

太平洋年代际变化研究进展浅析

吴德星¹, 林霄沛¹, 万修全¹, 兰 健¹

(1. 中国海洋大学 物理海洋实验室, 山东 青岛 266003)

摘要: 综述了近几年太平洋年代际变化形成机制或起因的 7 种代表性观点, 对已有观点作了初步评述, 并提出未来太平洋年代际变化研究应关注以下方面: 太平洋年代际变化的多重模态及相应的多重机制, 不同时空尺度海洋现象间的相互作用, 南太平洋年代际变化及在全太平洋年代际变化中的作用, ENSO 与 PDO 的预测, 海洋环流的年代际变化及其对气候变化的作用, 海洋热能、机械能的收支及转换等关键问题。

关键词: 太平洋; 年代际变化; 机制

中图分类号: P721; P731

文献标识码: A

文章编号: 0253-4193(2006)01-0001-08

1 引言

随着长时间海洋观测资料的积累和基本符合实际的海洋数据同化产品的不断推出, 20 世纪 90 年代后, 10 年及以上年代际尺度的气候变化成为国际气候学研究中的热点问题。由于海洋相对大气所表现出的缓变性和巨大的热容量, 海洋在全球气候系统中起着重要的作用, 因此海洋年代际变化是众多海洋学家们关心的热点问题, 江志红和屠其璞^[1]、李泓等^[2]、王东晓等^[3]、Yang 和 Zhang^[4] 对太平洋海气系统年代际变化研究做过综述, 谷德军等^[5] 对太平洋年代际振荡 (PDO) 的研究进展进行了综述。本文将就近期国内外有关太平洋年代际变化研究作初步介绍和评述, 并就海洋年代际以上尺度未来研究做初步展望。

2 关于太平洋年代际变化形成机制与起因的几个观点

大量的观测数据和数据同化产品分析表明, 太平洋海洋在 1976 年前后经历了一次明显的年代际调整^[6-8] (图 1)。Graham 等基于观测资料分析和模

式模拟两方面研究, 指出 1976/1977 冬季起, 表现为年代际赤道中东太平洋地区的大面积增暖, 而中太平洋北部显著变冷。Chang 等^[9]、Bratcher 和 Giese^[10] 指出赤道西、中太平洋地区次表层海温年代际尺度上变冷; 副热带南太平洋风应力旋度场、SST (sea surface temperature) 和次表层海温存在年代际变化。太平洋存在年代际变化已是公认的事实。

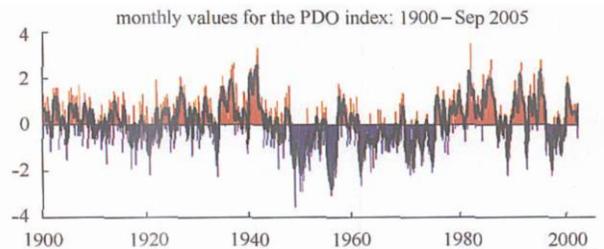


图 1 太平洋年代际变化 (PDO) 指数 (太平洋 20° N 以北的 SST 异常与全球 SST 异常的差), 引自美国华盛顿大学网站 (<http://tao.atmos.washington.edu/pdo>)

到目前为止, 已有大量关于太平洋年代际变化形成机制或起因的研究成果, 归纳起来至少有 7 种代表性观点。

收稿日期: 2005-02-12; 修订日期: 2005-11-22.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (90411010); 高等学校博士学科点专项科研基金项目 (20030423004).

作者简介: 吴德星 (1952—), 男, 山东省无棣县人, 教授, 博士, 博士生导师, 长期从事海洋环流和海洋动力学过程研究. E-mail: dxw@ouc.edu.cn

2.1 热带-中纬度的相互作用

以 Gu 和 Philander^[11] 为代表的不少学者提出热带-中纬度海气相互作用产生北太平洋年代际变化, 他们认为大气对热带太平洋增温的效应涉及温带西风加强和海温变冷, 海温异常水被抽吸潜沉, 沿温跃层经过 10 a 多的时间抵达热带海区, 改变热带太平洋的温跃层结构、经上升流或铅垂向混合使 SST 出现负异常. 大气对热带海区 SST 负异常的响应涉及温带西风减弱和海温变暖, 从而形成一个完整的反馈过程, 产生太平洋年代际变化. Kleeman 等^[12] 也认为热带-中纬度的相互作用是产生年代际变化的机制. 他们相一致的观点是均认为 STC (subtropical cell) 变化产生的经向水输运量变化影响赤道 SST. 不同点是 Gu 等认为 STC 的次表层分支异常海温水向赤道区的输运量引起赤道 SST 的变化, Kleeman 等则认为 STC 表层分支异常海温水输运量的变化引起赤道 SST 的变化.

2.2 中纬度不稳定海气相互作用

Latif 等^[13-15] 不少学者认为太平洋年代际变化源生在北太平洋中纬度海区. 他们的结果显示, 当中纬度北太平洋出现正 SST 异常时, 大气中伴随着西风气流减弱; 西风减弱一方面可能减少海洋向大气的潜热和感热输送, 从而使 SST 上升, 反映出局地海气相互作用的正反馈过程; 另一方面伴随西风减弱, 副热带风应力旋度变小, 副热带风应力旋度变小会改变黑潮及其延续体热运输强度, 从而减少通过黑潮及其连续体向北的热量运输, 导致中纬度 SST 的下降, 产生负反馈. 由于中纬度海洋运动对风应力强迫的调整时间很长, 故他们认为通过与风和旋度减弱相应的负反馈及局地海-气相互作用的正反馈产生太平洋年代际的振荡.

2.3 赤道与赤道外南太平洋相互作用

Luo 和 Yamagata^[16] 的研究认为当年代际 SST 正异常出现在热带东太平洋时, 热带南太平洋西部出现负风应力旋度是大气对其的响应. 负风应力旋度引起温跃层变浅和产生海温负异常. 海温负异常向西北方向传播抵达赤道西部和中部, 然后沿赤道向东运动, 使赤道东太平洋 SST 发生正异常, 通过海气相互作用, 赤道东太平洋海温冷异常增强, 大气对此的响应是在热带南太平洋西部产生正的风应力旋度. 和前面的正位相过程类似, 负位相过程发展, 从而产生年代际振荡.

Giese 等^[17] 基于数值模拟, 认为太平洋 1976 年

气候变迁源于热带南太平洋的次表层海温异常. 模拟结果表明, 热带南太平洋的次表层海温异常向西传播, 抵达西边界后传向赤道, 抵达赤道后沿赤道东传. 约达 140°W 时, 海温异常上升到海洋表面. 通过海气相互作用的正反馈过程使赤道东太平洋 SST 迅速增高. 响应赤道东太平洋 SST 的正异常, 大气环流进行调整, 太平洋中纬度海洋响应大气环流的调整产生变化. 他们认为, 伴随赤道 SST 和海面风应力间的耦合及赤道外南太平洋次表层海温异常, 赤道海洋和热带太平洋存在内在的振荡. 基于海表风强迫和其所致 SST 变化间的延迟时间约为赤道外南太平洋次表层海温异常穿过洋区达西边界、传达赤道、沿赤道传达东部海区所需的时间, 故他们认为通过海表海温异常潜沉联系的风应力异常与海洋次表层热变化间的反馈过程主要发生在南半球.

Chang 等^[9] 通过分析 1968~1976 年和 1977~1988 年两时期赤道次表层海温、赤道东太平洋 SST、赤道潜流和热带南太平洋环流及风应力旋度场的变化, 认为 1976~1977 年期间赤道西太平洋次表层海温异常是和热带南太平洋显著的环流变化同时发生的. 热带南太平洋加强的气旋式风应力旋度场增强了该区 Ekman 抽吸和南太平洋副热带环流的北翼部分. 环流的加强增大了南太平洋偏低海温水向赤道次表层的输运, 从而使赤道西太平洋次表层海温变冷. 他们的结果从海洋“桥”作用的角度支持了赤道与赤道外南太平洋相互作用机制的观点.

2.4 大气对海洋的随机强迫产生海洋的年代际低频变化

Jin^[18], Frankignoul 等^[19] 基于 Hasselmann^[20] 海气相互作用的随机理论, 通过数值模拟试验提出高频天气系统对海洋的随机强迫也能产生海洋的年代际低频变化. 他们的结果显示海洋对大气高频随机作用的响应是低频红噪声谱, 而缓慢变化的海洋异常又能反作用于大气, 使大气产生低频变化. Jin 的线性耦合模式结果指出, 海洋通过斜压 Rossby 波对高频风应力随机强迫产生缓慢调整, 可以产生中纬度海洋闭合环流的年代际低频变化.

2.5 非线性机制

Timmermann 和 Jin^[21] 利用低阶 ENSO 模型, 在相当现实的参数范围, 模拟了 SST 非线性平流的作用. 结果发现 SST 的非线性平流的存在可产生两个新的现象: ENSO 活动的长期调制和混沌. 在合理参数范围内, 由低阶 ENSO 模型描述的非线性热带海

洋-大气相互作用可产生年代际尺度上的具有较大振幅的非规则 ENSO 振荡. 他们基于动力系统理论(同宿轨迹的非线性概念)分析了低阶 ENSO 模型揭示的 ENSO 经历振幅的长期调制和周期的双重分叉特征.

2.6 热带海洋变化是中纬度海气系统年代际变化的强迫源地

Trenberth 和 Hurrell^[22], Trenberth 和 Hoar^[23] 的观测资料分析,特别是 SST 变化的诊断分析,结果指出北太平洋 SST 变化滞后热带太平洋 SST 变化约 3~4 个月,而热带太平洋 SST 的变化又超前北太平洋大气变化约 12 个月,由此推断,北太平洋年代际变化的强迫源是热带太平洋 SST 异常. Graham 等^[24] 和 Lau^[25] 的数值模拟结论支持了上述观点. Nonaka^[8] 等数值结果认为, STC 变化产生的 SST 异常滞后局地赤道风变化产生的 SST 异常约 2 a,由此推断赤道风的局地强迫启动年代际 SST 异常,遥强迫作用起维持和加强 SST 年代际异常的作用. Hazeleger 等^[26] 的研究也认为太平洋中纬度的变化通过海洋过程对热带太平洋温跃层变化的影响很小,热带太平洋的低频变化主要是由局地风应力变化驱动的.

2.7 年代际变化既可源于热带太平洋又可源于温带北太平洋

Liu 等^[27] 的研究认为太平洋的年代际变化既可源于热带太平洋又可源于温带北太平洋. 他们认为局地海气耦合过程是热带太平洋和北太平洋的年代际变化的关键,热带太平洋年代际变化似乎和高阶斜压模态相联系,通过热带和温带海洋与大气的遥联系增强了热带太平洋高阶斜压模态的强度. Wang 等^[28] 的研究认为异常浮力强迫是北太平洋年代际变化的主导因素,在热带太平洋异常风强迫较其他因素更重要.

3 评述

由上述介绍可以看到太平洋年代际变化形成机制或起因研究已取得不少成果. 但就其形成机制或起因远没有统一的认识,有些机制的讨论也大相径庭. 实际上太平洋年代际变化形成机制或起因尚形不成统一的认识是很自然的. 原因在于不同研究者的视角和侧重点是不一样的. 如热带-中纬度的相互作用机制侧重的是中纬度海温异常潜沉水沿运输路径向赤道的平流运动的海洋“桥”的作用. 中纬度不稳定海气相互作用机制侧重是上层海洋温度异常沿

副热带路径的向西传播的过程. 赤道与赤道外南太平洋相互作用机制强调的是热带太平洋海气系统自身年代际变化的过程. 大气对海洋的随机强迫产生海洋年代际低频变化机制的出发点是认为快变白噪声天气变化可能会造成气候系统的慢变红噪声响应. 非线性机制的重点是不考虑温带过程,热带太平洋子系统自身非线性作用仍可能产生年代际低频变化. 正是由于已有研究各有侧重,研究结论存在很多与实际不相符的方面.

仅就海洋输运过程而言, Schneider 等^[29] 的研究结论就不支持中纬度海温异常潜沉水沿海洋温跃层向赤道的平流可使中纬度与热带耦合的观点. 王东晓和刘征宇^[30]、钟姗姗等^[31] 的研究也指出由于受 IT CZ 产生的位涡障碍影响北太平洋的潜沉信号很难抵达热带地区,他们的研究同时还发现热带太平洋的年代际信号主要来自于热带南太平洋海区. Zhang 等^[32] 认为北太平洋海洋内部“桥”的作用可以解释 20 世纪 70 年代后期和 80 年代初期热带太平洋暖异常,但不能解释 20 世纪 90 年代初期热带太平洋的暖异常现象,因为,若按海洋内部“桥”的作用对应 20 世纪 80 年代中后期温带海温冷异常,90 年代的热带太平洋应发生冷异常,而不应该是现实存在的暖异常现象.

在赤道和赤道外南太平洋的相互作用机制中,主要基于两点考虑,一是认为中纬度的海温异常通过海洋“桥”很难影响赤道海洋上层热结构的年代际变化;二是通过大气作用路径,北太平洋的变化仅是对赤道 SST 异常响应的结果,并不能强迫跨太平洋的年代际气候变化. 由于现有的观测资料比较稀少,对于中纬度的潜沉过程特别是南太平洋的潜沉过程对赤道太平洋的影响仍然不清楚,但是一些观测^[33,34] 和模式结果^[35-39] 显示来自南北半球副热带海区的海温异常潜沉水沿密度跃层可抵达赤道地区. 此外,现有的资料和分析显示, PDO 型的年代际振荡不仅存在于北太平洋,在南太平洋也存在一个近似对称的海温形态^[40-42], 谷德军等^[5] 也认为 PDO 是一种太平洋海盆尺度的现象,北太平洋冷、暖位相的交替可能是对南太平洋闭合回路的一种反应. 因而太平洋的年代际变化在很大程度上是一个完整的体系,南北太平洋和赤道太平洋的年代际变化都是这个体系年代际变化的体现.

在大气对海洋的随机强迫产生海洋的年代际低频变化的研究中,海气耦合过程和北太平洋的年代

际变化如何通过大气桥影响到热带太平洋是其关键问题. 热带海区由于大气深对流的存在, 目前普遍接受的是 Bjerknes^[43] 的正反馈机制作为热带地区海气相互作用的耦合机制. 但是在中纬度地区, 海表温度较低, 大气对海洋的反应只是局限在边界层内, 与热带海区的海气耦合过程差别很大^[44]. 最近的一些工作揭示了不同海区大气对海洋变化的反馈过程, 这个过程的机制非常复杂, 特别是在海洋锋区或大气低云存在的情况下^[45-53]. 因而在中纬度海区的海气耦合过程远没有得到解决.

从以上分析可知, 关于太平洋海气系统年代际变化形成机制的研究仅仅是初步的, 尚有大量的研究工作亟待深入.

4 对未来研究的展望

人与自然的关系是人类生存与发展的基本关系, 自然支持系统是人类社会可持续发展的基础. 因此, 人类必须对自己居住的地球要有深入的认识. 从战略的观点, 人类必须开展对地球系统的整体性研究; 从战术的观点, 对地球的整体性认识, 须从其相对独立的子系统着手. 因此, 气候系统作为地球系统的子系统, 未来仍是海洋和大气研究者继续深入探索的领域.

基于近几年太平洋年代际变化研究的进展和存在的问题, 本文认为以下问题仍将是海洋界关注的热点方面.

4.1 太平洋年代际变化的多重模态及多重机制

事实上, 已有大量研究揭示太平洋 SST 展现出显著的年代(decadal), 年代际(inter-decadal) 和年代代(multi-decadal) 时间尺度变化的多重模态, 如年代到双年代尺度的 ENSO-Like 模态和年代代尺度的北太平洋模态^[33]. 有的研究认为^[54], 甚至在北太平洋区域存在多重模态, 如除了位于北太平洋亚极地锋带的北太平洋模态外, 还存在位于东太平洋且延伸到热带太平洋的东北太平洋模态(ENPM - The Eastern North Pacific Mode). 初步研究结果认为, 海洋-大气耦合对北太平洋模态的发展起决定性作用, 东北太平洋模态主要源于大气随机强迫. 多重模态及其相互关连的多重机制如何影响太平洋年代际变化值得深入探讨.

4.2 年代际变化与不同时空尺度海洋现象之间相互作用的研究将逐步成为热点

PDO 和 ENSO 空间结构的相似性提出了太平

洋年际和年代际变化间可能存在相互作用的问题, 王东晓等^[3]的研究认为, 太平洋环流年代际变化参与了 ENSO 循环, 太平洋海洋环流年代际变化参与了 PDO 循环, 副热带太平洋经圈环流与热带太平洋纬向环流系统之间存在的相互作用可能是沟通 ENSO 循环和 PDO 循环的内在环节. Neaman 等^[55]的研究认为, 在所有时间尺度上, PDO 依赖于 ENSO, 并认为 PDO 一阶变化是对大气噪声和 ENSO 红色谱部分的响应. 除 PDO 和 ENSO 的相互作用研究外, PDO 的起源问题一直是研究的热点方面. 谷德军等^[5]就 PDO 源地与机制的若干争论问题做了综述, 在此不在赘述. 需指出的是, 之所以存在如此多的争论, 除 PDO 起源的复杂性外, 更基本的问题是对海洋过程、不同海域动力学现象间的动力学连接, 甚至是其间的耦合或相互作用等问题认识的不够深入, 因此, 年代际变化与不同时空尺度海洋动力学现象间的相互作用的研究将逐步成为研究的热点.

4.3 南太平洋年代际变化将逐步受到重视

已有研究认为 PDO 作为“地理事件”已远远超出了中高纬度北太平洋的范围, 至少应包括热带和南半球太平洋. Garreand 和 Battisti^[56]的研究认为 PDO 是起源于热带太平洋, Evans 等^[57]基于拓展和重建 SST 资料的分析认为, 类似于 PDO 的 SST 变化的分布型在整个太平洋范围内延伸且大致关于赤道对称, 提出 PDO 起源于热带并且是整个太平洋海盆尺度现象的一部分. 再如前面, 赤道与赤道外南太平洋相互作用的综述部分, 许多研究强调了南太平洋年代际变化的存在性及其作用. 已有研究之所以更多地侧重北太平洋和热带太平洋海区, 是因为最初发现海洋的年代际变化是在北太平洋; 另外, 南太平洋观测数据相对稀疏也影响了对南太平洋年代际变化的研究. 事实上, 南太平洋作为连接世界三大洋和传递南极海洋变化的主通道, 其科学上的重要性是不言而喻的. 随着观测资料的日益增长, 更多研究工作的投入, 深入研究南太平洋及其年代际变化已势在必行.

4.4 ENSO 与 PDO 的预测研究需平行发展

关于 ENSO 存在年代际变化存在三种解释: 第一种解释假定 ENSO 是一自然模态, 归属于海洋大气相互作用, 主要论点认为自然模态是中性稳定的, 随机大气扰动对它的非规则性起贡献作用; 第二种解释假定海洋-大气耦合系统是高度非线性的, 其自身可产生混沌行为, 混沌行为与规则行为间的调整

是非规则性的;第三种解释假定,当背景场变化时,ENSO 的性质、周期和强度发生变化,关于第三种解释得到越来越多研究的支持.1977 年以后热带太平洋的热含量总量增加,营造了 ENSO 的暖背景场,此背景场在很大程度上改变了 ENSO 的特征,如 20 世纪 60 年代和 70 年代,El Niño 主导周期为 2~3 a,80 年代和 90 年代增加为 4~5 a,且振幅明显增强,其冷位相表现出少发或不发生.

Newman 等^[55]从 ENSO 影响 PDO 的角度进行了研究,认为一个成长的 ENSO 通常对夏季 PDO 的特征起贡献作用,处于成熟阶段的 ENSO 对其接续冬/春季 PDO 的特征起贡献作用,与此对应的北太平洋 SST 异常持续到下一夏季的初期.目前所述的 PDO 长期的正位相简单地来自 1971~1998 年期间热带海洋的暖事件,而近期 PDO 位相的明显变化期望是过去几年热带东太平洋冷 SST 的产物.基于上述研究认为,研究 PDO 直接关联着 ENSO 的预测,关于两者的作用关系及其可预测性尚需深入研究.

4.5 海洋环流的年代际变化及其对气候影响的研究急需加强

近期研究认为,太平洋环流也存在年代际变化.海洋环流的变化可由水体运输量的变化反映.分析过去 50 年观测数据发现^[58],自上世纪 70 年代热带和副热带间的子午向翻转环流减缓,沿密度跃层穿过 9°N-9°S 向赤道的水体运输从上世纪 70 年代以前的 $(27.0 \pm 2.5) \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ 减小到 90 年代的 $(14.0 \pm 2.5) \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$;穿过 15°N-15°S 向赤道的水体运输从 $(38.0 \pm 1.8) \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ 减小到 $(29.5 \pm 1.9) \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$.沿密度跃层向赤道水体运输的减小使赤道上升流减弱的 25%,使赤道 SST 升高 0.8 °C.

与沿密度跃层向赤道水体运输的减弱相应,表层水体的运输也存在年代际变化.研究表明 1970~1977 年期间 Ekman 运输辐散量是高的,而 1990~1999 年间 Ekman 运输辐散量是低的,运输辐散量减少约 $12 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$.

另外,基于 Sverdrup 公式的计算,1970~1977 年间穿过 9°N-9°S 的 Sverdrup 输运量是 $(27.1 \pm 6.8) \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$,1990~1999 年间 Sverdrup 输运量是 $(10.5 \pm 4.1) \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$.以上计算结果说明上世纪 90 年代较 70 年代 Sverdrup 输运存在与 Ekman 输运和沿密度跃层输运相似的减弱现象.

目前关于海洋环流年代际变化的研究仅是初步的,关于其成因和过程及其对气候年代际变化的影响和贡献研究尚需深化.

4.6 海洋热能、机械能的收支及转换将成为研究热点

人们普遍认为热能是大气运动的主要驱动力,机械能是海洋运动的主要驱动力.近年来的研究越来越注意到海洋中热能和机械能的收支对海洋内部混合、大洋子午向环流的维持和气候的长期变化等所起的重要作用^[59,60],而大洋的子午向环流是年代际变化中一个重要的“海洋桥”.故物理海洋学除继续深化研究与气候变化、海洋生态环境变化密切相关海水运动等科学问题外,其自身理论研究的深化将会更侧重控制海洋环流的能量守恒律及相应的海洋机械能的平衡,跨时空尺度的动量、能量转换,海洋运动及其变异三维结构的形成、维持及变化,海洋不同时空尺度运动过程及其相互作用等.

5 结语

年代际尺度是地球气候系统中具有承上启下作用的时间尺度.一方面,它作为年际尺度变化的背景尺度,其变化对年际尺度的气候变化现象有重要影响;另一方面,对于百年尺度的全球变暖,它又是一种极其重要的扰动.故气候系统年代际变化仍将是气候系统研究的热点领域.

在气候系统的年代际变化中有关年代际气候变率的可预报性是一个重要的问题,年代际变化的可预报性取决于其变化的机制^[61].现有的资料由于时间长度过短,质量较差,很难确定已有的年代际变化是一种周期性的震荡过程还是一种随机现象^[62].如果年代际变化由外强迫引起,则由于外强迫的随机性和不可预测性,年代际变化是无法预报的.如果年代际变化由海气系统的内部特性引起,特别是如果海洋是长期气候系统变化的主导因素,则可预报性将会大大增加,而预报的时间尺度取决于海洋的长期记忆过程.因而确定年代际变化的机制、主导因素和模式及其间的相互关系等将是未来研究的一个主要方向.

此外在未来研究中,人们将会更加关注低纬度、温带和高纬度海洋甚至不同大洋间内部连接“通道”(海洋波动、平流、西边界流)的相互作用及与其相关的动量、能量、热量输运与传播和相互转换过程;大气将会更加关注局部大气状态与环流调整与遥距离

处大气状态与环流间的相互作用过程及作用通道。人们除进一步深入研究气候系统年代际自然变化规律外,将会更加注意外在强迫下气候系统的年代际变化和自然变化与外在强迫变化间的耦合作用。总

之,今后关于太平洋年代际变化的研究必将在更广阔的范围、更多资料和模式结果相互校验的基础上寻找新的主导机制,发展其预测理论,为最终实现气候变化的预测做出应用的贡献。

参考文献:

- [1] 江志红,屠其璞.国外有关海气系统年代际变率的机制研究[J].地球科学进展,2001,16(4):569—573.
- [2] 李 泓,李丽平,王盘兴.太平洋地区海气系统年代际变率研究的若干进展[J].南京气象学报,2001,24(4):591—598.
- [3] 王东晓,谢 强,刘 赟,等.太平洋年代际海洋变率研究进展[J].热带海洋学报,2003,22(1):76—83.
- [4] YANG Hai-jun,ZHANG Qiong. On the decadal and interdecadal variability in the Pacific Ocean[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2003, 20(2): 173—184.
- [5] 谷德军,王东晓,李春晖. PDO 源地与机制的若干争论[J]. 热带气象学报,2003,19(增刊):136—144.
- [6] GRAHAM N E. Decadal-scale climate variability in the tropical and North Pacific during the 1970s and 1980s: observations and model results[J]. Climate Dynamics, 1994, 10(3): 135—162.
- [7] STEPHENS C S, LEVITUS J A, BOYER T P. On the Pacific Ocean regime shift [J]. Geophys Res Lett, 2001, 28(19): 3 721—3 724.
- [8] NONAKA M, XIE S P, McCREARY J P. Decadal variations in the subtropical cells and equatorial Pacific SST[J]. Geophys Res Lett, 2002, 29(7): 2011—2014.
- [9] CHANG P, GIESE B S, JI L, et al. Decadal change in the south tropical Pacific in a global assimilation analysis[J]. Geophys Res Lett, 2001, 28(18): 3 416—3 464.
- [10] BRATCHER A J, GIESE B S. Tropical Pacific decadal variability and global warming[J]. Geophys Res Lett, 2002, 29(19): 2411—2414.
- [11] GU D, Philander S G H. Interdecadal climate fluctuations that depend on exchanges between the tropics and extra tropics [J]. Science, 1997, 275(5301): 805—807.
- [12] KLEEMAN R., MCCREARY J P, KLINGER B A. A mechanism for generating ENSO decadal variability[J]. Geophys Res Lett, 1999, 26(12): 1 743—1 746.
- [13] LATIF M, BARNETT T P. Causes of decadal climate variability over the North Pacific and North America[J]. Science, 1994, 266: 634—637.
- [14] LATIF M, BARNETT T P. Decadal climate variability over the north Pacific and North America dynamics and predictability[J]. J Climate, 1996, 9(10): 2 407—2 423.
- [15] LATIF M. Dynamics of interdecadal variability in coupled ocean atmosphere models[J]. J Climate, 1998, 11(4): 602—624.
- [16] LU O J J, YAMAGATA T. Long term El Nino-Southern Oscillation ENSO-like variation with special emphasis on the South Pacific [J]. J Geophys Res, 2001, 106(C10): 22 211—22 228.
- [17] GIESE B S, URIZAR S C, FUCHKARN S. Southern Hemisphere origins of the 1976 climate shift[J]. Geophys Res Lett, 2002, 29(2): 111—114.
- [18] JIN F F. A theory of interdecadal climate variability of the North Pacific ocean-atmosphere system[J]. J Climate, 1997, 10(8): 1 821—1 835.
- [19] FRANKIGNOUL C, MULLER P, ZORITA E. A simple model of the decadal response of the ocean to stochastic wind forcing[J]. J Phys Oceanogr, 1997, 27(8): 1 533—1 546.
- [20] HASSELMAN K. Stochastic climate models: Part . Theory[J]. Tellus, 1976, 28: 473—485.
- [21] TIMMERMAN A, JIN F. A nonlinear mechanism for decadal El Nino amplitude changes[J]. Geophys Res Lett, 2002, 29(1): 313—314.
- [22] TRENBERTH K E, HURRELL J W. Decadal atmosphere-ocean variations in the Pacific[J]. Climate Dynamics, 1994, 9(6): 303—319.
- [23] TRENBERTH K E, HOAR T J. The 1990–1995 El Nino-Southern Oscillation event: longest on record[J]. Geophys Res Lett, 1996, 23(1): 57—60.
- [24] GRAHAM N E, BANETT T P, WILDER, et al. On the roles of tropical and mid-latitude SSTs in forcing interannual to inter-decadal variability in the winter Northern Hemisphere circulation[J]. J Climate, 1994, 7(9): 1 416—1 448.
- [25] LAU N C. Interactions between global SST anomalies and the mid-latitude atmospheric circulation[J]. Bull Amer Meteor Soc, 1997, 78(1): 21—33.
- [26] HAZELEGER W, VISBECK M, CANE M, et al. Decadal upper ocean temperature variability in the tropical Pacific[J]. J Geophys

- Res, 2001, 106(C5): 8 971—8 988.
- [27] LIU Z, WU L, GALLIMOR R, et al. Search for the origins of Pacific decadal climate variability[J]. *Geophys Res Lett*, 2002, 29(10): 42-1-42-4.
- [28] WANG D, WANG J, WU L, et al. Relative importance of wind and buoyancy forcing for interdecadal regime shifts in the Pacific Ocean [J]. *Science in China*, 2003, 46(5): 417—427.
- [29] SCHNEIDER N, MILLER A J, ALEXANDER M A, et al. Subduction of decadal North Pacific temperature anomalies: observations and dynamics[J]. *J Phys Oceanogr*, 1999, 29(5): 1 056—1 070.
- [30] 王东晓, 刘征宇. 太平洋年代际海洋变率的信号通道[J]. *科学通报*, 2000, 45(8): 208—815.
- [31] 钟姗姗, 何余海, 刘宣飞. 太平洋次表层海温年代际变率及其突变特征[J]. *南京气象学院学报*, 2002, 25(5): 595—602.
- [32] ZHANG R, ROTHSTEIN L M, BUSAHACCHI A J. Origin of upper-ocean warming and El Nino change on decadal scales in the tropical Pacific Ocean[J]. *Nature*, 1998, 391: 879—883.
- [33] DESEV C, ALEXANDER M A, TIMLIN M S. Upper-ocean thermal variations in the North Pacific during 1970–1991[J]. *J Climate*, 1996, 9(8): 1 840—1 855.
- [34] JOHNSON G C, McPHADEN M J. Interior pycnocline flow from the subtropical to the equatorial Pacific Ocean[J]. *J Phys Oceanogr*, 1999, 29(12): 3 073—3 089.
- [35] McCREARY J P, LU P. Interaction between the subtropical and equatorial ocean circulations: the subtropical cell[J]. *J Phys Oceanogr*, 1994, 24(2): 466—497.
- [36] LIU Z. A simple model of the mass exchange between the subtropical and tropical ocean[J]. *J Phys Oceanogr*, 1994, 24(6): 1 153—1 165.
- [37] ROTHSTEIN L M, ZHONG R H, BWALACCHI A J, et al. A numerical simulation of the mean water pathways in the subtropical and tropical Pacific Ocean[J]. *J Phys Oceanogr*, 1998, 28(2): 322—342.
- [38] HARPER S. Thermocline ventilation and pathways of tropical-subtropical water mass exchange[J]. *Tellus*, 2000, 52A(3): 330—345.
- [39] SOLOMON A, McCREARY J P, KLEEMAN R, et al. Interannual and decadal variability in an intermediate coupled model of the Pacific region[J]. *J Climate*, 2003, 16(3): 383—405.
- [40] WHITE W B, CAYAN D R. Quasi-periodicity and global symmetries in interdecadal upper ocean temperature variability[J]. *J Geophys Res*, 1998, 103: 21 335—21 354.
- [41] CHAO Y, GHIL M, McWILLIAMS J C. Pacific interdecadal variability in this century's sea surface temperatures[J]. *Geophys Res Lett*, 2000, 27(C10): 2 261—2 264.
- [42] MANTU A N J, HARE S R. The Pacific decadal oscillation[J]. *Journal of Oceanography*, 2002, 58: 35—44.
- [43] BJERKNES J. Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific[J]. *Mon Wea Rev*, 1969, 97(3): 163—172.
- [44] 李崇银, 咸 鹏. 北太平洋海温年代际变化与大气环流和气候的异常[J]. *气候与环境研究*, 2003, 8(3): 258—273.
- [45] XIE S P, ISHII ATARI M, HASHIZUME H, et al. Coupled ocean-atmospheric waves on the equatorial front[J]. *Geophys Res Lett*, 1998, 25(20): 3 863—3 866.
- [46] WENTZ F J, GENTEMANN C, SMITH D, et al. Satellite measurements of sea surface temperature through clouds[J]. *Science*, 2000, 288(5467): 847—850.
- [47] CHELTON D B, COAUTHORS. Observations of coupling between surface wind stress and sea surface temperature in the eastern tropical Pacific[J]. *J Climate*, 2001, 14(7): 1 479—1 498.
- [48] XIE S P, LIN W T, LIU Q, et al. Far-reaching effects of the Hawaiian Islands on the Pacific Ocean-atmosphere[J]. *Science*, 2001, 292(5524): 2 057—2 060.
- [49] LIU W T. Progress in scatterometer applications[J]. *J Oceanogr*, 2002, 58(1): 121—136.
- [50] WHITE W B, ANNIS J L. Coupling of extratropical mesoscale eddies in the ocean to westerly winds in the atmospheric boundary layer [J]. *J P O*, 2003, 33(5): 1 095—1 107.
- [51] ONEILL L W, CHELTON D B, ESBENSEN S K. Observations of SST-induced perturbations of the wind stress field over the Southern Ocean on seasonal time scales[J]. *J Climate*, 2003, 16(14): 2 340—2 354.
- [52] VECCHI G A, XIE S P, FISCHER A S. Ocean-atmosphere covariability in the western Arabian Sea[J]. *J Climate*, in press.
- [53] XIE S P. Satellite observations of cool ocean-atmosphere interaction[J]. *BAMS*, 2004, 85(2): 195—208.
- [54] WU L, LIU Z. Decadal variability in the North Pacific: the eastern north Pacific mode[J]. *J Climate*, 2003, 16(19): 3 111—3 131.
- [55] NEWMAN M, COMPO G P, ALEXANDER M A. ENSO-forced variability of the Pacific decadal oscillation[J]. *J Climate*, 2003, 16(23): 3 853—3 857.
- [56] GARREAU R D, BATTISTI D S. Interannual (ENSO) and interdecadal (ENSO-like) variability in the Southern Hemisphere tropospheric circulation[J]. *J Climate*, 1999, 12(7): 2 113—2 122.

- [57] EVANS M N, CANE M N, SCHRAD D P, et al. Support for tropically-driven Pacific decadal variability based on pale proxy evidence. [J]. *Geophys Res Lett*, 2001, 28(19): 3 689—3 692.
- [58] McPHADEN M J, ZHANG D. Slowdown of the meridian overturning circulation in the upper Pacific Ocean[J]. *Nature*, 2002, 415(7): 603—608.
- [59] MUNK W H, WUNSCH C. Energetics of tidal and wind mixing: abyssal recipes [J]. *Deep-Sea Res I*, 1998, 45(12): 1 977—2 010.
- [60] WUNSCH C. What is the thermohaline circulation? [J]. *Science*, 2002, 298(5596): 1 180—1 181.
- [61] 咸 鹏, 李崇银. 国际上年代际到世纪时间尺度气候变化的研究[J]. *气候与环境研究*, 2001, 6(3): 337—353.
- [62] WUNSOCH C. The interpretation of short climate records, with comments on the North Atlantic and Southern Oscillations[J]. *BAMS*, 1999, 80(2): 245—256.

Progress and perspective in study on interdecadal variability of the Pacific Ocean

WU De-xing¹, LIN Xiao-pei¹, WAN Xiu-quan¹, MENG Xiang-feng¹

(¹ *Physical Oceanography Laboratory, Ocean University of China, Qingdao 266003, China*)

Abstract: Seven different mechanisms being responsible for the interdecadal variability of the Pacific Ocean are reviewed. The primary perspectives to the future study on the interdecadal variability of the ocean-atmosphere system multi-modes and multi-mechanisms of the Pacific Ocean interdecadal variation, interaction among the different temporal and spatial scale ocean phenomena, interdecadal variation of the southern Pacific Ocean and its impacts on the whole Pacific Ocean variation, prediction of ENSO and PDO, interdecadal variation of the ocean general circulation and its influence on the climate change are also proposed.

Key words: Pacific Ocean; interdecadal variability; mechanism