

## 南极冰架月崩解数据集 (2010–2019)

戚梦真<sup>1,3,4</sup>, 刘岩<sup>1,3,4</sup>, 程晓<sup>2,3,4\*</sup>, 冯启阳<sup>1</sup>, 林依静<sup>1,4</sup>, 韦屹<sup>1,3,4</sup>,  
杨宸<sup>1,3,4</sup>, 惠凤鸣<sup>2,3,4</sup>, 陈卓奇<sup>2,3,4</sup>, 李新情<sup>2,3,4</sup>, 张媛媛<sup>1,3,4</sup>, 章影<sup>1,3,4</sup>,  
陈心桐<sup>1,4</sup>, 刘奥博<sup>1,3,4</sup>, 陈雅婷<sup>1,3,4</sup>, 关真富<sup>1,4</sup>, 叶玥<sup>1,4</sup>, 尚鑫怡<sup>1,3,4</sup>,  
田佳慧<sup>1,3,4</sup>, 段美惠<sup>1,4</sup>, 张卓宇<sup>1,3,4</sup>

1. 北京师范大学全球变化与地球系统科学研究院, 遥感科学国家重点实验室, 北京 100875;
2. 中山大学测绘科学与技术学院, 珠海 519082;
3. 南方海洋科学与工程广东省实验室, 珠海 519082;
4. 中国高校极地联合研究中心, 北京 100875

**摘要:** 冰架崩解是南极冰盖-冰架系统物质损失的主要方式, 也是精细评估冰架物质平衡的重要物理量。作者运用2010年8月至2019年8月间每月月初的多源遥感数据, 包括2010年8月至2012年4月ENVISAT ASAR传感器WSM模式影像, 2012年1月至2014年12月(极夜除外)Terra/Aqua MODIS传感器7-2-1波段合成影像, 2013年9月至2019年8月(极夜除外)Landsat-8 OLI传感器2-3-4波段合成影像, 2014年10月至2019年8月Sentinel-1 SAR传感器EW模式影像, 经过预处理、镶嵌得到月分辨率的环南极海岸线影像镶嵌图; 结合南极冰架年崩解数据集(2005–2019), 应用空间矢量编辑和分割功能逐月提取了2010年8月至2019年8月期间发生的月崩解事件, 应用空间计算功能更新了单个崩解区的面积、尺度、崩解量, 得到南极冰架月崩解数据集。该数据集包括13个月份区间(12个月份区间和一个2012–2014年度极夜区间)的南极冰架崩解分布数据, 同时含有冰架崩解的年份、月份、崩解区长度、面积、平均厚度、崩解量、崩解周期、崩解类型等信息。该数据集以.shp格式存储, 由104个数据文件组成, 数据总量为4.3 MB(压缩为1个文件, 1.6 MB)。

**关键词:** 南极; 冰架; 崩解; 遥感; 月度; 2010–2019

**DOI:** <https://doi.org/10.3974/geodp.2020.03.01>

### 数据可用性声明:

本文关联实体数据集已在《全球变化数据仓储电子杂志(中英文)》出版, 可获取:  
<https://doi.org/10.3974/geodb.2020.04.13.V1>.

## 1 前言

崩解(冰架或冰川前缘的冰块剥离并排入海洋)是南极冰架物质损耗的主要途径之一, 是南极冰盖-冰架物质平衡研究中重要的物理过程<sup>[1–3]</sup>。对独立崩解事件的高时间、空间分辨率观测不仅可以直接反映不同时间区间内南极冰架崩解的量级特征和分布情况, 亦可

收稿日期: 2020-06-30; 修订日期: 2020-08-28; 出版日期: 2020-09-25

基金项目: 中华人民共和国科学技术部(2018YFA0605403); 国家自然科学基金(41925027)

\*通讯作者: 程晓 AAT-6307-2020, 中山大学测绘科学与技术学院, [chengxiao9@mail.sysu.edu.cn](mailto:chengxiao9@mail.sysu.edu.cn)

数据引用方式: [1] 戚梦真, 刘岩, 程晓等. 南极冰架月崩解数据集(2010–2019) [J]. 全球变化数据学报, 2020, 4(3): 207–216. <https://doi.org/10.3974/geodp.2020.03.01>.

[2] 戚梦真, 刘岩, 程晓等. 南极冰架月崩解数据集(2010–2019) [J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2020. <https://doi.org/10.3974/geodb.2020.04.13.V1>.

以为优化现有的冰盖模式<sup>[4-5]</sup>、深入探究崩解的触发机制<sup>[6]</sup>、理解冰川和冰盖的行为特征<sup>[7]</sup>、评估气候变化下冰架-冰盖系统的物质平衡提供基础性数据。

由于全局范围内对独立崩解事件逐月、精细观测需要耗费大量人力，目前对南极冰架崩解事件的研究更多集中在局部范围或特定冰架上<sup>[8-9]</sup>，仍缺乏长时间跨度下对冰架月崩解事件的高精度监测。

本数据集基于冰架年崩解数据产品<sup>[10]</sup>，结合多源遥感影像数据，利用空间数据编辑及计算功能提取了 2010 年 8 月至 2019 年 8 月南极冰架的月崩解事件的发生位置及崩解区范围，记录了其发生年月、面积、崩解量、周期和类型。该数据集中崩解区最小提取面积约 0.02 km<sup>2</sup>，时间分辨率为月，既可以反映每月南极冰架崩解的局部细节特征，亦可以此为基础进行不同尺度下崩解季节性规律的统计分析。

2 数据集元数据简介

《南极冰架月崩解数据集（2010–2019）》<sup>[11]</sup>的名称、作者、地理区域、数据年代、时间分辨率、空间分辨率、数据集组成、数据出版与共享服务平台、数据共享政策等信息见表 1。

表 1 《南极冰架月崩解数据集（2010–2019）》元数据简表

条 目	描 述		
数据集名称	南极冰架月崩解数据集（2010–2019）		
数据集短名	MonthlyIcebergCalvingAntarctic_2010-2019		
作者信息	见表 2		
地理区域	南极洲		
数据年代	2010 年 8 月–2019 年 8 月		
时间分辨率	月	空间分辨率	0.02 km <sup>2</sup>
数据格式	.shp	数据量	4.31 MB
数据集组成	该数据集监测了连续 9 年间全南极冰架发生的月崩解事件，数据集由 12 个月份崩解文件和 1 个极夜崩解文件组成，每个子集以月份名称（或极夜）命名。子集中包含月崩解发生的具体年份信息见表 3		
基金项目	中华人民共和国科学技术部（2018YFA0605403）；国家自然科学基金（41925027）		
出版与共享服务平台	全球变化科学研究数据出版系统 <a href="http://www.geodoi.ac.cn">http://www.geodoi.ac.cn</a>		
地址	北京市朝阳区大屯路甲 11 号 100101，中国科学院地理科学与资源研究所		
数据共享政策	全球变化科学研究数据出版系统的“数据”包括元数据（中英文）、通过《全球变化数据仓储电子杂志（中英文）》发表的实体数据和通过《全球变化数据学报（中英文）》发表的数据论文。其共享政策如下：（1）“数据”以最便利的方式通过互联网系统免费向全社会开放，用户免费浏览、免费下载；（2）最终用户使用“数据”需要按照引用格式在参考文献或适当的位置标注数据来源；（3）增值服务用户或以任何形式散发和传播（包括通过计算机服务器）“数据”的用户需要与《全球变化数据学报（中英文）》编辑部签署书面协议，获得许可；（4）摘取“数据”中的部分记录创作新数据的作者需要遵循 10% 引用原则，即从本数据集中摘取的数据记录少于新数据集总记录量的 10%，同时需要对摘取的数据记录标注数据来源 <sup>[12]</sup>		

表 2 《南极冰架月崩解数据集（2010–2019）》作者信息

序号	姓名	Research ID	单位	邮箱
1	戚梦真	AAT-5417-2020	北京师范大学全球变化与地球系统科学研究院	201921490035@mail.bnu.edu.cn
2	刘岩	AAT-5481-2020	北京师范大学全球变化与地球系统科学研究院	liuyan2013@bnu.edu.cn
3	程晓	AAT-6307-2020	中山大学测绘科学与技术学院	chengxiao9@mail.sysu.edu.cn
4	冯启阳	AAT-5443-2020	北京师范大学全球变化与地球系统科学研究院	306592082@qq.com
5	林依静	AAT-6421-2020	北京师范大学全球变化与地球系统科学研究院	201921490033@mail.bnu.edu.cn
6	韦屹	AAT-5411-2020	北京师范大学全球变化与地球系统科学研究院	201721490021@mail.bnu.edu.cn
7	杨宸	AAT-5429-2020	北京师范大学全球变化与地球系统科学研究院	201821490039@mail.bnu.edu.cn
8	惠凤鸣	AAT-5865-2020	中山大学测绘科学与技术学院	huifm@mail.sysu.edu.cn
9	陈卓奇	0000-0003-0131-3132 ( ORCID )	中山大学测绘科学与技术学院	chenzq_2019@163.com
10	李新情	AAT-5475-2020	中山大学测绘科学与技术学院	lixq85@mail.sysu.edu.cn
11	张媛媛	J-5625-2017	北京师范大学全球变化与地球系统科学研究院	yyzhang@mail.bnu.edu.cn
12	章影	AAT-5442-2020	北京师范大学全球变化与地球系统科学研究院	—
13	陈心桐	AAT-6570-2020	北京师范大学全球变化与地球系统科学研究院	—
14	刘奥博	AAT-5467-2020	北京师范大学全球变化与地球系统科学研究院	—
15	陈雅婷	AAT-5592-2020	北京师范大学全球变化与地球系统科学研究院	—
16	关真富	AAT-6298-2020	北京师范大学全球变化与地球系统科学研究院	—
17	叶玥	AAT-6591-2020	北京师范大学全球变化与地球系统科学研究院	—
18	尚鑫怡	AAT-5505-2020	北京师范大学全球变化与地球系统科学研究院	—
19	田佳慧	AAT-5892-2020	北京师范大学全球变化与地球系统科学研究院	—
20	段美惠	AAT-5952-2020	北京师范大学全球变化与地球系统科学研究院	—
21	张卓宇	AAT-6574-2020	北京师范大学全球变化与地球系统科学研究院	—

3 数据研发方法

本产品中的月崩解事件的定义为：以月为周期，崩解区位置与当年当月其他崩解事件在空间上不相邻，则记为一次独立的月崩解事件。即要求当年当月的所有月崩解区矢量在空间上不重叠且不相邻，每条记录代表一次独立的月崩解<sup>[2,13]</sup>。本节中将论证数据研发过程中数据使用情况及提取方法。

3.1 基础数据选取

遥感影像数据：优先选择 2010 年 8 月至 2019 年 8 月中每月前三天的遥感影像作为崩解区月份判定依据，包括 2010 年 8 月至 2012 年 4 月 ENVISAT ASAR 传感器 WSM 模式影像，2012 年 1 月至 2014 年 12 月（极夜除外）Terra/Aqua MODIS 传感器 7-2-1 波段合成影像，2013 年 9 月至 2019 年 8 月（极夜除外）Landsat-8 OLI 传感器 2-3-4 波段合成影像，2014 年 10 月至 2019 年 8 月 Sentinel-1 SAR 传感器 EW 模式影像。数据使用及覆盖情况如图 1 所示。

ENVISAT 卫星由欧空局发射，对南极冰架的重访周期小于 10 天，ASAR（Advanced Synthetic Aperture Radar）传感器的工作频段为 C 波段，中心频率为 5.331 GHz，ASAR WSM 模式成像幅宽为 400 km，空间分辨率 150 m，地理空间编码后像元间距为 75 m<sup>[14]</sup>。Sentinel-1 卫星由欧空局发射，双星系统在高纬度地区双星系统重访周期小于 6 天，搭载双极化 C 波段 SAR 传感器，中心频率为 5.405 GHz，EW 模式适用于极地等需要大范围覆盖区域，模式成像幅宽 400 km，空间分辨率 40 m<sup>[15]</sup>。Terra 和 Aqua 卫星由美国宇航局发射，MODIS（中分辨率成像光谱仪）传感器共 36 个通道，光谱范围为 0.4–14.4 μm，双星系统重访周期 1–2 天，成像幅宽 2,330 km，所用南极 MODIS（7-2-1 波段）反射率影像合成的月无云产品空间分辨率 250 m，基于南极 MODIS（7-2-1 波段）日反射率影像生产<sup>[16]</sup>。Lanadsat-8 卫星由美国宇航局发射，重访周期 16 天，OLI（Operational Land Imager）传感器成像幅宽为 190 km，多光谱波段空间分辨率 30 m<sup>[17]</sup>。

年\月	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月
2010								ENVISAT ASAR (WSM)				
2011	ENVISAT ASAR (WSM)											
2012	ENVISAT ASAR (WSM); Terra/Aqua MODIS				极夜，缺数据				Terra/Aqua MODIS			
2013	Terra/Aqua MODIS								Terra/Aqua MODIS; Landsat-8 OLI			
2014	Terra/Aqua MODIS; Landsat-8 OLI								Terra/Aqua MODIS; Landsat-8 OLI; Sentinel-1 SAR (EW)			
2015	Sentinel-1 SAR (EW); Landsat-8 OLI											
2016	Sentinel-1 SAR (EW); Landsat-8 OLI											
2017	Sentinel-1 SAR (EW); Landsat-8 OLI											
2018	Sentinel-1 SAR (EW); Landsat-8 OLI											
2019	Sentinel-1 SAR (EW); Landsat-8 OLI											

图 1 月崩解产品研发过程中引用的遥感影像数据统计表

其他数据产品：使用了南极冰架年崩解数据集<sup>[10]</sup>中 2010–2019 年的年崩解数据。该数据集时间分辨率为年，以 shapefile 的形式记录了 2005–2019 年间南极冰架发生的所有面积在 1 km<sup>2</sup>以上的年崩解事件的位置及轮廓，并在属性表中提供了崩解区面积、周长、平均厚度、崩解周期、崩解类型、发生年份等信息。

3.2 冰架月崩解监测技术路线

冰架月崩解数据集生产流程可分为图像预处理和冰架月崩解监测两部分,如图 2 所示。图像预处理包括地理编码、几何校正及镶嵌,预处理后得到每月月初南极海岸线镶嵌图。

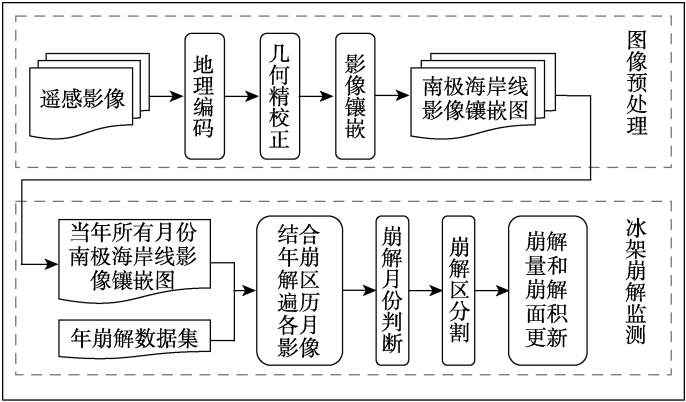


图 2 冰架月崩解监测技术路线框图

冰架月崩解监测过程包括月份判断、崩解区分割和分割后崩解区属性更新。对于每个年崩解事件,遍历其在各个月份的影像,判定每个月的崩解情况,按照崩解实际发生月份对年崩解事件进行分割,如图 3 所示。获取月崩解区矢量后,利用空间计算功能重新计算其在极坐标投影下的面积、周长并更新崩解量等其他属性。

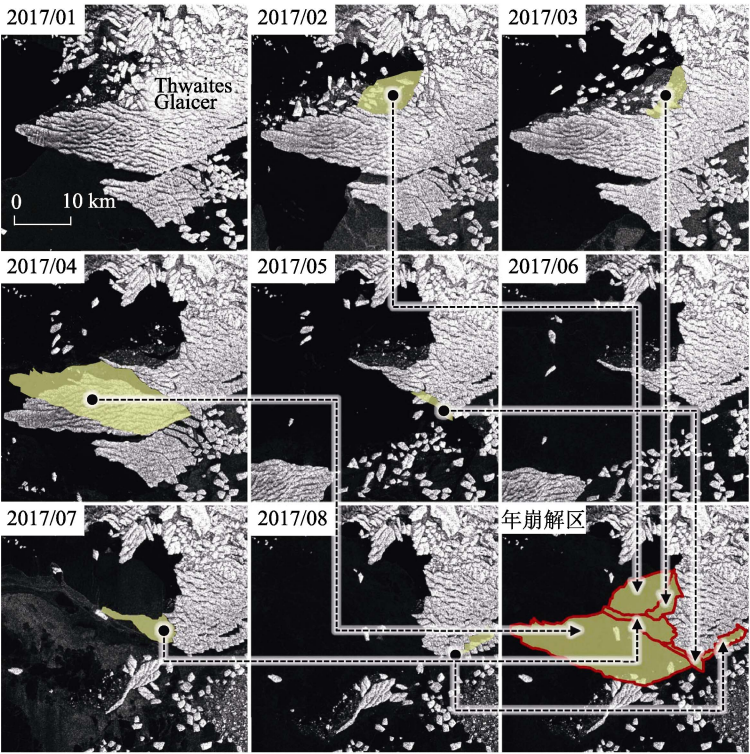


图 3 月崩解数据提取过程遥感影像对比图

4 数据结果与验证

4.1 数据集组成

南极冰架月崩解数据集中最小矢量图斑面积约 0.02 km<sup>2</sup>，时间范围是 2010 年 8 月至 2019 年 8 月，存储格式为.shp。该数据集由 13 个月份区间( 12 个月份区间和一个 2012–2014 年度极夜区间 ) 的南极冰架崩解分布数据子集组成，包含 104 个子文件，共计 1,774 条数据记录。并非所有年份的所有月份都有崩解事件发生，该产品中月崩解数据子集的命名和其包含月崩解事件的具体年份区间说明见表 3。数据集属性表中字段说明见表 4。

表 3 南极冰架月崩解数据子集信息

序号	子集名称	说明
1	Calving_January	包含 2011–2019 年每年 1 月崩解事件
2	Calving_February	包含 2011–2019 年每年 2 月崩解事件
3	Calving_March	包含 2011–2019 年每年 3 月崩解事件
4	Calving_April	包含 2011–2013、2015–2019 年每年 4 月崩解事件
5	Calving_May	包含 2011、2015–2019 年每年 5 月崩解事件
6	Calving_June	包含 2015–2019 年每年 6 月崩解事件
7	Calving_July	包含 2015–2019 年每年 7 月崩解事件
8	Calving_August	包含 2011–2012、2014–2018 年每年 8 月崩解事件
9	Calving_September	包含 2011–2018 年每年 9 月崩解事件
10	Calving_October	包含 2011–2013、2015–2018 年每年 10 月崩解事件
11	Calving_November	包含 2010–2018 年每年 11 月崩解事件
12	Calving_December	包含 2010–2018 年每年 12 月崩解事件
13	Calving_PolarNight	包含 2011–2013 年每年极夜（5–8 月）崩解事件。这部分数据由于影像缺失，无法判别崩解具体发生月份

表 4 南极冰架月崩解数据集属性字段说明

序号	字段名称	单位	字段含义
1	Id	—	崩解区多边形编号
2	Year	年度	崩解发生的年份区间（继承分割前该位置年崩解事件的年度。例如，2015–2016 代表其发生在 2015 年 8 月至 2016 年 8 月之间）
3	Month	月	崩解发生的月份
4	Year_Mon	—	崩解发生的年月（前四位数字代表年，后两位代表月份）
5	Length	km	崩解区周长
6	Area	km <sup>2</sup>	崩解区面积
7	Size	—	崩解尺度（依据崩解面积划分：0 代表面积小于 1 km <sup>2</sup> 的微型崩解；1 代表面积在 1–10 km <sup>2</sup> 之间的小型崩解，2 代表面积在 10–100 km <sup>2</sup> 之间的中型崩解，3 代表面积在 100–1,000 km <sup>2</sup> 之间的大型崩解；4 代表面积大于 1,000 km <sup>2</sup> 的特大型崩解）
8	Thickness	km	崩解区平均厚度
9	Mass	Gt	崩解量
10	Cycle	年	崩解周期（继承分割前该位置年崩解事件的周期）
11	Type	—	崩解类型（继承分割前该位置年崩解事件的类型）
12	H_from	—	厚度数据来源

4.2 数据结果分析

南极冰架崩解频次具有明显的季节性，崩解主要集中在南极夏季（12 月到次年 3 月）

和秋季（4–6 月），占总崩解频次的 66.9%，其中，2 月崩解频次最高，其次是 1 月和 3 月，分别占 26.4%、22.3%和 18.2%；7 月崩解频次最低，仅占 1.7%。崩解面积和崩解质量也呈现季节性分布，12 月至次年 3 月逐月增加，4 月开始下降，6 月最小，10 月为小峰值；其中，7 月出现一个异常的峰值，是由于 2016 年 7 月拉森 C 冰架发生了面积超过 6,000 km<sup>2</sup>、质量超过 1,100 Gt 的特大型崩解。

不同尺度月崩解事件的频次、面积、质量分布随着尺度的增加其季节性规律减弱。如图 4 所示，小型、中型崩解在 2 月发生的频次都是最高的，且三种尺度崩解的月季变化趋势大致相当，都表现为 4–10 月之间崩解发生频次稳定且处于较低值；10 月到次年 2 月崩解发生频次逐步上升，到 3 月稍有下降但仍处于高位，4 月继续下降保持相对低位水平。同样的，小型、中型崩解的面积和质量也表现出了和频次分布相似的季节性特征。大型崩解的面积和质量总体上在南极暖季处于高位，但其他个别月份仍出现较高值。在观测期内，特大型崩解仅发生 2 次，暂无法获悉其季节分布特征。

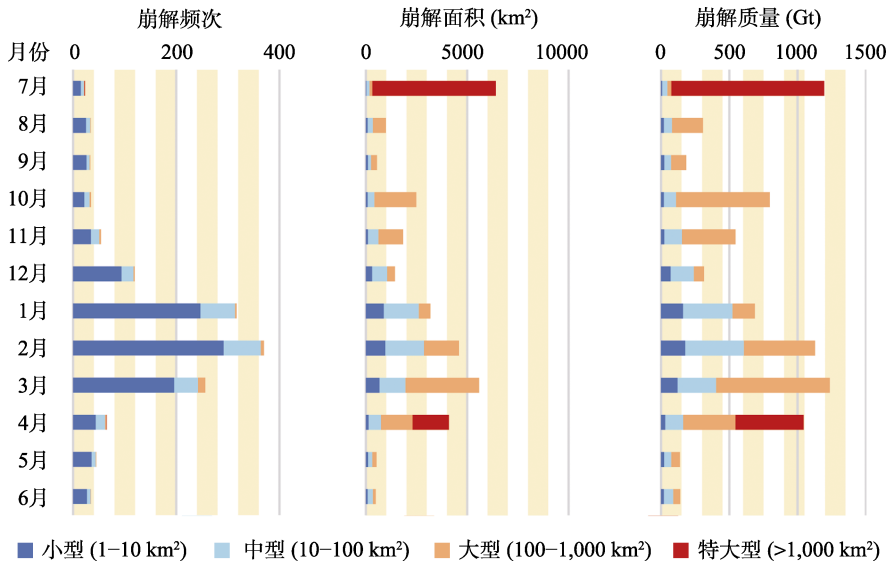


图 4 2010–2019 年不同尺度月崩解事件的崩解频次、面积、崩解量统计分布图

小型、中型和大型月崩解事件的年频次、面积、质量占比相对稳定。如图 5 所示，小型崩解频次占比最高，为 60%左右。小型和中型崩解面积占比最高的月份都是 1 月，分别占 26.8%和 54.3%；大型崩解面积占比最高的月份是 3 月，达到 64.9%。崩解质量占比的分布及变化趋势与崩解面积相似。

2010–2019 年南极冰架月崩解的空间分布如图 6 所示。在崩解频繁发生的 1–3 月，小型崩解覆盖范围最大。在其他月份，西南极地区小型、中型崩解依旧频繁，其次是埃默里冰架以东的东南极区域；在埃默里冰架以西的东南极区域崩解鲜有发生。观测时间区间内，大型崩解在西南极相对频发，其中 2 月的大型崩解仅集中在西南极和东南极威尔克斯地区区域，但 3 月的大型崩解分散在南极各个地区。特大型崩解仅在 7 月和 4 月各发生过一次，分别发生于南极半岛 Larsen C 冰架和西南极 Thwaites 冰架。



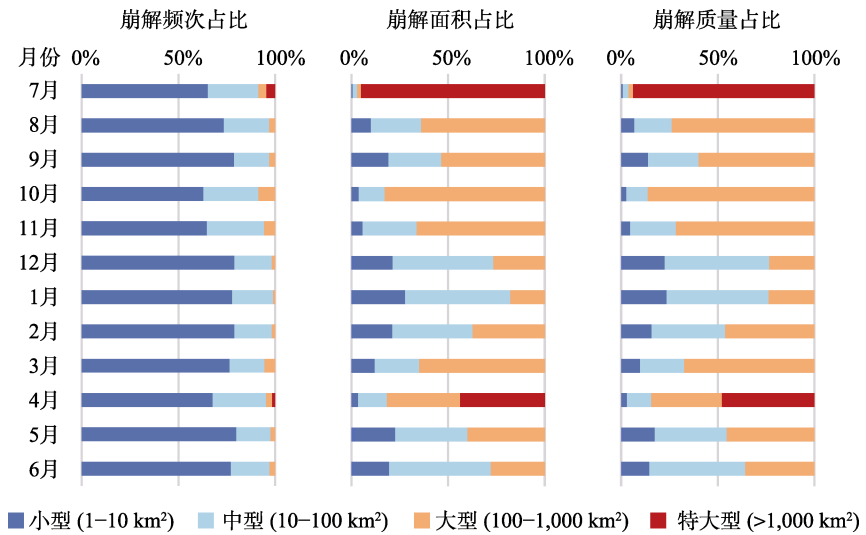


图 5 2010–2019 年南极冰架不同尺度月崩解事件占比图

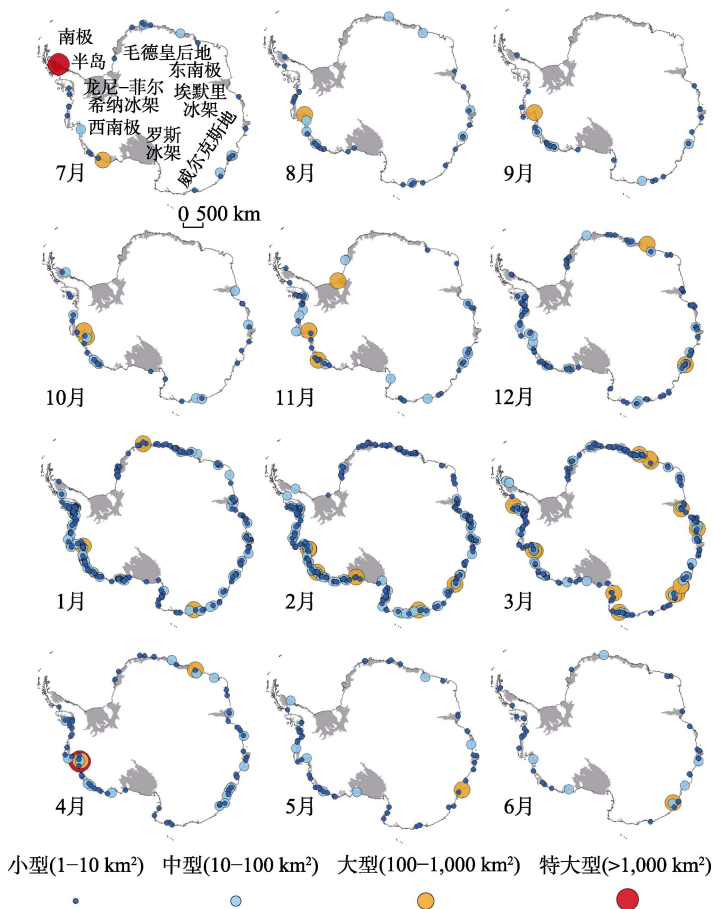


图 6 2010–2019 年不同尺度月崩解事件的累积分布数据可视化图



### 4.3 数据精度验证

月崩解区自年崩解区分割得到，因此南极冰架月崩解数据集的精度继承了年崩解区的提取精度：崩解区面积观测误差等效周长为 5 m，面积观测误差为 5 倍崩解区周长（m<sup>2</sup>）。单个月崩解事件的面积小于等于其对应的年崩解事件，因此其面积观测误差小于年崩解事件的面积观测误差，即年平均崩解区面积观测误差低于 17.1 km<sup>2</sup>。

## 5 讨论和总结

目前现有的南极冰架崩解监测产品为《南极冰架年崩解数据集（2005–2019）》<sup>[10]</sup>，上述数据集以 2005–2019 年间每年 8 月初覆盖全南极的多源光学和合成孔径雷达（SAR）数据为基础，利用基于冰流速的冰架前缘扩张模拟结合人工目视解译，提取了全南极冰架 2005–2019 年间发生的面积在 1 km<sup>2</sup> 以上的独立年崩解事件，并进一步提取并判定了其发生年份、面积、质量、周期和类型，制作了包含崩解区轮廓、位置和其他属性信息的 2005–2019 年南极冰架崩解产品。南极冰架年崩解数据集的崩解区面积观测误差等效周长为 5 m，该数据集中年均崩解区面积观测误差均值为 17.1 km<sup>2</sup>。单个崩解事件的厚度不确定度在 1.0 m 到 67.7 m 之间不等，均值为 18.5 m。14 年间崩解量不确定度均值为 13.9 Gt·yr<sup>-1</sup>，不确定度占比在 1.9%–6.0% 之间浮动。

本文中南极冰架月崩解产品是在上述数据集的基础上，结合 2010–2019 年间逐月覆盖南极海岸线的多源遥感影像，对每一个独立的年崩解事件进行月份判定及分割，得到更为精细的独立月崩解事件。该数据集将崩解的监测周期进一步缩短至月，实现了对连续 9 年全南极冰架的月崩解事件的精细监测并定量评估了南极冰架崩解的季节性特征。

冰架表面与大气相互作用，底部和前缘与海洋相互作用，是全球变暖的背景下的活跃区域。冰架周围大气与海洋因素的变化可通过分析冰盖表面融化程度、冰架周围海冰分布体现，南极冰盖表面融化和南极海冰面积可通过微波辐射计获取大尺度下冰雪状态信息，进而监测融化、冻结状态，生成南极冰盖表面融化及南极海冰分布产品。基于《南极冰架月崩解数据集（2010–2019）》，结合南极冰盖表面融化数据<sup>[18]</sup>中的冰盖表面最大日融化面积参数、南极海冰面积产品<sup>[19]</sup>中的月均海冰面积参数，我们初步分析了月崩解频次与南极冰盖月最大融化面积、南极月海冰面积之间的关系。结果表明，冰架月崩解频次与冰盖月最大表面融化面积变化趋势相似，两者正相关但不显著，崩解高峰出现在 2 月，而冰盖表面融化高峰出现在 1 月；南极冰架月崩解频次与南极月海冰面积变化趋势完全相反，呈显著的负相关，在 2 月海冰面积最小的时候崩解最频繁。后续仍需深入探究崩解与冰盖表面融化、海冰面积及其他相关气候因子之间的关系。

**作者分工：**程晓、刘岩、戚梦真、惠凤鸣、陈卓奇对数据集的开发做了总体设计；戚梦真、冯启阳、李新情、张媛媛、章影、陈心桐、刘奥博、陈雅婷、关真富、叶玥、尚鑫怡、田佳慧、段美惠、张卓宇采集和预处理了影像数据；戚梦真、冯启阳、林依静、韦屹、杨宸进行了月崩解区的分割和提取；刘岩、戚梦真设计了模型和算法；戚梦真做了数据验证；戚梦真、刘岩撰写了数据论文。

## 参考文献

- [1] Depoorter, M. A., Bamber, J. L., Griggs, J. A., *et al.* Calving fluxes and basal melt rates of Antarctic ice shelves [J]. *Nature*, 2013, 502(7469): 89–92.
- [2] Liu, Y., Moore, J. C., Cheng, X., *et al.* Ocean-driven thinning enhances iceberg calving and retreat of Antarctic ice shelves [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(11): 3263–3268.
- [3] Rignot, E., Jacobs, S., Mouginot, J., *et al.* Ice-shelf melting around Antarctica [J]. *Science*, 2013, 341(6143): 266–70.
- [4] Massom, R. A., Scambos, T. A., Bennetts, L. G., *et al.* Antarctic ice shelf disintegration triggered by sea ice loss and ocean swell [J]. *Nature*, 2018, 558(7710): 383–389.
- [5] Pattyn, F., Morlighem, M. The uncertain future of the Antarctic Ice Sheet [J]. *Science*, 2020, 367(6484): 1331–1335.
- [6] Medrzycka, D., Benn, D., Box, J., *et al.* Calving Behavior at Rink Isbræ, West Greenland, from Time-Lapse Photos [J]. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 2016, 48(2): 263–277.
- [7] Åström, J. A., Vallot, D., Schäfer, M., *et al.* Termini of calving glaciers as self-organized critical systems [J]. *Nature Geoscience*, 2014, 7(12): 874–878.
- [8] Wahlin, A. K., Steiger, N., Darelius, E., *et al.* Ice front blocking of ocean heat transport to an Antarctic ice shelf [J]. *Nature*, 2020, 578(7796): 568–571.
- [9] Darelius, E., Fer, I., Nicholls, K. W. Observed vulnerability of Filchner-Ronne Ice Shelf to wind-driven inflow of warm deep water [J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 12300.
- [10] 戚梦真, 刘岩, 程晓等. 南极冰架年崩解数据集 (2005–2019) [J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2020. <https://doi.org/10.3974/geodb.2020.04.09.V1>.
- [11] 戚梦真, 刘岩, 程晓等. 南极冰架月崩解数据集 (2010–2019) [J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2020. <https://doi.org/10.3974/geodb.2020.04.13.V1>.
- [12] 全球变化科学研究数据出版系统. 全球变化科学研究数据共享政策 [OL]. <https://doi.org/10.3974/dp.policy.2014.05> (2017 年更新).
- [13] 刘岩, 程晓, 惠凤鸣等. 利用 EnviSat ASAR 数据监测南极冰架崩解 [J]. *遥感学报*, 2013, 17(3): 479–494.
- [14] ENVISAT ASAR WSM [DB/OL]. <http://eogrid.esrin.esa.int/browse>.
- [15] Sentinel-1 SAR EW [DB/OL]. <https://www.esa.int/ESA>.
- [16] Terra Aqua MODI [DB/OL]. <https://worldview.earthdata.nasa.gov/>.
- [17] Landsat-8 OLI [DB/OL]. <https://www.usgs.gov/>.
- [18] Picard, G., Fily, M. Surface melting observations in Antarctica by microwave radiometers: correcting 26-year time series from changes in acquisition hours [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 104(3): 325–336.
- [19] Stroeve, J., Meier, W. N. Sea ice trends and climatologies from SMMR and SSM/I-SSMIS (version 3) [Z]. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center, 2018.