

# 南北极海冰的对比分析



李沛嶙\*, 王星东

河南工业大学信息科学与工程学院, 河南郑州 450001

**摘要:** 极地对全球的气候变化有深远影响, 因为极地是全球最大的冷源之一。海冰是极地的主要影响因素, 对热量的传递影响较大, 进而影响全球气候系统。近二十年来, 北极海冰逐年减少, 而南极海冰却有增加趋势。利用被动卫星遥感数据对极地海冰进行长时间的观测与研究分析, 将为研究全球气候变化提供重要理论依据, 为极地海冰研究提供重要数据源。本研究利用 1998-2018 年南极和北极海冰密集度数据进行时空变化对比分析, 找出南北极海冰变化情况。采用美国国防气象卫星 DMSP 的 SSM/I 数据和 NASA TEAM 算法, 将 1998-2018 年海冰数据进行对比分析。具体流程是利用 NASA TEAM 算法对南北极海冰进行反演, 得到多年冰、一年冰、整体海冰密集度数据, 进而确定海冰面积。通过对比分析得出: 南极海冰面积明显大于北极, 两者变化趋势相似, 南极、北极整体海冰呈减少趋势, 北极整体海冰减少幅度较大; 多年冰面积北极大于南极, 北极多年冰的下降趋势大于南极; 南极的一年冰总量大于北极, 两者都有上升趋势, 而北极上升幅度更大; 整体海冰下降, 多年冰减少而一年冰增加, 以上结果表明: 南极、北极海冰有多年冰向一年冰转化的趋势; 南极多年冰主要分布在威德尔海, 稳定存在区域占多年冰面积的 60%; 南极以一年冰为主, 一年冰稳定存在区域占一年冰总面积的 80.1%; 北极多年冰主要存在于北冰洋中心区域, 北极多年冰稳定存在的区域仅占 35.06%; 北极一年冰主要分布在多年冰外围, 稳定存在区域占一年冰总面积的 48.5%。

**关键词:** 南极; 北极; NASA TEAM 算法; 海冰; 时空变化

**DOI:** [10.57237/j.res.2023.02.001](https://doi.org/10.57237/j.res.2023.02.001)

# Comparative Analysis of Sea Ice Between the Antarctic and the Arctic

Li Peilin\*, Wang Xingdong

School of Information Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China

**Abstract:** Polar regions have a profound impact on global climate change, because polar regions are one of the world's largest sources of cold. Sea ice is the main influencing factor in the polar regions, which has a great influence on the heat transfer, which in turn affects the global climate system. In the past two decades, Arctic sea ice has decreased year by year, while Antarctic sea ice has increased. The use of passive satellite remote sensing data for long-term observation and analysis of polar sea ice will provide an important theoretical basis for studying global climate change and an important data source for polar sea ice research. This study uses the data of the Antarctic and Arctic sea ice density data from 1998 to 2018 to compare and analyze the changes in time and space to find out the changes of the sea ice in the south and Arctic. Using the SSM / I data of the US National Defense Meteorological Satellite and the NASA TEAM algorithm, the sea ice data from 1998 to 2018 was compared and analyzed. The specific process is to use the NASA TEAM algorithm

\*通信作者: 李沛嶙, lpl001022@163.com

收稿日期: 2022-12-07; 接受日期: 2023-03-08; 在线出版日期: 2023-05-25

<http://www.resenvsci.org>

to invert the Arctic and Antarctic sea ice, obtain multi-year ice, one-year ice, and overall sea ice density data, and then determine the sea ice area. Through comparative analysis, it is found that the area of Antarctic sea ice is significantly larger than that of the North Pole, and the change trend of the two is similar. The downward trend is greater than that of the South Pole; the total annual ice volume of the South Pole is greater than that of the North Pole, both of which have an upward trend, and the Arctic has a greater increase; the overall sea ice has fallen, and the multi-year ice has decreased while the annual ice has increased. Sea ice has a tendency to transform from multi-year ice to one-year ice; Antarctic multi-year ice is mainly distributed in the Weddell Sea, with stable areas accounting for 60% of the multi-year ice area; Antarctica is dominated by one-year ice, and one-year ice stable area accounts for one 80.1% of the total annual ice area; Arctic multi-year ice mainly exists in the central area of the Arctic Ocean. The Arctic multi-year ice stable area only accounts for 35.06%; the Arctic one-year ice is mainly distributed around the multi-year ice periphery, and the stable existence area accounts for the total annual ice area 48.5%.

**Keywords:** Antarctic; Arctic; NASA TEAM Algorithms; Sea Ice; Spatiotemporal Change

## 1 引言

近几十年来，气候变暖逐渐成为全社会讨论的热点问题，气候变暖不仅造成极端天气的增多，还导致冰雪融化速度加快，致使海平面上升，甚至给沿海地区、岛屿上人类的生存环境造成了威胁。极地能对全球的气候变化起到深远的影响，因为南极、北极是全球最大的冷源之一。两极地区在全球变暖中扮演重要角色，因为这一区域发生的大气-冰-海洋的相互作用通过反馈、生物地球化学循环、深层大洋环流、能量的大气辐射传输以及冰物质平衡的变化等而影响整个地球系统[1]。

海冰具有反射率高的特点，会将大部分太阳辐射反射，从而起到抑制作用，平衡热量在海洋与大气之间的交换[2]沈校熠被动微波遥感技术不受天气影响，可全天候持续地进行对地观测，已成为海冰密集度及海冰范围监测的主要手段[3]。

近几十年来，北极的海冰受气候变化影响较大，出现了不同程度的面积减少和范围缩减，而与此相反是，近二十年来南极海冰呈增长态势，南极的海冰也出现了不同程度的异常。南极海冰的异常变化不仅影响南极地区局地能量平衡，而且对于包括海洋、大气、极冰在内的全球气候系统的稳定和变化亦会产生巨大的影响[4]。

短时间的变化可能并不足以说明问题，只有进行长时间序列的分析与研究才能发现海冰的时空变化情况和趋势。本研究利用被动卫星遥感数据对极地海冰进行长时间的观测与研究分析，将为研究全球气候变化提供重要理论依据，为极地海冰研究提供重要数据源。

1999 年, Parkinson 等[5]利用 SMMR 和 SSM/I 获得

的海冰密集度产品估算海冰范围，发现 1979-1998 年间，南极海冰范围以  $11180 \pm 4190 (\text{km}^2/\text{yr})$  的速度增加。Parkinson 等利用 SMMR、SSM/I、SSMIS 数据计算北极海冰范围和面积，并得出 1979 年至 1996 年间北极海冰范围以  $(-34300 \pm 3700) (\text{km}^2/\text{yr})$  的速率持续减少。

2003 年, Cavalieri 等[6]指出 1973-1977 年南极海冰面积减少, 1977-2002 年增加。Fowler 等[7]使用 SSMR、SSM/I 和 AVHRR 数据的研究表明, 1978-2003 年间, 北极的多年冰减少, 一年冰增加。

2008 年, Cavalieri[8]等利用 1979 年至 2006 年数据分析发现南极海冰范围增长率为  $1.0 \pm 0.4 (\%/\text{yr})$ 。Comiso 等[9]发现 1979 年至 2006 年间北极海冰面积以每年 11.4% 的速度减少, 于 2007 年达到最小。

2011 年, Comiso 等[10]使用 1979-2011 年微波遥感数据的研究表明, 北极冬季多年冰的外缘线和面积每十年分别缩减 15.1% 和 17.2%。

2014 年, 张辛等[11]使用 MODIS 影像与 AMSR-E 卫星传感器数据, 发现 2002-2010 年的南极海冰面积 2 月最小, 9 月最大; 2002-2004 年无明显变化, 2005-2007 年明显减少, 2008-2010 年则处于增长趋势。随着全球气候变暖, 北极海冰有减少的趋势。

2016 年, 沈校熠等[2]利用 AMSR-E 逐日海冰密集度数据, 发现 2002-2011 年南极海冰面积增加了 3.8%, 总体上呈现增加的趋势, 2008 年达到最大值; 罗斯海、西太平洋和威德尔海的海冰面积呈现增加趋势, 其余海域面积减少; 南极海冰面积夏季最小、冬季最大, 相同季节海冰面积变化波动较小; 南极一年冰每年增

加约  $0.1 \times 10^6 \text{ km}^2$ , 主要分布在南极大陆(除威德尔海外)周围; 多年冰每年减少  $0.05 \times 10^6 \text{ km}^2$ , 且多处于威德尔海; 海冰面积变化与气温有负相关关系。

刘艳霞等[3]通过线性倾向估计方法, 对被动微波辐射计海冰密集度产品进行分析。结果显示 1979-2014 年北极海冰范围明显减小, 海冰密集度变化率分布在 -2.03% 至 1.06% 之间; 北极海冰 2 月份最大范围为  $15.54 \times 10^6 \text{ km}^2$ , 9 月份最小范围为  $2.86 \times 10^6 \text{ km}^2$ , 海冰呈现明显的减少趋势, 整体变化率为  $-4.63 (10^4 \text{ km}^2/\text{yr})$ ; 南极海冰范围略微增大, 海冰密集度变化率在 -1.4% 至 1.03% 之间。

2017 年, 张雷等[12]利用 1989-2015 年海冰密集度气候资料, 分析了极地海冰长期变化趋势。结果表明: 研究期内, 北极年平均海冰面积减少, 南极海冰面积增加, 变化趋势分别为  $-0.569 \times 10^6 \text{ km}^2 (10\text{a})^{-1}$ ,  $0.327 \times 10^6 \text{ km}^2 (10\text{a})^{-1}$ ;

与我们的认知不同是, 同在气候变暖的大背景下, 南极情况复杂, 变化多样, 海冰近几十年有增加的趋势。目前已有学者对南极北极海冰做了大量分析, 但是仍存在一些问题: 大部分研究都是侧重于南极或北极单一区域, 同时, 近几年对于南极和北极长时间序列的海冰、多年冰、一年冰变化研究较少。将南极、北极海冰进行对比分析, 可以直观了解近 20 年来海冰时空变化。

## 2 研究区域与数据源

### 2.1 南极、北极概述

南极是地球的最南端, 南极地区通常是指南纬 66.5° 到 90° 的地理区域, 主要由南极大陆和周边海域组成。南极海冰环绕南极的边缘海区存在, 与格陵兰岛上的冰和南极大陆的冰盖不同。北极是地球的最北端, 通常将北纬 66° 以北的广大区域称为北极地区。北冰洋大部分区域都在海冰的覆盖下, 是地球上唯一的白色海洋, 海冰平均厚度达到 3 米, 夏季也有一半以上的海域覆盖着海冰, 中央区域的海冰更是存在了上百万年, 属于永久性海冰。

### 2.2 SSM/I 传感器数据概述

由于海洋具有其特殊性, 如面积很大, 反射较强, 海水具有透明性的差异, 以及海面特殊情况等, 海洋遥感具有较多特点。海洋范围广、幅度大、变化快, 只有从高空和空间平台才能获得大面积同步覆盖信息, 进行海洋研究。微波可以适应各种天气条件, 透过云层获取

所需信息, 具有全天候、全天时的特点。微波对海水特别敏感, 波长很适合获得海洋温度、浓度等信息。

本研究所用的数据来自于美国冰雪数据中心提供的 SSM/I 数据, 该数据来自于美国空军国防气象卫星 DMSP 所携带的一台星载微波辐射计。DMSP 有 F8、F11、F13、F17 四个平台。最早的 F8 平台从 1989 年 7 月开始使用, 目前使用的是 F17 平台数据(平台工作时间如下表 1 所示)。该平台提供每日数据, 数据范围包括南极和北极区域, 数据空间分布率为  $25 \times 25 \text{ km}$ 。该数据共有四个波段, 分别为 19GHz、22GHz、37GHz 和 85GHz。

极化表示电磁辐射电场向量的振动方向, 或者电场向量随时间变化的空间取向。在微波领域, 物体的空间分布和形状等特性, 可以根据电磁波传播的直线性从传播方向上知道。电场向量与地面平行的叫做水平极化, 电场向量与地面成 90° 的称为垂直极化。不同的极化方式获取的微波遥感数据也是不同的。19GHz、37GHz 和 85GHz 波段都有两种数据形式, 分别是垂直和水平极化状态。

表 1 各平台传感器工作时间

传感器型号	工作时间
DMSP-F8	1987 - 1991
DMSP-F11	1991 - 1995
DMSP-F13	1995 - 2007
DMSP-F17	2007 -

如果要进行长时间序列的研究, 可能会出现跨平台的问题。本论文所用数据时间为 1998-2018 年, 1998 年数据来自于 F13 平台, 而 2007 年以后的数据来自于 F17 平台。同时, 经过 20 年的时间, 南极的数据版本从 v2 升级到了 v4, 北极数据版本为 v5 保持不变。因此, 需要将不同平台的数据进行统一, 以便做长时间序列的研究分析。利用公式(1), 将 1998-2007 年 F13 平台数据归一化处理到 F8 平台, 将 2008-2017 年 F17 平台数据归一化处理到 F8 平台。三个平台传感器的回归参数如表 2 所示:

$$T_a = a * T_b + b \quad (1)$$

其中,  $T_a$  为 F8 平台 19GHz 波段水平极化通道的亮温数据,  $T_b$  为 F13、F17 平台的亮温数据,  $a$ 、 $b$  为回归参数,  $a$ 、 $b$  分别表示斜率和截距[13]。

表 2 不同传感器的回归参数

数据转化	斜率	截距	相关系数
F13 19GHz	1.008	-1.17	R>0.99
F17 19GHz	1.0286	-3.0094	R>0.99

### 3 理论基础

### 3.1 海水概论

海冰顾名思义就是海水遇冷凝固结成的冰。海冰相当于温暖的海水和寒冷的大气之间的隔离层，隔绝了热量的传输和能量交换。海冰的形成、生长到消融都在海水中进行。海冰占全球海洋总面积的 5%-8%，主要集中在两极地区。南半球海冰存在于南极大陆周围海区，北半球海冰主要存在于北极圈内。根据海冰的生长阶段以及存在时间，可以将海冰分为多年冰和一年冰。一年冰指存在时期在一年内的海冰，多年冰指经过夏季未融化的海冰。一年冰从每年的夏季末开始生长，到次年的夏季完全融化，而多年冰在秋季末才开始生长。海冰密集度是指海冰的密集程度，通常以 0-1 为取值范围。Heinrichs 等[14]研究发现，将密集度 0.15 的区域定为海水与海冰的分界线可以较好地反演出海冰边缘。

### 3.2 NASA TEAM 算法

NASA TEAM 算法[15]所用数据为星载微波辐射计 SSM/I 数据，该算法具体使用的是 19GHz 垂直 (19V) 和水平方向 (19H) 极化的亮温数据，以及 37GHz 垂直方向 (37V) 极化的亮温数据。NASA TEAM 算法根据两个独立变量进行反演，分别是极化梯度率 PR (Polarization Gradient Ratio) 和光谱梯度率 GR (Spectral Gradient Ratio) [16]，定义如公式(2)、(3)所示，其中 T 表示水平 (H) 或垂直 (V) 极化亮温数据。

$$PR = \frac{T_b[19V] - T_b[19H]}{T_b[19V] + T_b[19H]} \quad (2)$$

$$GR = \frac{T_b[37V] - T_b[19V]}{T_b[37V] + T_b[19V]} \quad (3)$$

NASA TEAM 算法的另一个优点就是可以直接计算得到多年冰密集度和一年冰密集度，而 Bootstrap 算法只能计算整体海冰密集度。多年冰和一年冰密集度都是根据极化梯度率  $PR$  和光谱梯度率  $GR$  计算得到。

- tb\_f13\_19980101\_v5\_n19h.bin
- tb\_f13\_19980101\_v5\_n19v.bin
- tb\_f13\_19980101\_v5\_n22v.bin
- tb\_f13\_19980101\_v5\_n37h.bin
- tb\_f13\_19980101\_v5\_n37v.bin
- tb\_f13\_19980101\_v5\_n85h.bin
- tb\_f13\_19980101\_v5\_n85v.bin

多年冰密集度 $C_M$ :

$$C_M = \frac{b_0 + b_1 \cdot PR + b_2 \cdot GR + b_3 \cdot PR \cdot GR}{c_0 + c_1 \cdot PR + c_2 \cdot GR + c_3 \cdot PR \cdot GR} \quad (4)$$

一年冰密集度 $C_F$ :

$$C_F = \frac{a_0 + a_1 \cdot PR + a_2 \cdot GR + a_3 \cdot PR \cdot GR}{c_0 + c_1 \cdot PR + c_2 \cdot GR + c_3 \cdot PR \cdot GR} \quad (5)$$

将多年冰密集度和一年冰密集度相加就能得到总体海冰密集度 $C_T$ 。公式如下：

$$C_T = C_F + C_M \quad (6)$$

在公式(4)、(5)中,用到了12个关于亮温数值的系数,a、b、c是在 $19GHz$ 水平极化(19H)、 $19GHz$ 垂直极化(19V)和 $37GHz$ 垂直极化(37V)下观测到的在无冰海面、一年冰面和多年冰面上的SSM/I亮温值。南极和北极的参数不同,a、b、c的具体数值如表3所示:

表 3 亮温系数

参数	南极	北极
$a_0$	3055	3290.2
$a_1$	-18592.6	-20761.2
$a_2$	20906.9	23934
$a_3$	42554.5	47985.4
$b_0$	-782.750	-790.9
$b_1$	13453.5	13825.3
$b_2$	-33908.3	-33155.8
$b_3$	-47334.6	-47771.9
$c_0$	2078	2035.3
$c_1$	7423.8	9244.6
$c_2$	-3376.76	-5665.8
$c_3$	-8722.03	-12875.1

#### 4 海冰密集度反演

美国冰雪数据中心提供了 SSM/I 原始数据，每日有四个波段总计七个数据。

以 1998 年 1 月 1 日为例，此次共用到了三个数据如下：



图 1 (a) 北极原始数据; (b) 南极原始数据

首先根据上文表 2 和公式(1)对数据归一化统一处理。将南极北极 F13、F17 平台数据统一至 F8 平台。根据上文提到的公式(2)、(3)、(4)、(5)进行波段运算。提取南极、北极掩模数据，将处理过的数据进行掩模处理，掩模的目的是将大陆地区的灰度值赋值为 0，以降低误差最终分别得到南极和北极每日的多年冰与一年冰密集度。

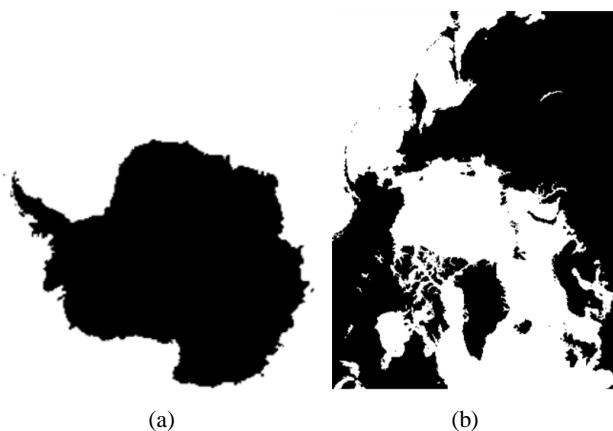


图 2 (a) 南极掩模文件, (b) 北极掩模文件

以 1998 年 1 月 1 日为例，处理过后的南极、北极多年冰密集度图像如下图所示：

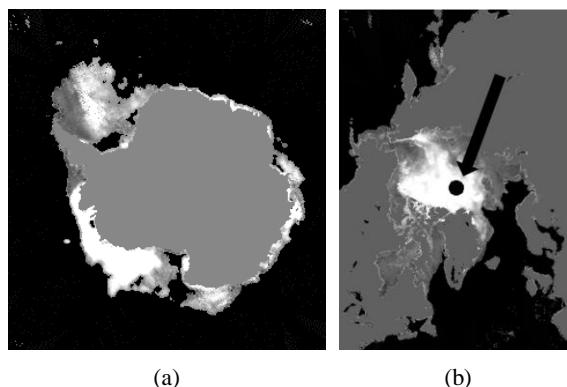


图 3 (a) 南极 1998 年 1 月 1 日多年冰密集度, (b) 北极 1998 年 1 月 1 日多年冰密集度

在上图 3 (b) 中，北极中心区域出现了圆形孔洞，这是由于数据的缺失所造成的情况。原因是因为卫星无法覆盖北纬 90° 附近的区域，因此遥感数据在北极点存在缺省值，缺失值范围在北纬 85°~90° 之间。SSM/I 传感器数据有四个不同的平台，而不同平台的传感器也有差异，所以获取的缺失值范围也略有不同，1998-2008 年缺失的数据点平均约为 310 个，2009-2018

年缺失的数据点约为 17 个。根据前人的研究和实际情况来分析，在确定密集度时应该将缺失值全部视为存在海冰密集度，在统计海冰面积时应视为存在海冰。从北极的实际情况来看也是合理的，因为北极点附近存在着永久性海冰。

通过公式反演得到每日多年冰与一年冰密集度数据后，进行数据加和处理，得到每月、每年的多年冰与一年冰密集度数据。

整体海冰密集度为多年冰与一年冰密集度之和，通过波段运算，将 1998-2018 年的多年冰与一年冰密集度数据求和运算，得到当年整体海冰密集度数据。以 1998 年为例，南极、北极整体海冰密集度如下图 4 所示：

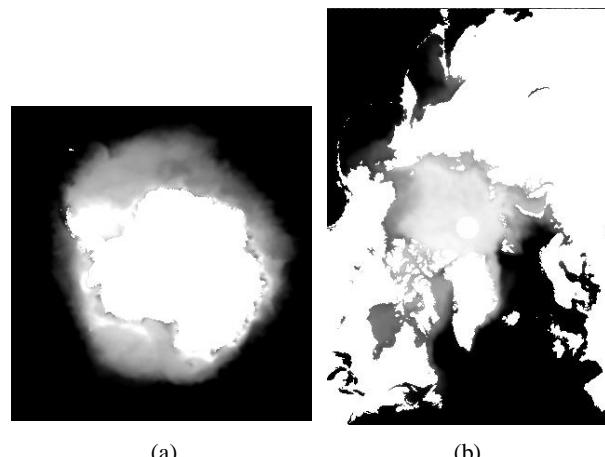


图 4 (a) 南极 1998 年整体海冰密集度, (b) 北极 1998 年整体海冰密集度

## 5 结果与分析

### 5.1 海冰时间变化

#### 5.1.1 整体海冰年变化

海冰时间变化是指海冰随着时间推移发生的变化，通常以图表的形式展现。根据海冰密集度，通过 Envi 软件确定海冰面积，统计 1998-2018 年南极、北极年平均海冰面积得到图 5。

1998-2018 年南极海冰面积呈现小幅下降的趋势，下降率为 0.52%，2018 年相比 1998 年，面积减少了  $0.79 \times 10^6 \text{ km}^2$ ；年平均海冰面积为  $12.68 \times 10^6 \text{ km}^2$ ；2014 年海冰面积出现极大值为  $13.626 \times 10^6 \text{ km}^2$ ，2017 年海冰面积出现极小值为  $11.524 \times 10^6 \text{ km}^2$ ；从南极海冰的变化上看，1998-2001 年海冰面积变化较小，2002 年海冰

突然减少, 2002 年后海冰面积开始增加。2003-2011 年, 南极海冰面积在平均值附近上下波动, 变化较为平稳。2011-2014 年海冰面积逐年增加, 2014 年达到极大值。2014 年以后海冰又开始大幅度减少, 直到 2018 年才有所回升。如果从 1998-2014 年来看, 南极海冰实际处于

一个波动增加的趋势, 这 17 年间海冰增加了  $1.03 \times 10^6 \text{ km}^2$ , 年均增长率为 6.46%, 这一点与我们的认知所不同, 大部分人都会认为随着全球气候变暖, 南极海冰也会逐年减少, 而事实确是增加。从 2014-2017 年, 南极海冰减少了约  $2.12 \times 10^6 \text{ km}^2$ 。

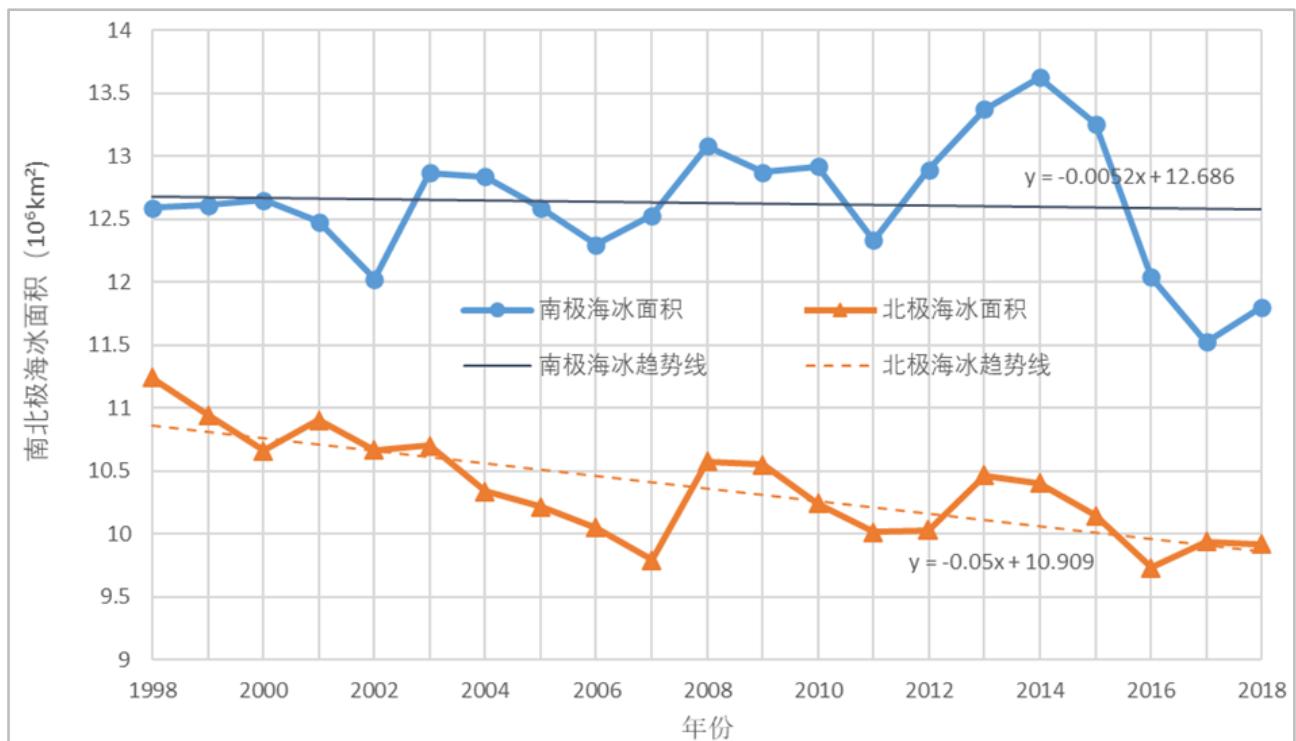


图 5 1998-2018 年南极、北极整体海冰面积年变化

1998-2018 年北极海冰面积呈大幅度下降趋势, 下降率为 5%; 年平均海冰面积为  $10.36 \times 10^6 \text{ km}^2$ , 最大值出现在 1998 年, 为  $11.24 \times 10^6 \text{ km}^2$ , 最小值出现在 2016 年, 为  $9.73 \times 10^6 \text{ km}^2$ ; 1998-2007 年, 北极海冰面积波动下降, 面积减少了约  $1.45 \times 10^6 \text{ km}^2$ , 下降率为 16.1%。2007-2008 年间, 海冰面积突然大幅度增加。2008 年后北极海冰面积又呈现波动下降的状态, 面积减少了  $0.66 \times 10^6 \text{ km}^2$ , 下降率为 6.5%; 2018 年相比 1998 年, 面积减少了约  $1.32 \times 10^6 \text{ km}^2$ ; 以 2007 年为分界点将二十年的数据分为两段, 前后十年的数据都是呈下降状态, 而后十年北极海冰的减少速率是小于前十年的, 由此可见北极海冰的下降趋势有放缓的迹象。

由图 5 可以直观看到, 南极海冰面积明显大于北极, 两者变化趋势相似, 都呈现下降趋势; 而北极下降幅度大于南极。

### 5.1.2 海冰月变化

统计 1998-2018 年南极北极每月的海冰面积得到图 6、图 7。

南极的夏季为 1-3 月, 每年的二月份南极海冰面积最小, 1998-2018 年二月平均海冰面积为  $3.34 \times 10^6 \text{ km}^2$ , 最小值为 2018 年二月的  $2.49 \times 10^6 \text{ km}^2$ , 最大值为 2008 年的  $4.09 \times 10^6 \text{ km}^2$ ; 从二月到九月, 南极进入秋冬季节, 气温逐渐降低, 海冰开始形成, 九月海冰达到一年中的最大值, 平均面积为  $19.79 \times 10^6 \text{ km}^2$ , 最小值为 2017 年的  $18.81 \times 10^6 \text{ km}^2$ , 最大值为 2014 年的  $21.03 \times 10^6 \text{ km}^2$ 。九月过后, 海冰开始消融减少, 整体呈现周期性变化; 南极九月份海冰面积最大、最小值出现年份与南极整体海冰最大、最小值出现年份保持一致, 说明九月对整体海冰面积影响较大。

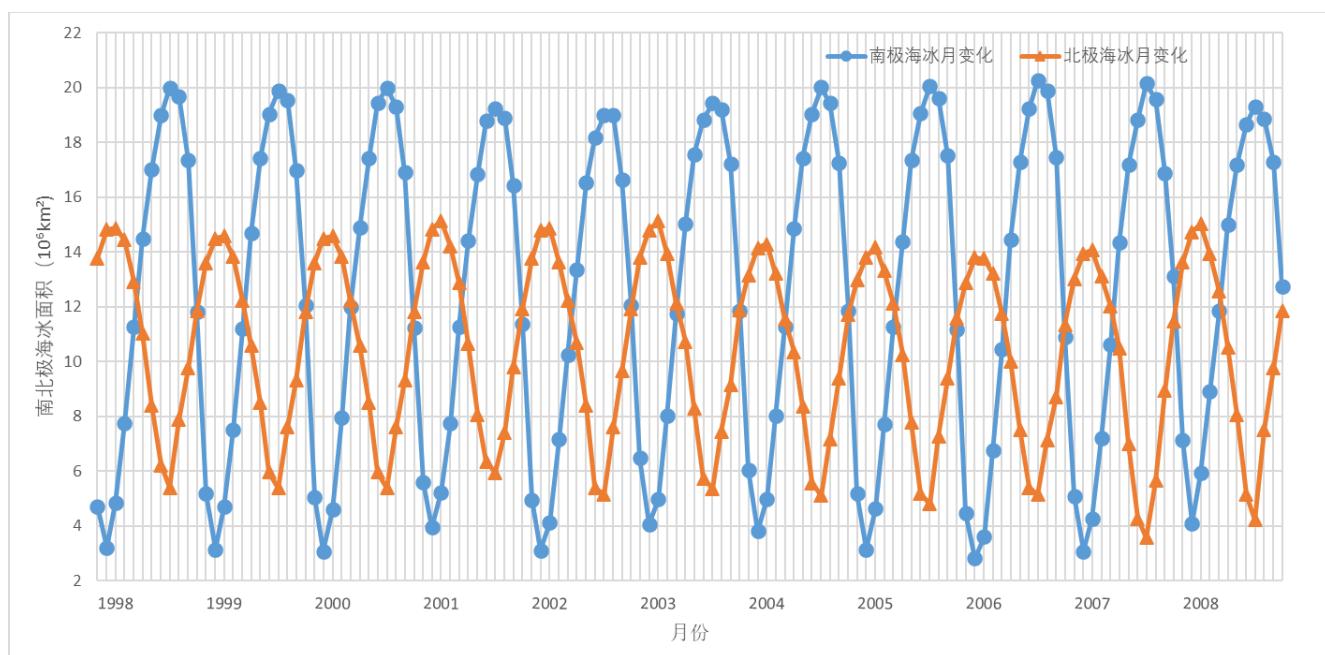


图 6 1998-2008 年南北极海冰月变化

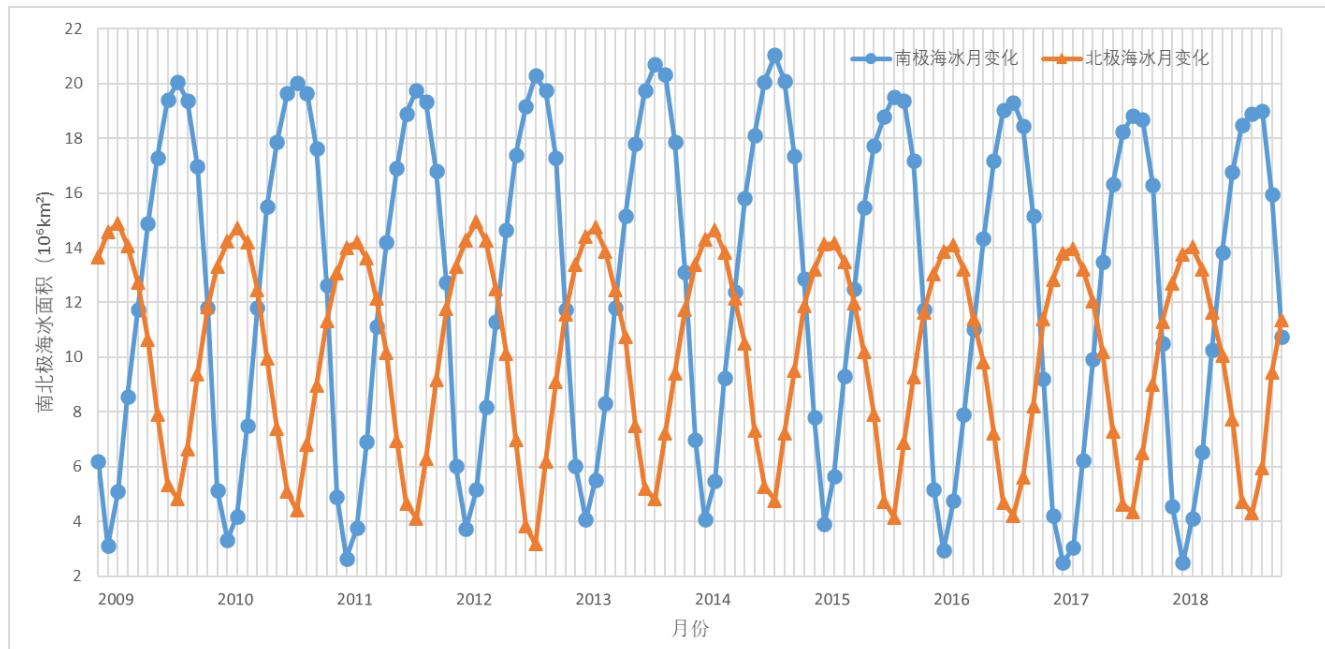


图 7 2009-2018 年南北极海冰月变化

北极海冰面积最小值出现在每年的九月，平均面积为  $4.72 \times 10^6 \text{ km}^2$ ，最大值为 2001 年的  $5.93 \times 10^6 \text{ km}^2$ ，最小值为 2012 的  $3.19 \times 10^6 \text{ km}^2$ 。九月之后北极气温转冷，海冰开始生长，三月份达到最大值；三月平均海冰面积为  $14.56 \times 10^6 \text{ km}^2$ ，最小值出现为 2006 年的  $13.75 \times 10^6 \text{ km}^2$ ，最大值为 1998 年的  $15.38 \times 10^6 \text{ km}^2$ 。

南北极海冰都呈现周期性变化；南极海冰每年的最

大值比北极大，最小值也比北极小（除 2012 年），说明南极海冰变化比北极更加剧烈，夏季融化了更多的海冰，冬季生成的海冰也更多。北极的 1-3 月是冬季，因此北极海冰月变化与南极正好相反，值得注意的是北极海冰面积最大的月份出现在三月，与南极面积最小的月份并不对应，一方面说明南极北极气候有所差异，另一方面说明海冰的季节性变化与气温的季节性变化并不同步。

### 5.1.3 多年冰变化

根据南极、北极多年冰密集度数据统计南北极每年多年冰面积得到图 8。

南极多年冰面积整体呈小幅度下降趋势, 下降率为 2.76%, 平均每年减少  $0.024 \times 10^6 \text{ km}^2$ , 多年冰面积

下降的速度大于整体海冰下降速度; 多年冰年均面积为  $2.54 \times 10^6 \text{ km}^2$ , 面积最大值为 2003 年的  $3.36 \times 10^6 \text{ km}^2$ , 面积最小值出现在 2017 年, 为  $1.82 \times 10^6 \text{ km}^2$ ; 除 2000-2003 年多年冰变化幅度较大外, 1998-2015 年多年冰面积在均值附近上下浮动, 2015 年以后面积出现大幅度降低。

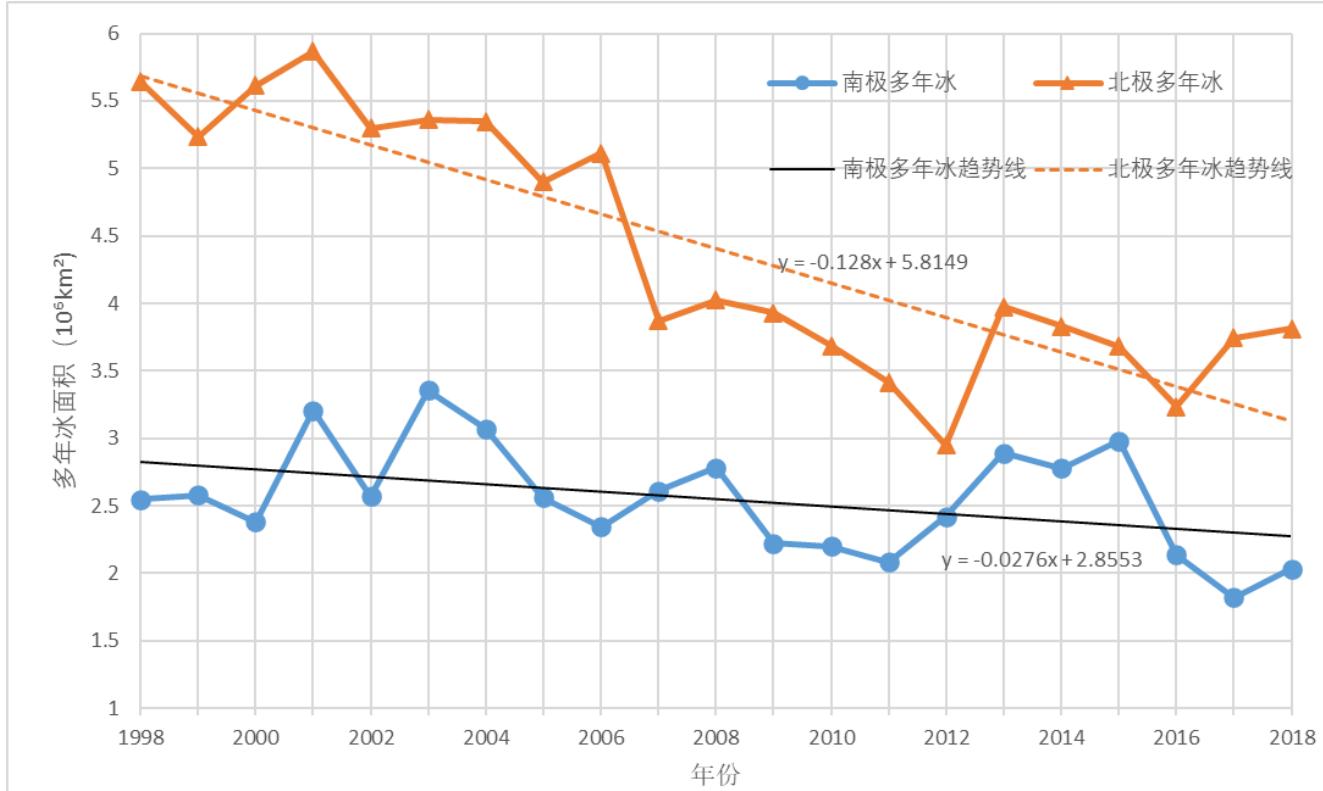


图 8 1998-2018 年南、北极多年冰时间变化

北极多年冰总体呈大幅度下降趋势, 下降率为 12.8%, 平均每年减少  $0.087 \times 10^6 \text{ km}^2$ , 多年冰面积下降速度大于整体海冰下降速度; 北极多年冰面积均值为  $4.41 \times 10^6 \text{ km}^2$ , 最大值出现在 2001 年, 面积为  $5.87 \times 10^6 \text{ km}^2$ , 最小值出现在 2012 年, 面积为  $2.95 \times 10^6 \text{ km}^2$ ; 1998-2006 年北极多年冰缓慢下降, 2006-2007 年多年冰大幅度下降, 2007-2012 年多年冰又呈现缓慢下降, 2012-2013 年多年冰面积出现大幅度增加, 2013 年以后多年冰呈现波动下降状态。

虽然南极海冰总量远大于北极, 但是多年冰的面积却是北极大于南极, 说明南极区域以一年冰为主。北极多年冰的下降趋势大于南极, 同时北极多年冰变化较大, 出现多次突变, 而南极多年冰变化平稳。从折线图中也可以看出, 两条曲线变化具有相似性。

### 5.1.4 一年冰变化

根据南极、北极一年冰密集度数据统计每年一年冰面积得到图 9。

南极一年冰整体呈小幅度上升趋势, 增长率为 2.24%, 1998-2018 年南极一年冰年均面积约为  $10.08 \times 10^6 \text{ km}^2$ ; 1998-2000 年一年冰变化不大, 2001 年一年冰面积出现最小值为  $9.27 \times 10^6 \text{ km}^2$ 。随后南极一年冰面积开始逐年波动增加, 在 2014 年达到最高峰, 面积为  $10.85 \times 10^6 \text{ km}^2$ 。2014-2018 年一年冰开始进入大幅度下降状态。从整体来看, 1998-2014 年之间(除 2001 年外), 一年冰基本处于增长的趋势, 直到近几年才开始出现下降情况。

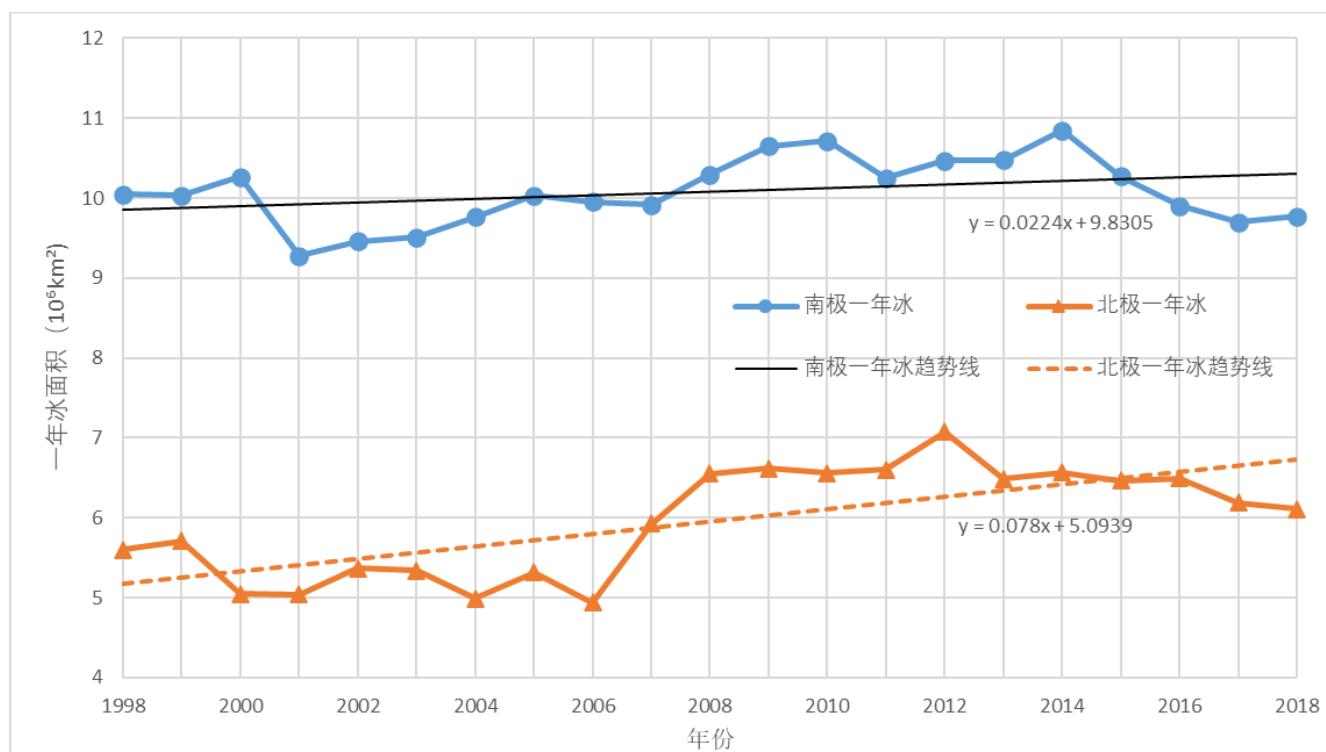


图 9 1998-2018 年南、北极一年冰时间变化

北极一年冰面积呈现大幅增长趋势，增长率为 7.8%，2018 年相比 1998 年面积增加了  $0.51 \times 10^6 \text{ km}^2$ ，平均每年增加  $0.024 \times 10^6 \text{ km}^2$ ，一年冰年均面积为  $5.95 \times 10^6 \text{ km}^2$ ；1998-2006 年北极一年冰面积波动下降，于 2006 年达到最小值，面积为  $4.94 \times 10^6 \text{ km}^2$ ，2006-2012 年，一年冰逐渐增加，于 2012 年达到高峰，面积为  $7.08 \times 10^6 \text{ km}^2$ ，2012 年以后一年冰面积开始减少。

对比南北极一年冰面积，南极的一年冰总量大于北极，两者都有上升趋势，而北极幅度更大。不管是整体海冰、多年冰还是一年冰，北极的变化趋势都要比南极更明显。

## 5.2 海冰空间变化

根据每年的多年冰和一年冰密集度数据，统计海冰出现的频率，利用 ArcGIS 软件生成空间变化图。

### 5.2.1 多年冰空间变换

统计南极多年冰出现频率得到图 10。由图 10 可直观看出，南极多年冰主要分布在南极大陆周围海区，紧邻大陆，其中威德尔海最多，其次是罗斯海和别林斯高晋海，剩余的西太平洋和印度洋只有少量分布；靠近南极大陆颜色最深的区域是多年冰存在 19 年以上

的区域，越向外多年冰出现的频次越低，存在时间越短；如果将多年冰出现次数在 19 年以上的区域视为稳定区域的，该区域同样集中在威德尔海，其余海区分布较少，稳定存在的多年冰面积有  $0.81 \times 10^6 \text{ km}^2$ ，占南极多年冰总面积的 28.65%；存在时间在 15 年以上的区域面积为  $1.52 \times 10^6 \text{ km}^2$ ，占多年冰总面积的 60.54%。

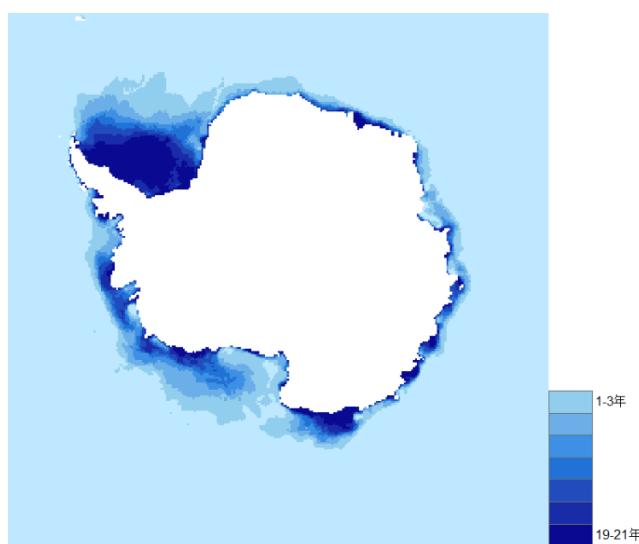


图 10 1998-2018 年南极多年冰空间变化

统计每年北极多年冰出现频率得到图 11。北极多

年冰主要集中于北冰洋区域、格陵兰岛北部和极点附近; 北极海冰主要为多年冰, 纬度越低多年冰存在时间越短, 位于波弗特海、楚科奇海域以及东西伯利亚海域大部分区域多年冰存在时间都较短; 相比南极, 北极多年冰稳定存在的区域较少, 多年冰存在时间超过 19 年的区域面积为  $2.52 \times 10^6 \text{ km}^2$ , 占多年冰总面积的 25.85%; 存在时间在 15 年以上的区域面积有  $3.41 \times 10^6 \text{ km}^2$ , 占多年冰总面积的 35.06%。

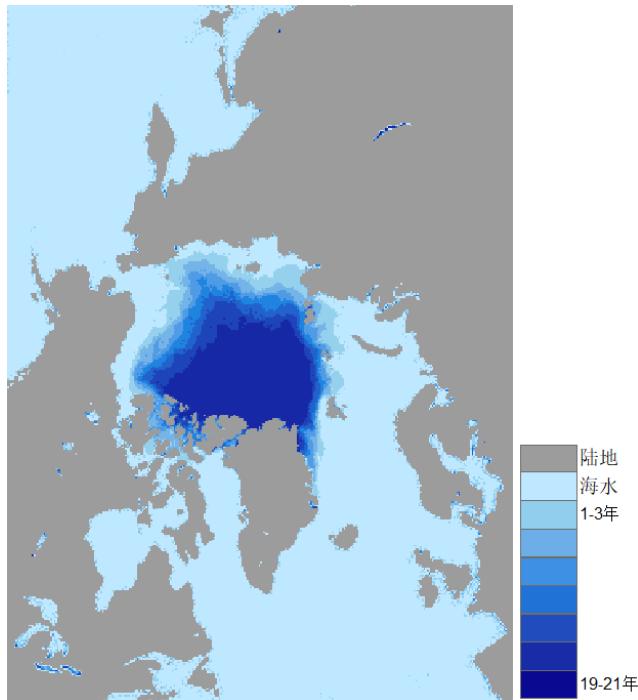


图 11 1998-2018 年北极多年冰空间变化

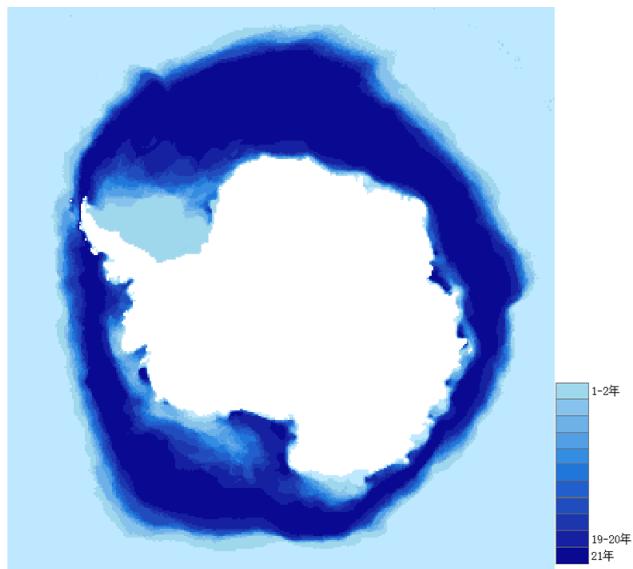


图 12 1998-2018 年南极一年冰空间变化

### 5.2.2 一年冰空间变化

统计南极一年冰出现频率得到图 12。由图 12 可以直观看出, 南极以一年冰为主, 南极 80.1% 的海冰为一年冰, 多年冰只有占很少一部分; 南极一年冰分布在多年冰外围, 整体呈现环形。环中心区域为稳定区域, 边缘区域一年冰出现次数较少; 一年冰大部分区域为稳定区域, 威德尔海多年冰与一年冰的交界区域一年冰不稳定。

统计北极一年冰出现频率得到图 13。北极一年冰同样分布在多年冰外围, 在哈德逊湾、拉布拉多海、巴伦支海北部、格陵兰东海岸、北冰洋北部和白令海峡有大量分布, 大陆沿岸一年冰较为稳定; 一年冰存在时间超过 19 年的区域面积有  $3.31 \times 10^6 \text{ km}^2$ , 占一年冰总面积的 36.6%, 存在时间超过 15 年的区域有  $4.39 \times 10^6 \text{ km}^2$ , 占总面积的 48.5%。相比南极, 北极一年冰稳定存在区域较少。

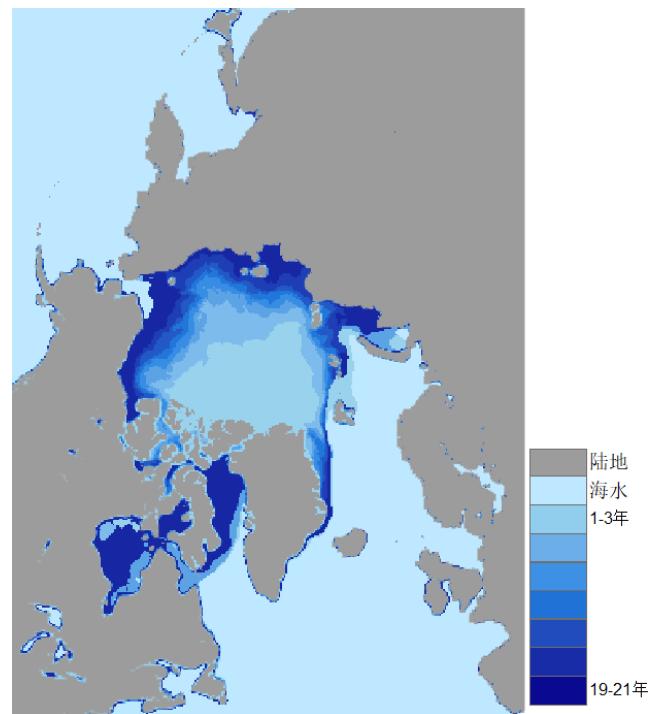


图 13 1998-2018 年北极一年冰空间变化

## 6 结论

- (1) 1998-2018 年南极海冰整体呈小幅度下降趋势, 下降率为 0.52%, 年平均海冰面积为  $12.68 \times 10^6 \text{ km}^2$ 。北极海冰整体呈下降趋势, 下降率为 5%, 年平均海冰面积为  $10.36 \times 10^6 \text{ km}^2$ ; 南极海冰面积

- 明显大于北极，两者变化趋势相似，都呈现幅度下降趋势；北极下降幅度远大于南极；南极海冰每年的最大值比北极大，最小值也比北极小（除2012年），说明南极海冰变化更加剧烈，夏季融化了更多的海冰，冬季生成的海冰也更多。
- (2) 虽然南极海冰总量远大于北极，但是北极多年冰的面积大于南极；北极多年冰的下降趋势大于南极，同时北极多年冰出现多次突变，而南极多年冰变化平稳；南极的一年冰总量大于北极，两者都有上升趋势，而北极上升幅度更大；整体海冰下降，多年冰减少而一年冰增加，表明南极、北极海冰有从多年冰向一年冰转化的趋势。
- (3) 南极多年冰主要分布在威德尔海，稳定存在区域占多年冰面积的60%。南极以一年冰为主，一年冰稳定存在区域占一年冰总面积的80.1%；北极多年冰主要存在于北冰洋中心区域，相比南极，北极多年冰稳定存在的区域较少，仅占35.06%。北极一年冰主要分布在多年冰外围和大陆沿岸，稳定区域占一年冰总面积的48.5%。

## 参考文献

- [1] 董兆乾, 梁湘三. 南极海冰、冰穴和冰川冰及其对水团形成和变形的作用 [J]. 南极研究, 1993, 5 (03): 1-14.
- [2] 沈校熠, 柯长青, 张杰. 2002-2011年南极海冰变化的遥感分析 [J]. 极地研究, 2017, 29 (01): 163-171.
- [3] 刘艳霞, 王泽民, 刘婷婷. 1979~2014年南北极海冰变化特征分析 [J]. 遥感信息, 2016, 31 (02): 24-29.
- [4] 马丽娟, 陆龙骅, 卞林根. 南极海冰的时空变化特征 [J]. 极地研究, 2004 (01): 29-37.
- [5] Parkinson C L, Cavalieri D J. Arctic sea ice extents, areas, and trends, 1978-1996 [J]. Journal of geophysical research, 1999, 104 (C9): 20837-20856.
- [6] Cavalieri D J, Parkinson C L, Vinnikov K Y. 30-Year satellite record reveals contrasting Arctic and Antarctic decadal sea ice variability [J]. Geophysical Research Letters, 2003, 30 (18): CRY 4-1-4-3.
- [7] Fowler C, Emery W J, Maslanik J. Satellite-derived evolution of Arctic sea ice age: October 1978 to March 2003 [J]. IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters, 2004, 1 (2): 71-74.
- [8] Cavalieri D J, Parkinson C L. Antarctic sea ice variability and trends, 1979-2006 [J]. Journal of geophysical research, 2008, 113: C07004.
- [9] Comiso J C, Parkinson C L. Accelerated decline in the Arctic sea ice cover [J]. Geophysical research letters, 2008, 35: L01703.
- [10] Comiso J C. Large Decadal Decline of the Arctic Multiyear Ice Cover [J]. Journal of Climate, 2011, 25 (4): 1176-1193.
- [11] 张辛, 周春霞, 鄂栋臣, 等. MODIS 多波段数据对南极海冰变化的监测研究 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2014, 39 (10): 1194-1198.
- [12] 张雷, 徐宾, 师春香, 周自江, 任国玉. 基于卫星气候资料的1989-2015年南北极海冰面积变化分析 [J]. 冰川冻土, 2017, 39 (06): 1163-1171.
- [13] 王星东, 李新武, 梁雷. 南极冰盖冻融的时空分析 [J]. 中国环境科学, 2014, 34 (05): 1303-1309.
- [14] Heinrichs J F, Cavalieri D J, Markus T. Assessment of the AMSR-E Sea Ice-Concentration product at the ice edge using RADARSAT-1 and MODIS imagery [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44 (11): 3070-3080.
- [15] 王欢欢. 利用遥感卫星AMSR-E89 GHz频段的数据反演北极多年冰密集度 [D]. 中国海洋大学, 2009.
- [16] Konrad Steffen, Axel Schweiger. NASA team algorithm for sea ice concentration retrieval from Defense Meteorological Satellite Program special sensor microwave imager: Comparison with Landsat satellite imagery [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1991, 96 (C12): 21971-21987.