

太平洋年代际振荡的研究进展*

杨修群¹⁾ 朱益民²⁾ 谢 倩²⁾ 任雪娟¹⁾ 徐桂玉¹⁾

1) (南京大学灾害性天气气候研究所海气相互作用研究室, 南京 210093)

2) (解放军理工大学气象学院大气科学系, 南京 211101)

摘 要 作者以太平洋年代际振荡 (PDO) 现象为重点, 系统地回顾了太平洋年代际变率观测、模拟和理论研究的国内外进展。在 PDO 时空结构方面, 总结了 PDO 的基本观测事实, 在 PDO 成因方面, 从海洋大气相互作用观点出发比较了三类 PDO 形成机制的理论或假说, 讨论了现有理论或假说中存在的若干问题, 并提出了未来研究的方向和需要解决的关键科学问题。作者也简要介绍了东亚及中国气候年代际变化的特征及其和太平洋海表温度异常的联系, 并讨论了东亚大气环流异常在 PDO 形成中的可能作用。

关键词: 太平洋; 海气相互作用; 年代际变率

文章编号 1006-9895 (2004) 06-0979-14 **中图分类号** P432 **文献标识码** A

1 引言

太平洋年代际振荡 (以下简称 PDO) 是近年来揭示的一种年代际时间尺度上的气候变率强信号^[1,2], 一方面, 它既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 (包括我国) 气候的年代际变化; 另一方面, 它又是年际变率的重要背景, 对年际变化 (如 ENSO 及其影响) 具有重要的调制作用, 可影响 ENSO 事件频率和强度, 同时也可导致年际 ENSO—季风异常关系的不稳定性 (或年代际改变)。因此, 充分认识这一现象的特征、形成机制及其与我国气候变化的联系规律, 对于理解我国气候年代际变化的成因是有重要意义的^[3~8]。

2 PDO 的基本观测特征

1976/1977 年北太平洋出现了一次显著的年代际突变现象, 直到 20 世纪 80 年代末, 这种现象才引起人们关注。先期研究主要集中于分析这一突变现象的特征及其对北太平洋和周边区域物理和生态环境的影响^[9~13]。研究表明, 这一突变现象在各类海气要素场上均有反映, 在 1976/1977 年突变以后, 在海洋方面, 热带中东太平洋海表温度 (SST) 年代际异常增高, 黑潮及其续流区 (以下简称 KOE 区) 和北太平洋中部异常变冷, 北美沿岸和阿拉斯加湾 SST 增高; 在大气方面, 北太平洋海平面气压 (SLP) 和 500 hPa 高度场明显降低, 阿留申低压异常加深、东移并偏南。

从 20 世纪 90 年代中后期开始, 人们利用近百年的海洋大气资料分析了太平洋年

代际变率的时空结构^[1,2,14~23]。图 1 给出了由 SST 异常和 SLP 异常揭示的典型 PDO 时空结构^①。研究表明,太平洋年代际信号和年际信号具有相似空间结构,即热带中东太平洋和北太平洋中纬度 SST 异常符号相反,大气异常表现为 PNA 结构;但两者的差别是,年际变率优势区位于热带太平洋,而年代际变率优势区位于中纬北太平洋,最大振幅在 KOE 区及北太平洋风暴轴附近,且与 PNA 型年代际变化密切相关。时间序列分析表明,1976/1977 年发生在北太平洋的年代际突变并不是唯一的,类似的较大突变现象同样发生在 1925 和 1947 年。这表明北太平洋存在着年代际振荡现象,且这种振荡与热带太平洋有关联,观测的分别发生在 20 世纪 20、40 和 70 年代的所谓突变事实上是这种振荡的位相转换。Mantua 等^[2]把这种太平洋年代际振荡现象称为 PDO (Pacific Decadal Oscillation),并把它描述为一种类似于 ENSO 型的具有年代尺度生命史的太平洋变率。若以太平洋海温异常作为定义, PDO 可分为冷、暖位相(或称为 PDO 冷、暖“事件”)。在 PDO 暖位相时,热带中东太平洋异常暖,北太平洋中部异常冷,而沿北美西岸却异常暖;反之,则为 PDO 冷位相。PDO 与 ENSO 的区别主要在于:(1)典型 PDO 事件可持续 20~30 年,持续时间远比 ENSO 事件长;(2)PDO 主信号在北太平洋,次信号在热带,而 ENSO 事件恰恰相反。20 世纪发生了两个完整的 PDO 循环,即冷位相:1890~1924 年和 1947~1976 年,暖位相:1925~1946 年和 1977~1998 年。PDO 的大气方面对应北太平洋涛动即 NPO,在 PDO 暖位相,阿留申低压异常降低,而北美西部和副热带太平洋地区气压异常升高。20°N 以北北太平洋 SST 异常第一主分量被定义为 PDO 指数,而阿留申低压指数^[12]一般被用于描述北太平洋气压变化,观测表明,至少从 20 世纪 20 年代起 PDO 指数与阿留申低压指数在位相上有显著的对应关系,因此, PDO 在海洋—大气系统中的一致性变化表明这一现象是海气相互作用的产物。

近年来的研究表明, PDO 具有多重时间尺度性,主要表现为准 20 年周期和准 50 年周期。准 20 年振荡特征可从许多分析结果得到印证,如局地气温、水温和混合层深度变化^[18,24~26],以及海盆尺度或全球 SST 和 SLP 场^[27~32];近 400 年树木年轮代用资料重建的 PDO 指数分析也表明 PDO 具有准 20 年振荡周期分量^[33]。对于准 50 年振荡分量,也可从 18~19 世纪美国和加拿大的树木年轮记录中得以检测,但估计出的振荡周期为 50~70 年^[34],比 20 世纪仪器记录分析的周期略长^[35~38]。通过对阿留申低压指数和 PDO 指数的分析发现,20 世纪北太平洋三次年代际位相转换时,准 50 年振荡和准 20 年振荡的转换表现为同步^[39],但准 50 年振荡和准 20 年振荡具有明显的季节差异性^[39,40];另外,准 20 年振荡模态的时空演变结构与准 50 年振荡也有所不同^[19]。这些特征预示着这两种时间尺度振荡模态可能源于不同的物理机制。

PDO 对年际变率有明显的调制作用。分析表明:对应不同的年代际背景,年际 ENSO 空间结构^[41]、El Niño 发生频率与强度^[42]及 El Niño 发生特点^[43]均表现显著的差异;从 19 世纪末到 20 世纪 20 年代 ENSO 循环的方差较大,1920~1950 年处在相对较弱的时期,随后加强至今^[44,45]; ENSO 年代际变率与温盐环流 (THC) 变化可能有联系,THC 强时 El Niño 频率可能低,THC 弱时 El Niño 频率可能高^[46]。不过,年际

① 朱益民、杨修群,太平洋年代际振荡与中国气候变率的联系规律,气象学报,2003.

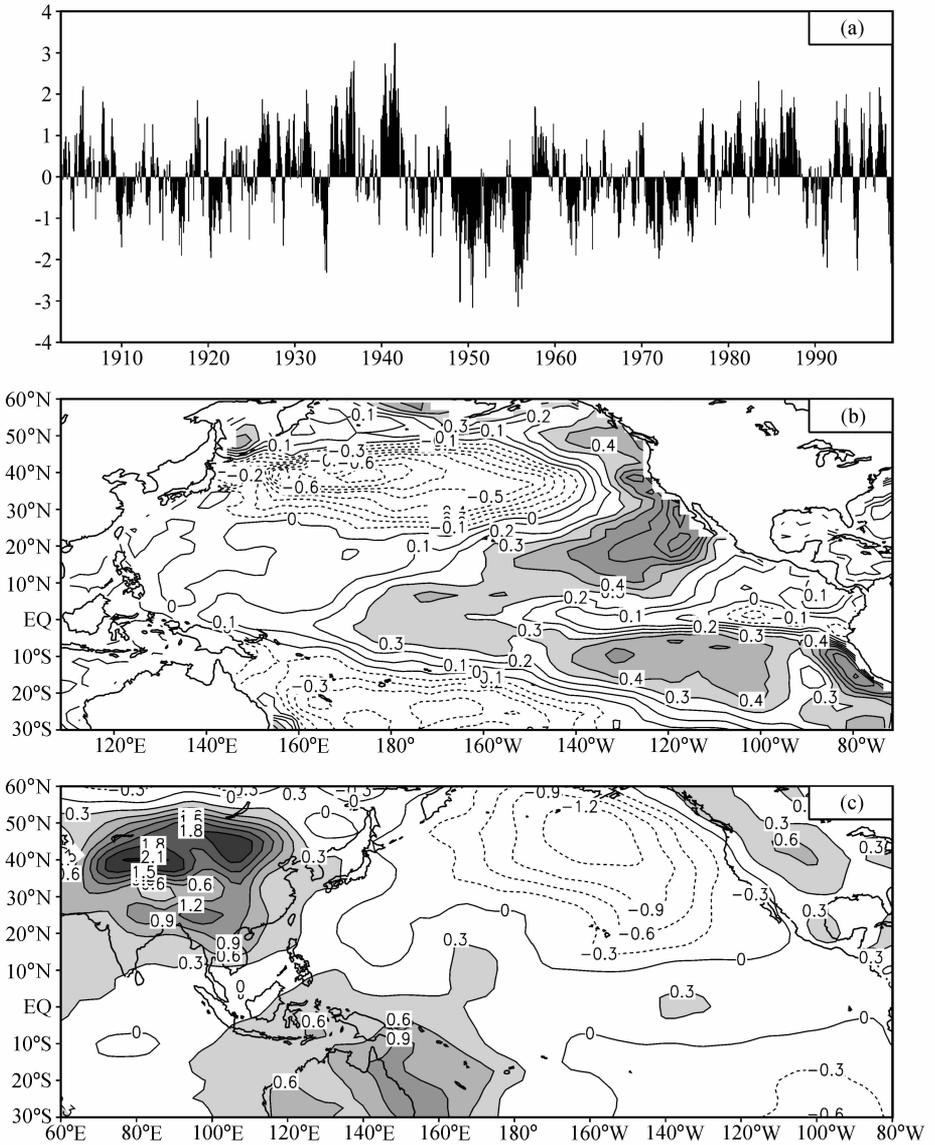


图1 1903~1998年间标准化的PDO指数时间序列 (a), 1950~1998年间海表温度 (SST) 距平 (b) 和 海平面气压 (SLP) 距平 (c) 对PDO指数的回归系数分布

PDO指数是1903~1998年20°N以北北太平洋SST距平(GISST资料)EOF第一模态的标准化时间系数, 回归所用SST资料选自Maryland大学海洋同化分析资料(SODA6), SLP资料选自NCEP/NCAR再分析资料

与年代际变率之间的相互关系可能是非线性的^[1,13]。PDO对年际变率的调制作用还表现在: 当阿留申低压处于较强的平均态时, 其冬季年际变率增强, 这在SLP、500 hPa高度场、SST和风场中都有一致反映; ENSO对北美气候的遥相关影响很大程度上依赖于PDO的位相, 典型的El Niño和La Niña影响只在ENSO与PDO同位相时(即暖PDO+El Niño或冷PDO+La Niña)才有效^[47,48]。

3 中国气候年代际变化及其和太平洋 SST 关系

近百年来,中国气候经历了显著的年代际变化^[49],但区域差异很大^[50,51]。例如,20世纪80年代中国降水气温异常特点是,华北暖干,西南冷干,东北是暖略偏湿,长江中下游则冷湿,西北暖湿;长江、淮河流域从70年代末起降水明显增多,涝灾增多,而华北和华南地区降水明显比70年代少^[52],而90年代是长江中下游地区近百年来降水最多的十年^[53];华北到东北近百年降水中存在明显的准20年振荡^[54],1883~1898年和1949~1964年是华北降水较丰沛时期,1899~1920年和1965~1997年华北降水处于偏少时期,其中1980~1993年降水持续偏少,干旱现象严重^[55]。近500年中国降水等级资料分析表明,我国华北夏季降水和东亚夏季风存在约80年周期的振荡^[56]。

中国区域气候年代际变化与大尺度环流的年代际变化相联系。北半球冬季主要大气活动中心在近百年内发生了3次气候突变,突变时间和PDO位相转换一致^[57];冬季西伯利亚高压20世纪60年代到70年代强度偏强,80年代以来则持续偏弱^[58],和我国冬季气温变化一致^[59]。对应于我国气候年代际变化的不同阶段,大气环流形势表现出明显差异^[59],对于多雨的20世纪50年代,西太平洋副高偏北偏西,东亚沿海高空槽偏浅,而巴尔喀什湖的高空槽偏深;相反,对于少雨的20世纪80年代,形式则相反。1958~1975年东亚夏季风总体偏强,1976~1993年东亚夏季风偏弱^[60],因此,东亚夏季风具有与北太平洋海温一致的年代际变化特点。在20世纪70年代末之后,亚洲和非洲季风环流变弱,同时热带东太平洋信风也变弱,这次转变的时间尺度在20年以上^[61]。此外,研究还发现东亚夏季风和ENSO的相互关系存在明显的年代际变化,在二者关系紧密时期和微弱时期夏季大气环流的年际变率有显著差别,并且中国夏季降水和ENSO的关系也有明显差异^[62]。

中国气候异常与太平洋海温年代际变化有明显联系。北太平洋海温跃变前(即1976/1977年以前),我国汛期降水在东北地区偏少,华北地区偏多,长江流域偏少,华南偏多;而跃变后则相反^[63]。ENSO对中国降水的影响不仅与ENSO发展的不同阶段有关,还与太平洋海温的年代际背景有密切关系^[64,65],在年代际冷、暖背景下,ENSO和东亚季风区降水的关系不同。东亚夏季风与北太平洋SST异常之间的关系存在年代际变化特征,1976年以前,华北地区夏季降水偏多,北太平洋海温异常可能起主要作用;而1976年以后,北太平洋海温异常与东亚夏季风关系不明显,赤道中东太平洋变得更重要,出现所谓年际异常的海温关键区发生年代际转移^[60]。我国气候异常对黑潮区及中纬度北太平洋海温异常也有响应,春季黑潮区正SSTA造成春季北极低涡明显减弱,欧亚大陆中高纬地区纬向环流加强,西太平洋副高位置偏北偏西,且存在负PNA型异常环流型,华北地区夏季多雨;反之,则少雨干旱^[66]。中纬度北太平洋大范围SST降低,造成东北地区降水偏多,而我国40°N以南大部分地区降水偏少^[67]。

4 PDO 形成机制的目前观点

人们对太平洋年代际变率研究的时间还很短,由于缺少全面系统的研究,对太平

洋 PDO 成因尚未定论。已有研究表明, PDO 是海气系统内部自然振荡, 并涉及与上层海洋热力调整有关的若干慢变物理过程, 如海洋 Gyre (以下译为“涡旋”) 输送、Rossby 波传播、Subduction (以下译为“潜沉”) 输送等。海气相互作用和温盐环流是海洋年代际变率产生的两个主要原因, 但和大西洋不同的是, 太平洋温盐环流很弱, 所以海气相互作用是人们理解 PDO 形成机制的主要方向。目前, 国际上有关 PDO 形成机制问题存在许多不成熟的观点或假说^[68,69], 国外一般将其分成两类: 确定性理论和随机强迫理论^[68,69]。经归纳, 我们从 PDO 产生的源地将这些观点可分为三类:

第一类观点认为 PDO 可能源于热带海气耦合系统内部。热带年代际振荡通过遥相关过程影响中纬度海洋和大气。部分海气耦合模式已显示有能力产生热带海气系统内部固有的年代际变率^[70~73]。热带海气系统本身可以产生年代际变率的原因目前并不清楚, 随机强迫和非线性效应可能是重要的, 热带耦合系统可能存在一种甚低频模态, 对热带年代际变率作出贡献^[74]。通过大气遥相关(如 PNA 型)是热带年代际变率影响中纬度的一个途径, 类似于年际 ENSO 的影响过程。例如, 热带东太平洋偏暖, 则导致中纬度西风偏强, 阿留申低压增强, 通过增强表面热通量、向南的 Ekman 平流输送及下层冷水混合, 使得中纬度海表变冷。早期的研究即用这一遥相关过程来解释北太平洋 1976/1977 年的气候突变^[11,75~78]。通过海洋遥相关是热带年代际变率影响中纬度的另一途径。沿海盆东边界的边界 Kelvin 波向极地方向传播, 可能使热带和中纬度东边界区域保持信息联系, 这些沿东边界由热带传播到中纬度东边界处的波动, 可能发射西传斜压 Rossby 波, 从而影响到整个中纬度太平洋^[79~82]。海洋、大气遥相关过程对中纬度年代际变化影响的相对贡献还不清楚, 但一般认为海洋遥相关过程对北美沿岸的影响可能更为重要。

第二类观点认为 PDO 可能源于中纬度海气耦合系统内部。有两个可能原因: 一是沿着风暴轴附近的高频随机大气强迫; 另一是中纬度海洋大气相互作用。随机大气强迫观点认为大气随机强迫可以驱动海洋的长期变化, 即白噪声的表面通量强迫可以导致具有红噪声谱特征的 SST 变化^[83~86]; 在合适的条件下, 通过随机共振机制, 即使不存在海气耦合, 随机模式也能解释海洋年代尺度谱峰^[85,87~89]。由随机理论描述的北太平洋年代际谱特征和观测的谱特征具有可比性, 它可能给出了海洋低频变化谱的一种零级近似特征或背景场^[90]。中纬度海气相互作用产生年代际振荡的观点认为, 中纬度海洋变冷(增暖)和阿留申低压及伴随的纬向西风增强(减弱)通过某种过程构成一种正反馈, 而副热带海洋涡旋(subtropical gyre)对风应力旋度变化的延迟响应形成一种滞后的负反馈, 因为副热带海洋涡旋的缓慢调整远远落后于大气风应力变化, 所以产生年代际振荡^[91,92], 振荡的时间尺度取决于副热带海洋涡旋的热力调整时间。当副热带海洋涡旋异常强时, 把暖的热带海水输向中纬, 在中纬度造成 SST 正距平; 大气对 SST 正距平的响应通过某种过程使阿留申低压和纬向西风减弱, 从而进一步加强正 SST 距平; 然而, 西风减弱导致风暴轴南部风应力旋度减弱, 从而使副热带海洋涡旋减弱, 因此, 西边界流向极地的热量输送减弱, 使 KOE 区 SST 下降, 抵消原先 SST 正距平。副热带海洋涡旋的缓慢调整涉及两个可能的物理过程, 一是大气风应力旋度变化强迫产生斜压 Rossby 波向西传播, 在若干年后到达西边界, 从而影响副热带涡旋西边界流向极地输送及向 KOE 区的热量输送; 另一是副热带涡旋环流对温度的平

流输送过程^[93]。在 Latif 和 Barnett 提出这一可能机制（以下简称“Latif-Barnett 假说”）之后，一系列简单理论模式研究分析或模拟了这一类机制^[87,89,94~101]，结果表明，北太平洋对风应力滞后响应（即温跃层调整）的特征时间决定了振荡的周期，而海洋和大气之间的反馈强度决定了振荡是自激的还是指数衰减的。

第三类观点将热带和中纬度联系起来作为一个整体考虑，认为热带和中纬度相互作用形成了 PDO，其中热带不稳定海气相互作用起着信号放大作用。Gu 和 Philander^[102]提出了一种热带和中纬度相互作用的机制（以下简称“Gu-Philander 假说”），其中热带影响中纬度是通过大气 PNA 遥相关途径，而中纬度影响热带是通过海洋信号沿等密度面（isopycnals）传播的潜沉通道（subduction pathway）^[103~108]。根据这一假说，初始的热带 SST 暖异常通过大气遥相关导致中纬度西风增强，通过增加表面蒸发和 Ekman 效应，驱动中纬度太平洋产生 SST 冷异常，这一异常冷水在中纬度“通风区”潜沉到温跃层，然后沿着等密度面随着平均环流流向热带，一旦这种冷的潜沉海水几年后到达热带，则可能会上翻到表层，然后通过热带不稳定海气相互作用放大，引起热带 SST 变冷，从而使原先的 SST 异常变号，从而形成年代际振荡。显然，Gu-Philander 假说中年代际振荡的时间尺度取决于信号沿潜沉通道从中纬度传播到热带的的时间。支持 Gu-Philander 假说的观测证据是 1970~1991 年期间北太平洋次表层确实存在一个冷的温度距平沿等密度面缓慢地向赤道传播的现象^[109]，三维结构显示异常信号沿等密度面从夏威夷北部的副热带潜沉区的混合层向西南、向下可传播到低纬西太平洋 200 m 深的温跃层，但只能到达 20°N^[103,110]。热带和中纬度相互作用的机制还有一些与 Gu-Philander 假说不同的观点，即不通过潜沉通道来实现热带和中纬度的联系。例如，Lysne 等^[111]提出热带遥相关能强迫中纬度温跃层振荡，并以 Rossby 波向西传到西边界，如果这些 Rossby 波能与向赤道传播的沿岸截陷 Kelvin 波耦合，则热带将受这一过程影响；White 和 Cayan^[32]提出，副热带太平洋东部海洋上层平均环流将 SST 异常从中纬向热带平流，从而闭合大气遥相关和海洋热量平流的年代反馈循环；Kleeman 等^[112]提出热带遥相关引起中纬度风应力异常，造成副热带环流调整，从而形成年代信号，调制着温跃层中的向赤道输送速度，从而对热带提供一种反馈；Jin 等^[100]指出副热带 Rossby 波对赤道地区热容量在年代际时间尺度上起 recharge（“再充电”）作用，它们将质量从副热带海洋涡旋输送到热带涡旋，副热带海洋 Rossby 波使热带和副热带涡旋之间交换质量和热量。

5 PDO 形成机制中没有解决的若干问题

PDO 形成机制并未定论，我们认为存在以下主要问题：

(1) **PDO 起源于热带的观点值得怀疑。**第一类观点假设 PDO 起源于热带海气系统内部，这一观点似乎可解释 PDO 空间结构关于赤道的南北对称性^[113,114]，但却无法解释 PDO 在中纬度占优的观测特征；同时，用热带海洋热力调整特征时间尺度也难以解释 PDO 准 20 年和准 50 年周期特征。Giese 和 Carton^[17]利用近 40 年海洋同化资料分析指出，年际变率在热带由正反馈过程控制，在中纬度海洋由负反馈控制，故热带年际变率最大；而年代际变率在热带由负反馈过程控制，在中纬度海洋由正反馈控制，故

中纬度年代际变率最大。因此，热带海气系统对 PDO 形成的贡献值得研究。

(2) 中纬度海气相互作用的 **Latif-Barnett 假说与观测事实不符**。第二类观点提出了 PDO 源于中纬度海气相互作用的可能机制，即 Latif-Barnett 假说。按照这一假说，一个初始的增强的阿留申低压，通过和北太平洋中部 SST 冷异常的正反馈而使信号发展，其南部增强的风应力旋度强迫将使副热带海洋 Gyre 增强，导致其在西边界向 KOE 区（黑潮及其续流区）暖水输送的增强，几年之后将导致 KOE 区增暖，从而抵消原先的中部 SST 冷异常，因此，KOE 区 SST 异常超前于北太平洋中部 SST 异常。然而，观测事实是：1976/1977 年北太平洋经历了一次年代际突变，北太平洋中部变冷，5 年之后，其西部的 KOE 区 SST 也开始降低^[13,109,115~118]。显然，Latif-Barnett 假说和观测事实不符。观测到的 KOE 区 SST 变化滞后于北太平洋中部 SST 变化的原因还不清楚，值得研究。

(3) 相对于副热带海洋涡旋，副极地海洋涡旋的作用未被认识。Latif-Barnett 假说及相关研究一般只强调风应力旋度强迫下的具有顺时针旋转特征的副热带海洋涡旋 (subtropical gyre) 的调整过程，并把它作为北太平洋 SST 异常的延迟负反馈机制，然而，风应力变化也可能导致具有逆时针旋转特征的副极地海洋涡旋 (subpolar gyre) 的调整。假设初始时，阿留申低压异常强，并导致北太平洋中部异常冷，风应力强迫将增强副极地涡旋区的 Ekman 上翻和副热带涡旋区的 Ekman 下沉，增强这两个海洋涡旋及其西部边界流；此时，如果以副热带涡旋热量输送为主，则 KOE 区几年后应变暖，抵消北太平洋中部原先的冷异常，起负反馈作用，但是，正如前文所述，这与观测不符；如果以副极地涡旋热量输送为主，则 KOE 区几年后应变冷，使北太平洋中部原先冷异常西移，这与观测相符，因此，副极地涡旋的作用似更为重要。副极地涡旋的调整过程及其和副热带涡旋对 PDO 的相对贡献值得研究。考虑了副极地海洋涡旋的延迟反馈作用后，中纬度海气相互作用的延迟负反馈过程值得进一步寻找。另外，海洋涡旋对热量的输送涉及平流过程和 Rossby 波传播过程，到底哪一过程对 SST 变化起支配作用，也需研究确定。

(4) 中纬度 SST 与大气的正反馈过程并未确定。许多研究都假定中纬度 SST 变冷（增暖）和阿留申低压增强（减弱）构成一种正反馈，而事实上，中纬度 SST 与大气的这一正反馈过程并不确定^[119]，大气对中纬度 SST 异常响应是否敏感并不很清楚。虽然大气对 KOE 区 SST 异常响应是敏感的，但依赖于背景态^[120~122]。如果不考虑副热带海洋涡旋的响应，则大气对 KOE 区 SST 异常的不同响应情况可能导致三种不同的结果：一是如果 KOE 区冷的 SST 导致阿留申低压增强，则通过增强副极地海洋涡旋在西部向南的冷水输送，将导致一个正反馈，一个持续冷的状态将建立；二是如果 KOE 区冷的 SST 导致阿留申低压减弱，则通过减弱副极地海洋涡旋在西部向南的冷水输送，将导致一个负反馈，年代际振荡有可能产生；三是如果 KOE 区冷的 SST 导致大气的响应不能影响阿留申低压，则不能形成一个闭合的海气相互作用循环，这时大气随机强迫可能变得重要^[88]。总之，对于确定北太平洋年代际变率是中纬度海气耦合模态还是对大气随机强迫的响应，大气对 KOE 区 SST 的敏感性是一个十分关键的问题，值得深入研究。

(5) **中纬度和热带信息相互联系的一些关键过程未被确定。**对于热带如何影响中纬度,大气桥(即热带 SST 异常通过大气 PNA 型遥相关影响中纬度大气和海洋)的作用已被明确,该过程可合理解释热带和中纬度 SST 异常变化同步且反号的原因;而海洋遥相关(即信息沿海洋东边界从赤道向中高纬度传播)的过程及其对中纬度 SST 变化作怎样的贡献,仍需仔细研究认识。对于中纬度如何影响热带,涉及两类可能的海洋过程:即潜沉和 Rossby 波。中纬度信号沿等密度面通过潜沉通道可能传播到热带温跃层,但观测显示,异常信息通过潜沉通道由中纬度传播到达低纬 18°N 之前就消失了。因此,通过潜沉将中纬度和赤道直接联系起来还不能为观测所证实。而依赖于中纬度潜沉而产生的年代际模态目前也没有在具有完全物理过程的海气耦合环流模式中发现。潜沉传播来的异常信息如何及能否有效地影响赤道区域并产生赤道表层异常仍是疑问。因此,基于潜沉传播并将其作为延迟负反馈的 Gu-Philander 假说有其局限性,该假说依靠热带海气正反馈维持异常信号的发展也难以揭示 PDO 的中纬度占优性。中纬度风应力旋度强迫的 Rossby 波西传到达西边界可能和向赤道传播的边界 Kelvin 波耦合,从而将中纬度信号和热带联系起来^[100,111,123],这一过程也有待验证。对于中纬度如何影响热带,过去研究几乎没有注意通过大气桥的作用,这种作用可能和东亚环流相联系,需仔细探索。

(6) **PDO 准 20 年和准 50 年时间尺度性成因不清楚。**过去研究提出的机制均是针对准 20 年时间尺度而言的,即考虑的是海洋热力调整时间尺度在准 20 年的一些过程,这些过程主要涉及与北太平洋海洋涡旋调整有关的中纬度局地延迟负反馈过程。对准 50 年振荡模态机制几乎没有研究,系统研究它与准 20 年模态结构和演变特征差异,进而揭示这一时间尺度振荡的形成机制将是有意義的。准 50 年振荡模态可能涉及一个更长时间尺度的热力调整过程,其涉及的负反馈可能不是中纬度北太平洋局地过程,而很有可能涉及到一个从中纬度到热带再到中纬度的海洋异常的远程延迟负反馈过程,寻找和揭示这一负反馈途径对于理解准 50 年振荡模态的形成是至关重要的。

(7) **东亚气候变化与 PDO 的联系规律和机制未被注意。**以往研究对于中纬度影响热带的环节只考虑了海洋而几乎忽略了大气。Pierce 等^[124]在研究中纬度对热带影响时认为,在沿等密面平流、Rossby 波传播、通过大气联系这三种可能机制中,通过大气联系是最直接的。中纬度海洋异常可以影响西风带槽脊系统,进而影响热带大气系统。我们预研究显示,阿留申低压和蒙古高压具有年代际“Seesaw”同步变化特征,即阿留申低压增强(对应中纬度 SST 偏冷),则蒙古高压也增强(但东西伯利亚高压减弱),赤道西风增强,热带东太平洋偏暖。反之亦然。因此,阿留申低压—蒙古高压同步变化通过东亚大气环流可能是中纬度北太平洋影响热带的—个大气桥梁。—问题既是 PDO 影响我国气候年代际变化的—个切入点,又是理解 PDO 机制的—个重要环节,值得研究。—系列研究揭示了 PDO 对北美气候的影响^[1,2],但几乎没有研究关注 PDO 与我国气候变率的关系。我们的预研究表明, PDO 指数与东亚区域 SLP、中国降水和气温年代际变化存在密切的回归关系。同时,我国学者的研究^[61,62]已注意到太平洋年代际变化作为年际气候变化的背景可以影响季风—ENSO 关系的稳定性。因此,分析 PDO 与我国气候变化的关系是有意義的。

6 结束语

总而言之,由以上国内外研究现状分析可知,尽管近年来对 PDO 的基本观测特征已有许多分析研究,但其涉及的物理过程及其形成机制研究还很不充分,中纬度海气相互作用的关键环节及其物理过程并没有被很好地认识清楚, PDO 形成机制有待深入研究揭示。我们建议以中纬度海气相互作用为重点,研究弄清中纬度海洋大气不稳定相互作用的发生原理,弄清副极地海洋涡旋和副热带海洋涡旋对风应力异常的延迟响应特征,弄清中纬度异常影响热带及热带异常影响中纬度的途径和过程,弄清东亚大气环流在中纬度-热带联系中的桥梁作用及 PDO 与我国气候变化的关系,特别是通过揭示海洋涡旋的局地延迟负反馈过程和寻找从中纬度到热带、从热带再到中纬度的远程延迟负反馈过程,来揭示 PDO 的准 20 年和准 50 年周期的时间尺度选择机制。通过这些研究,有望揭示 PDO 的形成机制及其与我国气候变化的关系。

参 考 文 献

- 1 Zhang, Y., J. M. Wallace, and D. S. Battisti, ENSO-like interdecadal variability: 1900-93, *J. Climate*, 1997, **10**, 1004~1020.
- 2 Mantua, N. J., S. R. Hare, Y. Zhang, et al., A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1997, **78**, 1069~1079.
- 3 徐建军、朱乾根、施能,年代际气候变率问题的研究,南京气象学院学报,1996, **19** (4), 488~495.
- 4 王黎娟、何金海,海温的年际和年代际变化及其对东亚季风影响的国内研究进展,气象教育和科技,1998, **46**, 24~29.
- 5 王绍武、朱锦红,国外关于年代际气候变率的研究,气象学报,1999, **57** (3), 376~383.
- 6 李崇银,气候动力学引论(第二版),北京:气象出版社,2000, 421~448.
- 7 江志红、屠其璞、施能,年代际气候低频变率诊断研究进展,地球科学进展,2000, **15** (3), 342~347.
- 8 王绍武,现代气候学研究进展,北京:气象出版社,2001, 348~370.
- 9 Quinn, W. H., and V. T. Neal, Recent climate change and the 1982-1983 El Niño, *Proc. Eighth Annual Climate Diagnostic Workshop*, Downsville, 1984, 148~154.
- 10 Nitta, T., and S. Yamada, Recent warming of tropical sea surface temperature and its relationship to the Northern Hemisphere circulation, *J. Meteor. Soc. Japan*, 1989, **67**, 375~383.
- 11 Trenberth, K. E., Recent observed interdecadal climate changes in the Northern Hemisphere, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1990, **71**, 988~993.
- 12 Trenberth, K. E., and J. W. Hurrell, Decadal atmosphere-ocean variations in the Pacific, *Climate Dyn.*, 1994, **9**, 303~319.
- 13 Deser, C., and M. L. Blackmon, On the relationship between tropical and North Pacific sea surface temperature variations, *J. Climate*, 1995, **8**, 1677~1680.
- 14 Zhang, Y., J. R. Norris, and J. M. Wallace, Seasonality of large-scale atmosphere-ocean interaction over the North Pacific, *J. Climate*, 1998, **11**, 2473~2481.
- 15 Zhang, X. B., J. Sheng, and A. Shabbar, Modes of interannual and interdecadal variability of Pacific SST, *J. Climate*, 1998, **11**, 2556~2569.
- 16 Mestas-Nunez, A. M., and D. B. Enfield, Rotated global modes of non-ENSO sea surface temperature variability, *J. Climate*, 1999, **12**, 2734~2746.

- 17 Giese, B. S. , and J. A. Carton, Interannual and decadal variability in the tropical and midlatitude Pacific Ocean, *J. Climate*, 1999, **12** (12), 3402~3418.
- 18 Tourre, Y. , Y. Kushnir, and W. B. White, Evolution of interdecadal variability in sea level pressure, sea surface temperature, and upper ocean temperature over the Pacific Ocean, *J. Phys. Oceanogr.* , 1999, **29**, 1528~1541.
- 19 Chao, Y. , M. Ghil, and J. C. McWilliams, Pacific interdecadal variability in this century's sea surface temperature, *Geophys. Res. Lett.* , 2000, **27**, 2261~2264.
- 20 Tomita, T. , B. Wang, T. Yasunari, and H. Nakamura, Global patterns of decadal-scale variability observed in sea surface temperature and lower-tropospheric circulation fields, *J. Geophys. Res.* , 2001, **106**, 26805~26815.
- 21 Barlow, M. , S. Nigam, and E. H. Berbery, ENSO, Pacific decadal variability, and US summertime precipitation, drought, and stream flow, *J. Climate*, 2001, **14**, 2105~2128.
- 22 Stephens, C. , S. Levitus, J. Antonov et al. , On the Pacific Ocean regime shift, *Geophys. Res. Lett.* , 2001, **28** (19), 3721~3724.
- 23 Tourre, Y. M. , B. Rajagopalan, Y. Kushnir et al. , Patterns of coherent decadal and interdecadal climate signals in the Pacific basin during the 20th century, *Geophys. Res. Lett.* , 2001, **28**, 2069~2072.
- 24 Royer, T. C. , Upper ocean temperature variability in the northeast Pacific: is it an indicator of global warming? *J. Geophys. Res.* , 1989, **94**, 18175~18183.
- 25 Lagerloef, G. S. E. , Interdecadal variations in the Alaska Gyre, *J. Phys. Oceanogr.* , 1995, **25**, 2242~2258.
- 26 Polovina, J. , G. T. Mitchum, and G. T. Evans, Decadal and basin-scale variations in mixed layer depth and the impact on biological production in the Central and North Pacific, *Deep-Sea Research I*, 1995, **42**, 1701~1716.
- 27 Ghil, M. , and R. Vautard, Interdecadal oscillations and the warming trend in global temperature time series, *Nature*, 1991, **350**, 324~327.
- 28 Kawamura, R. , A rotated EOF analysis of global sea surface temperature variability with interannual and interdecadal scales, *J. Phys. Oceanogr.* , 1994, **24**, 707~715.
- 29 Mann, M. E. , and J. Park, Global-scale modes of surface temperature variability on interannual to century timescale, *J. Geophys. Res.* , 1994, **99**, 25819~25833.
- 30 Mann, M. E. , J. Park, and R. S. Bradley, Global interdecadal and century scale climate oscillations during the past five centuries, *Nature*, 1995, **378**, 266~270.
- 31 Mann, M. E. , and J. Park, Joint spatiotemporal modes of surface temperature and sea level pressure variability in the Northern Hemisphere during the last century, *J. Climate*, 1996, **9**, 2137~2162.
- 32 White, W. B. , and D. R. Cayan, Quasi-periodicity and global symmetries in interdecadal upper ocean temperature variability, *J. Geophys. Res.* , 1998, **103**, 21335~21354.
- 33 Biondi, F. , G. Alexander, and D. R. Cayan, North Pacific decadal climate variability since 1661, *J. Climate*, 2001, **14**, 5~10.
- 34 Minobe, S. , A 50-70 year climatic oscillation over the North Pacific and North America, *Geophys. Res. Lett.* , 1997, **24**, 683~686.
- 35 Ware, D. M. , A century and a half of change in the climate of the NE Pacific, *Fisheries Oceanography*, 1995, **4**, 267~277.
- 36 Shabalova, M. V. , and S. L. Weber, Patterns of temperature variability on multidecadal to centennial timescales, *J. Geophys. Res.* , 1999, **104**, 31023~31041.
- 37 Ware, D. M. , and R. E. Thomson, Interannual and multidecadal timescale climate variations in the northeast Pacific, *J. Climate*, 2000, **13**, 3209~3220.
- 38 Gedalof, Z. , and D. J. Smith, Interdecadal climate variability and regime-scale shifts in Pacific North America, *Geophys. Res. Lett.* , 2001, **28** (8), 1515~1518.
- 39 Minobe, S. , Resonance in bidecadal and pentadecadal climate oscillations over the North Pacific: role in climatic regime shifts, *Geophys. Res. Lett.* , 1999, **26**, 855~858.

- 40 Minobe, S., Spatio-temporal structure of the pentadecadal variability over the North Pacific, *Progress in Oceanography*, 2000, **47**, 381~408.
- 41 Tanimoto, Y., N. Iwasaka, K. Hanawa et al., Characteristic variations of sea surface temperature with multiple time scales in the North Pacific, *J. Climate*, 1992, **6**, 1153~1160.
- 42 Trenberth, K. E., and T. J. Hoar, The 1990-1995 El Niño-Southern Oscillation event: Longest on record, *Geophys. Res. Lett.*, 1996, **23**, 57~60.
- 43 Wang, B., Interdecadal changes in El Niño onset in the last four decades, *J. Climate*, 1995, **8**, 267~285.
- 44 Rasmusson, E. M., Wang Xueliang, and C. G. Topolewski, Secular variability of the ENSO cycle, Natural Climate Variability on Decade-to-Century Time Scales, National Research Council, 1995, 458~471.
- 45 Wallace, J. M. et al., On the structure and evolution of ENSO-related climate variability in the tropical Pacific: Lessons from TOGA, *J. Geophys. Res.*, 1998, **103**, 14241~14259.
- 46 Gray, W. M., The Atlantic Ocean thermohaline circulation as a driver for multi-decadal variations in El Niño intensity and frequency, In: Proceedings of Twenty-Third Annual Climate Diagnostics and Prediction Workshop, October 26~30, US Department of Commerce, NOAA, 1999, 54~57.
- 47 Gershunov, A., and T. P. Barnett, Interdecadal modulation of ENSO teleconnection, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1998, **79**, 2715~2725.
- 48 Minobe, S., and N. Mantua, Interdecadal modulation of interannual atmospheric and oceanic variability over North Pacific, *Progress in Oceanography*, 1999, **43**, 163~192.
- 49 王绍武, 近百年气候变化与变率的诊断研究, *气象学报*, 1994, **52** (3), 261~273.
- 50 施能、陈家其、屠其璞, 中国近 100 年来 4 个年代际的气候变化特征, *气象学报*, 1995, **53** (4), 431~439.
- 51 陈隆勋, 中国近 45 年来气候变化的研究, *气象学报*, 1998, **56** (3), 257~271.
- 52 黄荣辉、徐予红、周连童, 我国夏季降水的年代际变化及华北干旱化趋势, *高原气象*, 1999, **18** (4), 465~476.
- 53 龚道溢、王绍武、朱锦红, 1990 年代长江中下游地区多雨的机制分析, *地理学报*, 2000, **55** (5), 567~575.
- 54 严中伟, 华北降水年代际振荡及其与全球温度变化的联系, *应用气象学报*, 1999, **10**, 16~22.
- 55 张庆云, 1880 年以来华北降水及水资源的变化, *高原气象*, 1999, **18** (4), 486~495.
- 56 Zhu, J. H., and S. W. Wang, 80 yr oscillation of summer rainfall over North China and East Asian summer monsoon, *Geophys. Res. Lett.*, 2002, **29** (14), Art. No., 1672.
- 57 朱乾根、施能等, 近百年北半球冬季大气活动中心的长期变化及其与中国气候变化的关系, *气象学报*, 1997, **55** (6), 750~758.
- 58 龚道溢、王绍武, 西伯利亚高压的长期变化及全球变暖可能影响的研究, *地理学报*, 1999, **54** (2), 125~133.
- 59 李崇银、李桂龙、龙振夏, 中国气候年代际变化的大气环流形势对比分析, *应用气象学报*, 1999, **10** (增刊), 1~8.
- 60 李峰、何金海, 北太平洋海温异常与东亚夏季风相互作用的年代际变化, *热带气象学报*, 2000, **16** (3), 260~271.
- 61 Wang Huijun, The weakening of the Asian monsoon circulation after the end of 1970's, *Adv. Atmos. Sci.*, 2001, **18** (3), 374~386.
- 62 Wang Huijun, The instability of the East Asian summer monsoon-ENSO relations, *Adv. Atmos. Sci.*, 2002, **19** (1), 1~11.
- 63 于淑秋、林学椿, 北太平洋海温的气候跃变及其对中国汛期降水影响, *热带气象学报*, 1997, **13** (3), 265~275.
- 64 朱乾根、徐建军, ENSO 及其年代际异常对中部气候异常影响的观测分析, *南京气象学院学报*, 1998, **21** (4): 615~623.
- 65 徐建军、朱乾根, ENSO 及其年代际异常对全球及亚洲季风降水影响的数值研究, *气象学报*, 1999, **57** (3), 302~315.

- 66 朱平盛、张苏平, 华北夏季旱涝的前期环流异常及其与北太平洋海温的关系, *应用气象学报*, 1997, **8** (4), 438~443.
- 67 朱平盛、张苏平、胡桂芳, 北太平洋海温异常对我国降水影响的数值试验, *气象*, 2000, **26** (5), 3~8.
- 68 Latif, M., Dynamics of interdecadal variability in coupled ocean-atmosphere models, *Beyond El Niño, Decadal and Interdecadal Climate Variability*, Antonio Navarra (Ed.), Springer-Verlag, 1999, 213~250.
- 69 Miller, A. J., and N. Schneider, Interdecadal climate regime dynamics in the North Pacific Ocean: theories, observations and ecosystem impacts, *Progress in Oceanography*, 2000, **47**, 355~379.
- 70 Cane, M. A., S. E. Zebiak, and Y. Xue, Model studies of the long-term behavior of ENSO, *Natural Climate Variability on Decade-Century Time Scales*, edited by D. G. Martinson et al., National Academy Press, 1995, 442~457.
- 71 Tziperman, E., M. A. Cane, and S. E. Zebiak, Irregularity and locking to the seasonal cycle in an ENSO prediction model as explained by the quasi-periodicity route to chaos, *J. Atmos. Sci.*, 1995, **52**, 293~306.
- 72 Yukimoto, S., M. Endoh, Y. Kitamura, et al., Interannual and interdecadal variabilities in the Pacific in an MRI coupled GCM, *Climate Dyn.*, 1996, **12**, 667~683.
- 73 Schneider, N., A decadal spiciness mode in the tropics, *Geophys. Res. Lett.*, 2000, **27**, 257~260.
- 74 Jin, F. -F., Low-frequency modes of tropical ocean dynamics, *J. Climate*, 2001, **14**, 3874~3881.
- 75 Graham, N. E., Decadal scale variability in the 1970s and 1980s: observations and model results, *Climate Dyn.*, 1994, **10**, 135~162.
- 76 Graham, N. E., T. P. Barnett, R. Wilde et al., On the roles of tropical and midlatitude SSTs in forcing interannual to interdecadal variability in the winter northern hemisphere circulation, *J. Climate*, 1994, **7**, 1416~1441.
- 77 Miller, A. J., D. R. Cayan, T. P. Barnett et al., Interdecadal variability of the Pacific Ocean: model response to observed heat flux and wind stress anomalies, *Climate Dyn.*, 1994, **9**, 287~302.
- 78 Miller, A. J., D. R. Cayan, T. P. Barnett et al., The 1976-1977 climate shift of the Pacific Ocean, *Oceanography*, 1994, **7**, 21~26.
- 79 Jacobs, G. A., H. E. Hurlburt, J. C. Kindle et al., Decade-scale trans-Pacific propagation and warming effects of an El Niño anomaly, *Nature*, 1994, **370**, 360~363.
- 80 Meyers, S. D., M. A. Johnson, M. Liu et al., Interdecadal variability in a numerical model of the northeast Pacific Ocean: 1970-89, *J. Phys. Oceanogr.*, 1996, **26**, 2635~2652.
- 81 Miller, A. J., W. B. White, and D. R. Cayan, North Pacific thermocline variations on ENSO time scales, *J. Phys. Oceanogr.*, 1997, **27**, 2023~2039.
- 82 Clarke, A. J., and A. Lebedev, Remotely driven decadal and longer changes in the coastal Pacific waters of the Americas, *J. Phys. Oceanogr.*, 1999, **29**, 828~835.
- 83 Hasselmann, K., Stochastic climate models. I. Theory, *Tellus*, 1976, **28**, 473~485.
- 84 Frankignoul, C., and K. Hasselmann, Stochastic climate models. Part II. Application to SST anomalies and thermocline variability, *Tellus*, 1977, **29**, 289~305.
- 85 Frankignoul, C., P. Muller, and E. Zorita, A simple model of the decadal response of the ocean to stochastic wind forcing, *J. Phys. Oceanogr.*, 1997, **27**, 1533~1546.
- 86 Barsugli, J. J., and D. S. Battisti, The basic effects of atmosphere-ocean thermal coupling on midlatitude variability, *J. Atmos. Sci.*, 1998, **55**, 477~493.
- 87 Jin, F. -F., A theory of interdecadal climate variability of the North Pacific ocean-atmosphere system, *J. Climate*, 1997, **10**, 1821~1835.
- 88 Saravanan, R., and J. C. McWilliams, Advective ocean-atmosphere interaction: an analytical stochastic model with implications for decadal variability, *J. Climate*, 1998, **11**, 165~188.
- 89 Neelin, J. D., and W. J. Weng, Analytical prototypes for ocean-atmosphere interaction at midlatitudes. Part I: coupled feedbacks as a sea surface temperature dependent stochastic process, *J. Climate*, 1999, **12**, 697~721.

- 90 Pierce D. W. , Distinguishing coupled ocean-atmosphere interaction from background noise in the North Pacific, *Progress in Oceanography*, 2001, **49**, 331~352.
- 91 Latif, M. , and T. P. Barnett, Causes of decadal climate variability over the North Pacific and North America, *Science*, 1994, **266**, 634~637.
- 92 Latif, M. , and T. P. Barnett, Decadal climate variability over the North Pacific and North America: dynamics and predictability, *J. Climate*, 1996, **9**, 2407~2423.
- 93 Robertson, A. W. , Interdecadal variability over the North Pacific in a multi-century climate simulation, *Climate Dyn.* , 1996, **12**, 227~241.
- 94 Xu, W. , T. P. Barnett, and M. Latif, Decadal variability in the North Pacific as simulated by a hybrid coupled model, *J. Climate*, 1998, **11**, 297~312.
- 95 Goodman, J. , and J. Marshall, A model of decadal middle-latitude atmosphere-ocean coupled models, *J. Climate*, 1998, **12**, 621~641.
- 96 Münnich, M. , M. Latif, S. Venzke et al. , Decadal oscillation in a simple coupled model, *J. Climate*, 1998, **11**, 3309~3319.
- 97 Tallery, L. D. , Simple coupled mid-latitude climate models, *J. Phys. Oceanogr.* , 1999, **29**, 2016~2037.
- 98 Watanabe, M. , and M. Kimoto, Behavior of midlatitude decadal oscillations in a simple atmosphere-ocean system, *J. Meteor. Soc. Japan*, 2000, **78** (4), 441~460.
- 99 Cessi, P. , Coupled dynamics of ocean currents and midlatitude storm tracks, *J. Climate*, 2000, **13**, 232~244.
- 100 Jin, F. -F. , M. Kimoto and X. C. Wang, A model of decadal ocean-atmosphere interaction in the North Pacific basin, *Geophys. Res. Lett.* , 2001, **28**, 1531~1534.
- 101 Primeau, F. , and P. Cessi, Coupling between wind-driven currents and midlatitude stormtracks, *J. Climate*, 2001, **14** (6), 1243~1261.
- 102 Gu, D. F. , and S. G. H. Philander, Interdecadal climate fluctuations that depend on exchanges between the tropics and extratropics, *Science*, 1997, **275**, 805~807.
- 103 Schneider, N. S. , A. J. Miller, M. A. Alexander, and C. Deser, Subduction of decadal North Pacific temperature anomalies: observations and dynamics, *J. Phys. Oceanogr.* , 1999, **29**, 1056~1070.
- 104 Zhang, R. H. , and Z. Liu, Decadal thermocline variability in the North Pacific Ocean: two pathways around the subtropical gyre, *J. Climate*, 1999, **12**, 3273~3296.
- 105 Wang, D. X. , and Z. Y. Liu, The pathway of the interdecadal variability in the Pacific Ocean, *Chinese Science Bulletin*, 2000, **45** (17), 1555~1561.
- 106 Stephens, M. , Z. G. , Liu, and H. J. Yang, Evolution of subduction planetary waves with application to North Pacific decadal thermocline variability, *J. Phys. Oceanogr.* , 2001, **31** (7), 1733~1746.
- 107 Hazeleger, W. , M. M. A. Visbeck, A. R. Cane et al. Decadal upper ocean temperature variability in the tropical Pacific, *J. Geophys. Res.* , 2001, **106**, 8971~8988.
- 108 Zhang, R. H. , T. Kagimoto, and S. E. Zebiak, Subduction of decadal North Pacific thermal anomalies in an ocean GCM, *Geophys. Res. Lett.* , 2001, **28** (12), 2449~2452.
- 109 Deser, C. , M. A. Alexander, and M. S. Timlin, Upper ocean thermal variations in the North Pacific during 1970-1991, *J. Climate*, 1996, **9**, 1840~1855.
- 110 Schneider, N. S. , S. Venzke, A. J. Miller, et al. , Pacific thermocline bridge revisited, *Geophys. Res. Lett.* , 1999, **26**, 1329~1332.
- 111 Lysne, J. , P. Chang, and B. Giese, Impact of the extratropical Pacific on equatorial variability, *Geophys. Res. Lett.* , 1997, **24**, 2589~2592.
- 112 Kleeman, R. , J. P. McCreary, and B. A. Klinger, A mechanism for generating ENSO decadal variability, *Geophys. Res. Lett.* , 1999, **26**, 1743~1746.
- 113 Garreaud, R. D. , and D. S. Battisti, Interannual (ENSO) and interdecadal (ENSO-like) variability in the Southern Hemisphere tropospheric circulation, *J. Climate*, 1999, **12**, 2113~2122.

- 114 Evans, M. N. et al., Support for tropically-driven Pacific decadal variability based on paleoproxy evidence, *Geophys. Res. Lett.*, 2001, **28** (19), 3689~3692.
- 115 Nakamura, H., G. Lin, and T. Yamagata, Decadal climate variability in the North Pacific during the recent decades, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1997, **98**, 2215~2225.
- 116 Miller, A. J., D. R. Cayan, and W. B. White, A westward intensified decadal in the North Pacific thermocline and gyre-scale circulation, *J. Climate*, 1998, **11**, 3112~3127.
- 117 Enfield, D. B., and A. M. Mestas-Nunez, Multiscale variabilities in global sea surface temperatures and their relationships with tropospheric climate patterns, *J. Climate*, 1999, **12** (9), 2719~2733.
- 118 Xie, S. -P., Interdecadal thermocline variability in the North Pacific for 1958-97: A GCM simulation, *J. Phys. Oceanogr.*, 2000, **30**, 2798~2813.
- 119 Lau, N. C., Interactions between global SST anomalies and the midlatitude atmospheric circulation, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1997, **78**, 21~33.
- 120 Miller, A. J., Large-scale ocean-atmosphere interactions in a simplified coupled model of the midlatitude winter-time circulation, *J. Atmos. Sci.*, 1992, **49**, 273~286.
- 121 Peng, S., W. A. Robinson, and M. P. Hoerling, The modeled atmospheric response to midlatitude SST anomalies and its dependence on background circulation states, *J. Climate*, 1997, **10**, 971~987.
- 122 Bond, N. A., and D. E. Harrison, The Pacific Decadal Oscillation, air-sea interaction and central north Pacific winter atmosphere regimes, *Geophys. Res. Lett.*, 2001, **27**, 731~734.
- 123 Capotondi, A., and M. A. Alexander, Rossby waves in the tropical North Pacific and their role in decadal thermocline variability, *J. Phys. Oceanogr.*, 2001, **31** (12), 3496~3515.
- 124 Pierce, D. W., T. Barnett, and M. Latif, Connections between the Pacific Ocean tropics and midlatitudes on decadal time scales, *J. Climate*, 2000, **13**, 1173~1194.

Advances in Studies of Pacific Decadal Oscillation

Yang Xiuqun¹⁾, Zhu Yimin²⁾, Xie Qian²⁾, Ren Xuejuan¹⁾, and Xu Guiyu¹⁾

1) (*Global Ocean-Atmosphere Interaction Laboratory, Institute of Severe Weather and Climate, Nanjing University, Nanjing 210093*)

2) (*Department of Atmospheric Sciences, Meteorological College, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101*)

Abstract This review summarizes major advances in the observational and theoretical studies of the Pacific Decadal Oscillation (PDO) phenomenon. The spatio-temporal structures of the PDO are described and three categories of existing theories or hypotheses associated with the large-scale air-sea interaction are compared and discussed. The problems and unresolved issues in these theories are proposed, and future prospects are suggested. Moreover, the interdecadal climate variabilities in East Asia and China are also reviewed and possible role of these variations in the PDO is also discussed.

Key words: Pacific Decadal Oscillation; air-sea interaction; interdecadal climate variability