

刘凯, 祝从文. 2015. 冬季北太平洋海温主模态在 1990 年前后调整及其成因初探 [J]. 大气科学, 39 (5): 926–940. Liu Kai, Zhu Congwen. 2015. Regime shift of winter North Pacific sea surface temperature after 1990 and its possible causes [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39 (5): 926–940, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1411.14218.

冬季北太平洋海温主模态在 1990 年前后 调整及其成因初探

刘凯 祝从文

中国气象科学研究院, 北京 100081

摘 要 太平洋年代际振荡 (PDO) 和北太平洋涡旋振荡 (NPGO) 是北太平洋 ($20^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$, $120^{\circ}\text{E}\sim 120^{\circ}\text{W}$) 海温 (SST) 的 EOF 前两个模态, 本文通过比较 1990 年前后北太平洋冬季 SST EOF 前两个模态, 揭示了 PDO 和 NPGO 在 1990 年前后特征, 并从关键区海温变化、北太平洋涛动 (NPO)、赤道太平洋中部变暖 (CPW) 和北极涛动 (AO) 的影响, 揭示了北太平洋主模态在 1990 年之后调整的成因。我们发现, 1990 年之前, 北太平洋 SST 场的 EOF 前两个模态与 PDO 和 NPGO 的空间结构类似, 但是在 1990 年之后, SST 的 EOF 第一模态的最大荷载中心向日界线移动, 40°N 以北的太平洋被正的 SST 异常控制, 表现出与 NPGO 模态的负位相相似的空间分布特征, 而 EOF 第二模态由偶极子演变成了三极子结构。北太平洋中部 ($28^{\circ}\sim 36^{\circ}\text{N}$, $152^{\circ}\sim 178^{\circ}\text{W}$) 和北太平洋北部 ($44^{\circ}\sim 49^{\circ}\text{N}$, $151^{\circ}\sim 177^{\circ}\text{W}$) 海温距平在 1990 年之后呈显著的负相关变化, 是导致在 1990 年之后冬季 NPGO 成为主模态的内部原因, 而 NPO 在 1990 年之后的显著增强则是重要的外部原因。分析显示, NPO 在 1980 年开始表现出增强趋势, 通过风生流机制, NPO 可以增强北太平洋 45°N 附近的气压梯度和西风异常幅度, 从而导致了 1990 年之后 NPGO 海温模态的加强。虽然 CPW 和 AO 对 NPO 的南支 (夏威夷) 和北支 (阿拉斯加) 的海平面气压异常中心加强有贡献, 但是上述两个因子与 NPGO 之间的关系在 1990 年之前并不明显。因此, CPW 和 AO 与 NPGO 之间并不存在稳定的物理联系。

关键词 太平洋年代际振荡 北太平洋涡旋振荡 年代际调整成因

文章编号 1006-9895(2015)05-0926-15

中图分类号 P47

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1411.14218

Regime Shift of Winter North Pacific Sea Surface Temperature after 1990 and Its Possible Causes

LIU Kai and ZHU Congwen

Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

Abstract The Pacific Decadal Oscillation (PDO) and North Pacific Gyre Oscillation (NPGO) are generally referred to as the first two EOF modes of Sea Surface Temperature (SST) in the North Pacific ($20^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$, $120^{\circ}\text{E}\sim 120^{\circ}\text{W}$). In the present study, the authors compared the first two EOF modes of winter SST anomalies in North Pacific for the period before and after 1990. Based on the impacts of key regional SST changes, the North Pacific Oscillation (NPO), Central Pacific Warming (CPW), as well as Arctic Oscillation (AO), the authors discuss the possible causes of the first mode of the NPGO after 1990. Our results suggest that before 1990, the first two EOF modes of SST exhibit the PDO and NPGO

收稿日期 2014-07-03; **网络预出版日期** 2014-11-18

资助项目 国家自然科学基金项目 41475057、41221064、41376020, 中国气象科学研究院基本科研业务费项目 2010Z001、2013Z002

作者简介 刘凯, 女, 1990 年出生, 硕士研究生, 主要从事季风与海气相互作用的研究。E-mail: 15811032956@163.com

通讯作者 祝从文, E-mail: tomzhu@cma.cma.gov.cn

pattern, respectively. However, after 1990 the center of the maximal load of the first EOF tilts to the dateline, and gives rises to positive SST anomalies north of 40°N , resulting in a negative phase of NPGO; meanwhile, the previous NPGO changes from a dipole pattern to the triple mode. Analyses suggest that the negative correlation between the changes of SST in the northern ($44^{\circ}\text{--}49^{\circ}\text{N}$, $151^{\circ}\text{--}177^{\circ}\text{W}$) and central ($28^{\circ}\text{--}36^{\circ}\text{N}$, $152^{\circ}\text{--}178^{\circ}\text{W}$) North Pacific could have resulted in the internal shift of the dominant SST modes after 1990. Evidence shows that the NPO played an important external forcing in enhancing the NPGO after 1990. Based on wind-driven oceanic current theory, the increased amplitude of NPO in Sea Level Pressure (SLP) may intensify the polar gradient of the SLP along 45°N , enhancing the zonal sea surface winds, and causing the NPGO mode to prevail after 1990. The increase in CPW and AO may have enhanced the NPO by intensifying the southern and northern branch of the NPO in Hawaii and Alaska after 1990, but there is no evidence to show that both these factors were closely related to the NPO before 1990.

Keywords Pacific Decadal Oscillation, North Pacific Gyre Oscillation, Decadal change and causes

1 引言

太平洋年代际振荡 (Pacific Decadal Oscillation, PDO) 和北太平洋涡旋振荡 (North Pacific Gyre Oscillation, NPGO) 分别表示的是北太平洋海温 (SST) 和海表高度 (SSH) 异常的年代际振荡现象 (Mantua et al., 1997; Di Lorenzo et al., 2008)。其中, PDO 指的是 20°N 以北的西太平洋与赤道东太平洋 SST 在年代际时间尺度上的跷跷板变化, 当 PDO 处于正位相时, 20°N 以北的西太平洋海温变冷, 而赤道东太平洋的 SST 变暖。Di Lorenzo et al. (2008) 对 SSH 资料进行 EOF 分析发现, 东北太平洋区域 ($25^{\circ}\text{--}62^{\circ}\text{N}$, $180^{\circ}\text{--}110^{\circ}\text{W}$) SSH 场的 EOF 第二模态表现出南北相反的变化特征, 并将该模态定义为北太平洋涡旋振荡 (NPGO), 其对应的时间序列称为 NPGO 指数。当 NPGO 指数为正值时, 南部 SSH 为正异常中心, 对应涡旋呈顺时针环流; 北部 SSH 为负异常中心, 对应的涡旋呈逆时针环流, 此时为 NPGO 的正位相, 反之则称为 NPGO 的负位相。虽然 PDO 和 NPGO 的定义分别源自北太平洋 SST 和 SSH 距平场的 EOF 分析, 但是 Di Lorenzo et al. (2008) 发现北太平洋 SST 的 EOF 第二模态 (“维多利亚”模态; Bond et al., 2003) 与 SSH 场的 EOF 第二模态 (NPGO) 在空间分布上存在高度的相似, 时间系数显著相关。因此, PDO 和 NPGO 可以理解为北太平洋 SST 或 SSH 场的 EOF 前两个模态, 它们反映的是北太平洋海温年代际尺度主要变化特征。

研究发现, PDO 通过影响 ENSO 发生的频率和强度, 进而导致 ENSO 与东亚季风之间的关系发生变化 (杨修群等, 2004; 吕俊梅等, 2005; 王会军和范可, 2013), 冬季的 PDO 与同期的阿留申低压

和蒙古高压存在同步的跷跷板变化, PDO 可以通过改变中高纬度纬向海—陆之间的气压差对东亚冬季风的强度产生直接影响 (Zhou et al., 2007; 李崇银等, 2011; Chen and Zhai, 2011)。研究还发现, 华南春季降水以及我国夏季降水的年代际尺度变化与 PDO 的位相变化存在密切联系 (李宏毅等, 2010; Qian and Zhou, 2013; 陈红和薛峰, 2013) 以及华北和西北东部的年干湿变化与同期 PDO 指数有密切的关系 (马柱国和邵丽娟, 2006)。因此, 一直以来 PDO 被认为是影响北半球和东亚季风年代际变化的最重要海洋因子之一。然而, Bond et al. (2003) 发现, 20 世纪 90 年代后期, 北太平洋 SST 的 EOF 第一模态与传统的 PDO 存在显著差异, 并且 Park et al. (2012) 指出 1990~2005 年期间东亚季风与海洋相互作用的机制较 1990 年之前存在显著的差异。最近, Yeh et al. (2010) 对 1956~2009 年北太平洋冬季 SST 距平分阶段进行 EOF 分析发现, SST 的 EOF 第一模态在 1956~1988 年为 PDO 型, 而在 1977~2009 年则表现为 NPGO 型, SST 的 EOF 前两个模态发生调整的时间大概在 1990 年前后。观测分析表明, 1990 年之后 NPGO 的振幅明显增加 (Bond et al., 2003), 而气候模拟的结果显示, 未来 100 年 (2000~2100 年) NPGO 的振幅将增加 38%, 而 PDO 的振幅将减少 58% (Cummins and Freeland, 2007)。上述结果预示未来 NPGO 将很有可能成为北太平洋的主导模态。

Di Lorenzo et al. (2010a, 2010b) 认为北太平洋这种海温模态的改变与赤道太平洋中部型 ENSO 事件频率的增加有密切的关系。由于传统的东部型 ENSO 和中部型 ENSO 分别体现在热带 SST EOF 前两个模态中 (Ashok et al., 2007; Kao and Yu, 2009; Furtado et al., 2012), 因此, 很容易理解 PDO 和

NPGO 与东部型和中部型 ENSO 之间的同步变化关系。而 Yeh et al. (2010) 认为北极涛动 (AO) 的变化可能是导致 NPGO 在 1990 年之后发生改变的重要原因。我们注意到, PDO 模态的 SST 最大变化中心位于中东太平洋 $30^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$ 之间, 而 NPGO 模态则表现为副热带西太平洋 ($20^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$) 和 $40^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{N}$ 东北太平洋地区的 SST 之间的偶极子变化, 因此热带海温的变化无法直接解释 PDO 和 NPGO 模态的调整。为此, 本文试图在以往研究的基础上, 从影响 PDO 和 NPGO 的关键区海温, 以及它们之间的变化关系角度揭示 PDO 和 NPGO 在 1990 年前后发生转换的海温场内部变化原因。在此基础上, 通过对北太平洋涛动 (NPO), 赤道太平洋中部变暖 (CPW) 和北极涛动 AO 的影响分析, 揭示北太平洋海温主模态在 1990 年之后调整的可能外部成因。

2 资料与方法

本文分析所用的资料: 1950~2014 年期间的美国 NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) 的月平均海温资料 (ERSST.V3b), 水平分辨率为 $2^{\circ}\times 2^{\circ}$ (Smith et al., 2008); 1950~2013 年期间的英国 Hadley 环流中心的月平均海温资料 (HadISST1), 水平分辨率为 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ (Smith et al., 1998); 月平均海平面气压 (SLP) 和风场资料均取自美国的 NECP/NCAR (National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research) 再分析资料, 水平分辨率为 $2.5^{\circ}\times 2.5^{\circ}$ (Kalnay et al., 1996)。本文采用的 NPO 指数为北太平洋冬季海表面气压异常 5 年低通滤波 EOF 分析第二模态对应的时间序列。PDO 指数定义为 20°N 以北太平洋海温异常 (SSTA) EOF 第一模态对应的时间系数 (Mantua et al., 1997), NPGO 指数为东北太平洋区域 ($25^{\circ}\sim 62^{\circ}\text{N}$, $180^{\circ}\sim 110^{\circ}\text{W}$) 海表高度异常 (SSHA) 的 EOF 第二模态对应的时间系数 (Di Lorenzo et al., 2008)。PDO 和 NPGO 指数的资料分别取自 <http://jisao.washington.edu/pdo/PDO.latest> [2014-04-01] 和 <http://www.ocean3d.org/npgo> [2014-04-01]。AO 指数为北半球 1000 hPa 位势高度异常 EOF 分析第一模态的时间序列, 资料取自 <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/climateindices/list> [2014-10-01]。

在对关键区海温指数之间的变化关系分析中, 我们采用了时间序列 EOF (T-EOF) 方法, 该方法

类似于主成分分析 (PCA), 但 EOF 模态表示的是各关键区 SST 异常之间的时间位相关系, 而对应的 PC 表示的是时间位相关系随时间变化。本文中所采用的统计信度的检验方法为 t 检验。

3 冬季北太平洋海温主模态变化及其内部成因

图 1 表示的是 1950 年 1 月到 2014 年 2 月 PDO 和 NPGO 指数时间序列及其 10 年滑动相关系数的变化 (计算 1950~1959 期间的相关系数, 我们将相关系数记在中间点 1955 年, 当计算 1951~1960 期间的相关系数时, 我们将相关系数记在 1956 年以此类推)。如图所示, PDO 与 NPGO 指数表现出明显的年代际变化, 且两者的周期基本一致。NPGO 振幅自上世纪 90 年代表现出显著的增强趋势, 这与 Bond et al. (2003) 的研究结果一致。分析两指数之间 10 年滑动相关系数可以发现, PDO 和 NPGO 指数自上世纪 90 年代后由正相关转化成负相关, 并且伴随 NPGO 指数振幅增强, 两者之间的负相关系数明显增强, 在 1990 年之后两者呈现显著负相关, 最大相关系数的绝对值超过了 0.50, 通过了 95% 的信度检验。

Di Lorenzo et al. (2008) 发现, 冬季 SST 的 EOF 第二模态与 NPGO 的空间结构基本一致, 并且 PDO 和 NPGO 的振幅在冬季达到最大。为此, 本文选取冬季 (December, January, and February; DJF) 的 PDO 与 NPGO 指数超过 (低于) 一个标准差的年份定义为 PDO 和 NPGO 的强正 (负) 位相年。选取的 PDO 正位相年份为 1983、1984、1985、1986、1987 年, 负位相年份为 1955、1956、1962、1971、1975 年。NPGO 的正位相年份为 1999、2000、2001、2002、2009 年, 负位相的年份则选为 1992、1993、1994、1995、1996 年。由于 NPGO 在 1990 年之后的振幅变强, 按照上述标准所选取的 NPGO 的极端正负位相年份均发生在 1990 年之后。

图 2 表示的是 1950~2013 年冬季 PDO 和 NPGO 强正负位相年份分别对应的海温, 气压和 850 hPa 风场异常合成图。在 PDO 正位相年份 (图 2a), SST 异常分布表现为北太平洋副热带 SST 负异常与赤道中东太平洋 SST 正异常之间的跷跷板变化, 并且伴随阿留申低压的加强, 以及 850 hPa 风场气旋性环流异常和北太平洋 30°N 附近的显著西风异常。PDO 负位相时的分布特征与之相反 (图 2b)。当 NPGO 处于正位相时 (图 2c), 东北太平洋

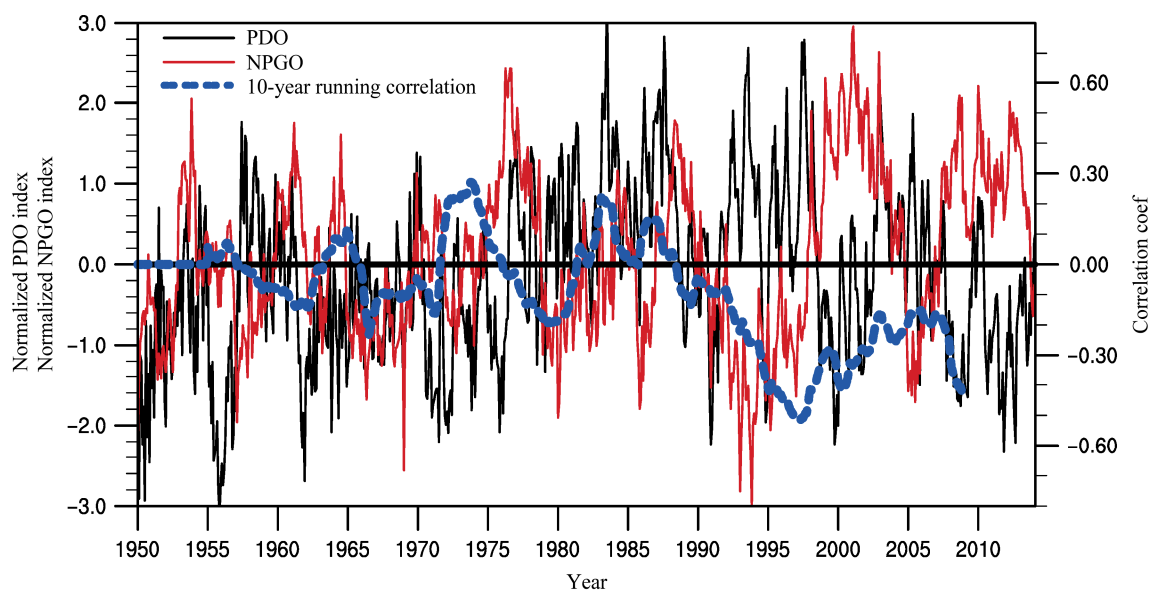


图1 1950~2014年PDO与NPGO指数及其10年滑动相关系数变化。其中,黑色和红色实线分别表示的是PDO和NPGO指数,蓝色虚线表示PDO与NPGO指数之间的十年滑动相关系数变化

Fig. 1 Normalized time series of monthly PDO (Pacific Decadal Oscillation; black line) and NPGO (North Pacific Gyre Oscillation; red line) indices during 1950–2014. The blue dashed line indicates the 10-year running correlation coefficients between PDO and NPGO indices

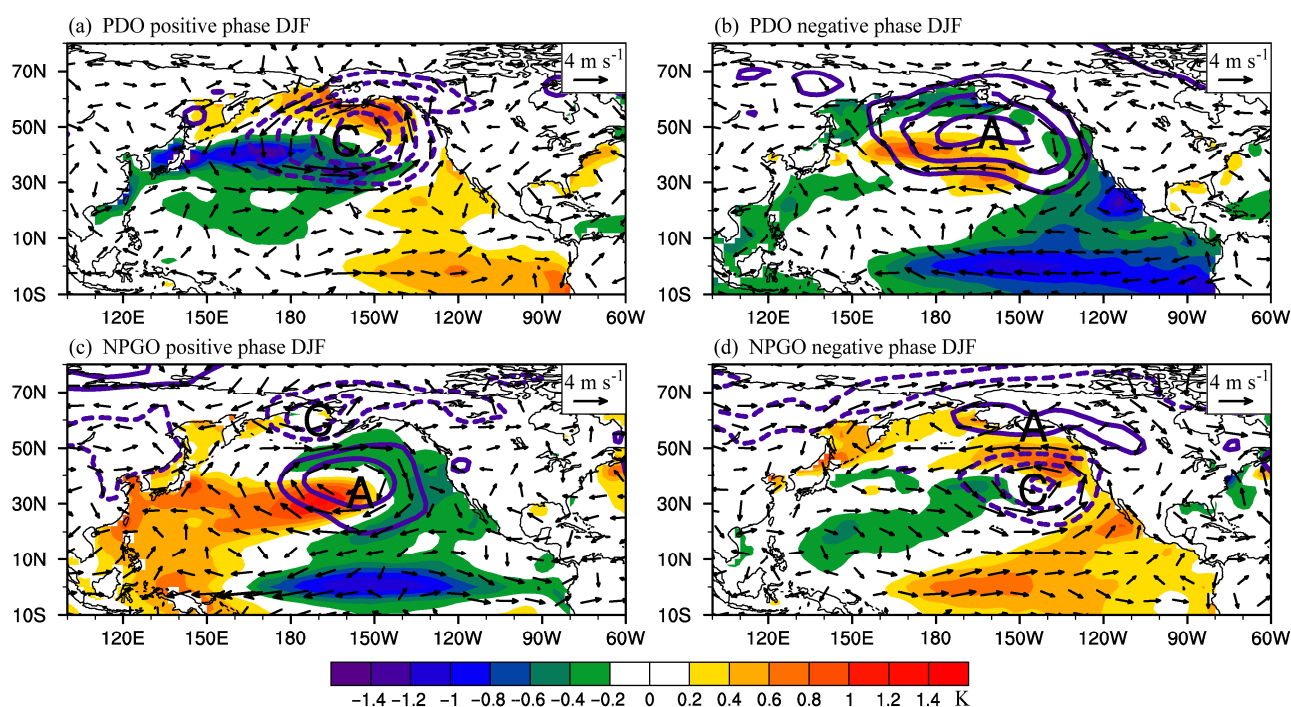


图2 PDO和NPGO极端正、负位相年份对应的冬季(DJF)海温异常(单位: K)、气压异常(SLPA)(单位: hPa)、850 hPa风场异常(单位: m s^{-1})合成图:(a) PDO正位相年份;(b) PDO的负位相年份;(c) NPGO的正位相年份;(d) NPGO的负位相年份。其中,填色图表示的是海温异常;紫色等值实(虚)线为海平面气压正(负)异常;箭头表示850 hPa风场异常;字母A和C分别表示反气旋和气旋中心

Fig. 2 Composite fields of SST anomalies (shaded; units: K), sea level pressure anomaly (SLPA) (hPa) (purple dashed contours: negative anomaly; purple solid contours: positive anomaly), and 850 hPa wind anomaly (arrows; units: m s^{-1}) for the positive and negative PDO and NPGO years in DJF (December, January, and February): (a) Positive phase of PDO; (b) negative phase of PDO; (c) positive phase of NPGO; (d) negative phase of NPGO. Marks of 'A' and 'C' indicate the centers of anti-cyclone and cyclone in the wind anomalies at 850 hPa, respectively

为负的 SST 异常, 副热带西北太平洋表现为正的 SST 异常, 并且一直延伸到西太平洋副热带地区, 此时赤道中东太平洋 SST 表现为负距平, 海温最大经向梯度位于北太平洋 40°N 附近。与 PDO 模态存在显著的差异, NPGO 模态的 SLP 的正负异常中心分别位于夏威夷以北和阿拉斯加地区, 对应冬季的北太平洋涛动 NPO 的正位相 (Walker and Bliss, 1932)。其中, 850 hPa 风场在阿拉斯加上空表现为气旋性环流异常, 而夏威夷地区为反气旋性的环流异常, 风场最显著的特征是北太平洋 40°N 表现为显著西风异常, 对比 PDO 模态, 西风异常的位置向北移动了近 10 个纬度。NPGO 负位相时的分布特征与之相反, 但是海温的变化幅度明显减弱 (图 2d)。

比较可以发现, PDO 正负位相对应的是赤道东太平洋海温异常, 而 NPGO 正负位相对应的赤道中东太平洋的海温异常, 相比 PDO 而言 NPGO 对应的赤道太平洋海温异常的大值中心偏西, 两者分别对应赤道东部型和中部型海温变暖。在北太平洋地区两者在 SST 场和环流异常场存在较大的差异。由于 PDO 和 NPGO 对应的 SST 和环流异常明显不同, 意味着它们对北半球大气环流的影响存在差异。

图 3 表示的是 1950~2013 年冬季北太平洋 SST

异常场 EOF 前两个模态 (EOF1 和 EOF2) 及其对应的主分量 (PC1 和 PC2)。如图所示, SST 的 EOF1 模态在北太平洋表现为椭圆形分布的 SST 负异常, 北界位于 50°N 附近, 其中 SST 的负值范围几乎控制了北太平洋 50°N 以南的大部分地区, 最大荷载位于东北太平洋副热带地区 (28°~36°N, 178°~152°W), 在 EOF2 模态中 SST 异常则表现为沿东北西南走向的负、正偶极子异常分布, 其中海温最大的负 (正) 荷载中心分别位于东北太平洋 (44°~49°N, 151°~177°W) 和副热带西北太平洋 (22°~28°N, 145°~170°E), 并且在 40°N 附近存在一个很强的 SST 经向梯度。计算表明, PC1 和 PC2 与 PDO 指数之间的相关系数分别为 0.83 和 -0.40, 而它们与 NPGO 指数之间的相关系数分别为 -0.17 和 0.59, 因此, SST 的 EOF 前两个模态和时间系数分别反映的是 PDO 和 NPGO 的时空演变特征。

为了揭示 PDO 和 NPGO 在 1990 年前后的变化及其差异, 我们分别对 1990 年前后两个阶段的冬季 SST 场进行了 EOF 分析 (图 4)。1950~1990 年间, 冬季北太平洋 SST 的 EOF1 模态表现出明显的 PDO 结构, 最大荷载位于北太平洋中部, 这期间的 PC1 与 PDO 指数之间的相关系数 0.91 (PC2 与 PDO 的相关系数仅为 0.10), 而 SST 的 EOF2 模态则表

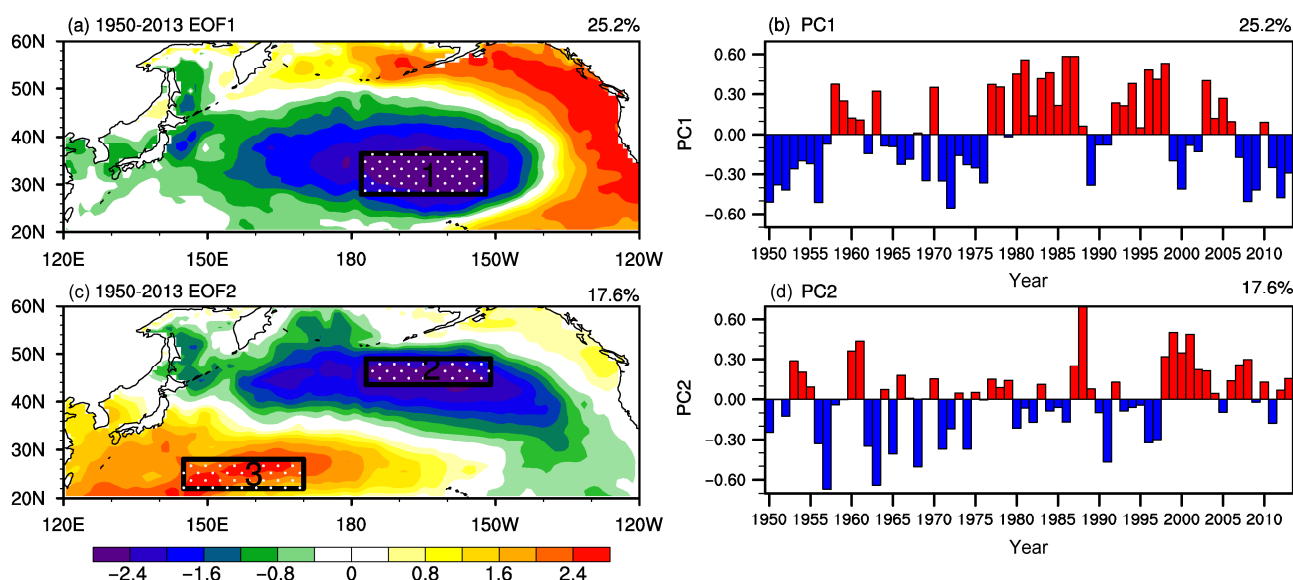


图 3 1950~2013 年冬季北太平洋 (20°~60°N, 120°E~120°W) 海表温度 EOF 前两个模态 (EOF1 和 EOF2) 及其对应的主分量 (PC1 和 PC2) 时间变化: (a) EOF1; (b) PC1; (c) EOF2; (d) PC2。其中, 黑色方框分别表示的是 EOF1 和 EOF2 的海温场最大荷载范围

Fig. 3 The first two EOF modes (EOF1 and EOF2) of winter SST and their two principal components (PC1 and PC2) in the North Pacific (20°~60°N, 120°E~120°W) during 1950~2013: (a) EOF1; (b) PC1; (c) EOF2; (d) PC2. The black square frames indicate regions of the largest loadings of EOF1 and EOF2

现出 NPGO 模态, PC2 与 NPGO 指数之间的相关系数为 0.46 (PC1 与 NPGO 的相关系数仅为 0.17)。比较可以发现, SST 的 EOF 前两个模态与图 3 的结果非常相似, 并且前两个模态的时间系数与 PDO 和 NPGO 指数之间存在显著的正相关。但是, 我们注意到在 1990~2013 年, 冬季北太平洋 SST 的 EOF 前两个模态与之前的模态存在明显的差异, 第一模态的负值海温分布由原来的近似西北—东南向的椭圆结构沿 30°N 纬向轴逆时针旋转转变成东北—西南向椭圆结构, 负值最大荷载中心向日界线倾斜, 40°N 以北地区被正的 SST 异常控制, 这期间

的 EOF1 与 1990 年之前的 EOF2 模态的负位相存在明显的相似性。正因为上述变化, Yeh et al. (2010) 认为 1990 年之后北太平洋 PDO 和 NPGO 模态发生了反转。

计算表明, 1990 年之后 PC1 与 PDO 指数相关系数为 0.55, 与 NPGO 指数之间的相关系数为 -0.61。虽然 1990 年之后的 PC1 与 PDO 指数依然相关, 但是 EOF1 更接近于 NPGO 的负位相模态。同样, EOF2 在 1990 年之后也发生了显著变化, SST 异常的最大荷载中心向西南方向移动, EOF2 由偶极子结构演变成了东北—西南向的三极子结构。计

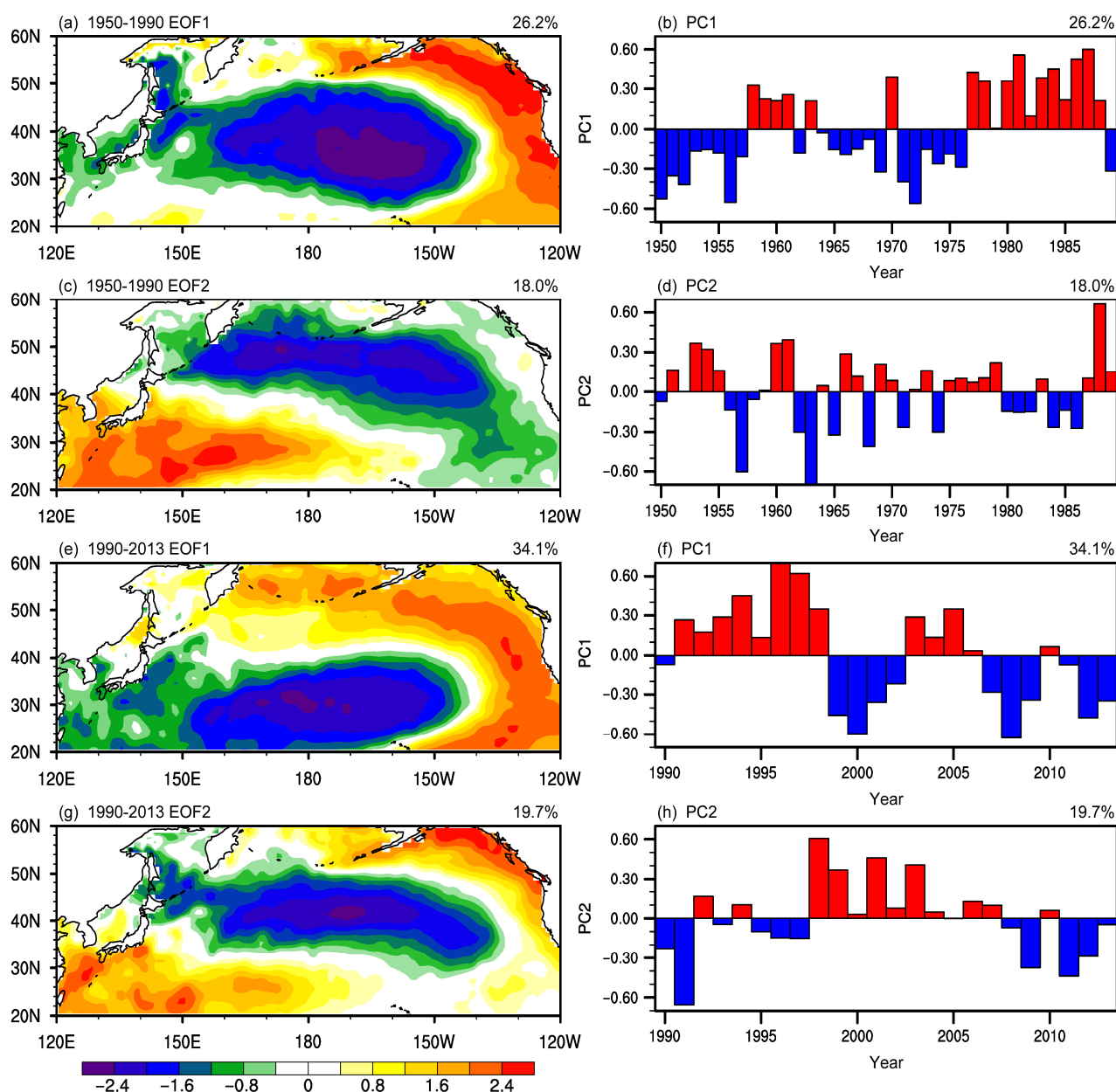


图 4 同图 3, 但表示的是 1950~1990 年和 1990~2013 年的结果

Fig. 4 Same as Fig. 3, but for the time periods of 1950-1990 and 1990-2013, respectively

算表明, PC2 与 PDO 指数之间的相关系数为 0.71, 而与 NPGO 之间的相关系数仅为 0.36。由此可见, 1990 年之后冬季北太平洋海温的 EOF 前两个模态的确发生了调整, EOF1 更接近于 1990 年之前的 NPGO 负位相模态, 而 EOF2 则由原来的偶极子演变成了三极子结构。上述海温 EOF 前两个模态的调整不能简单地认为是 PDO 和 NPGO 模态的互换, 虽然前两个 PC 系数依然与 PDO 和 NPGO 指数之间存在显著地相关, 但是海温 EOF 前两个模态与传统的 PDO 和 NPGO 模态表现出明显的变异。

根据 1950~2013 年冬季海温 EOF 前两个模态的空间荷载最大中心 (图 3) 我们定义了 3 个海温关键区 (图中黑色方框区域), 分别是北太平洋中部 ($28^{\circ}\sim 36^{\circ}\text{N}$, $152^{\circ}\sim 178^{\circ}\text{W}$), 北太平洋北部 ($44^{\circ}\sim 49^{\circ}\text{N}$, $151^{\circ}\sim 177^{\circ}\text{W}$) 和西北太平洋副热带地区 ($22^{\circ}\sim 28^{\circ}\text{N}$, $145^{\circ}\sim 170^{\circ}\text{E}$), 将上述 3 个区域平均的冬季海温距平分别定义为 Index1、Index2、Index3, 之后将上述三个海温指数分别对同期的北太平洋的海温进行回归分析 (图略)。结果表明, SST 对 Index1 的回归系数场主要表现为 PDO 海温模态特征, 而 SST 场对 Index2 和 Index3 的回归系数场则对应 NPGO 的空间模态特征, 表明上述三个关键区的海温变化与 PDO 和 NPGO 的空间模态的演变可能存在密切联系。此外, 三个关键区海温指数与 PDO 和 NPGO 的相关系数显示, Index1 与 PDO 为显著的负相关关系 (相关系数高达 -0.74), Index2 与 PDO 和 NPGO 为显著的负相关的关系 (相关系数分别为 -0.53 和 -0.63), 而 Index3 与 NPGO 有显著的正相关关系 (相关系数为 0.55)。

北太平洋关键区海温的时间变化反映了 PDO 和 NPGO 的时间演变特征。利用傅里叶谐波分析, 我们获得了三个关键区海温指数 5 年低通滤波之后的时间序列 (图 5), 并且分别计算了 1950~1990 和 1990~2013 年两个阶段滤波前后三个指数之间的相关系数 (表 1)。分析发现, 在 1950~2013 年期间, Index1 与 Index2 之间显著正相关 (相关系数为 0.28), 1990 年之前正相关关系比较明显 (相关系数为 0.55), 但是在 1990 年之后 Index1 和 Index2 之间则表现为显著的负相关 (相关系数为 -0.24)。Index1 与 Index3 之间在整个阶段几乎不存在相关, 但是 1990 年之后两者之间表现出显著的正相关 (相关系数为 0.50)。相对而言, Index2 和 Index3 之间的负相关关系比较稳定。上述三个关键区海温指数

之间的变化关系在 5 年低通滤波的中的表现更为明显, 而 1990 年之后上述三个关键区海温指数之间的相关系数的变化可能与北太平洋冬季海温模态的调整存在密切的关系。

表 1 Index1、Index2、Index3 之间的相关系数, 括号中的数值表示 5 年低通谐波分量之间的相关系数。

Table 1 The correlation coefficients between Index1, Index2, and Index3 and the values in the brackets represent the correlation coefficients between the 5-year low pass harmonic components of the three indices. Value with ‘**’ represents pass the Student *t* test at 95% confidence level, R12 represents the correlation between Index1 and Index2, and definitions for R13 and R23 are similar

时间段	相关系数		
	R12	R13	R23
1950~1990 年	0.55* (0.55*)	0.05 (0.14)	-0.57* (-0.58*)
1990~2013 年	-0.24 (-0.45*)	0.50* (0.61*)	-0.65* (-0.85*)
1950~2013 年	0.28* (0.19)	0.19 (0.31*)	-0.54* (-0.59*)

注: R12 表示的是海温 Index1、Index2 之间的相关系数, R13、R23 以此类推。

*表示通过 95%信度检验。

北太平洋海温的 PDO 和 NPGO 模态主要源于对 1950~2013 年 SST 场的协方差或相关系数矩阵的 EOF 分析结果, 由于 1990 年前后两个阶段 SST EOF 的前两个模态发生了变化, 由此可推测, 其方差或相关系数矩阵一定发生了变化。我们注意到在 1990 年后, 北太平洋中部和北部的 SST 之间的相关关系发生了显著调整。接下来我们试图从关键区海温之间的协同变化关系对 PDO 和 NPGO 模态的影响来揭示 PDO 和 NPGO 模态发生变化的内部原因。由于图 3 中的三个关键区的海温与 PDO 和 NPGO 指数之间的变化密切相关, 因此 PDO 和 NPGO 模态随时间的变化可以简化为上述三个关键区海温指数 EOF 位相关系随时间的变化。其中, EOF 模态表示的是海温指数之间时间位相关系, 而对应的 PC 系数表示时间位相关系随时间的变化。图 6 表示的是 1950~2013 年冬季三个关键区海温指数的 EOF 前两个模态及其对应的 PC 系数。如图所示, EOF1 主要表现为 Index1 与 Index2 同位相模态, 解释方差为 58.7%, EOF2 主要表现为 Index2 与 Index3 和 Index1 之间的反位相模态, 其中 Index3 的振幅明显大于 Index1, 该模态的解释方差为 34.5%。PC1 与 PDO 指数之间的相关系数为 0.78 (PC2 与 PDO 指数之间的相关系数为 -0.15) PC2

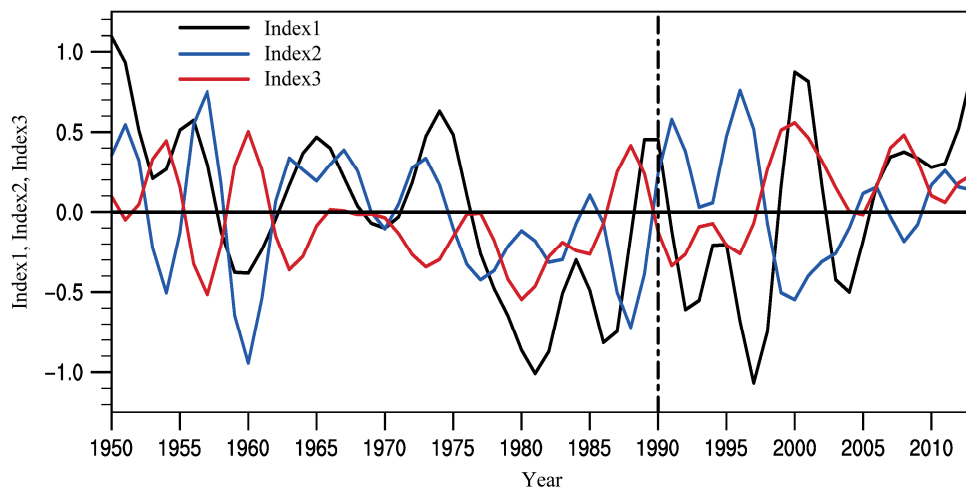


图 5 1950~2013 年冬季三个最大荷载区平均 SST 距平指数 (Index1、Index2、Index3) 的 5 年低通谐波分量随时间的变化。其中, 海温场为北太平洋 SST EOF 前两个模态重建场

Fig. 5 Variations of averaged SST anomaly indices (the 5-year low pass harmonic components) in the three largest loading-regions (Index1, Index2, and Index3). North Pacific SST is reconstructed by the first two EOF modes

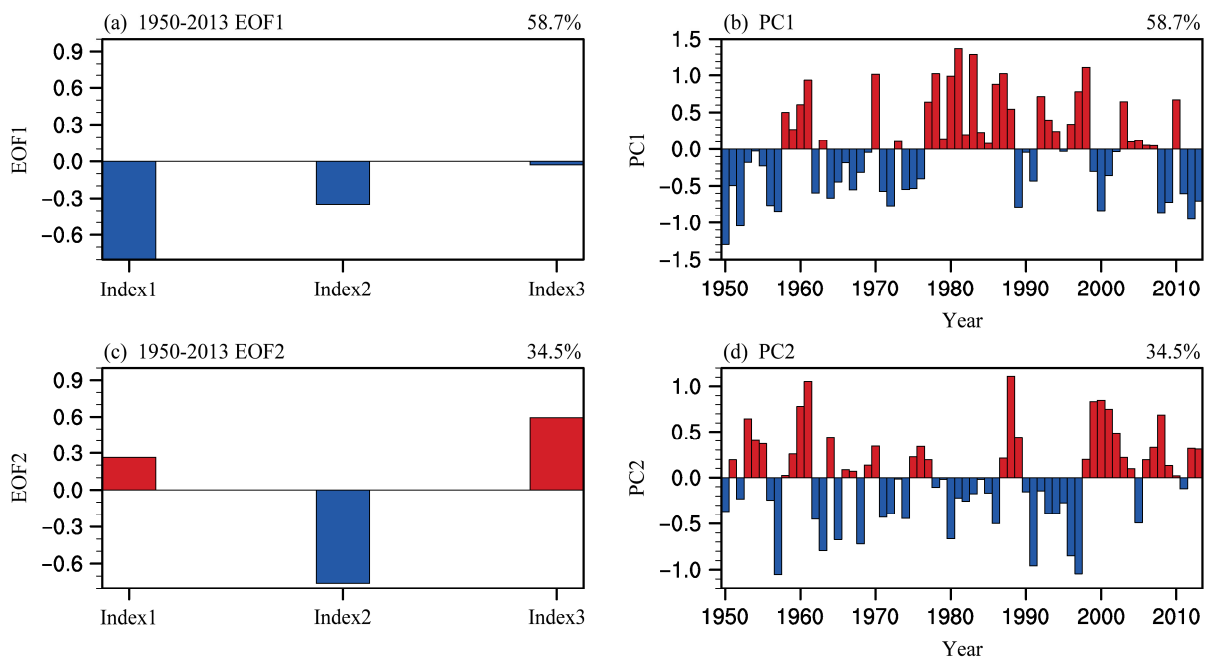


图 6 1950~2013 年 Index1、Index2、Index3 时间序列 EOF 分析: (a) EOF1; (b) PC1; (c) EOF2; (d) PC2

Fig. 6 The EOF analysis of Index1, Index2, and Index3 during 1950~2013 in winter: (a) EOF1; (b) PC1; (c) EOF2; (d) PC2

与 NPGO 之间的相关系数为 0.68(PC1 与 NPGO 之间的相关系数仅为-0.17), 均超过了 95%的信度检验。

我们同样以 1990 年为分界, 将 1950~2013 年分为两个阶段并分别计算了三个关键区海温指数的 EOF 前两个模态和 PC 系数 (图 7), 以及两个阶段的 PC1 和 PC2 与 PDO 和 NPGO 指数之间的相关系数。比较可以看出, 1990 年之前的 EOF 前两个

模态 (图 7a 和 7b) 与图 6a 和 6b 的 EOF 模态基本一致, 解释方差分别占 67.1%和 28.4%, EOF1 和 EOF2 分别反映的是 PDO 和 NPGO 最大荷载区的海温的时间位相关系。其中, PC1 和 PC2 与 PDO 和 NPGO 指数之间的相关系数分别为 0.81 和 0.55。但是, 1990 年之后 EOF 前两个模态解释方差分别占 68.5%和 26.8%, 对比可以发现, 1990 年之后的 EOF1 和 EOF2 与 1990 年之前的 EOF2 和 EOF1 负位相模

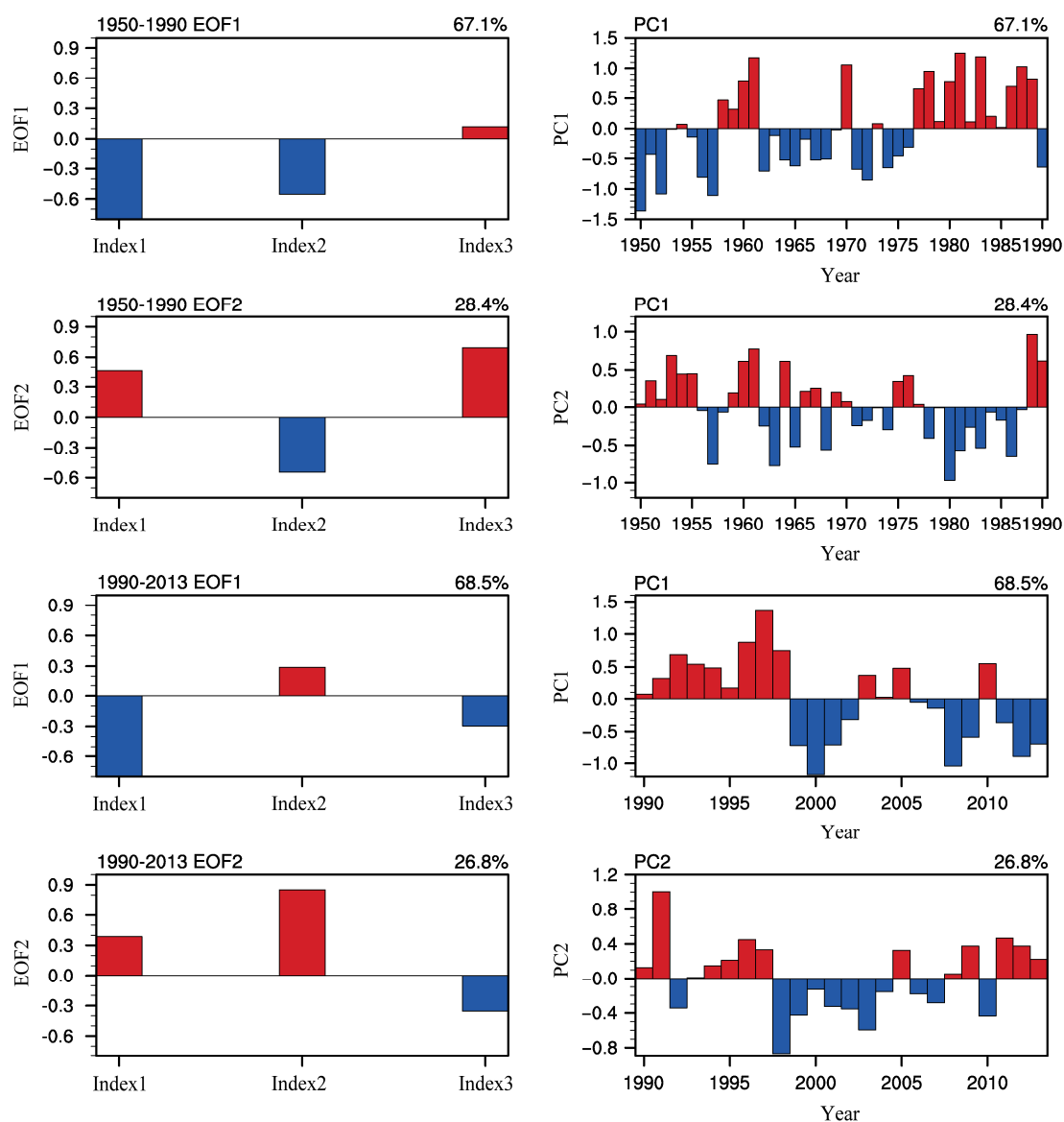


图7 与图6相同,但分别为1950~1990年和1990~2013年的结果

Fig.7 Same as Fig.6, but for the time periods of 1950–1990 and 1990–2013, respectively

态存在明显的相似性, PC1 与 PDO 和 NPGO 指数之间的相关系数分别为 0.57 和 -0.56, PC2 与 PDO 和 NPGO 指数相关系数分别为 -0.59 和 -0.51。由于 PDO 和 NPGO 指数在 1990 年之后呈现显著的负相关, 因此很容易理解 PC 指数与 PDO 和 NPGO 同时存在显著相关。但是, 关键区海温 (Index1 和 Index2) 在 1990 年之后由同步变化转化成了反向变化。

为进一步验证 Index1 与 Index2 之间相关关系的调整对北太平洋海温主模态调整的重要影响, 我们对 1950~2013 年冬季 Index1 与 Index2 进行 EOF 分析 (图略), EOF1 空间模态表现为 Index1 与 Index2 同位相变化, 所对应的时间序列 PC1 与 PDO 的相关

系数高达 -0.80, EOF2 空间模态表现为 Index1 与 Index2 反位相变化, 所对应的时间序列 PC2 与 NPGO 的相关系数为 -0.59。将 PC1 和 PC2 分别对 850 hPa 风场以及海温场进行回归, 分别可以得到 PDO 和 NPGO 风场和海温场的空间分布特征。

关键区海温之间的关系调整有可能与北太平洋 SST 的主模态调整存在伴随关系, 为了进一步确认对冬季北太平洋海温模态调整的影响, 我们对本文定义的关键区 SST 指数进行了 10 年滑动相关分析 (图 8)。如图所示, Index1 和 Index2 之间的相关系数在 1980 年之前一直表现出显著的正相关关系, 但是在 1983 年左右两者的正相关系数开

始减弱,并在 1990 年之后转化为显著的负相关。由此可见,Index1 和 Index2 之间的正负关系调整明显偏早,是冬季北太平洋海温模态调整的先兆特征,当上述 2 个关键区海温变化调整为显著的负相关时,随后冬季北太平洋海温主模态发生了改变。因此,北太平洋关键区海温之间的关系变化可认为是北太平洋海温主模态调整的内部成因。

4 外部因子对冬季北太平洋海温主模态调整的影响

NPO 是北太平洋 SLP 距平场的 EOF 第二模态,

表现为夏威夷和阿拉斯加地区的 SLP 异常随时间反位相变化,被证明是 NPGO 的重要大气强迫 (Furtado et al., 2012)。是否是 NPO 在 1990 年之后的增强导致了北太平洋海温 NPGO 的加强?为此,我们分别对 1990 年前后两个阶段五年低通滤波的北太平洋冬季 SLP 距平场进行了 EOF 分析,并比较了 EOF 第一模态之间的差异(图 9)。如图所示,在 1990 年之前,SLP 的最大荷载中心位于日界线以东和 40°N 附近,为气压负异常,并且在副热带西太平洋为气压正异常,这种气压异常的分布就导致在整个北太平洋西北部为西北风异常。1990 年之

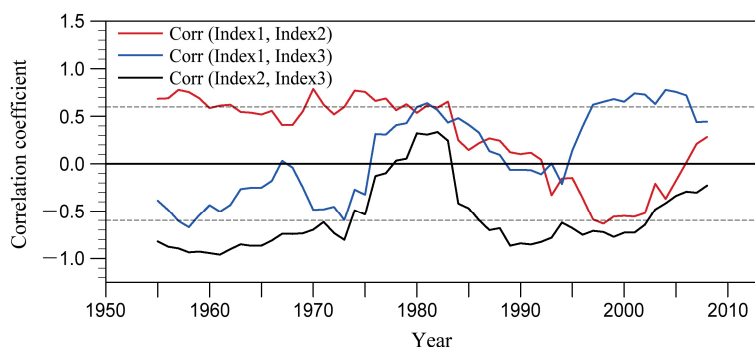


图 8 1950~2013 年 Index1、Index2、Index3 的 10 年滑动相关系数分布。其中,红色实线表示 Index1 与 Index2 之间 10 年滑动相关系数;蓝色实线表示 Index1 与 Index3 之间 10 年滑动相关系数;黑色实线表示 Index2 与 Index3 之间 10 年滑动相关系数;黑色虚线表示 95%信度 t 检验阈值

Fig. 8 The 10-year running correlation coefficients of Index1, Index2, and Index3 during 1950–2013. The red, blue, and black lines indicate the correlation between Index1 and Index2, Index1 and Index3, and Index2 and Index3, respectively. The dashed black line indicates above 95% confidence level according to the t test

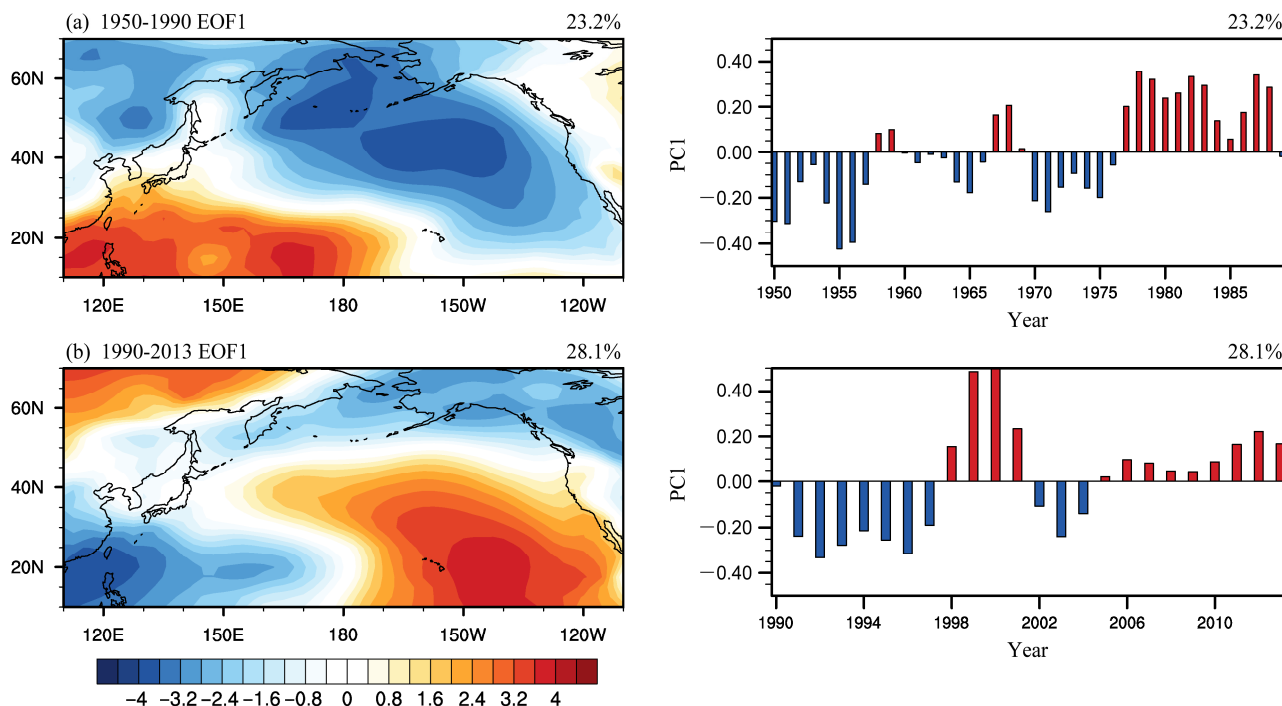


图 9 北太平洋冬季 SLP 5 年低通滤波 EOF 分析: (a) 1950~1990 年; (b) 1990~2013 年

Fig. 9 EOF1 and PC1 of winter 5-year low pass harmonic components of SLP in winter: (a) 1950–1990; (b) 1990–2013

后最大中心向西南移动,并在夏威夷群岛附近形成了变化中心,另一个中心位于阿拉斯加群岛以北地区,EOF 模态表现为明显的 NPO 特征。上述 SLP 异常导致了 45°N 附近气压梯度增强,进而加强了 45°N 纬向风异常幅度。

通过风生流机制,我们将 NPO 和 NPGO 大气和海洋两个模态有机地联系在一起,其中,北太平洋中纬度西风异常是驱动北太平洋西风漂流异常的关键环节(李春,2010)。对中纬度大尺度天气系统,纬向风场 u 与气压场 p 满足准地转关系(朱乾根等,2007):

$$u \approx u_g = -\frac{1}{f\rho} \frac{\partial p}{\partial y}, \quad (1)$$

式中, u_g 表示地转风, g 代表重力加速度, ρ 表示大气密度, f 表示地转参数。(1) 式表明地面西风异常正比于海表气压异常在 y 方向的经向梯度,所以 NPO 不仅反映了海表面气压异常的分布,其经向梯度还反映了地面西风异常。同样对于中纬度海洋大尺度系统,纬向海流 u_o 与压力场 p_o 也满足地转关系和静力平衡(冯士筭等,1999):

$$\begin{cases} u_o \approx u_{go} = -\frac{1}{f\rho_o} \frac{\partial p_o}{\partial y}, \\ \frac{\partial p_o}{\partial z} = -\rho_o g. \end{cases} \quad (2)$$

式中, ρ_o 代表海水密度, u_{go} 代表海洋中的地转流。考虑海水状态方程(冯士筭等,1999):

$$\rho_o = \rho_t [1 - \alpha(T - T_t) + \gamma(S - S_t)], \quad (3)$$

式中, T 为海水的温度, S 为海水的盐度,其中 ρ_t ,

T_t , S_t 为海水密度、温度、盐度的典型值,可取为常数, α , γ 为温度和盐度的函数与纬度的变化无关;将纬向流 u_o 对垂直方向 z 求导,将状态方程(3)带入方程(2)中的静力平衡方程可以得到

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_o}{\partial z} &\approx \frac{\partial u_{go}}{\partial z} = \frac{g}{f\rho} \frac{\partial \rho_o}{\partial y} \approx \frac{g}{f\rho_t} \frac{\partial \rho_o}{\partial y} \approx \\ &\frac{g}{f} \frac{\partial(-\alpha T + \gamma S)}{\partial y} = \frac{-\alpha g}{f} \frac{\partial T}{\partial y}. \end{aligned} \quad (4)$$

(4) 式的结果未考虑盐度的影响,这在海温(异常)经向梯度远大于盐度(异常)经向梯度时是合适的。由(4)式可知,海洋纬向流(异常)的垂直梯度正比于海温(异常)的经向梯度。对(4)式在垂直方向取差分近似后则有

$$\frac{u_{ob} - u_{os}}{\Delta z} \approx \frac{-g\alpha}{f} \frac{\partial T}{\partial y}, \quad (5)$$

其中, u_{ob} 为表层流, u_{os} 为深层流, Δz 表示水深,表层流要大于深层流,略去深层流后则有

$$u_{ob} = \frac{-g\alpha\Delta z}{f} \frac{\partial T}{\partial y} \propto -\frac{\partial T}{\partial y}, \quad (6)$$

上式表明海表纬向流(异常)正比于海温(异常)经向梯度。

当 NPO 模态处于正位相时,北部海平面气压负异常,南部为气压正异常。海平面气压的梯度大值区位于北太平洋 45°N,根据公式(1),此时低层的西风增强,从而导致西风漂流增强,即黑潮延伸流(KEO)和北太平洋流(NPC)增强。由(6)式可知,当西风漂流增强,必然造成 SST 的经向梯度的增大,这样就会增强 SST 的北负南正的模态,

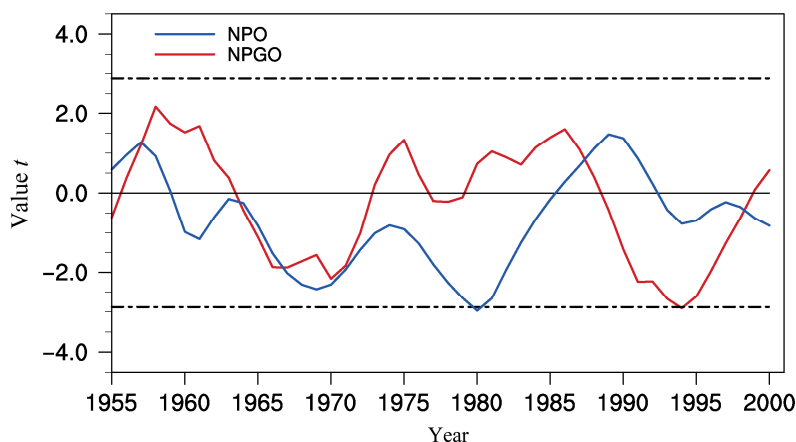


图 10 1950~2013 年冬季 NPGO 指数与 NPO 指数 10 年滑动 t 检验。红色和蓝色实线分别表示的是 NPGO 和 NPO 指数滑动 t 检验值的 t 值,黑色虚线表示超过 95% 信度水平的 t 检验值

Fig. 10 The 10-year moving t test of NPGO Index and NPO Index during 1950–2013 in winter. The red and blue solid lines represent the value of the t test of NPGO and NPO, respectively. The dashed black line indicates above 95% confidence level according to the t test

从而 SST 场表现出 NPGO 正位相模态。我们对 NPO 指数（定义为 SLP 场 EOF 第二模态的主分量）进行了 10 年滑动 t 检验（图 10）。比较发现，NPO 在 1980 年开始出现增强趋势，其调整的时间与北太平洋关键区海温相关关系开始调整的时间吻合，并且在 1990 年前期显著增强。因此，NPO 的增强早于 NPGO，意味着它对 NPGO 的增强具有显著的影响。

Furtado et al. (2012) 认为太平洋中部变暖（Central Pacific Warming, CPW）主要影响 NPO

的南支（夏威夷气压异常），进而影响北太平洋海温异常的空间分布模态，而 Yeh et al. (2010) 认为，1990 年之后 AO 的增强对 NPGO 具有重要的影响。为此，我们采用 Niño4 区海温指数表示 CPW，并比较了 Niño4 区海温和 AO 指数与 NPGO 之间的关系。图 11 和 12 分别表示的是 1950~1990 和 1990~2013 年两个阶段 AO 和 Niño4 区海温指数对 SST、SLP 和 850 hPa 风场的超前和同期回归分析。如图所示，1990 年之前，北部 SLP 异常的中心主要位于阿留申群岛以南地区，这样就导致了当

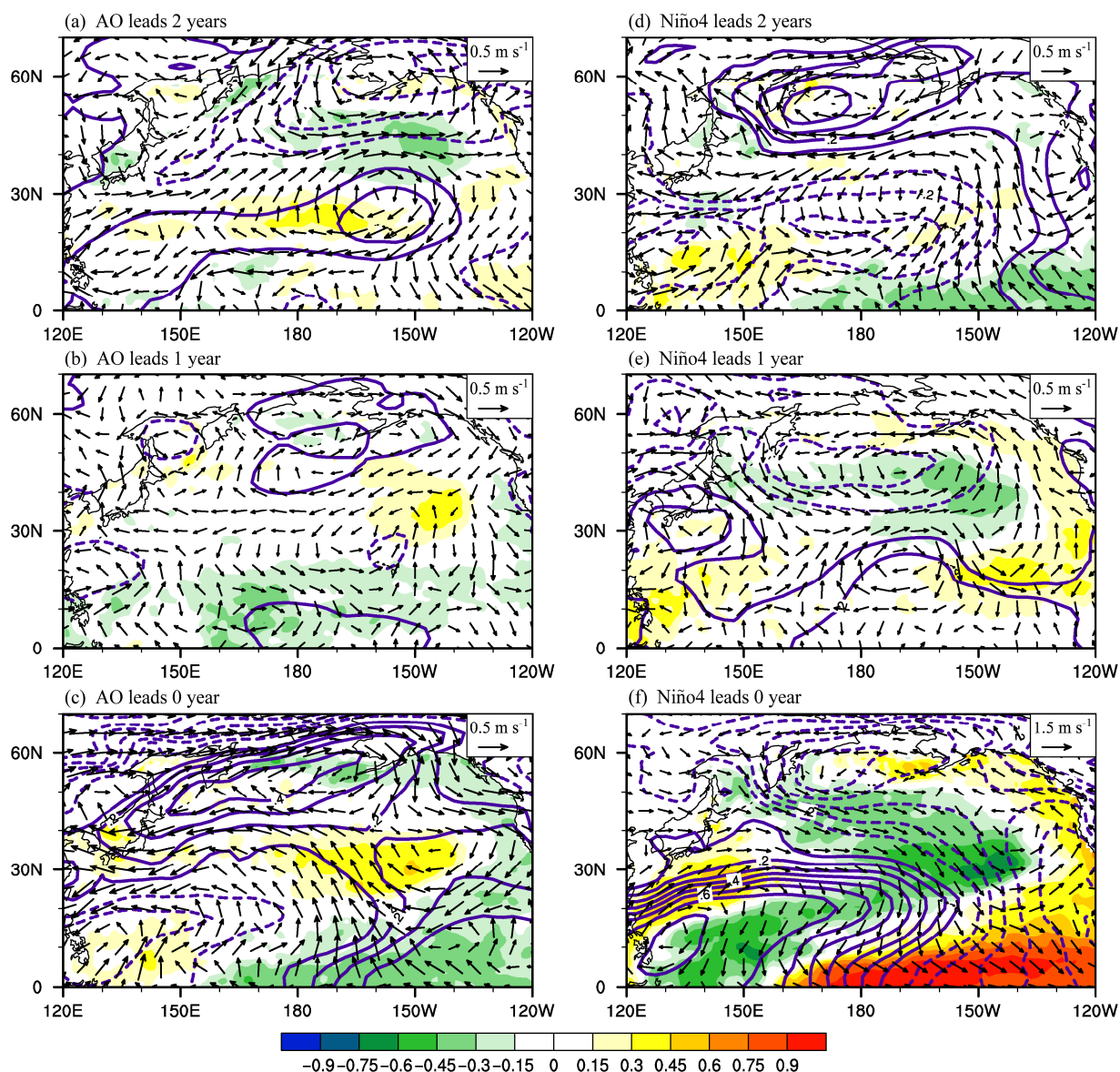


图 11 1950~1990 年 AO 和 Niño4 区海温指数对 SSTa (单位: K)、SLPA (单位: hPa) 和 850 hPa (单位: m s^{-1}) 风场异常回归的超前和同期分析。紫色等值线表示的是 SLP 回归系数 (单位: hPa; 虚线表示负值, 实线表示正值); 彩色阴影表示海温回归系数 (单位: K)

Fig. 11 The leading and simultaneous regression coefficients of SSTAs (units: K; shaded), SLPAs (units: hPa; purple contours, the dashed lines represent negative regression coefficients and the solid lines are positive regression coefficients) and the wind anomalies at 850 hPa (arrows; units: m s^{-1}) on AO (Arctic Oscillation) index and Niño4 SST index during 1950–1990 in winter

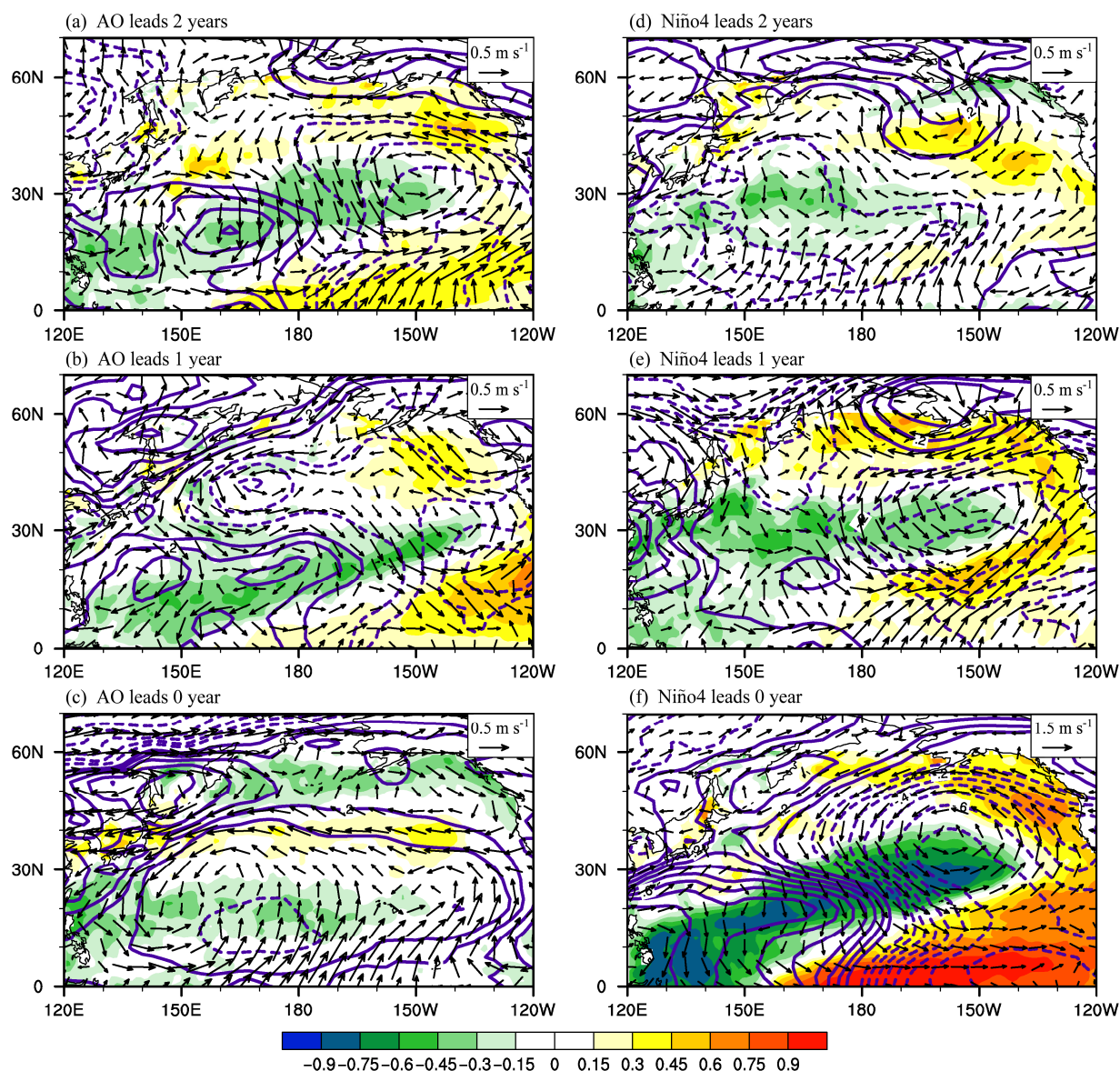


图 12 同图 11, 但为 1990~2013 年的结果

Fig. 12 Same as Fig. 11, but for the period of 1990–2013

Niño4 区海温超前一年时, 北太平洋西风异常的纬度主要位于 30°N 附近, 而同期的北太平洋地区几乎为西北风异常, 这样风场异常的分布就导致在北太平洋海温异常为椭圆形一致的 PDO 模式; 1990 年之后北支异常中心主要位于阿拉斯加半岛附近, 这样气压异常的分布型就导致在 $40^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{N}$ 为显著的风异常 (或东风异常)。受风异常的影响, 北太平洋海温北部和北太平洋中部呈反向分布, 从而有利于 NPGO 型空间分布模式。因此, 中部太平洋变暖与 NPGO 之间的相关并不稳定。除此之外, 我们分析了 1990~2013 年 AO 指数

回归的 SLP 场, 发现 SLP 的大值中心位于阿拉斯加半岛附近, 这正是影响 $40^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{N}$ 纬向风异常的北部气压关键区。当 AO 超前两年时, 气压异常位于阿拉斯加半岛附近以及夏威夷半岛, 导致中高纬度的纬向风异常。此时北太平洋东北部为海温的负异常, 而中部地区为海温的正异常, 海温经向梯度最大地区位于北太平洋 40°N 附近, 与 NPGO 模式高度相似。因此, NPGO 在 1990 年之后的加强的确与 CPW 和 AO 存在一定的关联。但是, 相对 NPO 而言, 它们与 NPGO 之间的物理关系在 1990 年之前并不显著。

5 结论与讨论

PDO 和 NPGO 代表的是北太平洋海温年代际尺度振荡的主要模态, 本文通过对 1950~2013 年冬季海温, 以及 1990 年前后两个阶段海温的 EOF 前两个模态的差异、关键区海温之间的关系变化对 EOF 前两个模态影响的研究, 揭示了 1950~1990 年和 1990~2013 年两个阶段冬季北太平洋 SST 场 EOF 前两个模态的差异, 并从关键区海温之间的关系变化、NPO、CPW 和 AO 的影响, 讨论了 1990 年前后 PDO 和 NPGO 模态的调整的可能成因。

本文分析发现, 1990 年前后两个阶段的 SST EOF 第一模态存在明显的差异, 前期表现为 PDO 结构, 后期则表现为 NPGO 模态, 表明北太平洋冬季海温主模态在 1990 年之后发生了调整。PDO 模态的 SST 负值区在 1990 年后由原来近似于西北—东南向的椭圆结构沿 30°N 纬向轴逆时针旋转, 演变成了东北—西南向椭圆结构, SST 的负值最大荷载中心向日界线倾斜, 40°N 以北的太平洋被 SST 的正异常控制, 表现出与 NPGO 模态的负位相 SST 异常场相似的结构特征。1990 年前后 SST 场对应的 EOF 第二模态由偶极子分布演变成了三极子结构。因此, 冬季北太平洋海温模态在 1990 年之后的调整不能简单认为是 PDO 和 NPGO 模态之间的顺序互换。

通过比较, 我们认为北太平洋中部 (28°~36°N, 152°~178°W) 和北太平洋北部 (44°~49°N, 151°~177°W) 海温之间的正负相关演变是北太平洋海温主模态在 1990 年前后发生调整的海温场内部原因, 而冬季北太平洋涛动 (NPO) 在 1990 年之后的显著增强是导致北太平洋海温主模态调整的重要外部原因。本文发现, NPO 振幅在 1980 年开始表现出增强趋势, 时间早于 NPGO 的变化, NPO 通过风生流机制增强北太平洋 40°N 附近的气压梯度和西风异常幅度, 从而导致了 NPGO 海温模态的加强。虽然中太平洋增暖 (CPW) 和北极涛动 (AO) 对 NPO 的南支 (夏威夷群岛) 和北支 (阿拉斯加) 的海平面气压异常中心加强有贡献, 但是上述两个因子与 NPGO 之间的关系在 1990 年之前并不明显。因此, CPW 和 AO 与 NPGO 之间的物理关系并不稳定。

参考文献 (References)

- Ashok K, Behera S K, Rao S A, et al. 2007. El Niño Modoki and its possible teleconnection [J]. *J. Geophys. Res.*, 112 (C11), doi:10.1029/2006JC003798.
- Bond N A, Overland J E, Spillane M, et al. 2003. Recent shifts in the state of the North Pacific [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 30 (23): 2183, doi:10.1029/2003GL018597.
- Chen Yang, Zhai Panmao. 2011. Interannual to decadal variability of the winter Aleutian low intensity during 1900–2004 [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 25 (6): 710–724.
- 陈红, 薛峰. 2013. 东亚夏季风和中国东部夏季降水年代际变化的模拟 [J]. *大气科学*, 37 (5): 1144–1153. Chen Hong, Xue Feng. 2013. Numerical simulation of decadal variations in the East Asian summer monsoon and summer rainfall in eastern China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 37 (5): 1144–1153.
- Cummins P F, Freeland H J. 2007. Variability of the North Pacific current and its bifurcation [J]. *Progress in Oceanography*, 75: 253–265.
- Di Lorenzo E, Schneider N, Cobb K M, et al. 2008. North Pacific Gyre Oscillation links ocean climate and ecosystem change [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 35 (8): L08607, doi:10.1029/2007GL032838.
- Di Lorenzo E, Cohn K M, Eurtado J C, et al. 2010a. Central Pacific El Niño and decadal climate change in the North Pacific Ocean [J]. *Nature Geoscience*, 3 (11): 762–765.
- Di Lorenzo E, Schneider N, Cobb K M, et al. 2010b. ENSO and the North Pacific Gyre Oscillation: An integrated view of Pacific decadal dynamics [R]. Atlanta GA: The 90th American Meteorological Society Annual Meeting.
- 冯士筭, 李凤岐, 李少菁. 1999. 海洋科学导论 [M]. 北京: 高等教育出版社, 154–155. Feng Shizuo, Li Fengqi, Li Shaojing. 1999. An Introduction to Marine Science (in Chinese) [M]. Beijing: Higher Education Press, 154–155.
- Furtado J C, Di Lorenzo E, Anderson B T, et al. 2012. Linkages between the North Pacific Oscillation and central tropical Pacific SSTs at low frequencies [J]. *Climate Dyn.*, 39 (12): 2833–2846.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77: 437–472.
- Kao H Y, Yu J Y. 2009. Contrasting eastern-Pacific and central-Pacific types of ENSO [J]. *J. Climate*, 22 (3): 615–632.
- 李春. 2010. 北太平洋风生环流变异及其对大气环流的反馈 [D]. 中国海洋大学博士论文, 23–28. Li Chun. 2010. Variation of wind-driven oceanic gyre in the North Pacific and its feedback to atmospheric circulation [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Ocean University of China, 23–28.
- 李崇银, 王力群, 顾薇. 2011. 冬季蒙古高压与北太平洋海温异常的年际尺度关系 [J]. *大气科学*, 35 (2): 193–200. Li Chongyin, Wang Liqun, Gu Wei. 2011. Interannual time-scale relationship between Mongolia high and SST anomaly in the North Pacific in winter [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 35 (2): 193–200.
- 李宏毅, 林朝晖, 陈红. 2010. 我国华南 3 月份降水年代际变化的特征 [J]. *气候环境与研究*, 15 (3): 311–321. Li Hongyi, Lin Chaohui, Chen Hong. 2010. Interdecadal variability of precipitation in March over South China [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 15 (3): 311–321.
- 吕俊梅, 琚建华, 张庆云, 等. 2005. 太平洋年代际振荡冷、暖背景下 ENSO 的循环特征 [J]. *气候与环境研究*, 10 (2): 238–249. Lü Junmei, Ju Jianhua, Zhang Qingyun, et al. 2005. The characteristics of ENSO

- cycle in different phases of Pacific decadal oscillation [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 10 (2): 238–249.
- 马柱国, 邵丽娟. 2006. 中国北方近百年干湿变化与太平洋年代际振荡的关系 [J]. *大气科学*, 30 (3): 464–474. Ma Zhuguo, Shao Lijuan. 2006. Relationship between dry/wet variation and the Pacific Decade Oscillation (PDO) in northern China during the last 100 years [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 30 (3): 464–474.
- Mantua N J, Hare S R, Zhang Y, et al. 1997. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 78: 1069–1079.
- Park Y H, Yoon J H, Youn Y H, et al. 2012. Recent warming in the western North Pacific in relation to rapid changes in the atmospheric circulation of the Siberian high and Aleutian low systems [J]. *J. Climate*, 25 (10): 3476–3493.
- Qian C, Zhou T J. 2014. Multidecadal variability of North China aridity and its relationship to PDO during 1900–2010 [J]. *J. Climate*, 27 (3): 1210–1222.
- Smith T M, Livezey R E, Shen S S. 1998. An improved method for analyzing sparse and irregularly distributed SST data on a regular grid: The tropical Pacific Ocean [J]. *J. Climate*, 11 (7): 1717–1729.
- Smith T M, Reynolds R W, Peterson T C, et al. 2008. Improvements to NOAA's historical merged land–ocean surface temperature analysis (1880–2006) [J]. *J. Climate*, 21: 2283–2296.
- Walker G T, Bliss E W. 1932. *World weather V* [J]. *Memories of the Royal Meteorological Society*, 4 (36): 53–84.
- 王会军, 范可. 2013. 东亚季风近几十年来的主要变化特征 [J]. *大气科学*, 37 (2): 313–318. Wang Huijun, Fan Ke. 2013. Recent changes in the East Asian monsoon [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 37 (2): 313–318.
- 杨修群, 朱益民, 谢倩, 等. 2004. 太平洋年代际振荡的研究进展 [J]. *大气科学*, 28 (6): 979–992. Yang Xiuqun, Zhu Yimin, Xie Qian. 2004. Advances in studies of pacific decadal oscillation [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 28 (6): 979–992.
- Yeh S W, Kang Y J, Noh Y, et al. 2010. The North Pacific climate transitions of the winters of 1976/77 and 1988/89 [J]. *J. Climate*, 24 (4): 1170–1183.
- Zhou W, Li C Y, Wang X. 2007. Possible connection between Pacific Oceanic interdecadal pathway and East Asian winter monsoon [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34 (1): L01701, doi:10.1029/2006GL027809.
- 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. 2007. *天气学原理与方法* [M]. 北京: 气象出版社, 37–38. Zhu Qiangen, Lin Jinrui, Shou Shaowen, et al. 2007. *The Principles and Methods of Synoptic Meteorology* (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 37–38.