

## 1989—2018年南极布兰斯菲尔德海峡海冰时空变化分析

卓梦婷, 胡松, 朱国平

### Spatial-temporal variation of sea ice in the Bransfield Strait, Antarctica from 1989 to 2018

ZHUO Mengting, HU Song, ZHU Guoping

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12024/jsou.20201003194>

#### 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

#### 采用声学方法研究2016年秋季布兰斯菲尔德海峡南极磷虾群昼夜垂直移动特征及其影响因素

Diel vertical migration of Antarctic krill (*Euphausia superba*) swarm in the Bransfield Strait during austral autumn 2016 inferred from acoustic data and its relations to environmental factors

水产学报. 2018, 42(10): 1541 <https://doi.org/10.11964/jfc.20170810919>

#### 1989—2010年广东沿海牡蛎体内锌的时空分布特征与污染水平分析

Spatial-temporal characters and pollution level of Zn in oysters from Guangdong coastal areas from 1989 to 2010

水产学报. 2011, 35(8): 1217 <https://doi.org/10.3724/SP.J.1231.2011.17348>

#### 基于点模式模型的南极半岛北部南极磷虾渔场的时空变动

Spatial-temporal variation on *Euphausia superba* fishing ground in the northern Antarctic Peninsula based on point pattern model

水产学报. 2018, 42(3): 356 <https://doi.org/10.11964/jfc.20161110607>

#### 2001—2002年间南极埃默里冰架水的空间分布与季节变化

Spatial distribution and seasonal variation of ice shelf water between 2001 and 2002 at Amery Ice Shelf, Antarctica

上海海洋大学学报. 2016, 25(5): 753 <https://doi.org/10.12024/jsou.20151201622>

#### 2017年冬季斯科舍海南极磷虾种群结构变动研究

Variation in population structure of Antarctic krill (*Euphausia superba*) in Scotia Sea in winter 2017

上海海洋大学学报. 2019, 28(6): 953 <https://doi.org/10.12024/jsou.20190302561>

#### 南极海冰变动对西南大西洋阿根廷滑柔鱼资源丰度及空间分布的影响

Influence of Antarctic sea ice variation on abundance and spatial distribution of Argentine shortfin squid *Illex argentinus* in the southwest Atlantic Ocean

水产学报. 2021, 45(2): 187 <https://doi.org/10.11964/jfc.20191112074>

文章编号: 1674-5566(2021)06-1113-10

DOI:10.12024/jsou.20201003194

## 1989—2018 年南极布兰斯菲尔德海峡海冰时空变化分析

卓梦婷<sup>1</sup>, 胡松<sup>1,2</sup>, 朱国平<sup>1,3,4,5</sup>

(1. 上海海洋大学 海洋科学学院, 上海 201306; 2. 上海海洋大学 海洋科学与技术实验教学示范中心, 上海 201306; 3. 上海海洋大学 极地研究中心, 上海 201306; 4. 大洋渔业资源可持续开发教育部重点实验室极地海洋生态系统研究室, 上海 201306; 5. 国家远洋渔业工程技术研究中心, 上海 201306)

**摘要:** 基于 1989—2018 年美国冰雪中心海冰密集度数据, 分析近 30 年南极布兰斯菲尔德海峡及附近海域海冰分布规律及变化趋势。结果表明, 布兰斯菲尔德海峡内部海冰属于 1 年冰, 海冰密集度于 2 月达到最低, 8 月达到最高, 历史上强厄尔尼诺年份与该区域海冰密集度较低的年份存在明显对应关系。对 30 年冰情线性拟合得到年际变化趋势, 海峡内结冰月份普遍延迟, 年结冰月数以减少为主。3 个代表站点的海冰密集度分析结果显示, 海峡内 A 站点海冰变化与海峡口外北部海域 B 站点的相关性较强, 与海峡口外南部靠近威德尔海区域 C 站点的相关性弱。循环神经网络模型可用于预测和分析海冰密集度的时序变化, 尤其是适合海冰密集度相对较低的时序分析。

**关键词:** 海冰密集度; 布兰斯菲尔德海峡; 南极; 全球变化; 循环神经网络; ENSO

**中图分类号:** P 728.2      **文献标志码:** A

过去 30 年来, 全球变暖备受关注, 南极经历了每十年  $(0.61 \pm 0.34)^\circ\text{C}$  的变暖, 是全球平均水平的 3 倍多<sup>[1]</sup>。作为全球巨大的冰库, 南极海冰生消影响着全球气候<sup>[2]</sup>。南极半岛周边水域, 海洋、气象、冰川及生物状况等也正在发生剧烈变化, 是海洋学研究关注的热点区域<sup>[3]</sup>。

对于南极海冰, 较多研究<sup>[4-6]</sup>均表明, 南极海冰存在着明显的季节变化, 且融冰速度远大于结冰速度<sup>[7]</sup>。与北极海冰明显变少不同, 南极海冰对全球变暖的响应较为复杂但不如北极显著。有针对南极海冰变化趋势的研究<sup>[7]</sup>显示, 1973—2002 年南极海冰面积呈增加趋势。但柯长青等<sup>[8]</sup>发现, 1992—2008 年南极海冰面积整体呈上下等幅度波动且呈不显著的微弱增加。同时, COMISO 等<sup>[9]</sup>发现, 南极海冰范围一直处于缓慢增加状态, 并于 2014 年 9 月达到 1978—2015 年间海冰范围的最高水平, 首次超过  $2 \times 10^7 \text{ km}^2$ 。王星东等<sup>[10]</sup>进一步分析不同类型海冰的变化趋势, 发现 1997—2017 年南极地区多年冰呈减少趋

势, 而一年冰呈增加趋势; 且 2015—2017 年整体海冰、多年冰和一年冰的面积大幅度减少。

上述研究多以整个南极作为研究区域分析海冰变化, 但实际上南极海冰的变化还存在着极强的区域差异性。从影响因素的角度上看, 陈静等<sup>[11]</sup>发现, 各气候变化因子对于南极 5 个海域海冰的影响情况不同。从南极海冰的分布情况上看, 马丽娟等<sup>[5]</sup>研究表明, 南极海冰的区域性差异较大, 其中南极半岛和罗斯海地区存在明显的振荡特征。同时, 柯长青等<sup>[8]</sup>发现, 西南极分布的海冰多于东南极; 海冰密集度高值区集中在威德尔海和罗斯海, 其多年平均海冰密集度处于 80% 以上。从南极海冰的变化趋势上看, 陈锦年等<sup>[12]</sup>通过分析, 证明了南极不同经度的海冰存在不同的变化特征。MATEAR 等<sup>[13]</sup>和 STAMMERJOHN 等<sup>[14]</sup>研究发现, 南极半岛西部和别林斯高晋海南部的海冰密集度和海冰持续时间减少, 而罗斯海和阿蒙森海则有所增加。STAMMERJOHN 等<sup>[15]</sup>研究表明, 南极海冰的区域

收稿日期: 2020-10-15      修回日期: 2021-03-17

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC1406801); 国家自然科学基金(41776185)

作者简介: 卓梦婷(1999—), 女, 研究方向为海洋科学。E-mail: mtzhuo@163.com

通信作者: 胡松, E-mail: shu@shou.edu.cn

性还会导致南极不同海区海冰的结冰和融冰趋势存在较大差异,夏季无冰期延长和缩短的趋势不同。

在南极半岛区域,南极海冰的变化十分明显,且显著影响着当地的理化环境以及生态系统结构,尤其是影响南极海洋生态系统中的关键物种——南极磷虾(*Euphausia superba*,以下简称磷虾)的种群结构。南极半岛区域是磷虾资源的主要分布区,同时也是我国磷虾渔业的主要作业区域<sup>[16]</sup>。布兰斯菲尔德海峡磷虾资源较为丰富,近年来已成为磷虾渔业的中心渔场。王碧雪等<sup>[17]</sup>研究表明,斯科舍海磷虾的种群结构多变,而这种变化可能与海冰等理化要素有关。较多研究表明<sup>[18-22]</sup>,海冰为磷虾提供了必要的栖息地和索饵场,并由此影响着磷虾的时空分布。因此,厘清布兰斯菲尔德海峡周边区域的海冰变化及趋势对探明磷虾资源变动具有重要的科学意义,研究海冰变化的精准预报也具有重要的作用经济意义。

南极海冰面积总体缓慢增加,但布兰斯菲尔德海峡内部海冰面积的变化趋势,其趋势在时间与厄尔尼诺-南方涛动(El Niño-Southern Oscillation, ENSO)的关系,以及在空间上与附近海域的关联等还需进一步研究。此外,深度学习处理大数据的优势在冰情预报的应用具有较大的前景。基于这些学者关注的问题,研究重点聚焦分析布兰斯菲尔德海峡周边区域的冰情特征,特别是近30年来的海冰分布规律以及变化趋势,并尝试运用循环神经网络对海冰密集度进行模拟预测和比较。

## 1 材料与方法

### 1.1 数据

研究区域为布兰斯菲尔德海峡周边区域,范围为 $50^{\circ}\text{S} \sim 70^{\circ}\text{S}$ 和 $30^{\circ}\text{W} \sim 80^{\circ}\text{W}$ (图1)。为便于描述,选取3个南极磷虾较为丰富的站点,分别命名为海峡内A站点( $63^{\circ}03'\text{S}$ ,  $60^{\circ}31'\text{W}$ )、海峡北部B站点( $60^{\circ}56'\text{S}$ ,  $55^{\circ}08'\text{W}$ )和海峡南部C站点( $63^{\circ}00'\text{S}$ ,  $52^{\circ}30'\text{W}$ )。站点A处于布兰斯菲尔德海峡西侧,该区域主要由从别林斯高晋海流入的海水以及从南设得兰群岛北侧进入的海水控制,水温相对较高,盐度较低;站点B处于南设得兰群岛与象岛之间,主要受西向的南极陆坡

流以及由威德尔海进入的威德尔海陆坡流影响;站点C则处于布兰斯菲尔德海峡东侧,靠近威德尔海西北侧,此处主要由低温的威德尔海水控制。因此,这3个磷虾站点基本上代表了布兰斯菲尔德海峡的海洋物理环境,由此也可通过这3个站点海冰的变化进一步了解布兰斯菲尔德海峡海冰的变化。

研究区域及3个站点的海冰密集度数据均来自美国国家冰雪中心<sup>[23]</sup>(NSIDC, <https://nsidc.org/data/G02202/versions/3>),该数据集提供了根据美国国家海洋与大气管理局(NOAA)气候数据记录(CDR)程序标准<sup>[24]</sup>得出的无源微波海冰密集度估算值。本文使用1989—2018年南极每月海冰密集度数据,空间分辨率为25 km,时间分辨率为月。海冰密集度为海冰面积占网格总面积的百分比,取值为0~1。采用国内外研究者广泛采用的0.15海冰密集度值作为临界值区分有冰区和无冰区<sup>[25]</sup>。

ENSO现象以海洋尼诺指数(oceanic niño index, ONI)衡量,数据来源于NOAA气候预测中心(CPC, [https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ONI\\_v5.php](https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php)),以太平洋Niño 3.4区( $5^{\circ}\text{N} \sim 5^{\circ}\text{S}$ ,  $120^{\circ}\text{W} \sim 170^{\circ}\text{W}$ )海表面温度异常的3个月平均值表征<sup>[26]</sup>。ONI的时间序列与海冰密集度的时间序列相同,为1989—2018年。

### 1.2 数据处理

#### 1.2.1 月份定义

由于南极海冰结冰融冰的季节性,以公历2月为统计中各年的第一个月,以次年1月为统计中的最后一个月。结冰起始月份定义为一年中首次结冰的月份,即每年2月至次年1月中首个海冰密集度大于或等于0.15的月份。年结冰月数定义为一年中存在海冰的月份个数,即每年2月至次年1月中海冰密集度大于或等于0.15的总月份数。

#### 1.2.2 分析方法

采用Pearson相关性分析<sup>[27]</sup>对A、B、C3个站点进行两两相关性分析( $P < 0.01$ ),采用MATLAB trend函数<sup>[28]</sup>对数据进行趋势分析,该函数采用线性最小二乘法。提取拟合斜率作为多年增减趋势,对1989—2018年海冰结冰起始月份、年结冰月数进行多年趋势分析。为保证趋势

分析的准确性,对海冰结冰起始月份的趋势进行分析,剔除存在全年无冰现象的区域。

循环神经网络 (recurrent neural network, RNN) 具有强大的非线性拟合和时间记忆能力,从训练数据中提取信息的能力较强,能够较好地对时间序列进行预测<sup>[29-30]</sup>。运用 1989—2018 年

共 360 个月的海冰密集度数据,随机挑选 2/3 样本作为训练样本,剩下 1/3 的样本作为预测样本,对 3 个站点的海冰密集度进行模拟预测。采用均方根误差 (mean square error, MSE) 作为评定预测结果优劣的标准。

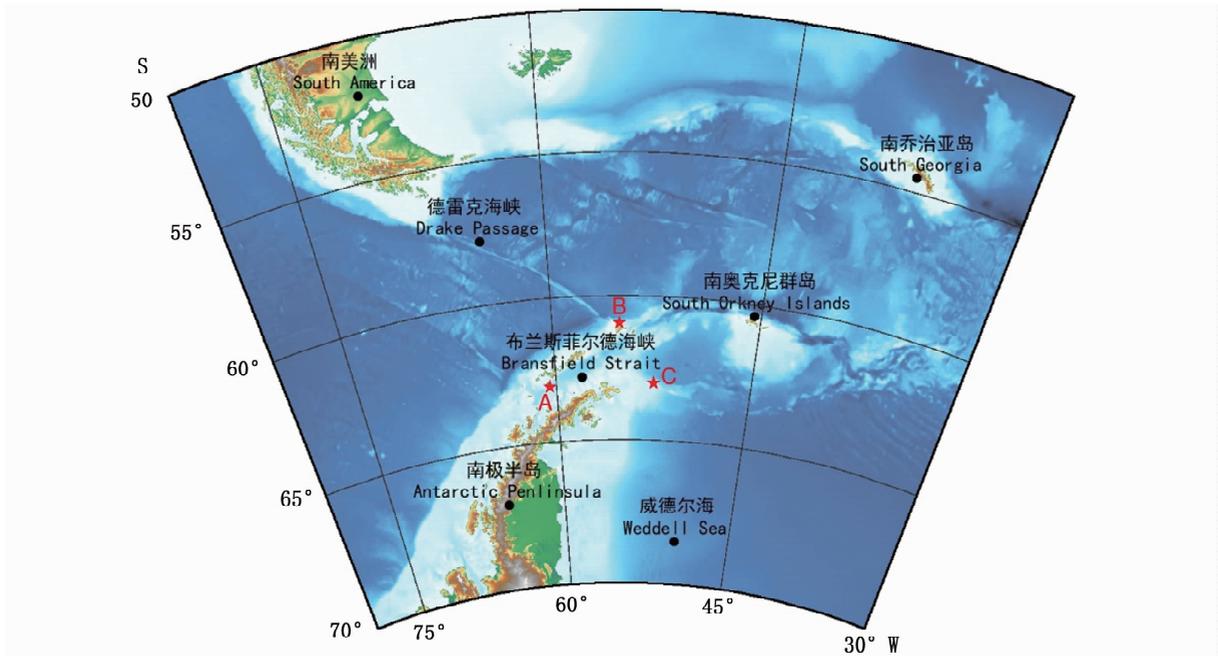


图 1 研究区域及站点分布图

Fig. 1 Map of the study area and stations

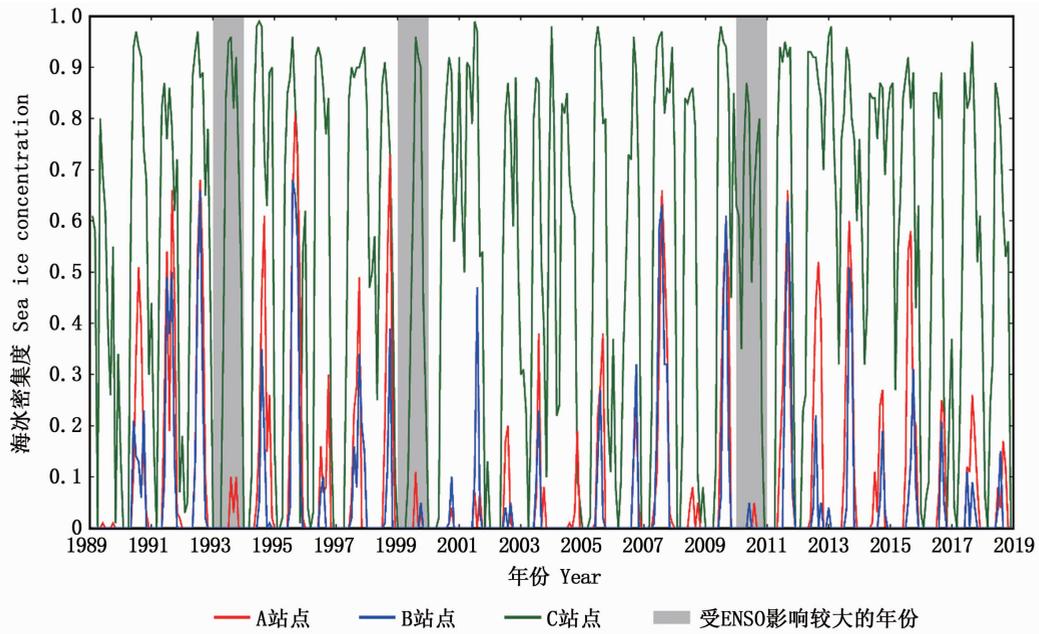
## 2 结果

### 2.1 海冰时间序列分析

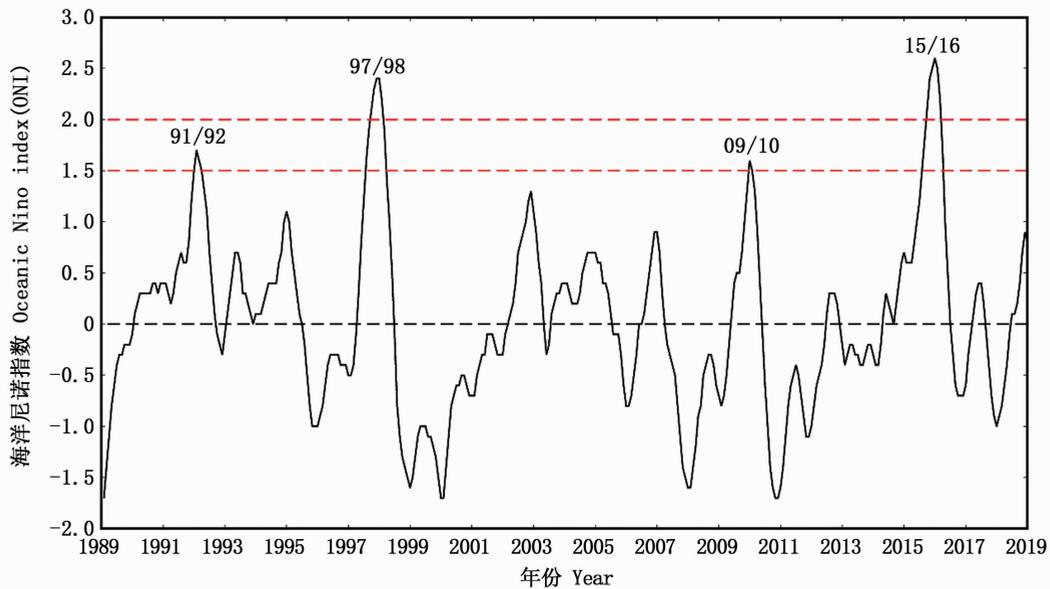
由时间序列图(图 2a)可以明显看出,海峡内部和海峡口外北侧(A、B 站点)海冰密集度年际变化较一致,相关性较强。采用 Pearson 相关性分析方法,对 A、B、C 3 个站点进行两两相关性分析,得到 A、B 站点的相关系数为 0.80, B、C 站点的相关系数为 0.37, A、C 站点的相关系数为 0.42,且均能满足  $P < 0.01$  的显著性水平检验。因此, A、B 站点两者间关系非常密切,呈正相关,且显著性水平较高,具有高度统计学意义。整体上看, A 站点和 B 站点海冰密集度重叠度高,趋势线的上升及下降的时间点一致。这两个站点在 1989 年时,月海冰密集度均接近 0,在 1995 年时,月海冰密集度均达到 30 年的最高水平。总体上, B 站点海冰密集度平均水平较低,海冰密集

度基本上均低于 A 站点。A、B 站点与 C 站点(海峡口外南侧)之间的相关性比较差, C 站点的海冰密集度变化趋势较 A 站点和 B 站点差别较大。近几年, C 站点海冰密集度较高,处于高冰期,海冰密集度基本均在 0.8 以上。通过时间序列图可以发现, A、B、C 这 3 个站点的海冰为一年冰。A、B 站点存在 4 个特殊年份,分别为 1993、1999、2008 和 2010 年。在这 4 个年份, A、B 站点的海冰密集度均在 0.1 以下, B 站点基本不结冰,为 30 年内海冰密集度最低的年份。对照 1989—2018 年 ONI 变化(图 2b)可知,除了 2008 年外,其余 3 个年份(图 2a 阴影区域)均处于厄尔尼诺现象显著的年份之后一年左右,符合海冰对厄尔尼诺现象的滞后反应时间。尤其值得一提的是, 2015—2016 年也发生了显著的强厄尔尼诺现象, ONI 指数最高,但 A、B 站点却未出现完全无冰的情况,说明该区域的水团结构或海气作用极有可

能在多年持续融冰后发生拐点改变,海冰对 ENSO 的响应发生了变化,这点仍需进一步研究。



(a)海水密集度 Sea ice concentration



(b)海洋尼诺指数 ONI

图中阴影区域表示受 ENSO 影响较大的年份。

The shaded areas in the figure represent the years that were greatly affected by ENSO.

图 2 1989—2018 年布兰斯菲尔德海峡内 3 个站点海冰密集度时间序列图及 ONI 时序变化  
Fig. 2 Time series of sea ice concentration at three stations in the Bransfield Strait and temporal variation in ONI from 1989 to 2018

### 2.2 海冰分布规律及变化趋势分析

#### 2.2.1 海冰年际分布规律

1989—2018 年总体上海冰分布在 60°S 以南,由南向北逐渐减少,东侧海冰密集度高(图 3)。30 年内总体平均海冰范围界线由 65°S 开始,最北至 57°S 附近。界线中间穿过布兰斯菲尔德海峡,并涵盖南奥克尼群岛。在平均水平上,布兰斯菲尔德海峡处于海冰变化的边界区域,总体上海冰密集度较低。海冰密集度最低的月份发生在 2002 年 2 月,冰缘线(图 3 绿线)在南极半岛西侧贴近南极半岛岸线。海冰密集度最高的月份发生在 1995 年 8 月,冰缘线曲折分布(图 3 红线),并于 45°W ~ 65°W 范围内总体向北突出。

以月为单位,统计 1989—2018 年布兰斯菲尔德海峡区域年平均海冰结冰月数和 30 年内有结冰的年数(图 4)。海冰结冰时长由南向北逐渐由 12 个月缩短至 0 个月。平均海冰密集度等值线与平均海冰结冰时长等值线分布规律大致对应,且前者较后者更为平滑。其中,多年平均冰缘线与 2、3 个月的结冰维持时长边界线弯曲程度一致,平均冰缘线较边界线靠南,由此可以推断,结冰区域年平均结冰时长基本处于 3 个月以上。30

年结冰年数由南向北逐渐由 30 年减少至 0 年。超过 3 年不结冰的区域均处于平均冰缘线北侧,结冰年数变化较大的区域纬度处于 55°S 至 65°S 附近。可以发现,布兰斯菲尔德海峡的海冰结冰时长为每年 2 ~ 6 个月左右,30 年内有结冰的年数处于 24 ~ 30 年之间。

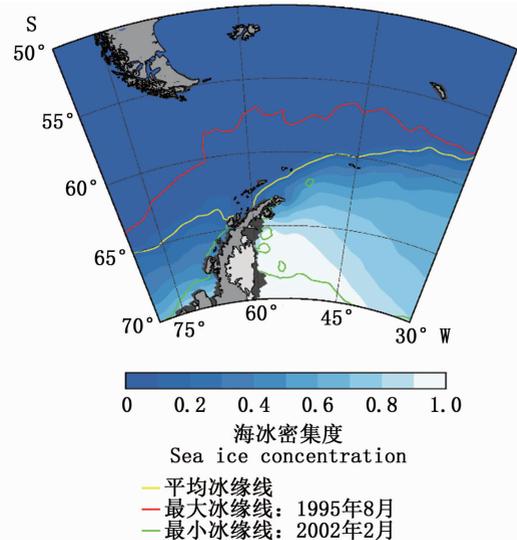


图 3 1989—2018 年平均海冰密集度分布及冰缘线  
Fig. 3 Distribution of average sea ice concentration and ice marginal line from 1989 to 2018

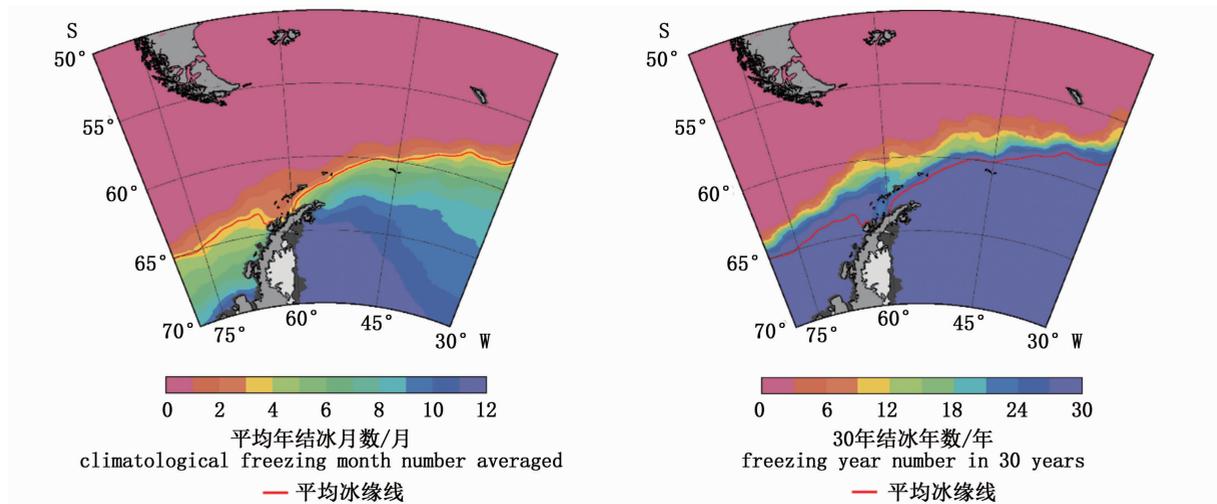


图 4 1989—2018 年平均年结冰月数和 30 年结冰年数空间分布  
Fig. 4 The spatial distribution of climatological freezing month number averaged from 1989 to 2018 and freezing year number in 30 years

#### 2.2.2 海冰季节分布规律

研究区域的海冰密集度,2 月达到最低,8 月达到最高(图 5)。2—3 月,研究区域海冰密集度比较低,南极半岛西侧 3 条冰缘线基本贴近岸

线,海冰的范围较小;海冰密集度在 7—9 月维持在比较高的水平,在这 3 个月中最大冰缘线存在一定的变化,7 月最大冰缘线偏向东侧,而 8、9 月最大冰缘线最北的区域主要集中在中间经度部分。

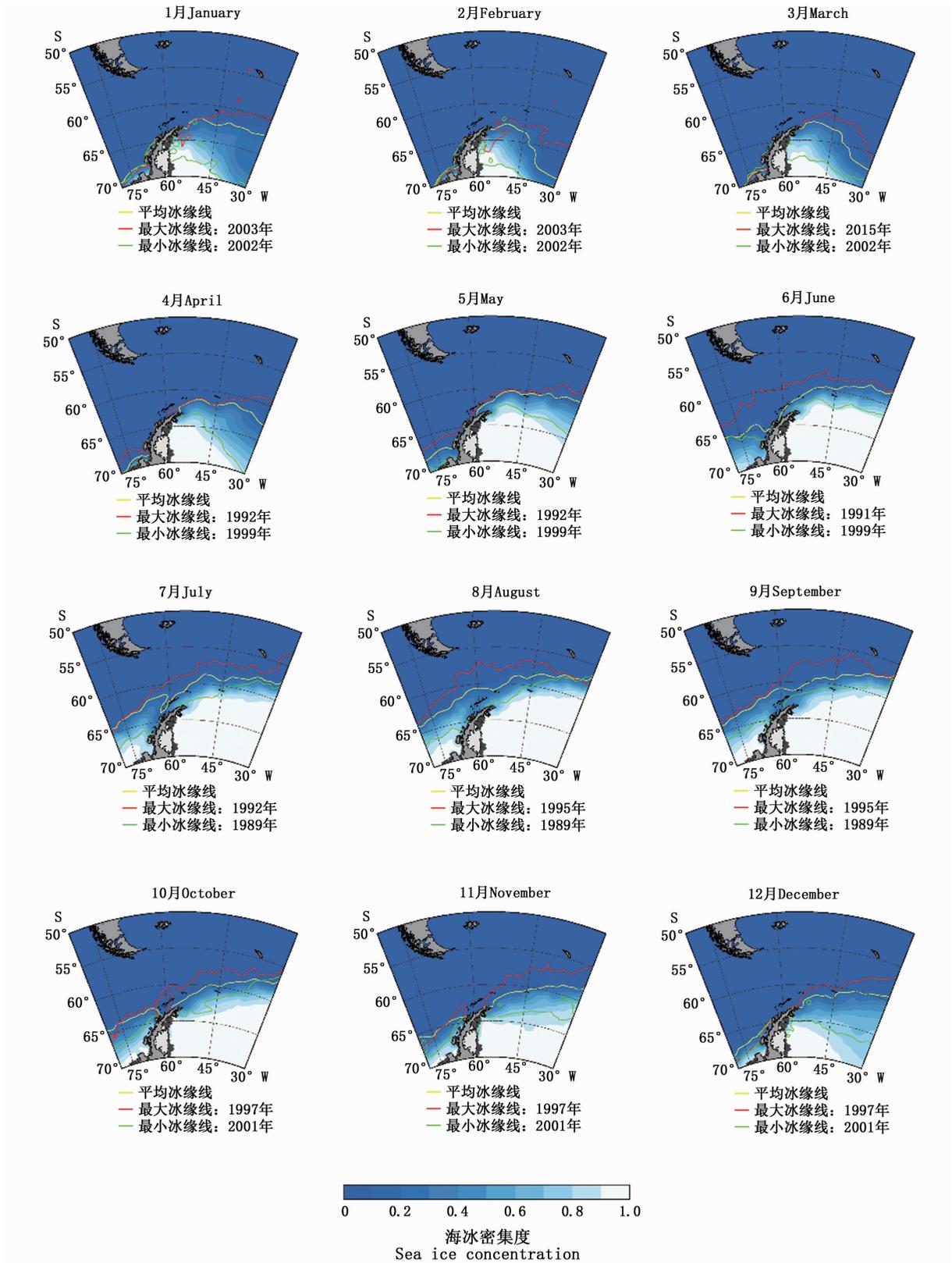


图5 1989—2018年每月平均海冰密集度图

Fig. 5 Monthly distribution of mean sea ice concentration and ice marginal line from 1989 to 2018

### 2.2.3 海冰变化趋势

图 6a 为结冰起始月份变化趋势图,趋势值正值越大,说明结冰延迟的趋势越显著,负值越小,说明结冰提前的趋势越明显。布兰斯菲尔德海峡区域的结冰起始月份趋势值处于 -0.05 到 0.05 月/年之间,南极半岛西侧区域以延迟为主,南极半岛东侧区域以提前为主。在南极半岛东侧 45°W ~ 60°W,60°S ~ 65°S 之间,存在两个结冰提前最为显著的大范围区域,趋势值在 -0.03 月/年以下。研究区域结冰延迟最为显著的区域在南极半岛西侧偏南的位置,存在两个小的区域,趋势值达到 0.04 月/年以上。而这两个小区域周围区域的延迟情况也比较明显。

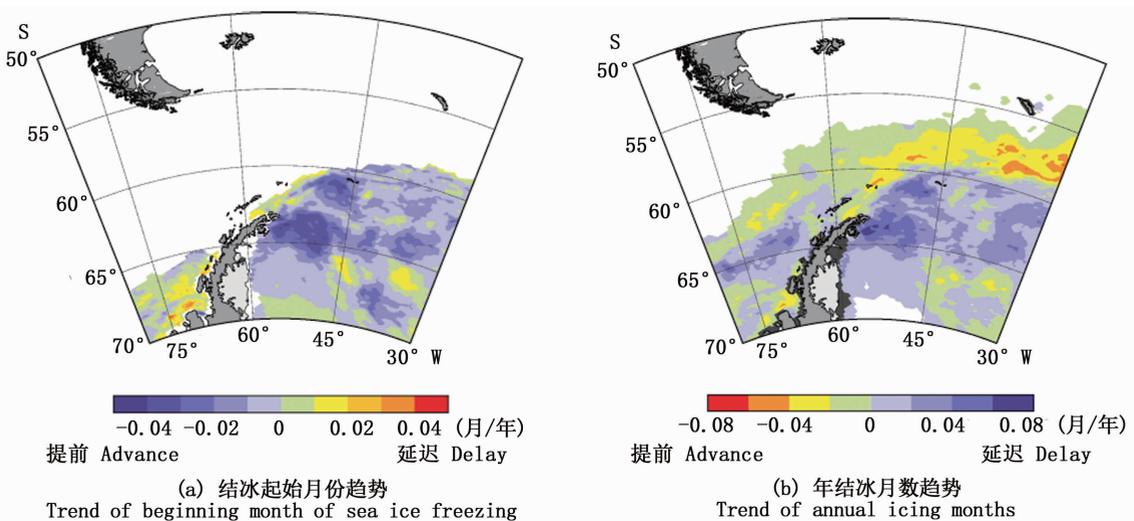
图 6b 为年结冰月数变化趋势图:趋势值正值越大,说明海冰年结冰月数增加的趋势越显著,负值越小,说明年结冰月数减少的趋势越明显。与结冰起始月份趋势图不一样的是,白色区域表示海冰年结冰月数多年无增减趋势,即海冰年结冰月数在 30 年内不变的区域。布兰斯菲尔德海峡区域的趋势值处于 -0.08 到 0.08 月/年之间,总体上大部分趋势值均处于 -0.04 到 0.04 月/年之间。在 60°S 以北区域基本上是海冰年结冰月数减少的区域,在南极半岛左右两侧的绝大部分区域海冰年结冰月数增加。布兰斯菲尔德海峡区域海冰年结冰月数增加最显著的区域,在南极半岛最北部的东侧,大致为 50°W ~ 55°W,

63°S ~ 65°S 区域,趋势值处于 0.04 ~ 0.08 月/年之间,向四周逐渐减小。

1989—2018 年南极半岛研究区域的结冰时间变化在 1.5 个月之内,海冰年结冰月数变化在 2.4 个月之内。结合两幅趋势图与平均海冰密集度图可以发现,各个趋势与海冰分布有一定的相关性。海冰结冰起始月份趋势值越小,海冰年结冰月数趋势值越大,则越有利于海冰的生长。南极半岛东侧 60°S 以南的海冰结冰起始月份为提前趋势,且年结冰月数为增加趋势,均有利于海冰的生长;南极半岛西侧海冰结冰起始月份基本上为延迟趋势,而部分区域年结冰月数却有所增加。对布兰斯菲尔德海峡区域的结冰趋势分析可以发现,海峡结冰起始月份普遍延迟,年结冰月数以减少为主。

### 2.3 海冰预测分析

由图 7 可以看出,RNN 模型的预测结果与实际海冰密集度的趋势基本相同,对于中间部分的数据能够较好地进行预测,数值较为接近,能够正确反映处于中间部分海冰密集度数据的特征,具有较好的预测精度。然而,对于处于较高水平和较低水平的海冰密集度数据,预测精度比较低。对于较高海冰密集度数据的预测,预测结果偏低;对于较低海冰密集度数据的预测,预测结果偏高。



白色区域:a. 存在不结冰现象的区域;b. 海冰年结冰月数在 30 年内不变的区域。  
White area: a. the area where no ice occurs; b. the area where annual icing months remain constant within 30 years.

图 6 1989—2018 年结冰起始月份和年结冰月数变化趋势图

Fig. 6 Trend of beginning month of sea ice freezing and annual icing months from 1989 to 2018

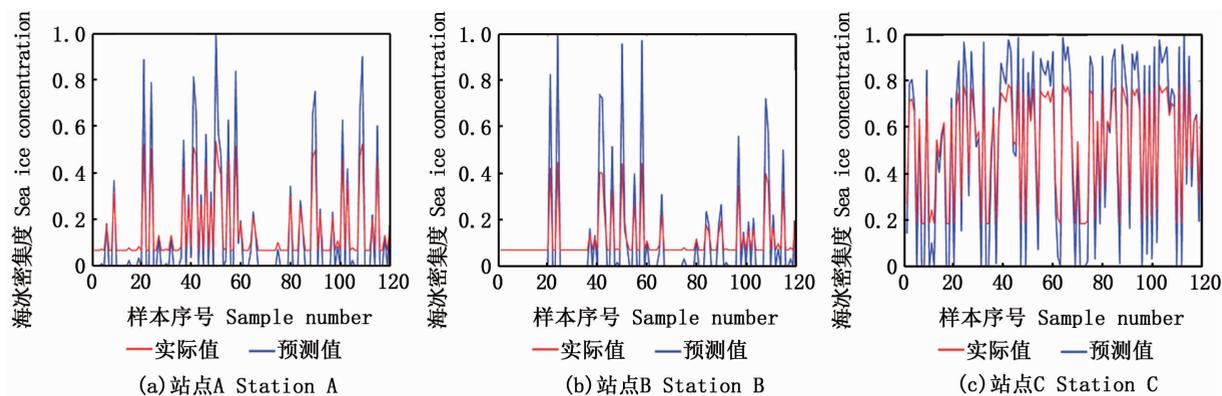


图7 观察与预测的1989—2018年布兰斯菲尔德海峡各站点海冰密集度时间序图

Fig. 7 Time series of observed and predicted sea ice concentrations for stations in the Bransfield Strait from 1989 to 2018

由表1可知,A、B、C这3个站点训练样本的MSE值分别为0.036、0.033、0.075,预测样本的MSE值分别为0.031、0.025、0.101,结果说明RNN模型可有效地预测海冰密集度的变化趋势。由MSE值可知,A、B站点海冰密集度的预测比C站点更为准确,预测精度更高。因此,可以认为该区域RNN模型更适用于对低海冰密集度区域进行预测分析。

表1 循环神经网络(RNN)模拟的1989—2018年各站点海冰密集度时间序列均方根误差(MSE)

Tab. 1 The MSE values produced by RNN simulation for time series of sea ice concentration at stations from 1989 to 2018

站点 Station	训练样本 Training sample	预测样本 Predicted sample
A	0.036	0.031
B	0.033	0.025
C	0.075	0.101

### 3 结论与展望

布兰斯菲尔德海峡A、B、C这3个站点的海冰为1年冰。与王星东等<sup>[10]</sup>关于一年冰的空间变化研究一致,这3个站点处于一年冰的稳定区域。对3个站点的时间序列图进行相关性分析,可以发现,A、B两个站点的相关性非常强,C站点的海冰密集度变化与A、B站点相关性不强。

历史上强厄尔尼诺年份与海峡内部处于低冰的年份存在着明显的对应关系,除了2008年外,其余3个年份(1993、1999和2010年)均处于厄尔尼诺现象显著的年份之后一年左右,符合海

冰对厄尔尼诺现象的滞后反应时间,也与陈锦年等<sup>[12]</sup>的结论一致,初步说明南极海冰变化与ENSO存在一定联系。ONI指数最强的2015—2016年之后却未发生显著的低冰情况,说明该区域的水团结构或海气作用可能在多年持续融冰后发生拐点改变,这点仍需进一步研究。

以往研究<sup>[4,7,11]</sup>显示,整个南极区域的海冰2月最少,9月海冰密集度最高。本文研究区域的海冰密集度,2月达到最低,8月达到最高。海冰密集度最高的月份与以往对整个南极的研究存在着差异,也体现出研究区域海冰的特殊性。30年内,研究区域海冰密集度最低的月份为2002年2月,海冰密集度最高出现在1995年8月。1989—2018年南极半岛研究区域的结冰时间变化在1.5个月之内,海冰年结冰月数变化在2.4个月之内。同时,STAMMERJOHN等<sup>[15]</sup>研究表明,1979—2010年南极半岛区域海冰的融冰时间提前超过1个月,海冰的结冰时间延迟约2个月,导致夏季无冰期延长3个多月,与本文的结论比较一致。对布兰斯菲尔德海峡区域的结冰趋势分析可以发现,海峡内部结冰月份普遍延迟,年结冰月数以减少为主。

RNN模型可以对海冰密集度进行初步预测分析,且更适用于预测低海冰密集度的变化趋势。未来的研究,可以将RNN模型作为预测海冰密集度的新思路,进一步考虑多种因素,更加准确地对海冰密集度进行变化趋势预测。

### 参考文献:

- [1] CLEM K R, FOGT R L, TURNER J, et al. Record warming at the South Pole during the past three decades[J]. Nature

- Climate Change, 2020, 10(8): 762-770.
- [2] RAFFERTY J P. Glaciers, sea ice, and ice formation[M]. New York: Britannica Educational Publishing, 2011: 177.
- [3] VAUGHAN D G, MARSHALL G J, CONNOLLEY W M, et al. Recent rapid regional climate warming on the Antarctic Peninsula[J]. Climatic Change, 2003, 60(3): 243-274.
- [4] 解思梅,郝春江,钱平,等. 南极海冰变化特征初探[J]. 南极研究, 1993, 5(2): 57-62.  
XIE S M, HAO C J, QIAN P, et al. A preliminary study on the variation features of the Antarctic sea ice[J]. Antarctic Research, 1993, 5(2): 57-62.
- [5] 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, 16(1): 29-37.  
MA L J, LU L H, BIAN L G. Spatio-temporal character of Antarctic sea ice variation [J]. Chinese Journal of Polar Research, 2004, 16(1): 29-37.
- [6] 康建成,唐述林,刘雷保. 南极海冰与气候[J]. 地球科学进展, 2005, 20(7): 786-793.  
KANG J C, TANG S L, LIU L B. Antarctic sea ice and climate[J]. Advances in Earth Science, 2005, 20(7): 786-793.
- [7] 卞林根,林学椿. 近 30 年南极海冰的变化特征[J]. 极地研究, 2005, 17(4): 233-244.  
BIAN L G, LIN X C. Variation of Antarctic sea ice in the latest 30 years [J]. Chinese Journal of Polar Research, 2005, 17(4): 233-244.
- [8] 柯长青,金鑫,沈校熠,等. 南北极海冰变化及其影响因素的对比分析[J]. 极地研究, 2020, 32(1): 1-12.  
KE C Q, JIN X, SHEN X Y, et al. Comparison of Antarctic and Arctic sea ice variations and their impact factors [J]. Chinese Journal of Polar Research, 2020, 32(1): 1-12.
- [9] COMISO J C, GERSTEN R A, STOCK L V, et al. Positive trend in the Antarctic sea ice cover and associated changes in surface temperature[J]. Journal of Climate, 2017, 30(6): 2251-2267.
- [10] 王星东,代文浩. 基于 1997-2017 年遥感数据的南极海冰时空变化分析[J]. 海洋预报, 2020, 37(3): 91-97.  
WANG X D, DAI W H. Analysis of temporal and spatial changes of Antarctic sea ice based on remote sensing data from 1997 to 2017[J]. Marine Forecasts, 2020, 37(3): 91-97.
- [11] 陈静,陆志波. 1979-2013 年南大洋海冰变化特征及与典型气候变化因子相关性分析[J]. 极地研究, 2016, 28(4): 539-547.  
CHEN J, LU Z B. Variation of sea ice in the Southern Ocean and analysis of its correlation with typical climate change factors during 1979-2013 [J]. Chinese Journal of Polar Research, 2016, 28(4): 539-547.
- [12] 陈锦年,褚健婷,许兰英. ENSO 循环过程与南极海冰变化[J]. 水科学进展, 2004, 15(1): 56-60.  
CHEN J N, CHU J T, XU L Y. ENSO events associated with the variation of the Antarctic sea ice extent[J]. Advances in Water Science, 2004, 15(1): 56-60.
- [13] MATEAR R J, O'KANE T J, RISBEY J S, et al. Sources of heterogeneous variability and trends in Antarctic sea-ice[J]. Nature Communications, 2015, 6: 8656.
- [14] STAMMERJOHN S, MARTINSON D G, SMITH R C, et al. Trends in Antarctic annual sea ice retreat and advance and their relation to El Niño-Southern Oscillation and Southern Annular Mode variability [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2008, 113(C3): C03S90.
- [15] STAMMERJOHN S, MASSOM R, RIND D, et al. Regions of rapid sea ice change: An inter-hemispheric seasonal comparison[J]. Geophysical Research Letters, 2012, 39(6): L06501.
- [16] 薛梅,张海亭,朱国平,等. 2016 年夏秋季南极半岛南极磷虾脂肪酸组成及食性研究[J]. 大连海洋大学学报, 2019, 34(5): 710-717.  
XUE M, ZHANG H T, ZHU G P, et al. Fatty acid composition and feeding habits of Antarctic krill *Euphausia superba* in the South Shetland Islands during summer-autumn in 2016[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2019, 34(5): 710-717.
- [17] 王碧雪,张海亭,朱国平. 2017 年冬季斯科舍海南极磷虾种群结构变动研究[J]. 上海海洋大学学报, 2019, 28(6): 953-960.  
WANG B X, ZHANG H T, ZHU G P. Variation in population structure of Antarctic krill (*Euphausia superba*) in Scotia Sea in winter 2017 [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2019, 28(6): 953-960.
- [18] STEINBERG D K, RUCKELSHAUSEN E, GLEIBER M R, et al. Long-term (1993-2013) changes in macrozooplankton off the Western Antarctic Peninsula[J]. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 2015, 101: 54-70.
- [19] ROSS R M, QUETIN L B, MARTINSON D G, et al. Palmer LTER: Patterns of distribution of five dominant zooplankton species in the epipelagic zone west of the Antarctic Peninsula, 1993-2004 [J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2008, 55(18/19): 2086-2105.
- [20] 丁博,朱国平,张海亭. 2016 年南极斯科舍海南极大磷虾种群结构的时空变化[J]. 应用生态学报, 2018, 29(8): 2763-2770.  
DING B, ZHU G P, ZHANG H T. Spatial-temporal variation in population structure of Antarctic krill (*Euphausia superba*) in the Scotia Sea, Antarctic in 2016 [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(8): 2763-2770.
- [21] 朱国平,李慧婷,李焱,等. 2018 年夏秋季南设得兰群岛周边水域南极磷虾集群类型及其影响因素[J]. 生态学杂志, 2020, 39(4): 1265-1272.  
ZHU G P, LI H T, LI Y, et al. Antarctic krill (*Euphausia superba*) aggregation types and affecting factors around the South Shetland Islands, Antarctic during austral summer-autumn 2018 [J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39

- (4): 1265-1272.
- [22] 朱国平, 杨洋, 王芮, 等. 采用声学方法研究 2016 年秋季布兰斯菲尔德海峡南极磷虾群昼夜垂直移动特征及其影响因素[J]. 水产学报, 2018, 42(10): 1541-1549.  
ZHU G P, YANG Y, WANG R, et al. Diel vertical migration of Antarctic krill (*Euphausia superba*) swarm in the Bransfield Strait during austral autumn 2016 inferred from acoustic data and its relations to environmental factors[J]. Journal of Fisheries of China, 2018, 42(10): 1541-1549.
- [23] MEIER W N, FETTERER F, SAVOIE M, et al. NOAA/NSIDC climate data record of passive microwave sea ice concentration, version 3 [EB/OL]. Boulder, Colorado, USA: National Snow and Ice Data Center, 2017 [2020-06-01]. <https://doi.org/10.7265/N59P2ZTG>.
- [24] National Research Council. Climate data records from environmental satellites; Interim report [M]. Washington, D. C. : National Academies Press, 2004: 150.
- [25] PANGX P, PU J, ZHAO X, et al. Comparison between AMSR2 sea ice concentration products and pseudo-ship observations of the Arctic and Antarctic sea ice edge on cloud-free days [J]. Remote Sensing, 2018, 10(2): 317.
- [26] MEYERSON E A, MAYEWSKI P A, KREUTZ K J, et al. The polar expression of ENSO and sea-ice variability as recorded in a South Pole ice core[J]. Annals of Glaciology, 2002, 35: 430-436.
- [27] 刘浩, 韩晶. MATLAB R2018a 完全自学一本通[M]. 北京: 电子工业出版社, 2018: 253.  
LIU H, HAN J. MATLAB R2018a self study all in one[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2018: 253.
- [28] GREENE C. Trend, MATLAB central file exchange [EB/OL]. [2020-09-02]. <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/46363-trend>.
- [29] 王洪亮, 穆龙新, 时付更, 等. 基于循环神经网络的油田特高含水期产量预测方法[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(5): 1009-1015.  
WANG H L, MU L X, SHI F G, et al. Production prediction at ultra-high water cut stage via recurrent neural network[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(5): 1009-1015.
- [30] 朱贵重, 胡松. 基于 LSTM-RNN 的海水表面温度模型研究[J]. 应用海洋学学报, 2019, 38(2): 191-197.  
ZHU G Z, HU S. Study on sea surface temperature model based on LSTM-RNN[J]. Journal of Applied Oceanography, 2019, 38(2): 191-197.

## Spatial-temporal variation of sea ice in the Bransfield Strait, Antarctica from 1989 to 2018

ZHUO Mengting<sup>1</sup>, HU Song<sup>1,2</sup>, ZHU Guoping<sup>1,3,4,5</sup>

(1. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Experimental Teaching Demonstration Center for Marine Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 3. Center for Polar Research, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 4. Polar Marine Ecosystem Laboratory, Key Laboratory of Sustainable Exploitation of Oceanic Fisheries Resources, Ministry of Education, Shanghai 201306, China; 5. National Engineering Research Center for Oceanic Fisheries, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** Based on the sea ice concentration data from the US National Snow and Ice Data Center, the distribution and trend of sea ice in the Bransfield Strait in recent 30 years are analyzed. The results show that the sea ice in Bransfield Strait is dominated by one-year ice, reaches the lowest in February and reaches the highest in August. There is obvious correlation between the years with low sea ice concentration and the strong El Niño years in the historical years. The trend of sea ice concentration in the Bransfield Strait in recent 30 years shows that the freezing month of sea ice was generally delayed and the sea ice concentration was mainly reduced. The analysis on ice concentration in three typical stations shows, the correlation between the sea ice in Bransfield Strait (Station A) and the sea ice in the north of the Strait mouth (Station B) is strong, while the correlation with the sea ice in the south of Bransfield Strait near the Weddell Sea (Station C) is weak. The recurrent neural network (RNN) model can be used to predict and analyze temporal variation in sea ice concentration, particularly in the years with low ice concentration level.

**Key words:** sea ice concentration; Bransfield Strait; Antarctica; global change; recurrent neural network; ENSO