科学通报 2010 年 第 55 卷 第 1 期: 74 ~ 79
论 文 www.scichina.com csb.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

亚洲-太平洋涛动变化与北太平洋海温异常的联系

周波涛[①], 赵平[②*], 崔绚[③]

① 国家气候中心, 北京 100081;
② 国家气象信息中心, 北京 100081;
③ 国家气象中心, 北京 100081
* 联系人, E-mail: zhaop@cma.gov.cn

2009-03-24 收稿, 2009-04-24 接受
国家重点基础研究发展计划(编号: 2009CB421407)、国家自然科学基金(批准号: 40805029, 40890052)和财政部/科技部公益类行业专项(编号: GYHY200706005)资助项目

摘要 通过对观测资料的分析, 初步探讨了夏季(6~8 月平均)亚洲-太平洋涛动(APO)变化和北太平洋海表温度(SST)异常的关系, 发现APO强弱的年际变化与北太平洋SST之间存在显著的正相关关系(1954~2003 年间年际变化的相关系数为 0.58). 夏季 APO 偏强(弱)时, 北太平洋 SST 往往偏高(低). 与 APO 异常相关联的动力和热力条件佐证了 APO 和北太平洋 SST 的同位相变化关系. 当 APO 处于正位相时, 高空东亚西风急流减弱, 北太平洋对流层低层为异常反气旋型环流控制. 此外, 北太平洋区域感热潜热通量出现负异常, 海洋得到热量, 同时, 暖水向北的异常平流输送增强. 这些变化均有利于北太平洋 SST 增暖, 反之亦然.

关键词
亚洲-太平洋涛动
北太平洋
海表温度
大气环流
热力条件

海洋是地球气候系统中一个重要的组成部分. 其中, 海表温度(SST)的变化可以引起大气环流和气候的异常. 早在 1950 年代, Namias[1]就指出北太平洋 SST 异常是影响北美气候的重要因素, 并且对大气环流异常具有维持和加强的反馈作用[2]. 吕炯等人[3,4]也发现北太平洋 SST 异常与我国江淮流域梅雨的丰欠有着紧密联系.

近十多年来, 有不少工作研究了北太平洋 SST 变化对气候异常的影响. 如杨英等人[5]探讨了北太平洋海流区 SST 异常与大气环流的相互关系, 揭示出该区域海洋与大气协同作用的事实和机制. 研究还表明北太平洋 SST 和东亚急流系统具有显著联系[6], 而且北太平洋 SST 和东亚急流系统在北美与东亚季风区夏季降水的遥联中起着重要桥梁作用[7]. 余贞寿等人[8]发现夏季北太平洋 SST 异常可通过激发 EUP 遥相关型来影响我国夏季降水. Kawamura[9]和 Park 等人[10]的研究显示夏季北太平洋 SST 偏暖时, 东亚副热带地区同期气候往往十分干燥. 于润玲等人[11]还发现在北太平洋西风漂流区正异常 SST 和赤道东太平洋负异常 SST 的共同影响下, 我国华北夏季降水一般偏多, 反之亦然. Lau 等人[12]着重分析了北太平洋 SST 异常对欧亚大陆和北美气候的影响, 结果表明夏季北太平洋 SST 较常年偏高(低)时, 中国中东部、日本、韩国、太平洋西北部、加拿大西部、美国北部及中西部容易出现以干热(冷湿)为特征的气候. 此外, 朱乾根等人[13]认为, 3 月北太平洋关键区(42.5°~52.5°N, 170°E~170°W)SST 异常可通过影响同期和后期的斜压波列进而影响我国东部夏季降水. 孙建奇等人[14]指出, 北太平洋 SST 异常可以维持阿拉伯半岛-北太平洋遥相关型信号从春到夏的传播.

可见, 北太平洋 SST 在大气环流和气候的变动中起着至关重要的作用. 鉴于其重要性, 有必要对北

英文版见: Zhou B T, Zhao P, Cui X. Linkage between the Asian-Pacific Oscillation and the sea surface temperature in the North Pacific. Chinese Sci Bull, doi: 10.1007/s11434-009-0386-x

太平洋 SST 变化的机理进行深入研究, 明晰影响北太平洋 SST 变化的因素. 已有不少研究[15~18]揭示热带地区 ENSO 的变化可以影响北太平洋 SST 的变化. 武炳义等人[19]还发现冬季喀拉海、巴伦支海海冰面积异常能影响后期初夏北太平洋 SST 的变化. 当冬季该海区海冰偏多(少)时, 夏季北太平洋 SST 偏低(高).

由于海洋-大气是一个相互作用的系统, SST 异常可以影响大气环流的变化, 大气环流异常同样可以引起 SST 的变化. 杨英等人[5]在分析北太平洋 SST 异常与大气环流相互关系时, 发现两者的相互作用中大气环流是首先启动的方面. Lau 等人[12]也提出北太平洋 SST 变化首先是由其上空的反气旋/气旋环流系统驱动的, 即大气环流占着主导作用. 海洋模式模拟结果也证实北太平洋 SST 异常很大部分是由大气强迫的[20]. 孙建奇等人[21]还指出强北极涛动可导致阿留申低压加深, 进而影响北太平洋 SST. 近来, Wang[22]提出太平洋对流层上层存在一个环太平洋遥相关型. Zhao 等人[23]还发现在热带外亚洲和太平洋两个区域存在显著的遥相关型, 即亚洲-太平洋涛动(APO), 并指出 APO 的异常变化可以导致亚洲和太平洋区域上空的大尺度大气环流发生异常. 这些研究启示: APO 与北太平洋 SST 是否存在联系? 这也正是本文所要探讨的问题.

1 资料和亚洲-太平洋涛动指数

本文所用资料包括: (1) 美国国家环境预报中心/大气研究中心(NCEP/NCAR)的再分析资料[24], 水平分辨率为 2.5° × 2.5°; (2) 美国国家海洋和大气局(NOAA)提供的 SST 和风应力资料[25], 水平分辨率为 2° × 2°; (3) 马里兰大学 SODA 资料中的海流资料[26], 纬向分辨率为 1°, 径向 128 个点, 垂直 20 层. 研究所用的时间长度为 1954~2003 年.

APO 反映的是热带外亚洲和太平洋区域上空大气环流的一种遥相关特征, 这种涛动特征在夏季 500~200 hPa 垂直积分的扰动温度(T')气候场上主要表现为: 欧亚大陆上空 T'为正值, 北太平洋上空 T'为负值, 呈现一种跷跷板式的振荡. 关于 APO 的详细说明可参见文献[23]和[27]. 为描述 APO 强度的变化, 本文沿用 Zhao 等人[23]的定义, 采用(60°~120°E, 15°~50°N)和(180°~120°W, 15°~50°N)两个区域平均的 T'差作为 APO 指数(APOI), 即 APOI= $T'_{60°\sim120°E,15°\sim50°N}-T'_{180°\sim120°W,15°\sim50°N}$.

2 结果分析

图 1 为夏季 APOI 与同期 SST 的相关分布. 可见, 北太平洋 30°~50°N 区域为正相关, 最大相关系数超过 0.5, 说明 APO 异常偏强(弱)时, 北太平洋 SST 升高(降低). 如果选取显著相关区域(150°E~150°W, 35°~45°N)里平均的 SST 作为北太平洋 SST 指数(NPSSTI)来代表北太平洋 SST 的变化, 可以发现 APOI 与 NPSSTI 随时间的演变形式非常一致(图 2), 都具有明显的年际和年代际变化特征. 约在 20 世纪 70 年代中期之前, APOI 和 NPSSTI 大多处于正位相阶段, 对应强的 APO 和暖的北太平洋 SST; 70 年代中期之后, 两者转为负位相阶段, 对应弱的 APO 和冷的北太平洋 SST. 扣除线性趋势前后, APOI 和 NPSSTI 的相关系数分别为 0.52 和 0.58, 均超过 99%的显著性水平, 意味着 APO 异常与北太平洋 SST 变化在年际和年代际时间尺度上均存在显著联系. 由于本文重点研究两者在年际时间尺度上的联系, 所以在随后的分析中均扣除了线性趋势.

为揭示 APO 和北太平洋 SST 联系的物理机理, 我们给出了夏季 200 hPa 纬向风分别与 APOI 和 NPSSTI 的回归分布(图 3). 从图 3(a)可以看到, 与北太平洋 SST 变化相联系的高层环流系统主要是横跨北太平洋-欧亚大陆-北非的环球副热带西风急流. 相应于北太平洋 SST 异常升高一个标准方差, 30°~45°N 的北太平洋-东亚地区为异常的东风, 北侧为异常的西风. 这种分布型态表明: 东亚西风急流减弱而北侧西风气流加强时, 北太平洋 SST 偏暖, 反之亦然. 这与 Lau 等人[12]所得的结论相吻合. APOI 与夏季 200 hPa 纬向风的回归关系(图 3(b))与图 3(a)十分类似, 即 APO 位于正位相时, 东亚西风急流减弱, 北侧西风气流异常增强, 与这种环流特征相对应的正是北太平洋 SST 偏暖; 反过来, 在 APO 负位相时则正好相反. 200 hPa 纬向风的回归分布确证了 APO 和北太平洋 SST 间正相关关系的存在. 因此, 东亚西风急流在 APO 和北太平洋 SST 的联系中起着重要的纽带作用, APO 异常变化可以通过影响东亚西风急流强度进而引起北太平洋 SST 的显著年际波动.

北太平洋上空对流层低层的反气旋/气旋环流系统对北太平洋 SST 变化同样具有显著影响[12]. 当对流层低层出现异常反气旋型环流时, 北太平洋 SST

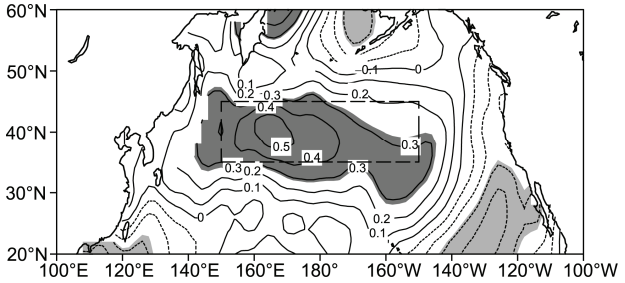


图 1 夏季 APOI 与 SST 的相关分布

阴影区表示通过 **95%**的信度

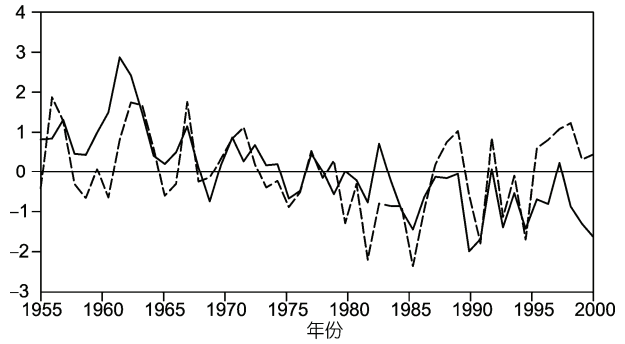


图 2 夏季 APOI(实线)与 NPSSTI(虚线)的标准化时间序列

往往偏高; 反之, 当对流层低层出现异常气旋型环流时, 北太平洋 SST 往往偏低. 这在 NPSSTI 同 850 hPa 水平风场和 500 hPa 位势高度的回归分布图(图 4(a))上体现得十分清楚. 图 4(a)显示, 与北太平洋 SST 异常变化相联系的中低层大气环流显著特征主要表现为: 北太平洋 850 hPa 为异常反气旋型环流控制, 500 hPa 位势高度的回归系数为正值. APOI 与 850 hPa 水平风场和 500 hPa 位势高度的回归分布(图 4(b))揭示, 在北太平洋地区同样存在 850 hPa 异常反气旋型环流和 500 hPa 位势高度正异常, 大气环流的这种异常特征与图 4(a)相一致, 表明北太平洋上空对流层中低层反气旋/气旋型环流是联系 APO 和北太平洋 SST 同位相变化关系的一种途径. 当 APO 偏强(弱)时, 北太平洋对流层低层易出现异常反气旋(气旋)型环流, 有利于北太平洋 SST 升高(降低).

北太平洋 SST 变化与热带中东太平洋 SST 变化具有密切联系, 热带地区 ENSO 的变化可以通过大气环流影响到北太平洋 SST 的异常[15~18]. 因此, 为明晰 ENSO 对所得结论的影响, 我们也计算了滤去 ENSO 信号后的 200 hPa 纬向风, 850 hPa 水平风场和 500 hPa 位势高度场分别与 APOI 的回归系数, 所得的回归分布(图略)与未滤去 ENSO 信号的回归分布十

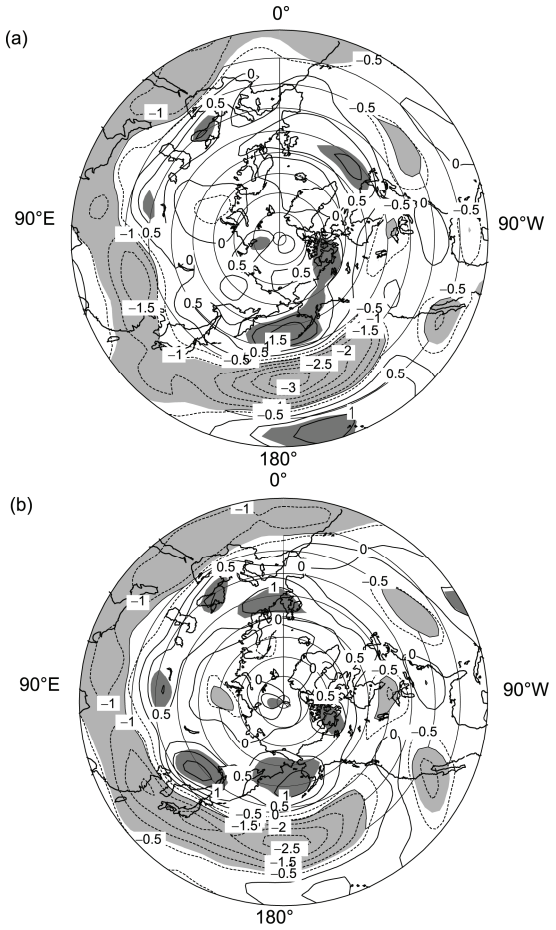


图 3 夏季 200 hPa 纬向风分别投影到 NPSSTI(a)和 APOI(b)上的回归系数分布

阴影区表示通过 95%的信度, 单位: m/s

分类似, 表明扣除 ENSO 信号后文中所揭示的物理过程仍然存在.

上述分析从大气环流角度论证了 APO 异常与北太平洋 SST 变化联系的物理过程, 接下来再探讨海表通量的贡献. 研究表明, 海洋和大气之间的感热和潜热通量交换是影响北太平洋 SST 的一个重要因素, 向上的感热和潜热通量正(负)距平对应于北太平洋 SST 偏冷(暖)[28,29]. 为研究 APO 异常变化对北太平洋区域感热潜热通量的影响, 我们分析了感热潜热通量之和与 APOI 的回归分布(图 5(b)). 为便于比较, 也给出了感热潜热通量总和与 NPSSTI 的回归分布(图 5(a)). 比较这两幅图可以发现, 两者的回归分布型态非常相似, 均在北太平洋区域出现显著的负异常特征(负值表示大气向海洋输送热量, 海洋得到热量). 这种分布型态与表层异常反气旋环流具有密切关系.

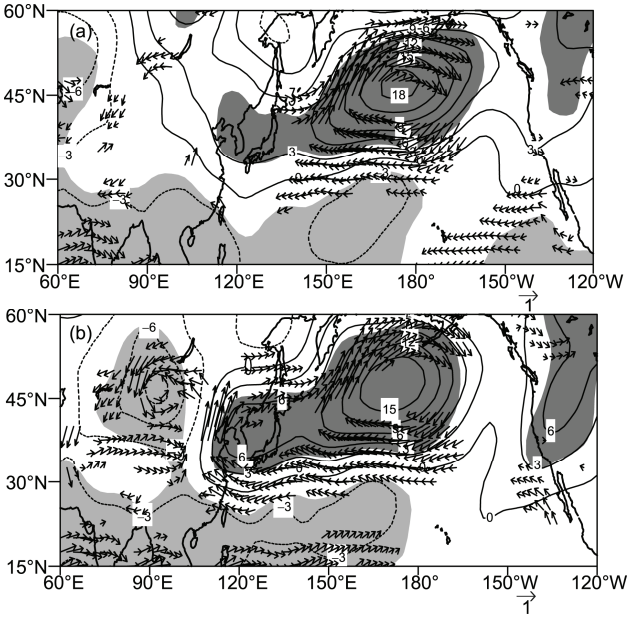


图 4　夏季 850 hPa 水平风场(单位: m/s)和 500 hPa 位势高度(单位: m)分别投影到 NPSSTI(a)和 APOI(b)上的回归系数分布

阴影区表示与 500 hPa 位势高度的回归通过 95%信度, 矢量表示仅通过 95%信度的水平风场

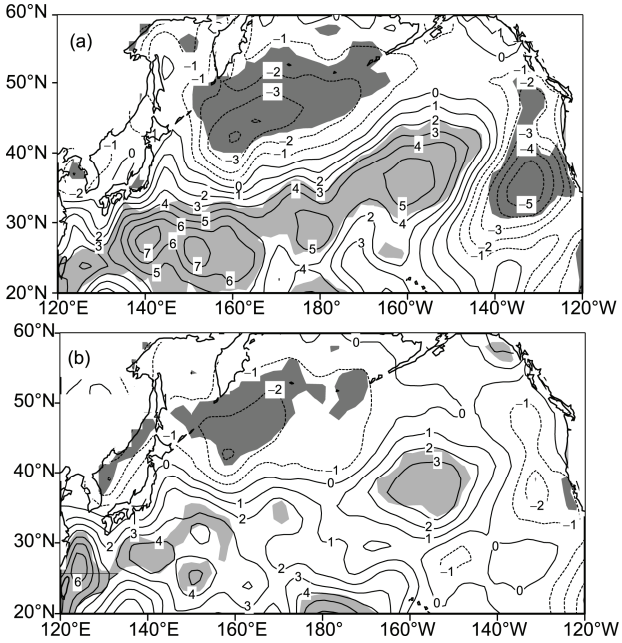


图 5　感热和潜热通量总和分别投影到 NPSSTI(a)和 APOI(b)上的回归系数分布

阴影区表示通过 95%的信度

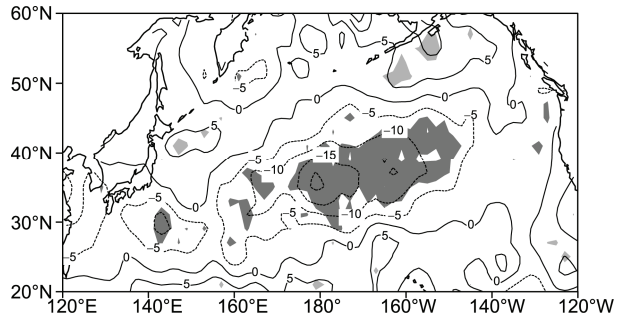


图 6　强弱 APO 年纬向风应力的合成差值分布

单位: $m^2 \cdot s^{-2}$. 阴影区表示通过 95%的信度

Cayan[28]指出, 北太平洋区域感热潜热通量的变化主要是由风向的变化引起的, 该区域异常偏北(南)风通过温度和湿度平流作用可导致感热潜热通量正(负)异常. 所以, 当 APO 较常年偏强时, 北太平洋低层受异常高压系统控制, 在北太平洋中西部为异常的偏南风和暖湿平流, 海洋得到热量, 结果导致北太平洋 SST 升高; 反过来, 当 APO 较常年偏弱时, 北太平洋地区感热潜热通量为正异常, 海洋失去热量, 导致北太平洋 SST 降低.

不过, 由于 APO 与感热潜热通量呈负位相变化的区域(图 5(b))位于图 1 所揭示的显著正相关区域的北侧, 所以感热潜热通量的变化不宜解释其南侧 SST 的变化. 因此, APO 可能还通过其他物理过程影响北太平洋 SST 的变化. 为进一步探讨 APO 影响北太平洋 SST 的机理, 我们分别挑出扣除线性趋势后的 APO 强弱年作合成分析. 其中, 强(弱)APO 年为 1960, 1961, 1962, 1963, 1967, 1984, 1991, 1994, 2000(1957, 1958, 1969, 1976, 1977, 1983, 1986, 1987, 1992, 1993, 1995)年.

图 6 为强弱 APO 年纬向风应力的合成差异分布. 可见, 在所关注的(150°E~150°W, 35°~45°N)区域中为大范围的纬向风应力负异常. 由于气候意义下, 该区域盛行西风应力, 其南侧为东风应力, 所以当 APO 偏强时, 北太平洋区域西风应力减弱, 减弱的纬向风应力通过改变 Ekman 热量输送强度, 从而造成北平洋 SST 升高, 反之亦然[30~32]. 这可从 APO 强年和弱年对应的异常径向海流平流分布(图 7)得到证实. 强 APO 年, 我们所关注的北太平洋大部分区域为向北的暖水输送异常, 造成该区域 SST 升高. 相反地, 弱 APO 年, 我们关注的北太平洋区域为向南的冷水输送异常, 造成该区域 SST 降低. 因此, 综上来看, APO 可通过影响热量通量交换和平流输送来影响北太平洋 SST 的变化.

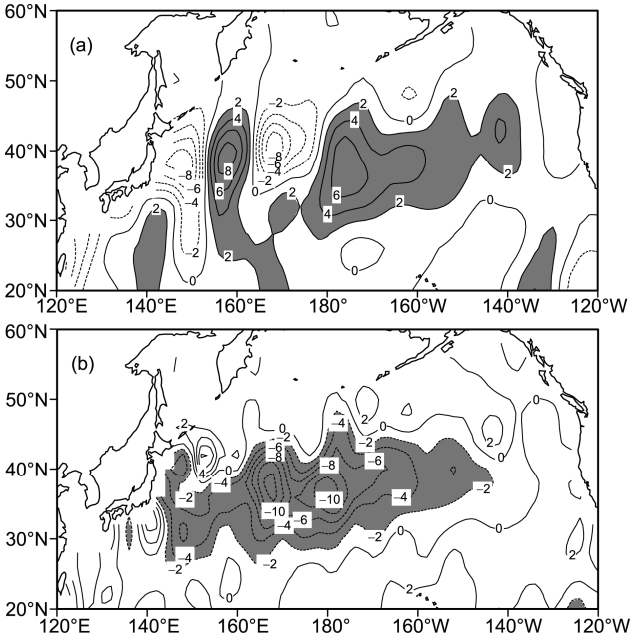


图 7 强 APO 年(a)和弱 APO 年(b)对应的径向海流平流距平
单位: 10^{-8}°C·s^{-1}, (a)与(b)中的阴影分别表示值>2 和<–2 的区域

3 结论与讨论

本文研究了夏季APO变化和北太平洋SST异常之间的关系. 结果表明, APO同北太平洋SST在年际和年代际时间尺度上都具有显著的正相关关系. 1954~2003年期间, 两者的相关系数在扣除线性趋势前后分别为0.52和0.58, 都通过99%的显著性水平. 因此, APO偏强时, 北太平洋 SST 升高; 反之, APO 偏弱时, 北太平洋 SST 降低.

文章还进一步分析了 APO 异常和北太平洋 SST 变化相联系的内在原因. 结果表明, 在 APO 正位相年份, 高空东亚西风急流减弱, 北太平洋对流层中低层出现异常的反气旋型环流, 位势高度增加, 这种大气环流条件有利于北太平洋 SST 增暖. 此外, 在 APO 与 SST 显著相关区域北侧为感热潜热通量负异常, 海洋得到热量, 结果导致该区域SST升高. 同时, 由于纬向风应力的变化, 北太平洋区域出现向北的暖水异常输送, 有利于北太平洋 SST 的增暖. 因此, 北太平洋 SST 的升高可能是热量通量交换和平流输送共同作用的结果. APO 负位相年时所对应的动力和热力条件与 APO 正位相年时恰好相反, 结果导致北太平洋 SST 降低. 本研究对于认识和理解北太平洋 SST 的变化机理及成因具有一定的理论意义. 不过, 上述只是对 APO 与北太平洋 SST 相联系的物理机制做了一个初步的解释. 由于海气相互作用是一个比较复杂的问题, 要弄清两者联系的动力和热力过程, 还需要今后作更多的定量诊断以及利用先进的气候模式作深入研究, 这也是我们以后的努力方向.

致谢 在本文完成过程中与郜永祺研究员、苏京志博士进行了有益的讨论, 在此表示衷心的感谢.

参考文献

1 Namias J. Recent seasonal interaction between North Pacific waters and the overlying atmospheric circulation. J Geophys Res, 1959, 64: 631—646
2 Namias J. Large-scale air-sea interaction over the North Pacific from summer 1962 through the subsequent winter. J Geophys Res, 1963, 68: 6171—6186
3 吕炯. 海水温度与水旱问题. 气象学报, 1950, 21: 1—16
4 吕炯, 张丕远. 北太平洋温度场变异与长江中下游降水异常. 中国科学, 1964, 13: 113—142
5 杨英, 孙照渤. 中纬度北太平洋 SST 异常与大气环流的关系. 南京气象学院学报, 1995, 18: 192—199
6 Yang S, Lau K M, Kim K M. Variations of the East Asian jet stream and Asian-Pacific-American winter climate anomalies. J Clim, 2002, 105: 306—325
7 Lau K M, Weng H. Recurrent teleconnection patterns linking summertime precipitation variability over East Asia and North America. J Meteorol Soc Jpn, 2002, 80: 1129—1147
8 余贞寿, 孙照渤, 曾刚. 太平洋 SSTA 对中国东部夏季降水的影响Ⅱ-数值模拟. 热带气象学报, 2005, 21: 478—487
9 Kawamura R. A rotated EOF analysis of global sea surface temperature variability with interannual and interdecadal scales. J Phys Oceanogr, 1994, 24: 707—715
10 Park C K, Schubert S D. On the nature of the 1994 East Asian summer drought. J Clim, 1997, 10: 1056—1070
11 于润玲, 孙照渤, 陈海山. 华北夏季降水与北半球环流及北太平洋海温关系的初步分析. 南京气象学院学报, 2002, 25: 577—586
12 Lau K M, Lee J Y, Kim K M, et al. The North Pacific as a regulator of summertime climate over Eurasia and North America. J Clim, 2004,

17: 819—833
13 朱乾根, 滕莺, 徐国强. 北太平洋中纬海温异常对中国东部夏季降水影响的可能途径. 南京气象学院学报, 2000, 23: 1—8
14 孙建奇, 袁薇, 高玉中. 阿拉伯半岛-北太平洋型遥相关及其与亚洲夏季风的关系. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2008, 38: 750—762
15 Zhang Y, Wallace J M, Iwasaka N. Is the climate variability over the North Pacific a linear response to ENSO? J Clim, 1996, 9: 1468—1478
16 Lau N C, Nath M J. The role of the “Atmospheric Bridge” in linking tropical Pacific ENSO events to extratropical SST anomalies. J Clim, 1996, 9: 2036—2057
17 Barlow M, Nigam S, Berbery E H. ENSO, Pacific decadal variability, and U.S. summertime precipitation, drought, and stream flow. J Clim, 2001, 14: 2105—2128
18 Yeh S W, Kirtman B P. On the relationship between the interannual and decadal SST variability in the North Pacific and tropical Pacific Ocean. J Geophys Res, 2003, 108: 4344, doi: 10.1029/2002JD002817
19 武炳义, 黄荣辉, 高登义. 冬季喀拉海、巴伦支海海冰面积变化对后期北太平洋海温的影响. 气候与环境研究, 1999, 4: 165—175
20 Cayan D R, Miller A J, Barnett T P, et al. Seasonal-to-interannual fluctuations in surface temperature over the Pacific: Effects of monthly winds and heat fluxes. In: Martinson D G, Bryan K, Hall M M, et al, eds. Natural Climate Variability on Decadal-to-Century Time Scales. Washington D C: National Academy Press, 1995. 133—150
21 孙建奇, 王会军. 北极涛动与太平洋年代际振荡的关系. 科学通报, 2005, 50: 1648—1653
22 Wang H J. The circum-Pacific teleconnection pattern in meridional wind in the high troposphere. Adv Atmos Sci, 2005, 22: 463—466
23 Zhao P, Zhu Y N, Zhang R H. An Asian-Pacific teleconnection in summer tropospheric temperature and associated Asian climate variability. Clim Dyn, 2007, 29: 293—303
24 Kalnay E, Kanamistu M, Kistler R, et al. NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. Bull Am Meteorol Soc, 1996, 77: 437—471
25 Smith T M, Reynolds R W. Improved Extended Reconstruction of SST (1854—1997). J Clim, 2004, 17: 2466—2477
26 Carton J A, Chepurin G, Cao X, et al. A simple ocean data assimilation analysis of the global upper ocean 1950-1995, Part 1: Methodology. J Phys Oceanogr, 2000, 30: 294—309
27 周波涛, 崔绚, 赵平. 亚洲-太平洋涛动与西北太平洋热带气旋频数的关系. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2008, 38: 118—123
28 Cayan D R. Latent and sensible heat flux anomalies over the northern oceans: The connection to monthly atmospheric circulation. J Clim, 1992, 5: 354—369
29 Lau N C, Nath M J. Impact of ENSO on SST variability in the North Pacific and North Atlantic: Seasonal dependence and role of extratropical sea-air coupling. J Clim, 2001, 14: 2846—2866
30 Miller A J, Cayan D R, Barnett T P, et al. Interdecadal variability of the Pacific Ocean: Model response to observed heat flux and wind stress anomalies. Clim Dyn, 1994, 9: 287—302
31 Latif M, Barnett T P. Causes of decadal climate variability over the North Pacific and North America. Science, 1994, 266: 634—637
32 Latif M, Barnett T P. Decadal climate variability over the North Pacific and North America: Dynamics and predictability. J Clim, 1996, 9: 2407—2423