

吕庆平, 路凯程, 张铭. 2013. 北太平洋冬季上层海温异常的 NPGO 模态 [J]. 气候与环境研究, 18 (2): 210–220 doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.11156.
Lü Qingping, Lu Kaicheng, Zhang Ming. 2013. NPGO mode of the upper sea temperature anomalies in the North Pacific during winter [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 18 (2): 210–220.

北太平洋冬季上层海温异常的 NPGO 模态

吕庆平¹ 路凯程^{1,2} 张铭¹

¹ 解放军理工大学气象海洋学院, 南京 211101

² 解放军 39506 部队 82 分队, 北京 100076

摘 要 利用较高分辨率的全球海洋同化分析系统 (SODA) 资料, 对冬季北太平洋上层的海温异常做了整层经验正交函数 (EOF) 分析, 并主要讨论了第二模态的结果。该模态空间结构与经典的北太平洋涡旋振荡 (NPGO) 一致, 且时间系数与 NPGO 指数也吻合, 故北太平洋上层海温异常 EOF 第二模态可称为 NPGO 模态。这说明 NPGO 现象不单纯反映在海表面温度异常上, 在上层海温中该现象也存在。在该模态空间场上, 水深 100 m 以上 25°N~30°N 的副热带处, 沿纬圈从 120°E 向东延伸至中东太平洋均为海温正异常带, 其北面则为负异常带, 两者构成双带系统; 其中在 170°W 附近分别有正、负异常大值区, 中心构成南北偶极子; 在本州岛以东海域, 从海表直到海洋上层底则有小范围的海温强异常。该模态空间结构的形成与大气 NPO 模态关系密切, 并与中纬度西风大值带上的风应力异常有关, 是造成 NPGO 的直接原因。该模态表现出明显的准 13 年年代际变化, 且对其进行 5 年滑动平均后发现, 从 20 世纪 70 年代中期以来, 该序列的振幅越来越大, 1976/1977 年和 1988/1989 年的两次气候年代际突变均处该序列峰值处。引入了冬季北太平洋上层海温异常的 NPGO 指数, 其能更好反映海洋上层的 NPGO 现象及其年代际变化。

关键词 北太平洋上层海温异常 NPGO 模态 EOF 分析

文章编号 1006-9585 (2013) 02-0210-11

中图分类号 P732

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.11156

NPGO Mode of the Upper Sea Temperature Anomalies in the North Pacific during Winter

LÜ Qingping¹, LU Kaicheng^{1,2}, and ZHANG Ming¹

¹ Institute of Meteorological and Oceanography, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101

² Unit 39506, 82, PLA, Beijing 100076

Abstract In this paper, the empirical orthogonal function (EOF) method is used to analyze the upper sea temperature anomalies in the North Pacific during winter with higher resolution Simple Ocean Data Assimilation (SODA) data. The spatial pattern of the second EOF mode is similar to the classical North Pacific Gyre Oscillation (NPGO) mode, as is the time series. Therefore, the second EOF mode is hereafter referred to as the NPGO mode. Results indicate that the NPGO exists not only at the sea surface, but also at the entire upper ocean. The spatial structure of the NPGO mode is characterized by a dipole-like structure in the meridional direction with maximum anomalous centers located near 170°W above a depth of 100 m. The anomalously warm band between 25°N and 30°N extends from 120°E to the Mideast Pacific, while the northern area is anomalously cool. In addition, obvious temperature anomalies exist from the sea surface to the upper sea level at the eastern area of Honshu Island. The formation of this spatial feature has a close relationship with the North Pacific Oscillation (NPO) mode and the wind stress anomalies in the mid-latitude westerly zone, which is the direct reason for the NPGO modes. The time series of the NPGO mode shows obvious decadal variation of approximately

收稿日期 2011-10-10 收到, 2012-08-01 收到修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展计划 2007CB411805

作者简介 吕庆平, 女, 1986 年生, 博士研究生, 主要从事海气相互作用的研究。E-mail: qingping860405@sina.com

13 years. The five-year moving average of the time series shows that its amplitude has become larger since the middle 1970s, and the climate transition of 1976/1977 and 1988/1989 show peak values of this series. Finally, the NPGO index of the sea temperature anomalies in the upper North Pacific during winter is defined, which can reflect the decadal variation of NPGO mode more accurately.

Keywords North Pacific upper sea temperature anomalies, NPGO mode, EOF analysis

1 引言

浩瀚的太平洋位于我国东面, 为全球最大大洋, 其海洋异常对气候变化有很大影响。赤道太平洋的 ENSO 事件是气候变化的强信号, 早已引起人们的关注, 并有丰硕的研究成果(巢纪平, 1993)。进入新世纪后, 太平洋年代际振荡(PDO)(Mantua et al., 1997)引起了高度重视, 其不仅是年代际时间尺度上的气候变化强信号(杨修群等, 2004; 朱益民等, 2008), 又是叠加在长期气候趋势变化上的扰动, 可直接造成太平洋及其周边地区气候的年代际变化(刘秦玉等, 2010)。分析还表明, PDO 对年际变率有明显的调制作用, 对应不同的年代际背景, 年际 ENSO 空间结构(Tanimoto et al., 1992)、El Niño 发生频率与强度(Trenberth and Hoar, 1996)以及 El Niño 的发生特点(Zhou et al., 2002)均表现有显著的差异。然而 PDO 并不能解释东北太平洋中盐度、营养物质以及鱼储量等的年代际变化。因此, Di Lorenzo et al. (2008)定义了一个新的气候模态——北太平洋涡旋振荡(NPGO)。

NPGO 是东北太平洋海表面高度异常(SSHA)经验正交函数(EOF)分解的第二模态, 空间结构在北太平洋中部呈南北偶极子分布。由于海表温度异常(SSTA)和 SSHA 的变化趋势相关较高(Cummins et al., 2005), 所以 NPGO 亦可反映 SSTA 的年代际变化。自 1993 年以来, NPGO 的强度正在逐渐加强(Cummins and Freeland, 2007), NPGO 的加强可能是因人类活动和全球变暖引起的, 这个假设得到了 GFDL2.0 气候耦合模式初步分析结果的支持(Di Lorenzo et al., 2008)。

阿留申低压(AL)(Trenberth and Hurrell, 1995)通常被认为是 PDO 模态的大气强迫场(Chhak et al., 2009)。Ceballos et al. (2009)的研究则发现, 与海洋 NPGO 相对应, 大气环流表现为北太平洋涛动(NPO)(Walker and Bliss, 1932), 在北太平洋中部驱动 NPGO 信号。PDO 和 NPGO 及其对应的特定大气异常强迫场, 不仅可从长时间序列的观测

资料中得到(Qiu and Chen, 2010), 而且可在海洋模式的回报试验得到证实(Chhak et al., 2009), 这一结果还得到了 IPCC AR4 海气耦合模式的验证(Furtado et al., 2011)。

以上研究表明, NPGO 模态是近年来发现的重要的太平洋海表温度异常的年代际变化。然而, NPGO 是否仅表现在海洋表层温度异常上, 是否也存在于海洋上层? 该海温异常的空间结构特点如何? 时间尺度又如何? 此外, 造成 NPGO 的原因是什么? 这些问题均未有明确的答案和取得一致的共识。

我们曾利用较高分辨率的简单海洋同化分析系统(SODA)资料对整个赤道外北太平洋冬季上层海温异常(最深至 229.48 m)做了整层 EOF 分析, 并对第一模态做了分析和讨论(路凯程等, 2011a)。本文对 EOF 第二模态的结果进行分析, 并试图回答上面有关 NPGO 的问题。为书写方便, 以下将 Di Lorenzo et al. (2008)定义的 NPGO 模态称之为经典 NPGO。

2 资料和方法

研究使用的月平均海温资料由美国 Maryland 大学全球简单海洋同化分析系统(SODA)提供(Carton and Giese, 2008), 时间范围为 1958 年 1 月至 2007 年 12 月, 共 600 个月, 水平分辨率为 0.5° (纬度) $\times 0.5^\circ$ (经度), 最深至海表面下 229.48 m, 共分为 15 层, 各层深度分别为 5.01、15.07、25.28、35.76、46.61、57.98、70.02、82.92、96.92、112.32、129.49、148.96、171.4、197.79、229.48 m。月平均海表气压(SLP)和纬向风场(UWIND)资料来自于 NCEP/NCAR (Kalnay et al., 1996), 时间范围为 1948 年 1 月至 2009 年 12 月, 共计 744 个月, 资料空间分辨率为 2.5° (纬度) $\times 2.5^\circ$ (经度)。

采用的方法为 EOF 分析、小波分析及变差度分析。研究范围则是赤道外北太平洋海域($20^\circ\text{N} \sim 60^\circ\text{N}$, $120^\circ\text{E} \sim 100^\circ\text{W}$)。因一般以 2 月份作为冬季海洋的代表, 本文的冬季海温异常也就以 2 月份的海温异常来表示。将研究海域 2 月份整层(15 层)

的海温异常作为北太平洋冬季上层海温异常的代表,并作为一个整体进行 EOF 分析。于是,得到的海温异常 EOF 各模态中,各层有相同的时间系数,这样就可将同一模态中各层的海温异常有机地关联起来。在此得到的 EOF 第二模态方差贡献为 6.5%,并通过了 North 检验 (North et al., 1982)。因篇幅关系,本文仅给出深度为 25.28 m、112.32 m 和 229.48 m 3 层的结果,其可分别代表近表层、次表层和海洋上层的底部 (以下简称上层底)。

本文所用的变差度是根据曾庆存等 (2005) 的思想,并略有改进。定义序列 $\{a_j\}$ 的变差度为:

$$D_j = \text{sign}(a_{j+1/2} - a_{j-1/2}) \frac{|a_{j+1/2} - a_{j-1/2}|^2}{|a_{j+1/2}|^2 + |a_{j-1/2}|^2} = \text{sign}(a_{j+1} - a_{j-1}) \frac{|a_{j+1} - a_{j-1}|^2}{|a_{j+1} + a_j|^2 + |a_j + a_{j-1}|^2}. \quad (1)$$

以上定义的变差度与曾庆存等 (2005) 的略有不同。因本文所用到的序列 $\{a_j\}$ 其值有正负,故在此乘了符号函数 sign。sign 函数的值则由 $a_{j+1} - a_{j-1}$ 的符号决定,当 $a_{j+1} > a_{j-1}$ ($a_{j+1} < a_{j-1}$) 时,其值取 1 (-1)。因本文需要反映序列 $\{a_j\}$ 的值对变差度 D_j 的影响,故对序列 $\{a_j\}$ 做了线性内插,即有

$$a_{j+1/2} = (a_{j+1} + a_j)/2, \quad a_{j-1/2} = (a_j + a_{j-1})/2. \quad (2)$$

由以上变差度的定义可知,其可定量度量序列 $\{a_j\}$ 随时间变化的速率 (这里的时间用下标 j 表示)。易证明有

$$\frac{|a_{j+1/2} - a_{j-1/2}|^2}{|a_{j+1/2}|^2 + |a_{j-1/2}|^2} \leq 2. \quad (3)$$

这样有 $-2 \leq D_j \leq 2$ 。若 $D_j = 0$, 则 $a_{i+1} = a_{i-1}$; 若 $D_j \neq 0$, 则表明其在 $j-1$ 和 $j+1$ 时段 a_j 的值有变化。 $|D_j|$ 越大,这种变化就越快。在本文中 j 表示年份,而 $j-1$ 和 $j+1$ 的时段则为 2 年。曾庆存等 (2005) 将变差度 (其用 d^2 表示) 分成 4 档: 极强 ($d^2 > 0.8$)、强 ($0.8 \geq d^2 > 0.6$)、稍强 ($0.6 \geq d^2 > 0.4$)、不强 ($d^2 \leq 0.4$)。本文也可依此定义,不过,这里定义变差度强度时则采用 $|D_j|$ 。

3 第二模态的特征

3.1 空间场

图 1 给出了冬季北太平洋上层海温异常 EOF

第二模态空间场的分布。近表层 (参见图 1a) 在 $25^\circ\text{N} \sim 30^\circ\text{N}$ 的副热带上,从 120°E 向东一直延伸至 150°W 均为正值带,其中在 160°W 至 180°W 有正的大值区。在中纬度 $40^\circ\text{N} \sim 50^\circ\text{N}$,即在上述正值带以北,从北太平洋西岸一直向东延伸至 140°W 则为负值带,其后向南弯曲,占有 140°W 以东的东太平洋,其中在 160°W 至 180°W 则有负的大值区。以上正、负值带构成一个沿纬圈的两条符号相反的平行带系统,以下简称双带系统,其上正、负大值区的中心则呈南北偶极子分布 (这与经典 NPGO 空间分布相似)。此外,在日本本州岛东面海域则有小范围强海温异常,表现为很强的正异常中心和较强的负异常中心,两者大致呈南北分布。次表层 (参见图 1b) 与近表层相比,两者分布相似,不过该双带系统和南北偶极子上的海温异常值要减低一半左右;其中,本州岛东面海域小范围强海温异常仍存在,分布也相似。上层底 (参见图 1c) 的情况有所变化,以上的双带系统仅残留一点痕迹,南北偶极子也几乎不见;但日本本州岛东面海域小范围强海温异常仍维持,并相对更加突出。

纵观该模态的空间分布可见,在次表层及以上的中纬度北太平洋中部海温异常的双带系统和带上的偶极子,以及从日本本州岛以东的小范围强海温异常,是海温异常表现明显的两个区域,这也是该模态的特点所在;尽管后者范围要较前者小得多,但其温度异常却不小,特别是在正异常中心处。

3.2 时间系数

从第二模态时间系数的演变可见 (图 2),其具有年际变化和明显的年代际变化。为进一步揭示时间系数的变化规律,作了小波分析。图 3 中的实线给出了小波全谱。可见,冬季北太平洋上层海温异常第二模态的年际变化不明显,但有十分明显的准 13 年年代际变化,及不太明显的准 22 年年代际变化。

4 讨论

4.1 空间场

前面已提到,北太平洋海温异常的双带系统及其上的南北偶极子,以及日本本州岛以东的小范围强海温异常,这两者正是上层海温异常 EOF 第二模态空间场分布的特点所在。以下对此进行讨论。

从我们的理论工作可知,风应力异常导致的海

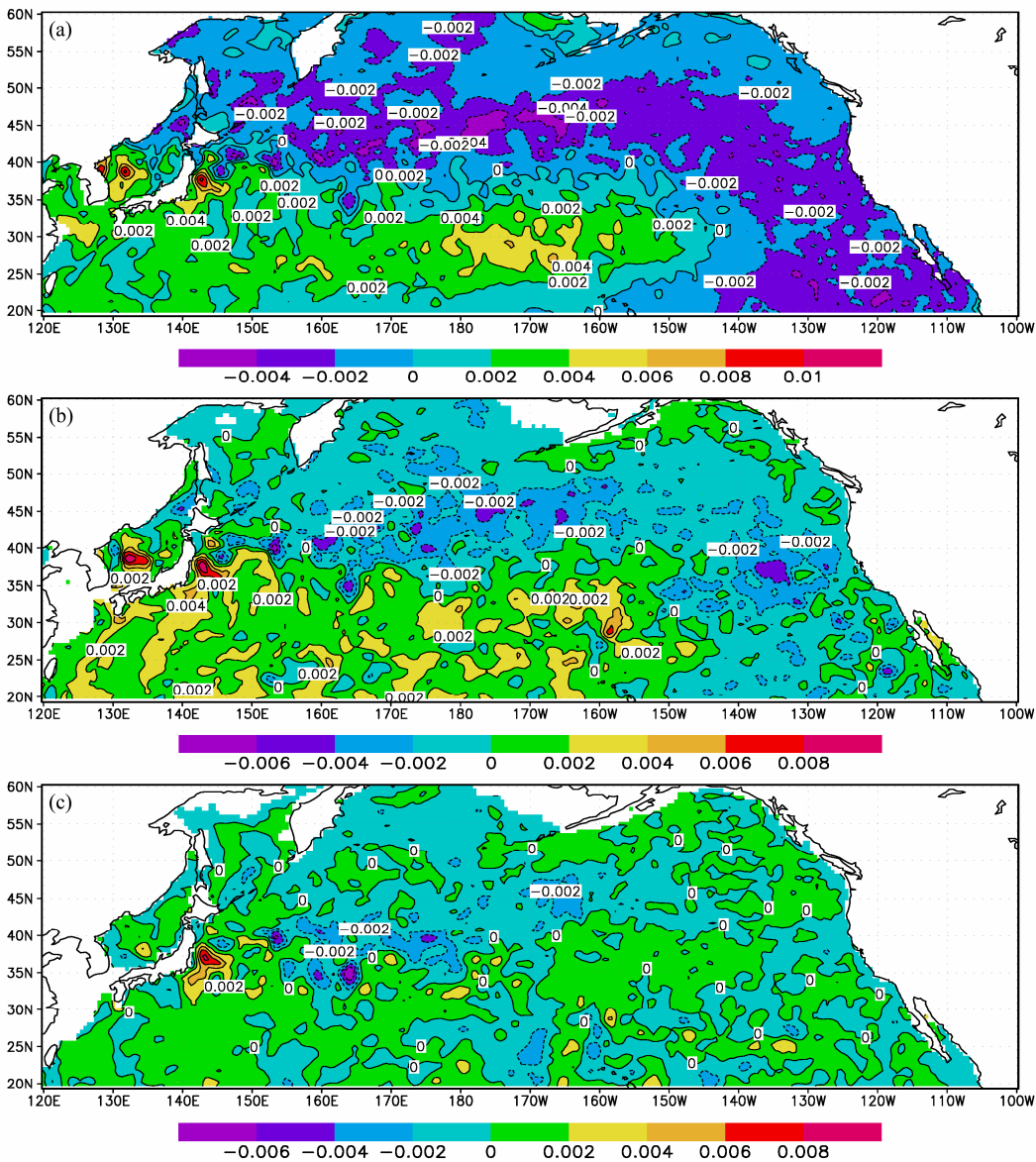


图1 冬季北太平洋上层海温第二模态的空间场: (a) 25.28 m; (b) 112.32 m; (c) 229.48 m
Fig. 1 The second EOF mode of sea temperature for the levels of (a) 25.28 m, (b) 112.32 m, and (c) 229.48 m in the North Pacific during winter

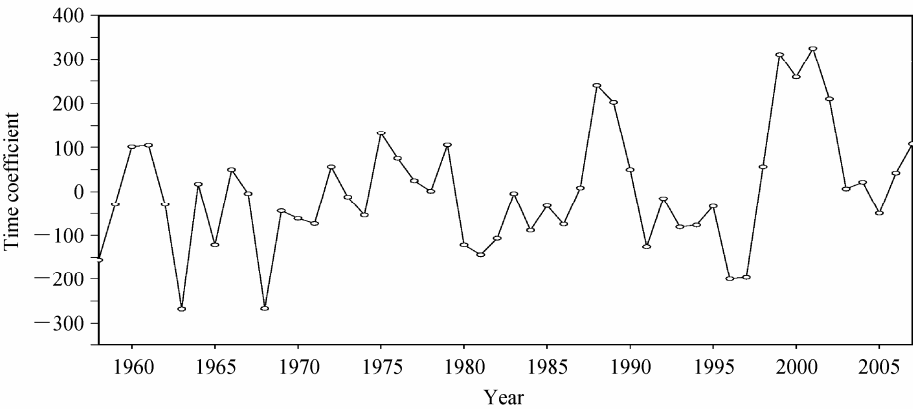


图2 北太平洋上层海温第二模态的时间系数
Fig. 2 Time series of the second EOF mode (PC2) of sea temperature in the upper North Pacific

流异常在海洋西边界表现突出,且表现为涡旋偶形式(张永垂等, 2011; 吕庆平等, 2013)。该涡旋偶会造成海水明显的垂直运动。对北太平洋上层海洋流场的 EOF 分析中也发现,其第一、二模态最明显的流场异常均表现在日本本州岛以东,也即北太平洋西海岸以东海域,且从海面一直到上层底,流形不变,呈现正压形式(路凯程等, 2011b)。由以上第二模态海温异常分布的情况看,在日本本州岛以东小范围的海温强异常,一直到上层底均表现明显,这应由流场异常引起,为海温的动力异常。因该流场异常处于大洋西海岸附近,其应与中纬度的西风异常有关(路凯程等, 2011b; 张永垂等, 2011; 吕庆平等, 2013)。

下面讨论双带系统与日本本州岛以东的小范围海温异常的关系。因前者体现了此处海温南北水平梯度的异常,且海洋大尺度运动必须满足地转平衡和静力平衡,故其也反映了纬向海流的异常。从双带系统海温异常所在的位置看,该海流即为北太平洋流(NPC)。再注意到本州岛东面海域小范围强海温异常正位于北太平洋西岸该双带系统的两带交界附近(参见图 1a、1b),而该处正是黑潮续流,即 NPC 的起始处。若时间系数为正,从空间场上看,此时双带系统该处的海温南北水平梯度为负异常($\partial T / \partial y < 0$),故应有 NPC 的正异常(因在一定条件下近似有 $u_s \propto -\partial T / \partial y > 0$,在此 u_s 为纬向流),这样就造成本州岛以东的离岸流,并在本州岛以东该离岸流北边与南边会出现一对由气旋涡与反气旋涡组成的涡旋偶(路凯程等, 2011b; 张永垂等, 2011; 吕庆平等, 2013),从而造成上层海洋该涡旋偶中反气旋涡旋处有下沉流,而气旋涡旋处有上升流;由海温动力异常机制知,这样在该涡旋偶处就会出现北冷南暖的强温度异常配置。因

本州岛的东海岸并非正南北方向,故该温度正异常的范围和强度均要较负异常的更明显(吕庆平和张铭, 2013),本文 EOF 分析的情况正是如此(参见图 1)。由此可知,双带系统与本州岛以东小范围海域两者的海温异常密切不可分,同属一个整体,而 NPC 的异常则是两者的中介。因上层洋流为风生流,故 NPC 的异常应与其上空中纬度西风大值带上的风应力异常关系密切,对此还将在下文中进一步讨论。

4.2 时间系数

为突出上层海温异常第二模态的年代际变化,现对其时间系数序列 $\{s_j\}$ 做 5 年滑动平均,用来滤去年际变化中的高频部分,特别是滤去具有 3~7 年年际变化的 ENSO 的影响。滑动平均后的时间序列设为 $\{\tilde{s}_j\}$,见图 4。图上高频年际变化已被滤去,年代际变化得到凸显;在 20 世纪 70 年代中期以后,其振幅变得越来越大。由该图还可见,北太平洋发生在 1976/1977 年和 1988/1989 年的两次气候年代际突变,均位于该图折线的峰值附近,这表明其与该模态的年代际变化有着密切的关系。

为进一步揭示该模态年代际变化的尺度,对时间序列 $\{\tilde{s}_j\}$ 也做了小波分析。分析结果表明(参见图 3),年际变化已基本消除,约 13 年的年代际变化幅度明显加大。由平滑后的时间系数演变看,自 1993 年以来,其振幅在加大,这与 Cummins and Freeland (2007) 指出的北太平洋海表温度 EOF 第二模态(其反映经典 NPGO 模态的强度变化)正在逐渐加强完全一致,事实上,这种加强在 1976 年后就已开始(图 4)。

以下为叙述方便,将时间序列 $\{\tilde{s}_j\}$ 中 $\tilde{s}_j < 0$ ($\tilde{s}_j \geq 0$) 的时段称为冷(暖)位相,此时, NPGO 模态中海温异常的空间分布与图 1 相反(相同)。

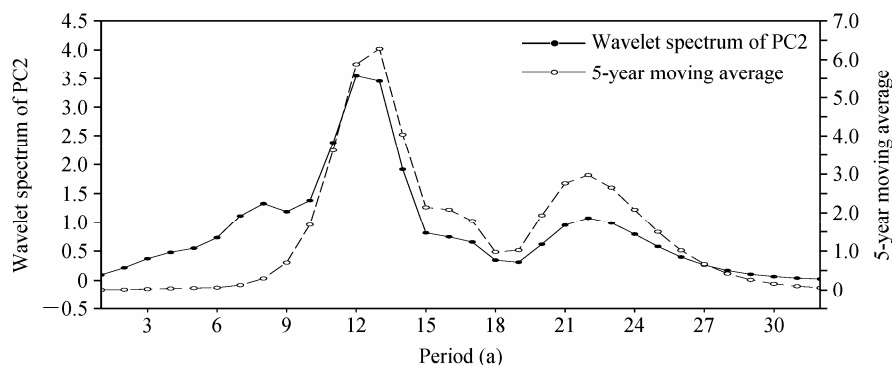


图 3 北太平洋海温场第二模态时间系数的小波全谱和 5 年滑动平均后的小波全谱

Fig. 3 Wavelet spectrum of PC2 and wavelet spectrum of PC2 with 5-year moving average of sea temperature in the upper North Pacific

在 1960~2005 年期间, 共有 3 个冷(暖)位相期, 每个冷(暖)位相期的时间尺度约为 13 年; 而在 1972/1973 年、1978/1979 年、1985/1986 年、1991/1992 年和 1997/1998 年这 5 年前后, 冷、暖位相发生了交替, 这意味着上层海温异常发生了反转。在同一冷(暖)位相期间, 该异常位相虽保持不变, 但异常程度则有变化。

为客观定量反映这种变化, 对 5 年滑动平均后的时间系数序列 $\tilde{s}_j$ 进行变差度分析。当 $D_j > 0$ ($D_j < 0$) 时, 这表明暖(冷)位相加强和冷(暖)位相减弱。因而, 考察 D_j 随时间的变化可以确定冷、暖位相变化的趋势和速率, 即上层海温异常是增强还是减弱, 以及其变化的快慢程度。

图 5 给出了按上述方法用 $\{\tilde{s}_j\}$ 算得的 D_j 变化折线。可见, 在 1973、1986 和 1997 年(1978 和 1991 年)有非常明显的尖峰(谷)出现。按以上定义, 这些年的变差度均属极强该档, 其 $|D_j|$ 均大于 1.0, 其中有 4 年大于 1.5。这表明在这些年附近, 该模态海温异常的变化非常剧烈, 也可认为其有突变。其他年份则仅有 2 年属强档次, 1 年属稍强档次, 其余 36 年均属不强档次。这表明在绝大多数年份, 该

海温异常的变化均不强。由此看来, 引入变差度的确可以客观定量刻画上层海温异常变化的趋势和速率。

由图 5 还可见, 北太平洋模态发生在 1976/1977 年和 1988/1989 年的两次气候年代际突变(Yeh et al., 2011), 均出现在尖峰(谷)的 3(2)年后(前)、即该模态海温正(负)异常突变的 3(2)年后(前)。这表明气候年代际突变应与该模态的海温突变关系密切。注意到, 在 1997 年又出现了尖峰, 若按以上尖峰的规律推测, 则在 2000 年左右又会发生气候年代际突变, 但由于至 2004 年尖谷尚未出现以及受所用资料长度的限制, 该气候年代际突变是否发生目前尚难确定, 也有学者认为已有该突变出现(Kim et al., 2004)。不过在进入新世纪后, 气候、天气等极端事件出现频繁, 且灾害屡现确实是不争的事实。

由以上对空间场和时间系数的讨论知, 冬季北太平洋上层海温异常 EOF 第二模态的空间结构和时间系数均体现了经典 NPGO 的特点, 能很好反映经典 NPGO 现象; 而经典 NPGO 模态是东北太平洋 SSHA EOF 的第二模态。这样, 本文就把 NPGO

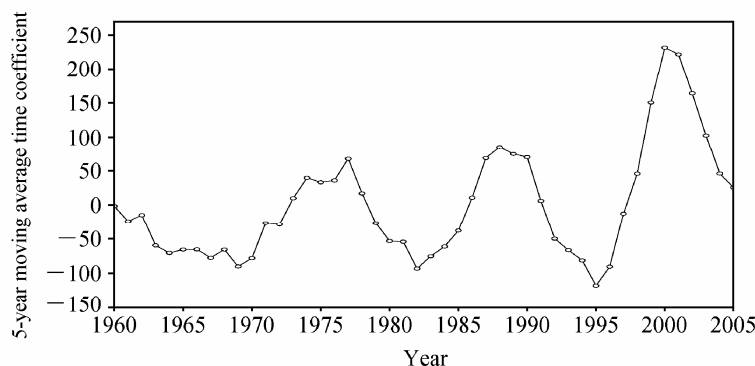


图 4 北太平洋上层海温第二模态时间系数的 5 年滑动平均

Fig. 4 5-year moving average of PC2 of sea temperature in the upper North Pacific

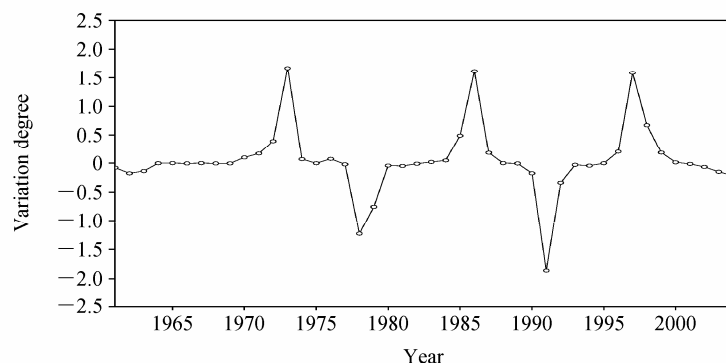


图 5 北太平洋上层海温第二模态时间系数 5 年滑动平均后的变差度

Fig. 5 Variation degree of 5-year moving average time series of PC2 of sea temperature in the upper North Pacific

现象由海洋表层扩展到海洋上层。该海洋上层 NPGO 的空间结构特点为：在近表层到次表层海温异常上呈现沿纬圈正、负大值带构成的双带系统，该带上大值中心则呈南北偶极子分布，在日本本州岛东面海域有小范围强海温异常；而在上层底，则仅存本州岛东面海域的强海温异常。海洋上层 NPGO 的年代际变化的时间尺度约为 13 年。

4.3 NPGO 模态中年际与年代际变化的关系

以下讨论上层海温异常 NPGO 模态中时间系数的年际变化。为此将原时间序列 $\{s_j\}$ 减去 5 年滑动平均后的序列 $\{\tilde{s}_j\}$ ，得到一个新序列 $\{\hat{s}_j\}$ ，其元素有 $\hat{s}_j = s_j - \tilde{s}_j$ 。显然，此序列反映了 NPGO 模态中的 5 年及其以下的年际变化（图 6）。可见，从 20 世纪 60 年代至 70 年代中期，年际变化的振幅在减小，而在 70 年代中期以后则逐步增大。在 20 世纪 70 年代中期前，年际变化尺度较短，约为 3 年，而 70 年代中期以后增大至 5 年左右。因热带 ENSO 的时间尺度为 3~7 年，故上述现象也许体现了 NPGO 模态与热带 ENSO 的相互作用（Di Lorenzo et al., 2010）。Zhou et al. (2002) 指出，北太平洋 SST 的变化，实际上是年代际变率和年际变率的叠加，而年际变率和热带大洋联系密切。不过，这种相互作用究竟是 ENSO 受 NPGO 的调制，抑或 NPGO 受 ENSO 的调制，在此尚难确定，有待深入研究。

4.4 造成 NPGO 的直接原因

以上已指出，因上层洋流为风生流，故 NPC 的异常应与其上空中纬度地面西风大值带上的风应力异常密切相关。引言中已介绍，大气中的 NPO 模态强迫驱动了海洋中的 NPGO 模态，而 NPO 模态主要特点就表现为中纬北太平洋中部的海表气

压异常以及相应的地面西风异常。为了揭示造成 NPGO 的直接原因，首先对冬季 SLP 异常 (SLPA) 进行 EOF 分解。其第二模态的方差贡献为 19.31%，通过了 North 检验 (North et al., 1982)。其空间结构 (图 7a) 的特点是，正负异常中心呈南北向的偶极子分布，南部中心位于 (28°N~40°N, 175°E~150°W)，北部中心位于 (55°N~62°N, 175°E~155°W)，即呈典型的 NPO 型分布。

为进一步揭示 SLPA 与冬季上层海温异常 EOF 第二模态的关系，将各年冬季的 SLPA 与该上层海温异常第二模态的时间系数求回归，回归系数分布如图 7b。由该图可见，回归系数场也表现为南北偶极子分布，且与图 7a 揭示的 NPO 模态的空间结构类似，只是南部负值中心略向东偏。以上结果表明，上层海温异常的第二模态 (NPGO) 的确对应于 NPO 异常强迫。

对中纬度大尺度天气系统，风场与气压场应满足准地转关系，这反映了地面西风异常正比于 SLPA 的经向梯度，故而北太平洋中纬度地区的上层海温异常第二模态应与地面纬向西风异常密切相关。

为进一步探讨地面西风异常，即地面纬向风异常 (UWNDA) 与上层海温异常第二模态 (NPGO) 之间的关系，现对研究区域内的冬季 UWNDA 进行 EOF 分析。图 8a、8b 分别为 UWNDA 第二模态的空间结构、冬季上层海温第二模态时间系数与 UWNDA 的回归系数场。由图 8a 可见，UWNDA 第二模态在北太平洋中部 (40°N~50°N) 存在一个椭圆形负值中心，而这与 SLPA EOF 分析时第二模态空间场 (图 7a) 中正负中心间的经向梯度大值区相对应。在 UWNDA 的回归系数场上 (图 8b) 可

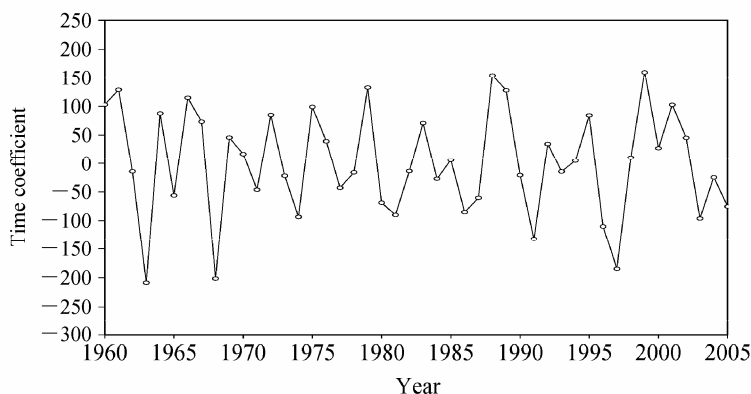


图 6 北太平洋上层海温第二模态时间系数的年际变化

Fig. 6 Interannual variability of time series of PC2 of sea temperature in the upper North Pacific

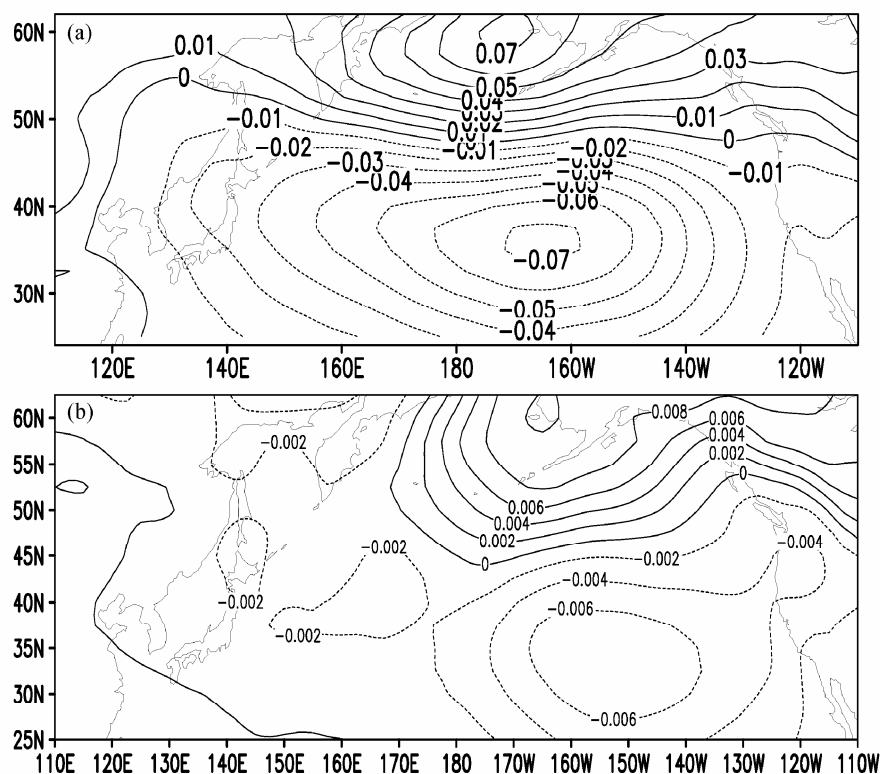


图 7 (a) 1958~2007 年冬季 SLPA EOF 分解第二模态的空间结构, (b) 同时段同海域冬季 SLPA 对上层海温第二模态时间系数的回归系数分布
Fig. 7 (a) The second EOF mode of sea level pressure anomaly (SLPA) in North Pacific for the period of 1958–2007 during winter; (b) regression map of the second EOF mode time series of upper sea temperature with SLPA for the same period

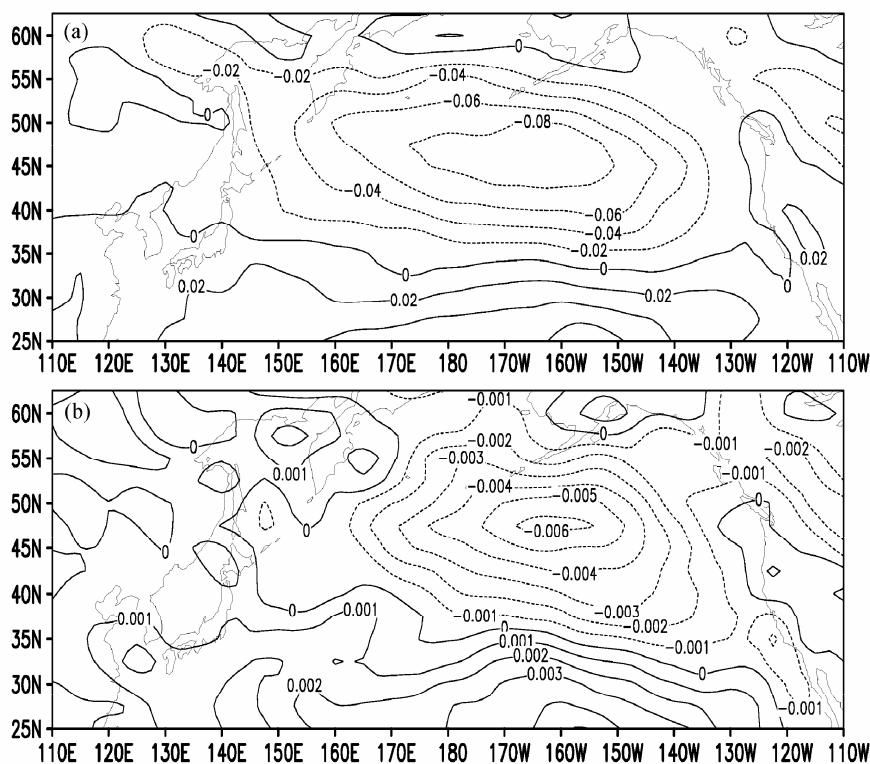


图 8 (a) 1958~2007 年冬季 UWNA EOF 分解第二模态的空间结构, (b) 同时段同海域冬季 UWNA 对上层海温第二模态时间系数的回归系数分布
Fig. 8 (a) The second EOF of zonal wind anomaly (UWNA) in North Pacific for the period of 1958–2007 during winter; (b) regression map of the second EOF mode time series of upper sea temperature with UWNA for the same period

见,其与 UWNDA 第二模态的空间场的分布结构类似,在(40°N~50°N)也有一个椭圆形负值中心,而该区域正是地面西风的大值区所在。

此外,对 SLPA 及 UWNDA 的 EOF 第二模态时间系数分别进行小波分析,结果显示,其均有准 13 年的年代际变化(图略)。

以上分析表明:NPO 模态对应着地面西风异常,并进一步因风生流机制造成了 NPC 的异常,从而使上层海温出现 NPGO 现象。这样就揭示出造成 NPGO 的直接原因,从而对引言中提出的最后一个问题给出了回答。

5 冬季上层海温异常 NPGO 指数

因 5 年平滑后上层海温 EOF 第二模态的时间系数可很好反映 NPGO 现象,且更加突出了年代际变化,故而可用其来定义冬季上层海温异常的 NPGO 指数。具体做法是,首先将平滑后该模态时间系数的序列 $\{\tilde{s}_j\}$ 归一化,然后将归一后的值均减去一个常数,使得这样处理后 NPGO 指数的 0 值仍对应于原序列的 0 值,以便反映该模态海温异常的冷暖位相;最后将减去该常数后所得的序列作为冬季上层海温异常 NPGO 指数 I_w ,即有

$$I_{wj} = \frac{\tilde{s}_j}{\tilde{s}_{\max} - \tilde{s}_{\min}}, \quad (4)$$

其中, $\tilde{s}_{\max} = \max\{\tilde{s}_j\}$, $\tilde{s}_{\min} = \min\{\tilde{s}_j\}$ 。请注意,在上式中,当 $\tilde{s}_j = 0$ 时有 $I_{wj} = 0$ 。

表 1 给出了在 1960~2005 年该指数的值。 I_w 随时间演变的图形则与图 4 同,仅纵坐标的标度不同(图略)。易证明,用该指数计算的变差度与图 5 完全相同。由此可见,以上关于序列 $\{\tilde{s}_j\}$ 及其变差度的讨论中得到的结论可原封不动地用于 I_w 及其变差度上,这里不再赘述。因此该指数能够反映 NPGO 模态年代际变化的特点。

这里将指数 I_w 与 Di Lorenzo et al. (2008) 定义的经典 NPGO 指数比较后可知,两者变化的大趋势相同(图略),相关系数可达 0.78。因所用资料和处理手段的不同(前者用海洋上层的整层海温,还做了 5 年滑动平均,而后者用 SSHA),两者有些差别也是自然的。将本文的 I_w 与经典 NPGO 指数相比后可见,两者均能反映 NPGO 现象;而前者可更好反映上层海温异常的 NPGO 模态,而后者则反映了 SSHA 的 NPGO 模态;且前者可更加突出的反

映 NPGO 的年代际变化。不过,由于得到前者时用了 5 年滑动平均,故前者不宜用于讨论像 NPGO 与 ENSO 之间关系等具有年际变化的问题。

表 1 1960~2005 年冬季海温异常的 NPGO 指数 I_w
Table 1 NPGO index I_w of the winter sea temperature anomalies during 1960–2005

年份	I_w	年份	I_w	年份	I_w
1960	-0.005	1976	0.103	1992	-0.142
1961	-0.069	1977	0.194	1993	-0.190
1962	-0.042	1978	0.049	1994	-0.232
1963	-0.170	1979	-0.077	1995	-0.336
1964	-0.201	1980	-0.152	1996	-0.258
1965	-0.187	1981	-0.155	1997	-0.036
1966	-0.186	1982	-0.266	1998	0.131
1967	-0.222	1983	-0.215	1999	0.431
1968	-0.187	1984	-0.175	2000	0.664
1969	-0.257	1985	-0.109	2001	0.636
1970	-0.223	1986	0.031	2002	0.470
1971	-0.077	1987	0.197	2003	0.294
1972	-0.082	1988	0.244	2004	0.132
1973	0.028	1989	0.214	2005	0.073
1974	0.113	1990	0.201		
1975	0.095	1991	0.017		

6 结语

本文利用较高分辨率的 SODA 资料,对赤道外北太平洋冬季上层海温异常做了整层 EOF 分析,并主要讨论了第二模态的结果,得到的主要结论如下:

(1) 在空间场上,表层和次表层在 25°N~30°N 的副热带处,从 120°E 向东一直延伸至中东太平洋均为纬向海温正异常带,在其北面有与之平行的海温负异常带;两带构成双带系统,在中太平洋两带上的大值中心构成南北偶极子,这与经典的 NPGO 相似;在本州岛以东海域从海表直到海洋上层底则有小范围的海温强异常。

(2) 空间模态中双带系统的海温异常与北太平洋流(NPC)的异常关系密切,本州岛以东小范围的强海温异常应属由 NPC 异常引起的海温动力异常;NPC 异常与其上空地面西风大值带上的风应力异常有关,并与大气 NPO 模态关系密切,而 NPC 异常则在 NPO 模态和 NPGO 模态中起着中介作用。

(3) 时间系数的年际变化不明显,但约 13 年的年代际变化非常明显;从 20 世纪 70 年代中期以来,其振幅越来越大,尤其在 1993 年后,这与经

典的 NPGO 模态相同; 1976/1977 年和 1988/1989 年的两次气候年代际突变均位于滑动平均后的时间系数峰值上。

(4) 该模态的空间场和时间系数特征均体现了经典 NPGO 模态的特点, 因此本文将 NPGO 的海温异常由海洋表层扩展到海洋上层, 并可称该模态为北太平洋冬季上层海温异常的 NPGO 模态; 同时, 定义了冬季北太平洋上层海温异常的 NPGO 指数 I_w , 其能更好表现 NPGO 的年代际变化。

(5) 为客观定量反映该 NPGO 模态的演变, 引入了变差度。发现绝大多数年份变差度不强, 但在 1973、1986、和 1997 年 (1978 和 1991 年) 变差度折线上则出现了十分明显的尖峰 (谷), 此时变差度均属极强, 海温异常有突变, 而气候年代际突变则与之密切相关。

本文将上层海温异常作为一个整体进行 EOF 分析, 这样得到的各层海温异常有相同的时间系数, 其可反映各层海温异常的共同特点, 这是本方法的优点。然而, 正因其时间系数相同, 故不能反映各层海温异常的超前、滞后问题, 这是本方法的局限所在。

最后还要指出, 本文的工作以诊断为主, 虽也做了一些动力分析, 揭示了造成 NPGO 的直接原因, 但对其根本原因及其机理则尚未深入研究。NPGO 是海气相互作用的产物, 而海气相互作用是一种非线性耦合, 解析研究难度极大。采用海气耦合模式开展数值研究这不失为较好的方法, 其能深入揭示该非线性耦合的物理原因和具体机理, 而这些也是我们今后要做的工作。

参考文献 (Reference)

- Carton J A, Giese B S. 2008. A reanalysis of ocean climate using simple ocean data assimilation (SODA) [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 136: 2999–3017.
- Ceballos L I, Di Lorenzo E, Hoyos C D, et al. 2009. North Pacific Gyre Oscillation synchronizes climate fluctuations in the eastern and western boundary systems [J]. *J. Climate*, 22 (19): 5163–5174.
- 巢纪平. 1993. 厄尔尼诺和南方涛动力学 [M]. 北京: 气象出版社, 309pp.
- Chao Jiping. 1993. Dynamics of El Niño and Southern Oscillation (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 309pp.
- Chhak K C, Di Lorenzo E, Schneider N, et al. 2009. Forcing of low-frequency ocean variability in the Northeast Pacific [J]. *J. Climate*, 22 (5): 1255–1276.
- Cummins P F, Freeland H J. 2007. Variability of the North Pacific current and its bifurcation [J]. *Progress in Oceanography*, 75 (2): 253–265.
- Cummins P F, Lagerloef G S E, Mitchum G. 2005. A regional index of northeast Pacific variability based on satellite altimeter data [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 32 (17), doi:10.1029/2005GL023642.
- 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), doi:10.1029/2007GL032838.
- Di Lorenzo E, Schneider N, Cobb K M, et al. 2010. ENSO and the North Pacific gyre oscillation: an integrated view of Pacific decadal dynamics [R]. Atlanta GA: The 90th American Meteorological Society Annual Meeting.
- Furtado J C, Di Lorenzo E, Schneider N, et al. 2011. North Pacific decadal variability and climate change in the IPCC AR4 models [J]. *J. Climate*, 24 (12): 3049–3067.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77: 437–470.
- Kim S B, Tong L, Fukumori I. 2004. The 1997–1999 abrupt change of the upper ocean temperature in the north central Pacific [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 31 (22), doi:10.1029/2004GL021142.
- 刘秦玉, 李春, 胡瑞金. 2010. 北太平洋的年代际振荡与全球变暖 [J]. *气候与环境研究*, 15 (2): 217–224.
- Liu Qinyu, Li Chun, Hu Ruijin. 2010. Interdecadal oscillations in the North Pacific and the global warming [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 15 (2): 217–224.
- 路凯程, 廖前锋, 张铭. 2011a. 赤道外北太平洋冬夏海温场的 EOF 分析 [J]. *海洋预报*, 28 (5): 50–60.
- Lu Kaicheng, Liao Qianfeng, Zhang Ming. 2011a. EOF analysis on sea temperature field in extratropical North Pacific [J]. *Marine Forecasts (in Chinese)*, 28 (5): 50–60.
- 路凯程, 卢炳, 张铭. 2011b. 赤道外北太平洋上层洋流异常分析 [J]. *海洋通报*, 30 (1): 29–36.
- Lu Kaicheng, Lu Xu, Zhang Ming. 2011b. Analysis for upper abnormal current in North Pacific without equatorial area [J]. *Marine Science Bulletin (in Chinese)*, 30 (1): 29–36.
- 吕庆平, 张铭. 2013. 倾斜西海岸线的正压海洋对中纬西风的响应 [J]. *解放军理工大学学报 (自然科学版)*. Lü Qingping, Zhang Ming. 2013. A study on the barotropic ocean model with tilting western coast forced by the mid-latitude western wind [J]. *Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition) (in Chinese) (in press)*.
- 吕庆平, 张维锋, 张铭. 2013. 两层海洋对风场异常响应的解析解及其讨论 [J]. *气候与环境研究*, 18 (1): 124–134.
- Lü Qingping, Zhang Weifeng, Zhang Ming. 2013. Study of two-layer ocean model forced by climate wind anomalies [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 18 (1): 124–134.
- 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.
- North G R, Bell T L, Cahalan R F, et al. 1982. Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal function [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 110: 699–706.
- Qiu B, Chen S M. 2010. Eddy-mean flow interaction in the decadal modulating Kuroshio Extension system [J]. *Deep-Sea Res II*, 57: 1098–1110.
- Tanimoto Y C, Iwasaka N, Hanawa K, et al. 1992. Characteristic variations of sea surface temperature with multiple time scales in the North Pacific [J]. *J. Climate*, 6: 1153–1160.

- Trenberth K E, Hurrell J W. 1995. Decadal Climate Variations in the Pacific, National Research Council, Natural Climate Variability on Decade-to-Century Time Scales [M]. Washington D C: National Academy Press, 472–481.
- Trenberth K E, Hoar T J. 1996. The 1990–1995 El Niño-Southern Oscillation event: Longest on record [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 23: 57–60.
- Walker G T, Bliss E W. 1932. World Weather V [J]. *Memoirs of the Royal Meteorological Society*, 4 (1): 53–84.
- 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, et al. 2004. Advances in studies of Pacific decadal oscillation [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Science (in Chinese)*, 28 (6): 979–992.
- Yeh S W, Kang Y J, Noh Y, et al. 2011. The North Pacific climate transitions of the winters of 1976/77 and 1988/89 [J]. *J. Climate*, 24 (4): 1170–1183.
- 曾庆存, 张东凌, 张铭, 等. 2005. 大气环流的季节突变与季风的建立 I ——基本理论方法和气候场分析 [J]. *气候与环境研究*, 10 (3): 285–302. Zeng Qingcun, Zhang Dongling, Zhang Ming, et al. 2005. The abrupt seasonal transitions in the atmospheric general circulation and the onset of monsoons Part I: Basic theoretical method and its application to the analysis of climatological mean observation [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 10 (3): 285–302.
- 张永垂, 路凯程, 张铭. 2011. 正压准平衡海洋模型及其解 I ——中纬度大尺度风场强迫情况 [J]. *气象科学*, 31 (1): 11–16. Zhang Yongchui, Lu Kaicheng, Zhang Ming. 2011. Barotropic Quasi-Equilibrium ocean model and its solution. I: Mid-latitude forcing of large-scale wind field [J]. *Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 31 (1): 11–16.
- Zhou T, Yu R C, Li Z X. 2002. ENSO-dependent and ENSO-independent variability over the mid-latitude North Pacific: Observation and air-sea coupled model simulation. *Advances in Atmospheric Sciences*, 19: 1127–1147.
- 朱益民, 杨修群, 俞永强, 等. 2008. FGOAIS-g 快速耦合模式模拟的北太平洋年代际变率 [J]. *地球物理学报*, 51 (1): 58–69. Zhu Yimin, Yang Xiuqun, Yu Yongqiang, et al. 2008. Decadal variability in the North Pacific as simulated by FGOALS-g fast coupled climate model [J]. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 51 (1): 58–69.