

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.

北太平洋的年代际振荡与全球变暖

刘秦玉 李春 胡瑞金

中国海洋大学海洋—大气相互作用与气候实验室, 青岛 266100

摘 要 通过回顾和总结前人工作, 特别是有关北太平洋年代际振荡的研究, 针对近 50 年来北太平洋中纬度海温变冷的现象进行了分析与讨论。从全球气候变化的角度, 总结了影响北太平洋中纬度海温变冷现象的几种可能机制, 推测了全球气温变暖可能会对北太平洋的直接或间接影响, 归纳指出了研究该问题的复杂性与目前面临的困难。

关键词 全球变暖 中纬度 北太平洋 海洋—大气耦合 年代际振荡

文章编号 1006-9585 (2010) 02-0217-08 **中图分类号** P47 **文献标识码** A

Interdecadal Oscillations in the North Pacific and the Global Warming

LIU Qinyu, LI Chun, and HU Ruijin

Ocean-Atmosphere Interaction and Climate Laboratory, Ocean University of China, Qingdao 266003

Abstract Previous works related to interdecadal oscillations in the North Pacific are reviewed, and the phenomena of sea surface temperature cooling in the middle latitudes of the North Pacific during the past 50 years are discussed. Several possible impact mechanisms that cause sea surface temperature cooling in the middle latitudes of the North Pacific are proposed from the view of global climate change. The possible direct and indirect impacts of global warming on the North Pacific, as well as the complexities of science problems and the main difficulties are also summarized.

Key words global warming, middle latitude, North Pacific, coupled ocean-atmosphere, decadal oscillations

1 引言

全球变暖是人类社会目前面临的一个严峻现实; 北太平洋中纬度海洋—大气相互作用的耦合系统有明显 10 年以上周期变化已成为众所周知的自然现象。在全球变暖背景下, 北太平洋中纬度海洋—大气耦合系统近 50 年来演变过程中哪些异

常现象是北太平洋对全球变暖或外强迫的响应, 哪些现象是北太平洋中纬度局地海洋—大气相互作用的结果, 目前尚不清楚。

根据 1854~2006 年的海面温度 (SST) 资料所作的经验正交函数 (EOF) 分析, 可以得到 SST 异常第一模态的空间分布与时间序列 (Wang and Lee, 2008), 近 50 年来全球海洋的 SST 几乎都有不同程度的增温, 只有在南极绕极流、北大

收稿日期 2008-09-10 收到, 2009-11-20 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金项目 40830106、40676010, 国家重点基础研究发展计划项目 2007CB411803

作者简介 刘秦玉, 女, 1946 年出生, 硕士, 教授, 主要从事海洋—大气相互作用研究。E-mail: liuqy@ouc.edu.cn

西洋和太平洋中纬度海域出现 SST 降低的现象。由于北太平洋中纬度海洋—大气耦合系统有明显的年代际振荡 (PDO), 振荡周期约为 10~20 年甚至长达 50~70 年 (Minobe, 1999); 最近二十多年该振荡处于北太平洋 SST 负异常的阶段, 这种周期性的自然变化可能会超过由于近 50 年温室气体增加引起的北太平洋增温, 因此, 近 50 年中纬度海域出现 SST 降低的现象也可能是长周期的 PDO 暖位相的表现, 即赤道东太平洋和北美沿岸为 SST 正异常, 而在西北太平洋、黑潮延伸体 (KOE) 附近 SST 为负异常。即使北太平洋中纬度海域出现 SST 降低的现象是 PDO 的结果, 目前对 PDO 的形成机制, 特别是有关太平洋 20 年以上周期振荡的负反馈机制尚未有统一的认识, 对于长达 50~70 年周期的 PDO 的可预测性几乎不了解。

本文对目前有关北太平洋中纬度海洋—大气耦合系统年代际振荡的研究进行回顾, 分析全球变暖可能会对北太平洋的直接或间接的影响, 提出目前面临的科学问题。鉴于各个大洋之间可以通过大气桥进行连接, 本文建议从地球气候系统的观念出发, 重新理解近 50 年北太平洋海洋—大气相互作用的基本规律与形成机制。

2 太平洋海洋—大气耦合系统年代际振荡机制研究中存在的主要问题

太平洋年代际振荡 (PDO) 是指周期为 10 年以上的整个太平洋 SST 的变化, 其主要周期大约为 10~20 年或更长。PDO 指数是指 20°N 以北 SST 异常场空间分布主模态的时间序列, 该模态的空间分布与周期为 2~7 年的 ENSO 循环对应的 SST 异常场的空间分布有共同之处 (Zhang et al., 1998)。目前有关 PDO 的研究存在以下的问题:

问题 1: PDO 的源地是北太平洋中纬度还是热带太平洋?

依据观测资料发现, 北太平洋 SST 变化滞后热带太平洋 SST 变化, 而热带太平洋 SST 的变化又超前北太平洋大气变化, 由此推断, 北太平洋年代际振荡的强迫源是热带太平洋 SST 异常 (Trenberth and Hurrell, 1994), 某些数值模式的

结果也证实了北太平洋海温的变化的确与热带 SST 异常有关。但是, 杨修群等 (2004) 提出 PDO 源生于北太平洋中纬度海区, 该海域局地海洋—大气相互作用提供 PDO 中的正反馈机制: 中纬度西风带西风异常可以导致局地蒸发加强, 冷的 Ekman 平流作用加强, 形成 SST 负异常, SST 负异常可能引起阿留申低压加强导致更明显的西风异常; 上述正反馈机制在冬天已经被证实, 在夏季存在着层云 (包括雾) 与 SST 之间的正反馈机制: SST 正 (负) 异常, 海面大气层结不稳定, 层云减少, 海面得到的短波辐射增加 (减少) (Norris et al., 1998)。三维混合层模式的数值模拟也证实了, 与云量变化有关的短波辐射在北太平洋中纬度 SST 的年代际变化中起重要作用 (Mochizuki and Awaji, 2008)。黑潮和黑潮/亲潮延伸体中的热输送异常是 PDO 循环中的负反馈机制 (Latif and Barnett, 1994, 1996); 中纬度西风带西风异常导致副热带环流加强, 黑潮和黑潮/亲潮延伸体中的平流热输送正异常, 该正异常会抵消局地海洋—大气相互作用形成 SST 的负异常。

正反馈和负反馈机制的同时存在支持北太平洋中纬度可能是 PDO 的源地的猜想。但是, 后来的学者发现没有证据表明副热带环流的平流作用构成异常信号能在海洋中延迟 10 年以上的负反馈机制 (Schneider et al., 2002)。

问题 2: 北太平洋中纬度异常信号通过“海洋桥”到达赤道太平洋是否为 PDO 形成的负反馈机制?

前人研究指出中纬度与热带太平洋 (包括赤道太平洋) 之间海洋—大气的相互作用是形成 PDO 的主要机制 (Gu and Philander, 1997), 其主要观点是: 中纬度的异常西风 (西风加强) 可以导致中纬度混合层温度降低, 潜沉增加, 温度负异常信号沿通风温跃层中的内部通道和西边界通道输送到赤道附近, 通过赤道上升流上升, 导致热带东、中太平洋 SST 降低; 热带东、中太平洋 SST 降低又会引起大气中的 PNA 遥相关波列, 使得中纬度西风减弱 (Gu and Philander, 1997)。北太平洋中纬度大气异常信号通过海洋内部通道和西边界通道影响赤道温跃层变化的时间可以长达十几年 (Wang and Huang, 2005), 该过程不仅决定了 PDO 的时间尺度, 也成为 PDO 形成的

负反馈机制。但是,对这种观点目前还有争议:有人认为南太平洋中纬度大气异常通过南太平洋的内部通道和西边界通道影响热带太平洋温跃层的作用是最重要的(Chang et al., 2001)。位于北太平洋热带辐合带(ITCZ)的“位涡障碍”效应,北太平洋中纬度海洋—大气相互作用的异常信号很难通过内部通道抵达赤道太平洋(钟姗姗等, 2002; Yang and Liu, 2005)。由于观测资料的缺乏,以上研究只能通过数值模式来实现,不同模式的结果也不同,因此也无法做出定论。但是,如果北太平洋中纬度海洋—大气相互作用的异常信号不能从海洋的“内部通道”被输运到赤道海域,有关北太平洋中纬度与热带太平洋之间海洋—大气的相互作用是形成 PDO 的论点也会面临着挑战。因此,北太平洋中纬度海洋—大气相互作用的异常信号在中纬度“潜沉”后,有多少能到通过海洋次表层通道到达赤道太平洋是目前亟待解决的科学问题。

问题 3: 北太平洋中纬度是否存在局地海洋—大气相互作用的 PDO 模态?

既然北太平洋 SST 年际变化中存在与 ENSO 有关的模态和独立于 ENSO 的模态(Trenberth and Hurrell, 1994),那么在年代际时间尺度上也应有对应的两个模态。一个是热带太平洋年代际模态,该模态源于热带海洋高阶模态,另一个是北太平洋年代际模态,该模态形成的负反馈机制是斜压 Rossby 波对随机风强迫的响应(Wu et al., 2003);并提出热带太平洋的变化受到来自热带外大气异常信号可以通过风—蒸发—SST 反馈机制引起热带海气系统的年代际振荡(Wu et al., 2007),而中纬度西太平洋 SST 的异常对大气的影 响可能是年代际转型的关键(Wu et al., 2005)。最近我们(Liu et al., 2006)以及法国科学家(Frankignoul and Sennéchaël, 2007)先后独立地提出北太平洋中纬度海域 SST 的变化会对北半球夏季大气环流(包括东亚夏季风)有重要的反馈效应,该反馈效应表现在冬季“马蹄型”SST 异常影响夏季大气环流(Liu et al., 2006)。有的研究也表明冬季太平洋 SST 与北半球中纬度大气环流异常存在两种时空特征明显不同的共变模态,即年际时间尺度的厄尔尼诺—南方涛动模态和准 20 年时间尺度的北太平洋模态;他们认为

北太平洋年代际变率可能涉及两部分分量,一部分分量是北太平洋特有的、与热带没有关系,另一部分与热带是相联系的,而 PDO 现象则可能包含了这两部分(朱益民等, 2008)。上述研究都支持了北太平洋存在局地海洋—大气相互作用形成的 PDO 模态。

3 有关北太平洋局地海洋—大气耦合模态研究面临的主要困惑

假如北太平洋中纬度的确存在由于局地海洋—大气相互作用形成的 PDO 模态,目前科学家们还面临以下困惑:(1)究竟哪个海洋动力过程决定了该模态的时间尺度;(2)究竟什么物理过程完成了海洋对大气的反馈作用,实现了中纬度的海洋—大气耦合?

3.1 海洋动力过程决定了该模态的时间尺度

北太平洋中纬度海域上层(0~400 m)热含量的变化既受海面热通量变化的影响,还与海洋环流对温度的平流输送等海洋动力过程有关,在季节尺度上,该海域的 SST 的变化主要是取决于海面热通量的变化,而在年际尺度上海流的热平流在改变海洋的热含量中起着更为重要的作用(Vivier et al., 2002; Dong and Kelly, 2004)。数值模式模拟的结果表明 1976/1977 北太平洋中纬度海温变冷的主要原因是海面热通量和海洋的经向热平流异常(Fang et al., 2006)。

观测资料表明 20 世纪 80 年代黑潮延伸体的增强比海盆尺度表面风强迫的增强要滞后 4~5 年,这 4~5 年的滞后对应于海洋第一斜压模态的 Rossby 波从北太平洋东部被激发出之后传播到日本以南所需的时间(Miller et al., 1998; Deser et al., 1999)。依据对 TOPEX/Poseidon 海平面高度(SSH)资料的分析发现:1993~1996 年黑潮延伸体海域 SSH 有逐渐降低的趋势,1997 年以后这一趋势逆转;用线性涡度动力学所做的模拟证明对黑潮延伸体这一纬向流的低频调制是由东太平洋风应力旋度异常导致的(Qiu, 2003)。他指出风应力旋度异常在东北太平洋产生 SSH 异常,SSH 异常信号以斜压 Rossby 波的形式向西传播,在黑潮延伸体南北两侧斜压 Rossby 波的传播速度不同,4~5 年后导致黑潮延伸体两侧出现相反的

SSH 异常; 黑潮延伸体在 1993~1996 年 (1997~2001 年) 的减弱 (增强) 是由黑潮延伸体南侧的西传负 (正) 异常 SSH 和黑潮延伸体北侧的西传正 (负) 异常 SSH 引起的 (Qiu, 2003)。黑潮延伸体低频变化的主要时间尺度约为 12 年, 这一时间尺度与随机白噪声大气强迫下的首选时间尺度相吻合 (Jin, 1997)。该物理过程给出了北太平洋中纬度海洋大约十年周期变化的机制。

依据大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室的海洋—大气耦合数值模式的模拟结果, 上层海洋热容量异常的演变过程大约为 20 年周期 (朱益民等, 2008)。最近我们的研究发现了潜沉于北太平洋中部的低位涡水的异常信号在跃层内的输运过程, 并给出了输运通道 (Liu et al., 2007), 通过该通道低位涡水的输运时间约为 12 年 (Liu and Hu, 2007)。该低位涡水的异常信号能够到达台湾以东, 并可能影响黑潮和再循环的强度; 据此我们提出一个猜想: 低位涡水异常信号沿该通道的传播可能成为周期为二十几年振荡中的负反馈机制。因此, 证实该猜想的正确性是值得我们今后研究的重要问题。

总之, 海洋动力过程的调整的时间尺度决定太平洋年代际变化的时间尺度。已经初步确定海洋第一斜压 Rossby 波的调整机制是太平洋海洋—大气耦合系统周期约为十年变化的机制, 但对于周期约为二十年和五十年以上的年代际振荡的机制还存在不同认识, 特别是在这种周期变化中的负反馈机制方面还存在争议。

3.2 中纬度海洋异常对大气的反馈作用

中纬度天气尺度的涡旋, 特别是“风暴轴”附近的强涡旋移动的很快, 将海洋对大气的反馈能量带走, 或与大气超长波相互作用形成新的天气或气候变化。因此, 如何确定中纬度海洋异常对大气的反馈作用一直成为海洋—大气相互作用中的难题。

利用大气环流模式 (AGCM) 来研究中纬度大气是如何响应给定 SST 的异常是一种重要途径。AGCM 试验结果显示, 对同一暖 SST 异常, 在 1 月大气会产生斜压响应, 而 2 月大气的响应是一个相当正压结构 (Peng et al., 1997)。对于同样的 SST 异常不同的模式可能生成不同的结果 (Kushnir et al., 2002)。大气响应严重依赖于海

气耦合, 在耦合模式中黑潮延伸体附近海域强的暖海温异常则对应大气相当正压的高压脊响应 (Liu and Wu, 2004; Liu and Hu, 2007)。

依据卫星观测资料发现, 日本以南 SST 的变化可以决定海面风的强弱 (Xie, 2004)。但是, 该影响通过哪些物理过程, 如何影响自由大气并不是十分清楚, 大气对黑潮/亲潮延伸体海区 SST 的敏感性是一个十分关键的问题。以黑潮/亲潮延伸体为中心的北太平洋中纬度海域是温跃层“露头”区, 也是全球海洋通过释放感热和潜热对大气加热的最重要的海区之一 (刘衍韞等, 2004), 是北太平洋海洋动力过程影响大气的关键海区 (Xie, 2004; Kelly and Dong, 2004)。在该海域不仅大气的变化可以直接引起海洋的变化 (An and Wang, 2005), 而且海洋的变化, 特别是上层海洋热含量和 SST 的变化会对北半球大气环流 (包括亚洲季风) 有重要的反馈效应 (Liu and Wu, 2004), 该反馈效应在统计学上一个最明显的信号为: 冬季“马蹄型”SST 异常与夏季大气环流之间的耦合关系 (Liu et al., 2006)。以黑潮/亲潮延伸体为中心的北太平洋中纬度海域上层海洋热含量变异的对全球气候的影响也在海洋—大气耦合模式的数值试验结果中得到验证 (Liu and Wu, 2004; Wu et al., 2005); 海洋—大气耦合模式的数值试验也表明, 该海域上层海洋热含量的异常可以通过海洋 SST 的“再现”机制持续影响大气, 长达一年之久 (Liu and Hu, 2007)。

尽管上述研究工作给出了中纬度大气对海温异常的某些响应信息和海洋对大气异常强迫响应的规律, 但是, 有关北太平洋局地海洋—大气耦合模态的物理过程和时间尺度的认识并不完整。

4 全球气温升高对北太平洋的直接与间接影响

根据 IPCC 2007 报告, 气候系统的变暖已经得到大多数研究者的认同, 目前从观测得到的全球平均气温和海温升高、大范围的冰雪融化以及全球平均海平面上升的证据支持了这一观点。1995~2006 年中有 11 年位列 1850 年以来最暖的 12 年。近 50 年气温平均线性增暖速率为每 10 年增加 0.13 °C 几乎是近 100 年来的 2 倍 (沈永平,

2007)。20 世纪热带海洋,尤其是印度洋近百年来增暖最稳定。北大西洋近几十年来的显著降温导致了西半球 30°N 以北大部分地区增暖趋势明显下降,与之相反,东半球欧亚大陆近几十年来冬季的强烈增温使地球增暖趋势大大增高,以致形成了东亚大陆和北大西洋—北美大陆东部地区在近 50 年来变温反相的不均衡格局(曾昭美和严中伟,1999)。因此,全球气温升高是否会直接加热北太平洋,还是加热其它海域后,其它海域的异常再通过大气桥间接影响北太平洋是目前尚未解决的科学问题。

4.1 全球变暖可能对北太平洋的直接影响

全球气温变暖情景下,究竟北太平洋中纬度海域海面的大气温度是否升高,进入中纬度北太平洋海面的热通量是增加还是减少,目前还没有见到任何报道。已有的研究指出:1979 年以后,热带 Walker 环流减弱, Hadley 环流向极扩展 (Vecchi and Soden, 2007);从三种再分析资料中哈德莱环流向极扩展发生在南、北半球各自的春秋季节,这种扩展形成了中纬度对流层增暖和干旱区向极的扩展 (Hu and Fu, 2007; Lu et al., 2007),也可能会改变北太平洋副热带大气环流和该海域上空云的变化,从而导致北太平洋中纬度海域海面温度的变化。通过对历史资料分析表明,20 世纪后 50 年中纬度气旋活动的海域海洋上空云量增加,海面温度降低(曾昭美和章名立,1996)。北太平洋副热带冷水面上层化效应,抑制水汽的向上混合,有利于低云和雾的形成;空气温度在垂直方向一致的加热也会导致云量和光学厚度的减小 (Norris and Iacobellis, 2005),海温变冷可能是云量增多的原因。总之,全球变暖如何通过改变云及其辐射效应,从而影响北太平洋中纬度海域海面温度异常并没有明确的结论。

4.2 全球变暖的背景下热带太平洋的变化对北太平洋中纬度海域的影响

最近许多学者关注了在全球变暖的背景下热带太平洋 El Niño 增幅和频繁出现 (Timmermann et al., 1999; Fedorov and Philander, 2000),并发现热带太平洋温跃层中温度的垂直梯度加强是 ENSO 在几十年尺度被调制的主要机制 (Yang and Zhang, 2008)。依据前人研究的结果,热带太平洋 ENSO 可以通过大气“遥相关”路径 (PNA)

向赤道外传播,影响中纬度大气—海洋系统的变化 (Horel and Wallace, 1981)。因此,在全球气温变暖背景条件下,热带太平洋 ENSO 在几十年尺度上的增幅也可能是导致北太平洋中纬度海域出现 SST 降低的原因之一。近 20 几年热带太平洋的增暖也可能是北太平洋中纬度海域变冷的结果。因此,北太平洋中纬度海域出现 SST 降低的现象可能与热带太平洋对全球增暖的响应有关。

4.3 全球变暖的背景下大西洋对北太平洋中纬度变化的影响

近 50 年全球气温升高,北冰洋海冰融化,大西洋热盐环流崩溃的可能性以及对气候的影响成为最热门的话题之一 (Curry et al, 2003; Wu et al., 2008)。最近数值试验结果表明在北大西洋“洒淡水”能使大西洋热盐环流崩溃,并通过“大气桥”和海洋过程影响其它区域气候;热盐环流崩溃后通过对极地低压变异的影响,使北太平洋西风加强,导致北太平洋海温变冷 (Dong and Sutton, 2007)。热带大西洋对热盐环流崩溃的响应是赤道以北冷异常、赤道及其以南暖异常的偶极子分布,这种 SST 异常的偶极子分布,使得北大西洋热带信风加强,跨越中美大陆,导致春季热带东太平洋偶极子海温分布(赤道以北侧冷异常、南侧暖异常),秋季有类 El Niño 发生 (Zhang and Delworth, 2007);还有研究表明热盐环流减弱可以增强 ENSO 的变率,进而影响北太平洋中纬度海域 (Wu et al., 2008)。

大西洋几十年周期振荡 (AMO) 能够对太平洋的年代际振荡,特别是独立于 ENSO 现象的年代际振荡有影响;AMO 为北太平洋几十年周期的振荡提供了一个扰动源,该扰动通过大气“遥相关”影响北太平洋阿留申低压,并引起北太平洋的一系列变化 (Dong and Sutton, 2007; Zhang and Delworth, 2007)。目前的研究给出了一些大西洋通过什么物理过程引起北太平洋变化的推测,与这些推测有关的物理过程需要进一步地证明。

4.4 全球变暖的背景下热带印度洋对北太平洋的影响

不仅大西洋会对太平洋有影响,印度洋海温异常对北太平洋也有重要的影响 (Annamalai and Mutugrddde, 2004),最近的研究表明,热带印度洋海盆一致地增暖会通过夏季风加强水汽异常输

送,并在亚洲大气环流中形成异常新的热源,影响夏季风和北太平洋大气环流(Yang et al., 2007)。全球变暖会导致热带印度洋 SST 持续增暖,在全球海洋中近 60 年热带印度洋 SST 增暖趋势与 SST 标准差的比值最大,达到 4.5 以上(Du and Xie, 2008),这种增暖是否会影响近 50 年亚洲季风和北太平洋中纬度的大气和海洋是目前正在研究的热门话题。尽管我国的科学家已经注意到季风及其它气候系统的年代际振荡与 PDO 有关(Wang, 2001, 2002),但印度洋—亚洲季风—北太平洋中纬度海洋—大气耦合系统之间的关系目前并不清楚,印度洋如何通过影响季风,进而影响北太平洋的变化还有争议。

5 总结

综上所述,近 50 年来,在全球气温增暖的同时,北太平洋中纬度海域出现 SST 降低的现象。该现象似乎是北太平洋中纬度局地海气相互作用引起的自然变化。但是,并不排除还有以下 2 种与全球气温增暖有关的机制:(1) 在全球气温变暖背景条件下,海洋上空云—辐射的变化及大气温度的变化可能会改变海面热通量,进而影响海洋表面温度;(2) 全球气温变暖导致的大西洋、热带太平洋和热带印度洋变化可能会影响北太平洋中纬度海域。自然变化与外强迫影响在过去 50 年北太平洋海—气系统的演变中各起着何种作用是目前尚未解决的科学问题。

解决上述问题面临的困难在于:在实际北太平洋中纬度海洋—大气的观测资料和气候模式中,由于既包含外强迫的影响,又含有局地的海洋—大气相互作用过程,在海洋加热大气的同时,大气还受到其它因素的影响。因此,确定海洋对大气的反馈作用,将北太平洋中纬度局地的海洋—大气相互作用过程从观测资料和气候模式中分离出来,是解决上述科学问题的两个关键点。

今后应针对近 50 多年来在全球变暖背景条件下,北太平洋中纬度海洋—大气耦合系统变化的基本规律开展系统的研究,探索这些规律的形成机制。特别是应从黑潮/亲潮延伸体及再循环海域的低位涡水的潜沉、输运的观点出发,揭示海洋动力过程在控制不同时间尺度变化中起到的作用,

估计全球气温变暖导致的大西洋、热带太平洋和热带印度洋变化可能会影响北太平洋中纬度海域的影响,分析外强迫和北太平洋中纬度独立的海洋—大气耦合系统相对重要性,以深化对北太平洋海洋—大气系统的演变以及其对 ENSO 及东亚气候的影响机理认识,提高对北太平洋海气耦合系统演变的预估能力。

参考文献 (References)

- An S I, Wang B. 2005. The forced and intrinsic low-frequency modes in the North Pacific [J]. *J. Climate*, 18: 876–885.
- Annamalai H, Mutugrdde R. 2004. Role of Indian Ocean in regional climate variability [J]. *Geophysical Monograph*, 147: 213–246.
- Chang P, Giese B S, Ji L, et al. 2001. Decadal change in the southern tropical Pacific in a global assimilation analysis [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 28 (18): 3461–3464.
- Curry R, Dickson B, Yashayaev I. 2003. A change in the freshwater balance of the Atlantic Ocean over the past four decades [J]. *Nature*, 426: 826–829.
- Deser C, Alexander M A, Timlin M S. 1999. Evidence for a wind driven intensification of the Kuroshio current extension from the 1970s to the 1980s [J]. *J. Climate*, 12: 1697–1706.
- Dong S, Kelly K A. 2004. Heat budget in the Gulf Stream region: The importance of heat storage and advection [J]. *J. Phys. Oceanogr.*, 34: 1214–1231.
- Dong B, Sutton R T. 2007. Enhancement of ENSO variability by a weakened Atlantic thermohaline circulation in a coupled GCM [J]. *J. Climate*, 20: 4920–4939.
- Du Y, Xie S. 2008. Role of atmospheric adjustments in the tropical Indian Ocean warming during the 20th century in climate models [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 35, L08712, doi: 10.1029/2008GL03363.
- Fang J, Rong X, Yang X. 2006. Decadal-to-interdecadal response and adjustment of the North Pacific to prescribed surface forcing in an oceanic general circulation model [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 25 (3): 11–24.
- Fedorov A V, Philander S G. 2000. Is El Niño changing? [J]. *Science*, 288: 1997–2002.
- Frankignoul C, Sennéchaël N. 2007. Observed influence of North Pacific SST anomalies on the atmospheric circulation [J]. *J. Climate*, 20: 592–606.
- Gu D, Philander S G H. 1997. Interdecadal climate fluctuations that depend on exchanges between the tropics and extratropics [J]. *Science*, 275: 805–807.
- Horel J D, Wallace J M. 1981. Planetary-scale atmospheric phenomena associated with the Southern Oscillation [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 109: 813–829.

- Hu Y, Fu Q. 2007. Observed poleward expansion of the Hadley circulation since 1979 [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 7: 5229–5236.
- Jin F. 1997. A theory of interdecadal climate variability of the North Pacific ocean – atmosphere system [J]. *J. Climate*, 10: 1821–1835.
- Kelly K A, Dong S. 2004. The relationship of western boundary current heat transport and storage to midlatitude ocean-atmosphere interaction [M]. *Earth Climate: The Ocean – Atmosphere Interaction*. Wang C, Xie S, Carton J A, Eds. Washington D C: American Geophysical Union Geophysical Monograph 147, 347–364.
- Kushnir Y, Robinson W A, Bladé I, et al. 2002. Atmospheric GCM response to extratropical SST anomalies: Synthesis and evaluation [J]. *J. Climate*, 15: 2233–2256.
- Latif M, Barnett T P. 1994. Causes of decadal climate variability over the North Pacific and North America [J]. *Science*, 266: 634–637.
- Latif M, Barnett T P. 1996. Decadal climate variability over the North Pacific and North America: Dynamics and predictability [J]. *J. Climate*, 9: 2407–2423.
- 刘衍韞, 刘秦玉, 潘爱军. 2004. 太平洋海气界面净热通量的季节、年际和年代际变化 [J]. *中国海洋大学学报 (自然科学版)*, 34 (3): 341–350. Liu Yanyun, Liu Qinyu, Pan Aijun. 2004. Seasonal, interannual, and decadal variations of air – sea heat fluxes in the Northern Pacific Ocean [J]. *Journal of Ocean University of Qingdao (in Chinese)*, 34 (3): 341–350.
- Liu Q, Wen N, Liu Z. 2006. An observational study of the impact of the North Pacific SST on the atmosphere [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 33, L18611, doi: 10.1029/2006GL026082.
- Liu Q, Hu H. 2007. A subsurface pathway for low potential vorticity transport from the central North Pacific toward Taiwan Island [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34, L12710, doi: 10.1029/2007GL029510.
- Liu Z, Wu L. 2004. Atmospheric response to North Pacific SST anomaly: The role of ocean – atmosphere coupling [J]. *J. Climate*, 17: 1859–1882.
- Liu Z, Liu Y, Wu L, et al. 2007. Seasonal and long term atmospheric responses to reemerging North Pacific Ocean variability: A combined dynamical and statistical assessment [J]. *J. Climate*, 20: 955–980.
- Lu J, Vecchi G A, Reichler T. 2007. Expansion of the Hadley cell under global warming [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34, L06805, doi: 10.1029/2006GL028443.
- Miller A J, Cayan D R, White W B. 1998. A westward-intensified decadal change in the North Pacific thermocline and gyre-scale circulation [J]. *J. Climate*, 11: 3112–3127.
- Minobe S. 1999. Resonance in bidecadal and pentadecadal climate oscillations over the North Pacific: Role in climatic regime shifts [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 26: 855–858.
- Mochizuki T, Awaji T. 2008. Summertime evolution of decadal sea surface temperature anomalies in the midlatitude North Pacific [J]. *J. Climate*, 21: 1569–1588.
- Norris J R, Zhang Y, Wallace J M. 1998. Role of low clouds in summertime atmosphere – ocean interactions over the North Pacific [J]. *J. Climate*, 11: 2482–2490.
- Norris J R, Iacobellis S F. 2005. North Pacific cloud feedbacks inferred from synoptic-scale dynamic and thermodynamic relationships [J]. *J. Climate*, 18: 4862–4878.
- Peng S, Robinson W A, Hoerling M P. 1997. The modeled atmospheric response to midlatitude SST anomalies and its dependence on background circulation states [J]. *J. Climate*, 10: 971–987.
- Qiu B. 2003. Kuroshio Extension variability and forcing of the Pacific decadal oscillations: Responses and potential feedback [J]. *J. Phys. Oceanogr.*, 33: 2465–2482.
- Schneider N, Miller A J, Pierce D W. 2002. Anatomy of North Pacific decadal variability [J]. *J. Climate*, 15: 586–605.
- 沈永平. 2007. IPCC WGI第四次评估报告关于全球气候变化的科学要点 [J]. *冰川冻土*, 29 (1): 156. Shen Yongping. 2007. Key results from summary for policymakers of IPCC WGI AR4 [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 29 (1): 156.
- Timmermann A, Oberhuber J, Bacher A, et al. 1999. Increased El Niño frequency in a climate model forced by future greenhouse warming [J]. *Nature*, 398: 694–697.
- Trenberth K E, Hurrell J W. 1994. Decadal atmosphere – ocean variations in the Pacific [J]. *Climate Dyn.*, 9: 303–319.
- Vecchi G A, Soden B J. 2007. Global warming and the weakening of the tropical circulation [J]. *J. Climate*, 20: 4316–4340.
- Vivier F, Kelly K A, Thompson L. 2002. Heat budget of the Kuroshio Extension region: 1993–1999 [J]. *J. Phys. Oceanogr.*, 32: 3436–3454.
- Wang C, Lee S K. 2008. Global warming and United States land-falling hurricanes [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 35, L02708, doi: 10.1029/2007GL032396.
- Wang H. 2001. The weakening of the Asian monsoon circulation after the end of 1970's [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 18 (3): 374–386.
- Wang H. 2002. The instability of the East Asian summer monsoon – ENSO relations [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 19 (1): 1–11.
- Wang Q, Huang R. 2005. Decadal variability of pycnocline flows from the subtropical to the equatorial Pacific [J]. *J. Phys. Oceanogr.*, 31: 3538–3550.
- Wu L, Liu Z, Gallimore R. et al. 2003. Pacific decadal variability: The tropical Pacific mode and the North Pacific mode [J]. *J. Climate*, 16: 1101–1120.
- Wu L, Liu Z, Liu Y, et al. 2005. Potential global climatic impacts of the North Pacific Ocean [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 32, L24710, doi: 10.1029/2005GL024812.
- Wu L, Liu Z, Li C, et al. 2007. Extratropical control of recent tropical Pacific decadal climate variability: A relay teleconnection

- [J]. *Climate Dyn.*, 28: 99–112.
- Wu L, Li C, Yang C, et al. 2008. Tropical and extratropical Atlantic–Pacific teleconnection in response to a shutdown of the Atlantic meridional overturning circulation [J]. *J. Climate*, 21: 3002–3019.
- Xie S. 2004. Satellite observations of cool ocean–atmosphere interaction [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 85: 195–208.
- Yang H, Liu Z. 2005. Tropical–extratropical climate interaction as revealed in idealized coupled climate model experiments [J]. *Climate Dyn.*, 24: 863–879.
- Yang H, Zhang Q. 2008. Anatomizing the ocean role in ENSO changes under global warming [J]. *J. Climate*, 21: 6539–6555.
- Yang J, Liu Q, Xie S P, et al. 2007. Impact of the Indian Ocean SST basin mode on the Asian summer monsoon [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34, doi: 10.1029/2006GL028571.
- 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): 978–992. 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): 978–992.
- 曾昭美, 章名立. 1996. 本世纪海洋云量变化与全球变暖问题 [J]. *大气科学*, 20 (2): 149–157. Zeng Zhaomei, Zhang Mingli. 1996. Variation of ocean cloud amounts in the 20th century and the globe warming [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese)*, 20 (2): 149–157.
- 曾昭美, 严中伟. 1999. 本世纪全球变暖的显著性分析 [J]. *应用气象学报*, 10 (增刊): 23–33. Zeng Zhaomei, Yan Zhongwei. 1999. Analysis on the significance of global warming trends during the last 100 years [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese)*, 10 (Suppl.): 23–33.
- Zhang R, Rothstein L M, Busacchi A J. 1998. Origin of upper-ocean warming and El Niño change on decadal scales in the tropical Pacific Ocean [J]. *Nature*, 391: 879–883.
- Zhang R, Delworth T L. 2007. Impact of the Atlantic Multidecadal Oscillation on North Pacific climate variability [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34, L23708, doi: 10.1029/2007GL031601.
- 钟姗姗, 何金海, 刘宣飞. 2002. 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*, 25 (5): 595–602. Zhong Shanshan, He Jinhai, Liu Xuanfei. 2002. Decadal variability and abrupt change of upper-ocean temperature in the Pacific [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese)*, 25 (5): 595–602.
- 朱益民, 杨修群, 俞永强, 等. 2008. FGOALS_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.