

南极海冰涛动对北半球夏季大气环流影响研究

王爽¹ 吴其冈^{1,2} 刘师佐¹ 梁涵洲¹ 户元涛¹ 康彩燕³ 包晓军⁴ 高艳⁵

1 复旦大学大气与海洋科学系, 上海 200438

2 海气系统监测与预测创新中心, 珠海复旦创新研究院, 珠海 519000

3 南京大学大气科学学院, 南京 210023

4 广东纳睿雷达科技股份有限公司, 珠海 519000

5 宁夏气象台, 银川 750002

摘要: 南极海冰首要模态呈现偶极子型异常, 正负异常中心分别位于别林斯高晋海/阿蒙森海和威德尔海。过去研究表明冬春季南极海冰涛动异常对后期南极涛动 (Antarctic Oscillation, AAO) 型大气环流有显著影响, 而 AAO 可以通过经向遥相关等机制影响北半球大气环流和东亚气候。本文中我们利用观测分析发现南极海冰涛动从 5-7 月 (May-July, MJJ) 到 8-10 月 (August-October, ASO) 有很好的持续性, 并进一步分析其对北半球夏季大气环流的可能影响及其物理过程。结果表明, MJJ 南极海冰涛动首先通过冰气相互作用有利于在南半球激发持续性的 AAO 型大气环流异常, 使得南半球中纬度和极地及热带之间的气压梯度加大, 在 MJJ 至 JAS, 纬向平均纬向风呈现显著的正负相间的从南极到北极的经向遥相关型分布。对流层中层位势高度场上, 在澳大利亚北部到海洋性大陆区域, 出现显著的负异常, 在东亚沿岸从低纬到高纬呈现南北走向的 “-+” Pacific-Japan(PJ)遥相关波列对应赤道中部太平洋及赤道印度洋存在显著的降水 and 海温负异常, 西北太平洋至我国东部沿海地区存在显著降水正异常和温度负异常; 同时, 低纬度北美洲到大西洋一带存在的负位势高度异常和北大西洋附近存在的正位势高度异常中心, 构成一个类似于西大西洋型遥相关 (Western Atlantic, WA) 的结构, 对应赤道南大西洋降水增加和南撒哈拉地区降水减少。从物理过程来看, 南极海冰涛动首先通过局地效应影响 Ferrel 环流, 进而通过经圈环流调整使得海洋性大陆区域和热带大西洋上方的 Hadley 环流上升支得到增强, 海洋性大陆区域特别是菲律宾附近的热带对流活动增强, 激发类似于负位相的 PJ 波列影响东亚北太平洋地区的大气环流, 而热带大西洋对流增强和北传特征, 则通过激发 WA 遥相关影响大西洋和欧洲地区的大气环流。以上两种通道将持续性 MJJ 至 ASO 南极海冰涛动强迫的大气环流信号从南半球中高纬度经热带地区传递到北半球中高纬地区, 从而对热带和北半球夏季大气环流产生显著影响。

关键词： 南极海冰涛动；冰气相互作用；南极涛动；北半球；大气环流；北半球夏季

文章编号： 2021051A

DOI： 10.3878/j.issn.1006-9895.2111.21051

收稿日期 2021-03-31；**网络预出版日期**

作者简介 王爽，男，硕士，主要从事气候变化及数值模拟研究。E-mail: your_wangshuang@qq.com

通讯作者 吴其冈，E-mail: qigangwu@fudan.edu.cn

资助项目 国家自然科学基金项目（91837206）；广东省引进创新创业团队项目（2016ZT06G579）

Studying Impacts of Antarctic Sea Ice Oscillation on Boreal Summer Atmospheric Circulation in the Northern Hemisphere

WANG Shuang¹, WU Qigang^{1, 2}, LIU Shizuo¹, LIANG Hanzhou¹, HU Yuantao¹, KANG Caiyan³, BAO Xiaojun⁴, GAO Yan⁵

1. Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, Fudan University, Shanghai ,200438
2. China Innovation Center of Ocean and Atmosphere System, Zhuhai Fudan Innovation Research Institute,Zhuhai, 519000
3. School of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing ,210023
4. Naruida Technology Ltd. ,Zhuhai ,519000
5. Ningxia Meteorological Observatory,Yinchuan,750002

ABSTRACT: The primary mode of empirical orthogonal decomposition (EOF) of Antarctic sea ice is a dipole anomaly, with the positive and negative anomaly centers over the Bellingshausen Sea/Amundsen Sea and the Weddell Sea, respectively, which is known as the Antarctic sea ice oscillation or Antarctic Dipole. Previous studies have shown that the Antarctic sea ice oscillation in austral winter and spring have a significant effect on the later Antarctic Oscillation (AAO) -type atmospheric circulation, which has significant impacts on Northern Hemisphere climate and East Asian Summer Monsoon. This empirical study further examines the remote effects of the May-July (MJJ) Antarctic sea ice oscillation on boreal summer atmospheric circulation in the Northern Hemisphere and the associated physical processes. Results show that the Antarctic sea ice's dipole anomaly has good persistence around austral winter from MJJ-JAS, which is conducive to triggering persistent AAO-like atmosphere responses in the troposphere and lower stratosphere, with the increasing of the pressure gradient between the middle and high latitudes. Moreover, the latitudinal mean zonal wind presents a significant distribution of meridional teleconnection from the South Pole to the North Pole. In the middle troposphere, 700 mb geopotential height field displays significant negative anomalies from northern Australia to the maritime continent, and a significant positive anomaly center near Japan and a band-shaped negative anomaly appears near the Sea of Okhotsk and Aleutian Islands when the atmosphere lags behind the sea ice anomaly by zero to two months. It is another form of meridional teleconnection except for zonal wind. There are significant negative precipitation and sea surface temperature anomalies in the equatorial central Pacific and Indian Ocean, and significant positive

precipitation anomalies from the northern Marine Continent to the eastern coastal China. In addition, the negative geopotential height anomaly from the subtropical North America to the western Atlantic and the positive geopotential height anomaly center over the North Atlantic constitute a structure similar to the western Atlantic teleconnection (WA). There are significant positive precipitation anomaly in the tropical southern Atlantic and negative precipitation anomaly over the Sahara. In terms of the physical mechanism, Antarctic sea ice dipole first affects the Ferrel circulation through local forcing effects. In turn, the ascending branch of Hadley circulation over the oceanic continental region and Tropical Atlantic are enhanced by the meridional circulation adjustment. Then the negative phase of Pacific Japan (PJ) wave train and WA teleconnection excited by the enhanced tropical convection affects the atmospheric circulation in the northern hemisphere. The strong tropical convection activity in the oceanic continental region (especially near the Philippines) and Tropical Atlantic, serves as a bridge to transmit the forced tropical signals to boreal summer East Asia-North Pacific, North Atlantic-Europe and other middle and high latitude regions in the northern hemisphere. These results indicate that the persistent Antarctic sea ice oscillation anomaly from MJJ to ASO has significant impacts on the summer atmospheric circulation in the tropics and northern hemisphere.

Keywords: Antarctic Sea ice Oscillation; sea ice-atmosphere interaction; Antarctic Oscillation; Northern Hemisphere; Atmosphere circulation; Boreal Summer

1 引言

近几十年来，伴随着全球变暖，北极海冰显著减少，南极海冰面积却呈上升趋势（Holland, 2014; Hobbs et al., 2016; Kwok et al., 2017），而 2016 年春季，南极海冰面积（sea ice extent）则急剧下降（Wang et al., 2019）。海冰一方面受到局地和大尺度大气的影响，同时具有显著的反馈作用；过去研究揭示了冬季南极海冰异常通过冰气相互作用对冬春季南半球大气环流南极涛动（Antarctic Oscillation, AAO）有显著影响（Wu and Zhang, 2011），但目前关于南极海冰异常对北半球气候的影响研究还较少。本研究利用观测资料诊断分析南半球冬季南极海冰变异与北半球大气环流的关联，预期结果为进一步开展与此有关的数值模拟研究、寻找南极对我国短期气候影响的强预测信号等提供有用的信息。

南极海冰作为冰雪圈系统的重要组成部分，是南半球表面季节性变化特征最显著的区域之一。南半球季节转换期是南极海冰变化最为剧烈的时期，也是冰-气相互作用最显著的时期。对北半球夏季前后（MJJ-JAS）南极海冰进行 EOF 分析，得到其第一模态的空间分布及对应的时间序列（PC）如图 1、图 2 所示。空间模态的主要正负异常中心分别位于别林斯高晋海/阿蒙森海和威德尔海，在东南极南印度洋一带也有两个弱的负值中心。1979 年后环南极海冰变化趋势也表现出类似的特征（图略）。这种南极半岛两侧海冰密集度反向变化的特征被称为或南极海冰涛动（Antarctic Sea Ice Oscillation）（程彦杰等，2002；卞林根和林学椿，2008）或者南极偶极子（Antarctic Dipole, ADP; Wu and Zhang, 2011）。ADP 现象与南半球海温和大气环流异常有关（Lefebvre and Goosse, 2005）。通常南极涛动正相位对应 ADP 的加强（Yuan, 2001）。正位相南极涛动有利于绕极西风增强，南大洋西风增强会使得海洋向大气释放的潜热通量增加，从而使得南大洋海表面温度（sea surface temperature, SST）降低，SST 降低会有利于海冰的生成（Swingedouw et al., 2008）。而 ENSO 事件则可以通过激发太平洋-南美洲遥相关（Pacific-South America, PSA）影响南极海冰的分布（Karoly, 1989）。

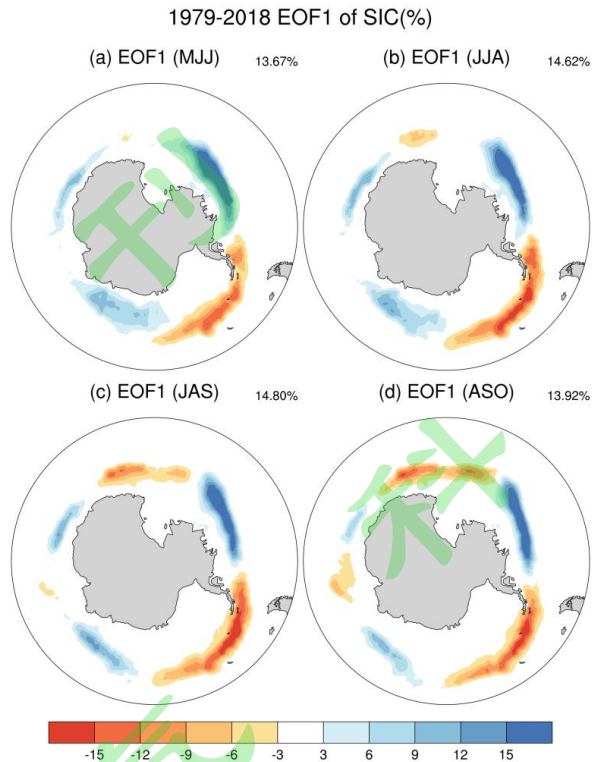


图 1 南极海冰异常 EOF 第一模态空间分布（单位：%）：（a）5/6/7 月（MJJ）；（b）6/7/8 月（JJA）；（c）7/8/9 月（JAS）；（d）8/9/10 月（ASO）。

Fig.1 Spatial distribution of the EOF1 of monthly Antarctic sea ice anomaly (unit:%): (a)May-June-July (MJJ); (b)June-July-August (JJA); (c)July-August-September (JAS); (d)August-September-October (ASO).

当南极海冰出现异常变化后，会通过冰气之间的相互作用直接影响局地的大气环流状况（吴仁广和陈烈庭，1994）；其高反照率和隔绝海气热量和动量交换作用会对南半球海-冰-气相互作用产生重要影响（Cavalieri et al., 2003）。研究显示，南极海冰的异常变化首先使局地大气环流（如绕南极低压带和极地涡旋）发生改变，随后经由南极涛动的串联作用，将高纬度的异常传递到中纬度，导致南大洋副热带高压也发生变化，最后导致经向气压梯度的改变，造成中纬度西风强度的改变和南北位置的偏移（窦挺峰，2009）。南极海冰所在的纬度带正好是 Ferrel 环流上升支所在的位置，上升气流可以将海冰异常引起的热通量异常和温度异常由上升气流带到对流层中上层，改变 Ferrel 环流的强度，因此间接地影响南纬 30°附近地区的气候，这就是中低纬对南极海冰变化异常遥响应的机制之一。

(窦挺峰, 2013)。李璠(2009)利用NCAR的CAM3.1气候模式, 对南极海冰异常对南半球大气环流影响的物理过程进行了数值模拟, 异常实验的数值模拟结果表明南极海冰增加确实会导致经向温度梯度以及气压梯度加大, 南极涛动增强以及南半球副热带高压偏南、澳大利亚高压偏南, 高纬西风加强, 中纬度东风加强。

早期理想数值模拟试验和观测分析显示, 南极海冰的变化异常可以影响北半球大气环流和东亚气候。杨修群和黄士松(1992)移去南极海冰的加热作用, 减弱南极高涡, 进而通过高纬度经向环流影响绕极低压带, 紧接着通过罗斯贝波频散作用于越赤道气流, 最终影响到北半球夏季大气环流以及夏季东亚季风气候。Miao and Chen(1997)利用1982-83年观测南极海冰强迫大气环流模式, 结果显示南极海冰异常变化可能通过赤道纬向环流异常, 在西太平洋激发自南向北传播的一串涡列。魏立新等(2003)模拟南极海冰比气候分布向北扩展四个纬度的气候效应, 发现7月南半球冬季南大洋绕极低压带北移和强度增加, 南半球大气响应以强经向环流为主, 越赤道气流在印度洋上加强, 但在太平洋上减弱, 通过经向热交换的变化影响到北半球夏季大气环流, 引起亚洲季风和北美气候异常。马丽娟等(2006, 2007)利用观测分析揭示了南极海冰异常和我国夏季温度及降水显著关联。

本文主要利用观测分析探讨南极海冰涛动异常对北半球夏季大气环流的影响。由于南半球冬春季南极海冰涛动异常显著影响AAO(Wu and Zhang, 2011), 而南极涛动等异常环流可以通过印度洋通道和太平洋通道等机制影响北半球大气环流和东亚气候(Sun et al., 2009; 钱卓蕾, 2014; Shi et al., 2019)。过去许多研究表明, 与南极涛动有关的南半球环流异常能够借助“海洋桥”传播到热带印度洋和南海地区, 再通过局地海气相互作用调控东亚气候, 从而构建了印度洋路径(Zheng et al., 2015; 马浩等, 2016); 另一方面, 南半球环流异常能够激发经向遥相关波列、引发太平洋大气经圈环流调整, 从而引起西太平洋暖池和西太平洋副热带高压异常, 最终导致东亚气候变异, 从而构建了太平洋路径(Fan and Wang, 2004; 薛峰, 2005; 孙淑清等, 2007; 马浩等, 2016)。范可(2006)研究发现, 南半球副热带高压异常在春、夏两季存在很好的持续性, 使得SAM

(Southern Annular Mode) 异常能够从春季持续到夏季, 并在夏季激发出从南半球太平洋地区到北半球东亚沿岸地区的经向遥相关波列。所以我们预期南极海冰涛动首先通过冰气相互作用引起南极涛动大气环流异常, 进一步对北半球的大气环流和气候变化产生间接的影响, 因而对南半球乃至北半球气候变化的机理研究和趋势预测具有重要的指示意义。

2 资料与方法介绍

本文使用的地面气象要素场资料如海平面气压场、对外长波辐射、热通量, 以及其他不同高度层气温、位势高度、经向风及纬向风资料来自于欧洲气象中心推出的 ERA5 月平均再分析资料及日资料, 空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$, 垂直分层为 32 层; 表面温度场资料采用美国航空航天局 (NASA) 推出的 GISS 表面温度资料, 空间分辨率为 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$; 降水资料来自于美国全球降水气候中心 (GPCP), 空间分辨率 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$; AAO 指数下载自美国气候预测中心 (CPC), 其定义的方法是对南半球 20°S 以南月均 700hPA 位势高度场进行 EOF, 得到第一模态的时间序列, 即为各月 AAO 指数; 南半球海冰资料利用英国 Hadley 中心的全球月平均海冰密集度资料, 空间分辨率 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$, 考虑到 1979 年之后卫星观测技术的利用, 本文研究时段选为 1979 年 1 月—2018 年 12 月, 共 40 年。

本文使用的方法主要为常见的气象统计方法, 例如经验正交分解 (EOF)、回归分析、相关分析等。首先对海冰场去线性趋势, 并根据 Wu (2008) 的方法去除 ENSO 的影响 (将海冰场与前几个月 Nino3.4 指数进行回归分析, 从原始场中减去拟合值, 从而滤除热带太平洋的影响。选取前 6 个月内的最大回归系数作为去除 ENSO 的回归系数)。其次, 针对四个季节 (MJJ, JJA, JAS, ASO), 利用月平均观测南极海冰资料异常 ($40 \text{ 年} \times 3 \text{ 月/年} = 120 \text{ 月}$) 进行 EOF 分析, 得到南极海冰的首要变化模态及其对应的时间序列 (PC), 需要格外说明的是, 计算过程中是将季节内的三个月份衔接起来, 而不是求三月平均 (即每个季节有三个样本资料而非一个)。第一 EOF 模态 (EOF1) 表现为南极半岛两侧海冰反

相变化关系，为南极偶极子或南极海冰涛动。然后，利用每个季节 EOF1 的 PC 时间序列作为南极海冰涛动指数，与各气象要素进行统计诊断，分析大气环流对海冰偶极子异常信号的响应；其中在计算风暴活动有关扰动动能和瞬变通量时，首先对观测日资料进行 2-8 天带通滤波处理，按照相应公式计算每日的动能和通量，然后取月平均；另外回归分析和相关分析均采用 t 检验标准进行双侧显著性检验。最后进行物理机制分析，以期理解南极海冰影响气候尤其是北半球夏季气候的可能机理。

对于季节的选择，赵宗慈和王绍武（1979）研究了南北半球大气环流与气候的相互作用，发现在夏半球与冬半球的相互作用中，冬半球常常处于主导地位，而夏半球的大气环流则深受冬半球的影响。目前在气象上已经达到共识的是：南北半球的相互作用主要是冬半球影响夏半球为主（范可，2006）。因此，本文选取南半球冬季前后（MJJ, JJA, JAS, ASO）南极海冰进行统计诊断，分析同期及滞后一到两个月全球大气环流的响应，诊断南极海冰对北半球夏季气候的可能影响，探讨跨半球相互作用的机理，以为北半球夏季气候预测提供一定的基础。

3 南极海冰涛动对北半球夏季大气环流的可能影响

对南半球冬季前后（MJJ-ASO）南纬 40~90°范围内的南极海冰进行 EOF 分析，得到其 EOF1 空间分布及对应的时间序列（PC1）如图 1、图 2 所示。EOF1 正负异常中心分别位于别林斯高晋海/阿蒙森海（南极半岛西侧）和威德尔海（南极半岛东侧）。将 MJJ 一直到 ASO 各个季节的 PC1 交叉求相关系数，结果（表 1）显示：滞后一个月时相关系数高达 0.9 左右，滞后两个月时相关系数仍高于 0.7，均达到 0.01 的显著性水平，表明南极海冰偶极子异常在南半球冬季前后有很好的持续性，可以为上方大气提供持续性的强迫。

接下来，为了详细分析大气对南极海冰涛动即海冰首要空间模态的响应，将各季节（MJJ-ASO）的 PC1 作为南极海冰涛动指数，诊断其对各气象要素场的影响。由于这四个季节结果基本类似，只是 MJJ 的影响相对较为显著，因此文

中仅展示 MJJ 的结果。

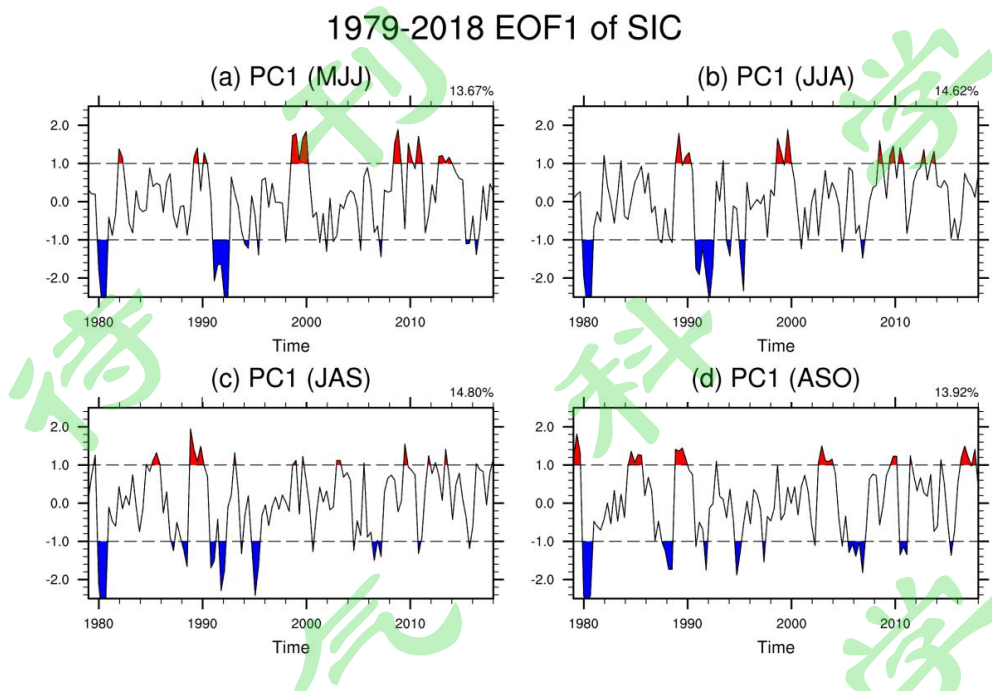


图 2 南极海冰 EOF1 对应的时间序列：（a）MJJ 5/6/7 月；（b）JJA 6/7/8 月；（c）JAS 7/8/9 月；（d）ASO 8/9/10 月

Fig. 2 Principal competent time series associated with the EOF1 of Antarctic sea ice anomaly (unit:%) in Fig. 1 : (a) MJJ; (b) JJA; (c) JAS; (d) ASO.

表 1 各个季节月平均南极海冰涛动指数之间的相关系数 R（均通过 1%显著性水平）

Table 1 Correlation coefficients (R) between Antarctic sea ice oscillation indices between two seasons (all R pass 1% significance level)

R	MJJ	JJA	JAS	ASO
MJJ	1.0	0.93	0.75	0.51
JJA	0.93	1.0	0.92	0.72
JAS	0.75	0.93	1.0	0.91
ASO	0.51	0.72	0.91	1.0

3.1 南极海冰涛动对南半球冬季大气环流的影响

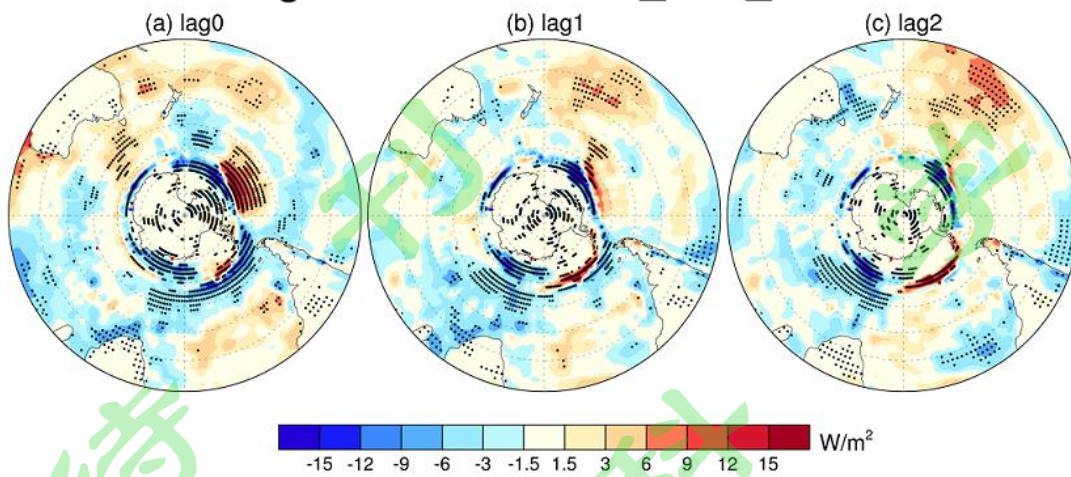
南极海冰涛动的变化首先通过表面反照率和表面热量、水汽和动量通量的变化影响局地大气环流，进而通过冰气相互作用显著影响南半球大尺度大气环流（吴仁广和陈烈庭，1994；Cavalieri et al., 2003; Wu and Zhang, 2011）。南半球冬季由于日照较低，海冰反照率效应受到抑制。为了确定图 1 中所述偶极子型海冰异常与热量通量变化的关系，我们在图 3a-c 中展示了热量通量对 MJJ 南极海冰涛动指数（SIC_MJJ_PC1）同期和滞后回归的结果，其中正值表示海洋向大气传递热量。结果显示，最大的热通量变化发生在冰缘附近，那里的热通量变化要比开阔海域上的大得多；正向上的热通量异常与威德尔海的海冰覆盖减少有关，并且有利于在下游方向形成向下热量通量异常；负向下的热通量异常与别林斯高森海、阿蒙森海和南印度洋的海冰覆盖增加有关，有利于在下游方向形成相反的变化，这也过去的研究一致（Wu and Zhang, 2011; Bader et al., 2013），表现在同期时（图 3a）在阿蒙森海冰缘附近有明显的正热通量异常，跨度超过 10 个纬度，滞后 1-2 个月时，显著的正异常逐步向外扩展至南太平洋；并且这种异常在同期和滞后 1-2 个月时都比较显著，说明上述海冰异常能够持续性地对大气热量产生影响。

研究发现，强的瞬变涡旋（eddy）强迫对于解释热带外环流对中纬度海温和海冰异常的响应具有重要意义（Deser et al. 2004）。

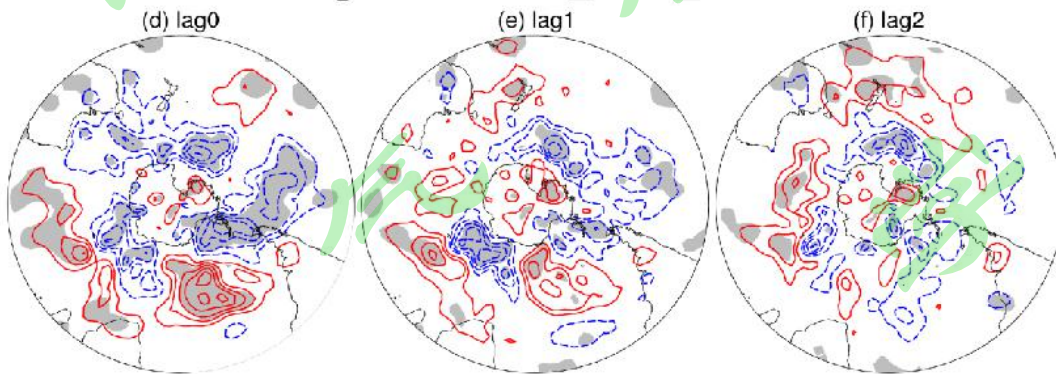
本文通过计算 300hPa 瞬变涡旋动量通量（ $\overline{u'v'}$ ）、700hPa 向北的瞬变涡旋热通量（ $\overline{v'T'}$ ）和 300hPa 瞬变涡旋动能（ $(\overline{u'^2+v'^2})/2$ ）对 MJJ 南极海冰涛动指数的回归系数，来探讨与 ADP 相关的风暴轨迹变化以及对纬向平均纬向风（[U]）的影响。与同期回归相比，滞后回归可以解释为 eddy 对海冰异常的响应。图 3d 显示，eddy 热通量在南极周围的高纬度以负值为主，向极的热量输送将有利于高纬风暴活动增加；在中纬度和副热带海洋以正异常为主，将减少中纬风暴活动；并且在滞后 1-2 个月的回归结果（图 3e,f）中，eddy 热通量的响应都能够维持，这种持续性的能量通量响应支持了风暴路径活动向南极偏移变化，即图 3j-l 中高纬度扰动动能增加，中低纬扰动动能以减少为主，与风暴活动的变化相伴随的，

是西风急流的向极偏移（图 4d-f），而图 3g-i 的结果与前述类似，表明南极海冰涛动异常将有利于高纬度（中纬度）向极（向赤道）的 eddy 动量通量输送，异常涡旋动量通量在副热带地区的辐散和高纬度辐合反映了涡旋对纬向平均流的强迫作用（Lorenz and Hartmann, 2003），图中向极的涡旋动量通量与纬向平均气流相互作用，维持着中纬度西风带的纬向位移，造成 60°S 附近[U]的增加，35°S 附近[U]的减少，表现为典型正位相 AAO 时[U]的异常特征。

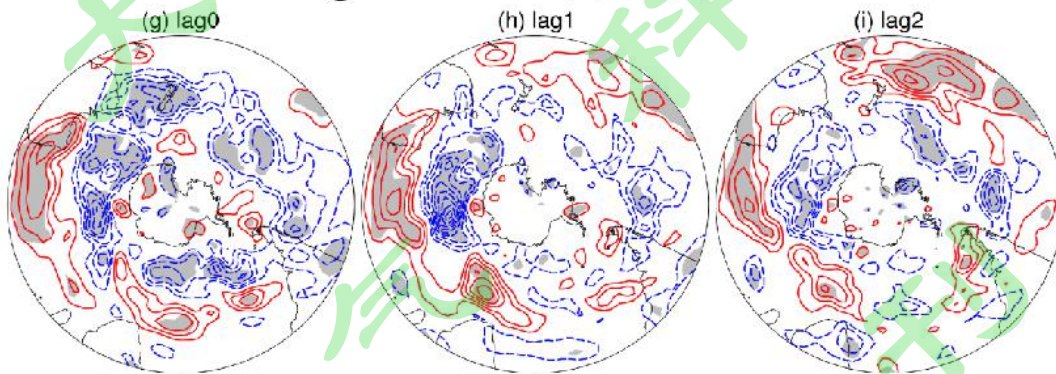
reg HeatFlux on SIC_MJJ_PC1



reg VT on SIC_MJJ_PC1



reg UV on SIC_MJJ_PC1



reg EKE on SIC_MJJ_PC1

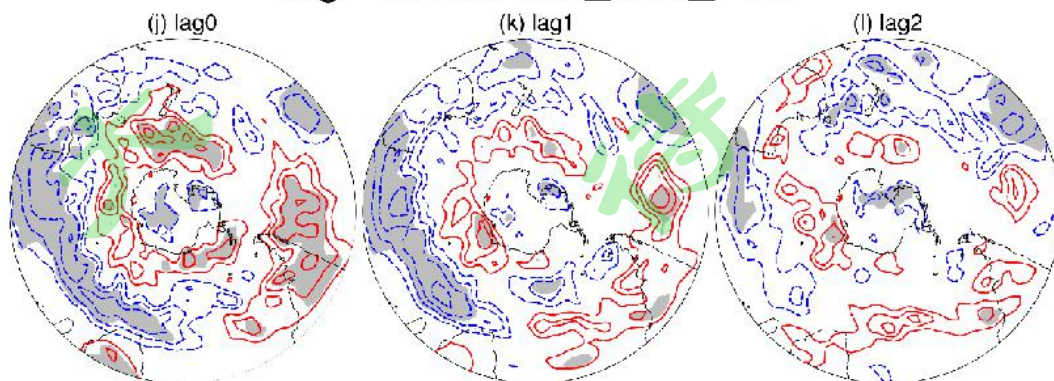


图3 地表热量通量 (a,b,c;单位: W/m^2)、700hPa 瞬变涡旋热通量 (d,e,f;单位: $\text{K}\cdot\text{m/s}$;间隔: $0.2\text{K}\cdot\text{m/s}$)、300hPa 瞬变涡旋动量通量 (g,h,i;单位: m^2/s^2 ;间隔: $1.0\text{m}^2/\text{s}^2$) 和 300hPa 瞬变涡旋动能 (j,k,l;单位: m^2/s^2 ;间隔: $1.25\text{m}^2/\text{s}^2$) 对 MJJ 南极海冰涛动指数的回归系数。(a,d,g,j) : 同期; (b,e,h,k) : 大气滞后海冰一个月; (c,f,i,l) : 大气滞后海冰两个月; 阴影表示通过 90%信度显著性检验

Fig.3 Regression coefficients of surface energy heat flux (a,b,c; units: W/m^2), 700-hPa transient eddy meridional heat flux (d,e,f; units: $\text{K}\cdot\text{m/s}$;interval: $0.2\text{K}\cdot\text{m/s}$), 300-hPa transient eddy momentum flux (g,h,i;units: m^2/s^2 ;interval: $1.0\text{m}^2/\text{s}^2$) and 300-hPa transient eddy kinetic energy (j,k,l;units: m^2/s^2 ;interval: $1.25\text{m}^2/\text{s}^2$) onto the Antarctic Sea Ice Oscillation Index in MJJ. (a,d,g,j) : the same period;(b,e,h,k) : The atmosphere lags behind sea ice by one month;(c,f,i,l) : the atmosphere lags behind sea ice by two months; Shadings indicate that the regression coefficients are statistically significant at the 90% confidence levels.

为了进一步探究南极海冰涛动对南极涛动的影响，首先将 MJJ 一直到 ASO 的各个季节的 PC1 与同期及滞后一个月的 AAO 指数求相关系数如表 2。结果显示，同期 PC1 与 AAO 相关系数在 0.4-0.6 之间，达到 0.01 显著性水平；滞后一个月相关系数在 0.3-0.4 之间，达到 0.05 显著性水平。以上结果表明：南极海冰偶极子异常从 MJJ 到 JAS 具有良好的持续性，通过冰气相互作用引起表面热量、水汽，及大气向南极的动量和热量输送等的变化对南半球冬春季节大气环流产生持续性的强迫作用，有利于激发南半球冬类似于 AAO 的大气环流异常。这也与前人的研究结果保持一致（Wu and Zhang, 2011；窦挺峰，2013）。

表2 各个季节月平均南极海冰涛动指数（横坐标）与南极涛动指数（纵坐标）的相关系数（及显著性水平）

Table 2 Correlation coefficients (and significance level) between the Antarctic Sea Ice Oscillation Index (X-axis) and the Antarctic Oscillation Index (Y-axis) in each season

	MJJ	JJA	JAS	ASO
--	-----	-----	-----	-----

MJJ	0.42 (0.01)	/	/	/
JJA	0.32 (0.05)	0.46 (0.01)	/	/
JAS	/	0.34 (0.05)	0.55 (0.01)	/
ASO	/	/	0.33 (0.05)	0.48 (0.01)

3.2 南极海冰涛动对北半球夏季大气环流的影响

为了分析南极海冰涛动对北半球夏季大气环流影响，首先将 MJJ 南极海冰涛动指数与 90°S-90°N 纬向平均的高度场、纬向风速场和温度场进行回归分析（图 4）。从同期高度场回归结果来看（图 4a），呈现较为典型的南极涛动型响应；这种响应具有明显的正压结构，从对流层到平流层低层都有反映，且表现为南极涛动的正位相，即高纬绕南极低压加深的同时，中纬海洋高压加强，使得高中纬度之间的气压梯度加大，有利于高纬西风加强。滞后 1-2 个月（图 4b,c），南半球中高纬之间的反向变化关系仍能维持，只是强度和显著性略有降低。同期纬向风速回归结果显示（图 4d），纬向平均纬向风呈现明显的正负相间的分布，其中南半球极地为东风异常，高纬 60°S 左右为显著的西风异常，中纬 40°S 左右为显著的东风异常，表现出正位相 AAO 异常的平均纬向风速变化的典型特征（Thompson and Wallace, 2000），赤道附近中高层存在较弱的西风异常，其结构为准正压，并且能维持一到两个月（图 4e,f）；同时，作用显著的区域顺着对流层高层逐步扩展到北半球，滞后两个月时（图 4f）可以发现，在北半球 30°N 附近为东风异常，60°N 附近为显著的西风异常，北极极为东风异常。这种南北传递性，最终引起北半球高纬西风加强。上述从南极到北极纬向风正负相间的分布，被前人称作经向遥相关（Fan and Wang, 2004；范可和王会军, 2006a, 2006b, 2007），他们在对 AAO 强弱年 500hPa 纬向风进行合成分析时，最早提出这项概念。而温度场回归结果显示（图 4g-i），不论同期还是滞后，在对流层中低层，南纬 60°以南和以北分别呈现降温和增温响应，特别是中纬度增温显著且持续，与图 4a-c 中的热通量正异常有关，如此增大了高中纬度之间的温度差异，提高了温度梯度，即是前述风速异常的原因。

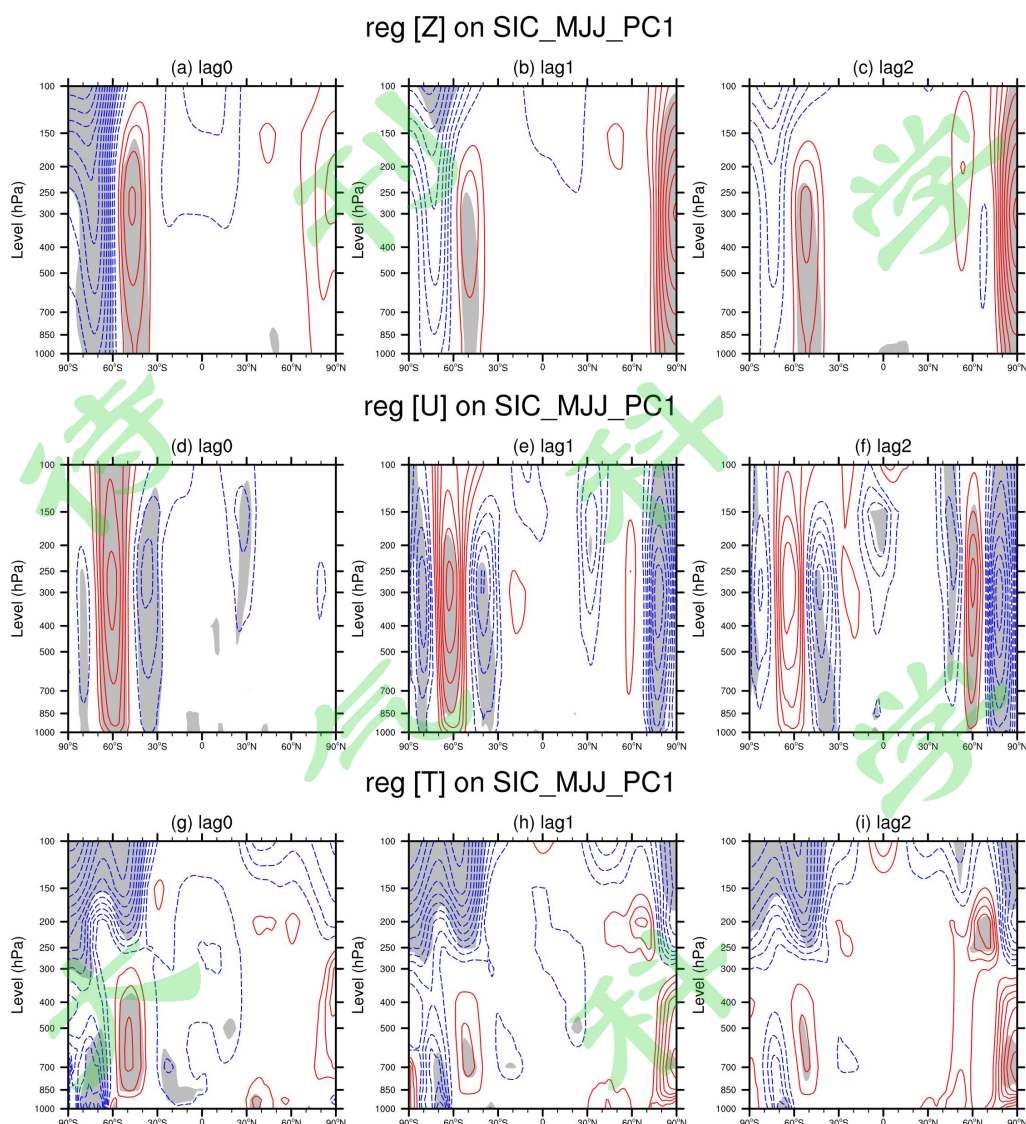


图 4 纬向平均的位势高度场 (a-c, 单位: gpm, 间隔: 2gpm)、纬向风速 (d-f, 单位: m/s, 间隔: 0.2m/s) 和温度 (g-i, 单位: K, 间隔: 0.05K) 对 MJJ 南极海冰涛动指数的回归系数。

Fig. 4 Same as Fig. 3 but for latitude-height cross sections of regression coefficients of zonally averaged geopotential height (a-c, units: gpm, interval: 2gpm), zonal wind speed (d-f, unit: m/s, interval: 0.2m/s) and temperature (g-i, units: K, interval: 0.05K) onto the Antarctic Sea Ice Oscillation Index in MJJ.

上述分析表明南极海冰涛动强迫的南半球的纬向风异常能够影响随后北半球的纬向风异常, 其结果是南北半球高纬度西风急流都得到显著加强; 并且环流

异常具有一定的持续性。南北半球之间的经向遥相关反映了纬圈平均的纬向风从南极到北极的正负相间分布，具有准正压的结构。紧接着，将中低层（以 700hPa 为例）和高层（以 150hPa 为例）高度场和风场分别与 MJJ 海冰指数做回归，结果分别见图 5 和图 6。

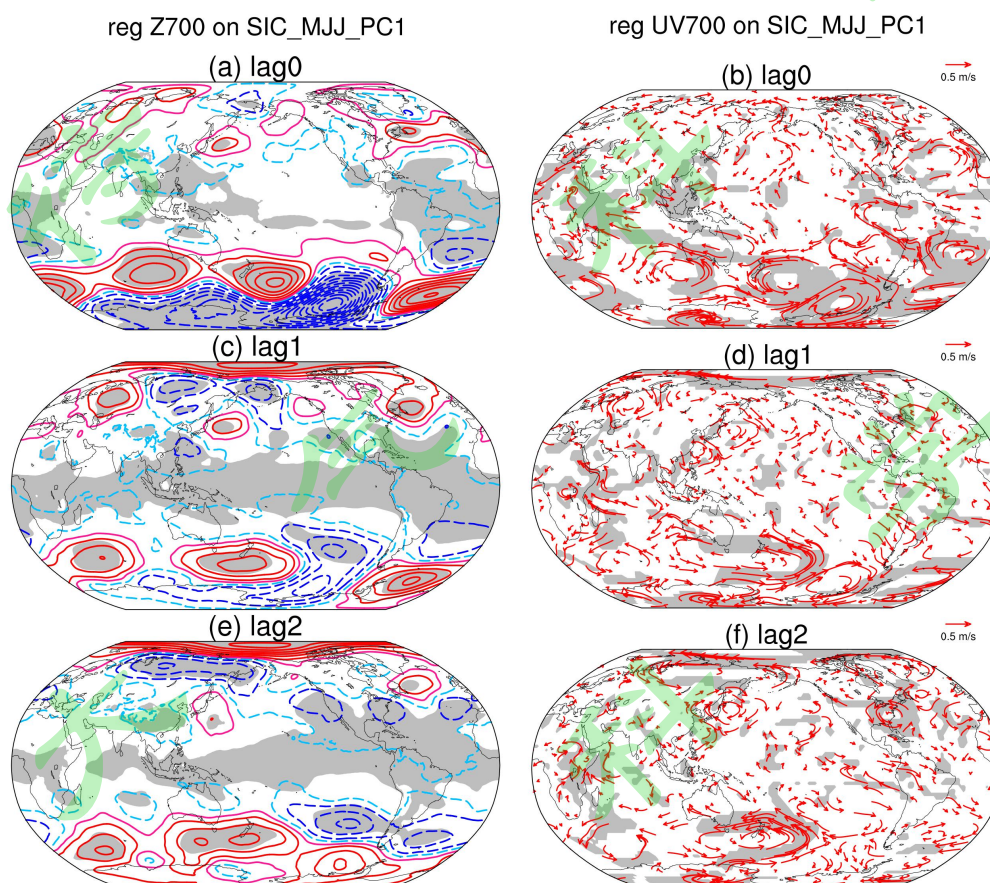


图 5 700hPa 位势高度场（a,c,e;单位：gpm;间隔：3gpm;其中浅蓝色虚线和浅红色实线分别代表值为-1 和 1 的等值线）、风场（b,d,f, 单位：m/s）对 MJJ 南极海冰涛动指数的回归系数。

Fig.5 Same as Fig. 3 but for regression coefficients of 700 hPa geopotential height (a,c,e; units: gpm;interval:3gpm; the light-blue dashed and light-red solid contours represent -1 and 1) and horizontal winds (b,d,f, units: m/s) onto the Antarctic Sea Ice Oscillation Index in MJJ.

从中低层同期的回归结果来看（图 5a），南半球中高纬度分别存在正负异常，

正异常中心分布在南印度洋、南大西洋及西南太平洋上，负异常中心位于阿蒙森海一带，其中南大西洋正异常中心位置较为偏南，这些都是 AAO 响应在 700hPa 高度场上的表现。同时在南半球热带地区（包括南非，热带南太平洋和大西洋）均出现负异常中心。相应的，在正负异常中心分别出现异常反气旋和气旋结构（图 5b），滞后 1-2 个月时（图 5c,e），南印度洋及西南太平洋上的正异常中心仍能维持，阿蒙森海一带的负异常则逐渐向北移动至南纬 30°附近。另外，值得关注的是，从澳大利亚北部海洋性大陆区域，一直延伸到菲律宾海一带，出现显著的负异常（图 5a），而在风场上澳大利亚北部及菲律宾附近分别呈现出一个明显的气旋性结构（图 5b）。滞后一到两个月时（图 5b,c,d,e），日本附近出现显著的正异常中心，对应于水平风场上该区域也存在一个持续的反气旋结构，鄂霍次克海-阿留申群岛一带出现带状的负异常，这种等压面上看到的位势高度正负中心的相间分布，即东亚沿岸从低纬到高纬南北走向的-+-波列，对应负位相的 Pacific-Japan (PJ) 波列，或者 East Asian-Pacific (EAP) 型遥相关 (Nitta, 1987; Xie et al., 2016)，是经向遥相关除纬向风场外的另外一种表现形式。

除了东亚地区，同期（图 5a）在北美洲到西大西洋低纬度一带、北大西洋至欧洲分别存在两个显著的负位势高度异常中心和一个正位势高度异常中心，对应于风场上的气旋-反气旋-气旋性结构，滞后一到两个月时（图 5c,e），该结构仍能维持，且通过显著性检验，尤其是北美和热带大西洋的负异常得到加强，它与北大西洋上的正异常构成一个类似于西大西洋型遥相关 (Western Atlantic, WA) 的结构 (Wallace and Gutzler, 1981)，也是经向遥相关在大西洋上的体现。

另外，图 5 中显示从 MJJ 到 JAS（从同期到滞后两个月）的 700hPa 高度场和风场在非洲大陆和热带西印度洋上有显著的负异常和气旋性环流响应；MJJ 在欧洲南部和 JJA 在欧洲大部均有显著的正异常和反气旋环流响应，JJA 和 JAS 在西伯利亚及北极则分别有显著的负异常和正异常环流响应。以上非洲-印度洋及欧洲至北极的大气环流响应，也很可能是经向遥相关在以上区域的体现，与南极涛动影响北半球气候的印度洋路径 (Zheng et al., 2015; 马浩等, 2016) 相对应。

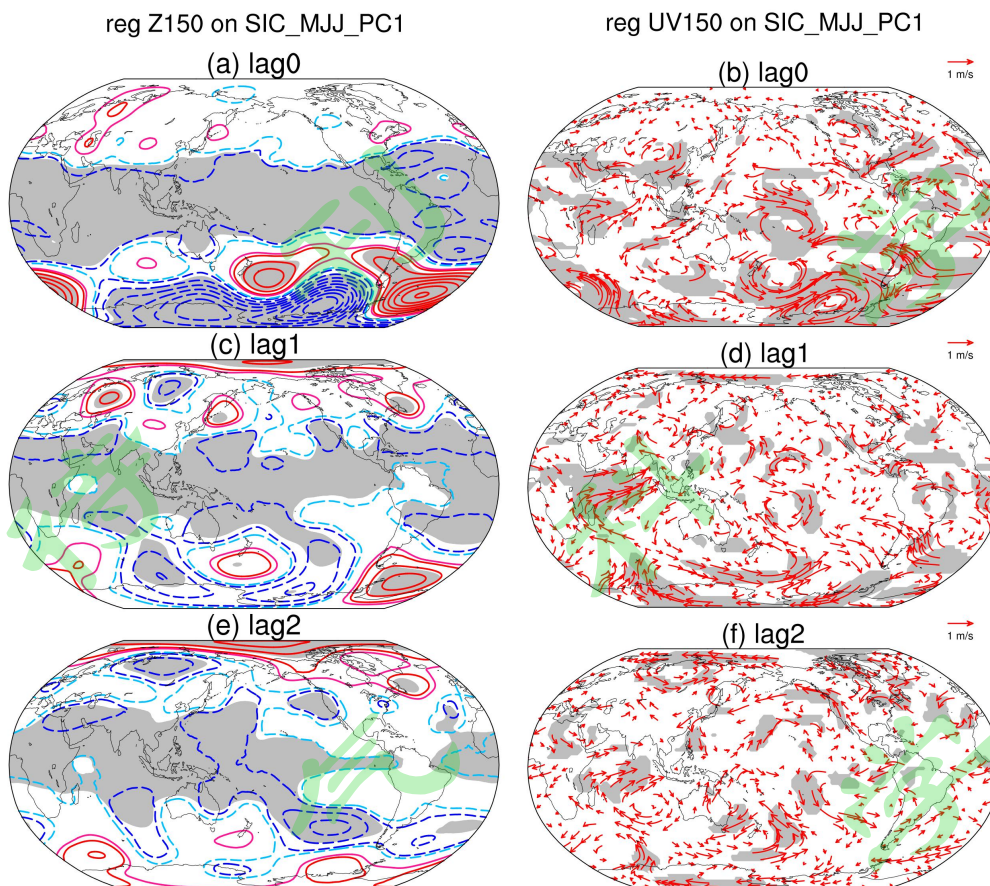


图6 与图5一致除了是对150hPa (a,c,e; 单位: gpm; 间隔: 5gpm; 其中浅蓝色虚线和浅红色实线分别代表值为-2和2的等值线)

Fig.6 Same as Fig.5 except for 150hPa geopotential height (a,c,e; units: gpm; interval: 5gpm; the light-blue dashed and light-red solid contours represent -2 and 2)

从高层的回归结果来看(图6), 南半球中、高纬度依然分别以正、负异常为主, 说明中高纬度这种跷跷板式的变化是很深厚的; 与低层稍有不同的是, 正异常中心分布在南大西洋及西南太平洋上, 南印度洋正异常较弱甚至出现负异常。相应的, 在正负异常中心分别出现异常反气旋和气旋。另外, 值得关注的是, 从同期回归结果来看(图6a), 赤道低纬度出现显著的负异常, 环绕全球呈带状分布, 反映出赤道低压带的加深; 而滞后一个月和两个月时(图6c,e), 这种负异常在澳大利亚以北至海洋性大陆一带依旧能够维持, 且存在大范围通过显著性检验的区域, 表明了该区域响应的持续性, 而日本中北部也维持着一个正异常

中心，从风场上来看存在一个明显的气旋性结构（图 6d,f），与低层正异常保持一致；相比之下，北美-大西洋一带通过显著性检验的范围有所减小，不过北大西洋的正异常和中部大西洋的负异常仍然一直存在，位置较低层有些许偏移。另外，JJA 和 JAS（图 6c,e）在热带南印度洋、热带北印度洋、中亚和非洲地区为持续性的负异常。

与以上高度场和风场相对应，南极海冰涛动异常和热带及北半球许多地区的降水和温度也存在显著的关联。MJJ 回归结果（图 7a-b）显示，在热带地区，赤道中部太平洋及赤道印度洋存在显著的降水 and 海温负异常，海洋性大陆至澳大利亚以东洋面、南美洲巴西和热带南大西洋有显著的降水和海温正异常。以上响应持续到 JJA 和 JAS，虽然强度和显著性有所减弱（图 7c-f）。而在赤道东太平洋，在滞后 1-2 月则出现显著降水正异常。值得关注的是，从同期到滞后 1-2 月，西北太平洋至我国东部沿海地区存在显著降水正异常，原因是我国南海至日本南部有一显著的气旋式大气环流异常区（图 5b,d,f），该区域上升运动加强（见一下节图 9b,d,f），同时以上地区有显著的降温，表明南极海冰对我国夏季短期气候具有一定的预测意义，这也印证了前人“南极海冰异常和我国夏季温度及降水存在显著关联”的观点（马丽娟等，2006，2007）。

除此之外也可看出，南极涛动海冰异常与非洲中部一带的下沉运动和降水减少引起的干旱（图 5b，图 7a,c）紧密相关；中东至地中海地区存在持续性的表面温度正异常；日本北部呈现增温异常，东西伯利亚-鄂霍次克海-阿留申群岛一带呈现降温异常，并且由同期至滞后两个月强度和显著性逐渐增大，表明了异常信号逐渐北传的特征，与前文高度场的响应特征相匹配（图 5a,c,e）；北美中部-北大西洋温度异常呈现东西偶极子型分布（图 7b,d,f），这与前文所提到的北美负异常与北大西洋正异常构成一个类似于西大西洋型遥相关相匹配（图 5a,c,e）。前述众多结果表明，南极海冰涛动异常与北半球同期及滞后的温度降水存在显著的联系，具有一定的预报潜力。

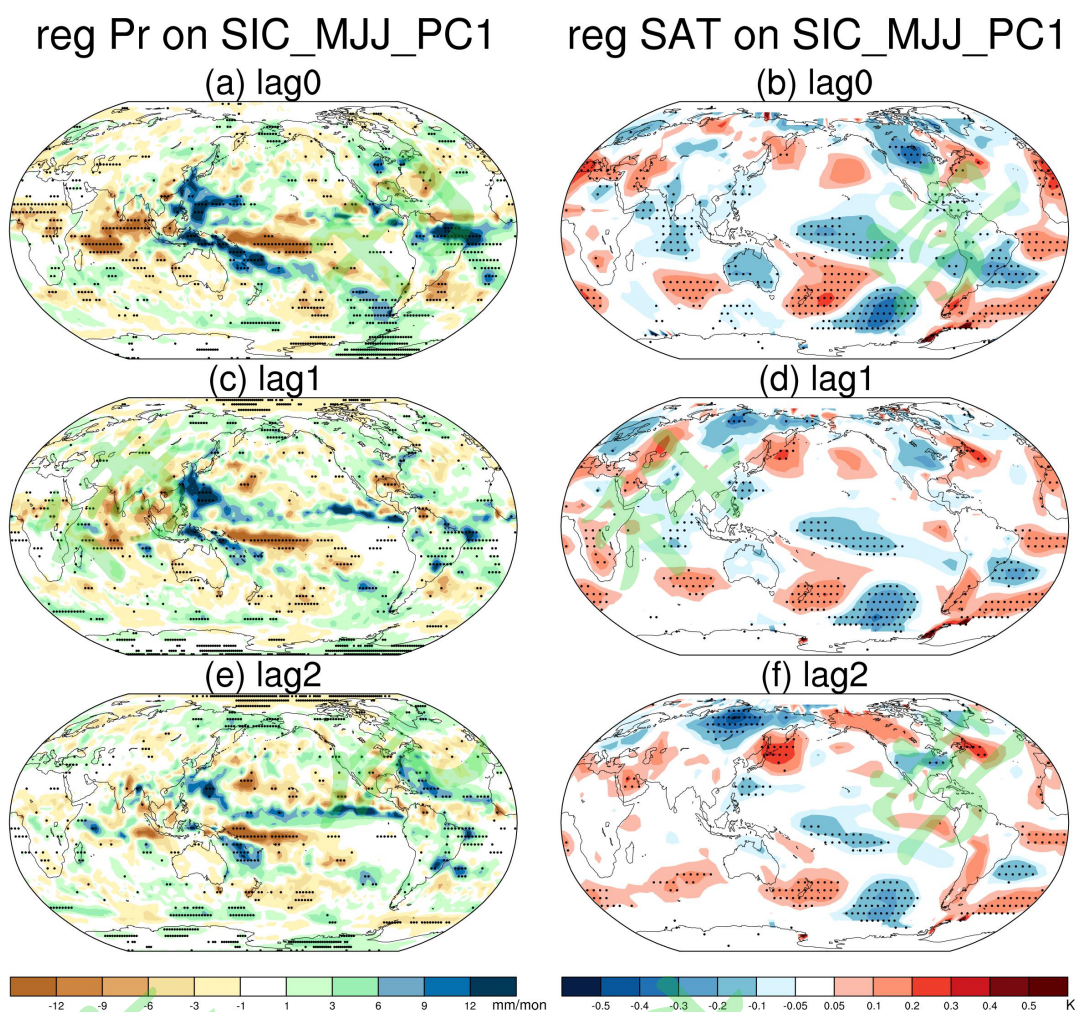


图 7 降水量 (a,c,e; 单位: mm/month) 和地表气温 (b,d,f; 单位: K) 对 MJJ 南极海冰涛动指数的回归系数。打点表示通过 90%信度显著性检验

Fig.7 Same as Fig. 3 but for regression coefficients of the precipitation(a,c,e;units: mm/month) and surface air temperature (b,d,f;units:K) onto the Antarctic Sea Ice Oscillation Index in MJJ at lag=0, +1 and +2 months.

3.3 经圈环流调整机制

从以上回归和相关分析结果来看, 南极海冰变异不仅具有显著的局地效应, 并且还可能影响南半球中高纬, 及热带低纬乃至北半球大气环流, 特别是澳大利亚以北至海洋性大陆一带和热带大西洋至北大西洋一带, 存在持续性的、高低层一致的显著响应, 反映出以上两区域是对南极海冰涛动的敏感性区域和实现南北

半球相互作用的关键通道。赵宗慈和王绍武（1979）也曾指出，南北半球之间的相互作用在澳大利亚到东亚一带最为活跃，并建议在研究北半球气候变异时，应当充分考虑南半球的作用，以便更好地开展短期气候预测。

关于这种跨半球的相互作用，Wu et al.（2009）研究发现，南半球环状模异常能够引发经圈环流调整。当 SAM 正异常时，南半球西风急流向极偏移，从而造成南半球中纬度风速减小，引起海温升高，而这一区域恰好正是南半球 Hadley 环流的下沉支，海温升高引发南半球 Hadley 环流异常，通过三圈环流环环相扣的联动作用，进一步导致北半球 Hadley 环流异常，从而引发东亚气候调整。从宏观视角来看，经圈环流调整的传递效应是 SAM 影响低纬度乃至北半球气候的一个十分简洁而有效的途径（马浩等，2016；Dou and Wu，2018）。受此启发，接下来主要从经圈环流的角度对南极海冰涛动的影响机理展开分析。

选取上文所述的敏感性区域，即西太平洋所处的 110-150°E 经度范围，计算纬向平均的经向及垂直风速与 MJJ 南极海冰涛动指数的相关系数，研究该区域经圈环流的响应（为了弱化垂直方向和水平方向的差异，提高显示效果，图中将垂直方向的相关系数做了扩大两倍的处理）。从同期相关图来看（图 8a），Ferrel 环流上升支（南半球高纬度蓝色区域）轴线呈现上升异常、Ferrel 环流下沉支（南半球中纬度红色区域）附近以下沉异常为主，反映了该经度范围内 Ferrel 环流增强以及向南偏移的倾向；Ferrel 环流下沉支也即是 Hadley 环流下沉支，相应的，Hadley 环流上升支（约 10°S-30°N 蓝色区域），可以发现大范围的上升异常，表明同期 Hadley 环流上升运动加强，并且从滞后 1-2 个月的相关图中（图 8b,c），也能观察到这种上升异常，表明这种上升运动的增强具有一定的持续性，在该经度范围内，Hadley 环流上升支对应于地面的海洋性大陆区域。另外，图 8a-c 显示副热带 30°N-55°N 出现持续性的上升运动，而大约 60°N 以北则为持续性的下沉运动。这表明，通过经圈环流调整的传递效应，南半球高纬的异常通过海洋性大陆通道，得以传递到低纬度乃至北半球东亚和北太平洋地区。

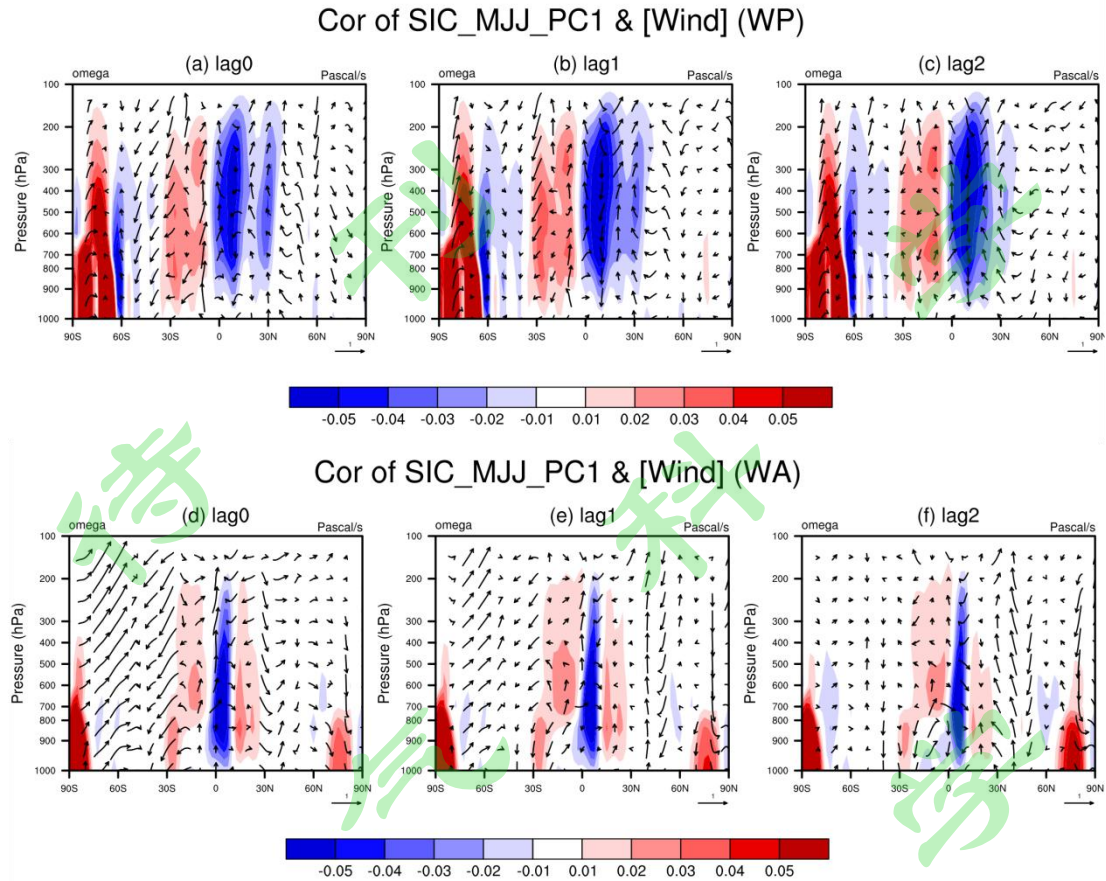


图 8 西太平洋（110-150°E，a-c）及西大西洋（30-80°W，d-f）纬向平均的经向及垂直风速与 MJJ 南极海冰涛动指数的相关系数，在图中用矢量箭头表示，图中填色为纬向平均垂直速度的气候平均场（单位：Pascal/s），负值为上升运动。

Fig. 8 Latitude-height cross sections of correlation coefficients between the zonally averaged meridional wind speed and vertical velocity and the Antarctic Sea Ice Oscillation Index in MJJ (vectors) of Western Pacific (110-150°E,a-c) and Western Atlantic (30-80°W,d-f) . The shadings represent the climatological zonally averaged vertical wind speed (units:Pascal/s). Negative values represent upward motion.

海洋性大陆（Maritime Continent，MC）是指由新几内亚岛、印度尼西亚群岛、菲律宾群岛等岛屿及浅海组成的区域，该地区地处亚洲与大洋洲、太平洋与印度洋的连接地带。MC 是连接太平洋和印度洋、低纬度和中高纬度大气环流以及对流层和平流层的重要纽带，是全球大气环流系统中极其重要的能量源区。MC 地区也是赤道上最大的大气对流活动中心，存在贯穿整个对流层的深厚的热

带对流活动，对流凝结释放的巨大能量驱动了全球大气环流，并通过激发罗斯贝波列向高纬度传播，进一步对北半球中高纬度产生影响。

MC 地区大尺度的上升运动也是 Walker 环流上升支的重要组成部分(王鑫等, 2016)。为了研究对流活动对南极海冰涛动的响应，将 MJJ 海冰指数与向外长波辐射 (OLR) 进行回归 (图 9a,c,e)，从回归结果来看，海洋性大陆区域为明显 OLR 负距平区，表明对流活动偏强，特别是菲律宾海东北部，对流正异常能够持续到滞后两个月。热带 OLR 的响应也与前文降水的响应相匹配 (图 7a,c,e)，即 OLR 负异常所在的区域往往对应降水正异常，均能说明对流活动的变化。

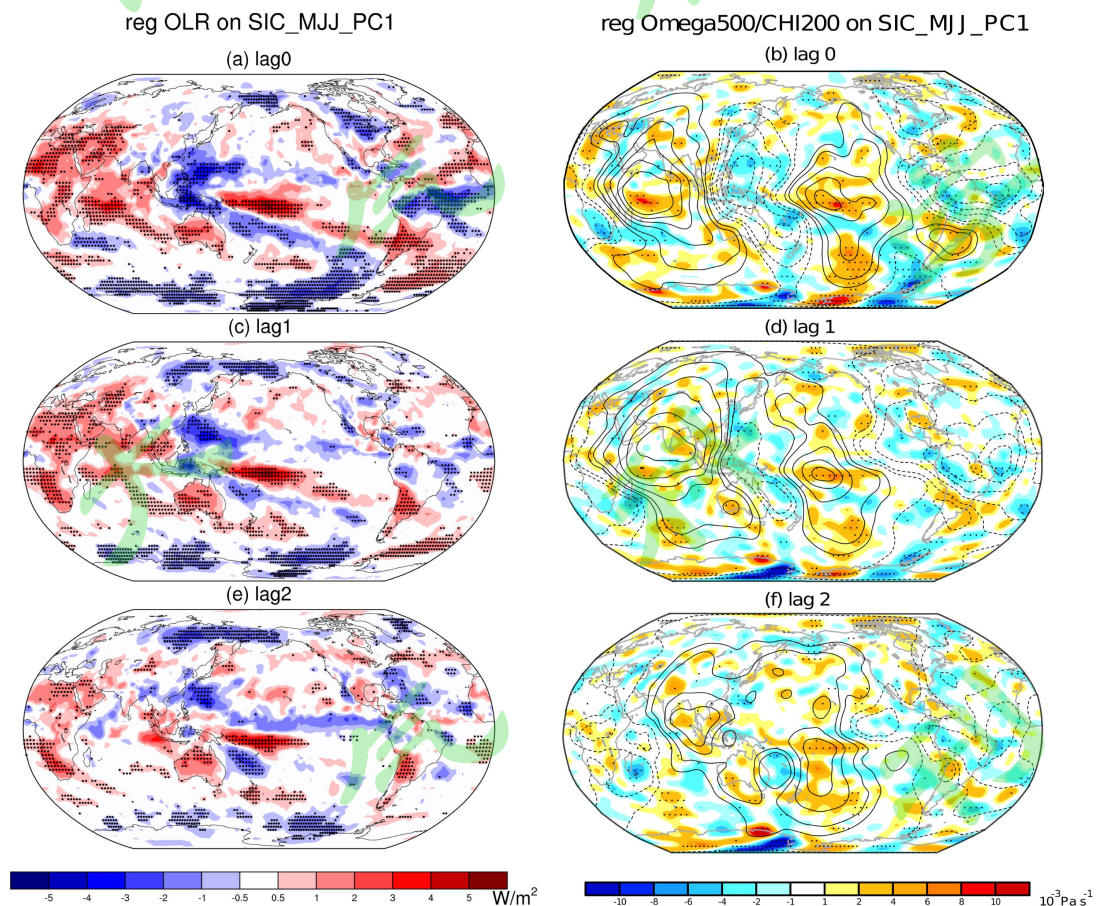


图 9 向外长波辐射 (a,c,e;单位: W/m^2)、500hPa 垂直速度 (b,d,f;阴影,单位: Pa/s)、200hPa 势函数 (b,d,f;等值线,单位: m^2/s ,间隔: $10^6 m^2/s$) 对 MJJ 南极海冰涛动指数的回归系数。打点表示通过 90%信度显著性检验

Fig.8 Same as Fig. 3 but for regression coefficients of the outgoing longwave radiation (a,c,e;units: W/m^2), 500hPa vertical velocity (b,d,f;shadings,unit: Pa/s) and

200hPa velocity potential(b,d,f;contours,unit:m²/s, interval:10⁶m²/s) onto the Antarctic Sea Ice Oscillation Index in MJJ at lag=0, +1 and +2 months.

除了 OLR，从垂直速度和势函数的角度来看亦是如此。回归结果显示（图 9b,d,f），海洋性大陆地区 500hPa 垂直速度以负异常为主，特别是菲律宾附近，负异常明显且滞后一到两个月仍能维持（图 9d,f），表明该区域上升运动持续加强；同时，该区域处在 200hPa 势函数负值中心，而东西两侧的太平洋和印度洋则存在势函数正值中心，表明 MC 在高层向两侧辐散；以上两种结果都说明了该区域热带对流活动的加强。而前人的研究已经发现（Kosaka et al, 2010; Xie et al, 2016），菲律宾周边的对流增强和偏少的降水，会激发出 PJ 波列（菲律宾周边-日本-鄂霍次克海），从南向北传播，将热带低纬度的信号传递到中高纬更远的地方；而在菲律宾周围对流偏强时，正负距平分布几乎相反，有利于激发出负位相的 PJ 波列，分布型态基本与前文图 5 一致。由此，图 5 中东亚沿岸从低纬到高纬南北走向的+-波列的形成机制得以解释，即海洋性大陆区域特别是菲律宾附近的热带对流活动偏强，起到了将热带信号传递到北半球中高纬的桥梁作用。

另外，也值得关注一下西大西洋所处的 30-80°W 经度范围，同样计算纬向平均的经向及垂直风速与 MJJ 南极海冰涛动指数的相关系数，研究该区域经圈环流的响应（图 8）。结果显示，同期（图 8d）高纬度 60°S 呈现上升异常，中纬 30°S 附近呈现下沉异常，对应 Ferrel 环流和 Hadley 环流的下沉支加强，低纬 10°S 和赤道附近则呈现上升异常，对应于同期 OLR 回归结果中（图 8a）热带南大西洋显著的负异常区，表明该区域对流活动的增强，表明热带大西洋 Hadley 环流上升支显著加强；而滞后 1 个月（图 8e）时，10°S 附近的上升异常扩展至约 20°N，滞后 2 个月（图 8f）时，30-40°N 出现明显的上升运动，对应于图 8b 和图 8c 中显著负 OLR 异常区逐渐由赤道大西洋北移至热带北大西洋加勒比海及其外围，同时在热带大西洋持续存在负势函数中心（图 9b,d,f），同样也印证了热带大西洋对流活动的增强。前人研究已经发现，热带大西洋对流异常可激发向中高纬度传播的 Rossby 波，引起在北大西洋和欧洲地区大气环流异常（Cassou et

al., 2004; 梅笑冬, 2015), 与图 5 中对流层低层类似于 WA 型遥相关相吻合。

4 结论和讨论

本文重点分析了南极海冰偶极子型异常即南极海冰涛动对南半球乃至北半球大气环流的可能影响, 并且提出了南极海冰跨半球影响的物理机理。主要的结论有:

(1) 南极海冰偶极子异常在所研究的时段内 (MJJ-ASO) 有很好的持续性, 可以为上方大气提供持续性的强迫, 通过冰气相互作用, 对南大洋热通量和大气瞬变活动有关的动量热量通量产生显著影响, 有利于激发持续性的 AAO 型大气环流异常。

(2) 从高度场回归结果来看, 呈现较为典型的正位相南极涛动型响应, 从对流层到平流层低层都有反映, 高纬绕南极低压加深的同时, 中纬海洋高压加强, 使中纬度和极地及热带之间的气压梯度加大, 有利于高纬西风和低纬度东南信风加强。从风场回归结果来看, 从南极到北极, 纬向平均纬向风呈现明显的正负相间的经向遥相关型分布。

(3) 滞前海冰异常一到两个月时, 日本附近出现显著的正异常中心, 鄂霍次克海-阿留申群岛一带出现带状的负异常, 这种等压面上看到的位势高度正负中心的相间分布, 即东亚沿岸从低纬到高纬南北走向的 “-+” 负位相 PJ 波列或者 EAP 遥相关, 是经向遥相关除纬向风场外的另外一种区域表现形式; 另外, 北美洲到大西洋低纬度一带存在的负位势高度异常和北大西洋附近存在的正位势高度异常中心, 构成一个类似于西大西洋型遥相关 (WA) 的结构, 而在非洲和热带印度洋到欧洲地区也分别存在负异常和正异常响应, 也很可能都是经向遥相关的区域表现形式。与以上高度场和风场相对应, 南极海冰涛动异常和热带及北半球许多地区的降水和温度也存在显著的关联。例如, 在热带地区, 赤道中部太平洋及赤道印度洋存在显著的降水和海温负异常; 西北太平洋至我国东部沿海地区存在显著降水正异常和温度负异常。此外, 南极涛动海冰异常与非洲中部一

带的干旱、中东地区及日本北部的增温、北美中部-北大西洋东西偶极子型温度异常也有显著的联系，具有一定的预报潜力。

(4) 海洋性大陆一带和热带大西洋至北大西洋一带是南极海冰涛动显著影响低纬乃至北半球大气环流，实现南北半球相互作用的关键通道。持续性的南极海冰涛动异常强迫导致海洋性大陆区域特别是菲律宾附近的热带对流活动偏强，起到了将南半球和热带信号传递到北半球东亚沿岸的桥梁作用；另外，热带大西洋对流持续增强并具有向北传递的特征，也起到了将南大西洋和热带大西洋信号传递到北大西洋的桥梁作用。

需要强调的是，基于相关分析得到的结论有待利用模式加以验证。南极海冰涛动指数和全球大气同期和滞后回归结果反映出南极海冰异常对南半球及北半球大气环流的可能影响，还缺乏数值模拟支持。同样关键机制中经向遥相关和经圈环流调整目前只是基于观测资料从统计关系的角度作出的解释，所得到的结果也是初步的，为了探讨这些机制的具体物理过程，还需要今后借助数值模式和气候动力学理论开展更深入的研究（范可和王会军，2006b；张乐英等，2017）。南极海冰影响全球大气环流过程中涉及其他重要过程，如能量传播和季节内演变特征等，也需要在今后的研究中详细讨论和进一步加强。

另外，已有的很多研究强调了南半球中纬度海表面温度在南半球环流影响北半球气候中的重要作用（郑菲和李建平，2012；Wu et al., 2015）；Li et al. (2010) 也曾指出印度洋海表面温度在串联南北半球环流系统中扮演重要角色。综合考虑海洋在海冰气候效应中的作用途径，是笔者接下来的主要任务。此外，与南极海冰涛动相联系的环流异常是大范围系统性的，本文仅从北半球西太平洋及大西洋上方的大气异常研究了海冰跨半球影响的可能过程。至于与南极海冰涛动有关的其他环流系统，如图 5 图 6 中赤道中东太平洋的位势异常（张乐英等，2017）等，也需要今后进一步细致研究。

参考文献(References)

- Bader J, Flügge M, Kvamstø N G, et al. 2013. Atmospheric winter response to a projected future Antarctic sea-ice reduction: a dynamical analysis[J]. *Climate Dynamics*, 40(11-12): 2707-2718, doi:10.1007/s00382-012-1507-9.
- 卞林根, 林学椿. 2008. 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*, 30(02): 196-203. Bian Lingen, Lin Xuechun. 2008. Antarctica sea-ice oscillation and its possible impact on monsoon of south sea and China summer rainfall [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology* (in Chinese), 30(02): 196-203, doi:CNKI:SUN:BCDT.0.2008-02-003.
- Cavalieri D J, Parkinson C L, Vinnikov K Y. 2003. 30-Year satellite record reveals contrasting Arctic and Antarctic decadal sea ice variability[J]. *Geophysical Research Letters*, 30(18): 1970-0, doi:10.1029/2003GL018031
- Cassou C, Deser C, Terray L, et al. 2004. Summer Sea Surface Temperature Conditions in the North Atlantic and Their Impact upon the Atmospheric Circulation in Early Winter[J]. *J. Climate*, 17(17): 3349-3363, doi:10.1175/1520-0442(2004)017<3349:SSSTCI>2.0.CO;2.
- 程彦杰, 卞林根, 陆龙骅. 2002. 南极海冰涛动与 ENSO 的关系[J]. *应用气象学报*, 13(06): 711-717. Chen Yanjie, Bian Lingen, Lu Longhua. Antarctic sea ice oscillation and its relationship with ENSO [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 13(06): 711-717, doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2002.06.009.
- Deser C, Magnúsdóttir G, Saravanan R, et al. 2004. The Effects of North Atlantic SST and Sea Ice Anomalies on the Winter Circulation in CCM3. Part II: Direct and Indirect Components of the Response[J]. *J. Climate*, 17(5): 877-889, doi:10.1175/1520-0442(2004)017<0877:TEONAS>2.0.CO;2
- 窦挺峰. 2009. 南极海冰对南半球大气环流和气候影响的数值模拟与诊断[D]. Dou Tingfeng. 2009. Numerical simulation and diagnosis of the impacts of the Antarctic sea-ice on Southern Hemisphere atmospheric circulation and climate. [D].
- 窦挺峰, 效存德. 2013. 南半球降水对南极海冰涛动异常的响应[J]. *极地研究*, 25(01): 45-52. Dou Tingfeng, Xiao Cunde. 2013. Response of southern hemisphere precipitation to Antarctic sea ice oscillation anomalies [J]. *Chinese Journal of Polar Research* (in Chinese), 25(01): 45-52,

doi:10.3724/SP.J.1084.2013.00045.

Dou J, Wu Z.2018 .Southern Hemisphere Origins for Interannual Variations of Snow Cover over the Western Tibetan Plateau in Boreal Summer[J]. J. Climate, 31(19): 7701-7718, doi: 10.1175/JCLI-D-17-0327.1.

范可.2006.南半球环流异常与长江中下游夏季旱涝的关系[J].地球物理学报,49(3):672-679.

Atmospheric circulation anomalies in the Southern Hemisphere and summer rainfall over Yangtze River Valley [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 49(3):672-679, doi: 10.3321/j.issn:0001-5733.2006.03.009.

范可, 王会军. 2006a. 有关南半球大气环流与东亚气候的关系研究的若干新近展 [J]. 大气科学, 30: 402-412. Fan Ke, Wang Huijun. 2006a. Studies of the relationship between southern hemispheric atmospheric circulation and climate over East Asia [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 30: 402 - 412, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2006.03.04.

范可, 王会军. 2006b. 南极涛动的年际变化及其对东亚冬春季气候的影响 [J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 36 (4): 385 - 391. Fan Ke, Wang Huijun. 2006. Interannual variability of Antarctic Oscillation and its influence on East Asian climate during boreal winter and spring [J]. Sci. China Ser. D, 2006, 49(5): 554 - 560, doi:10.1007/s11430-006-0554-7.

范可, 王会军. 2007. 南极涛动异常及其对冬春季北半球大气环流影响的数值模拟试验 [J]. 地球物理学报, 50 (2): 397 - 403. Fan Ke, Wang Huijun. 2007. Simulation of the AAO anomaly and its influence on the Northern Hemispheric circulation in boreal winter and spring [J]. Chinese J. Geophys.(in Chinese), 50 (2): 397 - 403, doi:10.3321/j.issn:0001-5733.2007.02.009.

Fan K, Wang H J. 2004. Antarctic oscillation and the dust weather frequency in North China [J]. Geophys. Res. Lett., 31 (10): L10201, doi:10.1029/ 2004GL019465.

Hobbs W R, Massom R, Stammerjohn S, et al. 2016. A review of recent changes in Southern Ocean sea ice, their drivers and forcings[J]. Global and Planetary Change, 143: 228-250, doi: 10.1016/j.gloplacha.2016.06.008.

Holland P R. 2014.The seasonality of Antarctic sea ice trends[J]. Geophysical Research Letters, 41(12): 4230-4237,doi:10.1002/2014GL060172.

- Karoly D J.1989.Southern Hemisphere circulation features associated with El Nino-Southern Oscillation events[J]. J. Climate,2(11):1239–1252, doi: 10.1175/1520-0442(1989)002<1239:SHCF>2.0.CO;2.
- Kosaka Y, Nakamura H. 2010. Mechanisms of Meridional Teleconnection Observed between a Summer Monsoon System and a Subtropical Anticyclone. Part I: The Pacific-Japan Pattern[J]. J. Climate, 23(19): 5085-5108,doi:10.1175/2010JCLI3413.1.
- Kwok R, Pang S S, Kacimi S. 2017. Sea ice drift in the Southern Ocean: Regional patterns, variability, and trends[J]. Elementa: Science of the Anthropocene, 5,doi:10.1525/elementa.226.
- 李 璠 .2009. 南极海冰时空演变特征及其对南半球大气环流的影响 [D].Li Fan.2009.Spatiotemporal evolution of Antarctic sea ice and its influence on atmospheric circulation in the southern hemisphere[D].
- Li S L, Perlwitz J, Hoerling M P, et al. 2010. Opposite annular responses of the Northern and Southern Hemispheres to Indian Ocean warming[J]. J. Climate,23(13):3720-3738, doi: 10.1175/2010JCLI3410.1.
- Lorenz D J, Hartmann D L.2003. Eddy-Zonal Flow Feedback in the Northern Hemisphere Winter[J].J.Climate,16(8):1212-1227,doi:10.1175/1520-0442(2003)16<1212:EFFITN>2.0.CO; 2.
- 马浩, 李正泉, 张力. 2016.南半球环状模对中国气候的影响研究进展 [J]. 高原气象, 35(6): 1595-1608. Ma Hao, Li Zhengquan, Zhang Li. 2016. Review on the impacts of the southern annular mode on climate over China [J].Plateau Meteorology(in Chinese), 35(6):1595-1608, doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2015.00098.
- 马丽娟, 陆龙骅, 卞林根. 2006. 南极海冰与我国夏季天气的关系 [J]. 极地研究, 18(1): 30-38. Ma Lijuan,Lu Longhua,Bian Lingen.2006.The relationship between Antarctic sea ice and the synoptic climate in summer of China [J].Chinese Journal of Polar Research(in Chinese), 18(1): 30-38,doi:CNKI:SUN:JDYZ.0.2006-01-003.
- 马丽娟,陆龙骅,卞林根.2007.南极海冰北界涛动指数及其与我国夏季天气气候的关系[J].应用气象学报,18(4):568-572. Ma Lijuan,Lu Longhua,Bian Lingen.2006. Antarctic Sea-ice Extent Oscillation Index with the Relationship Between ASEOI and Synoptic Climate in Summer of

- China [J].Journal of Applied Meteorological Science(in Chinese),18(4):568-572, doi: 10.3969/j.issn.1001-7313.2007.04.019.
- 梅笑冬. 2015.北大西洋海温对NAO型大气环流异常的影响研究[D]. Mei Xiaodong.2015.An impact study of North Atlantic SST on NAO-like circulation[D].
- Miao Q, Chen L. 1997.Numerical experiments for the impact of Antarctic ice cover and sea surface temperature on climate variability[J].Acta Meteorologica Sinica, 11(1):23-34,doi: CNKI:SUN:QXXW.0.1997-01-002.
- Nitta T.1987.Convective Activities in the Tropical Western Pacific and Their Impact on the Northern Hemisphere Summer Circulation[J].Journal of the Meteorological Society of Japan, 65(3):373-390, doi:10.2151/jmsj1965.65.3_373.
- 钱卓蕾. 2014. 秋季南极涛动异常对冬季中国南方降水的影响 [J]. 大气科学, 38 (1): 190-200, Qian Zhuolei. 2014. The impact of autumn Antarctic oscillation (AAO) on winter precipitation in southern China [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 38 (1): 190-200,doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2013.13122.
- 孙淑清, 刘舸, 张庆云. 2007. 南半球环流异常对夏季西太平洋热带气旋生成的影响及其机理 [J]. 大气科学, 31 (6): 1189 - 1200. Sun Shuqing, Liu Ge, Zhang Qingyun. 2007. The influence of the circulation anomalies in the Southern Hemisphere on the tropical cyclone frequency in summer over the Western Pacific and its mechanism [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese),31 (6): 1189-1200, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2007.06.14.
- Sun J Q, Wang H J, Yuan W. 2009. A possible mechanism for the co-variability of the boreal spring Antarctic Oscillation and the Yangtze River valley summer rainfall [J]. International Journal of Climatology, 29 (9): 1276-1284,doi:10.1002/joc.1773.
- Swingedouw D, Fichet T, Huybrechts P, et al. 2008. Antarctic ice-sheet melting provides negative feedbacks on future climate warming[J]. Geophysical Research Letters,35(17),doi: 10.1029/2008GL034410.
- Thompson D W J, Wallace J M. 2000. Annular modes in the extratropical circulation. Part I:Month-to-month variability[J].J.Climate,13(5):1000–1016, doi: 10.1175/1520-0442(2000)013<1000:AMITEC>2.0.CO;2.

- Wallace J M, Gutzler D S. 1981. Teleconnections in the Geopotential Height Field during the Northern Hemisphere Winter[J]. Mon. Wea. Rev., 109(4): 784-812, doi: 10.1175/1520-0493(1981)109<0784:TITGHF>2.0.CO;2
- 王鑫, 王东晓, Zhang Chidong, 等. 2016. “海洋性大陆”观测研究计划介绍及中国参与进展[J]. 气象学报, 74(4): 653-654. Wang Xin, Wang Dongxiao, Zhang Chidong, et al. 2016. Introduction of observation and research program of "oceanic continent" and progress of China's participation[J]. Acta Meteorologica Sinica, 74(4): 653-654, doi:10.11676/qxxb2016.070.
- Wang G, Hendon H H, Arblaster J M, et al. 2019. Compounding tropical and stratospheric forcing of the record low Antarctic sea-ice in 2016[J]. Nature Communications, 10(1): L08502-1484, doi: 10.1038/s41467-018-07689-7.
- 魏立新, 解思梅, 张占海. 2003. 南极海冰增加对全球7月气候的影响[J]. 冰川冻土, 25(z2): 285-291. Wei Lixin, Xie Simei, Zhang Zhanhai. 2003. The effect of Antarctic sea ice on the climate [J]. Journal of Glaciology and Geocryology (in Chinese), 25(z2): 285-291, doi: 10.3969/j.issn.1000-0240.2003.z2.017.
- Wu Z, Li J, Wang B, et al. 2009. Can the Southern Hemisphere annular mode affect China winter monsoon? [J]. Journal of Geophysical Research, 114(D11): D11107, doi: 10.1029/2008JD011501
- Wu Q. 2008. Observed impact of subtropical-midlatitude South Atlantic SST anomalies on the atmospheric circulation [J]. Geophysical Research Letters, 35(22): L22803, doi: 10.1029/2008GL035488.
- Wu Q, Zhang X. 2011. Observed Evidence of an Impact of the Antarctic Sea Ice Dipole on the Antarctic Oscillation [J]. J. Climate, 24(16): 4508-4518, doi: 10.1175/2011JCLI3965.1.
- Wu Z W, Dou J, Lin H. 2015. Potential influence of the November–December Southern Hemisphere annular mode on the East Asian winter precipitation: A new mechanism [J]. Climate Dyn., 44 (5-6): 1215-1226, doi: 10.1007/s00382-014-2241-2.
- 吴仁广, 陈烈庭. 1994. 南极海冰与南半球大气环流关系的初步探讨 [J]. 大气科学, 18(z1): 792-800. Wu Renguang, Chen Lieting. 1994. A Preliminary Investigation of the Relationship between the Antarctic Sea Ice and the Atmospheric Circulation of the Southern Hemisphere [J].

- Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese),18(z1): 792-800,doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1994.z1.03.
- Xie S, Kosaka Y, Du Y, et al. 2016. Indo-Western Pacific Ocean Capacitor and Coherent Climate Anomalies in Post-ENSO Summer: A Review[J]. Advances in atmospheric sciences, 33(4): 411-432,doi:10.1007/s00376-015-5192-6.
- 薛峰. 2005. 南半球环流变化对东亚夏季风的影[J]. 气候与环境研究, 10(3): 401-408. Xue Feng. 2005. Influence of the southern circulation on East Asian summer monsoon[J]. Climatic Environ Res,10(3):401-408,doi:10.3969/j.issn.1006-9585.2005.03.013
- 杨修群, 黄士松. 1992.北半球夏季南极冰气候效应的数值试验[J]. 大气科学, 16(1): 69-76. Yang Xiuqun, Huang Shisong. 1992.Climatic effect of Antarctic Sea Ice in the Northern Hemisphere Summe--A Numerical Experiment[J]. Chinese J. Atmos. Sci., 16(1): 69-76. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1992.01.11.
- Yuan X, Martinson D G. 2001. The Antarctic dipole and its predictability[J]. Geophysical research letters, 28(18): 3609-3612,doi:10.1029/2001GL012969.
- 张乐英, 徐海明, 施宁. 2017. 冬季南极涛动对欧亚大陆地表气温的影响[J]. 大气科学, 41(04):869-881. Zhang Leying, Xu Haiming, Shi Ning. 2017.Influence of the Antarctic oscillation on surface air temperature over the Eurasian continent during boreal winter [J]. Chinese J. Atmos. Sci.(in Chinese), 41 (4): 869-881, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1612.16228.
- 赵宗慈, 王绍武. 1979. 南北半球大气环流与气候的相互作用[J]. 气象学报, 37(2): 58-68. Zhao Zongci, Wang Shaowu. 1979. Interaction between the circulation and climate in northern and southern hemispheres[J]. Acta Meteorologica Sinica, 37(2): 58-68, doi:10.11676/qxxb1979.019.
- 郑菲, 李建平. 2012. 前冬南半球环状模对春季华南降水的影响及其机理[J]. 地球物理学报, 55(11): 3542-3557. Zheng Fei, Li Jianping. 2012. Impact of preceding boreal winter Southern Hemisphere annular mode on spring precipitation over South China and related mechanism [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 55(11): 3542-3557, doi:10.6038/j.issn. 0001-5733.2012.11.004.
- Zheng F, Li J, Clark R T, et al. 2015. Influence of the boreal spring Southern Annular Mode on summer surface air temperature over northeast China[J]. Atmospheric Science Letters, 16(2): 155-161, doi:10.1002/asl2.541.