

https://doi.org/10.3799/dqkx.2024.111



# 南半球中高纬度气旋对南极海冰面积的影响

陈蕾<sup>1,2</sup>, 黄昱<sup>1</sup>, 李双林<sup>1,2,3</sup>, 徐祥德<sup>1,2,4</sup>

1. 中国地质大学(武汉)环境学院, 湖北武汉 430078
2. 中国气象局-中国地质大学(武汉)极端天气气候与水文地质灾害研究中心, 湖北武汉 430078
3. 中国科学院大气物理研究所, 中国科学院气候变化研究中心, 北京 100029
4. 中国气象科学研究院国家灾害天气实验室, 北京 100081

**摘要:** 为研究南半球中高纬度气旋对南极海冰面积的年代际影响, 基于 1979—2022 年每年 9 月的欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 再分析数据, 识别并追踪南半球气旋, 探究中高纬度气旋频数与南极海冰面积之间的相关关系, 分析气旋经过时下方受影响的南极海冰面积变化的时间和空间特征。研究表明, 南半球中高纬度气旋对南极海冰的影响主要集中在南极海冰密集度变动频繁且大多低于 80% 的边缘区。气旋能够显著影响区域海冰密集度的变化, 尤其在海冰边缘线附近, 气旋是此处海冰密集度变化的主要影响因素。与气旋对南极海冰的影响相比, 南极大部分区域的海冰更易受南半球环状模的影响。然而, 在海冰密集度较小的海冰边缘区, 气旋对海冰密集度的影响尤为显著。气旋经过影响到的海冰密集度变化依赖于南极海冰的多寡, 海冰密集度在达到一定高值后继续增加, 会使受气旋影响的海冰密集度增加幅度减小。

**关键词:** 南半球; 中高纬气旋; 南极; 海冰; 气象学。

中图分类号: P447

文章编号: 1000-2383(2025)09-3395-13

收稿日期: 2024-07-29

## Impacts of Mid-High Latitude Cyclones in the Southern Hemisphere on Antarctic Sea Ice Extent

Chen Lei<sup>1,2</sup>, Huang Yu<sup>1</sup>, Li Shuanglin<sup>1,2,3</sup>, Xu Xiangde<sup>1,2,4</sup>

1. School of Environmental Studies, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430078, China
2. CMA-CUG Center for Severe Weather and Climate and Hydro-Geological Hazards, Wuhan 430078, China
3. Climate Change Research Center, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China
4. State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China

**Abstract:** The long-term effects of mid-high latitude cyclones on Antarctic sea ice extent (SIE) were investigated using reanalysis data from European Center for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) for September, spanning from 1979 to 2022. This study examines the correlation between the frequency of mid-high latitude cyclones and SIE, as well as analyzes the spatiotemporal distribution of SIE anomalies caused by cyclones. The results indicate that the mid-high latitude cyclones predominantly influence Antarctic sea ice within the marginal ice zone, where the sea ice concentration (SIC) is less than 80% and exhibits frequent changes across most regions. These findings reveal that SIE is more susceptible to Southern Annular Mode (SAM) than to cyclones in most

**基金项目:** 国家自然科学基金面上项目 (No. 42376250).

**作者简介:** 陈蕾 (1985—), 女, 副教授, 硕士生导师, 长期致力于研究气旋及其对气候系统的影响。ORCID: 0000-0002-1104-9200. E-mail: leichen@cug.edu.cn

**引用格式:** 陈蕾, 黄昱, 李双林, 徐祥德, 2025. 南半球中高纬度气旋对南极海冰面积的影响. 地球科学, 50(9): 3395-3407.

**Citation:** Chen Lei, Huang Yu, Li Shuanglin, Xu Xiangde, 2025. Impacts of Mid-High Latitude Cyclones in the Southern Hemisphere on Antarctic Sea Ice Extent. *Earth Science*, 50(9): 3395-3407.

regions of Antarctica. However, cyclone-induced variations in SIC are significant within the Antarctic marginal ice zone, particularly near the sea ice edges, where cyclones are the primary drivers of SIC fluctuations. The influence of cyclones on SIC variations depends on the initial SIC amount, with variations decreasing as SIC reaches a certain high value.

**Key words:** Southern Hemisphere; mid-high latitude cyclone; Antarctica; sea ice; meteorology.

## 0 引言

南极海冰是全球气候系统的重要组成部分,控制着大气和海洋之间的通量交换,如热量、水分和动量交换(Laine, 2004).此外,它还参与了南大洋复杂的大气-海冰-海洋相互作用(Francis *et al.*, 2019).南极海冰的增长与减少是地球上最大规模的年周期性事件之一(Massom and Stammerjohn, 2010),其变化具有显著的区域性和季节性特征(Meehl *et al.*, 2019).许多研究从多区域、多尺度、多海冰类型等不同角度探讨了南极海冰的变化,发现影响海冰变化的因素和机制各不相同,甚至相同因素对不同区域、不同尺度或不同类型的海冰影响也存在差异(Matear *et al.*, 2015; Zhang *et al.*, 2021; Guo *et al.*, 2023; Kim *et al.*, 2023; Song *et al.*, 2023).

南半球环状模(Southern Hemisphere Annular Mode, 简称SAM)是影响南极海冰气候变率的重要系统之一(Lefebvre *et al.*, 2004).近几十年来,SAM由于南半球平流层臭氧消耗而呈现正异常(Thompson *et al.*, 2011),推动了上层海洋的变暖并诱导了南极海冰的融化,使南极海冰的减少在南半球春季达到最大(Smith *et al.*, 2012; Sigmond and Fyfe, 2014).同时,SAM正异常时,南极附近海域会生成更多的气旋,尤其是强气旋(Pezza *et al.*, 2012; Reboita *et al.*, 2015).

南极海冰的自然变率与气旋活动密切相关(Vichi *et al.*, 2019),部分区域海冰的持续时间和范围的变化趋势主要受气旋而非大尺度大气模态的影响(Matear *et al.*, 2015; Schroeter *et al.*, 2017).南半球中高纬度气旋主要沿东南路径穿过中高纬度地区,在南极附近消亡(Hepworth *et al.*, 2022).同时,南极及其周边海域存在的强温度梯度,使得气旋频繁且常有强气旋活动(Gramscianinov *et al.*, 2019).这些气旋能够导致南极天气发生变化(Tracey and Kolstad, 2010; Papritz *et al.*, 2014).

已有研究运用原位观测数据(如浮标、科考船

等)、再分析数据或模式数据,通过多个典型个例探讨了气旋活动对南极海冰的影响机制(Wang *et al.*, 2014, 2021; Francis *et al.*, 2019; Vichi *et al.*, 2019; Alberello *et al.*, 2020; Womack *et al.*, 2022).从热力学角度来看,在开阔海域,气旋导致的海-气热通量相平衡,但在气旋穿过南极海冰边缘线时,气旋东侧海洋上的暖空气向海冰区平流、西侧海冰区的冷空气向海洋平流,使气旋东西两侧下方海冰密集度发生相反的变化,同时两侧下方的海冰边缘线变形、西侧的向北扩张、东侧的向南收缩(Vichi *et al.*, 2019).

气旋也能够通过动力过程对区域海冰面积造成影响.气旋能显著增强地表风场(Turner *et al.*, 2009),强风对海冰施加动力强迫,海冰动态响应风场变化,漂移速度增加,平均漂移方向变化为沿风向左侧 $0^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 范围内(Alberello *et al.*, 2020; Womack *et al.*, 2022).这导致气旋范围内的海冰密集度发生变化,该变化受气旋特性和地形区域差异的显著影响.当强气旋经过海冰密集度偏低的东威德尔海时,气旋中心区域下方的海冰运动受到气旋相关风场的辐散作用影响,导致区域海冰减少(Francis *et al.*, 2019).某些气旋穿越海冰边缘线时,能使区域内的海冰重组,西侧海冰漂移速度增加,伴随着冷空气向海洋表面输送的大气冷平流效应,使区域海冰增加,而东侧情况则相反(Vichi *et al.*, 2019).在南极沿岸,气旋南侧或西侧的风场受地形影响增强,导致区域海冰漂移速度向西北方向瞬时增加,海冰密集度持续减少(Wang *et al.*, 2014).此外,在南极沿岸东侧有向北突出的障碍物(如固定冰、冰舌或陆地)时,气旋引起的强东南风能够导致海冰大面积向西漂移,从而在区域内迅速达成极端海冰的生成条件(Wang *et al.*, 2021).

此外,与气旋相关的强风使极端波浪(海洋中波高很大、破坏性强的非线性海浪)在南极附近的海洋中生成和传播,导致区域内的海冰不断重塑、浮冰不被固结(Vichi *et al.*, 2019; Womack *et al.*, 2022),这些海冰更容易受到风和潜在洋流的影响发生变化(Dumont *et al.*, 2011; Kohout

*et al.*, 2014). 以上研究表明,气旋通过动力作用(影响海洋波动传播、强迫海冰漂移改变位置)和热力作用(引起冷暖平流)能够显著影响南极海冰变化.

在较短的时间尺度上,区域南极海冰受气旋的影响显著.那么,在更长的时间尺度上,南半球中高纬度气旋对南极海冰的影响如何呢?为了解答这一问题,本文分析了南极海冰面积变化与南半球中高纬度气旋的年际和年代际变化之间的关联,揭示了中高纬度气旋影响南极海冰面积变化的机制,并发现气旋经过时受到影响的海冰面积变化依赖于南极海冰的多寡.

## 1 数据与方法

本研究使用1979—2022年欧洲中期天气预报中心(ECMWF)第五代大气再分析数据集(ERA5)的每6小时850 hPa风场数据识别和追踪南半球气旋.SAM指数从<https://legacy.bas.ac.uk/met/gjma/sam.html>(Marshall, 2003)获取.

考虑到海冰密集度数据的完整性和可靠性,本研究使用1979—2022年ERA5再分析数据集的空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 、时间分辨率为6小时的10 m经纬向风场和海冰密集度数据.分析气旋经过对风场和海冰密集度的影响时,使用了日平均数据进行研究.

### 1.1 气旋追踪方法

本研究采用Hodges(1994, 1995)开发的850 hPa相对涡度法识别追踪南半球气旋.相对涡度法首先滤掉了波数小于5的行星波(Hodges, 1999),这能够有效消除大尺度的背景场影响.然后初步确定南半球局地相对涡度最小值小于 $-1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 的点为潜在的气旋中心,并使用Goldfarb(1969)的方法找到实际的局地最小值中心的位置.根据Hodges(1994)的方法,利用气旋移动的方向和速度不能突变这两个约束条件,确定相邻时间步中的局地最大值中心是否属于相同的气旋轨迹,并进行气旋追踪.最后,仅研究生命期在48 h以上且移动超过1 000 km的气旋.这一算法已被广泛应用于研究气旋的气候特征(Hoskins and Hodges, 2005; Gramscianinov *et al.*, 2019; Zhan and Chen, 2023).在1979—2022年间,通过该方法共识别追踪到南半球气旋77 155条,图1展示了2016年9月在南半球活动的气旋轨迹,这些气旋大多自西向东地绕极移动.

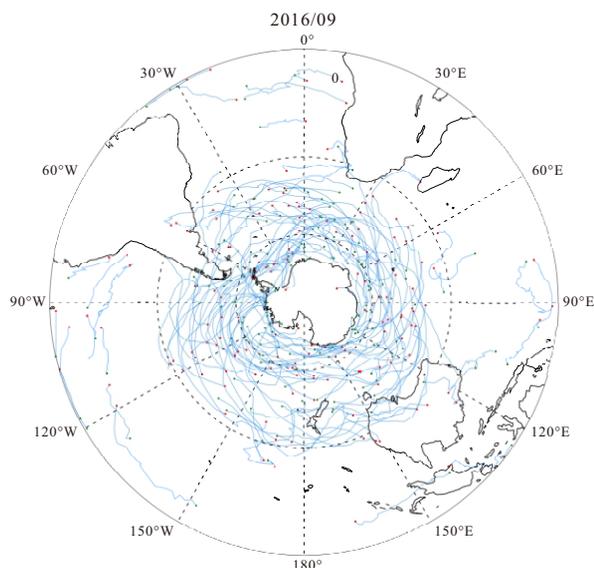


图1 2016年9月南半球气旋轨迹

Fig.1 Southern Hemisphere cyclone tracks in September 2016

红色点为气旋起点;绿色点为气旋终点

本研究采用Gramscianinov *et al.*(2019)提出的密度算法计算气旋密度.该方法以每个格点周围 $5^\circ \times 5^\circ$ 的区域为基本单位,确定每个基本单位内气旋中心点的个数,作为该格点的气旋轨迹密度.

每月气旋频数统计以气旋强度最大时刻所在的月份为准,每条气旋只计算一次.若未特别指出,则每条气旋的每步(一天为一步)都视作一个气旋.

气旋影响范围指当天各时次所有气旋影响的范围(以每个时次的气旋半径划分),该范围形状不规则.

### 1.2 海冰计算

文中9月南极海冰密集度异常为每年9月海冰密集度均值减去当年6月至11月的南极海冰密集度均值.

后文2.1节的研究表明南极海冰面积同时受气旋活动和背景环流的影响.本文为了能够更好地探究气旋对海冰面积的净影响,统计了气旋影响区域内的海冰面积变化.考虑到南极海冰能够迅速响应气旋经过带来的风场改变(Alberello *et al.*, 2020; Womack *et al.*, 2022),将某气旋经过时下方受到影响的海冰密集度变化定义为该天气旋影响范围内的海冰密集度变化,即后一天的海冰密集度减去该天的海冰密集度值.受气旋经过影响的海冰面积变化为气旋范围内每个格点的海冰密集度变化乘以该格点的面积总和.每年9月受气旋经过影响的海冰密集度变化为该月所

有受气旋经过影响的下方海冰密集度变化之和。

本文使用海冰密集度 15% 等值线作为海冰边缘线 (Comiso and Zwally, 1984), 文中的南极海冰边缘区特指 1979—2022 年 9 月最大和最小海冰边缘线之间的区域, 该区域海冰密集度大多低于 80%。

## 2 结果

### 2.1 SAM 对中高纬度气旋和南极海冰的影响

每年 7 月至 11 月, 南极附近区域的气旋活动频繁 (Hoskins and Hodges, 2005), 图 2 给出了 7 月至 11 月不同纬度到 90°S 内的气旋频数与南极海冰面积之间的相关系数。结果表明, 8 月在 55°S~90°S 中、9 月在 60°S~90°S 中、10 月在 60°S~90°S、66.5°S~90°S 中活动的气旋频数与南极海冰面积之间存在显著的负相关关系, 相关系数分别为 -0.27、-0.29、-0.30、-0.41 (在图 2 中用黑圈进行了标注)。

图 3 展示了 8 月至 10 月在 55°S~90°S、60°S~90°S 和 66.5°S~90°S 三个不同活动范围内气旋频数与南极海冰密集度的空间相关性, 表明这几个时间的相关系数空间分布类似。相较于其他时间和气旋范围, 在 9 月, 气旋活动范围为 60°S~90°S 时 (图 3e), 空间相关系数通过了 95% 显著性检验的区域最多, 且不同区域的相关性差异明显。进一步分析表明, 9 月东太平洋和西威德尔海大部区域 (图 3e 中绿框)

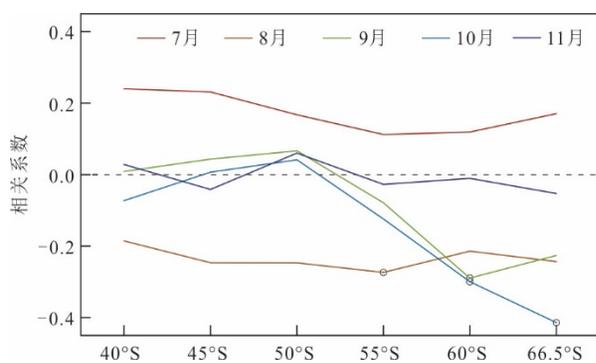


图 2 1979—2022 年 7 月至 11 月各纬度内 (分别为 40°S、45°S、50°S、55°S、60°S、66.5°S 到 90°S) 气旋频数与南极海冰面积之间的相关性

Fig. 2 Correlation between the frequency of cyclones and the Antarctic sea ice extent (SIE) at various latitudes (40°S, 45°S, 50°S, 55°S, 60°S, 66.5°S to 90°S) during July to November from 1979 to 2022

黑圈表示该相关系数通过了 90% 显著性检验

标注区域) 的海冰面积与 60°S~90°S 范围内的气旋频数之间相关系数分别达到 0.46 和 -0.62。因此, 在后文中选择现象更显著的 9 月来进行中高纬度气旋对南极海冰面积的影响分析。

气旋能通过相关风场对区域海冰面积产生影响 (Wang *et al.*, 2014, 2021; Francis *et al.*, 2019; Vichi *et al.*, 2019)。针对 9 月在 60°S~90°S 中活动的气旋密度、南极海冰面积与 10 m 风场的矢量相关进行分析 (图 4), 发现两者的大值区并不能完全吻合。然而, 南极海冰面积和风场的矢量相关 (图 4b) 与 9 月 60°S~90°S 范围内气旋频数和南极海冰密集度的空间相关 (图 3e) 的显著区域较为吻合。例如, 在西威德尔海、罗斯海和东印度洋区域, 南极海冰面积与经向风正相关 (图 4b), 与气旋频数负相关 (图 3e); 在 120°W 附近海域, 情况相反。同时, 研究表明东太平洋和西威德尔海大部区域 (图 3e 中绿框标注区域) 的海冰面积也存在高达 -0.51 的相关关系。南极海冰变化与大尺度大气环流模式息息相关 (Eayrs *et al.*, 2021), 这表明可能存在某种大尺度环流能够同时对南极海冰和气旋产生影响, 导致以上现象在 9 月发生。

已有研究表明, 在南半球春季, 南极海冰受 SAM (Holland *et al.*, 2017; Turner *et al.*, 2022) 影响显著, 且不同区域海冰对 SAM 的响应并不一致 (Holland *et al.*, 2017; Yu *et al.*, 2021; Yadav *et al.*, 2022)。总的来看, SAM 指数的增加将导致南极海冰面积的减少 (Smith *et al.*, 2012; Sigmond and Fyfe, 2014)。对于气旋而言, SAM 正异常事件发生时, 南极附近的气旋密度增加 (Pezza *et al.*, 2012, Uotila *et al.*, 2013, Reboita *et al.*, 2015)。在 9 月, SAM 与在 60°S~90°S 中活动的气旋频数的相关系数为 0.57, 与南极海冰面积的相关系数为 -0.28 (图 5), 这与前人研究结果相符。即 SAM 的正相位能够同时导致南极海冰面积的减少和气旋频数的增加。因此, 南半球中高纬度气旋与南极海冰面积同时受到了 SAM 的影响。

图 6 通过计算每年 9 月相对当年 6 月至 11 月的南极海冰密集度异常, 去除了海冰密集度的年际间差异, 消除了 SAM 对南极海冰面积的影响。结果显示, 南极海冰密集度异常值与气旋频数的相关系数显著下降, 这证明了气旋活动和海冰面积同时受到 SAM 的影响。因此, 在研究南半球中高纬度气旋对南极海冰面积的净

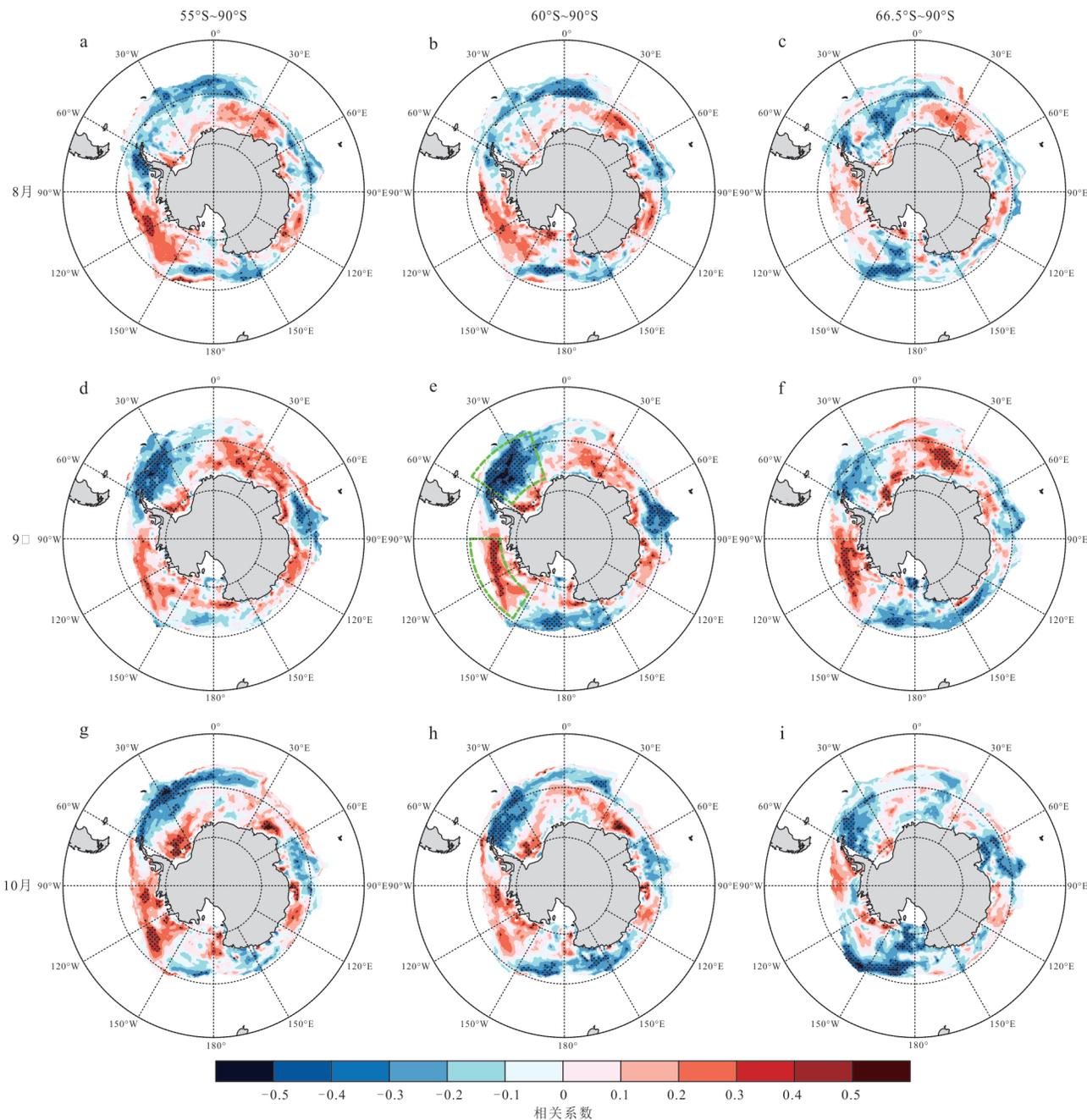


图 3 1979—2022年中8月(a~c)、9月(d~f)和10月(g~i)的各纬度(55°S~90°S:第一列,60°S~90°S:第二列,66.5°S~90°S:第三列)气旋频数和南极海冰密集度的相关系数空间分布

Fig.3 Spatial distribution of the correlation coefficients between the frequency of cyclones and the Antarctic sea ice concentration (SIC) at various latitudes (55°S—90°S: first column, 60°S—90°S: second column, 66.5°S—90°S: third column) in August (a—c), September (d—f), and October (g—i) from 1979 to 2022

作用时,需要去掉背景环流对海冰的影响.

### 2.2 中高纬度气旋对南极海冰面积的影响

1979—2022年间9月在60°S~90°S中活动的气旋共有3009条,97.93%的气旋(2947条)从南极海冰上方经过,迫使气旋影响范围内的海冰密集度发生改变.图7展示了2016年9月2日至5

日一次气旋经过时,下方海冰密集度的变化.整个天气过程中,在海冰边缘线附近,受气旋经过影响的海冰密集度变化显著,在南极沿岸变化较小.

图8a展示了这些能够影响南极海冰的气旋中心点(10842个)密度分布,结果表明整个南极海冰区都有气旋经过,其中海冰变化显著的海冰边缘区

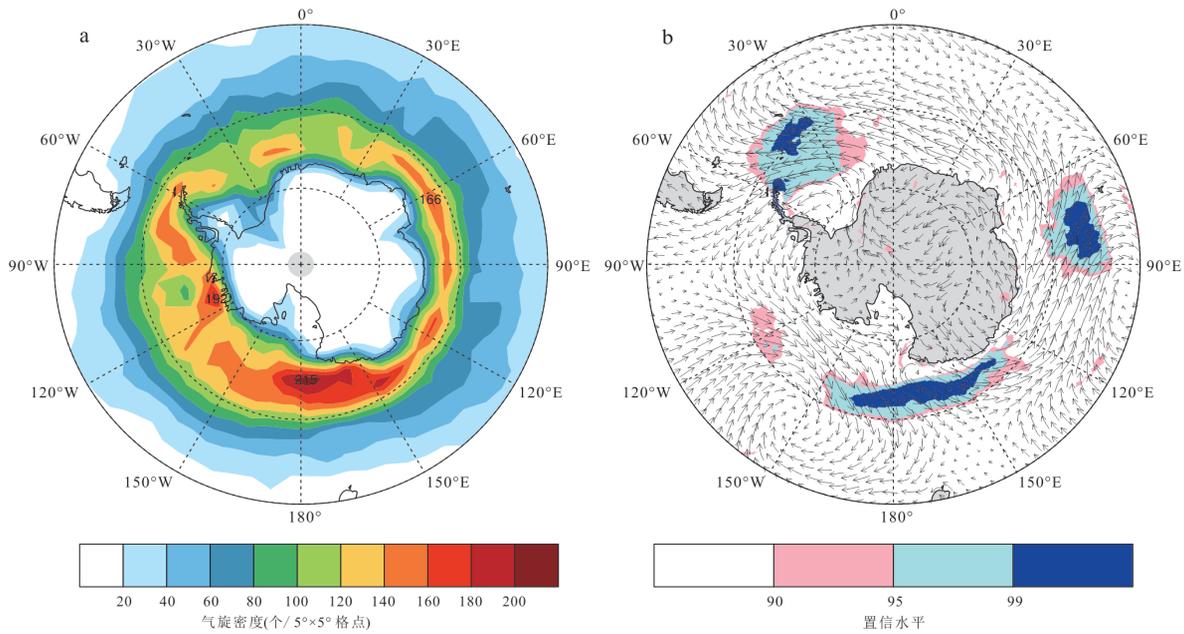


图 4 1979—2022 年间 9 月 (a) 在 60°S~90°S 中活动的气旋密度分布总值; (b) 南极海冰总面积与 10 m 风场矢量的空间相关  
 Fig.4 Total density distribution of cyclones active in 60°S—90°S (a) and spatial correlation (b) between the total Antarctic SIE and the 10 m wind field vectors in September from 1979 to 2022

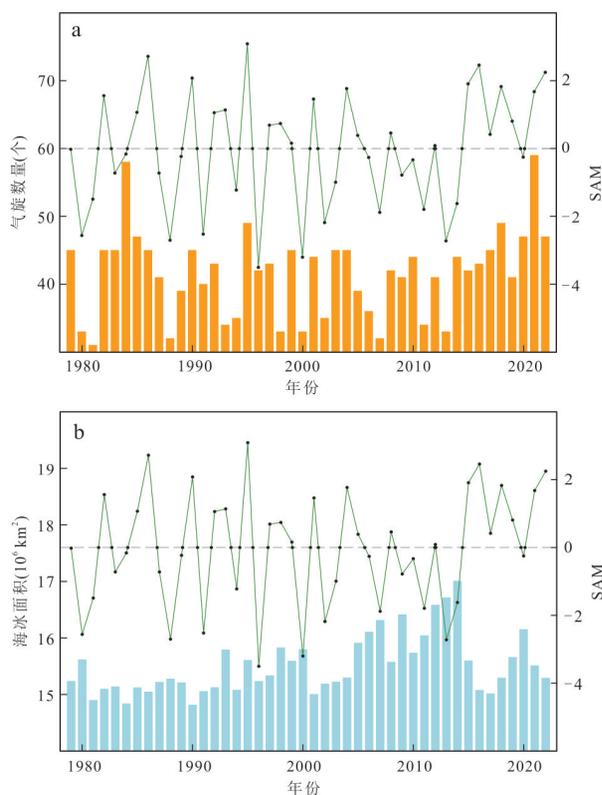


图 5 1979—2022 年 9 月 SAM 指数 (右轴, 折线) 与在 60°S~90°S 中活动的气旋频数 (左轴, 柱状) (a) 和南极海冰面积 (左轴, 柱状) (b) 的时间序列

Fig.5 Time series of the SAM index (right axis, line), (a) the frequency of cyclones active in 60°S—90°S (left axis, bars), and (b) the Antarctic SIE (left axis, bars) in September from 1979 to 2022

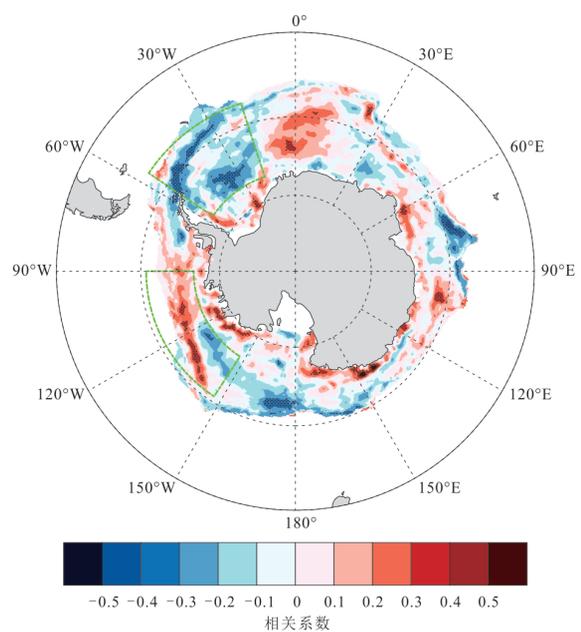


图 6 1979—2022 年间的 9 月在 60°S~90°S 中活动的气旋频数和南极海冰密集度异常值之间的相关性空间分布  
 Fig.6 Spatial distribution of the correlation between the frequency of cyclones active in 60°S—90°S and SIC anomalies in September from 1979 to 2022  
 打点区域通过 95% 显著性检验

(两黑色实线之间的区域) 气旋活动频繁. 图 8b 分析了这些气旋经过时下方受到影响的南极海冰密集度变化: 在海冰边缘区, 海冰受气旋影响显著, 除东印度洋小部分海域的海冰明显减少外, 其他大部分

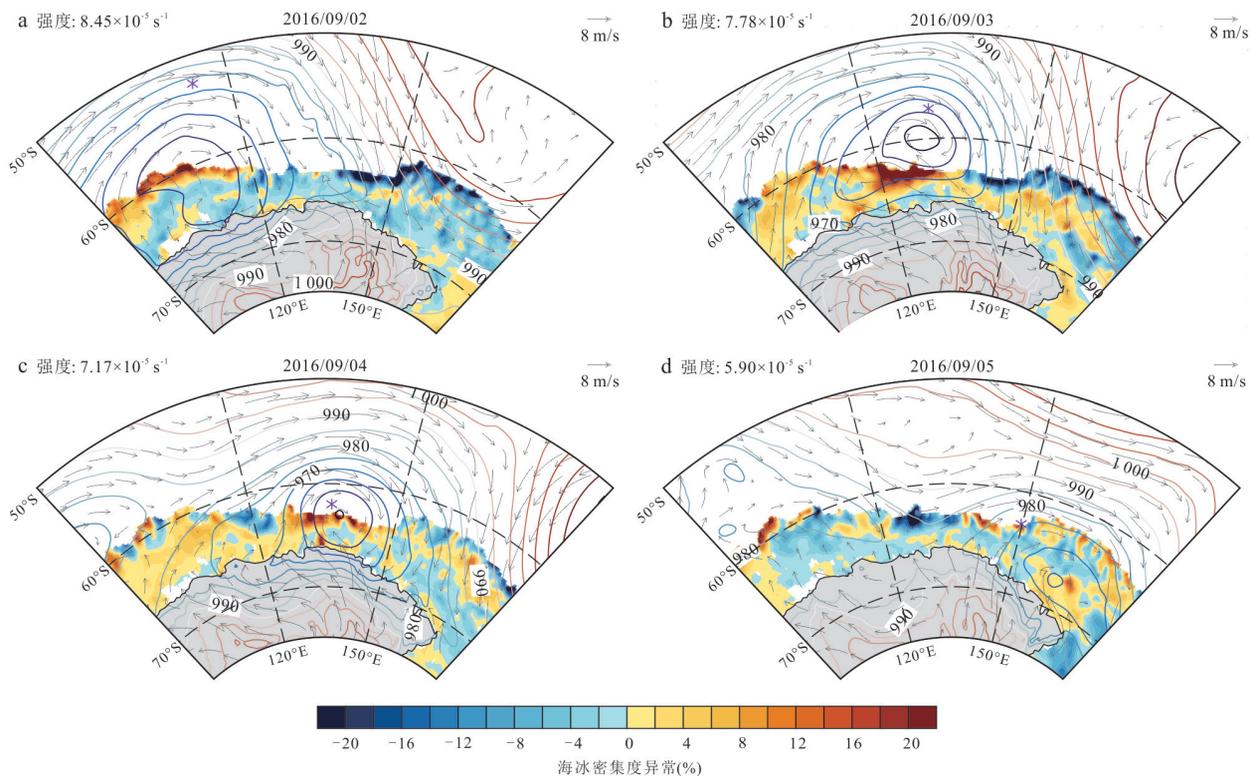


图 7 在 2016 年 9 月 2 日至 5 日一次气旋经过时的海冰密集度日异常(填色,单位:%)、海平面气压场(等值线,单位:hPa)和风场(灰色矢量)的日均值

Fig.7 Daily mean sea level pressure (contour lines, unit: hPa) and wind vectors (gray vectors) are overlaid on daily anomaly of SIC (shade, unit: %) during the passage of a cyclone from 2 to 5 September 2016

紫色星号表示气旋的低压中心;左上角显示了气旋的强度

区域的海冰密集度显著增加;在海冰密集度较大的区域(最小海冰边缘线到南极大陆沿岸),大部分海冰小幅增加,南极沿岸部分区域的海冰密集度在气旋影响下有减少趋势.从空间上看,气旋经过影响到的海冰密集度变化主要集中在海冰边缘区.

在 1979—2022 年间,9 月受中高纬度气旋影响的南极海冰面积变化年均值为  $1.30 \times 10^6 \text{ km}^2$ . 从时间序列来看,在这 44 年中,除了 2008—2012 年这五年的气旋活动使南极海冰小幅减少外,在绝大多数年份中,气旋活动更倾向于使整个南极海冰面积增加(图 8c). 同时,能够影响南极海冰的气旋数量与其影响到的整个南极海冰面积变化不存在显著的相关关系(相关系数为 0.01).

### 2.3 受气旋经过影响的海冰面积变化依赖于南极海冰多寡

为了分析 9 月中高纬气旋经过时发生的南极海冰密集度变化在南极海冰密集度年际变化中的影响,将两者进行相关性分析.结果表明,是否去除海冰密集度的年际变化对相关系数空间分

布的影响显著(图 9). 与图 9a 相比,图 9b 在去除南极海冰密集度的年际变化后,大部分海冰密集度较大的区域的相关性降低,这验证了前文的结论:南极海冰受大尺度环流影响显著. 在海冰边缘线附近,显著正相关仍然存在,部分区域相关系数达到 0.8 以上. 因此,虽然南极海冰受大尺度环流的影响显著,但在海冰边缘线附近(该区域海冰密集度常年偏低,且变动频繁),中高纬度气旋经过是影响此处海冰面积变化的主要因素.

同时,在图 9b 中可以注意到海冰边缘区南侧存在一条狭长的相关性负值带(在  $150^\circ\text{W} \sim 100^\circ\text{E}$  和  $10^\circ\text{E} \sim 50^\circ\text{E}$  区域的负相关尤为显著),即该区域海冰减少时,受气旋影响的海冰面积变化反而增加. 对此笔者提出猜想:可能是由于该区域海冰密集度较大时,海冰密集度更难或无法受气旋影响继续增大,使受气旋经过影响的海冰密集度增加幅度减小;与此相反的,海冰密集度减小时,该区域的海冰更易受气旋影响而增加.

为证实这一猜想,笔者以 1979—2022 年 9 月南

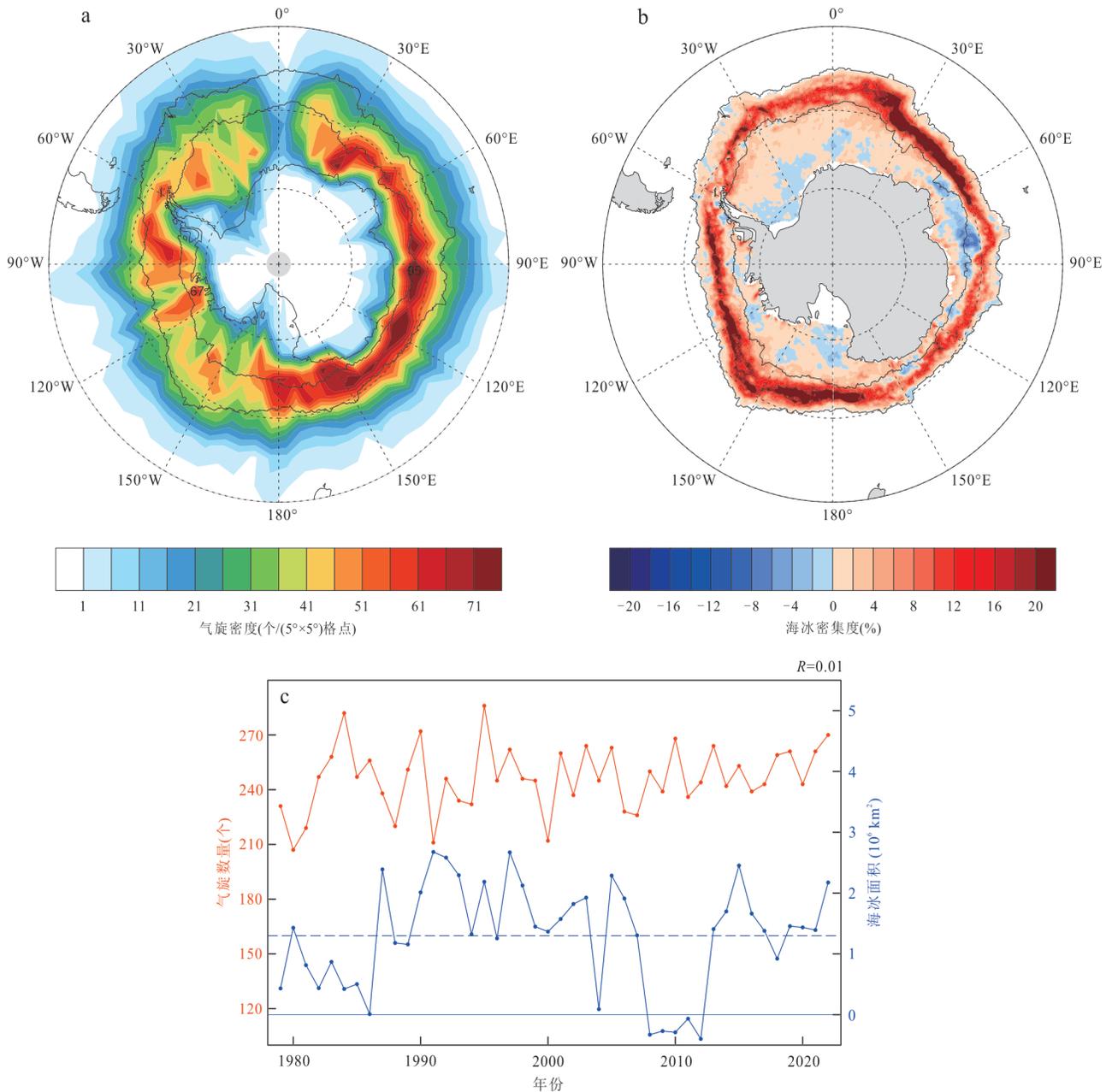


图 8 1979—2022 年间 9 月 (a) 影响南极海冰密集度发生变化的气旋密度分布总值; (b) 受气旋经过影响的南极海冰密集度变化年均值; (c) 能影响南极海冰面积发生变化的气旋数量 (左轴橙色折线) 和气旋影响的南极海冰面积变化 (右轴蓝色折线)

Fig.8 Total density distribution of cyclones causing changes in SIC (a), annual mean of SIC changes caused by cyclones (b), and number of cyclones affecting SIE (left axis, orange line) and SIE anomalies caused by cyclones (right axis, blue line) (c) in September from 1979 to 2022

图 c 中蓝色虚线为气旋影响的南极海冰面积变化 44 年均值 ( $1.30 \times 10^6 \text{ km}^2$ ); 蓝色实线为海冰面积变化 0 值, 右上角为气旋数量与南极海冰面积变化的相关系数. 图 a 和 b 中两条黑色实线为 1979—2022 年 9 月的最大和最小海冰边界线, 黑线之间的区域即为海冰边缘区

极海冰多寡为基准, 将这 44 年分为海冰较少的 22 年和海冰较多的 22 年, 分析多冰年和少冰年的海冰密集度差值和受气旋经过影响的海冰密集度变化之间是否存在关联. 与少冰年相比, 多冰年的海冰在海冰边缘区的印度洋、 $35^\circ\text{W} \sim 80^\circ\text{W}$  和  $160^\circ\text{W} \sim$

$145^\circ\text{E}$  区域显著增加、 $100^\circ\text{W} \sim 130^\circ\text{W}$  区域显著减少 (图 10a 的三个绿框和紫框标注区域). 不管是在多冰年还是少冰年, 这些区域的气旋都能使海冰密集度显著增加 (图 11). 然而, 以这三个海冰密集度异常增加的大值带为中心, 多冰年受气旋经过影响的海冰密

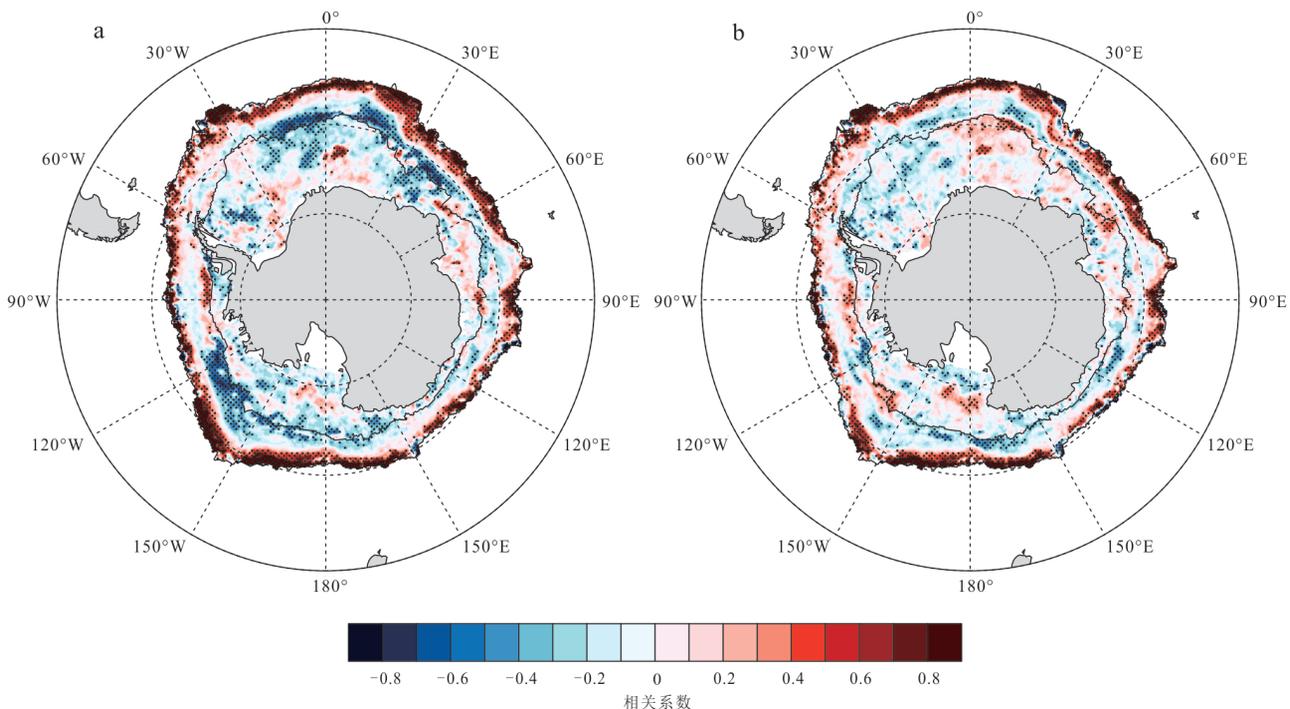


图 9 1979—2022年9月受气旋经过影响的海冰密集度变化与南极海冰密集度(a)和海冰密集度异常值(b)的相关性  
 Fig.9 Correlation between SIC anomalies caused by cyclones and Antarctic SIC (a), and SIC anomalies (b) in September from 1979 to 2022

打点区域通过了95%显著性检验.两条黑色实线为1979—2022年9月的最大和最小海冰边缘线,黑线之间的区域即为海冰边缘区

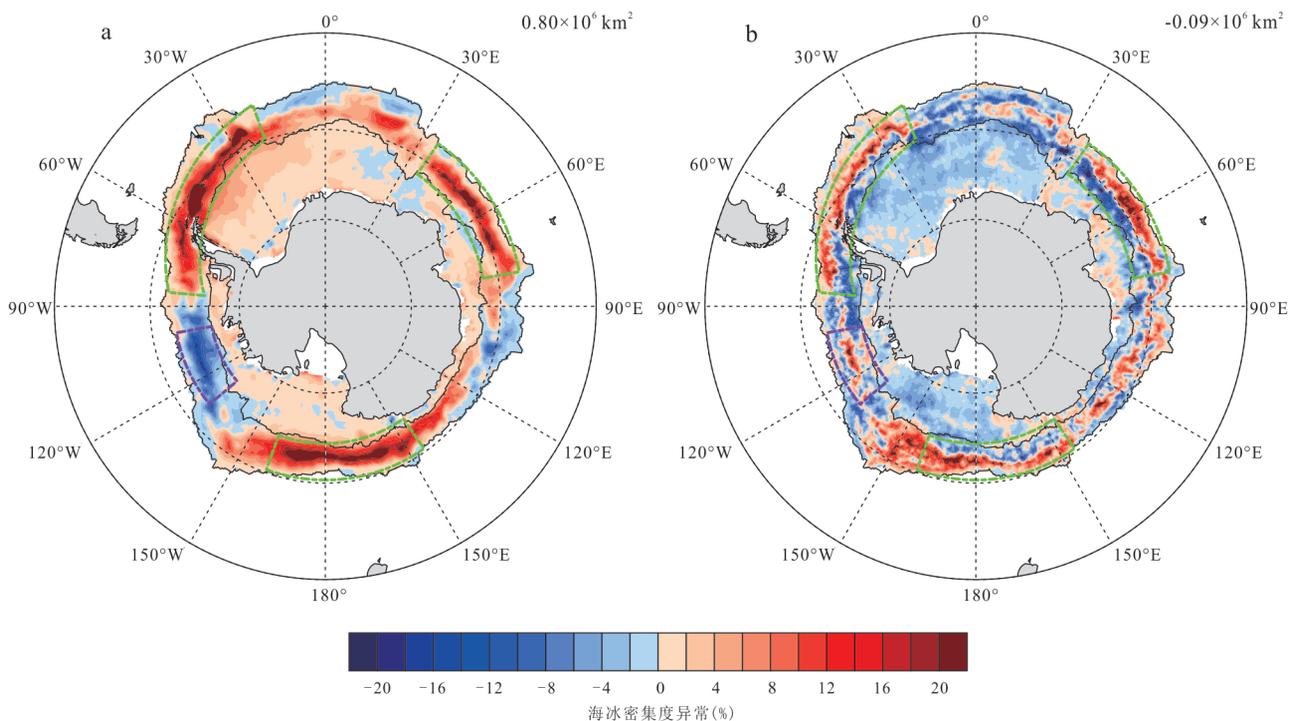


图 10 1979—2022年南极海冰多冰22年和少冰22年的9月海冰密集度年均差值(a)和受气旋经过影响的海冰密集度变化年均差值(b)(单位:%)

Fig.10 Annual mean SIC difference (a) and annual mean difference of SIC anomalies caused by cyclones (b) between the top 22 and the bottom 22 years of SIE in September from 1979 to 2022 (unit: %)

右上角数值为南极海冰面积总变化(单位: $10^6 \text{ km}^2$ ).两条黑色实线为1979—2022年9月的最大和最小海冰边缘线,黑线之间的区域即为海冰边缘区

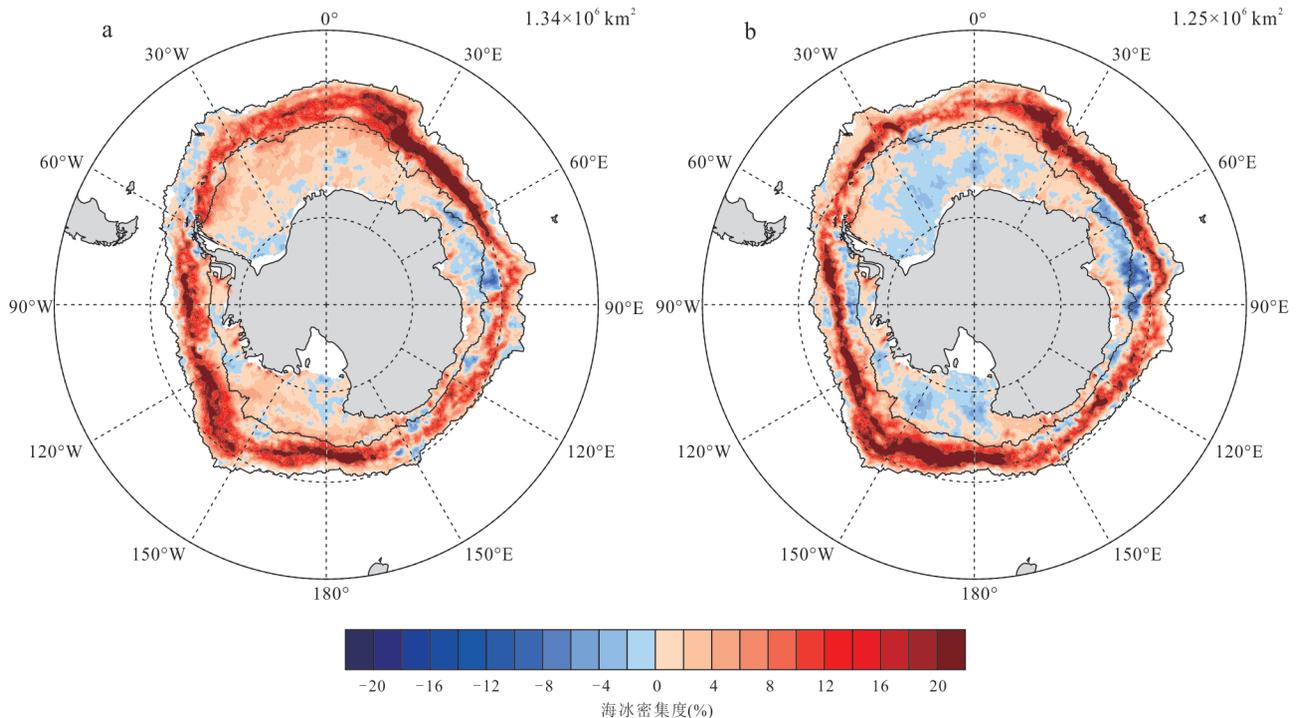


图 11 1979—2022 年南极少冰 22 年(a)和多冰 22 年(b)的 9 月受气旋经过影响的海冰密集度变化年均值(单位: %)

Fig.11 Average annual SIC anomalies caused by cyclones during the bottom 22 years (a) and top 22 years (b) of SIE in September from 1979 to 2022 (unit: %)

小图右上角数值为南极海冰面积总变化(单位:  $10^6 \text{ km}^2$ ); 两条黑色实线为 1979—2022 年 9 月的最大和最小海冰边缘线, 黑线之间的区域即为海冰边缘区

集度变化与少冰年相比, 南侧少、北侧多(图 10b 的绿框标注区域); 在多冰年海冰密集度异常低的  $100^\circ\text{W}\sim 130^\circ\text{W}$  区域, 受气旋经过影响的海冰密集度变化幅度偏小, 且多冰年受气旋经过影响的海冰增加比少冰年更多(图 10b 的紫框标注区域). 另外, 在南极海冰密集度较大的区域(最小海冰边缘线到南极大陆沿岸), 多冰年的海冰整体更多(图 10a), 但气旋更倾向于使除了海冰边缘区以外的海冰减少(图 10b 和图 11b). 少冰年的气旋除了使海冰边缘区的海冰明显增加, 也会使从最小海冰边缘线到南极大陆沿岸的海冰增加(图 11a).

总体来说, 除了在因南极总海冰面积增加而导致海冰边缘线向北移动的部分区域(通常在海冰边缘线附近), 出现了海冰密集度增加、同时受气旋经过影响的海冰密集度增加幅度也变大的情况; 在大部分区域, 南极海冰密集度降低时, 受气旋经过影响的海冰密集度增加反而更大. 即, 南极海冰的密集度在达到一定的高值后继续增加, 会使受气旋经过影响的海冰密集度增加幅度减小, 导致在海冰边缘区南侧出现相关性负值带.

### 3 结论与讨论

本文利用 ERA5 再分析数据, 识别并追踪了 1979—2022 年间的南半球气旋, 重点研究了 9 月在  $60^\circ\text{S}\sim 90^\circ\text{S}$  范围内活动的气旋. 为了明确南半球中高纬度气旋对南极海冰面积的净影响, 通过比较气旋影响范围内当天与第二天的海冰密集度变化, 以剔除背景环流的影响. 此外, 将 1979—2022 年分为多冰年和少冰年, 分析两段时间内受气旋经过影响的南极海冰面积变化是否存在差异. 主要结论如下:

(1) SAM 对中高纬度气旋和南极海冰面积影响显著: 中高纬度气旋的活动和南极海冰面积的变化均受到 SAM(南半球环状模)的显著影响. SAM 的正相位能够同时导致南极海冰面积减少和气旋频数增加.

(2) 气旋活动集中在海冰边缘区: 影响南极海冰面积变化的中高纬度气旋大多集中在海冰边缘区, 该区域受气旋经过影响的海冰密集度变化显著. 整体而言, 中高纬度气旋的活动更有利于南极海冰面积的增加.

(3) 海冰边缘区受气旋影响显著: 在海冰密集

度较小的海冰边缘区(该区域的海冰密集度大多低于80%且变动频繁),气旋活动对海冰面积的变化影响较大.特别是在南极海冰边缘线附近,部分区域受气旋经过影响的海冰面积变化与海冰面积变化本身的相关性超过0.80.在该区域,气旋活动是影响海冰面积变化的主要因素.

(4)受气旋经过影响的海冰密集度变化依赖于南极海冰的多寡:海冰密集度在达到一定高值后继续增加,会使受气旋活动影响的海冰密集度增加幅度减小.

本研究讨论了多年南半球中高纬度气旋经过影响到的南极海冰面积变化,以及这些变化与南极海冰面积本身之间的联系.在研究中笔者也发现了一些问题仍未解决,例如,能够影响南极海冰的气旋数量与受到其影响的整个南极海冰面积变化之间不存在相关关系.总的来说,本文对受气旋经过影响的南极海冰面积的变化做出了一些解释,但这其中的影响机制不够全面,笔者需要在之后的研究中进一步探讨气旋经过导致南极海冰面积发生变化的影响因素.

## References

- Alberello, A., Bennetts, L., Heil, P., et al., 2020. Drift of Pancake Ice Floes in the Winter Antarctic Marginal Ice Zone during Polar Cyclones. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 125(3): e2019JC015418. <https://doi.org/10.1029/2019JC015418>
- Bracegirdle, T. J., Kolstad, E. W., 2010. Climatology and Variability of Southern Hemisphere Marine Cold-Air Outbreaks. *Tellus a: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 62(2): 202–208. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0870.2009.00431.x>
- Comiso, J. C., Zwally, H. J., 1984. Concentration Gradients and Growth/Decay Characteristics of the Seasonal Sea Ice Cover. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 89(C5): 8081–8103. <https://doi.org/10.1029/JC089iC05p08081>
- Dumont, D., Kohout, A., Bertino, L., 2011. A Wave-Based Model for the Marginal Ice Zone Including a Floe Breaking Parameterization. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 116: C04001. <https://doi.org/10.1029/2010JC006682>
- Eayrs, C., Li, X. C., Raphael, M. N., et al., 2021. Rapid Decline in Antarctic Sea Ice in Recent Years Hints at Future Change. *Nature Geoscience*, 14(7): 460–464. <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00768-3>
- Francis, D., Eayrs, C., Cuesta, J., et al., 2019. Polar Cyclones at the Origin of the Reoccurrence of the Maud Rise Polynya in Austral Winter 2017. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124(10): 5251–5267. <https://doi.org/10.1029/2019JD030618>
- Goldfarb, D., 1969. Extension of Davidon's Variable Metric Method to Maximization under Linear Inequality and Equality Constraints. *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 17(4): 739–764. <https://doi.org/10.1137/0117067>
- Gramscianinov, C. B., Hodges, K. I., Camargo, R., 2019. The Properties and Genesis Environments of South Atlantic Cyclones. *Climate Dynamics*, 53(7–8): 4115–4140. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04778-1>
- Guo, Y. Y., Chen, X. D., Huang, S. H., et al., 2023. Amplified Interannual Variation of the Summer Sea Ice in the Weddell Sea, Antarctic after the Late 1990s. *Geophysical Research Letters*, 50(17): e2023GL104924. <https://doi.org/10.1029/2023GL104924>
- Hepworth, E., Messori, G., Vichi, M., 2022. Association between Extreme Atmospheric Anomalies over Antarctic Sea Ice, Southern Ocean Polar Cyclones and Atmospheric Rivers. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127(7): e2021JD036121. <https://doi.org/10.1029/2021JD036121>
- Hodges, K. I., 1994. A General Method for Tracking Analysis and Its Application to Meteorological Data. *Monthly Weather Review*, 122(11): 2573–2586. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1994\)122<2573:agmfta>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1994)122<2573:agmfta>2.0.co;2)
- Hodges, K. I., 1995. Feature Tracking on the Unit Sphere. *Monthly Weather Review*, 123(12): 3458–3465. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1995\)123<3458:ftotus>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1995)123<3458:ftotus>2.0.co;2)
- Hodges, K. I., 1999. Adaptive Constraints for Feature Tracking. *Monthly Weather Review*, 127(6): 1362–1373. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1999\)127<1362:acfft>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1999)127<1362:acfft>2.0.co;2)
- Holland, M. M., Landrum, L., Kostov, Y., et al., 2017. Sensitivity of Antarctic Sea Ice to the Southern Annular Mode in Coupled Climate Models. *Climate Dynamics*, 49(5): 1813–1831. <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3424-9>
- Hoskins, B. J., Hodges, K. I., 2005. A New Perspective on Southern Hemisphere Storm Tracks. *Journal of Climate*, 18(20): 4108–4129. <https://doi.org/10.1175/jcli3570.1>
- Kim, J., Kang, D., Lee, M. I., et al., 2023. Remote Influences of ENSO and IOD on the Interannual Variability of the West Antarctic Sea Ice. *Journal of Geophysical*

- Research: Atmospheres*, 128(10): e2022JD038313. <https://doi.org/10.1029/2022JD038313>
- Kohout, A. L., Williams, M. J. M., Dean, S. M., et al., 2014. Storm-Induced Sea-Ice Breakup and the Implications for Ice Extent. *Nature*, 509(7502): 604–607. <https://doi.org/10.1038/nature13262>
- Laine, V., 2004. Arctic Sea Ice Regional Albedo Variability and Trends, 1982–1998. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 109(C6): C06027. <https://doi.org/10.1029/2003JC001818>
- Lefebvre, W., Goosse, H., Timmermann, R., et al., 2004. Influence of the Southern Annular Mode on the Sea Ice-Ocean System. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 109(C9): C09005. <https://doi.org/10.1029/2004JC002403>
- Marshall, G. J., 2003. Trends in the Southern Annular Mode from Observations and Reanalyses. *Journal of Climate*, 16(24): 4134–4143. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2003\)016<4134:TITSAM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2003)016<4134:TITSAM>2.0.CO;2)
- Massom, R. A., Stammerjohn, S. E., 2010. Antarctic Sea Ice Change and Variability-Physical and Ecological Implications. *Polar Science*, 4(2): 149–186. <https://doi.org/10.1016/j.polar.2010.05.001>
- Matear, R. J., O’Kane, T. J., Risbey, J. S., et al., 2015. Sources of Heterogeneous Variability and Trends in Antarctic Sea - Ice. *Nature Communications*, 6: 8656. <https://doi.org/10.1038/ncomms9656>
- Meehl, G. A., Arblaster, J. M., Chung, C. T. Y., et al., 2019. Sustained Ocean Changes Contributed to Sudden Antarctic Sea Ice Retreat in Late 2016. *Nature Communications*, 10: 14. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-07865-9>
- Papritz, L., Pfahl, S., Rudeva, I., et al., 2014. The Role of Extratropical Cyclones and Fronts for Southern Ocean Freshwater Fluxes. *Journal of Climate*, 27(16): 6205–6224. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-13-00409.1>
- Pezza, A. B., Rashid, H. A., Simmonds, I., 2012. Climate Links and Recent Extremes in Antarctic Sea Ice, High-Latitude Cyclones, Southern Annular Mode and ENSO. *Climate Dynamics*, 38(1): 57–73. <https://doi.org/10.1007/s00382-011-1044-y>
- Reboita, M. S., da Rocha, R. P., Ambrizzi, T., et al., 2015. Trend and Teleconnection Patterns in the Climatology of Extratropical Cyclones over the Southern Hemisphere. *Climate Dynamics*, 45(7): 1929–1944. <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2447-3>
- Schroeter, S., Hobbs, W., Bindoff, N. L., 2017. Interactions between Antarctic Sea Ice and Large-Scale Atmospheric Modes in CMIP5 Models. *The Cryosphere*, 11(2): 789–803. <https://doi.org/10.5194/tc-11-789-2017>
- Sigmond, M., Fyfe, J. C., 2014. The Antarctic Sea Ice Response to the Ozone Hole in Climate Models. *Journal of Climate*, 27(3): 1336–1342. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-13-00590.1>
- Smith, K. L., Polvani, L. M., Marsh, D. R., 2012. Mitigation of 21st Century Antarctic Sea Ice Loss by Stratospheric Ozone Recovery. *Geophysical Research Letters*, 39(20): L20701. <https://doi.org/10.1029/2012GL053325>
- Song, L., Wu, R. G., Chen, W., et al., 2023. Intraseasonal Sea Ice Concentration Variability over the Weddell Sea during Austral Autumn. *Geophysical Research Letters*, 50(9): e2022GL102691. <https://doi.org/10.1029/2022GL102691>
- Thompson, D. W. J., Solomon, S., Kushner, P. J., et al., 2011. Signatures of the Antarctic Ozone Hole in Southern Hemisphere Surface Climate Change. *Nature Geoscience*, 4(11): 741–749. <https://doi.org/10.1038/ngeo1296>
- Turner, J., Chenoli, S. N., Abu Samah, A., et al., 2009. Strong Wind Events in the Antarctic. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114: D18103. <https://doi.org/10.1029/2008JD011642>
- Turner, J., Holmes, C., Harrison, T. C., et al., 2022. Record Low Antarctic Sea Ice Cover in February 2022. *Geophysical Research Letters*, 49(12): e2022GL098904. <https://doi.org/10.1029/2022GL098904>
- Uotila, P., Vihma, T., Tsukernik, M., 2013. Close Interactions between the Antarctic Cyclone Budget and Large-Scale Atmospheric Circulation. *Geophysical Research Letters*, 40(12): 3237–3241. <https://doi.org/10.1002/grl.50560>
- Vichi, M., Eayrs, C., Alberello, A., et al., 2019. Effects of an Explosive Polar Cyclone Crossing the Antarctic Marginal Ice Zone. *Geophysical Research Letters*, 46(11): 5948–5958. <https://doi.org/10.1029/2019GL082457>
- Wang, X. Q., Zhang, Z. R., Wang, X. Z., et al., 2021. Impacts of Strong Wind Events on Sea Ice and Water Mass Properties in Antarctic Coastal Polynyas. *Climate Dynamics*, 57(11): 3505–3528. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05878-7>
- Wang, Z. M., Turner, J., Sun, B., et al., 2014. Cyclone-Induced Rapid Creation of Extreme Antarctic Sea Ice Conditions. *Scientific Reports*, 4: 5317. <https://doi.org/10.1038/srep05317>
- Womack, A., Vichi, M., Alberello, A., et al., 2022. Atmospheric Drivers of a Winter-to-Spring Lagrangian Sea-

- Ice Drift in the Eastern Antarctic Marginal Ice Zone. *Journal of Glaciology*, 68(271): 999–1013. <https://doi.org/10.1017/jog.2022.14>
- Yadav, J., Kumar, A., Mohan, R., 2022. Atmospheric Precursors to the Antarctic Sea Ice Record Low in February 2022. *Environmental Research Communications*, 4(12): 121005. <https://doi.org/10.1088/2515-7620/aca5f2>
- Yu, L. J., Zhong, S. Y., Sui, C. J., et al., 2021. Synoptic Mode of Antarctic Summer Sea Ice Superimposed on Interannual and Decadal Variability. *Advances in Climate Change Research*, 12(2): 147–161. <https://doi.org/10.1016/j.accre.2021.03.008>
- Zhan, X. Y., Chen, L., 2023. Climatology and Changes in Extratropical Cyclone Activity in the Southern Hemisphere during Austral Winters from 1948 to 2017. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 62(8): 971–983. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-22-0061.1>
- Zhang, C., Li, T., Li, S. L., 2021. Impacts of CP- and EP-El Niño Events on the Antarctic Sea Ice in Austral Spring. *Journal of Climate*, 34(23): 9327–9348. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-21-0002.1>