。冰坑中补给的物质32.38%来自降雪,其余物质补给的来源有待进一步研究。

(2) 该表面塌陷很可能与达尔克冰川内部水文状况存在密切的联系。该冰坑下部可能存在冰下湖,在2013年2月至9月间发生排水事件形成了空腔,进而导致冰川表面塌陷。在塌陷发生前,尽管塌陷区域存在相对剧烈的表面融化,但是表面融化不是此次塌陷的主要诱因。结合达尔克冰川西侧在2017年也发生了塌陷,表明目前达尔克冰川稳定性较差,未来可能再次发生塌陷。

(3) REMA发布的条带DEM经过绝对高程校正后,其高程精度优于1 m,而且拥有高空间分辨率和时间属性的优点,适用于长期精细地监测冰川表面的地形特征和时空变化规律,是研究南极冰盖/冰架响应气候变化的优质数据源。

达尔克冰川活跃的内部水文过程可能是触发表面塌陷、补给冰坑物质的关键性原因。因此,达尔克冰川是研究冰川水文与稳定性关系的理想区域,未来将重点开展达尔克冰川内部水文过程和冰下地形的观测计划。

志 谢 感谢美国明尼苏达大学极地地理空间中心提供的2 m分辨率的REMA(FTP: pgc.umn.edu),感谢国家极地科学数据中心提供的普里兹湾CTD观测记录和南极中山站气象观测资料([https://www.chinare.org.cn/\[2021-12-07\]](https://www.chinare.org.cn/[2021-12-07])),感谢全球变化数据仓储电子杂志提供的1999年—2019年南极冰盖冻融数据集([https://doi.org/10.3974/geodb.2020.05.01.V1\[2021-12-07\]](https://doi.org/10.3974/geodb.2020.05.01.V1[2021-12-07])),达尔克

冰川花杆实测数据来自第23次至28次中国南极考察队, 在此一并表示感谢。

参考文献(References)

- Ai S T, Wang S S, Li Y S, Moholdt G, Zhou C X, Liu L B and Yang Y D. 2019. High-precision ice-flow velocities from ground observations on Dalk Glacier, Antarctica. *Polar Science*, 19: 13-23 [DOI: 10.1016/j.polar.2018.09.003]
- Banwell A F, Willis I C, Macdonald G J, Goodsell B and Macayeal D R. 2019. Direct measurements of ice-shelf flexure caused by surface meltwater ponding and drainage. *Nature Communications*, 10: 730 [DOI: 10.1038/s41467-019-08522-5]
- Bevan S L, Luckman A, Khan S A and Murray T. 2015. Seasonal dynamic thinning at Helheim Glacier. *Earth and Planetary Science Letters*, 415: 47-53 [DOI: 10.1016/j.epsl.2015.01.031]
- Bindschadler R, Scambos T A, Rott H, Skvarca P and Vornberger P. 2002. Ice dolines on Larsen Ice Shelf, Antarctica. *Annals of Glaciology*, 34: 283-290 [DOI: 10.3189/172756402781817996]
- Burton-Johnson A, Black M, Fretwell P T and Kaluza-Gilbert J. 2016. An automated methodology for differentiating rock from snow, clouds and sea in Antarctica from Landsat 8 imagery: a new rock outcrop map and area estimation for the entire Antarctic continent. *The Cryosphere*, 10(4): 1665-1677 [DOI: 10.5194/tc-10-1665-2016]
- Che T, Li X, Li X W and Jiang L M. 2020. Developing cryospheric remote sensing, promoting scientific programme of earth's three poles. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 35(4): 484-493 (车涛, 李新, 李新武, 江利明. 2020. 冰冻圈遥感: 助力“三极”大科学计划. *中国科学院院刊*, 35(4): 484-493) [DOI: 10.16418/j.issn.1000-3045.20200323001]
- Chen H N, Xu S F, Huang Y, Wang S J, Shu S, Yu B L and Wu J P. 2020a. Vertical accuracy correction and analysis of ASTER GDEM V2 over Antarctic Glacier. *Journal of Remote Sensing (Chinese)*, 24(8): 1010-1022 (陈昊楠, 许诗枫, 黄艳, 王淑杰, 舒松, 余柏漠, 吴健平. 2020. ASTER GDEM V2的南极冰川高程误差校正及精度分析. *遥感学报*, 24(8): 1010-1022) [DOI: 10.11834/jrs.20208361]
- Chen Y M, Zhou C X, Ai S T, Liang Q, Zheng L, Liu R X and Lei H B. 2020b. Dynamics of dalk glacier in East Antarctica derived from multisource satellite observations since 2000. *Remote Sensing*, 12(11): 1809 [DOI: 10.3390/rs12111809]
- Cheng Y, Xia M L, Qiao G, Lv D, Li Y J and Hai G. 2021. Imminent calving accelerated by increased instability of the Brunt Ice Shelf, in response to climate warming. *Earth and Planetary Science Letters*, 572: 117132 [DOI: 10.1016/j.epsl.2021.117132]
- Dunmire D, Lenaerts J T M, Banwell A F, Wever N, Shragge J, Lhermitte S, Drews R, Pattyn F, Hansen J S S, Willis I C, Miller J and Keenan E. 2020. Observations of buried lake drainage on the Antarctic ice sheet. *Geophysical Research Letters*, 47(15): e2020GL087970 [DOI: 10.1029/2020GL087970]
- Engel Z, Láská K, Nývlt D and Stachoň Z. 2018. Surface mass balance of small glaciers on James Ross Island, north-eastern Antarctic Peninsula, during 2009-2015. *Journal of Glaciology*, 64(245): 349-361 [DOI: 10.1017/jog.2018.17]
- Feng Z Z, Cheng X, Kang J, Hui F M, Liu Y, Cheng C, Wang F, Wang X W, Zhao C, Zhao S and Chen T B. 2013. Review of the NASA IceBridge mission: progress and prospects. *Journal of Remote Sensing (Chinese)*, 17(2): 399-422 (冯准准, 程晓, 康婧, 惠凤鸣, 刘岩, 程铖, 王芳, 王显威, 赵晨, 赵硕, 陈廷彪. 2013. 美国 NASA 冰桥(IceBridge)科学计划: 进展与展望. *遥感学报*, 17(2): 399-422) [DOI: 10.11834/jrs.20131337]
- Fretwell P, Pritchard H D, Vaughan D G, Bamber J L, Barrand N E, Bell R, Bianchi C, Bingham R G, Blankenship D D, Casassa G, Catania G, Callens D, Conway H, Cook A J, Corr H F J, Damaske D, Damm V, Ferraccioli F, Forsberg R, Fujita S, Gim Y, Gogineni P, Griggs J A, Hindmarsh R C A, Holmlund P, Holt J W, Jacobel R W, Jenkins A, Jokat W, Jordan T, King E C, Kohler J, Krabill W, Riger-Kusk M, Langley K A, Leitchenkov G, Leuschen C, Luyendyk B P, Matsuoka K, Mouginot J, Nitsche F O, Nogi Y, Nost O A, Popov S V, Rignot E, Rippin D M, Rivera A, Roberts J, Ross N, Siegert M J, Smith A M, Steinhage D, Studinger M, Sun B, Tinto B K, Welch B C, Wilson D, Young D A, Xiangbin C and Zirizzotti A. 2013. Bedmap2: improved ice bed, surface and thickness datasets for Antarctica. *The Cryosphere*, 7(1): 375-393 [DOI: 10.5194/tc-7-375-2013]
- Fricker H A, Allison I, Craven M, Hyland G, Ruddell A, Young N, Coleman R, King M, Krebs K and Popov S. 2002. Redefinition of the Amery Ice Shelf, East Antarctica, grounding zone. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 107(B5): ECV 1-1-ECV 1-9 [DOI: 10.1029/2001JB000383]
- Fricker H A, Scambos T, Bindschadler R and Padman L. 2007. An active subglacial water system in West Antarctica mapped from space. *Science*, 315(5818): 1544-1548 [DOI: 10.1126/science.1136897]
- Geng T, Xiao F, Zhang S K, Li J X, Xuan Y and Li F. 2021. Comparison and analysis of the accuracy of two new Antarctic DEMs based on remote sensing images. *Chinese Journal of Polar Research*, 33(2): 250-259 (耿通, 肖峰, 张胜凯, 李佳星, 宣越, 李斐. 2021. 两种新的基于遥感影像的南极DEM精度比较与分析. *极地研究*, 33(2): 250-259) [DOI: 10.13679/j.jdyj.20200031]
- Glasser N F and Scambos T A. 2008. A structural glaciological analysis of the 2002 Larsen B ice-shelf collapse. *Journal of Glaciology*, 54(184): 3-16 [DOI: 10.3189/002214308784409017]
- Howat I M, Porter C, Noh M J, Smith B E and Jeong S. 2015. Brief Communication: sudden drainage of a subglacial lake beneath the Greenland Ice Sheet. *The Cryosphere*, 9(1): 103-108 [DOI: 10.5194/tc-9-103-2015]
- Howat I M, Porter C, Smith B E, Noh M J and Morin P. 2019. The reference elevation model of Antarctica. *The Cryosphere*, 13(2): 665-674 [DOI: 10.5194/tc-13-665-2019]
- Indrigo C, Dow C F, Greenbaum J S and Morlighem M. 2021. Drygalski Ice Tongue stability influenced by rift formation and ice mor-

- phology. *Journal of Glaciology*, 67(262): 243-252 [DOI: 10.1017/jog.2020.99]
- Kang J, Cheng X, Liu Y, Hui F M, Ouyang L X and Li T. 2017. Shadow detection in Antarctica using Landsat8 satellite images. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 53(2): 187-193 (康婧, 程晓, 刘岩, 惠凤鸣, 欧阳伦曦, 李田. 2017. 南极地区 Landsat8 卫星影像的阴影检测方法. 北京师范大学学报(自然科学版), 53(2): 187-193) [DOI: 10.16360/j.cnki.jbnuns.2017.02.013]
- Leeson A A, Shepherd A, Briggs K, Howat I, Fettweis X, Morlighem M and Rignot E. 2015. Supraglacial lakes on the Greenland ice sheet advance inland under warming climate. *Nature Climate Change*, 5(1): 51-55 [DOI: 10.1038/nclimate2463]
- Liu Y, Zhou C X, Zheng L and Wang Z M. 2020. Surface freeze-thaw dataset development of the Antarctic ice sheet based on multi-source data (1999-2019). *Journal of Global Change Data and Discovery*, 4(4): 325-331 (刘勇, 周春霞, 郑雷, 王泽民. 2020. 多源数据融合的南极冰盖冻融数据集(1999—2019). 全球变化数据学报, 4(4): 325-331) [DOI: 10.3974/geodp.2020.04.02]
- Lu P, Cao X, Wang Q, Leppäranta M, Cheng B and Li Z. 2018. Impact of a surface ice lid on the optical properties of melt ponds. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 123(11): 8313-8328 [DOI: 10.1029/2018JC014161]
- Macayeal D R and Sergienko O V. 2013. The flexural dynamics of melting ice shelves. *Annals of Glaciology*, 54(63): 1-10 [DOI: 10.3189/2013AoG63A256]
- Mallinson L, Swift D A and Sole A. 2019. Proglacial icings as indicators of glacier thermal regime: ice thickness changes and icing occurrence in Svalbard. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 101(4): 334-349 [DOI: 10.1080/04353676.2019.1670952]
- Mellor M. 1960. Antarctic ice terminology: ice dolines. *Polar Record*, 10(64): 92-92 [DOI: 10.1017/S0032247400050786]
- Moore J. 1993. Ice blisters and ice dolines. *Journal of Glaciology*, 39(133): 714-716 [DOI: 10.3189/S002214300001666X]
- Petlicki M. 2018. Subglacial topography of an icefall inferred from repeated terrestrial laser scanning. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 15(9): 1461-1465 [DOI: 10.1109/LGRS.2018.2845342]
- Popov S V, Pryakhin S S, Bliakharskii D P, Pryakhina G V and Tyurin S V. 2017. Vast ice depression in Dalk Glacier, East Antarctica. *Ice and Snow*, 57(3): 427-432 [DOI: 10.15356/2076-6734-2017-3-427-432]
- Qin D H. 2017. *Cryospheric Sciences*. Beijing: Science Press: 484-496 (秦大河. 2017. 冰冻圈科学概论. 北京: 科学出版社: 484-496)
- Reynolds J M. 1983. Observations of glacial features near Fossil Bluff between 1936 and 1979. *British Antarctic Survey Bulletin*, 59: 75-78
- Roy D P, Wulder M A, Loveland T R, Woodcock C E, Allen R G, Anderson M C, Helder D, Irons J R, Johnson D M, Kennedy R, Scambos T A, Schaaf C B, Schott J R, Sheng Y, Vermote E F, Belward A S, Bindschadler R, Cohen W B, Gao F, Hipple J D, Hostert P, Huntington J, Justice C O, Kilic A, Kovalsky V, Lee Z P, Lymburner L, Masek J G, Mccorkel J, Shuai Y, Trezza R, Vogelmann J, Wynne R H and Zhu Z. 2014. Landsat-8: science and product vision for terrestrial global change research. *Remote Sensing of Environment*, 145: 154-172 [DOI: 10.1016/j.rse.2014.02.001]
- Shen H, Sun Q Z, Dong J, Tian Z X, Zhao J C, Chen F Y and Han X P. 2017. Characteristics of weather and sea ice at the Antarctic Zhongshan station in 2015. *Marine Forecasts*, 34(6): 27-38 (沈辉, 孙启振, 董剑, 田忠翔, 赵杰臣, 陈风云, 韩晓鹏. 2017. 2015年南极中山站气象和海冰特征分析. 海洋预报, 34(6): 27-38) [DOI: 10.11737/j.issn.1003-0239.2017.06.004]
- Stephenson A and Fleming W L S. 1940. King George the sixth sound. *The Geographical Journal*, 96(3): 153-166 [DOI: 10.2307/1788550]
- Tedesco M, Doherty S, Fettweis X, Alexander P, Jeyaratnam J and Stroeve J. 2016. The darkening of the Greenland ice sheet: trends, drivers, and projections (1981-2100). *The Cryosphere*, 10(2): 477-496 [DOI: 10.5194/tc-10-477-2016]
- Tedesco M, Willis I C, Hoffman M J, Banwell A F, Alexander P and Arnold N S. 2013. Ice dynamic response to two modes of surface lake drainage on the Greenland ice sheet. *Environmental Research Letters*, 8(3): 034007 [DOI: 10.1088/1748-9326/8/3/034007]
- Tuckett P A, Ely J C, Sole A J, Livingstone S J, Davison B J, van Wessem J M and Howard J. 2019. Rapid accelerations of Antarctic Peninsula outlet glaciers driven by surface melt. *Nature Communications*, 10: 4311 [DOI: 10.1038/s41467-019-12039-2]
- Warner R C, Fricker H A, Adusumilli S, Arndt P, Kingslake J and Spergel J J. 2021. Rapid formation of an ice doline on Amery Ice Shelf, East Antarctica. *Geophysical Research Letters*, 48(14): e2020GL091095 [DOI: 10.1029/2020GL091095]
- Williams R S Jr and Ferrigno J G. 1988. *Satellite Image Atlas of Glaciers of the World*. U.S. Geological Survey [DOI: 10.3133/pp1386]
- Xiao F, Li F, Zhang S K, Yuan L X and Zhu T T. 2017. DEM production for larsemann hills combining Cryosat-2 and Ground-based elevation data. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 42(10): 1417-1422 (肖峰, 李斐, 张胜凯, 袁乐先, 朱婷婷. 2017. 联合 CryoSat-2 测高数据和地面高程数据建立东南极拉斯曼丘陵地区 DEM. 武汉大学学报(信息科学版), 42(10): 1417-1422) [DOI: 10.13203/j.whugis.20160011]
- Yin H, Sun J and Cheng B. 2021. The effect of snow density evolution on modelled snow depth in the Arctic. *Haiyang Xuebao*, 43(7): 75-89 (尹豪, 苏洁, Cheng B. 2021. 积雪密度演变对北极积雪深度模拟的影响. 海洋学报, 43(7): 75-89) [DOI: 10.12284/hyxb2021143]
- Zhang B G, Zhao J, Ma C, Li T, Cheng X and Liu L B. 2019. UAV photogrammetric monitoring of Antarctic ice doline formation. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 55(1): 19-24 (张宝钢, 赵剑, 马驰, 李腾, 程晓, 刘雷保. 2019. 基于无人机遥感技术的南极冰川表面冰坑监测. 北京师范大学学报(自然科学版), 55(1): 19-24) [DOI: 10.16360/j.cnki.jbnuns.2019.01.003]
- Zhang B J, Wang Z M, Yang Q M, Liu J B, An J C, Li F, Liu T T and Geng H. 2020. Elevation changes of the Antarctic Ice sheet from joint envisat and CryoSat-2 radar altimetry. *Remote Sensing*, 12(22): 3746 [DOI: 10.3390/rs12223746]
- Zhang D, Sun B, Ke C Q, Li X, Cui X B and Guo J X. 2012. Mapping

the elevation change of Lambert Glacier in East Antarctica using ICESat GLAS. *Journal of Maps*, 8(4): 473-477 [DOI: 10.1080/17445647.2012.747355]

Zwally H J, Li J, Robbins J W, Saba J L, Yi D H and Brenner A C. 2015. Mass gains of the Antarctic ice sheet exceed losses. *Journal of Glaciology*, 61(230): 1019-1036 [DOI: 10.3189/2015JoG15J071]

Monitoring and analyzing of the depression on Dalk Glacier, East Antarctica by REMA

LIU Tingting, DING Rui, AI Songtao, ZHANG Baojun, WANG Zemin

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

Abstract: With global warming, glacier surface depressions are frequently occurring in Antarctica, which is challenging for stability evaluation of glaciers. However, the shortage of high spatial and temporal resolution digital elevation model, researches on single glacier surface variations remain rather limited. 11-period REMA during 2011-2016 were used to measure surface sudden depression on Dalk Glacier, East Antarctica. Landsat 7, 8 Worldview-2 satellite images and so on were utilized to analyze the process and reason of the glacier surface evolution. The results show that: a serious surface depression occurred on Dalk Glacier in 2013 with maximum depression depth of 45.29 m and caused the englacially stored meltwater loss of $26.29 \times 10^6 \text{ m}^3$; then the elevation were increasing until that the elevation achieved the pre-depression level in 2016. The depression was typical of uniform settlement and intense surface melting. And the depression was closely interconnected with active ice-covered lakes drainage inside Dalk Glacier. Thus, Dalk glacier has been in a dangerous and unstable position due to melting and depressions. In addition, REMA was verified to monitor glacier surface depression, which was valuable for refine monitoring ice shelf and glacier response to climate change.

Key words: the Antarctic, Dalk Glacier, surface depression, climate change, REMA Digital Elevation Model, remote sensing, Landsat data, Worldview data

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 41941010)