南极1992~2009年接地线遥感产品精度综合评估和分析

李荣兴^{1,2*}, 吕达^{1,2}, 谢欢^{1,2†}, 田一翔^{1,2}, 徐洋^{1,2}, 陆赛赛^{1,2}, 童小华^{1,2}, 翁和霞^{1,2}

1. 同济大学空间信息科学与可持续发展应用中心, 上海 200092;

2. 同济大学测绘与地理信息学院, 上海 200092

* 通讯作者, E-mail: ronli_282@hotmail.com

† 通讯作者, E-mail: huanxie@tongji.edu.cn

收稿日期: 2020-05-14; 收修改稿日期: 2020-12-24; 接受日期: 2021-01-25; 网络版发表日期: 2021-07-02

国家重点研发计划项目(编号: 2017YFA0603100)、国家自然科学基金项目(批准号: 41822106, 41571407, 41631178, 41730102)、上海曙光计划项目(编号: 18SG22)和中央高校基本科研业务费专项资金资助

摘要 本文利用多源遥感数据, 对五种主流的南极接地线遥感产品的精度进行了综合评估和分析. 采用全新的评估策略和评估流程实现了接地线产品精度的系统评估. 评估流程主要分成两大步骤: 首先提出一组评估指标自动处理了84.4%的接地线数据, 再根据多源遥感数据完成了剩余15.6%部分数据的人工评估. 结果显示, InSAR接地线(InSAR GL)产品质量比较高(不一致度为0.3%), 被推荐在有该类数据时优先使用. 基于光学影像提取的接地线产品质量相对较低(不一致度为3~12%), 但其覆盖范围更完整, 尤其是覆盖了潮汐较弱的地区. 在完成了全部五种接地线产品(1992~2009年)的精度评估后, 发现有9.5%的南极接地线表现出后退或前进的趋势, 这部分接地线被归类为“变化”状态. 文章对南极不同流域尺度上的接地线变化进行了分析, 发现其中接地线后退最快的区域为流域22(含松岛冰川), 速率为 $(544 \pm 51) \text{ m a}^{-1}$, 前进最快的区域为流域14(包括默茨冰川), 速率为 $(304 \pm 16) \text{ m a}^{-1}$. 西南极冰盖和东南极冰盖的接地线平均变化速度分别为 (-370 ± 8) 和 $(5 \pm 7) \text{ m a}^{-1}$. 结果表明, 西南极冰盖的接地线有显著的后退趋势, 而东南极冰盖的接地线介于平衡和轻微前进趋势之间(除托滕冰架区域外).

关键词 接地线产品, 质量评估, 南极, 冰架

1 引言

接地线(GL)是陆地冰盖和漂浮在海洋上冰架之间的过渡性边界, 同时也是接地冰开始从基岩分离、在海水中漂浮的位置. 冰流在接地状态下主要受垂直剪切力的作用, 而到了冰架上之后主要受浮力作用, 同

时还受到纵向拉力和横向剪切力作用. 冰川从冰盖流出接地线进入海洋会造成物质流失, 这也是全球海平面上升的主要原因之一. 接地线的动态变化也和冰架对冰盖的支撑作用息息相关(Schoof, 2007; Thomas等, 2004).

接地线位于“接地带(GZ)”内(图1), 并且在海洋潮

中文引用格式: 李荣兴, 吕达, 谢欢, 田一翔, 徐洋, 陆赛赛, 童小华, 翁和霞. 2021. 南极1992~2009年接地线遥感产品精度综合评估和分析. 中国科学: 地球科学, 51(10): 1707~1721, doi: [10.1360/N072020-0155](https://doi.org/10.1360/N072020-0155)

英文引用格式: Li R, Lv D, Xie H, Tian Y, Xu Y, Lu S, Tong X, Weng H. 2021. A comprehensive assessment and analysis of Antarctic satellite grounding line products from 1992 to 2009. Science China Earth Sciences, 64(8): 1332~1345, <https://doi.org/10.1007/s11430-020-9729-6>

图1 接地带结构示意图

摘自Fricker等, 2009. *F*: 潮汐运动在冰架表面产生的褶皱带的在陆地方向的外边缘; *G*: 接地线; *I_b*: 冰架表面坡度发生突变的位置; *I_m*: 冰架表面的局部最低点; *H*: 静力平衡点; 接地带: *F*和*H*之间的区域

汐作用下反复后退和前进, 同时接地线处的基岩和表面坡度也随之变化。接地带的宽度通常为几公里 (Brunt等, 2010b)。漂浮的冰架如果厚度增加, 冰架底部就会接触到基岩, 称之为接地线前进。与之相反的是, 不论何种原因的冰盖变薄都会导致接地线向上游后退。同时, 冰川流速的变化也会影响到接地线的位置 (Hanna等, 2013; Mengel和Levermann, 2014; Rebeco等, 2014; Rignot等, 2011a)。

因此, 如何提取接地线的准确位置对于计算南极冰盖物质平衡至关重要, 因为接地线的位置就是冰盖恰好从基岩分离后漂浮于海水中的位置, 这个位置通常位于冰架前缘的上游, 和冰架前缘相距10~1000km不等 (Rignot等, 2011a)。接地线对气候变化的响应可以用于估计和预测全球海平面变化, 因此接地线具有重要的研究意义。目前国际上主要依赖遥感的方法来实现接地线位置的探测, 方法主要有三种: (1) 利用光学卫星影像根据地形进行目视解译; (2) 利用差分干涉合成孔径雷达 (DInSAR) 数据分析在潮汐作用下冰架的垂直运动; (3) 使用激光/雷达测高数据等 (Bindenschadler等, 2011; Xie等, 2016a) 检测地表坡度的突变。目视解译的方法是通过探测接地冰和冰架冰表面纹理变化的分界线, 由于接地冰的表面地形较为陡峭而漂浮在海洋上的冰架的表面较为平坦, 二者表面坡度的差异可以直接反映在表面纹理上 (Scambos等, 2007)。基于测高数据的提取方法是在测高卫星的重复轨道位置对潮汐引起的冰架垂直运动情况进行分析, 再根据冰架的

运动提取出接地带的几个重要位置 (图1), 包括*F*点 (褶皱带的在陆地方向的外边缘) 和*I_b*点 (冰架表面坡度发生突变的位置)。而接地线就位于这两点之间 (Fricker等, 2009; Fricker和Padman, 2006; Hogg等, 2018)。DInSAR方法是先对合成孔径雷达 (SAR) 影像地理配准, 再根据相位信息提取冰架的运动状态, 然后根据干涉条纹提取接地线的位置 (Rignot等, 2011a)。

南极数字数据库 (ADD) 中包含了大量南极早期地图的数字化成果, 这些早期地图之前是根据多国的实地观测和航空相片绘制而成的。这些地图在数字化过程中还根据美国陆地卫星的系列光学影像 (主要是MSS影像) 进行了修订。ADD中的南极接地线产品是第一个覆盖全南极洲的接地线产品, 并参考近期的数据进行过修订 (Thomson和Cooper, 1993)。

基于上文提到的三种方法, 目前国际上有五种常用的南极接地线遥感产品, 分别是根据南极MODIS影像镶嵌图 (MOA) 生成的接地线MOA GL 2004和MOA GL 2009、南极表面积和冰通量接地线 (ASAID GL)、ICESat接地带数据 (ICESat GZ) 和干涉合成孔径雷达接地线 (InSAR GL)。这些产品可以通过美国国家冰雪数据中心网站访问和下载 (NSIDC, 2004, 2009, 2010, 2011, 2016)。在没有冰架相连的冰盖区域, 其中一些产品也有覆盖, 表示的是冰盖的外边缘线。这些产品的详细介绍参见本文2.1节。这五个产品中, MOA GL 2004、MOA GL 2009和ASAID GL都是基于光学影像提取的, 覆盖了整个南极。InSAR GL完整地覆盖了南极半岛和西南极, 但在横断山脉和东南极的冰川区域不够完整。后续随着InSAR数据的不断增加, InSAR GL的空间覆盖率和时间覆盖率也将不断提高 (Scheuchl等, 2016)。ICESat GZ产品虽然分布比较稀疏, 但在覆盖区域能根据冰架的潮汐运动提取出接地带的多个关键位置。从图2可以清楚地看到, InSAR GL和ICESat GZ数据空缺的区域主要位于东南极冰盖 (EAIS), 并且和南极周围的弱潮汐区域大致吻合。所以说, 在某些情况下利用冰架的潮汐运动较难探测出接地线的位置。

Rignot等 (2011a) 绘制了1994~2009年15年间的南极InSAR GL产品。由于InSAR GL和ICESat GZ都是根据冰架的垂直运动提取的, 所以两者的结果几乎一致。他在南极的11个地区对比了InSAR GL与MOA GL 2004, 发现在慢速冰流区域和陡峭区域二者几乎吻合。

图2 ICESat GZ和InSAR GL数据分布和南极周围海域潮汐强度分布的对比

(a) ICESat GZ (F 和 I_0)和InSAR GL数据的分布, 红点和蓝点分别表示ICESat GZ点略有偏移; (b) 60°S以南的南极周围海域潮汐强度分布用潮位的均方根表示(Padman等, 2002). 图中流域的划分标准来自Zwally等(2012)

Depoorter等(2013)使用了一种专门的方法将ASAID GL、MOA GL 2004、InSAR GL和ICESat GZ进行数据融合, 用于估算全南极冰架底部融化引起的质量变化. 具体方法是首先将ASAID GL和MOA GL 2004中冰隆和岛屿的接地线合并, 这样获得的接地线覆盖最为完整; 其次, 如果在ASAID GL的1km范围内存在InSAR GL或ICESat GZ数据, 就手动修改ASAID GL使得两个产品互相吻合; 最后在所有产品中, InSAR GL和ICESat GZ是优先于其他产品使用的. Moholdt等(2015)采用了类似的方法, 同样合成了这四种接地线产品用于制作全南极的冰架掩膜图.

综上, 接地线遥感产品的生产得益于长时间序列的遥感数据和不断成熟的遥感技术, 以及数据处理技术和接地线提取方法的进步. 然而, 由于接地线本身隐藏在冰盖之下, 提取过程不可避免地会涉及大量的人工解译, 那么就有可能由于人为操作的主观性从而导致产品之间存在差异. 不仅如此, 由于地面观测数据(冰芯钻探、冰雷达等)本身也很有限, 因此很难用来全面地验证接地线遥感产品. 总而言之, 接地线产品中包含了多种误差来源, 包括接地线本身的误差、各种改正的残差(例如潮汐改正)、人工解译误差等, 以及不同提取方法的物理原理也会影响提取精度. 因此, 尽管上述产品已经尽力保障产品的质量和可靠性, 但是目前尚未有人利用遥感和地理信息科学中常用的数据质量指标, 对这些产品进行质量评估. 因此, 如何

对不同的接地线产品进行系统地质量评估, 再在评估结果的基础上分析南极接地线的变化情况, 成为一个重要的科学问题.

为了解决以上的问题, 本文提出了一套全新的评估策略和评估流程, 系统地评估了五种南极接地线产品. 我们提出了一系列自动化评估指标, 评估了84.4%的接地线数据, 其余15.6%的数据利用多源遥感数据来人工综合处理分析, 使用的数据包括卫星影像、测高数据、冰流速度图、南极数字地形模型和基岩地形图等. 本研究实现了对五种接地线遥感产品的首次系统质量评估. 基于评估后的产品, 本文发现, 从流域角度分析, 1992~2009年间西南极的接地线有明显的后退, 而东南极接地线则有轻微的前进(托滕冰架区域除外). 从冰架角度分析, 1992~2009年间虽然有些东南极流域的接地线整体在前进, 但流域内的某些冰川却在后退. 总体来说, 接地线的变化研究, 特别是小型冰架, 仍有很高的不确定性. 本研究的结果对于接地线遥感产品的深入应用, 以及后续产品的生产开发具有重要意义.

2 接地线产品及评估方法和评估流程

2.1 接地线产品

(1) MOA GL 2004和MOA GL 2009. 运用目视解译方法获得, 分别从125m空间分辨率的2003~2004年

和2008~2009年的MODIS镶嵌图提取(Haran等, 2005, 2013年更新, 2014; Scambos等, 2007). 因为这两个产品的出版时间不同, 所以在本文中作为两个不同的接地线产品进行评估. 根据Scambos等(2007)所说, MOA接地线的定位精度约为MODIS的2个像素, 即 $\pm 250\text{m}$. Bindschadler等(2011)则认为, 从MODIS影像提取的接地线识别精度为500m (4个像素). 综上, MOA GL 2004和MOA GL 2009的定位精度约为 $\pm 250\sim 500\text{m}$. MOA接地线误差的主要来源被认为是在冰盖和冰架之间过渡区域的影像上, 很难定位接地线的实际位置. 具体来说, 由于接地冰和冰架冰受力方式不同, 接地冰主要受到剪切力作用, 而冰架底部并不存在阻力, 所以在接地冰和冰架之间, 必然存在着受力方式的过渡地带. 但是对于快速冰流来说, 接地线处(图1中的G)的冰流虽然依然和基岩接触, 但是已经像冰架一样处于完全滑动的状态, 那么它的受力方式就和漂浮的冰架一样, 都只受到浮力作用. 所以说, 快速冰流的接地线实际上位于受力过渡地带的下游方向. 那么, 接地线G处的表面坡度不会因为受力状态的变化出现明显的突变, 而是平滑变化的. 此外, 如果冰架中有冰隆存在, 那么整个或者部分冰架就可能被误判为接地状态. 由于以上这些原因, MOA GL 2004中错误的接地线可能偏移了数公里, 甚至在某些情况下高达100~150km (Rignot等, 2011a). 下文的分析表明, 在MOA GL 2009中, 大部分

此类解译错误已被纠正. 在本文的研究中, 考虑到与其他产品的对应关系, 仅对MOA南极大陆的接地线进行了分析(不含岛屿). 图3为MOA GL 2009产品叠加在数字高程模型(RAMP DEM)上的三维效果图 (NSIDC, 2015).

(2) ASAD GL. 该产品主要是从1999~2003年间15m分辨率的Landsat-7影像提取的, 并且根据ICESat GZ数据进行了修改调整(Bindschadler等, 2011). 它完整、连续地覆盖全南极和三个主要岛屿. 不同部分的接地线精度也是不同的, 其中冰架接地线的定位精度为 $\pm 67\text{m}$, 冰川出口处接地线的定位精度为 $\pm 502\text{m}$ (Bindschadler等, 2011).

(3) ICESat GZ. 该产品是从2003~2009年的ICESat激光测高数据提取的接地带特征点(Brunt等, 2010a; Fricker和Padman, 2006). 在不同海洋潮汐相位下, ICESat卫星沿着轨道多次重复飞越接地线上空, 提取出多组冰面褶曲点(F)和表面坡度突变点(I_b), 以此推算出接地带的边界(图1)(Brunt等, 2010a). ICESat GZ数据中, 互相对应的 F 点和 I_b 点共同构成了一组接地带边界点. 由于测高数据可以有效地反演出冰架在潮汐作用下的垂直运动, 同时ICESat卫星也不断重复观测了6年之久, 因此ICESat GZ的精度在卫星的任务期内不断提高. 但从另一个角度来说, 因为ICESat GZ数据的时间跨度太长, 并不适用于监测接地线的变化. 另外, 虽然

图3 MOA GL 2009接地线(红线)和海岸线(绿线)叠加在RAMP DEM上

在潮汐运动下, 冰盖-冰架过渡地带的表面会出现明显特征, 但只有在ICESat卫星的重复轨道区域才能提取出ICESat GZ数据, 因此ICESat GZ的空间覆盖率有限(图2a). 由于ICESat的激光足印大小约为65m, 足印沿轨间距约为172m, 在不考虑云层、仪器姿态偏差和信噪比降低等因素的情况下, F 点和 I_b 点的定位精度估计约为170m(Fricker等, 2009).

(4) InSAR GL. 在潮汐作用下冰架会产生垂直运动, 并在雷达干涉影像上出现毫米级精度的变形条纹, 通过这种方式可以确定接地线的位置. 可用于接地线提取的雷达数据包括ERS 1/2号卫星、RADARSAT 1/2号、ALOS L波段合成孔径雷达(PALSAR)数据、COSMO SkyMed和Sentinel-1A的DInSAR数据等(Rignot等, 2011a). 由于分辨率、空间覆盖和时间采样均比较有限, InSAR GL接地线产品只覆盖了约75%的南极冰盖(图2a). 在一些区域InSAR GL产品并不连续, 只覆盖了冰架的冰流出口区域. 一般来说, InSAR GL的空间覆盖率优于ICESat GZ, 差于光学影像接地线产品. 此外在某些区域会存在多个不同时间、不同卫星提取的InSAR GL数据. 因此, 这些区域InSAR GL的时间覆盖率优于其他产品. InSAR GL的数据质量取决于卫星数据本身的精度、干涉基线的长度、潮汐的振幅和相位相干性等. 据估计, InSAR GL接地线的位置精度为 $\pm 100\text{m}$ (Rignot等, 2011a).

2.2 接地线遥感产品间接评估质量指标

遥感产品的质量评估一般有直接评估和间接评估两种方法. 直接评估法是根据地面实测数据来评价遥感产品. 在评估过程中, 分析不同数据集在时间和空间上的差异, 以及探究差异背后的物理原因都非常重要. 地面实测数据一般包括GPS数据、花杆测量、地面探冰雷达影像等, 也包括高分辨率的机载数据. 然而南极由于其特殊性, 地面实测数据普遍比较缺乏, 所以较难直接验证遥感产品的正确性. 此外, 由于东南极的自然条件更为恶劣, 以及国际上的极地考察更偏向于西南极, 所以东南极的地面实测数据比西南极更加缺乏. 因此, 目前还不太可能对全南极的接地线遥感产品进行系统的直接评估. 因此, 本文采用了间接评估法, 通过现有的接地线产品之间互相综合比较来评价产品的质量. 评价过程中本文还参考其他遥感和地面数据进行了大量的人工检查.

为了提高操作的可行性, 首先将全南极的接地线产品分割成接地线段. 再在每个局部的小区域里比较不同产品的接地线段. 我们提出了以下三个几何指标, 用于衡量不同线段之间的一致性.

2.2.1 通过率($M1$)

根据接地线和接地带的定义, 第一个指标通过率 $M1$ 用于检查接地线是否落在接地带范围内(点 F 和 I_b 之间):

$$M1: G \in [F, I_b], \quad (1)$$

其中 G 是MOA或ASAID GL这类线状的产品, F 和 I_b 点来自于ICESat GZ. 对于某一种接地线产品, 通过率的定义为

$$PTR = \frac{|GL_{G \in [F, I_b]}|}{|GL_{Total}|}, \quad (2)$$

式中 $|GL_{G \in [F, I_b]}|$ 表示通过 $M1$ 指标的接地线长度, $|GL_{Total}|$ 是此接地线产品的总长度.

2.2.2 缓冲区($M2$)

对于多条接地线的互相比对, 我们选择其中的某条接地线为参考, 生成半径为 d 的缓冲区 $B_{GL_{Ref}}^d$. 第二个指标 $M2$ 用于判断某接地线产品是否部分或全部落在参考接地线的缓冲区内:

$$M2: GL_i \subseteq B_{GL_{Ref}}^d. \quad (3)$$

缓冲区包含率计算公式如下:

$$BIR = \frac{|GL_{i, B_{GL_{Ref}}^d}|}{|GL_{i, Total}|}, \quad (4)$$

式中 $|GL_{i, B_{GL_{Ref}}^d}|$ 是指落在缓冲区内的接地线的长度, $|GL_{i, Total}|$ 是接地线产品的总长度, 参数 d 是两个产品的相对位置不确定度, 可以利用误差传播律计算:

$$d = \sqrt{\sigma_{GL_{Ref}}^2 + \sigma_{GL_i}^2}, \quad (5)$$

式中, $\sigma_{GL_{Ref}}$ 和 σ_{GL_i} 是两个接地线产品的位置精度(表1). GL_i 既可以是直线也可以是点类型, 包括线状的MOA GL、ASAID GL和点状的InSAR GL、ICESat GZ. 而

表1 五种接地线产品信息概览

产品名称	数据源 (分辨率)	覆盖年份	表现形式	空间覆盖	精确度
MOA GL 2004 (Haran等, 2005, 2013更新)	MOA 2003~2004 (125m)	2003~2004	线状(63948km)	南极	$\pm 250 \sim \pm 500\text{m}$, 不考虑解译误差
MOA GL 2009 (Haran等, 2014)	MOA 2008~2009 (125m)	2008~2009	线状(61047km)	南极	$\pm 250 \sim \pm 500\text{m}$
ASAIID GL (Bindschadler等, 2011)	Landsat-7影像(15m) ICESat激光测高数据	1999~2003 (其他年份也有少量数据)	线状(53663km)	南极	$\pm 52 \sim \pm 502\text{m}$
ICESat GZ (Brunt等, 2010a)	ICESat 激光测高数据 (脚印尺寸65m)	2003~2009	点对(全部/岛, 4568/2310)	稀疏, 只有部分覆盖	170m
InSAR GL (Rignot等, 2011a)	ERS-1, 2 (50m) RADARSAT-1 (35m) RADARSAT-2 (46m) ALOS PALSAR (120m)	1992~2000 2000 2009 2007~2008	线状(49038km) 线状(8083km) 线状(9566km) 线状(5165km)	75%南极冰盖	100m

参考接地线必须是完整连续的线状产品. 如果 GL_i 为点类型, 则式(4)中的 BIR 就是缓冲区内的点数与总点数之比. 因为MOA GL 2009为覆盖全南极的连续产品, 因此在本研究中被选为参考接地线. 对于InSAR GL、MOA GL 2004、ASAIID GL和ICESat GL, 对应的 d 根据不同产品的定位精度经误差传播计算得到, 分别为510、707、709和528m.

2.2.3 接地线距离($M3$)

第三个指标 $M3$ 计算了两个接地线段之间的平均距离:

$$M3 : DBG = \text{Distance}(GL_1, GL_2). \quad (6)$$

如果我们已经知道了接地线平均年变化率 β , 计算出的 DBG 应在式(7)给定的范围内:

$$DBG \in [\beta \cdot \Delta t - d, \beta \cdot \Delta t + d], \quad (7)$$

其中, Δt 是两个接地线产品之间的时间间隔, d 是式(5)中两个产品之间的相对不确定度. 不同的冰川由于接地线的变化速度不同, 所以 β 也是不同的.

2.3 评估流程

由于待评估的5种接地线产品数据量较大, 我们的策略是利用上述三种指标, 最大程度地自动化处理数据. 自动化程序无法处理的数据再由人工处理. 最后, 接地线产品在完成质量评估后, 可以用于南极大陆尺度和流域尺度的接地线变化分析(图4).

我们根据Zwally等(2012)划分的27个流域范围(图2a)将接地线产品进行划分, 然后进一步将接地线数据分为6096个接地线段, 每段中的参考接地线长度为10km. 自动化指标在每个接地线段上进行, 之后统计分析和总结工作主要在流域和冰盖尺度上进行.

自动评估程序的核心思想是根据三个指标来判断同一接地线段内的所有产品是否一致, 进而根据一致性的高低, 判断此处的接地线处于稳定状态还是变化状态. 如果多个产品完全不一致, 那么就把这段接地线分至显著差异的类别, 之后再进行人工检查. 以下是对自动化处理算法的具体描述(图4):

(1) ICESat GZ数据存在的情况下, 所有线状接地线产品(MOA GL 2004、MOA GL 2009和ASAIID GL)都要根据式(1)判断是否通过 $M1$ 指标. 如果两个及以下的产品穿过ICESat GZ, 则这一段接地线段归类为稳定; 如果ICESat GZ点对数据不存在, 或者没能通过 $M1$ 指标, 此段的所有接地线进行 $M2$ 指标的检查.

(2) 如果接地线段中不包含ICESat GZ数据, 或未能通过 $M1$ 指标, 就要根据式(3)进行 $M2$ 指标的检查. 由于MOA GL 2009空间覆盖最全, 因此作为参考接地线来生成缓冲区. 如果InSAR GL、MOA GL 2004和ASAIID GL产品全部落在对应距离范围的缓冲区内, 那么这段接地线就被标记为稳定状态; 否则, 就进行 $M3$ 指标的检查.

(3) 未通过 $M2$ 的接地线段需要进行 $M3$ 的检查(ICESat GZ除外). 在每个接地线段内, 所有产品按时

图 4 南极接地线产品评估策略及评估流程

间顺序排列, 如果所有时间相邻的产品之间的距离均满足式(7)的要求, 我们则认为产品间的变化是合理的, 这段接地线就归类为变化状态; 否则就归类为显著差异, 之后再进行人工检查。

经过自动评估后, 所有的接地线段都被分为三类: 稳定、变化和显著差异。之后变化状态的接地线还要经过可视化人工评估和检查。其中不符合变化状态的接地线会被重新分类。我们的主要工作是检查和分析显著差异状态的部分, 主要方法是借助测高数据、影像、冰流速度图、基岩地形图等数据进行分析。同时也要结合流域、冰川和冰架的动力学知识分析变化的可能。同时也会参考其他论文的研究成果。自动化评估的结果经过了人工检查和纠正, 我们最终确定了每一段接地线的状态。在人工评估过程中, 如果一段接地线既不能划分为稳定也不能划分为变化状态, 那么就

划分为不确定类别。

3 评估结果

3.1 接地线产品自动化评估结果

在自动化评估之前, 我们首先要确定相关的参数和阈值。接地线产品的空间精度来自于出版的相关文献或产品报告中, 并在表1中列出。空间精度的计算均采用一倍标准差(σ)的方案, 用于估算式(5)中的参数 d 。式(7)中的阈值 β 采用的是已发表论文中提到的接地线变化率。例如, 有论文指出1978年和1987~1989年期间, 埃默里冰架的接地线前进速率为 $(1.0 \pm 0.1) \text{ km a}^{-1}$ (Herzfeld等, 1997), 松岛冰川的接地线后退速率为 $(1.0 \pm 0.2) \sim (1.5 \pm 0.2) \text{ km a}^{-1}$ (Cornford等, 2013; Joughin等, 2010; Payne等, 2004; Rignot, 2008; Rignot等, 2014)。对于某

个冰川, 如果文献给出了多个时期的不同接地线变化率, 本文选用最大的变化率来估计阈值, 以涵盖更多可能性. 如果文献给出的是速度的范围, 就使用范围的中间值. 如果冰川的接地线变化率无法得知, 我们就假设一个相对大的变化率 1km a^{-1} 作为阈值, 并且对这些冰架进行标记, 以便进一步的人工检查.

接地线遥感产品评估的过程和结果按照不同接地线段和流域来进行分类和记录. 我们整理完成了上述产品的详细评价报告, 包含了自动评估和手动评估的过程和结果. 网络版附表S1和S2(<http://earthcn.scichina.com>)展示了自动评估和手动评估后的分类结果示例. 附表S3选取了27个流域中的流域22的评估结果作为示例进行展示.

自动评估结果显示, 有5145个接地线段(51450km) (相当于接地线总长度的84.4%)通过了M1和M2指标, 被归类为稳定状态(表2). 有601个接地线段(6010km), 即9.9%的接地线通过了M3指标, 并被归类为变化状态. 还有350个接地线段(3500km), 即5.7%的接地线被归类为显著差异, 需要进一步的人工检查.

自动评估程序成功地将84.4%的接地线划分为稳定, 9.9%划分为变化. 自动化的处理大大降低了后续人工评估的工作量. 其中, 稳定的接地线主要位于冰架之间的冰盖区域, 以及坡度相对较陡峭的冰川支流区域. 变化的接地线段还需要进一步的人工确认和检查. 显著差异的接地线主要位于东南极, 但是针对东南极接地线变化的研究比较少. 西南极显著差异的接地线主要位于四个流域, 在这些区域目前还没有先验的接地线变化速率, 本文计算出的变化率也超过了 1km a^{-1} .

3.2 接地线产品的人工评估

人工评估分两个阶段, 用了前后近4年的时间完成所有产品的人工评估, 每个阶段都由两名熟悉南极遥感数据的人员共同完成. 虽然自动评估程序已经将接地线分为稳定和变化状态, 但评估人员依然要对一部分自动分类的结果进行逐段地目视检查和验证. 其中一部分接地线最后被重新分类(附表S1~S3).

显著差异的接地线约占全南极接地线的5.7%. 我们按照流域和冰架的顺序对标记为该类别的接地线进行逐一的人工检查, 并且记录了检查的过程和结果. 评估过程中不仅要参考自动评估的统计数据, 还需要结

表2 接地线自动评估和人工评估的分类结果统计

自动评估	接地线段(百分比)	人工评估	接地线段(百分比)
稳定	5145 (84.4%)	稳定	5504 (90.3%)
变化	601 (9.9%)	变化	582 (9.5%)
显著差异	350 (5.7%)	不确定	10 (0.2%)

合已发表文献中的相关知识. 最后, 显著差异的接地线会被重新分类为稳定、变化及不确定类别.

以下是流域7的Rayner冰川和Shirase冰川人工目视检查过程的示例.

流域7位于东南极, 主要包含两个冰川: Rayner冰川和Shirase冰川(图5). 在自动评估之后, 流域7中91%的接地线通过了M1和M2指标, 并被分类为稳定状态(即图5a中的红线和黑线). 剩余8%标记为变化状态的接地线主要位于这两个冰川中. 从数据覆盖情况可以看出, 在这两个冰川上InSAR GL和ICESat GZ的数据覆盖有限(图2a). 另外, 流域7中还有1%显著差异的接地线. 在整个流域范围内, 三种光学接地线产品(ASAID GL、MOA GL 2004和2009)基本一致. 鉴于上述情况, 人工检查的主要任务是确认和修正变化状态和显著差异的接地线, 然后估算冰川整体的接地线变化率.

所有的接地线产品分布如图5b所示, 可以看出自动评估把Rayner冰川和Thyer冰川的接地线归类为变化状态. 由于MOA GL 2004和2009的位置几乎是重叠的, 因此只有位于上层的MOA GL 2009可见. 在Thyer冰川中, MOA GL 2009产品比起MOA GL 2004做出了较大修正. 因此, 在Thyer冰川中, 光学接地线产品只需要使用MOA GL 2009和ASAID GL这两种, 且它们在沿冰川中心线位置上几乎是相同的. 考虑到2000年的InSAR GL位于MOA GL 2009下游约6km处, 因此2000~2009年接地线的整体后退速率估算为 $(667\pm 57)\text{m a}^{-1}$.

Rayner冰川的分析方法也是类似的. 因为本文为未知速率的冰川设定了 1km a^{-1} 的阈值, 而MOA GL 2004(时间范围为2003.11~2004.02, 在图5b中被MOA GL 2009盖住)和ASAID GL的变化超过了这个阈值, 所以这二者不用于变化分析. 此外, 有两条InSAR GL是在不同时间和潮位下提取的(2000.09~2000.11), 之间的距离大约为3km, 因此我们采用了两条InSAR GL的平均位置. 最后根据InSAR GL和MOA GL 2009估算得到, Rayner冰川的平均后退速率为 $(945\pm 57)\text{m a}^{-1}$. 因

图5 流域7接地线的人工评估和变化分析

(a) 接地线自动评估分类结果; (b) Rayner冰川的接地线产品; (c) Shirase冰川的接地线产品. (b)和(c)冰流速度数据分别来自Li等(2017)和Rignot等(2011b)

为这个区域潮汐偏弱, 对InSAR GL的提取造成了一定的误差, 但是我们无法量化和消除这部分误差, 所以速率的估值可能偏高.

在Shirase冰川中(图5c), 三条光学接地线和InSAR GL大体上一致, 说明1996~2009年间, 这里的接地线处于稳定状态. 在冰川出口处, 虽然出口边缘的接地线有所变化, 但冰流中心线处的变化很小. 因此我们认为, 这里的四种产品也是一致的. 另外, Shirase冰架两侧的接地线之间存在微小的差异, 这可能是产品误差造成的. 然而, 有些差异依然反映出冰川支流的接地线在

变化. 例如, 对于图5c白色框中的小冰川, MOA GL 2004的位置在MOA GL 2009中得到修正, 并且和ASAGL (2004)一致. 1996年的InSAR GL与基于光学的ASAGL和MOA GL 2009相差6km. 因此, 根据这三种产品估算, 这里的平均后退速率为 $(362 \pm 78) \text{ m a}^{-1}$ (1996~2009). 这个速率也可能像Rayner冰川一样有所高估, 但可以通过地面冰雷达进行验证(Friedl等, 2020).

从评估工作的角度来看, 因为东南极流域一般比较稳定, 如果不包含大型冰架(如Amery冰架)的话, 工

作量较小, 流域7就是典型的例子. 然而对于活跃的西南极流域, 或者东南极大型冰架所在的流域, 通常需要借助大量的多源遥感数据和其他产品, 深入分析接地线的变化情况. 以最终确定产品之间的差异究竟是接地线自身的动态变化, 还是产品的误差. 网络版附录给出了示例S1和S2, 分别是流域5(含Jutulstaumen冰川)和流域22(含松岛冰川), 都需要更为复杂的人工评估过程. 本文发现在所有流域中, 接地线产品都出现了巨大的差异和误差, 这主要归结于以下3点原因: (1) 错误地解译了光学影像中的表面特征; (2) 复杂多变的地理环境和物理因素导致接地线在时间、空间上都发生了复杂的变化, 如底部融化增加和反坡度地形等; (3) 缺乏足够的地面实测数据来对遥感产品进行验证. Rignot等(2011a)也对比分析了不同的接地线产品, 尽管他的对比方法、涉及的产品数目、研究范围和本文不同, 但在共同研究区域都发现了产品之间的差异和产品误差. Rignot等在11个活跃区域比较了InSAR GL与MOA GL 2004(不包括ASAID GL和MOA GL 2009), 这些区域包括Siple海岸、Evans冰川、Slessor冰川、Wilkins冰架、Fimbul冰架、Victoria地、托滕冰川、

松岛冰川、Institute冰川、埃默里冰架和Getz冰架. 因此, 虽然本文也利用了大量多源遥感数据, 花费了大量的人工在这些区域进行比较和分析, 这些部分的详细结果不再赘述.

3.3 接地线产品整体评估

3.3.1 整体评估结果

表2给出了接地线自动评估的整体结果. 本文基于自动评估结果, 再次进行人工检查和重新分类, 情况如下: 在变化(9.9%)类别中, 有2.3%保留了变化的状态, 剩余7.6%被重新分类为稳定状态; 同样, 在显著差异的部分(5.7%)中, 有4.8%被分类为稳定状态, 另外0.9%被分类为变化状态; 在稳定状态(84.4%)的接地线中, 有77.9%保留为稳定状态, 另外有6.5%被重新分类为变化状态. 因此人工评估的最终结果是有90.3% (55040km)的接地线为稳定状态, 9.5% (5820km)为变化状态, 0.2% (100km)为不确定状态(表2).

南极接地线中的大部分(90.3%)为稳定状态, 并且主要分布在冰盖周围. 图6展示的是每个流域中, 稳定、变化和不确定状态接地线的比例(详见附录S2).

图6 自动评估和人工评估完成后, 稳定、变化和不确定状态接地线按照流域划分后的空间分布

表 3 各接地线产品的不一致性

产品	总长度(km)	不一致的段数(km)	不一致率(%)
MOA GL 2004	63948	7490	12
MOA GL 2009	61047	1950	3
ASAID GL	53663	3570	6
InSAR GL	71852	250	0.3

变化状态接地线占比最大的是西南极的流域21(44%),也是全南极物质流失最严重的流域. 在冰川区域,变化的接地线主要位于冰川出口处. 有关这些方面的详细分析,请参见下文关于接地线变化和分析的章节. 此外,南极半岛稳定的接地线主要分布在冰崖区域. 西南极稳定的接地线主要位于冰川支流和冰川边缘,这些区域的冰川流向和接地线方向几乎一致,这意味着接地线很可能位于陡峭的斜坡上,所以不易发生后退或前进. 剩下0.2%不确定的接地线位于东南极的流域8和15.

在评估过程中,每段接地线的分类一般是通过检查某个产品和其他大多数产品是否一致. 同样地,某个产品的整体质量也是通过检查和其他产品的一致性来评估的. 要确定一段接地线的类别(稳定、变化或者不确定),必然会以某个指标或人工检查作为依据. 在每段接地线中,如果某个产品和其他大多数产品不一致,那么就会被标记出来(附表S3). 最后,产品的整体不一致性的定义是:不一致部分的长度与产品总长度之比(表3).

ICESat GZ的数据分布最为稀疏,主要位于ICESat的重复轨道上. 其提取原理是,通过在轨道上重复测量冰架表面的高程剖面,来检测潮汐运动引起的冰架变形. 该产品主要被M1指标用于判断接地线是否稳定. 因为ICESat GZ产品的数据量远小于其他产品,所以不包含在表3中.

InSAR GL产品尽管空间上不连续,但也覆盖了75%的南极海岸区域. 它的时间范围相对较长(1992~2008年). 由于该产品是由高精度的雷达干涉影像得到的,其0.3%的不一致性是所有产品中最低的. 早期产品MOA GL 2004的不一致性最高,为12%,其中不一致的部分在全南极的稳定区域和变化区域几乎都有分布. MOA GL 2004不一致的主要原因是影像解译错误. 大量的错误在后续产品MOA GL 2009中得到

了修正. MOA GL 2009的不一致性也因此降低到了3%,而且也是三个光学接地线产品中最低的. MOA GL 2009中不一致的部分主要位于东南极流域(6、13、15)和菲尔希纳-龙尼冰架区域. ASAID GL是一种基于美国陆地卫星影像的接地线产品,不一致性为6%,不一致部分主要位于东南极流域(6、7、12、15)、菲尔希纳-龙尼和罗斯冰架区域.

总的来说,InSAR和ICESat GZ产品质量更高,表现为数据的一致性更优. 因此,建议优先使用这两种产品. 另一方面,基于光学影像的接地线产品虽然时间覆盖率高、空间分布连续,但影像的解译错误造成了较高的不一致率. 这种解译错误在西南极比较少见,对此可能的解释是,由于西南极本身更为活跃,相关的地面观测、重要研究和出版物都很丰富,因此研究者对于西南极的了解更为深入. 相比之下,东南极接地线解译和提取更为困难,因为接地线自身变化的数量级非常接近于现有遥感传感器的探测能力. 因此,如果对于时间没有特定要求,我们建议使用MOA GL 2009产品;如果对时间有要求,三种基于光学影像的产品因为自身的连续性,在多数应用场景下都能够组成接地线的时间序列. 在产品评估完成之后,5种接地线产品可以用于分析1992~2009年期间南极接地线的变化情况.

3.3.2 流域尺度的接地线变化

本文的研究首次在流域尺度上对南极接地线进行了计算和分析. 在每个流域中,用所有的接地线(包括后退和前进)速率的平均值作为流域的接地线变化率. 由于MOA GL 2004、一部分ASAID GL和InSAR GL产品的时间十分接近,会导致计算接地线变化率时误差被放大,所以为了减少计算误差,时间间隔短于一年的产品不参与变化率的计算. 最终的计算结果如图7所示. 其中,南极半岛的流域和三个最大的冰架(罗斯、菲尔希纳-龙尼和埃默里冰架)所在的流域均作为一个整体来统计,其速率采用的是多个流域速率的均值.

变化状态的接地线长度为5820km(占南极接地线总长的9.5%),其中超过1/2的部分(3020km,占4.9%)位于东南极. 如图7所示,大多数东南极流域(4~6、8~11、14、15和17~19)接地线前进速率都低于 $(304 \pm 16) \text{ m a}^{-1}$. 流域1~3位于菲尔希纳-龙尼冰架,其后

图7 根据接地线产品估算的1992~2009年所有流域的接地线变化率

单位m a⁻¹; 正值表示前进, 负值表示后退

退速率为(471±12)m a⁻¹。流域7包含了Rayner冰川和Shirase冰川, 其后退速率为(75±14)m a⁻¹。流域12和13包含了托滕等其他冰川, 其后退速率分别为(228±34)m a⁻¹和(335±26)m a⁻¹。罗斯冰架周围的流域(17~19)的前进速率为(57±20)m a⁻¹。因此, 东南极接地线的平均前进速率为(5±7)m a⁻¹。东南极接地线接近于平衡状态。根据GRACE和ICESat计算出近年来东南极物质平衡状态为轻微的正平衡, 这个结论和接地线的状态是一致的(Chen等, 2009; Shepherd等, 2012; Xie等, 2016b; Zwally等, 2015)。

变化状态的接地线中, 剩下的2800km(占南极接地线总长的4.6%)位于西南极, 在流域尺度上表现出不同程度的后退趋势(图7)。最明显的例子是位于流域22的松岛冰川, 此处接地线后退的最大速率为(1544±51)m a⁻¹。流域20、21和23靠近阿蒙森海域, 包含了Thwaites及其他冰川, 后退趋势也很明显, 速率从(251±19)到(542±22)m a⁻¹不等。南极半岛流域(24~27)的平均后退速率为(232±11)m a⁻¹。总的来说, 西南极表现出较明显的后退趋势, 平均速率为(370±8)m a⁻¹。目前有研究表明, 根据GRACE和其他数据估算出西南极的物

质正在加速流失, 这和接地线的变化结果也是一致的(Sutterley等, 2014; Velicogna等, 2014)。

4 讨论

对评估过后的接地线产品计算分析可得, 西南极流域的接地线表现出明显的后退趋势, 而东南极流域接地线的状态介于稳定和轻微前进趋势之间。此外在西南极, 一些质量流失严重的冰川及其所在流域的接地线都表现出明显的后退趋势(例如, 附录中流域22的松岛冰川)。然而, 由于东南极某些区域的潮汐较弱, 导致InSAR GL和ICESat GZ产品较为稀疏(图2), 因此在冰架尺度上估算接地线的变化情况变得较为困难。例如, Rayner冰川出口处的接地线位于狭窄海湾深处, 这个海湾的深度约为57km(图5a)。由于此处的潮汐较弱, InSAR GL可能会缩短, 并向冰架前缘方向偏移, 最终导致高估了后退速率。对于弱潮汐区域的小冰架, InSAR GL甚至会进一步偏移(图5b中的白框)。由于潮汐引起了InSAR和ICESat GZ的误差, 以及基于光学影像的接地线存在着解译误差, 所以在冰架尺度上, 尤其

是东南极, 分析接地线的变化几乎是不可行的. 阿蒙森海域的冰架一致呈现出后退趋势, 其中最快的后退发生在松岛冰川, 速率约为 $(1544 \pm 51) \text{ m a}^{-1}$ (附录的示例S2). 松岛、Thwaites和其他冰川的快速后退可能与海洋型冰盖的不稳定性有关. 海洋型冰盖的不稳定性指的是如果接地线位于反坡度基岩上且处于海平面以下, 那么就容易出现加速后退的现象(Joughin等, 2010; Rignot等, 2014). 这个区域比较活跃, 大多数冰架接地线整体在后退中, 这和观测到的冰流速度增加以及冰架变薄现象是一致的(Paolo等, 2015; Rignot, 2008; Rignot等, 2014; Shepherd等, 2012). 然而, 同样位于反坡度地形的Jutulstraumen冰川的接地线却表现出相反的前进趋势, 速率为 $(1133 \pm 35) \text{ m a}^{-1}$ (网络版附图S1和示例S1).

5 结论

在本研究中, 我们系统评估了5种1992~2009年的南极接地线遥感产品, 包括MOA GL 2004和2009、ASAID GL、ICESat GZ和InSAR GL. 评估流程主要分为自动评估和人工评估两大步骤. 在自动评估过程中, 我们提出了三个指标用于衡量产品之间的一致性, 并且判断了接地线为稳定还是变化状态. 整体来说, 84.4%的接地线数据是自动处理和分类的. 对于剩下15.6%的接地线数据, 我们利用地面和遥感数据, 通过大量的人工做进一步的分析和检查. 人工评估重新分类了大多数变化较大的接地线, 但还有0.2%无法确定分类结果. 最终的评估结果不仅客观地衡量了产品之间的一致性, 还能够帮助我们更有意义地使用接地线产品. 结果表明, 评估后的接地线产品可用于分析流域尺度的接地线变化. 本文的主要结论如下:

(1) 在5个接地线产品中, InSAR GL和ICESat GZ的质量明显更高. InSAR GL的不一致性最低, 为0.3%, 但空间覆盖率不如光学影像接地线产品. 因此, 建议优先使用InSAR GL和ICESat GZ. MOA GL 2004/2009和ASAID GL是基于光学影像提取的, 优点为连续不间断地覆盖了整个南极. MOA GL 2009是质量最高的连续接地线产品, 不一致性最低, 为3%, 在一般情况下建议作为参考. MOA GL 2004质量最低, 不一致性为12%. 根据接地线的提取原理, 在InSAR和ICESat GZ数据缺失的区域, 特别是在弱潮汐区域, 光学接地线产

品可以起到补充作用. 总而言之, 多种接地线产品可以提供接地线的长时间序列, 并应用于诸多领域的研究.

(2) 评估后的接地线产品为1992~2009年间流域尺度的接地线变化分析提供了基础. 总的来说, 整个南极的接地线(5820km)中, 9.5%被分类为变化状态. 在流域尺度上, 接地线的变化趋势非常明显. 对多个流域的接地线变化情况平均可得, 西南极的接地线整体在后退, 总体速率为 $(370 \pm 8) \text{ m a}^{-1}$, 其中最大的速率为 $(1544 \pm 51) \text{ m a}^{-1}$, 位于流域22(包含松岛冰川). 南极半岛流域的后退速率相对较低, 为 $(232 \pm 11) \text{ m a}^{-1}$. 东南极接地线的整体前进速率为 $(5 \pm 7) \text{ m a}^{-1}$. 基于多个卫星南极物质平衡综合估计表明, 1992~2011年东南极的物质平衡状态为轻微的正平衡 $(14 \pm 43) \text{ Gt a}^{-1}$ (Shepherd等, 2012; Zwally等, 2015), 这个结果和接地线变化结果是一致的. 东南极流域位于罗斯冰架和菲尔希纳-龙尼冰架之间, 其中大多数流域的接地线都表现出平衡状态或前进的趋势, 除了流域7、12和13, 部分原因是这些流域的托滕冰川非常活跃.

(3) 未来南极沿海地区将会开展更多包括机载探冰雷达的实测工作, 获得的数据可用于确定接地线的“真实”位置, 以及验证和改进接地线遥感产品. 目前接地线遥感产品的误差主要是: 东南极弱潮汐引起的InSAR GL和ICESat GZ的误差, 以及光学影像上对于接地线解译的误差. 如果这些误差能够得到有效地纠正, 那么接地线遥感产品就可以用于精确分析冰架尺度上的接地线变化.

致谢 南极接地线产品由美国国家冰雪数据中心、英国南极勘测局和欧洲航天局提供, 文中也对这些产品进行了引用. 感谢这些产品作者的巨大努力和无私分享.

参考文献

- Bindshadler R, Choi H, Wichlacz A, Bingham R, Bohlander J, Brunt K, Corr H, Drews R, Fricker H, Hall M, Hindmarsh R, Kohler J, Padman L, Rack W, Rotschky G, Urbini S, Vornberger P, Young N. 2011. 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. *Cryosphere*, 5: 569–588
- Brunt K, Fricker H, Padman L, O'Neel S. 2010a. ICESat-Derived Grounding Zone for Antarctic Ice Shelves

- Brunt K M, Fricker H A, Padman L, Scambos T A, O'Neel S. 2010b. Mapping the grounding zone of the Ross Ice Shelf, Antarctica, using ICESat laser altimetry. *Ann Glaciol*, 51: 71–79
- Chen J L, Wilson C R, Blankenship D, Tapley B D. 2009. Accelerated Antarctic ice loss from satellite gravity measurements. *Nat Geosci*, 2: 859–862
- Cornford S L, Martin D F, Graves D T, Ranken D F, Le Brocq A M, Gladstone R M, Payne A J, Ng E G, Lipscomb W H. 2013. Adaptive mesh, finite volume modeling of marine ice sheets. *J Comput Phys*, 232: 529–549
- Depoorter M A, Bamber J L, Griggs J A, Lenaerts J T M, Ligtenberg S R M, van den Broeke M R, Moholdt G. 2013. Calving fluxes and basal melt rates of Antarctic ice shelves. *Nature*, 502: 89–92
- Fricker H A, Coleman R, Padman L, Scambos T A, Bohlander J, Brunt K M. 2009. Mapping the grounding zone of the Amery Ice Shelf, East Antarctica using InSAR, MODIS and ICESat. *Antarctic Sci*, 21: 515–532
- Friedl P, Weiser F, Fluhrer A, Braun M H. 2020. Remote sensing of glacier and ice sheet grounding lines: A review. *Earth-Sci Rev*, 201: 102948
- Fricker H A, Padman L. 2006. Ice shelf grounding zone structure from ICESat laser altimetry. *Geophys Res Lett*, 33: 5
- Hanna E, Navarro F J, Pattyn F, Domingues C M, Fettweis X, Ivins E R, Nicholls R J, Ritz C, Smith B, Tulaczyk S, Whitehouse P L, Zwally H J. 2013. Ice-sheet mass balance and climate change. *Nature*, 498: 51–59
- Haran T M, Bohlander J, Scambos T, Painter T H, Fahnestock M A. 2005. Updated 2013. MODIS Mosaic of Antarctica 2003–2004 (MOA2004) Image Map
- Haran T M, Bohlander J, Scambos T, Painter T H, Fahnestock M A. 2014. MODIS Mosaic of Antarctica 2008–2009 (MOA2009) Image Map
- Herzfeld U C, Lingle C S, Freeman C, Higginson C A, Lambert M P, Lee L H, Voronina V A. 1997. Monitoring changes of ice streams using time series of satellite-altimetry-based digital terrain models. *Math Geol*, 29: 859–890
- Hogg A E, Shepherd A, Gilbert L, Muir A, Drinkwater M R. 2018. Mapping ice sheet grounding lines with CryoSat-2. *Adv Space Res*, 62: 1191–1202
- Joughin I, Smith B E, Holland D M. 2010. Sensitivity of 21st century sea level to ocean-induced thinning of Pine Island Glacier, Antarctica. *Geophys Res Lett*, 37: L20502
- Li R, Ye W, Qiao G, Tong X, Liu S, Kong F, Ma X. 2017. A new analytical method for estimating antarctic ice flow in the 1960s from historical optical satellite imagery. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 55: 2771–2785
- Mengel M, Levermann A. 2014. Ice plug prevents irreversible discharge from East Antarctica. *Nat Clim Change*, 4: 451–455
- Moholdt G, Padman L, Fricker H A. 2015. Basal mass budget of Ross and Filchner-Ronne ice shelves, Antarctica, derived from Lagrangian analysis of ICESat altimetry. *J Geophys Res Earth Surf*, 119: 2361–2380
- NSIDC. 2004. MOA GL. ftp://sidacs.colorado.edu/pub/DATASETS/nsidc0280_moa2004/
- NSIDC. 2009. MOA GL. ftp://sidacs.colorado.edu/pub/DATASETS/nsidc0593_moa2009/
- NSIDC. 2010. ICESat GZ. ftp://sidacs.colorado.edu/pub/DATASETS/AGDC/nsidc0469_brunt_V01/
- NSIDC. 2011. ASAIID GL. ftp://sidacs.colorado.edu/pub/DATASETS/AGDC/nsidc0489_bindschadler_V01/
- NSIDC. 2015. Radarsat Antarctic Mapping Project Digital Elevation Model, Version 2. ftp://sidacs.colorado.edu/pub/DATASETS/nsid-c0082_radarsat_dem_v02/
- NSIDC. 2016. InSAR GL. <https://n5eil01u.ecs.nsidc.org/MEASURES/NSIDC-0498.002/>
- Padman L, Fricker H A, Coleman R, Howard S, Erofeeva L. 2002. A new tide model for the Antarctic ice shelves and seas. *Annals Glaciol*, 34: 247–254
- Paolo F S, Fricker H A, Padman L. 2015. Volume loss from Antarctic ice shelves is accelerating. *Science*, 348: 327–331
- Payne A J, Vieli A, Shepherd A P, Wingham D J, Rignot E. 2004. Recent dramatic thinning of largest West Antarctic ice stream triggered by oceans. *Geophys Res Lett*, 31: 4
- Rebesco M, Domack E, Zgur F, Lavoie C, Leventer A, Brachfeld S, Willmott V, Halverson G, Truffer M, Scambos T, Smith J, Pettit E. 2014. Boundary condition of grounding lines prior to collapse, Larsen-B Ice Shelf, Antarctica. *Science*, 345: 1354–1358
- Rignot E. 2008. Changes in West Antarctic ice stream dynamics observed with ALOS PALSAR data. *Geophys Res Lett*, 35: L12505
- Rignot E, Mouginot J, Morlighem M, Seroussi H, Scheuchl B. 2014. Widespread, rapid grounding line retreat of Pine Island, Thwaites, Smith, and Kohler glaciers, West Antarctica, from 1992 to 2011. *Geophys Res Lett*, 41: 3502–3509
- Rignot E, Mouginot J, Scheuchl B. 2011a. Antarctic grounding line mapping from differential satellite radar interferometry. *Geophys Res Lett*, 38: L10504
- Rignot E, Mouginot J, Scheuchl B. 2011b. Ice flow of the Antarctic ice sheet. *Science*, 333: 1427–1430
- Scambos T A, Haran T M, Fahnestock M A, Painter T H, Bohlander J. 2007. MODIS-based Mosaic of Antarctica (MOA) data sets: Continent-wide surface morphology and snow grain size. *Remote Sens Environ*, 111: 242–257

- Scheuchl B, Mouginot J, Rignot E, Morlighem M, Khazendar A. 2016. Grounding line retreat of Pope, Smith, and Kohler Glaciers, West Antarctica, measured with Sentinel-1a radar interferometry data. *Geophys Res Lett*, 43: 8572–8579
- Schoof C. 2007. Ice sheet grounding line dynamics: Steady states, stability, and hysteresis. *J Geophys Res*, 112: F03S28
- Shepherd A, Ivins E R, A G, Barletta V R, Bentley M J, Bettadpur S, Briggs K H, Bromwich D H, Forsberg R, Galin N, Horwath M, Jacobs S, Joughin I, King M A, Lenaerts J T M, Li J, Ligtenberg S R M, Luckman A, Luthcke S B, McMillan M, Meister R, Milne G, Mouginot J, Muir A, Nicolas J P, Paden J, Payne A J, Pritchard H, Rignot E, Rott H, Sorensen L S, Scambos T A, Scheuchl B, Schrama E J O, Smith B, Sundal A V, van Angelen J H, van de Berg W J, van den Broeke M R, Vaughan D G, Velicogna I, Wahr J, Whitehouse P L, Wingham D J, Yi D, Young D, Zwally H J. 2012. A reconciled estimate of ice-sheet mass balance. *Science*, 338: 1183–1189
- Sutterley T C, Velicogna I, Rignot E, Mouginot J, Flament T, van den Broeke M R, van Wessem J M, Reijmer C H. 2014. Mass loss of the Amundsen Sea Embayment of West Antarctica from four independent techniques. *Geophys Res Lett*, 41: 8421–8428
- Thomas R, Rignot E, Casassa G, Kanagaratnam P, Acuña C, Akins T, Brecher H, Frederick E, Gogineni P, Krabill W, Manizade S, Ramamoorthy H, Rivera A, Russell R, Sonntag J, Swift R, Yungel J, Zwally J. 2004. Accelerated sea-level rise from West Antarctica. *Science*, 306: 255–258
- Thomson J W, Cooper A P R. 1993. The scar Antarctic digital topographic database. *Antartic Sci*, 5: 239–244
- Velicogna I, Sutterley T C, van den Broeke M R. 2014. Regional acceleration in ice mass loss from Greenland and Antarctica using GRACE time-variable gravity data. *Geophys Res Lett*, 41: 8130–8137
- Xie H, Chen L, Liu S, Jin Y M, Liu J, Liu S J, Tong X H. 2016a. A least-squares adjusted grounding line for the Amery Ice shelf using ICESat and Landsat 8 OLI data. *IEEE J Sel Top Appl Earth Observations Remote Sens*, 9: 5113–5122
- Xie H, Li R X, Tong X H, Ju X L, Liu S J, Shen Y Z, Chen L, Liu S, Sun B, Cui X B, Tian Y X, Ye W K. 2016b. A comparative study of changes in the Lambert Glacier/Amery Ice Shelf system, East Antarctica, during 2004–2008 using gravity and surface elevation observations. *J Glaciol*, 62: 888–904
- Zwally H J, Giovinetto M B, Berkley M A, Saba J L. 2012. Antarctic and greenland drainage systems. http://icesat4.gsfc.nasa.gov/cryo_data/ant_grn_drainage_systems.php
- Zwally H J, Li J, Robbins J W, Saba J L, Yi D, Brenner A C. 2015. Mass gains of the Antarctic ice sheet exceed losses. *J Glaciol*, 61: 1019–1036

(责任编辑: 陈大可)