

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2023.0137

CHEN Yibing, WU Qigang. Interdecadal changes in the impacts of Antarctic sea ice anomalies on the Southern Hemisphere winter and spring atmospheric circulation[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2023, 45(6):1804–1815. [陈奕冰, 吴其冈. 南极海冰异常对南半球冬春季大气环流影响的年代际变化[J]. 冰川冻土, 2023, 45(6):1804–1815.]

# 南极海冰异常对南半球冬春季大气环流影响的年代际变化

陈奕冰<sup>1</sup>, 吴其冈<sup>1,2</sup>

(1. 复旦大学 大气与海洋科学系, 上海 200438; 2. 复旦大学 极地海冰气系统与天气气候教育部重点实验室, 上海 200438)

**摘要:** 南极海冰异常是影响南半球大气环流变化的一个重要因素。南极海冰变率的主要模态被称为南极海冰偶极子(Antarctic Dipole, ADP), 具体表现为南极半岛两侧海冰的反相变化。ADP的出现受到厄尔尼诺-南方涛动事件的强烈影响, 而过去的研究显示, 厄尔尼诺在2000年后由东部型转到中部型, 伴随着该转变, 南极海冰的异常模态及其对南半球大气环流的影响也发生了年代际变化。通过对前期的南极海冰异常与滞后的南半球冬春季位势高度异常进行最大协方差分析, 发现南半球冬季至春季持续性的正位相ADP, 在1979—1999年间与南半球春季的负位相南半球环状模(Southern Hemisphere Annular Mode, SAM)显著关联, 但在2000—2021年间该相关性较弱, 转变为南半球秋季的三极型海冰异常与后期冬季的SAM显著相关。动力诊断证明, ADP及三极型海冰异常均能通过引发高频瞬变涡旋的变化, 激发并维持SAM型大气环流异常。

**关键词:** 南极海冰; 南极偶极子; 南半球环状模; 瞬变涡旋; 年代际变化

**中图分类号:** P461<sup>+</sup>.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2023)06-1804-12

## 0 引言

海冰是极地气候系统的重要组成成分, 其存在和异常变化能够调节海-气间的热动量及物质通量交换过程, 从热动力的角度参与海-冰-气间的相互作用<sup>[1]</sup>。以往的研究已经证明, 南极海冰的持续性异常可以通过直接改变南半球区域的热辐射平衡, 进而影响到纬向温度和压力梯度, 具有影响南半球大气环流的能力。Bader等<sup>[2]</sup>利用大气环流模型ECHAM5进行的数值试验结果表明, 南极海冰变化所引发的大气响应与南半球热带外大尺度大气环流变率的主要模态——南半球环状模(Southern Hemisphere Annular Mode, SAM)类似。WACCM4、CCSM3及CM2.1等多个耦合气候模型的试验结果也表明<sup>[1,3-6]</sup>, 南极海冰的异常变化会使南半球中高纬度地区对流层内的出现反相压力异常(即SAM),

驱动中纬度急流强度的改变及南北位置的偏移, 并调节极地环流和费雷尔环流的强度。而Morioka等<sup>[7]</sup>及Cunningham等<sup>[8]</sup>的试验则分别研究了威德尔海和罗斯海的海冰变化, 发现两个开阔大洋的海冰异常信号都能传播至低纬度地区。

南极海冰异常变率的主要模态被称为南极偶极子(Antarctic Dipole, ADP), 其特征表现为南极半岛两侧海冰的反相变化。Wu等<sup>[9]</sup>指出, 前期的ADP与后期的SAM在年际尺度上存在显著关联。同时, ADP还能通过影响经圈环流, 与热带至北半球的大气环流异常产生联系<sup>[10-11]</sup>。而ADP的出现和维持会受到厄尔尼诺-南方涛动(El Niño-Southern Oscillation, ENSO)事件的强烈影响: 在El Niño期间, 热带太平洋海温的异常信号通过太平洋-南美(Pacific-South America, PSA)遥相关被传递到南极地区, 在阿蒙森-别林斯高晋海诱发的异常反气旋和冷暖

收稿日期: 2023-08-02; 修订日期: 2023-10-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(91837206; 42375031)资助

作者简介: 陈奕冰, 硕士研究生, 主要从事南北极气候变化研究. E-mail: 15651873968@163.com

通信作者: 吴其冈, 教授, 主要从事气候变化研究. E-mail: qigangwu@fudan.edu

平流会促使南极半岛两侧的海冰发生反相变化<sup>[12-13]</sup>。但在 2000 年前后, ENSO 出现了年代际转变: 东部型 (eastern Pacific, EP) 和中部型 (central Pacific, CP) El Niño 的发生频率分别在 2000 年前后占主导地位<sup>[14-17]</sup>, Dou 等<sup>[14]</sup>已发现, 成熟阶段的 ENSO 与之后南半球冷季 ADP 间的相关系数在最近二十年中显著减弱, 热带太平洋的海温异常可能难以再通过引发 ADP, 进而影响南半球的大气环流。

同时, 南极海冰在 1979—1999 年间以约 12 万平方公里每十年的趋势缓慢增长, 2000—2014 年间增速先变为原来的 5 倍<sup>[18-19]</sup>, 而后在 2016 年出现了突变减少, 且于 2017、2022 年不断刷新卫星观测资料出现以来南极海冰范围的最小记录<sup>[20-21]</sup>, 随后几年又有所增加<sup>[22]</sup>, 即 2000 年之后南极海冰的变率明显增强。故考虑到 2000 年前后热带-极地连接以及南极海冰变率的年代际变化, 本研究对比分析了 1979—1999 年 (记为 P1 阶段) 和 2000—2021 年 (记为 P2 阶段) 两阶段南半球冬春季大气环流受前期海冰异常的不同影响, 并讨论了该年代际变化发生的可能原因。

## 1 资料与方法

研究使用的月平均南极海冰密集度 (sea ice concentration, SIC) 资料来自美国国家冰雪数据中心<sup>[35]</sup>, 该资料集使用高级微波扫描辐射计-地球观测系统 Bootstrap 算法生成, 空间分辨率为 25 km×25 km。本研究选取了 1979—1999 年和 2000—2021 年为两个研究时段。位势高度场、风场和热通量资料来自欧洲中期天气预报中心第五代大气再分析资料集 (ERA5)<sup>[23-24]</sup>, 采用的空间分辨率为 2.5°×2.5°。

研究主要对南极 SIC 和 20°~90°S 的 500 hPa 位势高度场 (Z500) 进行了最大协方差分析 (Maximum Covariance Analysis, MCA) 计算, 其中 MCA 使用到数学中的奇异值分解函数<sup>[25]</sup>, 可以有效分析两个资料阵时空变化之间的联系<sup>[25]</sup>, 计算得到的左右场的时间序列分别记为 MCA-SIC 和 MCA-Z500 时间序列。本研究关注 MCA 第一模态的结果, 即两个时间序列的协方差达到最大的首要模态结果。选取前期的海冰异常与滞后的大气场进行 MCA 计算, 可以用于研究海冰异常对后期大气环流的影响<sup>[9]</sup>, 得到的首要 MCA-SIC 时间序列和 SIC 同质空间型代表对后期大气环流产生主要影响的 SIC 异常时间序列和空间模态, 首要 MCA-Z500 时间序列和

Z500 异质空间型代表受前期 SIC 异常主要影响的大气环流异常时间序列和空间模态。参照 Czaja 等<sup>[26]</sup>论文中的蒙特卡洛方法, 对 MCA-SIC 和 Z500 时间序列进行 100 次乱序计算, 以检验两者平方协方差的显著性。此外结合了其他的气象统计方法包括经验正交函数 (Empirical Orthogonal Function, EOF) 分解法、线性回归、合成和相关分析, 置信度水平检验使用双边 Student-*t* 检验。MCA 和 EOF 计算前, 通过对 SIC 的每个网格点乘以面积平方根、对 Z500 乘以纬度余弦平方根的方式来进行面积加权, 并在所有计算前分别去除了两个研究时段的气候态及利用最小二乘法计算的线性趋势。由于 ENSO 事件能显著影响到南半球大气环流和南极海冰的异常分布<sup>[12,27]</sup>, 研究中参考 Wu 等<sup>[9]</sup>的方法, 选取与前期 6 个月 Niño 3.4 指数的最大回归系数, 从原始场中减去回归拟合值, 以去除热带太平洋海温异常对结果的影响。采用的 Niño 3.4 指数下载自美国气候预测中心网站。计算时选取连续的 3 个月为每个季节, 且本研究中提到的季节均为南半球季节。由于冷季的大气环流更易产生变化<sup>[1]</sup>, 对海冰异常的响应可能更为强烈, 故本文选取冬春季大气场进行研究。

为了分析瞬变涡动对大气环流异常的作用, 计算了 2~8 天滤波后的 300 hPa 瞬变涡动动能 (EKE):  $(\overline{u'^2} + \overline{v'^2})/2$ , 其中“—”和“'”分别表示时间平均和扰动, *u* 表示纬向风, *v* 表示经向风。同时计算了 E 矢量的水平分量<sup>[28]</sup>:

$$[(\overline{v'^2} - \overline{u'^2})/2, -\overline{u'v'}] \quad (1)$$

此外, 通过计算准地转位势倾向方程进一步了解涡流响应对平均流响应的贡献, 参考 Lau 的方法<sup>[29]</sup>将位势倾向定义为:

$$\frac{\partial z}{\partial t} = \frac{f}{g} \nabla^2 \pi \quad (2)$$

式(2)中的  $\pi$  表示瞬时涡流涡动通量的收敛性, 定义为:

$$\pi = \frac{1}{r^2 \cos \theta} \left( \frac{\partial}{\partial \theta} \frac{1}{\cos \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \cos^2 \theta - \frac{1}{\cos \theta} \frac{\partial^2}{\partial \lambda^2} \right) \overline{u'v'} + \frac{1}{r^2 \cos \theta} \frac{\partial^2}{\partial \lambda \partial \theta} \cos \theta (u'^2 - v'^2) \quad (3)$$

## 2 结果与分析

### 2.1 海冰异常对大气环流影响的年代际变化

图 1 中两个阶段首要 MCA-Z500 和 MCA-SIC 时间序列的平方协方差都在 lag 为 0 和 1 时达到最

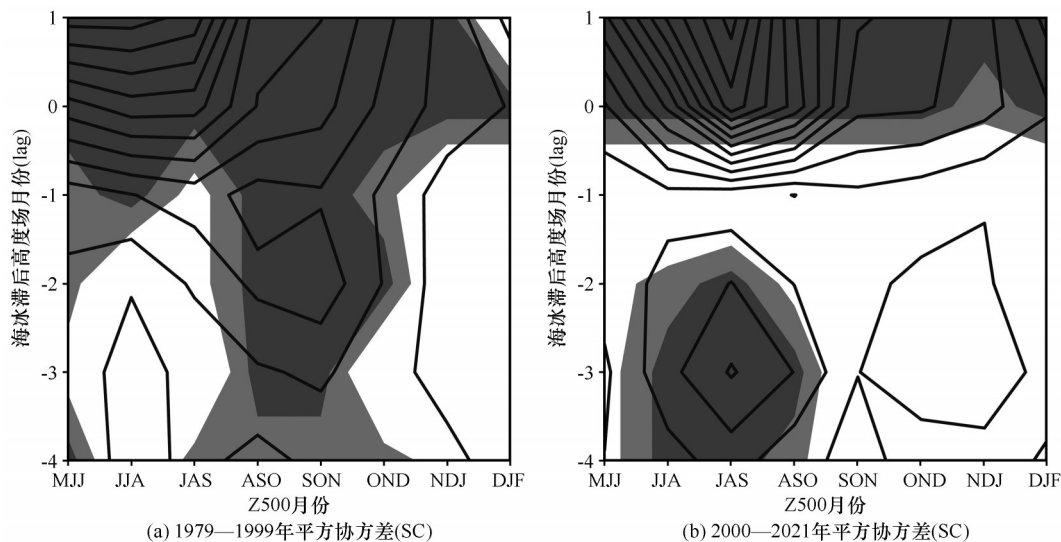


图1 1979—1999年(a)和2000—2021年(b)500 hPa 20°~90° S位势高度场异常和南极SIC异常的首要MCA时间序列间的平方协方差系数(横轴代表选取的位势高度场月份从5月到7月(MJJ)至12月到次年2月(DJF),纵轴代表海冰场滞后位势高度场的月份(记为lag),lag为负时代表选取前期的海冰和滞后的位势高度进行计算,lag为0时代表选取同期的海冰和位势高度;深(浅)阴影表示超过95%(90%)置信度月份)

Fig. 1 The 1979—1999 (a) and 2000—2021 (b) squared covariance coefficient associated with the first MCA time series between anomaly fields of the Z500 (20°~90° S) and the Antarctic SIC as a function of seasons and lags. The x-axis denotes the months assigned to Z500, from May to July (MJJ) to December to February (DJF) of the following year. SIC leads Z500 at negative lags indicated (in months) on the y-axis. When the lag is negative, it represents the selection of previous sea ice and lagging geopotential heights for calculation. When lag is 0, it represents the selection of sea ice and geopotential heights for the same season. Shading indicates the 90% (heavy) and 95% (the most heavy) confidence levels

强,且具有95%置信度,分别与以往研究所指出的冰-气间存在相互作用、及大气环流能迫使海冰发生异常变化的结论吻合<sup>[30-31]</sup>,而lag为负值的情况为研究的重点。如果海冰的异常变化仅是对大气被动的响应,lag为负值时不会出现显著的协方差,而图1显示,虽然出现在不同季节,两个阶段lag取-1到-4时都存在显著的协方差,证明前期海冰异常会对后期南半球冬春季大气环流产生影响,但影响的季节发生了年代际改变。1979—1999年主要是8月到10月(ASO)和9月到11月(SON)的Z500受到前期海冰异常的影响,以下的分析将该阶段大气场选定在SON季节(ASO季节的结果与之类似),并取其前期1~4个月即MJJ、JJA、JAS和ASO季节的SIC异常来研究气候效应;而P2阶段转变为六月到八月(JJA)和七月到九月(JAS)的Z500受前期海冰异常所影响,故将该阶段大气场选定在JAS季节(JJA季节的结果与之类似),取其前期1~4个月即MAM、AMJ、MJJ和JJA季节作为对后期大气场产生影响的海冰季节来进行研究。

为了进一步研究前期海冰异常与后期大气环流的联系,对1979—1999年SON(2000—2021年

JJA)季节的Z500与lag为-4至+1的南极SIC异常进行MCA计算,得到图2(图3)中的SIC同质协方差图和Z500异质协方差图。由于MCA的结果成对出现,选取图2和图3所示的位相进行研究,反位相的结果同理相反。图2(a)~(d)显示,1979—1999年南半球冬春季海冰主要以ADP型异常对后期春季大气环流产生影响,而图3(a)~(d)显示2000—2021年秋冬季的海冰以与前一阶段不同的三极型海冰异常对后期大气产生影响,其正负异常中心分布于威德尔海及其东西两侧,且与所处季节偏暖有关<sup>[1]</sup>,P2阶段威德尔海的SIC异常最值更靠近南极大陆且经向范围收缩,南极东部边缘的异常强度和显著性也减弱。

表1中展示了1979—1999年SON和2000—2021年JJA季节Z500和前期1~4个月SIC异常的首要MCA-SIC时间序列之间的相关系数。相关系数在滞后1个月时约为0.8,滞后3个月时仍能保持0.6左右且具有显著性,说明两个阶段海冰异常都具有较强的时空连续性,能对后期的大气环流产生持续性影响。伴随着前期的海冰异常影响,图2与图3中两阶段的Z500响应都呈现出较为典型的



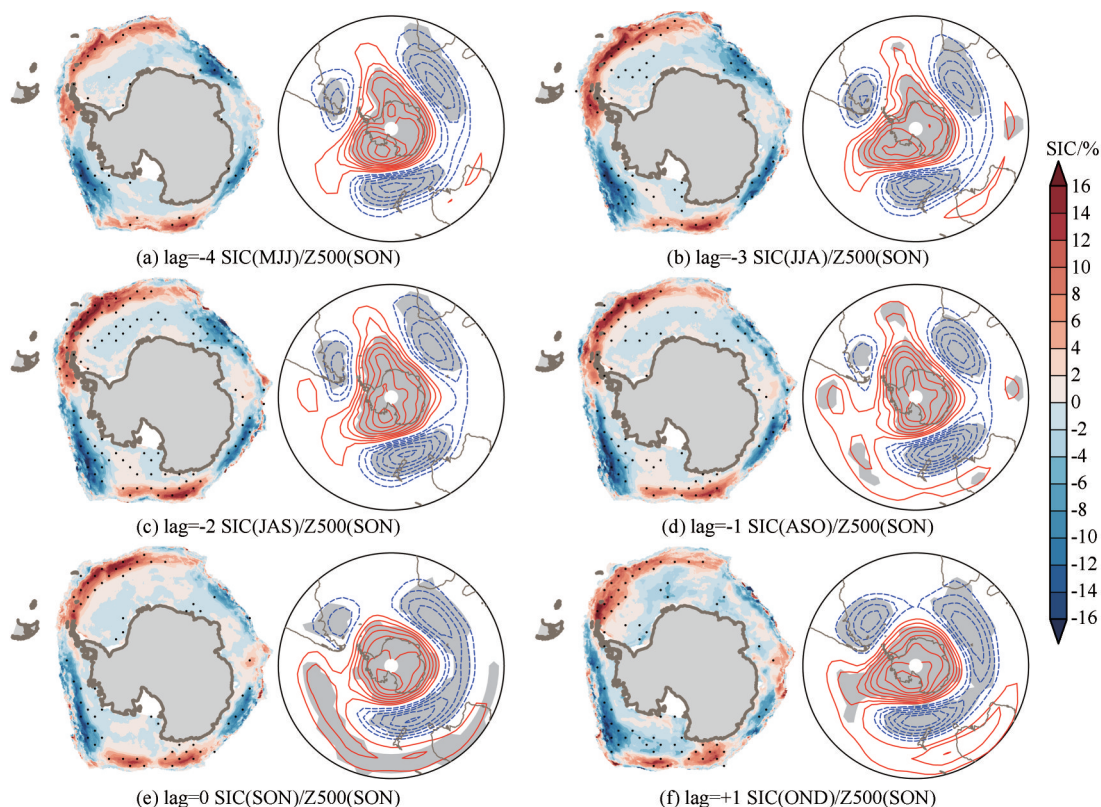


图2 1979—1999年 SON 季节 500 hPa 位势高度场异常与前期 0~4 个月和滞后 1 个月的南极 SIC 异常 MCA 首要模态的同质 (左侧) 和异质 (右侧) 协方差空间型 [位势高度的等值线间隔为 7.5 gpm, 实线 (虚线) 为正 (负) 值, 零线省略; 阴影和打点区分别代表位势高度和海冰场关于首要 MCA-SIC 时间序列回归超过 95% 置信度区域]

Fig. 2 1979—1999 (left) homogeneous SIC and (right) heterogeneous Z500 covariance maps in the first MCA mode at lags from -4 to +1 months when Z500 is fixed on SON seasons (Contour interval is 7.5 gpm for Z500; Negative contours are dashed and the zero line is omitted. The shaded and dotted areas indicate significance at 95% confidence levels)

SAM 特征<sup>[32-33]</sup>: 高纬度的南极大陆上空和中纬度的位势高度场基本呈反相变化, 非纬向对称成分主要位于阿蒙森海地区, 该大气环流型也是 1979—1999 年 SON 和 2000—2021 年 JJA 季节 Z500 的 EOF 首要变化模态。850 hPa 和 150 hPa 位势高度场的结果与之相似 (图略), 证明该种类似 SAM 的大气响应在对流层内具有深厚的准正压结构。表 2 显示 P1 阶段首要 MCA-Z500 时间序列与该时期 SON 季节 Z500 EOF 首要模态 (EOF1) 时间序列间的相关性均大于 0.9, 并具有 95% 置信度, 而 P2 阶段 MCA-Z500 的时间序列与 JAS 季节 Z500 的 EOF 首要模态时间序列间的相关性均大于 0.98 且 95% 置信显著。两阶段分别利用 ASO 和 JJA 季节的 Z500 异常与 SIC 异常计算的 MCA 结果与之相似。MCA-Z500 和 Z500 的 EOF1 时间序列间的显著相关性, 证明 1979—1999 年和 2000—2021 年两个阶段, 前期的南极海冰异常可以显著影响到后期南半球冬春季大气环流的主要变率。

图 4 显示了两阶段 MAM, JJA 和 SON 季节 SIC 的 EOF1 空间模态。1979—1999 年 EOF1 呈现 ADP 型异常, 南极半岛两侧的海冰异常为反位相分布, 同时该阶段 MJJ、JJA、JAS 和 SON 季节的海冰 EOF1 也均为 ADP (MJJ 和 JAS 图略), EOF1 时间序列与图 2 中对应季节的 MCA-SIC 时间序列间的相关系数分别为 0.67、0.85、0.92 和 0.89 (均具有 95% 置信度), 表明 P1 阶段前期持续的 ADP 与 SON 季节负位相 SAM 显著关联。P2 阶段 MAM 季节的 EOF1 中威德尔海和罗斯海海冰异常减少, 阿蒙森-别林斯高晋海海冰异常增加, AMJ 季节的 EOF1 (图略) 与 MAM 季节的类似, 而 JJA 季节的 EOF1 与 P1 阶段的 ADP 相似, 但威德尔海海冰异常强度明显偏弱, 罗斯海海冰异常略微加强。该阶段 MAM-MJJ 季节的 EOF1 时间序列与图 3 中对应季节的 MCA-SIC 时间序列间的相关系数为 0.69、0.69 和 0.55 (均具有 95% 置信度), 也反映出 P2 阶段海冰异常的 EOF1 与图 3(a)~(d) 中影响后期大气环流的海冰异常模态



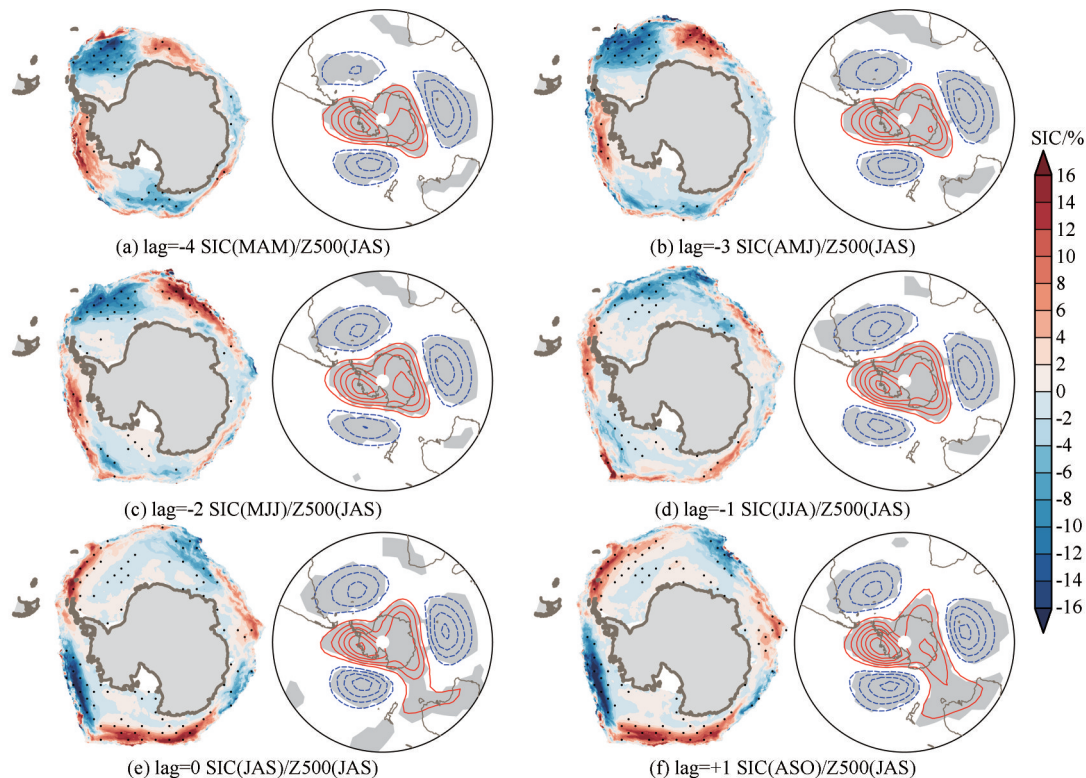


图3 2000—2021年JAS季节500 hPa位势高度场异常与前期0~4个月和滞后1个月的南极SIC异常MCA首要模态的同质(左侧)和异质(右侧)协方差空间型[位势高度的等值线间隔为7.5 gpm,实线(虚线)为正(负)值,零线省略;阴影和打点区分别代表位势高度和海冰场关于首要MCA-SIC时间序列回归超过95%置信度区域]

Fig. 3 2000—2021 (left) homogeneous SIC and (right) heterogeneous Z500 covariance maps in the first MCA mode at lags from -4 to +1 months when Z500 is fixed on JAS seasons (Contour interval is 7.5 gpm for Z500; Negative contours are dashed and the zero line is omitted; The shaded and dotted areas indicate significance at 95% confidence levels)

表1 1979—1999年(P1)超前SON季节和2000—2021年(P2)超前JAS季节1~4个月的首要MCA-SIC时间序列之间的相关系数

Table 1 Correlation coefficients between the first MCA-SIC time series in Fig. 2 and Fig. 3

$R(P1/P2)$	lag=-3	lag=-2	lag=-1
lag=-4	0.78**/0.88**	0.67**/0.68**	0.59**/0.64**
lag=-3	/	0.82**/0.84**	0.71**/0.71**
lag=-2	/	/	0.82**/0.80**

注: \*\*代表超过95%置信度。  
Note: \*\* indicate that the coefficients are significant at 95% confidence levels.

相关性较高,可以对后期南半球冬季的SAM产生影响。

两阶段南半球秋冬季海冰异常的主模态发生了年代际改变,P2阶段传统的ADP不再作为优势模态出现,这可能与ENSO-ADP间联系在2000年之后减弱有关。Dou等<sup>[14]</sup>提出,2000年以前,受ENSO激发的塔斯曼海海温异常可作为“海洋桥”,引发到极

地的PSA波列,加深的阿蒙森低压导致罗斯—阿蒙森海和威德尔海海冰的反向变化,建立了成熟季ENSO与其后冷季ADP的联系,但在2000年之后,ENSO与塔斯曼海海温的相关性减小,ENSO很难再通过影响塔斯曼海的海温异常来影响到ADP的形成,冷季ADP指数与前期十二月到二月的Niño4指数的相关系数也从1979—2001年的0.72,显著减小到2002—2020年的0.21,ENSO-ADP的联系减弱。Guo等<sup>[15]</sup>指出与2000年后发生频率升高的CP-El Niño相对应的南半球春季热带降水激发的罗斯贝波波源,会相对于EP-El Niño向西移动约20°~30°,导致PSA响应变弱并向西偏移,有利于罗斯海和威德尔海海冰的增加和阿蒙森—别林斯高晋海海冰的减少,即类似于图4(d)中的EOF1三极型海冰异常。

以上EOF和MCA分析的结果表明,两阶段影响后期大气环流的海冰异常首要模态及作用季节发生的年代际改变,可能与P2阶段ADP减弱有关。ADP在2000年后不再作为海冰变率的主要模态出

表2 1979—1999年和2000—2021年,海冰滞后Z500-4到+1个月计算的首要MCA-Z500时间序列,与对应季节的Z500 EOF1时间序列间的相关系数(R1),以及首要MCA-SIC时间序列与同期SIC EOF1时间序列间的相关系数(R2)

Z500		SIC lags					
	相关系数	-4	-3	-2	-1	0	1
P1 SON	R1	0.95**	0.96**	0.92**	0.90**	0.92**	0.94**
	R2	0.67**	0.85**	0.92**	0.89**	0.91**	0.67**
P1 ASO	R1	0.82**	0.84**	0.90**	0.90**	0.89**	0.71**
	R2	0.61**	0.78**	0.84**	0.87**	0.91**	0.95**
P2 JAS	R1	0.98**	0.99**	0.99**	0.99**	0.98**	0.99**
	R2	0.69**	0.69**	0.55**	0.20*	0.96**	0.99**
P2 JJA	R1	0.95**	0.98**	0.97**	0.95**	0.99**	0.99**
	R2	0.75**	0.57**	0.60**	0.56**	0.87**	0.97**

注：\*和\*\*分别代表超过90%和95%置信度。  
Note: \*\* (\*) indicate that the coefficients are significant at 95% (90%) confidence levels.

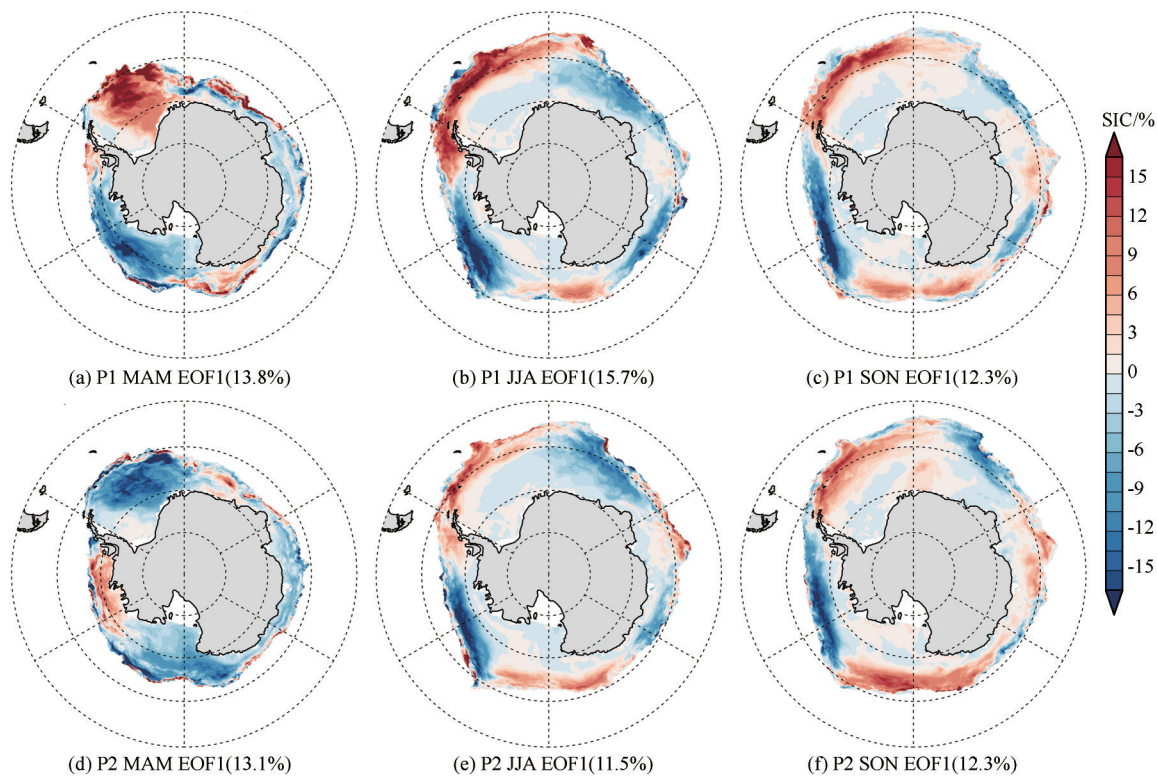


图4 1979—1999年(a)~(c)和2000—2021年(d)~(f)MAM、JJA和SON季节南极SIC异常的EOF首要模态  
Fig. 4 1979—1999 (a)~(c) and 2000—2021 (d)~(f) Antarctic SIC EOF1 of MAM, JJA and SON seasons

现,图2(a)~(d)中的ADP在图3(a)~(d)中也不再是影响南半球大气环流的首要模态,海冰异常模态发生了年代际改变,导致其对后期大气环流的影响也产生了变化。而海冰异常模态的变化很可能与热带太平洋海温异常对其影响的年代际改变有关: P1阶段ENSO与ADP联系较强<sup>[14]</sup>,ADP可作为热带太平洋海温异常影响南半球热带外大气环流的桥

梁,建立热带到极地的联系,但P2阶段ENSO对南极海冰的影响作用减弱且影响位置改变,部分解释了海冰模态的变化。与此同时SAM、纬向波数3模态(Zonal Wave 3, ZW3)大气季节内振荡(Madden-Julian Oscillation, MJO)和印度洋偶极子(Indian Ocean Dipole, IOD)等其他大气模态的内部变率和遥相关对南极海冰的变化也存在着重要影响<sup>[34-38]</sup>,



这些强迫因子在不同时期的对不同区域的海冰进行调制作用<sup>[39]</sup>,因此两阶段与后期大气环流异常有关的首要海冰异常模态及作用季节发生了年代际改变,对应的大气异常响应也有所差别。同时,图2(e)~(f)和图3(e)~(f)显示出在冰气相互作用及SAM的强迫下,两个阶段均出现ADP型海冰异常,说明ADP的出现与南半球大气环流的异常变化存在显著联系。

## 2.2 影响大气环流的可能机制

由MCA计算的结果可以发现,虽然影响到后期大气环流的海冰异常主要模态在2000年前后发生了年代际改变,但P1阶段南半球春季和P2阶段南半球冬季的大气环流对于前期海冰异常的响应整体呈现类似SAM的结构,本节主要研究了前期海冰异常影响下该大气环流异常出现的可能机制。

首先,海冰会通过改变海表反照率及海-气间的热通量来影响大气环流状态<sup>[40]</sup>,而两阶段海冰异常空间型会引发不同的热力效应。南半球冷季,较

低的日照量抑制了反照率效应,为了研究两个阶段海冰异常型对热通量的影响,图5利用标准化首要MCA-SIC时间序列计算了1979—1999年MJJ-ASO季节[图5(a)~(d)]和2000—2021年MAM-JJA季节[图5(e)~(h)]热通量的合成分析。由于海冰覆盖区的隔绝效应,高纬度SIC正(负)异常区存在热通量负(正)异常,异常的最大值发生在冰缘附近,位于极地环流和中纬度环流之间<sup>[3]</sup>,且具有下游效应,故有利于海冰异常信号向极地外地区的传播。由于图2(a)~(d)中ADP的存在,图5(a)~(d)中威德尔海和罗斯海热通量出现反相异常,且下游南大西洋和南太平洋出现与极地符号相反的大范围异常热通量。而2000—2021年的结果图3(a)~(d)中,三极型海冰异常以威德尔海为中心,故图5(e)~(h)中热通量异常最值持续出现在威德尔海及南大西洋,中低纬度的南太平洋和南印度洋也存在热通量的异常变化。海冰异常引发的热通量异常从地表传递至大气,进而影响南半球大尺度的大气环流。

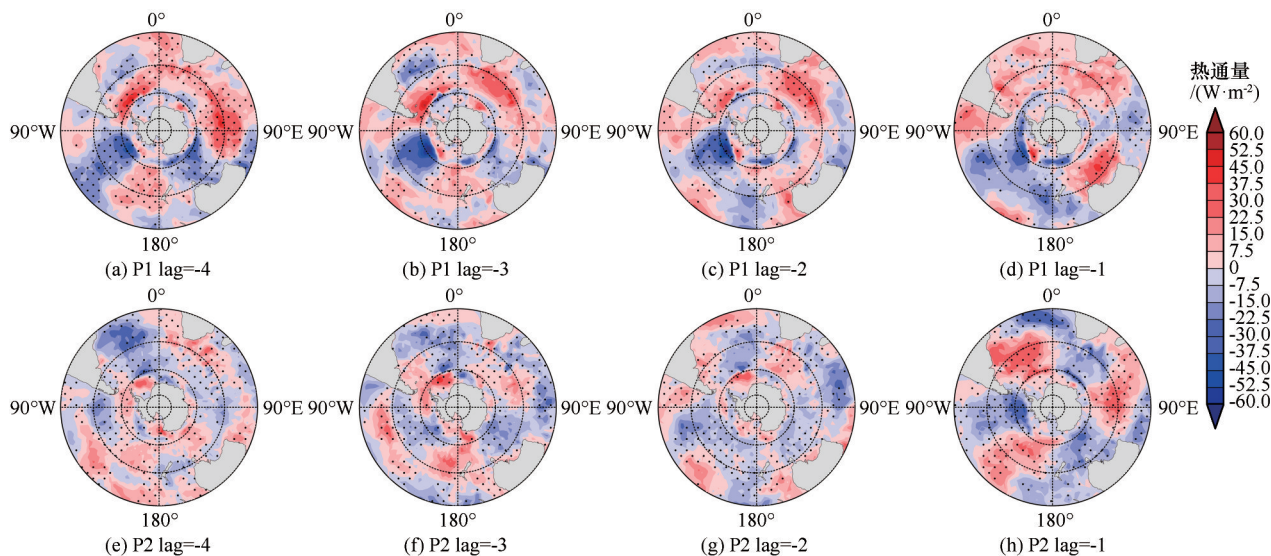


图5 超前1979—1999年SON季节(a)~(d)和2000—2021年JAS季节(e)~(h)1~4个月的感热、潜热之和关于标准化首要MCA-SIC时间序列的合成分析结果(打点表示结果超过95%置信度)

Fig. 5 Composite response in seasons preceding (a)~(d) 1979—1999 SON and (e)~(h) 2000—2021 JAS 1~4 months surface energy heat flux of the normalized MCA-SIC time series (The dotted areas indicate significance at 95% confidence levels)

此外,相关研究已指出,海冰变化影响大气环流的过程中涉及到强涡流相互作用<sup>[9,41]</sup>,而南半球的地形变化的影响与北半球相比较弱,定常波对平均流的贡献与涡旋作用相比较小,南半球的大气环流异常主要受涡旋运动驱动的纬向流异常主导<sup>[1,42]</sup>,其中高频瞬变涡旋对南半球总涡强迫贡献最大<sup>[43]</sup>,故可通过研究海冰异常对瞬变涡旋的影

响,来分析与前期海冰异常有关的SAM型响应出现及维持的可能机制。

图6中等值线代表1979—1999年SON和2000—2021年JAS季节300 hPa瞬变EKE关于前期1~4个月标准化首要MCA-SIC时间序列的回归,发现海冰异常会引发显著的瞬变涡旋响应。在60°S和40°S纬度带附近即SAM中位势高度场反相变化的临界



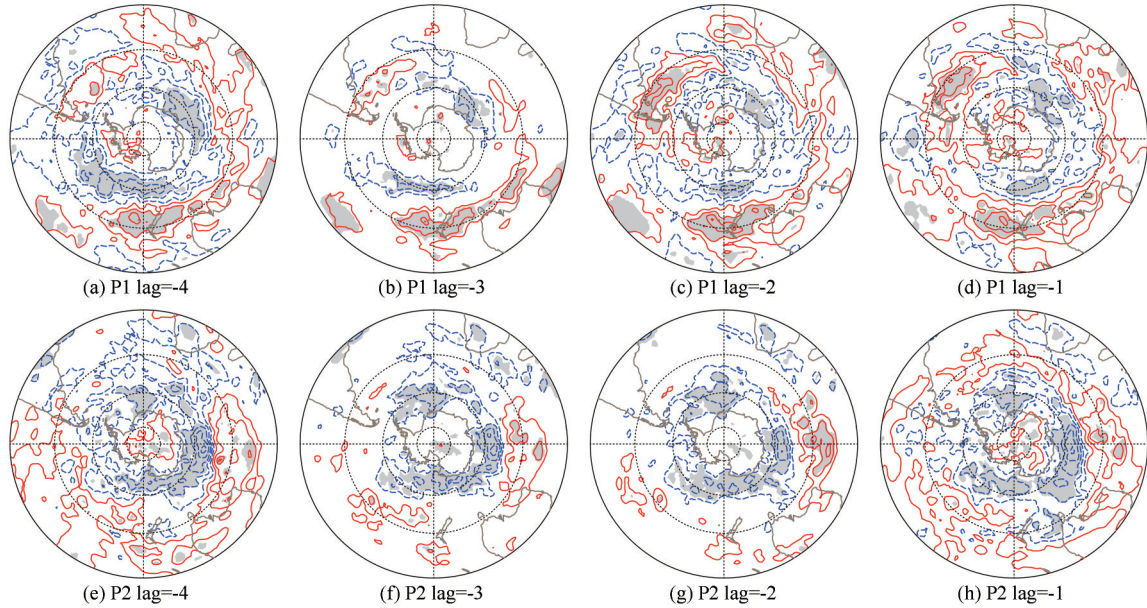


图6 1979—1999年SON季节(a)~(d)和2000—2021年JAS季节(e)~(h)的500 hPa EKE(等值线间隔为  $3 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ , 红色实线代表正异常)关于超前1~4个月的标准化的首要MCA-SIC时间序列的回归结果(阴影表示结果超过95%置信度)

Fig. 6 Regression coefficients of 1979—1999 SON (a)~(d) and 2000—2021 JAS seasons (e)~(h) 500 hPa EKE (interval:  $3 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ , red contours represent positive) onto the normalized MCA-SIC time series at lags from -4 to -1 months (Shadings indicate that the coefficients are significant at 95% confidence levels)

区域,存在着明显的EKE异常。1979—1999年,南半球春季 $60^\circ \text{S}$ 大洋上空出现显著的风暴轴减弱,前期1~4个月的海冰影响持续且稳健[图6(a)~(d)],中纬度上空出现大范围的风暴加强,并在副热带地区存在纬向延伸的动能极大值,对SAM负位相伴随的西风急流在极地侧的减弱和副热带侧的加强作用明显,并借助动能与势能的相互转化加深了SAM型结构。2000—2021年,前期海冰异常对南半球冬季风暴活动的影响与前一阶段相比在高纬度更强,且集中在南极大陆周围[图6(e)~(h)],三个最强作用区分别位于约 $55^\circ \text{S}$ 的南大西洋、南印度洋和南太平洋,而中纬度EKE正异常区域主要出现在南印度洋到南太平洋。图6的结果证明两种海冰异常模态都通过激发南半球瞬变涡旋的异常变化,支持了SAM中高纬反相位势高度异常的产生。

E矢量能诊断波流间的相互作用,其辐合辐散能反映瞬变涡旋对纬向气流的削弱或加强<sup>[44]</sup>。故进一步计算了1979—1999年南半球SON和2000—2021年JAS季节300 hPa E矢量的水平分量关于前期1~4个月标准化首要MCA-SIC时间序列的回归结果(图7)。与海冰异常相关的E矢量在高纬西风减弱区有强烈的辐合,且P2阶段辐合更为明显,作用的最强区与EKE异常最值区域吻合,表明瞬态涡旋对西风强烈的减弱作用。中纬度到副热带的E矢

量出现显著辐散,表明瞬变涡旋对副热带西风风速存在显著的加强作用,P1阶段辐散在南太平洋东部最强,P2阶段转移至南印度洋。E矢量的响应证明,海冰异常所引发的瞬变涡旋异常,能影响到伴随着SAM的纬向风的改变。

为进一步分析两种海冰异常模态是否通过影响瞬变涡旋运动使大气环流呈现出负SAM的倾向,图8计算了位势高度倾向方程关于前期1~4个月标准化首要MCA-SIC时间序列的回归。图8与图2(a)~(d)和图3(a)~(d)中位势高度的异常空间型特征十分相似,均在中高纬度呈现反相异常。1979—1999年的南半球春季,与前期ADP型海冰异常有关的瞬变涡旋作用与南极洲持续稳健的位势高度倾向正异常有关[图8(a)~(d)],位于中纬度新西兰南部、阿根廷和南非南部海洋的负位势高度也受瞬变涡旋的持续影响,超前4个月的瞬变涡旋对南大西洋东部到南印度洋西部及澳大利亚南部的带状位势高度异常也存在显著强迫[图8(a)]。相较于前一阶段,2000—2021年南半球冬季与前期海冰异常有关的瞬变涡旋作用在高纬度增强[图8(e)~(h)],同时中纬度瞬变涡旋强迫下的位势高度倾向异常中心向东偏移,在三大洋中部各有一个负异常中心[图8(e)~(h)],与图3(e)~(h)中三个海区上空的位势高度负异常对应良好,进一步证明由前期海冰异

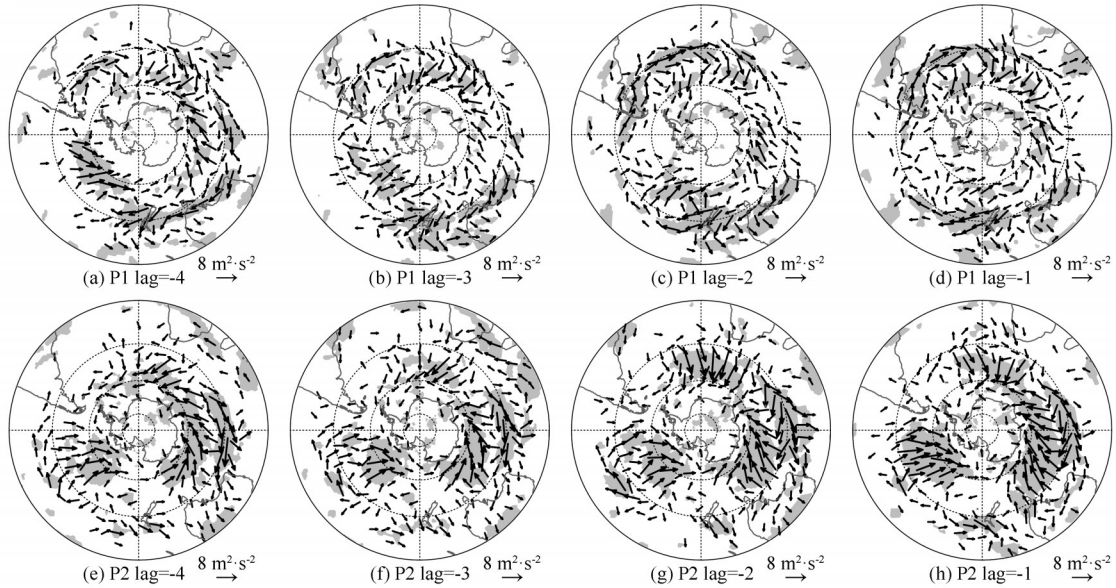


图7 1979—1999年SON(a)~(d)和2000—2021年JAS季节(e)~(h)的500 hPa E矢量的水平分量,关于超前1~4个月的标准化首要MCA-SIC时间序列的回归结果(阴影表示结果超过95%置信度)

Fig. 7 Regression coefficients of 1979—1999 SON (a)~(d) and 2000—2021 JAS seasons (e)~(h) 500 hPa horizontal component of E-vector onto the normalized MCA-SIC time series at lags from -4 to -1 months (Shadings indicate that the coefficients are significant at 95% confidence levels)

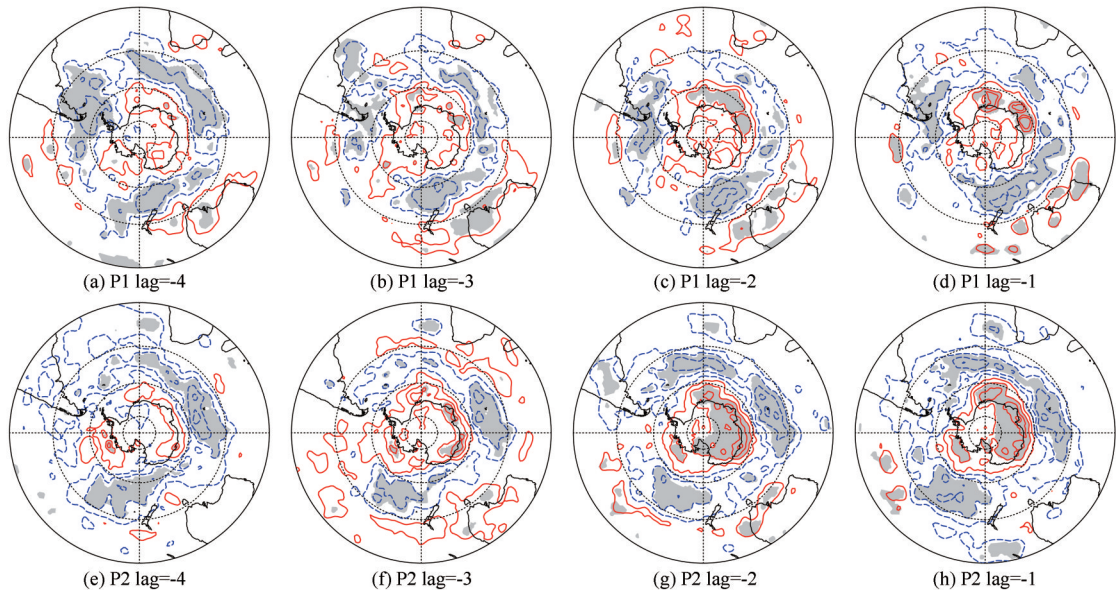


图8 1979—1999年SON(a)~(d)和2000—2021年JAS季节(e)~(h)的300 hPa位势高度倾向关于超前1~4个月的标准化首要MCA-SIC时间序列的回归结果,等值线间隔为 $3 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (阴影代表超过95%置信度区域)

Fig. 8 Regression coefficients of 1979—1999 SON (a)~(d) and 2000—2021 JAS (e)~(h) 300 hPa geopotential height tendencies (interval:  $3 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) onto the normalized MCA-SIC time series at lags from -4 to -1 months (Shadings indicate that the coefficients are significant at 95% confidence levels)

常引发的瞬态涡旋强迫,在1979—1999年南半球春季和2000—2021年冬季大气环流出现类似SAM型异常的倾向中存在重要贡献。

3 结论与讨论

本研究主要通过最大协方差分析及蒙特卡洛

显著性检验,分析了前期南极海冰异常对南半球冬季大气环流影响的年代际变化,发现1979—1999年间主要是南半球春季大气环流受前期ADP型海冰异常的影响,冬季大气与前期海冰异常的联系并不显著,而2000—2021年间转变为南半球冬季大气环流异常与前期秋冬季海冰异常显著相关,且影响



到后期大气环流的海冰异常主要模态不再是ADP而转变为三极型。受前期海冰异常所影响的大气环流在2000年前后均出现类似SAM的响应, 对流层位势高度以 $60^{\circ}\text{S}$ 为界在中高纬度呈反相变化。相关的动力诊断发现, 两种海冰异常均可以通过影响高频瞬变涡旋来产生和维持SAM型大气环流异常, 后续的研究中可利用数值模拟试验来验证两种海冰异常模态对SAM的影响及具体机理。

此外, 本研究中虽然去除了ENSO的年际变化在南极海冰影响南半球大气环流过程中的干扰, 但南极海冰与南半球大气环流关系的改变, 很可能与ENSO的年代际变化存在密切联系。正如Dou等<sup>[14]</sup>指出的, 在2000年之前ENSO可通过激发塔斯曼海的海温异常产生到南极半岛的波列, 促使ADP产生。该过程建立了ENSO与南极海冰的联系, 进而通过激发南极海冰的异常影响到南半球的大气环流。而2000年以后, 发生频率升高的CP-Niño与塔斯曼海海温的异常相关性微弱<sup>[14-15]</sup>, 热带太平洋海温与极地的联系减弱, 海冰异常的模态受其他因素影响加深, 例如关于2016年南极海冰出现突变减少的原因, 相关研究就指出热带印度洋的遥相关作用强于热带太平洋<sup>[45-46]</sup>。故2000年前后ENSO等海冰强迫因子在南极海冰异常影响南半球大气环流过程中的不同作用, 还需要进一步研究和确认。

## 参考文献(References):

- [1] Tewari K, Mishra S K, Salunke P, et al. Potential effects of the projected Antarctic Sea-ice loss on the climate system[J]. *Climate Dynamics*, 2023, 60(1): 589-601.
- [2] Bader J, Flügge M, Kvamstø N G, et al. Atmospheric winter response to a projected future Antarctic sea-ice reduction: a dynamical analysis[J]. *Climate Dynamics*, 2013, 40(11): 2707-2718.
- [3] Raphael M N, Hobbs W, Wainer I. The effect of Antarctic sea ice on the Southern Hemisphere atmosphere during the southern summer[J]. *Climate Dynamics*, 2011, 36(7): 1403-1417.
- [4] Parise C K, Pezzi L P, Hodges K I, et al. The influence of sea ice dynamics on the climate sensitivity and memory to increased Antarctic sea ice[J]. *Journal of Climate*, 2015, 28(24): 9642-9668.
- [5] England M, Polvani L, Sun Lantao. Contrasting the Antarctic and Arctic atmospheric responses to projected sea ice loss in the late twenty-first century [J]. *Journal of Climate*, 2018, 31(16): 6353-6370.
- [6] Ayres H C, Screen J A. Multimodel analysis of the atmospheric response to Antarctic sea ice loss at quadrupled  $\text{CO}_2$  [J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(16): 9861-9869.
- [7] Morioka Y, Engelbrecht F, Behera S K. Role of Weddell Sea ice in South Atlantic atmospheric variability [J]. *Climate Research*, 2017, 74(2): 171-184.
- [8] Cunningham C A, Bonatti J P. Local and remote responses to opposite Ross Sea ice anomalies: a numerical experiment with the CPTEC/INPE AGCM[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2011, 106(1/2): 23-44.
- [9] Wu Qigang, Zhang Xiangdong. Observed evidence of an impact of the Antarctic sea ice dipole on the Antarctic oscillation [J]. *Journal of Climate*, 2011, 24(16): 4508-4518.
- [10] Bian Lingen, Lin Xuechun. Antarctica sea-ice oscillation and its possible impact on monsoon of south sea and China summer rainfall [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2008, 30(2): 196-203. [卞林根, 林学椿. 南极海冰涛动及其对东亚季风和我国夏季降水的可能影响[J]. *冰川冻土*, 2008, 30(2): 196-203.]
- [11] Wang Shuang, Wu Qigang, Liu Shizuo, et al. Impacts of Antarctic sea ice oscillation on summer atmospheric circulation in the Northern Hemisphere [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2022, 46(6): 1349-1365. [王爽, 吴其冈, 刘师佐, 等. 南极海冰涛动对北半球夏季大气环流的影响[J]. *大气科学*, 2022, 46(6): 1349-1365.]
- [12] Yuan Xiaojun. ENSO-related impacts on Antarctic sea ice: a synthesis of phenomenon and mechanisms [J]. *Antarctic Science*, 2004, 16(4): 415-425.
- [13] Yuan Xiaojun, Kaplan M R, Cane M A. The interconnected global climate system: a review of tropical - polar teleconnections[J]. *Journal of Climate*, 2018, 31(15): 5765-5792.
- [14] Dou Juan, Zhang Renhe. Weakened relationship between ENSO and Antarctic sea ice in recent decades [J]. *Climate Dynamics*, 2023, 60(5/6): 1313-1327.
- [15] Guo Yuanyuan, Wen Zhiping, Zhu Yu, et al. Effect of the late-1990s change in tropical forcing on teleconnections to the Amundsen-Bellinghousen Seas region during austral autumn [J]. *Journal of Climate*, 2022, 35(17): 5687-5702.
- [16] Yang Song, Li Zhenning, Yu Jinyi, et al. El Niño-Southern Oscillation and its impact in the changing climate [J]. *National Science Review*, 2018, 5(6): 840-857.
- [17] McPhaden M J, Santoso A, Cai W. Introduction to El Niño Southern Oscillation in a changing climate [M]. *American Geophysical Union (AGU)*, 2020: 1-19.
- [18] Meehl G A, Arblaster J M, Chung C T Y, et al. Sustained ocean changes contributed to sudden Antarctic Sea ice retreat in late 2016 [J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 14.
- [19] Parkinson C L. A 40-y record reveals gradual Antarctic sea ice increases followed by decreases at rates far exceeding the rates seen in the Arctic [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, 116(29): 14414-14423.
- [20] Turner J, Holmes C, Caton Harrison T, et al. Record low Antarctic sea ice cover in February 2022 [J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, 49(12): e2022GL098904.
- [21] England M R, Polvani L M, Sun Lantao, et al. Tropical climate responses to projected Arctic and Antarctic sea-ice loss [J]. *Nature Geoscience*, 2020, 13(4): 275-281.
- [22] Zhong Xinyue, Kang Shichang, Guo Wanqin, et al. The rapidly shrinking cryosphere in the past decade: an interpretation of cryospheric changes from IPCC WGI Sixth Assessment Report [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2022, 44(3): 946-953. [钟歆玥, 康世昌, 郭万钦, 等. 最近十多年来冰冻圈加速萎缩——IPCC第六次评估报告之冰冻圈变化解读[J]. *冰川冻土*, 2022, 44(3): 946-953.]
- [23] Jones P D, Lister D H. Antarctic near-surface air temperatures compared with ERA-Interim values since 1979 [J]. *International Journal of Climatology*, 2015, 35(7): 1354-1366.



- [24] Gossart A, Helsen S, Lenaerts J T M, et al. An evaluation of surface climatology in state-of-the-art reanalyses over the Antarctic ice sheet[J]. *Journal of Climate*, 2019, 32(20): 6899-6915.
- [25] Wallace J M, Smith C, Bretherton C S. Singular value decomposition of wintertime sea surface temperature and 500-mb height anomalies[J]. *Journal of Climate*, 1992, 5(6): 561-576.
- [26] Czaja A, Frankignoul C. Observed impact of Atlantic SST anomalies on the North Atlantic oscillation[J]. *Journal of Climate*, 2002, 15(6): 606-623.
- [27] Pezza A B, Rashid H A, Simmonds I. Climate links and recent extremes in Antarctic sea ice, high-latitude cyclones, Southern Annular Mode and ENSO[J]. *Climate Dynamics*, 2012, 38(1): 57-73.
- [28] Trenberth K E. An assessment of the impact of transient eddies on the zonal flow during a blocking episode using localized Eliassen-Palm flux diagnostics[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1986, 43(19): 2070-2087.
- [29] Lau N C. Variability of the observed midlatitude storm tracks in relation to low-frequency changes in the circulation pattern[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1988, 45(19): 2718-2743.
- [30] Hobbs W R, Massom R, Stammerjohn S, et al. A review of recent changes in Southern Ocean sea ice, their drivers and forcings[J]. *Global and Planetary Change*, 2016, 143: 228-250.
- [31] Kohyama T, Hartmann D L. Antarctic sea ice response to weather and climate modes of variability[J]. *Journal of Climate*, 2016, 29(2): 721-741.
- [32] Thompson D W J, Wallace J M. Annular modes in the extratropical circulation. Part I: month-to-month variability[J]. *Journal of Climate*, 2000, 13(5): 1000-1016.
- [33] Abram N J, Mulvaney R, Vimeux F, et al. Evolution of the Southern Annular Mode during the past millennium[J]. *Nature Climate Change*, 2014, 4(7): 564-569.
- [34] Hall A, Visbeck M. Synchronous variability in the southern hemisphere atmosphere, sea ice, and ocean resulting from the annular mode[J]. *Journal of Climate*, 2002, 15(21): 3043-3057.
- [35] Yuan Xiaojun, Li Cuihua. Climate modes in southern high latitudes and their impacts on Antarctic sea ice[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2008, 113(C6): C06S91.
- [36] Li Shuanglin, Han Zhe, Liu Na, et al. A review of the researches on the record low Antarctic sea ice in 2016 and its formation mechanisms[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2021, 43(7): 1-10. [李双林, 韩哲, 刘娜, 等. 2016年南极海冰破纪录减少及其成因的研究综述[J]. *海洋学报*, 2021, 43(7): 1-10.]
- [37] Raphael M N. The influence of atmospheric zonal wave three on Antarctic sea ice variability[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2007, 112(D12): D12112.
- [38] Lee H J, Seo K H. Impact of the Madden-Julian oscillation on Antarctic sea ice and its dynamical mechanism[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 10761.
- [39] Raphael M N, Hobbs W. The influence of the large-scale atmospheric circulation on Antarctic sea ice during ice advance and retreat seasons[J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(14): 5037-5045.
- [40] Tang Shulin, Qin Dahe, Ren Jiawen, et al. The studies of polar sea ice and their contribution to climate change researches[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, 28(1): 91-100. [唐述林, 秦大河, 任贾文, 等. 极地海冰的研究及其在气候变化中的作用[J]. *冰川冻土*, 2006, 28(1): 91-100.]
- [41] Deser C, Tomas R A, Peng Shiling. The transient atmospheric circulation response to North Atlantic SST and sea ice anomalies[J]. *Journal of Climate*, 2007, 20(18): 4751-4767.
- [42] Lorenz D J, Hartmann D L. Eddy-zonal flow feedback in the southern hemisphere[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2001, 58(21): 3312-3327.
- [43] Limpasuvan V, Hartmann D L. Wave-maintained annular modes of climate variability[J]. *Journal of Climate*, 2000, 13(24): 4414-4429.
- [44] Hoskins B J, James I N, White G H. The shape, propagation and mean-flow interaction of large-scale weather systems[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1983, 40(7): 1595-1612.
- [45] Wang Guomin, Hendon H H, Arblaster J M, et al. Compounding tropical and stratospheric forcing of the record low Antarctic sea-ice in 2016[J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 13.
- [46] Purich A, England M H. Tropical teleconnections to Antarctic sea ice during austral spring 2016 in coupled pacemaker experiments[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(12): 6848-6858.

## Interdecadal changes in the impacts of Antarctic sea ice anomalies on the Southern Hemisphere winter and spring atmospheric circulation

CHEN Yibing<sup>1</sup>, WU Qigang<sup>1,2</sup>

(1. Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, Fudan University, Shanghai 200438, China; 2. Key Laboratory of Coupled Ocean-Ice-Atmosphere System and Weather and Climate, Ministry of Education, Fudan University, Shanghai 200438, China)

**Abstract:** Sea ice is an important component of the polar climate system. Previous observations and simulation studies have shown that the persistent anomalies of Antarctic sea ice can directly alter the thermal radiation balance in the Southern Hemisphere (SH), thereby affecting the zonal temperature and pressure gradients, and have the ability to affect the atmospheric circulation in the SH. The main mode of Antarctic sea ice variability is called the Antarctic Dipole (ADP), which is characterized by the inverse changes of sea ice anomalies on both sides of the Antarctic Peninsula. The occurrence of ADP is significantly correlated with atmospheric circulation

anomalies in the SH and profoundly influenced by El Niño-Southern Oscillation (ENSO) events. Previous studies have shown that El Niño underwent a noteworthy interdecadal shift from an eastern Pacific to a central Pacific type after 2000. The correlation coefficient between ENSO in the mature stage and the subsequent cold season ADP has significantly weakened in the past two decades. With this transition, the anomalous patterns of Antarctic sea ice and its impact on atmospheric circulation in the SH have also undergone interdecadal changes. Results from the Empirical Orthogonal Function (EOF) decomposition suggest that post-2000, the principal mode of SH autumn sea ice anomalies no longer represents ADP. The impacts of Antarctic sea ice anomalies on the SH winter-spring atmospheric circulation during the two periods have also undergone interdecadal changes. The maximum covariance analysis (MCA) can be used to study the connection between two fields. The results of MCA between prior Antarctic sea ice anomalies and lagged SH winter-spring geopotential height anomalies are intriguing. Specifically, from 1979 to 1999, the persistent positive phase of ADP from austral winter to spring demonstrated a significant correlation with the austral springtime negative phase of the Southern Hemisphere Annular Mode (SAM). However, this correlation became weaker and shifted to a significant correlation between the austral autumn tri-polar sea ice anomalies and the subsequent winter SAM from 2000 to 2021. The correlation between the MCA and EOF time series of the two fields proves that the early Antarctic sea ice anomalies are related to the main modes of sea ice variability, and can significantly affect the main variability of the later austral cold seasons atmospheric circulation in the SH. The main modes of austral autumn and winter sea ice anomalies in the two stages have undergone interdecadal changes, and the traditional ADP in the second stage no longer appears as the dominant mode. This may be related to the weakening of the ENSO-ADP connection after 2000. In the first stage, ENSO has a strong connection with ADP, establishing a tropical-to-polar connection. However, in the second stage, ENSO's impact on Antarctic sea ice has weakened and its location of influence has changed, partially explaining the changes in sea ice anomaly modes. Although the main modes of sea ice anomalies that affect the later atmospheric circulation underwent interdecadal changes around 2000, the overall response of the SH atmospheric circulation during the first phase in austral spring and the second phase in austral winter to the previous sea ice anomalies presents a structure similar to SAM. Dynamical diagnosis proves that ADP and the tri-polar sea ice anomalies can trigger changes in high-frequency transient eddies, thus stimulating and maintaining SAM-like atmospheric circulation patterns. In subsequent research, numerical simulation experiments can be used to verify the impact and specific mechanism of two sea ice anomaly modes on SAM. In addition, the changes in the relationship between Antarctic sea ice and SH atmospheric circulation are likely closely related to the interdecadal changes of ENSO. The different roles of sea ice forcing factors such as ENSO in the process of Antarctic sea ice anomalies affecting SH atmospheric circulation around 2000 still need further research and confirmation.

**Key words:** Antarctic sea ice; Antarctic Dipole; Southern Hemisphere Annular Mode; transient eddy; interdecadal change

(责任编辑: 杨清华)