

加利福尼亚附近海温的独特性及其与 PDO 短周期的可能联系

张海燕¹ 陶丽^{*1, 2} 徐川¹

1. 南京信息工程大学 大气科学学院, 江苏 南京 210044;

2. 南京信息工程大学 气象灾害教育部重点实验室, 江苏 南京 210044

摘要: 本文利用 1958-2018 年期间海表面温度 (SST) 异常和湍流热通量异常变化的关系, 探讨了与北太平洋年代际振荡 (PDO) 相关的年际和年代际时间尺度上在不同海域的海气相互作用特征。结果表明: 在年际尺度上, 黑潮—亲潮延伸区 (KOE) 表现为显著大气强迫海洋, 赤道中东太平洋表现为显著海洋强迫大气。在年代际尺度上, PDO 北中心表现为大气强迫海洋, 加利福尼亚附近则表现为显著海洋强迫大气。进一步分析表明: 加利福尼亚附近是北太平洋准 12 年振荡的关键区域之一, 与 PDO 准十年的周期类似, 加利福尼亚附近的冷 (暖) 海温对应其上有反气旋 (气旋) 型环流, 赤道中太平洋海水上翻和北太平洋东部副热带区域经向风应力的变化是北太平洋准 12 年振荡的另外两个重要环节。

关键词 加利福尼亚附近; 北太平洋年代际振荡; 海气相互作用; 湍流热通量

文章编号 2021012A

doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2107.21012.

收稿日期 2021-10-19; 网络预出版日期

作者简介 张海燕, 女, 1995 年 10 月出生, 硕士研究生, 主要从事海气相互作用研究。

Email: 15951619515@163.com

通讯作者 陶丽, Email: taoli@nuist.edu.cn

资助项目 国家重点研发计划 2016YFA0600402

Funded by National Key Research and Development Program (Grant 2016YFA0600402)

The SST Forcing off California Coast and Related to the Decadal Oscillation of PDO

ZHANG Haiyan¹ TAO Li^{1, 2} XU Chuan¹

1. School of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, Jiangsu, 210044, China

2. Key Laboratory of Meteorological Disasters, Ministry of Education (KLME), Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, Jiangsu, 210044, China

Abstract: This study explores the characteristics of interannual and interdecadal air-sea interaction related to Pacific Decadal Oscillation (PDO) over the different regions of the North Pacific based on the relationship between turbulent heat flux anomalies and sea surface temperature (SST) anomalies during 1958-2018. The results show that the atmosphere drives directly SST anomalies over the Kuroshio-Oyashio Extension (KOE), and the SST anomalies forces atmospheric circulation over the equatorial central and eastern Pacific on the interannual scale. On the interdecadal scale, it shows SST anomalies are mainly driven by atmospheric circulation over the north center of PDO. But ocean is very important in forming SST anomalies off California coast. Further analysis shows that the area off California coast is one of the key areas of quasi-12a oscillation in the North Pacific. The period is similar to the decadal oscillation of PDO. The anticyclone (cyclone) circulation off California coast may be forced by the cold (warm) SST anomalies off California coast. The upwelling of the equatorial central Pacific and the meridional wind stress anomalies in the subtropical eastern North Pacific are the other two important parts in the quasi-12a oscillation in the North Pacific.

Key words: off California coast; North Pacific Decadal Oscillation; Air-sea interaction; Turbulent heat flux

1 引言

自 20 世纪 90 年代中期以来,年代际尺度气候研究已成为气候变化研究领域的热门话题。作为北太平洋上最重要的年代际信号——太平洋年代际振荡(PDO),它强烈影响着北太平洋及其周边地区的气候和生态系统(Mantua et al., 1997; Cayan et al., 2001; Zhang et al., 2010)。有研究表明中国东部地区的降水与 PDO 有着紧密联系(朱益民和杨修群, 2003; 吕俊梅等, 2014)。也有学者指出 PDO 通过对厄尔尼诺和南方涛动(ENSO)的调控能影响北半球冬季太平洋蒸发量和夏季风(韩子轩等, 2017; 张雯等, 2020)。同时, PDO 也能调控北太平洋周边几个国家的温度变化(Mantua and Hare, 2002; 梁苏洁等, 2014)。还有些学者讨论了 PDO 与东北太平洋暖斑之间的联系(Wang et al., 2019; Zhi et al., 2019)。为更好地理解中纬度地区,甚至是全球的气候变化,探究 PDO 的形成机制显得尤为重要,如果可以准确预测这种年代际波动,将会给人类带来巨大的社会效益。

目前,已有大量模式和观测研究探讨了 PDO 的形成机制,提出了不少假设。有学者认为 PDO 的形成与 ENSO 相关的大气遥相关强迫有关: ENSO 在暖位相期间激发了太平洋——北美型(PNA),其范围从北太平洋延伸至北美,且在阿留申群岛附近具有明显的活动中心——阿留申低压(Horel and Wallace, 1981),北太平洋上增强的阿留申低压通过引起表面热通量、海洋垂直混合以及埃克曼流异常等过程,使得北太平洋中西部海表面温度(SST)冷却,形成 PDO 正位相(Graham, 1994; Graham et al., 1994; Miller et al., 1994; Alexander et al., 2002);也有学者指出, PDO 的形成主要是由于中纬度地区沿风暴轴附近的高频随机大气强迫:大气通过白噪声的表面热通量强迫可以使 SST 变化具有红噪声谱特征,在合适条件下通过随机共振机制使海洋产生年代际变化(Hasselmann, 1976; Frankignoul and Hasselmann, 1977; Saravanan and McWilliams, 1997)。也有不少研究指出在 PDO 的形成

过程中海洋过程非常重要：Cessi and Louazel (2001) 指出热带地区年代际信号以沿岸 Kelvin 波形式在海盆东边界向极地传播，沿途可能会发射西传的斜压 Rossby 波，从而影响整个中纬度太平洋 (Liu, 2003)；同时也有研究认为北太平洋中部 SST 年代际变率的准 10 年周期和海洋副热带经向环流圈 (STC) 有关，Gu and Philander (1997) 提出：热带 SST 暖异常信号通过大气遥相关引起北太平洋中纬度地区西风增强，从而增加向上的表面热通量，使得北太平洋中高纬度的 SST 偏冷。异常冷信号通过潜沉，经背景流又回到热带太平洋温跃层，因赤道地区有上升流的存在，从而该冷异常得以翻到表层，但 Schneider et al. (1999) 指出这种假说并不能在观测资料中得到验证，该 SST 异常信号通过潜沉并不能达到热带地区，只能到达 18°N ，无法继续向南传播。Kleeman et al. (1999) 提出类似假说，但 Gu and Philander (1997) 强调的是由风应力产生的副热带异常冷/暖信号下沉，然后沿着 STC 下层支向热带输送，而 Kleeman et al. (1999) 则强调的是 SST 异常冷/暖信号由 STC 中上层支从热带向副热带输送。Yu and Boer (2004) 及 Zhang and Yu (2011) 则认为海洋经向热输送对 PDO 的位相转换具有重要作用。中纬度北太平洋海气耦合也被很多学者所关注：由大气风应力异常激发上层海洋环流的动力调整，引起黑潮—亲潮延伸 (KOE) 区 SST 变化，KOE 区 SST 变化反馈给大气，再引起大气风应力异常，形成耦合的海气过程 (Latif and Barnett, 1994; Zhong et al., 2008; Zhong and Liu, 2009; Fang and Yang, 2016; Tao et al., 2020)。前人的研究也指出北太平洋年代际振荡存在多模态特征，如还存在北太平洋涡旋振荡 (NPGO; Di Lorenzo et al., 2008, 2015; Yi et al., 2018)、北太平洋模态 (NPM) 和北太平洋东部模态 (ENPM; Wu and Liu, 2003)、北太平洋经向模态 (PMM; Chiang and Vimont, 2004; Stuecke, 2018; Amaya, 2019; Zhang et al., 2021)。Newman et al. (2016) 利用北太平洋 (多年代

际)、热带中太平洋—副热带北太平洋(十年际)和热带东太平洋(年际)特征模投影时间序列很好地重建了 PDO 指数。

综上所述,我们发现影响 PDO 的因子很多,如大气随机强迫(包括中纬度大气随机强迫以及热带大气遥相关强迫)、海洋 Rossby 波、副热带海洋涡旋的调整以及 KOE 区的海气耦合等等。但 PDO 的形成究竟是大气强迫占主导地位,还是海洋强迫占主导地位呢?其年代际信号的源头究竟是什么?迄今为止还没有明确的诠释。大尺度海气相互作用是海洋年代际变率产生的主要原因之一(杨修群等,2004),因此我们希望通过分析中纬度北太平洋大尺度海气相互作用过程中是以海洋强迫大气为主,还是以大气强迫海洋为主,能对 PDO 形成机制有新的认识。对于中纬度大尺度海气相互作用,Bjerknes(1964)认为:大西洋在年代际尺度上大气直接驱动 SST 变率,而在年代际尺度上 SST 变率主要由海洋控制,进而可能影响大气。Gulev et al.(2013)利用 SST 异常(SSTA)和湍流热通量(向上为正)异常的相关关系(正相关表明海洋强迫大气,负相关表明大气强迫海洋)在北大西洋上验证了 Bjerknes 猜想。那么北太平洋上的情况是否和 Bjerknes 猜想一致呢?关于北太平洋的海气相互作用特征,前人有过一些研究(李博等,2011),但并未区分不同时间尺度,本文我们主要借鉴 Gulev et al.(2013)的研究方法,从 SSTA 和湍流热通量异常的相关关系角度诊断分析了北太平洋在 PDO 年际和年代际尺度上的海气相互作用特征,欲厘清年代际尺度上 PDO 的形成到底是海洋强迫主导还是大气强迫主导。

我们的初步结果表明加利福尼亚附近 SSTA 和湍流热通量(向上为正)异常在年代际尺度呈显著正相关,表现为稳定的海洋强迫大气,因此在本文的后半部分我们重点关注了加利福尼亚附近海洋过程与 PDO 短周期的关系,以期对 PDO 的形成机制有新的认识。这和以往研究关注 ENSO 或者 KOE 区 SST 对 PDO 的驱动作用不同。

2 资料与方法

2.1 使用数据

本文使用由美国伍兹霍尔海洋研究所 (Woods Hole Oceanographic Institution, WHOI) 提供的 1958-2018 年客观分析海气通量 (The Objectively Analyzed Air-Sea Fluxes, OAFflux) 逐月数据 (Yu and Weller, 2007), 它是由卫星观测的风速、SST 和再分析资料中的近地面大气温度和湿度客观综合分析而成, 并通过 130 多个浮标点海气数据的时间序列进行了校准和验证。该数据集包括潜热通量、感热通量、10m 全风速、SST、2m 气温以及比湿。目前 OAFflux 湍流热通量数据被人们公认为质量较高的热通量数据。本文规定潜热和感热通量(湍流热通量)向上为正, 即当湍流热通量为正时, 海洋失去热量, 大气得到热量。同时对分析了由美国国家环境预测中心 (National Centers for Environmental Prediction, NCEP) 和日本气象厅 (JRA-55) 提供的再分析资料中的湍流热通量数据, JRA-55 的湍流热通量数据仅更新至 2013 年。在分析中, 为估计湍流交换系数, 本文还使用 1985-2018 年 OAFflux 逐日数据。

我们也使用了由 NCEP 提供的 1958-2018 年的大气风应力和 10m 水平风 (纬向风 u_a 和经向风 v_a)、英国 Hadley 中心提供的 1958-2018 年期间的 SST 和 EN4.2.1 次表层海温 (上层海洋 5-1000m 不等间距分布共有 27 层) 的月平均数据。除此之外, 我们也使用了 1958-2018 年德国海洋环流和海洋气候常规估算第三版本 (General Estimating the Circulation & Climate of the Ocean version 3.0, GECCO3; 上层海洋 5-1000m 不等间距分布共有 24 层) 月平均海洋再分析数据集, 包括洋流纬向流速 (u_o) 和垂直速度 (w_o)。PDO 指数从 <http://research.jisao.washington.edu/pdo/PDO.latest.txt>[2021-3-25]网站下载。本文中, 所有数据

水平分辨率均被插值成 $2^\circ \times 2^\circ$ ，GECCO3 数据其在垂直方向上被线性插值成和 EN4.2.1 数据垂直层次一致。

2.2 分析方法

a. PDO 年际指数和年代际指数

在本研究中，我们主要关注北太平洋在年际和年代际尺度的 SSTa 和湍流热通量异常相关关系，因此所分析的变量均通过最小二乘法以去掉线性趋势。回归分析中对回归系数的显著性检验采用 t 检验。我们利用逐月 PDO 指数序列经过 96 月（即 8 年）Lanczos 高通/低通滤波得到年际/年代际 PDO 指数序列（图 1a），并将其回归到 SST 和湍流热通量场，用以分析北太平洋 SSTa 和湍流热通量异常在 PDO 年际/年代际时间尺度上的分布及其相关关系。图 1b 表示 1958-2018 年期间 PDO 逐月指数的功率谱图，由图可以看出 PDO 的年代际振荡短周期大约为 10-12 年左右，10 年左右的功率谱峰值通过了 90% 的置信水平。

b. 湍流热通量

本文主要从 SSTa 和湍流热通量异常相关关系角度揭示北太平洋在年际和年代际尺度上的海气相互作用特征，同时分析湍流热通量异常的驱动因子来进一步验证说明。湍流热通量包括潜热通量和感热通量，参数化公式如下：

$$Q_e = \rho_a L_e C_e U_a (q_s - q_a) \quad (1)$$

$$Q_s = \rho_a C_p C_h U_a (t_s - t_a) \quad (2)$$

其中 Q_e 表示潜热通量， Q_s 表示感热通量， U_a 表示大气低层全风速（通常在 10m）， q_s 表示海表面的饱和比湿， t_s 表示 SST， q_a 和 t_a 分别表示大气近表层比湿和温度（通常在 2m）， L_e 表示凝结潜热系数， C_p 表示定压比热， ρ_a 表示低层空气密度， C_e 和 C_h 分别表示潜热和感热通量的湍流交换系数。

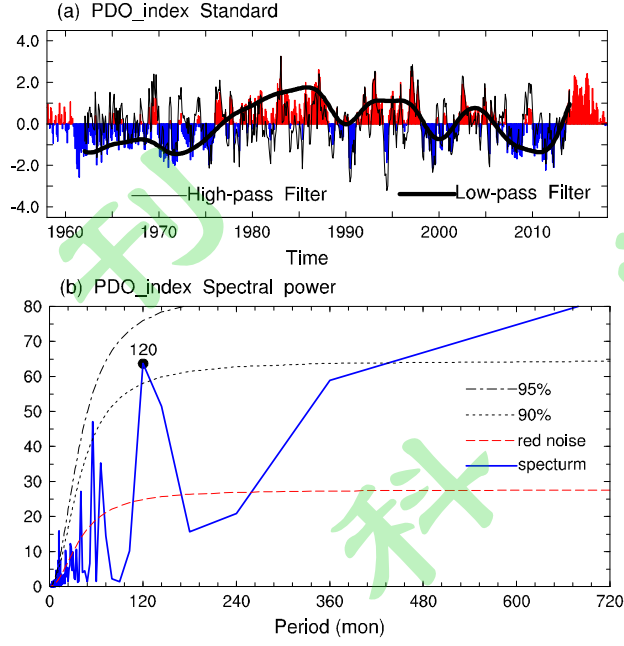


图1 (a) 1958-2018 年标准化 PDO 指数逐月时间序列（柱状）以及经过 96 月 Lanczos 高通/低通滤波后的 PDO 指数的逐月时间序列（细实线：年际 PDO 指数；粗实线：年代际 PDO 指数）；(b) PDO 逐月时间序列的功率谱分析，红色虚线、黑色点线、黑色点-虚线分别表示通过红噪音检验以及通过 90%、95% 的置信水平，图 (b) 中黑点及数字表示周期在 10 年以上的显著周期。其中 PDO 指数从 <http://research.jisao.washington.edu/pdo/PDO.latest.txt> [2021-3-25] 网站下载。

Fig.1 (a) The monthly standardized PDO index for the period 1958-2018, bar is for the unfiltered PDO index, thin/thick solid line are for interannual/(inter) decadal PDO index with 96-month Lanczos high-pass/low-pass filtering. (b) The power spectrum of monthly PDO index. The red dash line is red noise test line, and black dotted line and dot dash line are statistically significant at 90% and 95% level. The black dot and number indicate the significant period more than 10 years. The PDO index is from <http://research.jisao.washington.edu/pdo/PDO.latest.txt> [2021-3-25].

从公式 (1) (2) 可以看出，湍流热通量主要依赖于 U_a 、 q_a 、 t_s (q_s 由 t_s 计算得到)、 t_a ，因此我们依据 Tanimoto et al. (2003) 所提供的方法，将潜热和感热通量参数化公式线性化来评估驱动湍流热通量异常的主导因子。将公式 (1) (2) 中物理量分解成时间平均量和扰动量，则湍流热通量扰动量如下所示：

$$Q'_e = Q_e - \overline{Q_e} = \rho_a L_e C_e \left\{ \overline{U_a} (q'_s - q'_a) + U'_a (\overline{q_s} - \overline{q_a}) + \left[U'_a (q'_s - q'_a) - \overline{U_a} (\overline{q_s} - \overline{q_a}) \right] \right\} \quad (3)$$

$$Q'_s = Q_s - \overline{Q_s} = \rho_a C_p C_h \left\{ \overline{U_a} (t'_s - t'_a) + U'_a (\overline{t_s} - \overline{t_a}) + \left[U'_a (t'_s - t'_a) - \overline{U_a} (\overline{t_s} - \overline{t_a}) \right] \right\} \quad (4)$$

其中时间平均量使用各月的气候场，扰动量是相对于各月气候场的偏差。这里仅考虑等式右边前两项对于湍流热通量异常的贡献，最后两项属于二阶小量可以忽略不计。在分析各因子

的贡献之前,需估计 C_e 和 C_h (除两系数未知外,其它量已知)。我们根据 Small et al. (2019) 文中所提方法,利用 1985-2018 年 OAFlux 日数据根据公式 (1) (2) 计算得到湍流交换系数 C_e 和 C_h ,取该时段系数的气候场作为 C_e 和 C_h 的估计值,且估计值范围在 5×10^{-4} 到 2×10^{-3} 之间,超出该范围剔除。所估计的 C_e 和 C_h 分布如图 2a、b 所示。

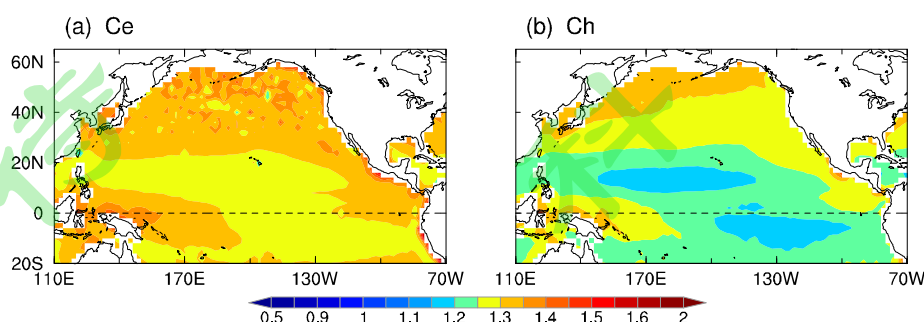


图 2 湍流交换系数估计值分布 ($\times 10^{-3}$)。 (a) 潜热通量湍流交换系数 C_e ; (b) 感热通量湍流交换系数 C_h 。
Fig.2 The estimate of the turbulent exchange coefficient ($\times 10^{-3}$). (a) The exchange coefficient of latent heat flux C_e , (b) The exchange coefficient of sensible heat flux C_h .

3 北太平洋年际、年代际尺度海气相互作用特征

3.1 与 PDO 相关的 SST 和湍流热通量之间相关关系

热通量是很难直接观测得到的物理量,时间长度较长、范围较广,可用于科学研究的热通量数据集更是少之又少。OAFlux 湍流热通量数据被人们公认为质量较高的热通量数据。在北大西洋, Gulev et al. (2013) 验证了 Bjerknes 猜想: 在年际尺度上, SSTA 和湍流热通量(向上为正)异常表现为显著负相关,表明大气强迫海洋;在年代际尺度上,两者表现为显著正相关,表明海洋强迫大气。我们利用 OAFlux 数据在北大西洋进行同样分析,得到了类似的结论(图略)。

对于广阔的北太平洋来说, SSTA 和湍流热通量异常相关关系较为复杂,信号较为杂乱。北太平洋上 SST 最主要的年代际信号是 PDO, 其呈现出“马蹄形”分布, 即在北太平洋中西部 SST 呈现出一个明显异常中心, 东部相反符号的 SSTA 向西北延伸至北美沿岸, 向西

南延伸至中部热带太平洋 (Mantua et al., 1997)。因此, 对于北太平洋海气相互作用特征的分析, 我们重点关注北太平洋中西部 (即 PDO 北中心: 147°E - 143°W , 25°N - 53°N)、赤道中东太平洋地区、以及北美西海岸。图 3a、c 和图 3b、d 分别给出了年际和年代际 PDO 指数序列对 SST 场和湍流热通量场的回归, 代表了年际和年代际尺度 PDO 正位相期间, SSTA 场和湍流热通量场异常的空间分布, 用以分析北太平洋 SSTA 和湍流热通量异常在年际和年代际尺度上的相关关系。

从图 3a、c 可以看出, 在年际尺度 PDO 正位相时, 赤道中东太平洋地区 SSTA 和湍流热通量 (向上为正) 异常均呈现出显著正异常, 两者表现为正相关, 即 SST 增加, 湍流热通量增加, 反之亦然, 表明赤道中东太平洋地区主要表现为海洋强迫大气。我们将 PDO 北中心划分为北太平洋中部和西部两个区域来分析, 北太平洋西部即在黑潮—亲潮延伸 (KOE) 区附近。在北太平洋中部, 湍流热通量呈现出微弱的负异常 (图 3c), SST 呈现出显著负异常 (图 3a), 两者呈现出一定的正相关, 此处表现出一定海洋强迫大气, 这可能与 El Niño 发生时, 赤道地区平均斜温层加深, 为补充这种热量的增加, 热带外地区的平均斜温层变浅, 即有热带外向热带的经向热量输送, 则在北太平洋中部表现为海温降低, 洋面湍流热通量异常减小, 即湍流热通量异常由海洋驱动; 另一方面, 由 El Niño 激发出的 PNA 型强迫阿留申低压异常, 从而引起中纬度地区西风增强, 引起北太平洋中部地区表面热通量、海洋垂直混合以及埃克曼输送异常, 也会引起该区域 SST 冷异常 (Graham et al., 1994; Alexander et al., 2002; Wu et al., 2003), 即从局地海气相互作用角度来说, 表现为大气强迫海洋, 所以此处的湍流热通量异常表现比较弱。北太平洋的湍流热通量异常信号主要在 KOE 区附近, 在年际尺度 PDO 正位相时 KOE 区呈现出显著正异常 (图 3c), 而 SST 呈现出显著负异常 (图

3a)，两者表现为负相关，即湍流热通量增加，SST 减小，反之亦然，此处主要表现为大气强迫海洋。

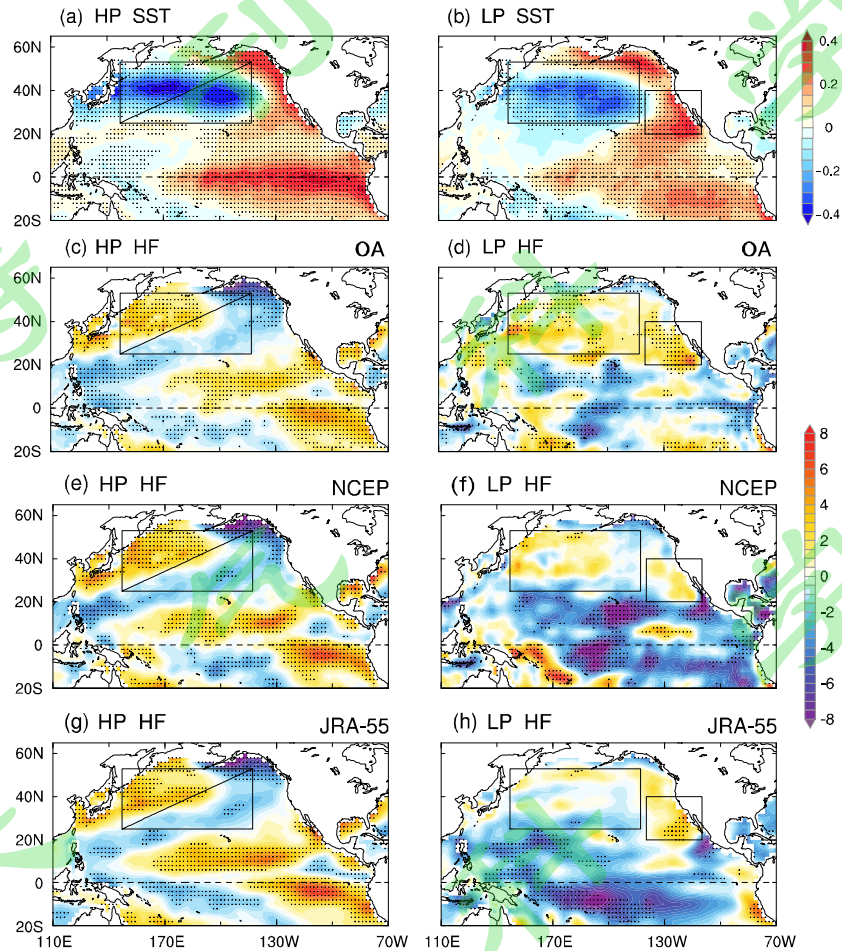


图3 1958-2018 年 (a) SST ($^{\circ}\text{C}$) 场和 (c) (e) (g) 湍流热通量 (HF ; W/m^2) 对年际 PDO 指数的回归分布 (打点区域表示通过 95% 的置信水平); (b) SST ($^{\circ}\text{C}$) 场和 (d) (f) (h) 湍流热通量 (W/m^2) 对年代际 PDO 指数的回归分布 (打点区域表示通过 90% 的置信水平)。其中 SST 来自于 HadISST 数据集, 湍流热通量分别来自于 1958-2018 年 OAFlux 数据集 (c、d)、1958-2018 年 NCEP 数据集 (e、f) 和 1958-2013 年 JRA-55 数据集 (g、h)。

Fig.3 The distribution of the regressed anomalies of (a) SST (unit: $^{\circ}\text{C}$) and (c) (e) (g) turbulent heat flux (HF; unit: W/m^2) upon the interannual PDO index from 1958 to 2018; (b) (d) (f) (h) are same as (a) (c) (e) (g) but upon the (inter) decadal PDO index. The areas with dots are statistically significant at the 95% level for (a) (c) (e) (g), 90% level for (b) (d) (f) (h). SST is from HadISST, and turbulent heat fluxes are from OAFlux during 1958-2018 for (c) (d), from NCEP during 1958-2018 for (e) (f), from JRA-55 during 1958-2013 for (g) (h), respectively.

在年代际尺度 PDO 正位相时，赤道中东太平洋地区湍流热通量异常信号微弱且不单一（图 3d）。对于整个 PDO 北中心，SST 呈现出显著负异常（图 3b），图 3d 中大部分地区

的湍流热通量呈现出正异常，两者表现为负相关，表明此处主要为大气强迫海洋现象。而在北美西海岸却凸显出一个特殊的区域—加利福尼亚附近，该区域湍流热通量呈现出显著正异常（图 3d），同时 SST 也呈现出显著正异常（图 3b），两者则表现为正相关，表明在年代际尺度上，北太平洋地区只有加利福尼亚附近海洋对大气有强迫作用。

我们使用 NCEP（图 3e、f）和 JRA-55（图 3g、h）的湍流热通量再分析数据进行了同样分析。在年际尺度上，三套数据的结果几乎一致（图 3c、e、g）：热带中东太平洋地区，湍流热通量有显著正异常，在 KOE 区附近，有显著负异常。在北太平洋中部，湍流热通量呈现出微弱的负异常。年代际尺度上，在 PDO 北中心，JRA-55 的分析结果与其它两套数据略有差异，PDO 正位相时正湍流热通量异常不是那么明显，但是在加利福尼亚附近三套数据得到的结论一致，均表现为 PDO 正位相时有较明显的正湍流热通量异常，表现为海洋强迫大气现象（图 3d、f、h）。

3.2 与 PDO 相关的湍流热通量异常驱动因子

为更好地理解 3.1 节中所得出的结论，我们从湍流热通量异常的驱动因子角度出发，进一步分析与 PDO 相关的湍流热通量异常到底是由海洋所驱动还是由大气所驱动，以此来对所得到的结论加以验证说明，我们仅关注在 3.1 节中所提到湍流热通量异常显著的区域。根据 2.2 节中湍流热通量异常（潜热和感热通量异常之和）的线性化公式，可知湍流热通量异常主要包括风速异常贡献、以及海气温差和比湿差异常贡献，对于海气温差和比湿差的贡献，我们进一步分析 SST、气温和大气比湿中哪一项贡献最大。

在年际尺度 PDO 正位相时，赤道中东太平洋地区湍流热通量表现为显著正异常（图 3c），即海洋向大气释放的热量显著增加，对比图 4a、b 可知，该区域风速异常信号并不单一，但主要表现为负异常，即 PDO 正位相时，赤道中东太平洋地区东风减弱，这会引发洋面向上

湍流热通量异常减小（图 4a），而海气温差和比湿差表现为异常增大，会引起洋面湍流热通量异常增大（图 4b），因此该区域湍流热通量正异常主要是由于海气温差和比湿差的异常增大所引起；对比图 4c、d 可知，该区域海气温差和比湿差的异常增大主要是海气比湿差异常增大的贡献（图 4c），而海气温差贡献很小（图 4d）；我们进一步对比分析图 4e、f 可知，该区域海气比湿差的异常增大则主要归因于 SST 的异常增暖，即 SSTa 调控湍流热通量异常，进而可能强迫出大气异常。

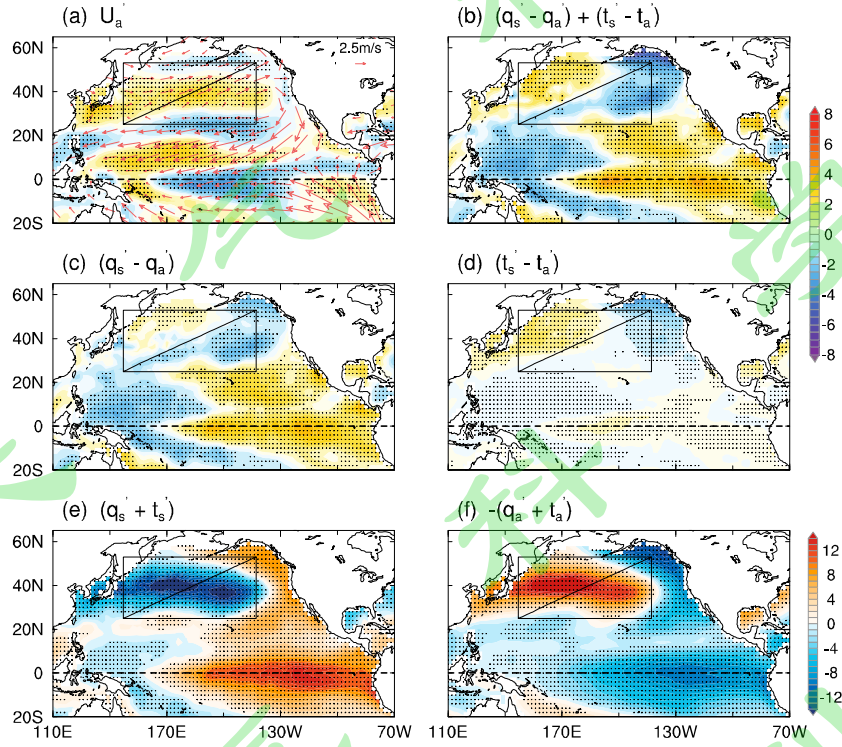


图 4 1958-2018 年年际 PDO 指数与湍流热通量异常各分量 (W/m^2) 的线性回归分布。(a) $U'_a[\rho_a L_e C_e (\overline{q_s} - \overline{q_a}) + \rho_a C_p C_h (\overline{t_s} - \overline{t_a})]$ ，图中红色矢量箭头表示 $\mathbf{u}_a$ 和 $\mathbf{v}_a$ 的气候场 (2.5m/s)；(b) $\rho_a L_e C_e \overline{U_a} (q'_s - q'_a) + \rho_a C_p C_h \overline{U_a} (t'_s - t'_a)$ ；(c) $\rho_a L_e C_e \overline{U_a} (q'_s - q'_a)$ ；(d) $\rho_a C_p C_h \overline{U_a} (t'_s - t'_a)$ ；(e) $\rho_a L_e C_e \overline{U_a} q'_s + \rho_a C_p C_h \overline{U_a} t'_s$ ；(f) $-\rho_a L_e C_e \overline{U_a} q'_a + \rho_a C_p C_h \overline{U_a} t'_a$ ；打点区域表示通过 95% 的置信水平。其中 $\mathbf{u}_a$ 和 $\mathbf{v}_a$ 来自于 NCEP 数据集， U_a 、 t_s 、 q_a 和 t_a 均来自于 OAFlux 数据集。

Fig.4 The distribution of the regressed turbulent heat flux anomaly components of (a) $U'_a[\rho_a L_e C_e (\overline{q_s} - \overline{q_a}) + \rho_a C_p C_h (\overline{t_s} - \overline{t_a})]$, the red vectors are for the climatology of $\mathbf{u}_a$ and $\mathbf{v}_a$ (unit: 2.5m/s), (b) $\rho_a L_e C_e \overline{U_a} (q'_s - q'_a) + \rho_a C_p C_h \overline{U_a} (t'_s - t'_a)$, (c) $\rho_a L_e C_e \overline{U_a} (q'_s - q'_a)$, (d) $\rho_a C_p C_h \overline{U_a} (t'_s - t'_a)$, (e) $\rho_a L_e C_e \overline{U_a} q'_s + \rho_a C_p C_h \overline{U_a} t'_s$, (f) $-\rho_a L_e C_e \overline{U_a} q'_a + \rho_a C_p C_h \overline{U_a} t'_a$ (unit: W/m^2) upon the interannual PDO index from 1958 to 2018. The areas with dots are statistically significant at the 95% level. The surface $\mathbf{u}_a$ and $\mathbf{v}_a$ are from NCEP, and U_a , t_s , q_a , t_a are all from OAFlux.

同理，我们分析年际尺度 PDO 正位相时 KOE 区的湍流热通量显著正异常（图 3c），对比分析图 4a、b 可以发现，年际尺度 PDO 正位相时该区域风速、海气温差和比湿差均呈现出显著正异常，均可引起湍流热通量的正异常；进一步分析可以确定主要是由于该区域气温更强的异常冷却（对比图 4e、f；大气气温和比湿对湍流热通量异常的贡献与其自身异常符号相反）所导致的海气温差的异常增大（对比图 4c、d），从而引起海气温差和比湿差的异常增大（图 4b），而该区域气温更强的异常冷却则归因于西北风的异常增强（图 4a），将更高纬度陆地上的干冷空气吹过来；即该区域湍流热通量的正异常最终就是由于风速的异常增强所致，进而强迫出 SST 负异常。这进一步验证了 3.1 节中在年际尺度所得到的结论。

年代际尺度上湍流热通量异常驱动因子的分析同年际尺度。在年代际尺度上，对于 PDO 北中心来说，该区域湍流热通量正异常（图 3d）主要是由 PDO 正位相时西风异常增强所引起（图 5a），进而可能强迫出 SST 负异常，该区域海气温差和比湿差并没有明显异常信号（图 5b）。而加利福尼亚附近湍流热通量正异常（图 3d）主要是由于 PDO 正位相时该区域 SST 异常增暖（对比图 5e、f）而引起海气比湿差异常增大（对比图 5c、d）所致，进而可能影响大气。这进一步验证了 3.1 节中在年代际尺度所得到的结论。

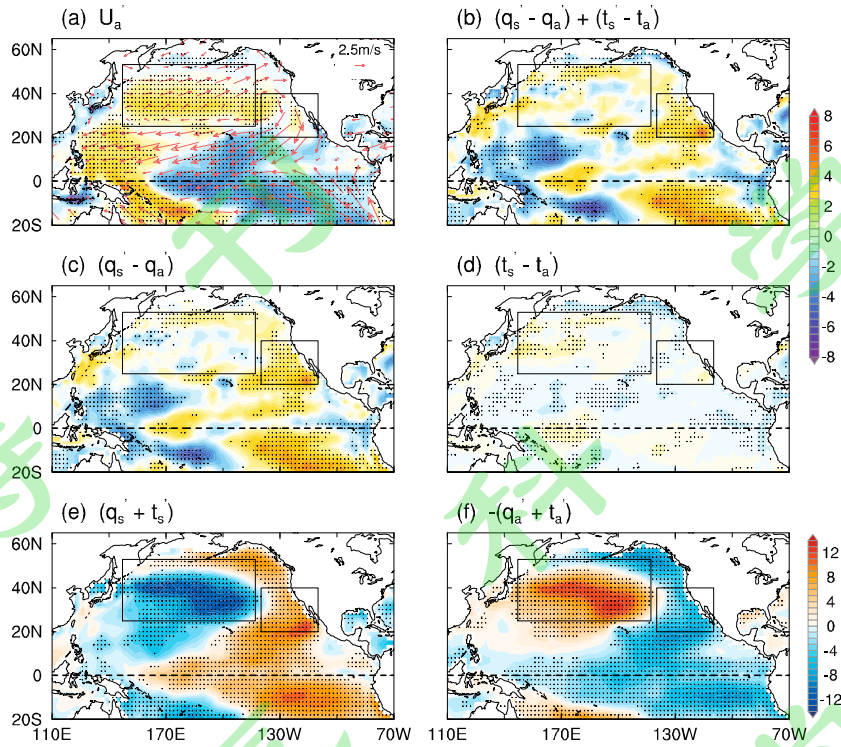


图 5 同图 4，但为年代际 PDO 指数的回归分布。打点区域表示通过 90% 的置信水平。

Fig.5 Same as Fig.4, but for (inter) decadal PDO index. The areas with dots are statistically significant at the 90% level.

3.3 年代际尺度在冬季、夏季与 PDO 相关的海气相互作用特征

年代际尺度上，北太平洋海气相互作用特征在冬季和夏季是否和全年一致呢？由图 6 可知：对于 PDO 北中心来说，在冬季，SSTA 和湍流热通量异常表现为负相关（图 6a、b），湍流热通量正异常相较于全年（图 3d）和夏季（图 6d）来说最强，即大气对海洋的强迫作用最明显；而在夏季（图 6c、d），两者表现为正相关，即表现为和冬季相反的海气相互作用特征，但相较于冬季来说，该湍流热通量负异常较弱。因此对于全年来说，PDO 北中心的海气相互作用特征表现为和冬季一致，即大气强迫海洋。而在加利福尼亚附近，不论冬季还是夏季，SSTA 和湍流热通量异常都表现为明显正相关，表明北太平洋上仅有此处为稳定的海洋强迫大气现象，只是在冬季湍流热通量异常中心稍向南偏。

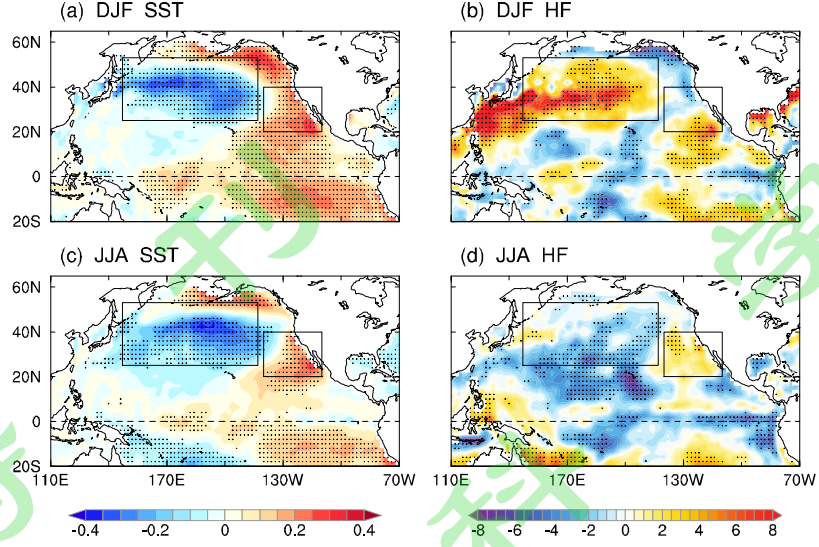


图 6 1958-2018 年年代际尺度冬季（12-2 月平均）(a) SST ($^{\circ}\text{C}$) 和 (b) 湍流热通量 (W/m^2) 对 PDO 指数的回归分布；(c)(d) 同 (a)(b) 但为夏季（6-8 月平均）；打点区域表示通过 90% 的置信水平。其中 SST 来自于 HadISST 数据集，湍流热通量来自于 OAFflux 数据集。

Fig.6 The distribution of the regressed anomalies of (a) (c) SST (unit: $^{\circ}\text{C}$), (b) (d) turbulent heat flux (unit: W/m^2) upon the (inter) decadal PDO index from 1958 to 2018. (a) and (b) are for the DJF-mean, (c) and (d) are for the JJA-mean. The areas with dots are statistically significant at the 90% level. SST is from HadISST, and turbulent heat flux is from OAFflux.

4 加利福尼亚附近海洋过程与 PDO 短周期的可能联系

通过第三部分北太平洋在年际、年代际尺度的 SSTA 和湍流热通量异常相关关系分析，我们发现与 PDO 相关的海气相互作用特征在年代际尺度上有这样的表现：在 PDO 北中心主要表现为大气强迫海洋；在加利福尼亚附近表现为海洋强迫大气，且年代际尺度北太平洋上仅有该区域表现为海洋强迫大气。因此，我们想进一步探讨加利福尼亚附近海洋过程是什么样？与 PDO 的短周期振荡（准十年周期）有着什么样的联系？

图 7 表示加利福尼亚附近（ 20°N - 40°N ， 140°W - 110°W ）SSTA 区域平均（记为 CaI）标准化逐月时间序列（图 7a）及其功率谱分析（图 7b）。我们从 CaI 的功率谱分析可以看出（图 7b），加利福尼亚附近 SSTA 具有 12 年左右周期，且通过了 95% 的置信水平。鉴于这一结果，同时也为能够更加清晰地看出海洋中异常信号的变化，我们对下文所有分析数据都进行 96-240 月（即 8-20 年）的 Butterworth 带通滤波。

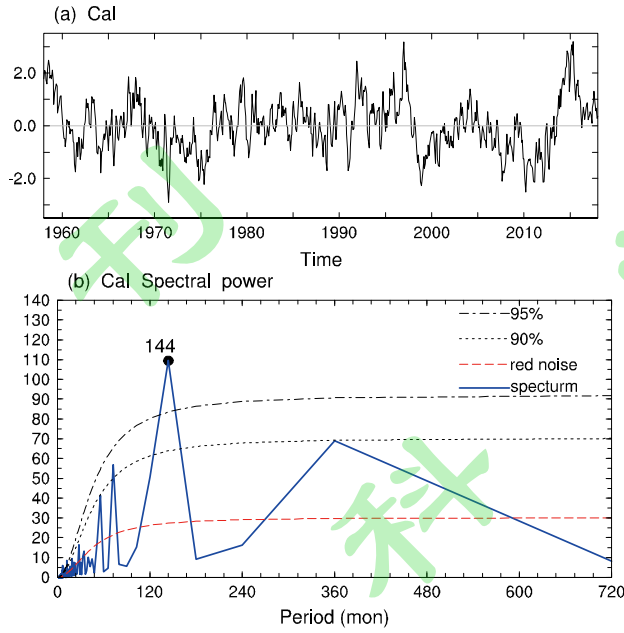


图 7 (a) 1958-2018 年加利福尼亚附近 SSTA 区域平均 (CaI: 20°N-40°N, 140°W-110°W) 的标准化逐月时间序列; (b) 表示 CaI 的功率谱分析, 红色虚线、黑色点线、黑色点-虚线分别表示通过红噪音检验以及通过 90%、95% 的置信水平, 图 (b) 中黑点及数字表示周期在 10 年以上的显著周期。其中 SST 来自于 HadISST 数据集。

Fig.7 (a) The standardized monthly time series of SSTA averaged over the area off California coast (CaI: 20°N-40°N, 140°W-110°W) for the period 1958-2018. (b) The power spectrum of CaI. The red dash line is red noise test line, and black dotted line and dot dash line are statistically significant at 90% and 95% level. The black dots and numbers in (b) indicate the significant period more than 10 years. SST is from HadISST.

图 8 为 CaI 和海洋次表层海温异常 (5-1000m 的上层海洋)、SSTA 以及风应力异常的超前滞后回归分布。通过分析我们可以发现: 当 CaI 滞后各要素场 84 月即 7 年 (Lag 84mon) 时 (图 8 a1-d1), SSTA 回归到 CaI 指数的空间模态类似于 PDO 冷位相, 在赤道中东太平洋至加利福尼亚附近为 SST 冷异常, 北太平洋中部为 SST 暖异常, 类似于 ENPM 模态冷位相阶段 (图 8 c1)。相应的, 加利福尼亚沿岸有反气旋型环流, 北太平洋东部副热带区域为东北风异常, 北太平洋中部、赤道太平洋中部为显著的偏东风风应力异常 (图 8 d1), 这种可能由加利福尼亚附近的冷海温导致的风应力异常叠加在风场气候场 (图 4a: 赤道中东太平洋偏东风, 北太平洋东部副热带区域为东北风, 北太平洋中部为偏西风) 上, 根据 Wind-Evaporation-SST (WES) 机制 (Xie and Philander, 1994), 引起赤道中东太平洋至加利福尼

亚沿岸 SST 冷异常，北太平洋中部 SST 暖异常。随着时间的变化，赤道西太平洋异常暖水沿着温跃层东移，赤道中东太平洋约 100m 以上的次表层异常冷水上翻（图 8 a1-a4），而加利福尼亚附近异常冷水随时间下沉（图 8 b1-b4）。当 CaI 滞后各要素场 12 月即 1 年（Lag 12mon）时（图 8 a4-d4），加利福尼亚沿岸有 SST 暖异常，伴随有气旋性风应力环流，北太平洋东部副热带区域为西南风异常，北太平洋中部、赤道太平洋中部为显著的风应力异常，根据 WES 正反馈机制，引起赤道中东太平洋至加利福尼亚沿岸 SST 出现暖异常，北太平洋中部出现 SST 冷异常，类似于 PDO 暖位相阶段，基本完成半个周期振荡，时间约为 5-6 年。当 CaI 超前各要素场 60 月即 5 年（Lead 60mon）左右（图 8 a8-d8），基本完成一个周期振荡，时间约为 12-13 年左右。

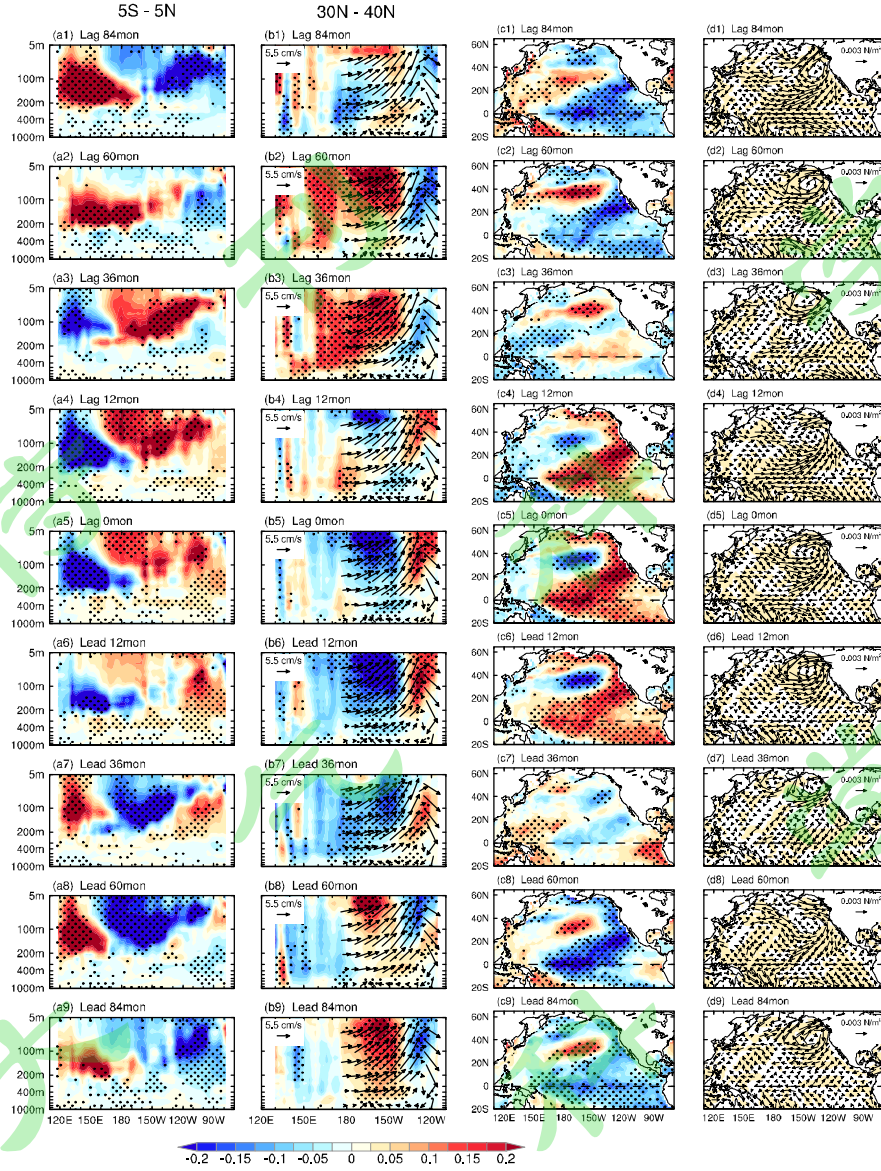


图 8 1958-2018 年期间 96-240 月带滤波的 CaI 和次表层海温异常 (°C)、SSTA (°C)、及风应力异常 (N/m²) 的超前滞后回归分布。(a1)-(a9) 5°S-5°N 纬度平均次表层海温异常; (b1)-(b9) 30°N-40°N 纬度平均次表层海温异常, 箭头表示海洋环流 u_o 和 w_o ($w_o \times 10^{-5}$) 的气候场 (5.5 cm/s); (c1)-(c9) 表示 SSTA; (d1)-(d9) 表示风应力异常, 图中黄色阴影区域表示通过 90% 的置信水平。在图 (a1)-(a9)、(b1)-(b9)、(c1)-(c9) 中打点区域表示通过 90% 的置信水平。“Lag” 表示 CaI 滞后, “Lead” 表示 CaI 超前。其中 SST 来自于 HadISST 数据集, 次表层海温来自于 EN4.2.1 数据集, 风应力来自于 NCEP 数据集, 海洋环流 u_o 和 w_o 来自于 GECCO3 数据集。

Fig. 8 The lead-lag regression between 96-240-month band-pass CaI and monthly sub-surface ocean temperature anomalies, SSTA and wind stress anomalies during 1958-2018. (a1)-(a9) sub-surface ocean temperature anomalies averaged over 5°S-5°N (shaded; unit: °C). (b1)-(b9) sub-surface ocean temperature anomalies averaged over 30°N-40°N (shaded; unit: °C), and climatological ocean circulation of the u_o and w_o ($w_o \times 10^{-5}$) (vector; unit: 5.5 cm/s). (c1)-(c9) SSTA (shaded; unit: °C). (d1)-(d9) wind stress anomalies (unit: N/m²), the areas with yellow shades are statistically significant at the 90% level. The areas with dots are statistically significant at the 90% level in (a), (b) and (c). “Lag” indicates CaI lagging, “Lead” indicates CaI leading. SST, sub-surface ocean temperature, wind stress and ocean circulation of the u_o and w_o are from HadISST, EN4.2.1, NCEP and GECCO3, respectively.

我们进一步分析了赤道中太平洋（ 5°S - 5°N , 180° - 120°W ）区域平均逐月 SSTA（图 9a）和北太平洋东部副热带地区（ 20°N - 40°N , 140°W - 110°W ）的区域平均逐月经向风应力（图 9b）的功率谱图，发现它们均有 12 年左右的周期，与加利福尼亚附近 SSTA 的功率谱结果一致，但赤道中太平洋 SSTA 的 12 年周期只通过了红噪音检验，未通过 90% 的置信水平。这说明北太平洋准 12 年振荡的关键区域和要素场包括加利福尼亚附近 SSTA、赤道中太平洋 SSTA，以及北太平洋东部副热带区域的经向风应力，这种准 12 年振荡周期与 PDO 的短周期振荡（准十年周期）类似。

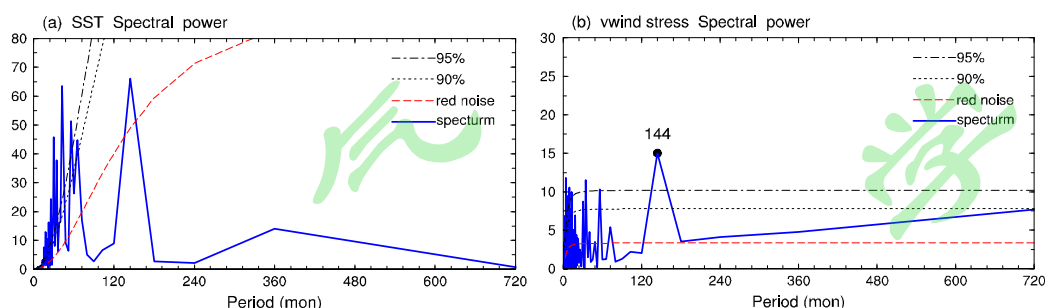


图 9 1958-2018 年 (a) 赤道中太平洋（ 5°S - 5°N , 180° - 120°W ）区域平均逐月 SSTA 和 (b) 北太平洋东部副热带地区（ 20°N - 40°N , 140°W - 110°W ）区域平均逐月经向风应力的功率谱分析，红色虚线、黑色点线、黑色点-虚线分别表示通过红噪音检验以及通过 90%、95% 的置信水平，图中黑点及数字表示周期在 10 年以上的显著周期。其中 SST 来自于 HadISST 数据集，经向风应力来自于 NCEP 数据集。

Fig.9 The power spectrum analysis of (a) monthly SSTA averaged over the equatorial central pacific (5°S - 5°N , 180° - 120°W) and (b) monthly meridional wind stress averaged over subtropical eastern north Pacific (20°N - 40°N , 140°W - 110°W) during 1958-2018. The red dash line is red noise test line, and black dotted line and dot dash line are statistically significant at 90% and 95% level. The black dots and numbers indicate the significant period more than 10 years. SST and meridional wind stress are from HadISST and NCEP, respectively.

5 结论与讨论

本文通过分析北太平洋在年际和年代际尺度与 PDO 相关的 SSTA 和湍流热通量异常的相关关系，探讨了 PDO 在年际和年代际时间尺度上的不同海域海气相互作用特征，并进一步分析了加利福尼亚附近海洋过程与 PDO 短周期的可能联系。主要结论如下：

(1) 在年际尺度, 赤道中东太平洋地区 SSTa 和湍流热通量 (向上为正) 异常表现为显著正相关, 即海洋可能通过热通量加热/冷却大气; KOE 区两者表现为显著负相关, 即湍流热通量异常主要受到大气风速异常影响, SST 则表现为对热通量异常的响应, 表现为大气强迫海洋。

(2) 在年代际尺度, PDO 北中心 SSTa 和湍流热通量 (向上为正) 异常为负相关, 表现为一定的大气强迫海洋; 加利福尼亚附近两者表现为显著正相关, 即海洋可能通过热通量加热/冷却大气。这种海气相互作用特征在不同季节稍有变化: PDO 北中心在冬季表现为强烈的大气强迫海洋现象, 而在夏季则表现为较弱的海洋强迫大气现象, 因此就全年而言 PDO 北中心表现为大气强迫海洋。加利福尼亚附近无论是在冬季还是夏季都表现为显著的海洋强迫大气现象。

(3) 加利福尼亚沿岸附近是北太平洋准 12 年振荡中的关键区域之一, 与 PDO 准十年的周期类似。赤道中太平洋海水上翻和北太平洋东部副热带区域经向风应力的变化是北太平洋准 12 年振荡另外两个重要环节。加利福尼亚沿岸附近的冷 (暖) 海温异常, 伴随着反气旋 (气旋) 性风应力环流, 以及北太平洋东部副热带为东北风 (西南风) 异常, 北太平洋中部、赤道太平洋中部为显著的东风 (西风) 异常。这种可能由加利福尼亚附近的冷 (暖) 海温导致的风应力异常叠加在风场气候场上, 引起赤道中东太平洋至加利福尼亚沿岸 SST 出现冷 (暖) 异常, 北太平洋中部出现 SST 暖 (冷) 异常。同时伴随有赤道西太平洋暖 (冷) 异常海水沿着温跃层东移上翻。

本文虽然指出了加利福尼亚附近 SST 具有海洋强迫大气的独特性, 且有准 12 年的振荡周期, PDO 准十年的振荡可能与此有一定的联系, 但是加利福尼亚附近 SSTa 的变化与什么有关, 此区域是否是促发北太平洋准 12 年振荡形成的关键区域, 还需进一步利用混合层

温度变化方程进行收支分析，对比分析 Ekman 平流、表面湍流热通量和风驱动的海洋垂直混合对局地混合层温度变化的贡献，并进一步利用数值试验分析加利福尼亚附近海洋过程对北太平洋准 12 年振荡模态的作用。

参考文献

- Alexander M A, Bladé I, Newman M, et al. 2002. The atmospheric bridge: The influence of ENSO teleconnections on air-sea interaction over the global oceans[J]. *J. Climate*, 15(16): 2205-2231. doi: 10.1175/1520-0442(2002)015<2205: TABTIO>2.0.CO;2.
- Amaya D J. 2019. The Pacific meridional mode and ENSO: A review[J]. *Curr. Clim. Change Rep.*, 5(4): 296-307. doi: 10.1007/s40641-019-00142-x.
- Bjerknes J. 1964. Atlantic air-sea interaction[J]. *Advances in Geophysics*, 10: 1-82. doi: 10.1016/S0065-2687(08)60005-9.
- Cayan D R, Kammerdiener S A, Dettinger M D, et al. 2001. Changes in the onset of spring in the western United States[J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 82(3): 399-416. doi: 10.1175/1520-0477(2001)0822.3.CO;2.
- Cessi P, Louazel S. 2001. Decadal oceanic response to stochastic wind forcing[J]. *J. phys. Oceanogr.*, 31(10): 3020-3029. doi: 10.1175/1520-0485(2001)031<3020:DORTSW> 2.0.CO; 2.
- Chiang J C H, Vimont D J. 2004. Analogous Pacific and Atlantic meridional modes of tropical atmosphere-ocean variability[J]. *J. Climate*, 17(21): 4143-4158. doi: 10.1175/JCLI4953.1.
- Di Lorenzo E, Liguori G, Schneider N, et al. 2015. ENSO and meridional modes: A null hypothesis for Pacific climate variability[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 42(21): 9440-9448. doi: 10.1002/2015 GL066281.
- 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): 1-6. doi: 10.1029/2007GL 032838.
- Fang J B, Yang X Q. 2016. Structure and dynamics of decadal anomalies in the wintertime midlatitude North Pacific ocean-atmosphere system[J]. *Climate Dyn.*, 47(5): 1989-2007. doi: 10.1007/s00382-015-2946-x.
- Frankignoul C, Hasselmann K. 1977. Stochastic climate models, Part II: Application to sea-surface temperature anomalies and thermocline variability[J]. *Tellus*, 29(4): 289-305. doi: 10.1111 /j.2153-3490.1977.tb00740.x.
- Graham N E. 1994. Decadal-scale climate variability in the tropical and North Pacific during the 1970s and 1980s: observations and model results[J]. *Climate Dyn.*, 10(3): 135-162. doi: 10.1007/BF00210626.

- Graham N E, Barnett T P, Wilde R, et al. 1994. On the roles of tropical and midlatitude SSTs in forcing interannual to interdecadal variability in the winter northern hemisphere circulation[J]. *J. Climate*, 7(9): 1416-1441. doi: 10.1175/1520-0442(1994)007<1416:OTR OTA>2.0.CO;2.
- Gu D F, Philander S G H. 1997. Interdecadal climate fluctuations that depend on exchanges between the tropics and extratropics[J]. *Science*, 275(5301): 805-807. doi: 10.1126/science.275.5301. 805.
- Gulev S K, Latif M, Keenlyside N, et al. 2013. North Atlantic ocean control on surface heat flux on multidecadal timescales[J]. *Nature*, 499(7459): 464-467. doi: 10.1038/ nature12268.
- 韩子轩, 苏涛, 支蓉, 等. 2017. 不同太平洋年代际振荡和 ENSO 位相下大气水分收支变化对北半球冬季太平洋蒸发量的影响[J]. *大气科学*, 41(6): 1316-1331. HAN Zixuan, SU Tao, ZHI Rong, et al. 2017. Effects of moisture budget changes on pacific evaporation associated with Pacific Decadal Oscillation and ENSO in boreal winter[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 41(6): 1316-1331. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1702.16257.
- Hasselmann K. 1976. Stochastic climate models Part I: Theory[J]. *Tellus*, 28(6): 473-485. doi: 10.1111/j.2153-3490.1976.tb00696.x.
- Horel J D, Wallace J M. 1981. Planetary-Scale atmospheric phenomena associated with the Southern Oscillation[J]. *Mon. Wea. Rev.*, 109(4): 813-829. doi: 10.1175/1520-0493(1981)109<0813: PSAPAW>2.0.CO;2.
- Kleeman R, McCreary Jr J P, Klinger B A. 1999. A mechanism for generating ENSO decadal variability[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 26(12): 1743-1746. doi: 10.1029/1999GL900352.
- Latif M, Barnett T P. 1994. Causes of decadal climate variability over the North Pacific and North America[J]. *Science*, 266(5185): 634-637. doi: 10.1126/science.266.5185.634.
- 李博, 周天军, 林鹏飞, 等. 2011. 冬季北太平洋海表面热通量异常和海气相互作用的耦合模式模拟[J]. *气象学报*, 69(1): 52-63. Li Bo, ZHOU Tianjun, LIN Pengfei, et al. 2011. The wintertime North Pacific surface heat flux anomaly and air-sea interaction as simulated by the LASG/IAP ocean-atmosphere coupled model FGOALS_s1.0[J]. *Acta Meteorological Sinica (in Chinese)*, 69(1): 52-63. doi: 10.11676/qxxb2011.005.
- 梁苏洁, 丁一汇, 赵南, 等. 2014. 近 50 年中国大陆冬季气温和区域环流的年代际变化研究[J]. *大气科学*, 38(5): 974-992. LIANG Sujie, DING Yihui, ZHAO Nan, et al. 2014. Analysis of the interdecadal changes of the wintertime surface air temperature over mainland China and regional atmospheric circulation characteristics

-
- during 1960-2013[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38(5): 974-992. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1401.13234.
- Liu Z Y. 2003. Tropical ocean decadal variability and resonance of planetary wave basin modes. Part I: Theory[J]. J. Climate, 16(10): 1539-1550. doi: 10.1175/1520-0442(2003)016<1539: TODVAR>2.0.CO;2.
- 吕俊梅, 祝从文, 琚建华, 等. 2014. 近百年中国东部夏季降水年代际变化特征及其原因[J]. 大气科学, 38(4): 782-794. Lü Junmei, ZHU Congwen, JU Jianhua, et al. 2014. Interdecadal variability in summer precipitation over east China during the past 100 years and its possible causes[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38(4): 782-794. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1401.13227.
- Mantua N J, Hare S R. 2002. The Pacific Decadal Oscillation[J]. Journal of Oceanography, 58(1): 35-44. doi: 10.1023/A:1015820616384.
- 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(6): 1069-1079. doi: 10.1175/1520-0477(1997)078<1069:APICOW>2.0.CO;2.
- Miller A J, Cayan D R, Barnett T P, et al. 1994. Interdecadal variability of the pacific ocean: model response to observed heat flux and wind stress anomalies[J]. Climate Dyn., 9(6): 287-302. doi: 10.1007/BF00204744.
- Newman M, Alexander M A, Ault T R, et al. 2016. The Pacific decadal oscillation, revisited[J]. J. Climate, 29(12): 4399-4427. doi: 10.1175/JCLI-D-15-0508.1.
- Saravanan R, McWilliams J C. 1997. Stochasticity and spatial resonance in interdecadal climate fluctuations[J]. J. Climate, 10(9): 2299-2320. doi: 10.1175/1520-0442(1997)0102.0. CO;2.
- Schneider N, Miller A J, Alexander M A, et al. 1999. Subduction of decadal North Pacific temperature anomalies: Observations and Dynamics[J]. J. phys. Oceanogr., 29(5):1056-1070. doi: 10.1175/1520-0485(1999)0292.0. CO;2.
- Small R J, Bryan F O, Bishop S P, et al. 2019. Air-sea turbulent heat fluxes in climate models and observational analyses: what drives their variability?[J]. J. Climate, 32(8): 2397-2421. doi: 10.1175/JCLI-D-18-0576.1.
- Stuecker M F. 2018. Revisiting the Pacific meridional mode[J]. Sci. Rep., 8(1): 1-9. doi: 10.1038/s41598-018-21537-0.

-
- Tanimoto Y, Nakamura H, Kagimoto T, et al. 2003. An active role of extratropical sea surface temperature anomalies in determining anomalous turbulent heat flux[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 108(C10). doi: 10.1029/2002JC001750.
- Tao L F, Yang X Q, Fang J B, et al. 2020. PDO-related wintertime atmospheric anomalies over the midlatitude North Pacific: Local versus remote SST forcing[J]. *J. Climate*, 33 (16): 6989-7010. doi: 10.1175/JCLI-D-19-0143.1.
- Wang Y Q, Liu H L, Lin P F, et al. 2019. Record-low coastal sea levels in the Northeast Pacific during the winter of 2013–2014[J]. *Sci. Rep.*, 9(1): 1-8. doi: 10.1038/s41598-019-40397-w.
- Wu L X, Liu Z Y. 2003. Decadal Variability in the North Pacific: The Eastern North Pacific Mode[J]. *J. Climate*, 16(19): 3111-3131. doi: 10.1175/1520-0442(2003)016<3111:DVITNP>2.0.CO;2.
- Wu L X, Liu Z Y, Gallimore R, et al. 2003. Pacific Decadal Variability: The Tropical Pacific Mode and the North Pacific Mode[J]. *J. Climate*, 16(8): 1101-1120. doi: 10.1175/1520-0442(2003)16<1101:PDVTTP>2.0.CO;2.
- Xie S P, Philander S G H. 1994. A coupled ocean-atmosphere model of relevance to the ITCZ in the eastern Pacific[J]. *Tellus*, 46(4): 340-350. doi: 10.3402/tellusa.v46i4.15484.
- 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 Qie, et al. 2004. Advances in studies of Pacific Decadal Oscillation[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 28(6): 979-992. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2004.06.15.
- Yi D L, Gan B L, Wu L X, et al. 2018. The North Pacific Gyre Oscillation and mechanisms of its decadal variability in CMIP5 models[J]. *J. Climate*, 31(6): 2487-2509. doi: 10.1175/JCLI-D-17-0344.1.
- Yu B, Boer G. 2004. The role of the western pacific in decadal variability[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 31(2): 231-254. doi: 10.1029/2003GL018471.
- Yu L S, Weller R A. 2007. Objectively analyzed air – sea heat fluxes for the global ice-free oceans (1981 – 2005)[J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 88(4): 527-539. doi: 10.1175/ BAMS-88-4-527.
- 张雯, 董啸, 薛峰. 2020. 不同 PDO 位相下 El Niño 发展年和 La Niña 年东亚夏季风的季节内变化[J]. *大气科学*, 44(2): 390-406. ZHANG Wen, DONG Xiao, XUE Feng. 2020. Intraseasonal variations of the east Asian summer monsoon in El Niño developing years and La Niña years under different phases of the Pacific Decadal Oscillation[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 44(2): 390-406. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1910.18269.

-
- Zhang L P, Wu L X, Lin X P, et al. 2010. Modes and mechanisms of sea surface temperature low-frequency variations over the coastal China Seas[J]. *J. Geophys. Res.*, 115(C8). doi: 10.1029/2009jc006025.
- Zhang Y, Yu S, Amaya D J, et al. 2021. Pacific Meridional Modes without Equatorial Pacific Influence[J]. *J. Climate*, 34(13): 5285-5301. doi: 10.1175/JCLI-D-20-0573.1.
- Zhang Y L, Yu Y Q. 2011. Analysis of decadal climate variability in the Tropical Pacific by coupled GCM[J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 4(4): 204-208. doi: 10.1175/JCLI-D-18-0164.1/10.1080/16742834.2011.11446930.
- Zhi H, Lin P F, Zhang R H, et al. 2019. Salinity effects on the 2014 warm “Blob” in the Northeast Pacific[J]. *Acta Oceanolo. Sin.*, 38(9): 24-34. doi: 10.1007/s13131-019-1450-2.
- Zhong Y F, Liu Z Y. 2009. On the mechanism of pacific multidecadal climate variability in CCSM3: The role of the subpolar North Pacific ocean[J]. *J. Phys. Oceanogr.*, 39(9): 2052-2076. doi: 10.1175/2009JPO4097.1.
- Zhong Y F, Liu Z Y, Jacob R. 2008. Origin of pacific multidecadal variability in Community Climate System Model, Version 3 (CCSM3): A combined statistical and dynamical assessment[J]. *J. Climate*, 21(1): 114-133. doi: 10.1175/2007JCLI1730.1.
- 朱益民, 杨修群. 2003. 太平洋年代际振荡与中国气候变率的联系[J]. *气象学报*, 61(6): 641-654. ZHU Yimin, YANG Xiuqun. 2003. Relationships between the Pacific Decadal Oscillation (PDO) and climate variabilities in China[J]. *Acta Meteorological Sinica (in Chinese)*, 61(6): 641-654. doi:10.11676/qxxb2003.065.