

林祥, 卞林根. 2015. 近百年来的南极绕极波变化特征 [J]. 气候与环境研究, 20 (1): 21–29, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2014.13095. Lin Xiang, Bian Lingen. 2015. Characteristics of the antarctic circumpolar wave during recent 100 years [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 20 (1): 21–29.

近百年来的南极绕极波变化特征

林祥 卞林根

中国气象科学研究院, 北京 100081

摘要 采用 2011 年发布的 20 世纪全球大气环流再分析资料, 结合长期观测序列, 分析了百余年来大气中南极绕极波的强弱变化和传播过程。结果显示, 南极绕极波有显著的年代际变化, 在 1940~1960 年和 1980~2000 年附近出现和活跃, 而在其他年代消失。东南太平洋南极绕极波振幅最强, 该区域的海气耦合过程可能是绕极波信号增强的关键之一。初步揭示了百年来南极绕极波和南极涛动的对应关系, 偏强的南极涛动有利于南极绕极波的出现, 但并非决定绕极波产生的唯一因素。

关键词 南极绕极波 年代际变化 南极气候 南极涛动

文章编号 1006-9585 (2015) 01-0021-09

中图分类号 P467

文献标识码 A

doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2014.13095

Characteristics of the Antarctic Circumpolar Wave during Recent 100 Years

LIN Xiang and BIAN Lingen

Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100871

Abstract The phenomenon known as the Antarctic Circumpolar Wave (ACW) was determined to have occurred during the last two decades of the 21st century. In this study, a new reanalysis dataset of 20th century reanalysis Version 2 (20CRV2) spanning 1871–2008 and several long-term observation series were used to investigate the interdecadal fluctuation and transmission of the ACW since 1871. The results indicate an obvious interdecadal variation of the ACW signal, which occurred in 1940–1960 and in 1980–2000 and disappeared during the other periods. The greatest amplitude of the ACW was detected near the southeast Pacific, implying the essential influence of ocean–atmosphere interaction at this region to the emergence of the ACW. Moreover, it was determined that a noticeable ACW phenomenon appeared during the period in which the Antarctic Oscillation (AO) was relatively stronger, which indicates that the enhanced AO may intensify the circumpolar westerly and benefit the emergence of the ACW.

Keywords Antarctic Circumpolar Wave (ACW), Interdecadal variation, Antarctic climate, Antarctic oscillation

1 引言

南极及南半球高纬度气候的主要模态对于全球气候具有重要的意义 (高登义等, 2008)。近年来一些观测研究已经揭示了多年际尺度上环南极

地区大气和海洋中同时出现的异常振荡信号向东传播的现象, 即所谓的南极绕极波 (Antarctic circumpolar wave) (White and Peterson, 1996), 该现象最早被发现出现在海平面气压、经向风应力、海平面温度和海冰边缘等要素场中 (White and Peterson, 1996; White et al., 2002), 后来又研究发现

收稿日期 2013-05-23; 网络预出版日期 2013-10-24

资助项目 南北极环境综合考察与评估专项 CHINARE2012-04-04/CHINARE2013-04-04

作者简介 林祥, 男, 1979 年出生, 博士, 助研, 主要从事气候变化研究。E-mail: linxiang@cma.gov.cn

在海平面高度和风应力旋度 (Jacobs and Mitchell, 1996)、近地面气温 (Bian and Lin, 2012) 等要素场中也有类似现象。南极绕极波的发现引起了气候和海洋学者的极大关注, 许多学者从观测现象、理论分析和数值模拟等多方面对南极绕极波的现象、规律和机制展开了研究 (Christoph et al., 1998; Bonekamp et al., 1999; Cai et al., 1999; Connolley, 2003; Venegas, 2003; 效存德等, 2004; 周琴等, 2004)。

目前已经发现的南极绕极波现象发生于 1980 年代早期到 1990 年代末期。最早的研究利用 1985~1994 年的观测和卫星资料揭示了在该时段内大气和海洋中存在 4~5 年周期的多年际振荡并且信号东传的现象 (White and Peterson, 1996)。后续的研究应用其他多种资料和数值模式, 深入分析了该次南极绕极波现象的变化特征 (Jacobs and Mitchell, 1996; Connolley, 2003; Bian and Lin, 2012) 和物理机制 (Christoph et al, 1998; Bonekamp et al, 1999; Cai et al, 1999; Venegas, 2003), 如有研究认为南极绕极波实际上由 5 年和 3.3 年左右的两种信号组成, 前者具有 2 波的传播特征, 与热带的 ENSO 事件密切联系, 后者则具有 3 波的驻波特征, 是南大洋内部自我维持的振荡, 南极绕极波实际是两种现象的组合 (Venegas, 2003)。近期研究指出 1951 年以来南极绕极波变化分为 3 个时段: 1951~1973 年、1974~1980 年和 1981~2000 年, 其中仅 1981~2000 年间具有清晰的传播现象 (Bian and Lin, 2012)。由此可见, 由于资料和方法的差异, 不同研究确定的周期和传播时段略有差异, 但有一共同点, 即南极绕极波在过去几十年里并非始终存在, 而是仅出现在 1980 年代初到 1990 年代末。从年代际变率的角度看, 南极绕极波在不同年代的出现与否是一种典型的年代际变化现象。

由于资料的限制, 对于 1951 年前南极绕极波年代际变化还没有认识。基于这种现状, 本文利用多种资料研究近百余年来南极绕极波的年代际变率及其与气候变化的关联, 这对于认识南半球气候变化的内在规律具有重要意义。

2 数据和方法

研究采用 NCAR 的第二代 20 世纪全球大气环流再分析资料 (20th Century Reanalysis Version 2,

20CRV2), 该资料是通过同化全球海平面气压 (sea level pressure, SLP), 以海表温度 (sea surface temperature, SST) 及海冰分布作为边界条件得到的最新一代时间最长 (1871~2008 年) 的全球大气同化资料, 在现有的百年全球气候资料中包含了最多的 SLP 原始观测信息 (Compo et al., 2011)。该资料可以较好地模拟南北半球的气候态和主要大气环流特征模态, 并已在早期气候事件和气候长期变率的研究中得到应用 (Emanuel, 2010; Giese et al., 2010; Wood and Overland, 2010)。本文采用该资料分析百年间南半球大气中的绕极波现象, 并用 NCEP 资料 (Kalnay et al., 1996) 和奥卡达斯 (Orcadas) (Walter et al., 2006) 等测站的温度资料来检验。此外, 利用小波分析方法 (Torrence and Compo, 1998) 研究南极绕极波的周期振荡, 通过环南极纬圈 (50°S~60°S) 平均要素场 (温度、海平面气压等) 的时间-经向剖面图来分析绕极波的时空传播特征。

3 南极绕极波的年代际变化

Orcadas 站是南极周边地区观测时间最长的测站, 恰好位于绕极波活跃的环南极纬圈, 该站的温度观测序列是目前南极地区时间最长的气候观测记录, 并有研究验证了其可靠性 (Walter et al., 2006)。由图 1a 可见, 最显著的周期是 3~4 年 (达到 0.05 显著性水平), 该周期信号最强的年代分别出现在 1910~1920 年左右、1940~1960 年左右和 1980~2000 年。为验证 20 世纪再分析资料中的信息, 选取了 Orcadas 站附近 9 个格点再分析温度资料, 对其平均序列进行了相同的小波分析, 得到了类似的结果, 差别是再分析资料中 1980~2000 年的周期振荡强度要大于观测资料, 而在 1910~1920 年和 1940~1960 年前后的振荡强度弱于观测资料。再分析温度资料还显示了 1880~1890 年存在 3~5 年周期振荡的活跃期。这种多年际振荡的年代际强弱变化也出现在其他气候现象, 如 ENSO 中 (Torrence and Webster, 1999), 某种程度上这种变化要比气候均值的年代际变化更重要。

为进一步识别 3~5 年周期振荡的年代际演变规律, 图 2 给出了 Orcadas 站及其周边的 Faraday Vernadsky 站和 Bellingshausen 站温度的 3~5 年周期信号方差的时间序列。3 个站振荡信号都有类似

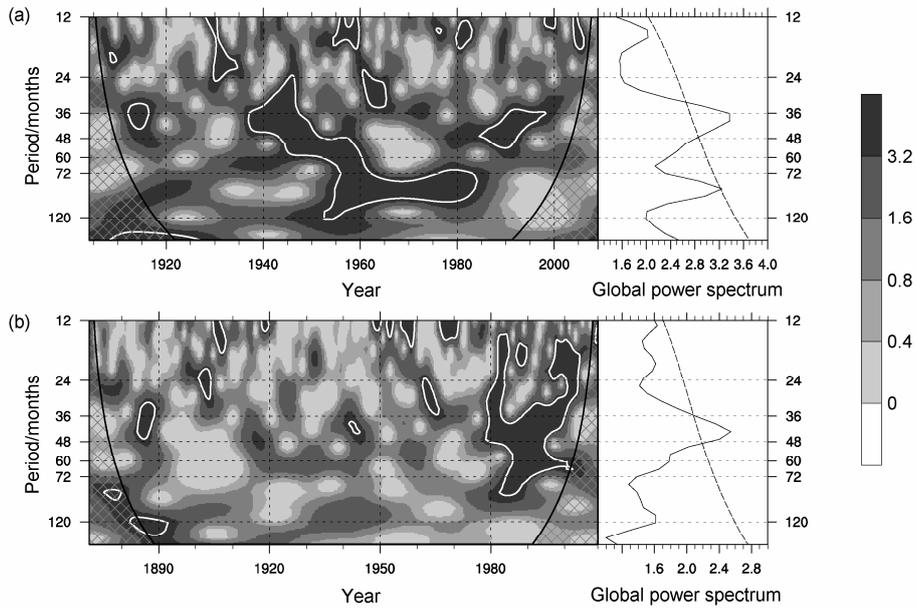


图1 Orcadas 站逐月 (a) 1904~2008 年观测序列和 (b) 1871~2008 年再分析温度序列的小波功率谱 (阴影, 白色粗实线内达到 0.05 显著性标准, 黑实线及网格覆盖的区域为小波分析边缘效应的影响区域。右侧图中实线表示不同周期在整个时段平均的全局功率谱, 虚线表示达到 0.05 显著性标准的功率谱阈值, 全局功率谱在虚线右侧表示达到统计上的显著)

Fig. 1 Wavelet power spectrums of the temperature from (a) observation (1904–2008) and (b) the reanalysis data (1871–2008) at Orcadas station (shaded denote the wavelet power in which the parts circled by the white lines were at 0.05 significance level and the cone of influence for the wavelet analysis was indicated by the black line and the gray mesh. In the right sub-figures, the solid lines are the global power averaged for all the time periods and the dash lines are the 0.05 significance level values for the global power spectrum, the global power spectrum for the corresponding periods is significant when the solid line is on the right side of the dash line)

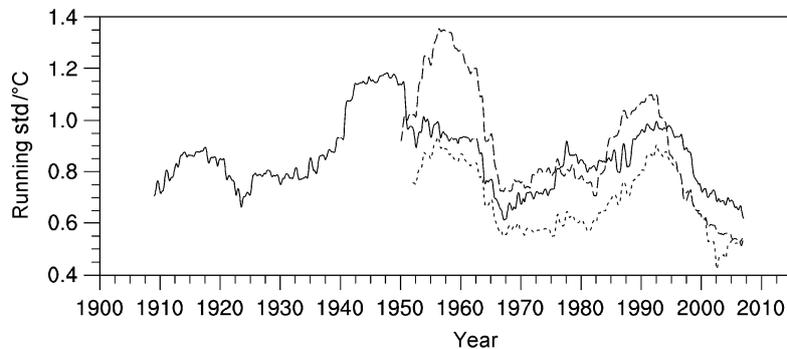


图2 Orcadas 站 (蓝线)、Faraday Vernadsky 站 (红线)、Bellingshausen 站 (黑线) 温度序列 3~5 年特征周期信号的 11 年滑动平均方差序列
Fig. 2 11-year running averaged standard deviation series for the 3~5-year band-pass filtered signals of the temperature at Orcadas (blue), Faraday Vernadsky (red), and Bellingshausen (black) stations

的低频变化, 1955~1965 年和 1985~1995 年方差明显偏大, 在 1967~1981 年方差偏小, 考虑到滑动平均方法对序列边缘的影响, 年代际变化特征和小波分析结果是基本一致的。Orcadas 站温度在 1940~1950 年和 1910~1920 年的方差偏强, 遗憾的是另外两站没有观测数据来验证。

环南极纬圈 (50°S~60°S) 内经向平均近地面温度和海平面气压场的随时间和空间的变化, 能够

显示百余年来南极绕极波不同时期的传播现象。如图 3 中的黄色箭头所示, 近地面温度场的 3~5 年周期振荡, 自 1871 年以来存在 3 次向东传播的时期, 分别出现在 1870~1890 年、1940~1960 年和 1980~2000 年前后, Orcadas 站温度的变化可以反映后 2 次南极绕极波东传的特征 (图 1)。此外, 1910~1920 年 Orcadas 站温度 3~5 年周期振荡也偏强, 但没有发现同期的振荡传播现象。SLP 场中

绕极波东传现象发生在 1946~1962 年和 1982~2000 年 (图 4), 但没有温度场显著, 具体表现在东传过程中距平信号的连续性和完整性要弱于温

度场, 这与 NCEP 资料分析的结果是基本吻合的 (图略)。经向风场的绕极波东传现象出现在 1950 年代和 1980~2000 年 (图略), 其传播的稳定性也

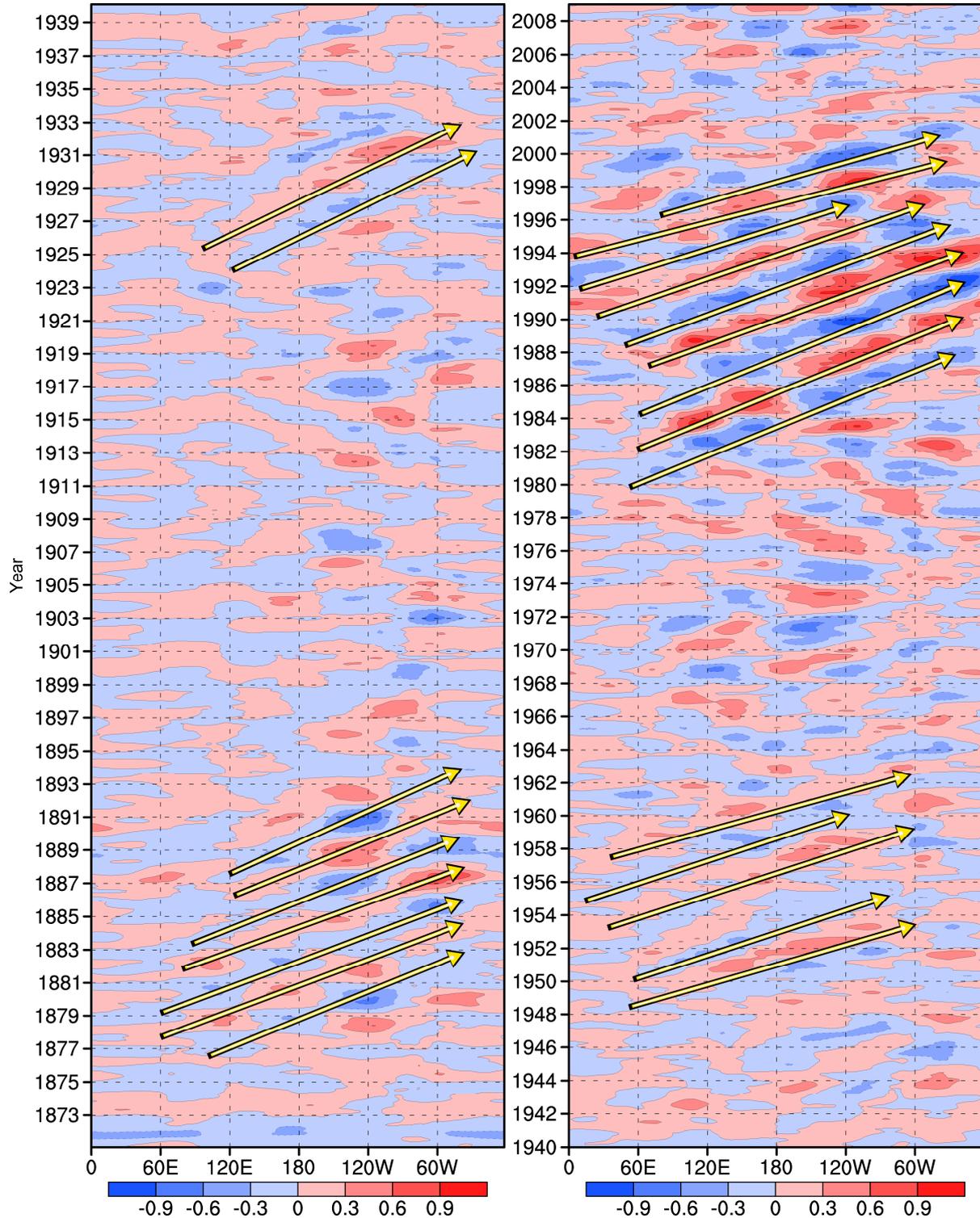


图 3 1871~2008 年间环南极纬圈 (50°S~60°S) 内经向平均的近地面温度 3~5 年周期信号的经度-时间剖面 (黄色箭头指示了南极绕极波的传播, 3~5 年周期信号从标准化距平序列中滤波提取)

Fig. 3 Hovmöller diagram for the 3-5-year band wave signals of standardized near surface air temperatures averaged for 50°S~60°S during 1871-2008 (yellow arrows indicate the evolution of eastward wave, 3-5-year signals were derived from the band pass filtering for the standardized anomalies series)

没有温度场显著。总体来说，再分析资料的结果显示，不同大气要素场中的南极绕极波传播特征存在差异，其中温度场中的绕极波传播现象是最明显

的。

因此，不难看出，南极绕极波的典型变化特征是 3~5 年周期振荡增强和振荡信号的东传现象同

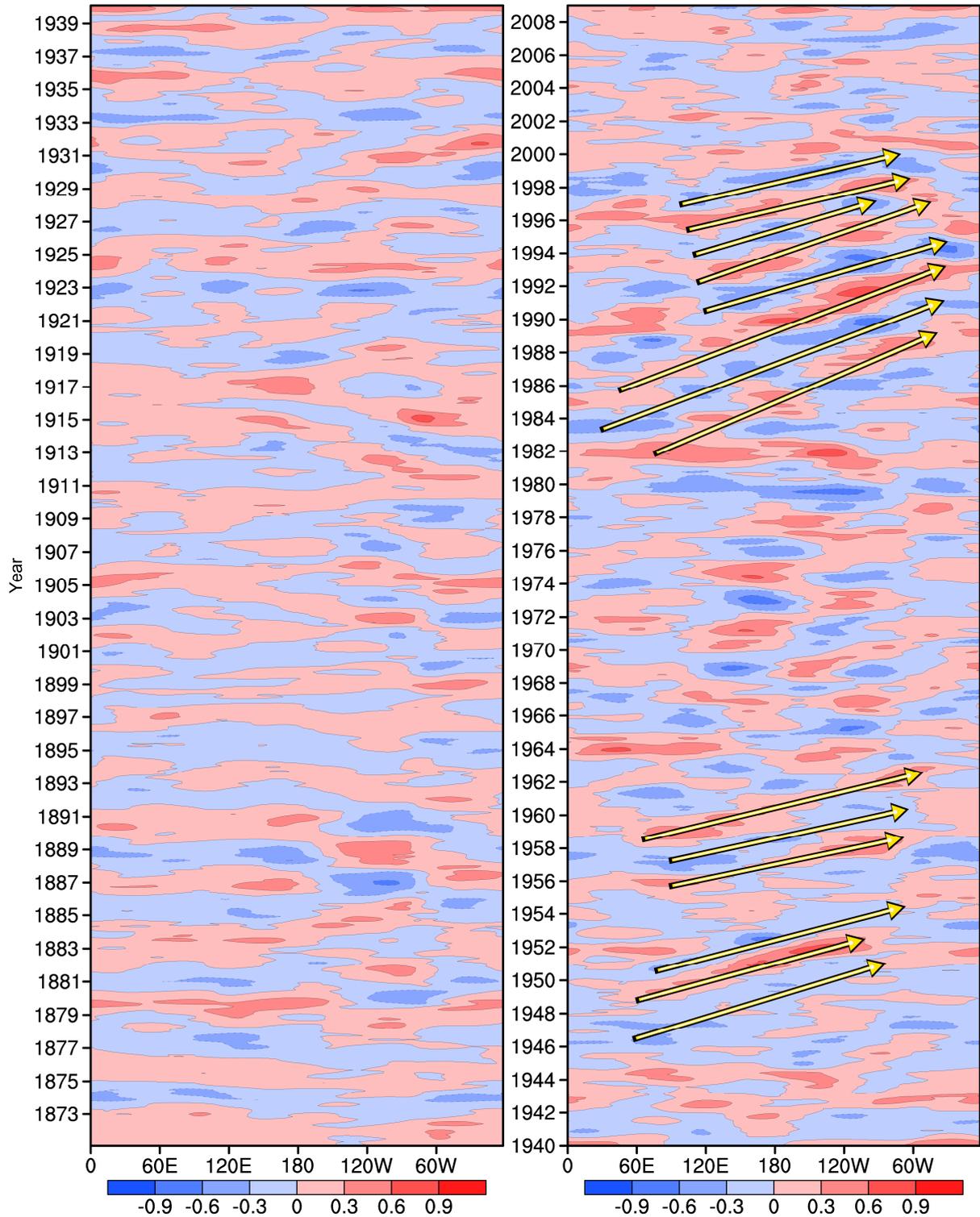


图4 同图3，但为海平面气压

Fig. 4 Same as Fig. 3, but the sea level pressure (SLP)

时出现,综合上述分析可知这种情况过去百年来发生过两次,大致在 1940~1960 年和 1980~2000 年。由此可以将近百余年划分为绕极波的两个活跃时段(1940~1960 年和 1980~2000 年前后)和 3 个不活跃的时段(1904~1940 年前后、1960~1980 年前后和 2000 年后)。1910~1920 年前后 Orcadas 站温度的多年际振荡有过短暂的增强,但各要素场中并无可识别的信号东传现象,因此该时期 Orcadas 站温度的异常振荡可能源于区域性波动,而非大尺度的绕极波现象。此外,再分析资料的近地面温度场在 1870 年代末至 1890 年代初也有可以辨识的绕极波东传现象,但同期 SLP 场和风场却更多地表现为驻波特征,并且没有观测记录来支持或验证再分析资料的结果。

4 南极绕极波现象的纬向分布特征

认识南极绕极波信号强弱的纬向差异,换言之,绕极波信号在环南极纬圈的哪些位置振幅最大,显然有助于揭示影响南极绕极波的关键区域和

相关机制。图 5 中,利用纬圈(50°S~60°S)平均的 3~5 年周期振荡信号的绝对值来表征南极绕极波的振幅,揭示了大气要素场中绕极波振幅大小的纬向分布特征,可以发现 1871~2008 年间近地面气温和海平面气压的绕极波信号峰值都在 120°W 附近,即东南太平洋附近洋面上(图 5a1 和 5b1)。过去的研究没有具体描述绕极波强度的纬向分布特征,但对于 1980 年代初开始的南极绕极波现象,有研究认为是从亚热带太平洋海温异常传到东南太平洋开始的(White and Peterson, 1996; White et al., 2002),还有研究指出绕极波存在南北两条路径,都在德雷克海峡(60°W 略偏西的位置)汇聚(Peterson and White, 1998)。由此可见,德雷克海峡以西的东南太平洋是绕极波信号增强的关键区域,近百年来都是如此。

此外,在 60°W 附近及其以东,近地面气温和海平面气压还有一个 3~5 年周期振荡的峰值(图 5a1 和 5b1),说明德雷克海峡东侧的大西洋上绕极波信号也偏强(但弱于东南太平洋)。与此不同的是,经向风 3~5 年周期振荡的峰值在 60°W 偏西一

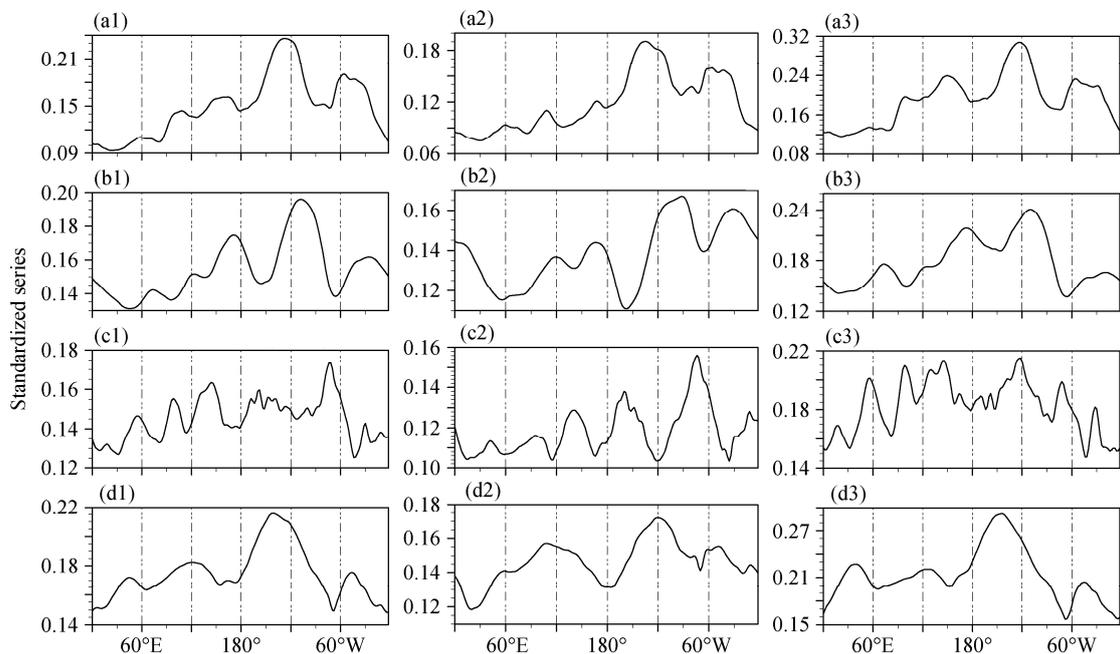


图 5 1871~2008 年(左列)、1871~1950 年(中列)、1951~2008 年(右列)平均环南极纬圈(50°S~60°S)内经向平均的(a1-a3)近地面气温、(b1-b3)海平面气压、(c1-c3)经向风、(d1-d3)纬向风 3~5 年周期振荡信号振幅在不同经度的分布(周期振荡信号是标准化距平序列经 3~5 年低通滤波后得到的,取其绝对值后再做纬圈平均则得到各经度上的信号振幅)

Fig. 5 Amplitude of the 3-5-year band signals of (a1-a3) near surface air temperature, (b1-b3) sea level pressure, (c1-c3) meridional wind, and (d1-d3) zonal wind averaged for 50°S-60°S and the different time span during 1871-2008 (left panel), 1871-1950 (middle panel), and 1951-2008 (right panel) (3-5-year band signals were derived from the standardizing and low-pass filtering of the original series, then the absolute values of band signals were averaged between the latitude of 50°S-60°S to indicate the amplitude of the 3-5-year wave fluctuation at the different longitudes)

点(图 5c1), 这里是德雷克海峡的位置, 低层的绕极西风和海流在经过海峡时由于狭管效应而加速, 并因为海峡的走势而更多地表现为经向风增强。海峡地形的影响还导致了纬向风在海峡西侧迅速的减弱和经过海峡后的增强(图 5d1)。

进一步比较了 1950 年前后绕极波强度的纬向分布特征(图 5 中列和右列), 结果显示对于近地面气温和纬向风来说, 1950 年前后的纬向分布特征基本一致, 说明绕极波强度的纬向分布具有稳定性。过去百余年里, 最强的绕极波始终出现在德雷克海峡的两侧, 其原因可能是在海峡两侧加强的海气相互作用, 这与年代无关, 而与海峡的地形和独特位置(两大洋之间)密不可分。此外, 海平面气压和经向风中绕极波强度的纬向分布在 1950 年前后有所差异, 这可能是因为相对其他要素场, 海平面气压和经向风场更加快变, 区域性振荡偏强, 从而影响其中绕极波信号表现的稳定性。

5 南极绕极波和南极涛动的可能联系

南极涛动是南半球大气环流的主要特征模态(Gong and Wang, 1999; 范丽君等, 2003)。由于资料稀缺, 目前对于其长期变率的认识还有待深入。本文对 20 世纪再分析资料集中的 700 hPa 高度场进行了经验正交分解(Empirical Orthogonal Function, EOF), 用其第一模态(EOF1)来定义南极涛动, 并重建南极涛动指数的百余年序列。该方法借鉴自美国气候预测中心(Climatic Prediction Center)在气候业务监测和预测中对南极涛动的定义(Mo, 2000), 在理论上能够捕捉纬度带间气压差的完整特征, 比若干纬线上的气压差值(Gong and Wang, 1999)更有代表性, 在国际上已广泛应用。

为检验 20 世纪再分析资料描述南半球大气环流基本特征的能力, 分别对 1979~2010 年 NCEP 和 20 世纪再分析资料的 700 hPa 高度场进行了 EOF 分析, 结果显示, 两者的前 5 个 EOF 空间模态和时间演变特征较为相似(图略), EOF1 均表现南极涛动的形态特征, 解释方差分别为 24.6%和 26.7%, 由此可见 20 世纪再分析资料描述南半球大气环流特征的效果与同期 NCEP 资料基本相同。进一步对 1871~2008 年的 20 世纪再分析资料做 EOF 分析, 得到的 EOF1 也表现为南极涛动的形态特征, 对应解释方差为 23.4%(图略), 可见南极涛动在百年来南极气候变化中同样是重要而稳定的大气模态。经过上述检验后, 具体重建南极涛动指数的过程是将 1979~2000 年 700 hPa 高度场的 EOF1 模态投影到 1871~2008 年 700 hPa 高度的时空场, 得到的时间系数序列即南极涛动指数的百年序列。

图 6 给出了南极涛动百余年来低频变化。可以发现, 南极涛动存在着明显的年代际波动, 有 3 段偏强期(1900~1911 年、1942~1966 年和 1980 年之后), 而绕极西风的低频变化和南极涛动基本一致。在绕极波活跃的 1940~1960 年和 1980~2000 年前后, 南极涛动都处于年代际偏强的阶段, 在绕极波不清楚的年代, 南极涛动多处于偏弱(负位相)阶段。已有研究关注到 1980~2000 年前后南极涛动偏强与绕极波活跃的联系, 认为是南极涛动通过加强绕极西风为绕极波的活跃提供了有利的大气环流背景(卞林根和林学椿, 2009; Bian and Lin, 2012)。图 6 则表明了在过去百余年里, 南极涛动的位相正负和南极绕极波的活跃与否也有着密切的对应关系。

图 6 还显示, 1900~1910 年前后南极涛动偏强, 但并无绕极波活跃。这说明并非南极涛动偏强

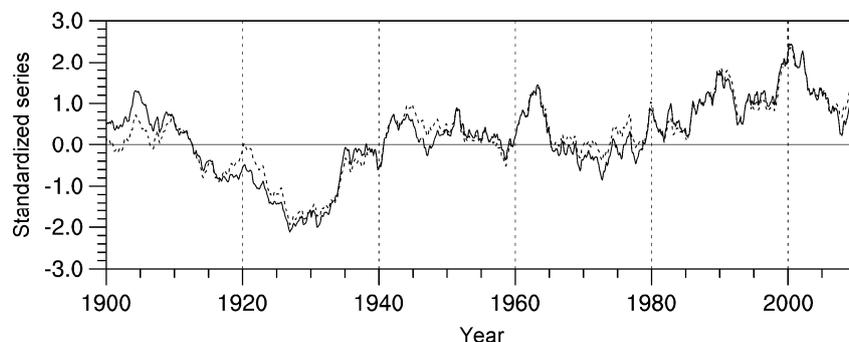


图 6 南极涛动(实线)和环南极纬圈平均西风(虚线)指数的年代际变化(21 点滑动平均滤波)
Fig. 6 Interdecadal variations (derived from the low pass filter of 21 points running average) of the Antarctic Oscillation (AAO, solid line) index and the circumpolar zonal averaged westerly (dashed line)

时就一定会有南极绕极波的出现。有研究指出, 1980~2000 年绕极波现象的初始异常信号可能来自于西南太平洋的亚热带海温距平异常, 赤道太平洋的 ENSO 事件和南极绕极波之间可能存在着大气的遥相关 (White and Peterson, 1996; Peterson and White, 1998; White et al., 2002)。由此可见, 绕极波的出现应该受到热力和动力因素的双重影响, 南极涛动可能只反映其中动力因素的部分。

6 小结与讨论

南极绕极波因其发生期间较强的规律性而备受关注, 然而目前所知, 南极绕极波仅发生在 1980 年初至 1990 年代末, 这大大限制了我们对它的理解。在更长的时间里, 南极绕极波是否还有发生, 以及为何出现和活跃, 这实际上是年代际变化的问题, 也是认识南极绕极波的关键之一。

南极绕极波的特征是气候多年际周期 (3~5 年) 振荡增强和振荡信号向东传播的同时出现, 综合 Orcadas 站等观测温度记录所反映的环南极地区气候多年际振荡特征和再分析资料所揭示的温度等大气要素场中振荡信号的传播特征, 可以认为 1940~1960 年前后存在另一次南极绕极波现象, 这说明南极绕极波并非仅发生在 1980~2000 年前后, 而是可能在其他年代重复出现和活跃的现象。由此也可将近百余年来划分为南极绕极波的两段活跃期和 3 段活跃期。

近百余年来, 温度等要素场中的绕极波信号振幅最大的位置在 120°W 附近, 另一个振幅的峰值则在 60°E, 表明激发或加强南极绕极波的海气耦合过程可能主要发生在德雷克海峡两侧, 这验证了过去研究对 1980~2000 年绕极波现象的相关认识。1950 年前后绕极波振幅的纬向分布特征基本一致, 表明影响绕极波的关键区域不随时间变化, 这意味着绕极波形成机制中内在固定因素的影响 (如地形的作用) 可能相当大。

近百余年来, 南极涛动经历了 3 个年代际偏强期和 2 个偏弱期。不仅 1980~2000 年前后, 另一个绕极波活跃时期 (1940~1960 年前后), 南极涛动也处于偏强期, 而南极涛动偏弱期绕极波消失不见。南极涛动通过加强绕极西风, 促进海气耦合, 进而有利于绕极波的出现和活跃, 这可以解释年代际尺度上南极涛动和南极绕极波这种较好的对应

关系。然而仅仅南极涛动并不能完全解释南极绕极波的存在与否, 亚热带太平洋海温异常距平信号作为必要的热力扰动, 也是激发南极绕极波的重要条件。1900~1910 年前后南极涛动偏强, 但并无南极绕极波出现 (Orcadas 站温度多年际振荡没有异常增强, 可能表明当时缺少外源热力扰动的影 响), 1910~1920 年前后 Orcadas 站温度多年际振荡增强, 也没有南极绕极波出现 (此时南极涛动偏弱), 这些都说明当环流条件和热力扰动不相配合时, 南极绕极波难以激发和活跃。因此, 尽管南极涛动对南极绕极波有重要影响, 但并不具备决定作用, 绕极波的出现和活跃可能是多个因素配合的结果。

考虑到资料中可能存在的不确定性, 本文的结果也可能存在难以估计的问题, 但毫无疑问在目前相关资料和研究都非常稀缺的情况下, 本工作是利用现有资源, 在年代际尺度上理解南极绕极波的一次努力尝试。目前所得到的结果, 在逻辑上是相互吻合的, 海峡的地形和位置是不变的, 而南极涛动是百年南半球气候中最稳定的环流特征, 正是因为这些条件对南极绕极波的稳定的重要影响, 才可以有南极绕极波在另一个年代的重现。当然, 南极绕极波还受到海洋热力扰动等复杂因素的影响, 在本文中并未展开详细的分析, 这还有待于未来更多数据的发掘和研究的开展。

参考文献 (References)

- 卞林根, 林学椿. 2009. 南极涛动和南极绕极波的年代际变化 [J]. 大气科学, 33 (2): 251-260.
- Bian Lingen, Lin Xuechun. 2009. Interdecadal change of the Antarctic oscillation and the Antarctic circumpolar wave [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (2): 251-260.
- Bian L G, Lin X. 2012. Interdecadal change in the Antarctic circumpolar wave during 1951-2010 [J]. Advances in Atmospheric Science, 29 (3): 464-470.
- Bonekamp H, Sterl A, Komen G J. 1999. Interannual variability in the southern ocean from an ocean model forced by European center for medium-range weather forecast reanalysis fluxes [J]. J. Geophys. Res., 104 (C6): 13317-13331.
- Cai W J, Baines P G, Gordon H B. 1999. Southern mid-to-high latitude variability, a zonal wavenumber-3 pattern, and the Antarctic circumpolar wave in the CSIRO coupled model [J]. J. Climate, 12: 3087-3104.
- Christoph M, Barnett T P, Rockner E. 1998. The antarctic circumpolar wave in a coupled ocean-atmosphere GCM [J]. J. Climate, 11: 1659-1672.
- Compo G P, Whitaker J S, Sardeshmukh P D, et al. 2011. The twentieth century reanalysis project [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 137 (654): 1-28.
- Connolley W M. 2003. Long-term variation of the antarctic circumpolar

- wave [J]. *J. Geophys. Res.*, 108 (C4): 3–12.
- Emanuel K. 2010. Tropical cyclone activity downscaled from NOAA-CIRES reanalysis, 1908–1958 [J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2 (1): doi:10.3894/JAMES.2010.2.1.
- 范丽君, 李建平, 韦志刚, 等. 2003. 北极涛动和南极涛动的年变化特征 [J]. *大气科学*, 27 (3): 419–424. Fan Lijun, Li Jianping, Wei Zhigang, et al. 2003. Annual variation of the Arctic oscillation and the Antarctic oscillation [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 27 (3): 419–424.
- 高登义, 邹悍, 周立波, 等. 2008. 极地大气科学考察研究与展望 [J]. *大气科学*, 32 (4): 882–892. Gao Dengyi, Zou Han, Zhou Libo, et al. 2008. Expedition research and prospect on atmospheric sciences in the polar regions [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32 (4): 882–892.
- Giese B S, Compo G P, Slowey N C, et al. 2010. The 1918/1919 El-Niño [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 91: 177–183.
- Gong D Y, Wang S W. 1999. Definition of antarctic oscillation index [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 26: 459–462.
- Jacobs G A, Mitchell J L. 1996. Ocean circulation variations associated with the Antarctic circumpolar wave [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 23 (21): 2947–2950.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NMC/NCAR 40-year reanalysis project [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77 (6): 437–471.
- Mo K C. 2000. Relationships between low-frequency variability in the Southern Hemisphere and sea surface temperature anomalies [J]. *J. Climate*, 13: 3599–3610.
- Peterson R G, White W B. 1998. Slow oceanic teleconnections linking the Antarctic circumpolar wave with the tropical El Niño-Southern Oscillation [J]. *J. Geophys. Res.*, 103 (C11): 24573–24583.
- Torrence C, Compo G P. 1998. A practical guide to wavelet analysis [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 79: 61–78.
- Torrence C, Webster P J. 1999. Interdecadal changes in the ENSO-monsoon system [J]. *J. Climate*, 12: 2679–2690.
- Venegas S A. 2003. The Antarctic circumpolar waves: An indication of ocean-atmospheric coupling in the extratropics [J]. *J. Climate*, 16 (15): 2509–2525.
- Walter E L, Pablo O C, Juan B, et al. 2006. 100 years of surface weather observations at Orcadas Antarctic station: A look at variability and change in the Antarctic Peninsula [C]// *Proceeding of 8 ICSHMO, Foz do Iguacu, Brazil*, 195–199.
- White W B, Peterson R G. 1996. An Antarctic circumpolar wave in surface pressure, wind, temperature and sea-ice extent [J]. *Nature*, 380: 699–72.
- White W B, Chen S C, Allan R J, et al. 2002. Positive feedbacks between the Antarctic circumpolar wave and the global El Niño-Southern Oscillation wave [J]. *J. Geophys. Res.*, 107 (C10): 29-1–29-17.
- Wood K R, Overland J E. 2010. Early 20th century Arctic warming in retrospect [J]. *International Journal of Climatology*, 30: 1269–1279.
- 效存德, 程彦杰, 任贾文, 等. 2004. 冰芯记录的南印度洋“南极绕极波”近期信号 [J]. *科学通报*, 49 (23): 2455–2463. Xiao Cunde, Cheng Yanjie, Ren Jiawen, et al. 2004. The signal of the Antarctic circumpolar wave in the ice core proxies [J]. *Chinese Science Bulletin (in Chinese)*, 49 (23): 2455–2463.
- 周琴, 赵进平, 何宜军. 2004. 南极绕极波研究综述 [J]. *地球科学进展*, 19 (5): 761–766. Zhou Qin, Zhao Jinping, He Yijun. 2004. Review on the studies of the Antarctic circumpolar wave [J]. *Advance in Earth Science (in Chinese)*, 19 (5): 761–766.