

# 南极极涡与南极涛动对大气环流异常影响的统计分析

曾繁蕊<sup>1</sup>, 孙即霖<sup>2</sup>

<sup>1</sup>中国海洋大学, 海洋与大气学院, 山东 青岛

<sup>2</sup>中国海洋大学, 物理海洋教育部重点实验室, 山东 青岛

Email: z81812120000@163.com, rainbetimes@vip.163.com

收稿日期: 2021年4月8日; 录用日期: 2021年5月3日; 发布日期: 2021年5月11日

## 摘要

本文利用1979~2018年7~9月NCEP/NCAR月平均再分析资料和AAO指数, 分析了季节平均时间尺度南极极涡和南极涛动与南半球大气环流异常和南半球向北的越赤道气流的关系。研究发现, 南极极区500 hPa位势高度异常EOF分解第一模态可反映南极涛动的位相变化, 第二模态反映极涡“偏心”形态分布。南极涛动的不同位相对应应的极地外西风带内大气环流异常具有明显的区域特征, 并非呈环状分布。极地与极地外冷暖空气交换的关键区域主要在南印度洋至澳大利亚南部, 南太平洋以及南美洲东部大西洋上空, 其中南印度洋上空与极地的冷暖空气交换最为显著。当极涡偏向西半球时, 极涡与南太平洋上空和南美洲南部的冷空气活动联系更密切。季节平均时间尺度南极极涡与季风环流强度具有密切的联系, 当极区位势高度偏高, 极涡偏弱时, 季风环流增强。

## 关键词

南极极涡, 南极涛动, “偏心”形态分布

# Statistical Analysis of the Effects of the Antarctic Polar Vortex and the Antarctic Oscillation on Atmospheric Circulation Anomalies

Fanrui Zeng<sup>1</sup>, Jilin Sun<sup>2</sup>

<sup>1</sup>College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Ocean University of China, Qingdao Shandong

<sup>2</sup>Key Laboratory of Physical Oceanography, Ocean University of China, Qingdao Shandong

Email: z81812120000@163.com, rainbetimes@vip.163.com

## Abstract

Based on the NCEP/NCAR monthly mean reanalysis data from Jul to Sep in 1979~2018 and the AAO index, this paper analyzes the relationship between the Antarctic Polar Vortex and the Antarctic Oscillation on the seasonal time scale and the Southern Hemisphere atmospheric circulation anomalies and the southern hemisphere northward cross-equatorial flow. It is found that the first mode of EOF decomposition can reflect the phase change of the Antarctic Oscillation, and the second mode can reflect the eccentricity distribution of the polar vortex. The anomaly of the atmospheric circulation in the outer westerly zone corresponding to the different phases of the Antarctic Oscillation has obvious regional characteristics and is not distributed as a ring. The key regions of cold and warm air exchange between polar and extra-polar regions are mainly from the southern Indian Ocean to the southern part of Australia, the southern Pacific Ocean and the Atlantic Ocean over the eastern part of South America, among which the cold and warm air exchange between the southern Indian Ocean and the polar region is the most significant. When the polar vortex is tilted over the Western Hemisphere, it is more closely associated with cold air activity over the South Pacific and southern South America. The intensity of Asian monsoon circulation is closely related to the Antarctic polar vortex. When the polar potential height is high, which means that the polar vortex is weak, the 55°E~65°E cross-equatorial airflow from south to north increases, and the intensity of Asian monsoon circulation increases.

## Keywords

Antarctic Polar Vortex, Antarctic Oscillation, "Eccentric" Morphology Distribution

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

南极极区通过其冰盖、大气的强烈耦合过程而影响全球,它是大气的热汇和冷源,在同中低纬度的动量、热量和水汽的交换中起到非常重要的作用。严华生等发现北极和赤道的位势高度振荡均落后于南极,南极是气候变化最先开始的区域[1]。南极极区对全球变化的影响得到越来越多的学者的关注[2] [3]。

极涡是体现高纬度大气活动特征的主要系统之一。与阻塞高压、副热带高压等环流系统相互配合,是位于对流层中上部并可延伸到平流层的深厚系统[4]。极涡一般在冬季加强,在夏季减弱[5]。描述极涡特征的特征参数有极涡面积[6],极涡强度指数,极涡中心位置和极涡绕极率等[7]。影响极涡的因素有温度、湿度、降水等物理要素。除此之外,赤道 SST、臭氧损耗及太阳黑子数也是极涡面积变化的影响因素[8] [9]。在特定的时间点,极涡代表着整个南(北)半球的长波特征,以及高空槽脊配置。它的扩张(收缩)对中纬度西风带的强度与地理位置有着显著影响[10]。由于南极涛动的存在,当南极极涡深浅改变时,伴随着南半球中纬地区位势高度的反相变化,使得经向压力梯度随之改变,引起中高纬度纬向风的相应变化[11]。

南半球的极地和低纬度地区之间存在大规模的 SLP 摆动[11] [12] [13] [14],被称之为南极涛动。南极涛动指数(Antarctic Oscillation Index, 简称 AAOI): 定义为 20°S 至 90°S 范围内海平面气压或 850 hPa 位势高度的 EOF 第一模态的时间序列,也可以用纬向平均海平面气压在 40°S 和 65°S 之间的差来表示[11]。

南极涛动反映了大气质量在中、高纬度跷跷板似的反向变化, 并伴随着急流位置的南北移动。当南极涛动处于正位相时, 南半球高纬度位势高度场偏低, 中纬度位势高度场偏高, 急流向极地方向移动; 当南极涛动处于负位相时则情况相反, 急流向低纬度方向移动[15]。

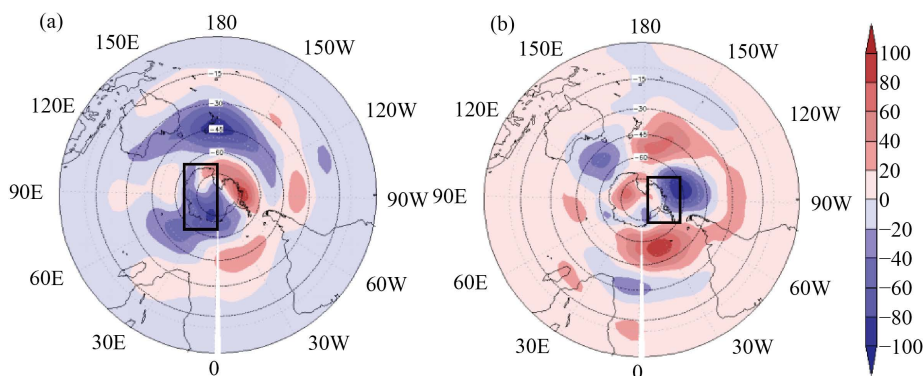
南半球冷空气活动可以对西北太平洋热带气旋活动产生影响。当澳大利亚冷空气加强时, 易造成  $100^{\circ}\text{E}\sim 160^{\circ}\text{E}$  经度带越赤道气流的加强。其中尤其是  $140^{\circ}\text{E}\sim 165^{\circ}\text{E}$  的越赤道气流加强有利于赤道辐合带强度增加, 从而导致西北太平洋热带气旋的发生和加强[16]。由于南极是南半球冷空气活动的源地, 那么南极极涡和南半球大气环流异常以及向北的越赤道气流之间有着怎样的联系呢? 鉴于南半球冬季极涡较强, 本文探讨了 1979~2018 年 7~9 月季节时间尺度南极极涡与极地和极地外冷暖空气交换的联系, 以及与向北越赤道气流的联系, 为深入了解南极极涡对大气环流异常的影响提供了一定的参考价值。

## 2. 资料

研究使用资料时段为 1979~2018 年共 40a, 主要包括美国气象环境预报中心和美国国家大气研究中心(NCEP/NCAR)再分析资料中的 500 hPa 月平均位势高度场资料, 850 hPa 经向风场资料, 分辨率为  $2.5^{\circ}\times 2.5^{\circ}$ 。美国 NOAA 网站提供的 1979~2018 年月平均南极涛动指数资料数据。

## 3. 南极极涡与大气环流异常的联系

在一些年份, 南极极涡会主要集中在南极极区的一侧。如 1992 年, 南极 500 hPa 位势高度负异常主要在东半球一侧(图 1(a)), 而 2018 年则主要分布在西半球一侧(图 1(b))。



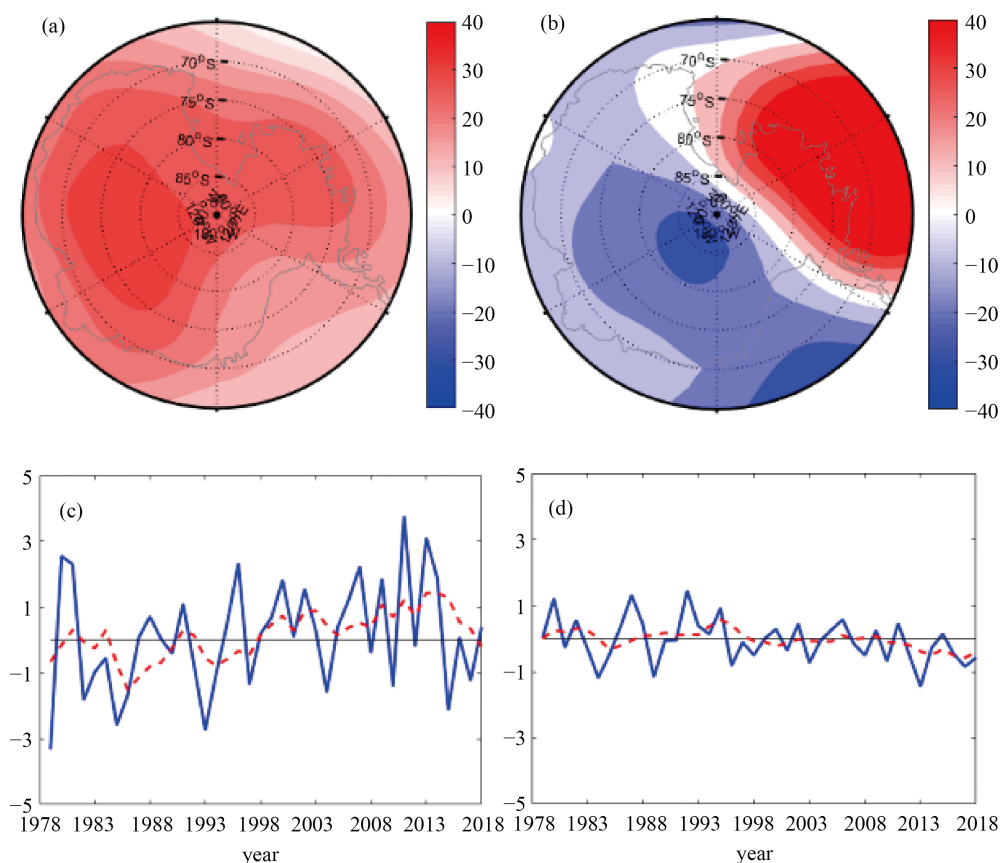
**Figure 1.** 500 hPa geopotential height anomalies in the southern hemisphere from Jul to Sep in 1992 (a) and 2018 (b)

**图 1.** 1992 年(a)和 2018 年(b) 7~9 月南半球 500 hPa 位势高度异常场

### 3.1. 南极 500 hPa 位势高度异常的 EOF 分析

为了分析南半球冬季南半球极涡的变化特征, 对 7~9 月  $65^{\circ}\text{S}$  以南区域 500 hPa 位势高度异常场进行 EOF 分析(图 2)。前两模态的方差贡献分别为 71.17%, 11.06%, 占总模态的 80% 以上。第一模态空间分布(图 2(a))为全区一致型。第一模态时间系数(PC1, 图 2(c))反映了第一模态空间场的时间变化特征, 90 年代后期之前时间系数多为负值, 5 年滑动平均值表明, 除了 2014 年到 2017 年时间系数为负值外, 90 年代后期之后时间系数多为正值。

第二模态的空间分布(图 2(b))表现为南极极涡“偏心”的偶极子形分布。从第二模态时间系数(PC2, 图 2(d))得出, 90 年代后期以来时间系数多为负值, 其中 1998~2011 年振幅较小, 2013~2018 年对应空间场即东半球极区位势高度偏高, 西半球极区位势高度偏低, 南极极涡容易偏向西半球一侧。



**Figure 2.** Spatial distribution (a), (c) and time series (b), (d) of the first two modes of EOF at 500 hPa geopotential height anomaly field of south of 65°S from Jul to Sep in 1979–2018. (Blue solid line: time series; Red dashed line: 5-year moving average)

**图 2.** 1979–2018 年 7~9 月 65°S 以南 500 hPa 位势高度异常场 EOF 分解前两模态空间分布(a), (c) 和时间序列(b) (d)。(蓝色实线: 时间序列, 红色虚线: 5 年滑动平均)

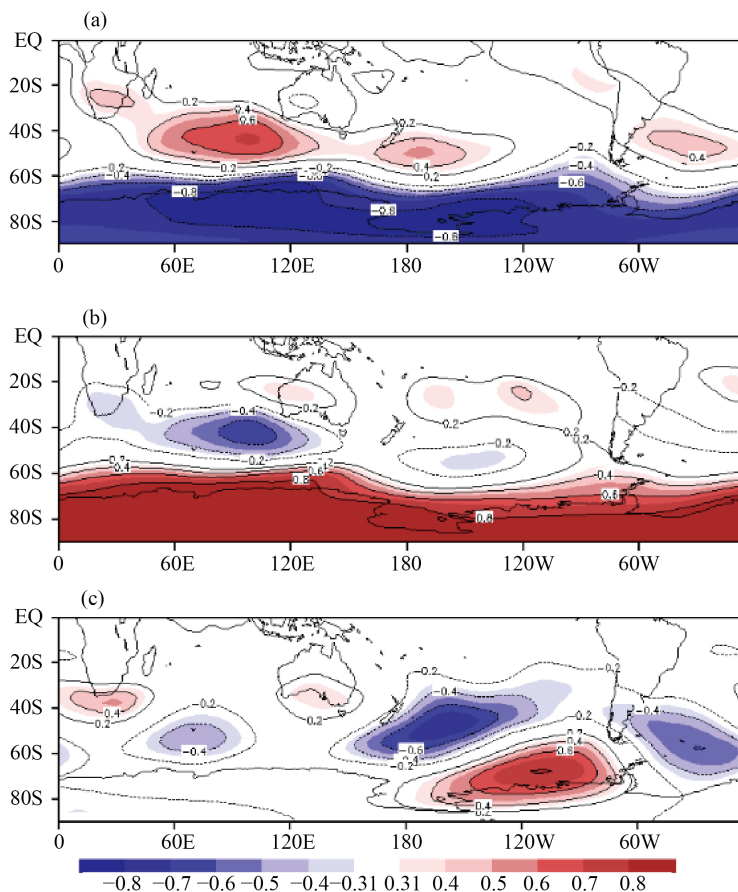
根据以上个例分析及 EOF 统计分析的结果, 可知极涡并不是一直均匀分布在南极大陆上空, 在有些时候会偏向某一半球(东或西半球), 当南极极涡主要只集中在某一半球时, 对南半球乃至全球大气环流的影响可能也会有所不同, 据此, 本文考虑当南极极区东、西半球位势高度存在差异时, 对南半球大气环流异常的影响是否存在差异。

### 3.2. 南极涛动和南极极涡与南半球极地外位势高度异常的联系

#### 3.2.1. 南极极区与极区外冷暖空气交换的区域特征

在季节尺度上, 受冷空气影响, 500 hPa 之下气柱平均气温偏低, 位势高度呈现负异常。计算的 7~9 月 AAO 指数同南半球 500 hPa 位势高度异常的同期相关系数(图 3(a))表明, 南极涛动指数与 60°S 以南极区的 500 hPa 位势高度异常呈显著负相关, 相关系数达到-0.8 以上。

极地外正相关区域主要分布在南印度洋至澳大利亚南部, 新西兰东南侧海域, 南美洲东南侧大西洋海域, 其中南印度洋区域的相关系数达到了 0.6。可以认为, 极区与极地外地区进行冷暖空气交换主要集中在正相关过信度的区域, 其中南印度洋区域最显著。比较 EOF 第一模态时间系数 PC1 与南半球位势高度异常的相关系数分布(图 3(b)), 可以看出, PC1 主要反映了南极涛动表现的极地和极地外大气的相互交换。



**Figure 3.** The correlation coefficient between the AAOI (a), the PC1 (b) and the PC2 (c) and the geopotential height anomaly field at 500 hPa in the SH during the same period from Jul to Sep in 1979~2018. (The blue shaded area and the red shaded area are the negative and the positive correlation area that pass the 95% reliability test respectively)

**图 3.** 1979~2018 年同期 7~9 月 AAOI (a), PC1 (b), PC2 (c) 与南半球 500 hPa 位势高度异常场的相关系数空间分布。(蓝色阴影区域和红色阴影区域分别为通过 95% 信度检验的负相关区域和正相关区域)

EOF 第二模态时间系数 PC2 与南半球 500 hPa 位势高度异常场的相关系数的空间分布(图 3(c))显示, 当极涡“偏心”时, 极地及极地外大气的相互交换在新西兰以东南太平洋和南大西洋更为显著。

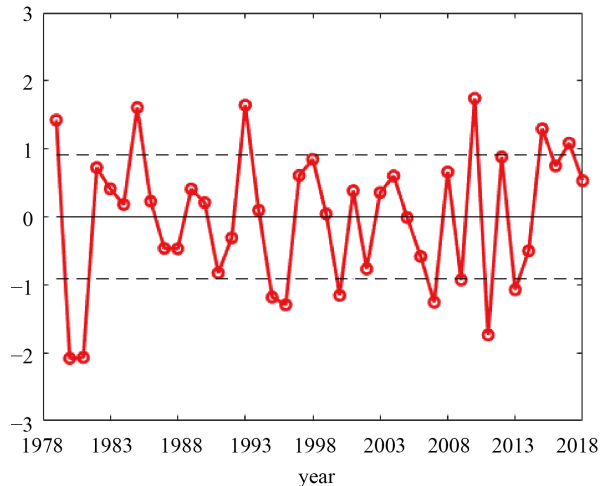
### 3.2.2. 南极涛动正负位相大气环流异常的合成分析

本文利用 0.9 倍标准差选取 1979~2018 年 7~9 月南极涛动指数的大值年和小值年(图 4 和表 1), 大值年共 6 年, 小值年共 9 年。

同样利用 0.9 倍标准差选出 EOF 第一模态和第二模态时间系数 PC1 和 PC2 标准化序列的大值年和小值年, 如表 1 所示。

根据表 1 中所列出的 AAOI, PC1 和 PC2 大值年与小值年, 对南半球 500 hPa 位势高度场分别进行合成分析, 得出强弱年差值的合成位势高度异常场如图 5 所示。AAOI 大、小值年的合成差值场(图 5(a))显示, 在南半球中纬度地区通过 95% 信度检验的三个正相关区域分别为南印度洋, 新西兰东部南太平洋以及阿根廷东部大西洋, 与图 3(a)中相关分析的区域特征相一致。PC1 大、小值年合成差值场(图 5(b))显示极区与中纬度冷暖空气交换的关键区域主要是南印度洋至澳大利亚南部, 与图 3(b)中相关分析的区域

域特征相一致。PC2 大、小值年合成差值场(图 5(c))显示在南半球中纬度地区其纬向呈现“+ -”的波列状分布, 与图 3(c)中相关分析的区域特征相一致, 当极涡偏在西半球时, 极区与中纬度冷暖空气交换的关键区域主要是南印度洋, 南太平洋与大西洋海区, 与南太平洋的相关程度最为显著。



**Figure 4.** Standardized AAOI from Jul to Sep in 1979~2018 (dotted line: 0.9 times standard deviation)

**图 4.** 1979~2018 年 7~9 月标准化的 AAO 指数(虚线: 0.9 倍标准差)

**Table 1.** Large and small value years of AAOI, PC1 and PC2 from Jul to Sep

**表 1.** 7~9 月 AAOI, PC1, PC2 大、小值年份

	大值年	小值年
AAOI	1979, 1985, 1993, 2010, 2015, 2017	1980, 1981, 1995, 1996, 2000, 2007, 2009, 2011, 2013
PC1	1980, 1981, 1996, 2000, 2007, 2009, 2011, 2013, 2014	1979, 1982, 1985, 1986, 1993, 2004, 2010, 2015
PC2	1980, 1982, 1987, 1992, 1995, 2006	1984, 1989, 1996, 2003, 2010, 2013, 2017

根据以上相关分析及合成分析的结果, 可知当南极极涡呈“偏心”形态分布时, 极区与极区外冷暖空气交换的关键区域存在明显差异。

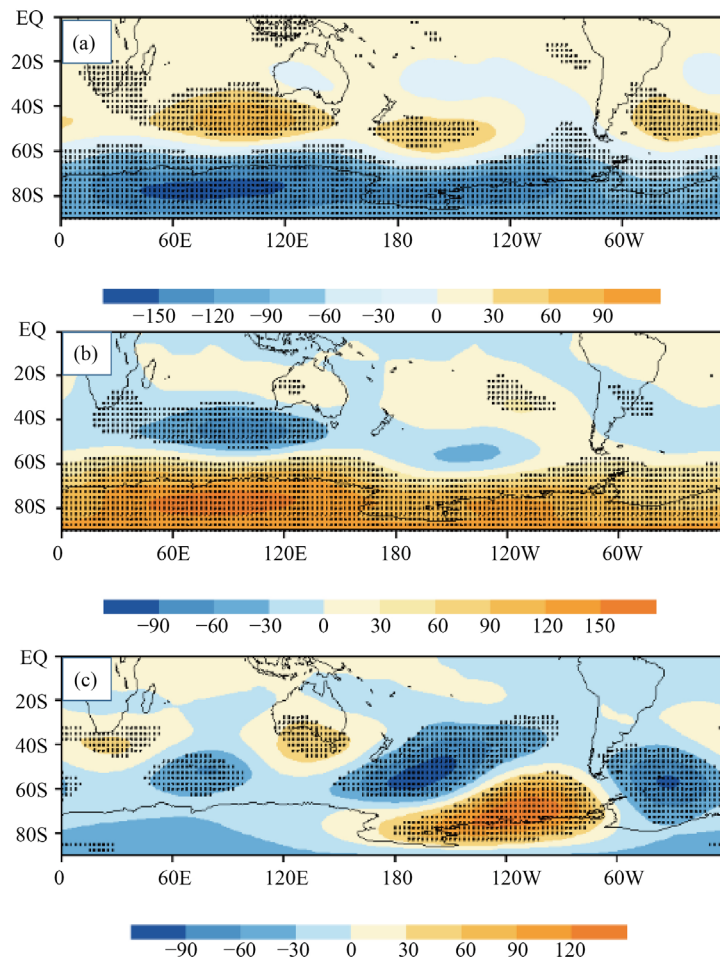
### 3.3. 季节时间尺度南极涛动对越赤道气流的影响

#### 3.3.1. 相关分析

将 PC1 和 PC2 与同期 850 hPa 赤道风速  $v$  分量的异常进行相关分析, 得出了不同经度上南极涛动正、负位相和极涡“偏心”情况下对向北越赤道气流的影响(图 6)。

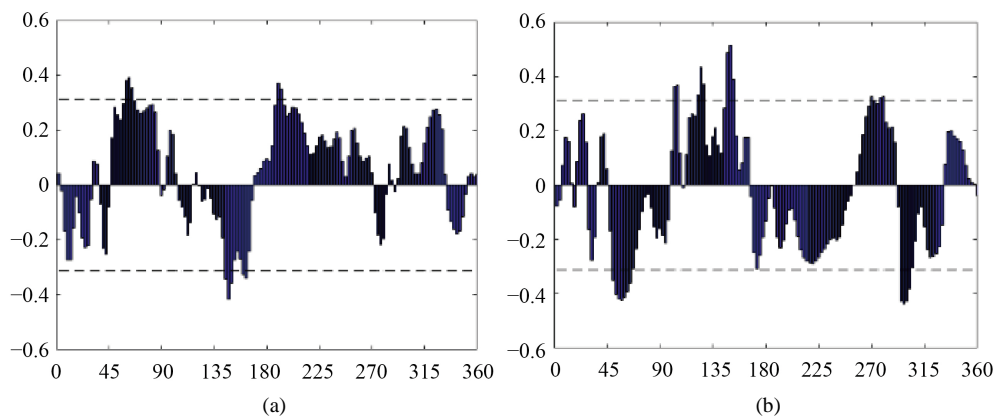
从图 6 中看出, PC1 与 850 hPa 上  $55^{\circ}\text{E}\sim 65^{\circ}\text{E}$  经度范围内的越赤道气流呈正相关(图 6(a)), 与  $150^{\circ}\text{E}$  附近的越赤道气流呈负相关, 即当时间系数为正值时, 对应南极极区位势高度偏高时, 南印度洋与极区冷暖空气交换强烈,  $55^{\circ}\text{E}\sim 65^{\circ}\text{E}$  从南向北的越赤道气流增强,  $150^{\circ}\text{E}$  附近的从南向北的越赤道气流减弱; 当时间系数为负值时则相反。

PC2 与不同经度带越赤道气流的相关系数(图 6(b))则与 PC1 (图 6(a))相反, 与 850 hPa 上  $135^{\circ}\text{E}$  和  $150^{\circ}\text{E}$  附近的从南向北的越赤道气流呈正相关, 与  $55^{\circ}\text{E}\sim 65^{\circ}\text{E}$  的从南向北的越赤道气流呈负相关。



**Figure 5.** Synthetic difference fields of 500 hPa geopotential height fields in the southern hemisphere for the high and low value years AAOI (a), PC1 (b) and PC2 (c) from Jul to Sep (scattered area: Pass the 95% reliability test)

**图 5.** 7~9 月 AAOI (a)、PC1 (b) 和 PC2 (c) 大、小值年南半球 500 hPa 位势高度场的差值合成场(散点区域: 通过 95% 信度检验)



**Figure 6.** Correlation coefficient between PC1 (a), PC2 (b) and V component of equatorial wind speed anomaly at 850 hPa over the same period from Jul to Sep in 1979~2018 (dashed line: 95% reliability test)

**图 6.** 1979~2018 年 7~9 月 PC1 (a)、PC2 (b) 与 850 hPa 赤道风速 v 分量异常的同期相关系数(虚线: 95% 信度检验)

图 6(b) EOF 第二模态主要体现当南极极涡“偏心”情况下, 对向北越赤道气流的影响。当 PC2 为正时, 极涡偏向东半球, 东半球位势高度偏低, 与 PC1 系数为负时的东半球极区的空间分布相一致, 东半球极区与南印度洋的冷暖空气交换减弱, 55°E~65°E 的从南向北的越赤道气流减弱, 同时西半球 500 hPa 位势高度偏高, 与新西兰东侧中低纬度南太平洋冷暖空气交换增强, 从 100°E 到 150°E 经度带内的 850 hPa 从南向北的越赤道气流增强, 当时间系数为负时则相反。

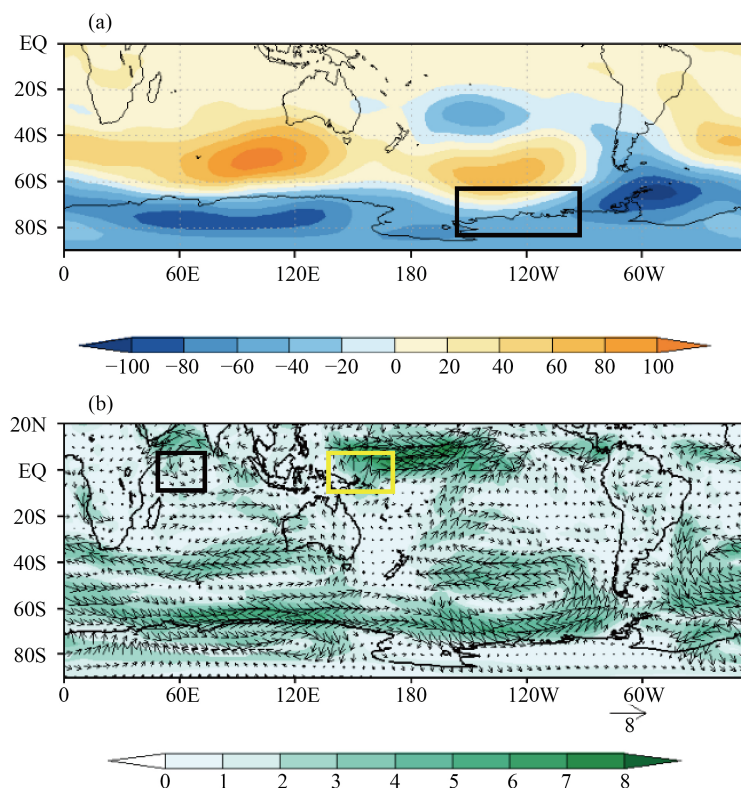
比较图 6(a)和图 6(b), 当南极极涡偏心时, 更容易出现向北越赤道气流在某些经度带内的增强或减弱。即南极极涡偏心时, 更容易影响北半球热带气旋的气候变化。

### 3.3.2. 个例分析验证

图 7 为 2015 年 7~9 月 500 hPa 位势高度异常场和 850 hPa 风矢量异常场, 其极区 500 hPa 位势高度异常场(图 7(a))看以看做是图 2 中 EOF 第一模态与第二模态空间分布的叠加。

图 7(a)显示 2015 年 7~9 月南极极涡偏强, 从第一模态的角度来看, PC1 为负值, 极区位势高度偏低, AAO 为正位相, 冷空气聚集在极区, 其中南印度洋与极区冷暖空气交换弱, 55°E~65°E (图 7(b)黑色方框)从南半球向北半球的越赤道气流为负异常, 季风环流减弱, 150°E 附近(图 7(b)黄色方框)的从南向北的越赤道气流则增强, 体现了 PC1 所对应的空间场与越赤道气流的联系, 与图 6(a)中的相关分析对应一致。

从第二模态的角度来看, 图 7(a)黑框区域(与图 2(b)中 EOF 第二模态空间场对应)的 500 hPa 位势高度相较于东半球偏高, 对应 PC2 为正值, 55°E~65°E (图 7(b)黑色方框)从南半球向北半球的越赤道气流为减弱, 150°E 附近(图 7(b)黄色方框)的从南向北的越赤道气流则增强, 与图 6(b)中的相关分析对应一致。



**Figure 7.** Geopotential height anomaly field of 500 hPa (a) and wind anomaly field of 850 hPa (b) in the Southern Hemisphere from Jul to Sep in 2015 (vector unit: m/s)

图 7. 2015 年 7~9 月南半球 500 hPa 位势高度异常场(a)和 850 hPa 风场异常(b) (矢量单位: m/s)



## 4. 结论

本文利用 1979~2018 年 7~9 月 NCEP/NCAR 月平均再分析资料以及 AAO 指数, 通过 EOF 和合成分析等方法对季节时间尺度南极极涡和南极涛动对大气环流异常影响进行了统计分析, 得到如下结论:

(1) 南极极区 500 hPa 位势高度异常 EOF 分解第一模态可反映南极涛动的位相变化, 第二模态反映极涡“偏心”形态分布, 两个模态均存在年代际变化特征, 极区 500 hPa 位势高度在 90 年代后期之前多为负异常, 90 年代后期之后多为正异常, 其中 2013 年~2018 年第二模态时间系数振幅增强, 南极极涡多偏向西半球一侧。

(2) 南极涛动的不同位相对应的极地外西风带内大气环流异常并非呈环状分布, 而是有明显的区域特征。极地与极地外冷暖空气交换的关键区域主要在南印度洋至澳大利亚南部, 南太平洋以及南美洲东部大西洋上空, 其中南印度洋上空与极地的冷暖空气交换最为显著。当南极极涡呈“偏心”结构, 偏在西半球一侧时, 极涡与新西兰东部南太平洋上空和南美洲东南部大西洋的冷空气活动联系更为密切。

(3) 南极极涡与季风环流强度具有密切的联系。当极区位势高度偏低, 极涡偏强, AAO 为正位相, 南印度洋位势高度偏高, 55°E~65°E 从南向北的越赤道气流减弱, 季风环流减弱, 同时 150°E 附近从南向北的越赤道气流增强。当极涡偏在西半球一侧, 东半球极区位势高度偏高, 55°E~65°E 从南向北的越赤道气流增强, 150°E 附近从南向北的越赤道气流减弱。

## 基金项目

国家自然科学基金重点项目(41430963)。

## 参考文献

- [1] 严华生, 宋国琼, 杨素雨, 李万彪. 500 hPa 高度场上两极和赤道位势高度气候演变规律的研究[J]. 地球物理学报, 2007, 50(1): 58-65.
- [2] 刘树华, 熊康. 南极大气环流特征探讨[J]. 北京大学学报(自然科学版), 1994, 30(1): 86-91.
- [3] 陈立奇. 南极和北极地区在全球变化中的作用研究[J]. 地学前缘, 2002, 9(2): 245-253.
- [4] 张恒德, 高守亨, 刘毅. 极涡研究进展[J]. 高原气象, 2008, 27(2): 452-461.
- [5] 钟萃相. 极涡的移动与全球气候变化的关系[J]. 科技视界, 2019(20): 114-117.
- [6] 朱其文, 章少卿. 北半球极涡与极冰之间统计关乘的初步分析[M]. 北京: 气象出版社, 1990: 182-190.
- [7] Wrona, K.M. and Rohli, R.V. (2006) Seasonality of the Northern Hemisphere Circumstance Polar Vortex. *International Journal of Climatology*, **27**, 697-713. <https://doi.org/10.1002/joc.1430>
- [8] Angell, J.K. (2009) Relation between 300-mb North Polar Vortex and Equatorial SST, QBQ and Sunspot Number and the Record Contraction of the Vortex in 1988-89. *Journal of Climate*, **5**, 22-29. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1992\)005<0022:RBMNPV>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1992)005<0022:RBMNPV>2.0.CO;2)
- [9] Kuroda, Y. (2005) Solar Cycle Modulation of the Southern Annular Mode. *Geophysical Research Letters*, **32**, L13802. <https://doi.org/10.1029/2005GL022516>
- [10] 卢楚翰, 管兆勇, 王盘兴, 秦育婧. 7 月南半球 500 hPa 极涡异常的度量及其与极区增暖的联系[J]. 大气科学学报, 2010, 33(2): 174-179.
- [11] Gong, D. and Wang, S. (1999) Definition of Antarctic Oscillation Index. *Geophysical Research Letters*, **26**, 459-462. <https://doi.org/10.1029/1999GL900003>
- [12] Karoly, D.J. (1990) The Role of Transient Eddies in Low-Frequency Zonal Variations of the Southern Hemisphere Circulation. *Tellus. Series A*, **42**, 41-50. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v42i1.11858>
- [13] 龚道益, 王绍武. 南极涛动[J]. 科学通报, 1998, 43(3): 296-301.
- [14] Thompson, D.W.J. and Wallace, J.M. (2002) Annular Modes in the Extratropical Circulation, Part I: Month-to-Month Variability. *Journal of Climate*, **13**, 1000-1016. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2000\)013<1000:AMITEC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2000)013<1000:AMITEC>2.0.CO;2)

- [15] 郑菲, 李建平, 刘婷. 南半球环状模气候影响的若干研究进展[J]. 气象学报, 2014, 72(5): 926-939.
- [16] 孙即霖, 韦冬妮, 李永平. 澳大利亚冷空气活动对西北太平洋热带辐合带强度的影响[J]. 中国海洋大学学报, 2009, 39(5): 863-869.