

夏季中国降水型的年代际变化与大气内部动力过程 及外强迫因子关系

张庆云¹ 吕俊梅² 杨莲梅^{1,3} 卫捷¹ 彭京备¹

1 中国科学院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, 北京 100029

2 中国气象局科学研究院, 北京 100080

3 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所, 乌鲁木齐 830002

摘要 根据中国 160 站月平均降水、NCEP/NCAR 的再分析资料以及英国气象局哈德莱中心 1900~1999 年全球 $1^\circ \times 1^\circ$ 格点月平均海表温度距平资料, 利用物理量诊断、EOF 分析等方法, 探讨东亚季风区大气环流内部动力过程与大气外强迫因子(海温)年代际变化及对中国夏季降水型的影响。分析发现, 中国东部地区、西北地区夏季降水型有各自不同的年代际变化趋势; 中国东部夏季降水型及东亚夏季风环流年代际变化趋势与大气外强迫因子北太平洋中纬度海温年代际变化(PDO)关系密切; 中国西北地区夏季降水年代际变化与大气内部动力过程中纬度西风带扰动动能年代际减弱有关。

关键词 东、西部降水型 外强迫 动力过程 年代际变化

文章编号 1006-9895(2007)06-1290-11

中图分类号 P461

文献标识码 A

The Interdecadal Variation of Precipitation Pattern over China during Summer and Its Relationship with the Atmospheric Internal Dynamic Processes and Extra-Forcing Factors

ZHANG Qing-Yun¹, LÜ Jun-Mei², YANG Lian-Mei^{1,3}, WEI Jie¹, and PENG Jing-Bei¹

1 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

3 Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Ürümqi 830002

Abstract Analyses of the monthly precipitation of 160 stations over China during 1951–2006, 50-yr NCEP/NCAR reanalysis dataset and monthly $1^\circ \times 1^\circ$ sea surface temperature data of Hadley center during 1900–1999 reveal remarkably different interdecadal variation of precipitation pattern between eastern and northwestern China in their temporal–spatial distributions. Since the early 1980s the precipitation over the Yangtze River valley became more than climatic average and the precipitation over Huabei Plain became less than climatic average, and since the late 1980s the precipitation over northwestern China became more than climatic average. The contributions of the atmospheric internal dynamic processes and the extra-forcing factors (such as sea surface temperature) to the interdecadal variations of precipitation between eastern and northwestern China are different. The interdecadal variations of pre-

收稿日期 2007-05-30, 2007-07-05 收修定稿

资助项目 中国科学院知识创新重要方向性项目 KZCX3-SW-226, 国家重点基础研究发展规划项目 2004CB418303, 国家自然科学基金资助项目 40523001

作者简介 张庆云, 女, 1950 年出生, 研究员, 主要从事亚洲季风和短期气候变化的成因机理及预测理论研究。

E-mail: zqy@mail.iap.ac.cn

precipitation over eastern China during summer are related to the temporal evolution of the Pacific Decadal Oscillation (PDO) by using empirical orthogonal function (EOF) method and regress analysis. The interdecadal variations of precipitation over northwestern China during boreal summer are related to the interdecadal variation of anomalous perturbation kinetic energy of Rossby wave along East Asian westerly jet in mid-latitudes. Since 1988 the perturbation kinetic energy of Rossby wave along East Asian westerly jet in mid-latitudes became weaker and meantime the precipitation over northwestern China became more than climatic average.

Key words the precipitation pattern in China, extra-forcing factor, internal dynamic processes, interdecadal variation

1 引言

东亚是全球最显著的季风气候区, 东亚季风环流在时间尺度上呈现出显著的季节内、季节、年际和年代际变化特征。受东亚季风环流多时间尺度变化的影响, 中国天气气候的变化也存在多时间尺度的特征。王绍武等^[1]分析了 19 世纪 80 年代到 20 世纪 90 年代中国东部每 10 年平均年降水量距平百分比的变化, 指出长江中下游地区降水呈现出周期不等的旱涝交替变化, 20 世纪 80 年代以来的这个多雨时段维持时间最长。张庆云等^[2]进一步指出, 20 世纪 60~70 年代长江流域降水处于年代际变化的少雨阶段, 1959、1963、1964、1967、1972、1976、1978 年都发生了严重的干旱; 20 世纪 80 年代以来, 长江流域降水处于年代际变化的多雨阶段, 1980、1983、1993、1996、1998 年出现了严重洪涝。张庆云^[3]对 1880~1997 年华北降水变化进行了研究, 指出华北降水存在显著的年际和年代际变化, 1883~1898 年和 1949~1964 年是华北降水相对较丰沛时段; 1899~1920 年和 1965~1997 年, 华北降水处于相对偏少阶段, 其中 1980~1993 年降水持续偏少, 干旱现象严重。陈烈庭^[4]研究了华北各区 1951~1997 年夏季降水的地域性特征, 指出华北地区近 40 多年发生过 2 次突然变干的过程, 一次在 20 世纪 60 年代中期, 另一次在 70 年代末期。后者突变无论在程度或范围上都比前者突变要大。这些研究都表明, 20 世纪 50 年代到 60 年代中期华北降水相对较丰沛, 60 年代中期以后特别是 80 年代以来华北降水处于年代际变化的相对偏少阶段, 而长江流域夏季降水在 20 世纪 80~90 年代明显增加。李栋良等^[5]、施雅风等^[6]和杨莲梅^[7]等研究发现, 中国西北地区降水也存在显著的年代际变化趋势, 20 世纪 80 年代末以来, 中国西北地区降水处于年代际降水变化的相对偏多期。施雅风

等^[6]分析指出, 西北气候可能正由暖干向暖湿转型, 北疆、天山山区及其南麓、南疆西部为显著转型区, 其它地区为轻度转型区。可见, 无论是中国东部地区还是西部地区, 夏季降水都出现了显著的年代际变化趋势。新疆气候不直接受季风环流系统影响, 为独特的干旱、半干旱沙漠气候, 降水主要集中在夏季, 近十几年新疆降水量明显增多, 显然是一个较强的气候现象, 但中国东、西部降水的年代际变化趋势并不一致, 因此中国东、西部气候的年代际变化的成因机理值得深入研究。

大量研究^[8~15]已指出, El Niño 事件(赤道中、东太平洋 SST 异常)是全球天气气候年际和年代际变化的一个强信号; El Niño 年的夏季, 亚洲和非洲夏季风环流比正常年份弱, 撒哈拉(Sahel)、印度和华北地区夏季降水相对偏少; La Niña 年的夏季, 夏季风环流比正常年偏强, 撒哈拉、印度和华北地区夏季降水相对偏多。20 世纪 50~60 年代中期, 撒哈拉、印度和华北夏季降水处于年代际降水相对偏多时段, 与这个时期 La Niña 现象占优势有关; 20 世纪 80 年代以来, 华北夏季降水处于年代际降水偏少于旱期与 El Niño 现象占优势有关。研究指出, 中国东部天气气候变化与东亚季风环流强弱变化有较好的关系, 但中国西部的天气气候并不直接受东亚季风环流系统影响, 因此中国东、西部气候年代际变化的成因机理是本文研究的重点。第 2 节给出资料及方法; 第 3 节分析中国东、西部夏季降水的年代际变化特征; 第 4 节探讨中国东部地区夏季降水年代际变化的环流异常特征及可能机理; 第 5 节探讨中国西北地区夏季降水年代际变化的环流异常特征及可能机理; 第 6 节总结与讨论。

2 资料和方法

全球降水、环流及海温资料是根据 1949~2001 年全球陆地 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 的月平均降水、NCEP/

NCAR 的再分析资料以及英国气象局哈德莱中心 1900~1999 年全球 $1^\circ \times 1^\circ$ 格点月平均海表温度距平资料; 中国 160 站月降水资料由国家气候中心提供, 中国东部各区域平均降水由国家九五重中之重“我国短期气候系统的研究”华北 (17 站)、长江中下游 (17 站) 和华南 (15 站) 的定义表示; 新疆北部夏季平均降水量由 8 个站 (阿勒泰、塔城、伊犁、乌苏、石河子、乌鲁木齐、奇台、北塔山) 的 7~8 月 (汛期降水) 代表。

3 中国东、西部夏季降水的年代际变化特征

根据国家气候中心提供的中国 160 站月降水资料, 图 1 是 1980~1999 年 (6~8 月) 与 1951~1971 年 (6~8 月) 降水距平百分率差值图。本文把 105°E 以东区域称为中国东部, 105°E 以西称为中国西部。从图 1 可见, 105°E 以东雨带分布的最显著特征是: 长江中下游及江南北部地区呈现正的大值区, 河套以东的华北地区呈现为负的大值区; 105°E 以西的最显著特征是: 西北地区降水呈现正的大值区。可见, 无论是中国东部还是中国西部夏季降水都有显著的年代际特征。

为了清楚地看出中国东、西部各区域降水年代际变化特征, 图 2 给出华北 (17 站)、长江中下游 (17 站) 和华南 (15 站) 1951~2005 年夏季 (6~8 月) 与新疆北部 (8 站) (7~8 月) 降水距平 9 年滑

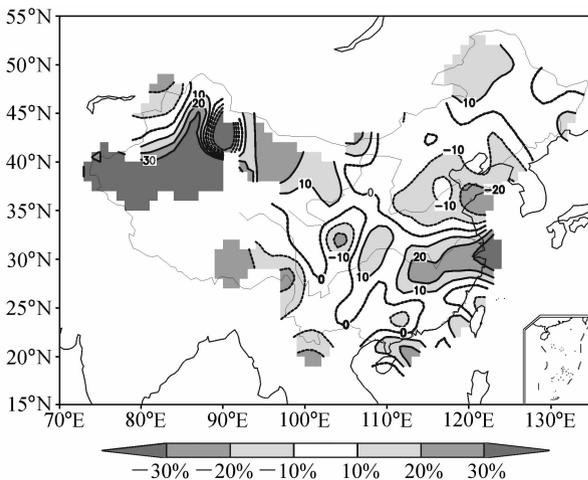


图 1 1980~1999 年 (6~8 月) 与 1951~1971 年 (6~8 月) 降水距平百分率差值图

Fig. 1 The difference of precipitation anomaly percentage between 1980-1999 and 1951-1971 during summer

动变化。从图 2 可见, 20 世纪 50~70 年代末, 特别是 1951~1965 年, 华北地区夏季降水处于年代际变化的偏多阶段, 而 1980 年后处于年代际降水偏少阶段 (见图 2a); 20 世纪 80 年代以前, 夏季长江流域降水处于年代际偏少阶段, 而 80 年代后处于年代际偏多阶段 (见图 2b); 华南地区降水的年代际变化的周期相对较短, 20 世纪 70 年代中期到 80 年代末降水相对偏少, 90 年代初到 21 世纪初降水相对偏多 (见图 2c); 西北地区 1973~1986 年降水偏少 (14 年降水平均值为 26.6 mm, 标准差为 7.1 mm), 1988~2005 年降水相对偏多 (1988~2001 年的 14 年降水平均值为 53.3 mm, 标准差为 11.9 mm), 可见新疆北部 1988~2001 年平均降水比 1973~1986 年平均降水多一倍, 降水年代际变化的成因机理值得深入研究。

4 夏季中国东部降水型及环流年代际特征与太平洋海温年代际变化的关系

图 3a 给出的是根据 1949~2001 年全球陆地 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 的 (6~8 月) 平均降水资料进行经验正交函数展开的中国东部 ($20^\circ\text{N} \sim 45^\circ\text{N}$, $105^\circ\text{E} \sim 130^\circ\text{E}$) 夏季降水年代际变化第一主分量的主模态 (滤去 10 年以下尺度, 方差贡献率为 34%); 图 3b 是年代际变异标准化的时间序列 (实线) 及 3 次多项式趋势线 (虚线)。夏季中国东部降水出现显著的负、正、负、正的纬向分布, 即长江中下游及江南北部地区为正值区, 华南、华北地区为负值区 (图 3a), 这与图 1 所示的中国 160 站资料分析的东部降水型的年代际变化一致。图 3b 是与图 3a 对应的时间序列的变化, 20 世纪 80 年代以前的负位相, 表明长江中、下游地区降水相对偏少, 华南和华北降水相对偏多; 80 年代至 90 年代时间序列转为正位相, 表明长江中、下游降水相对偏多, 华南和华北降水相对偏少。

与中国东部夏季降水年代际变化相对应的东亚夏季风环流有什么年代际异常特征? 图 4a、b 是 1950~1965 年、1980~1997 年平均北半球夏季 850 hPa 风场距平合成。图 4 中最显著的异常特征出现在中国东部 ($20^\circ\text{N} \sim 45^\circ\text{N}$, $105^\circ\text{E} \sim 120^\circ\text{E}$) 范围内, 即 1950~1965 年夏季, 850 hPa 风场上中国东部地区呈现偏南风距平, 而 1980~1997 年夏季

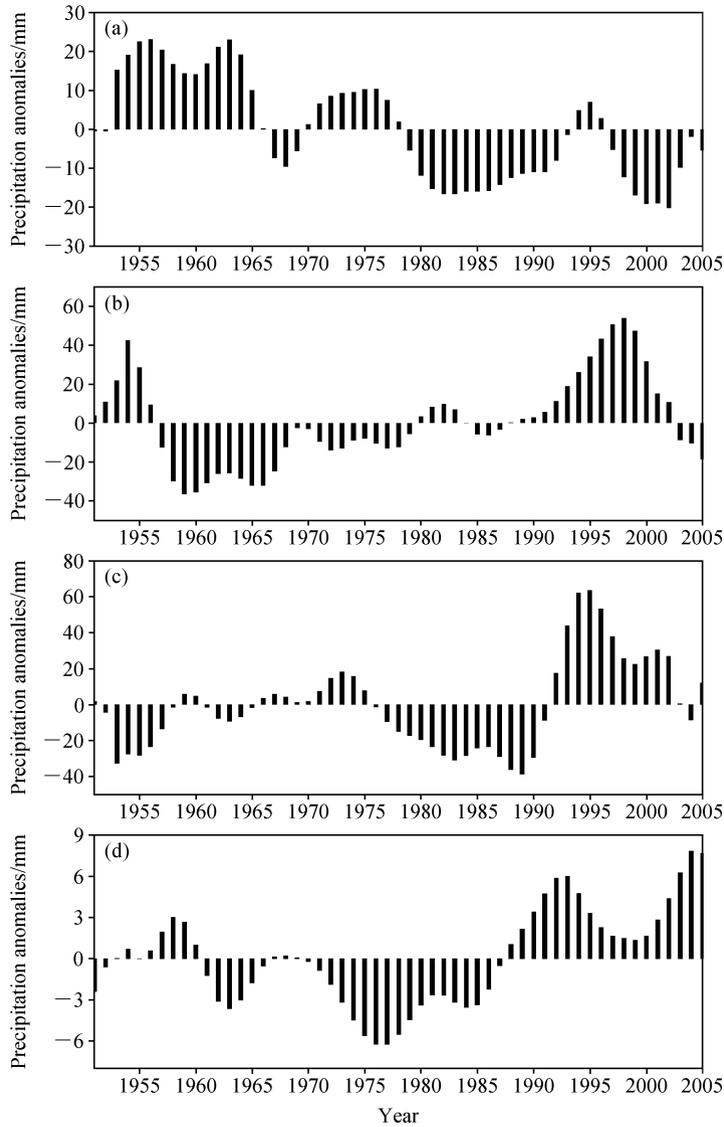


图2 夏季降水距平9年滑动平均: (a) 华北; (b) 长江中下游; (c) 华南; (d) 新疆北部
Fig. 2 The 9-year running averages of precipitation anomalies in summer: (a) 17 stations in North China; (b) 17 stations in the Yangtze River valley; (c) 15 stations in South China; (d) 8 stations in Northwest China

850 hPa 风场上中国东部呈现偏北风距平。中国东部 (20°N~45°N, 105°E~120°E) 地区风距平场的这种显著的年代际变化, 说明 20 世纪 80 年代以来, 华北地区降水呈现的年代际减少趋势与东亚地区偏南风气流呈现年代际减弱, 致使输送到华北地区的水汽减少有关。

为什么 20 世纪 80 年代以来东亚夏季风环流出现了年代际减弱? 许多研究都指出, 20 世纪北太平洋海温的变化存在显著的年代际变化趋势, 这种数十年尺度的低频变化被称之为太平洋年代际涛动 (PDO)^[16]。PDO 通常被描述为一种长期存在的与

ENSO 较为相像的太平洋气候变化态^[17, 18]。Mino-
be^[19]的研究进一步指出, 20 世纪 PDO 出现两个主要的变化周期, 一个为 15~25 年, 另一个为 50~70 年。最近的研究显示, PDO 对北太平洋地区的大气环流有着重要的影响。北太平洋上空大气环流槽、脊频率与 PDO 所处的冷、暖位相有着密切的关系^[20~22]。东亚夏季风环流年代际变化是否受北太平洋海温的年代际演变趋势的影响?

图 5a 给出 1900 年 1 月~1999 年 12 月北太平洋 20°N 以北的 SST 场去掉全球增暖趋势后的经验正交函数第一特征向量的时间序列 PDO 指数 (图

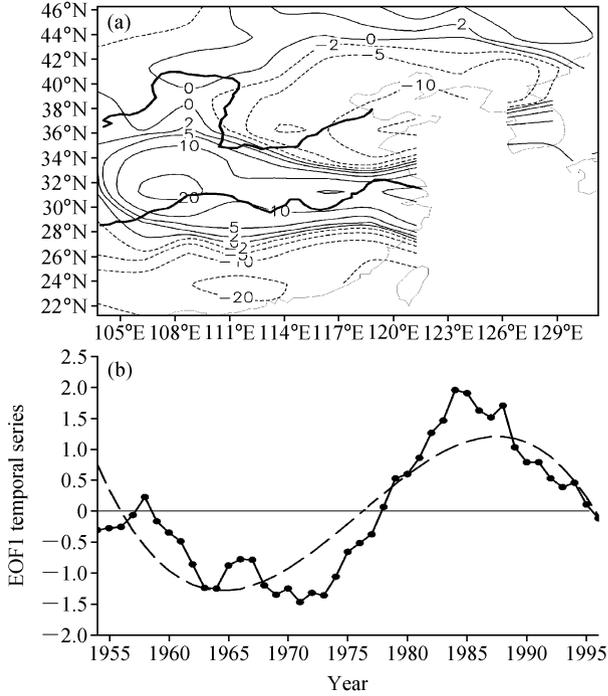


图3 (a) 1949~2001年(6~8月平均)降水的年代际变化 EOF 第一主分量模态; (b) 第一主分量的时间序列及 3 次多项式趋势线

Fig. 3 Spatial pattern (a) and temporal series and cubic polynomial fit (b) of EOF1 (the first principal component of EOF) of interdecadal variation of precipitation in Jun, Jul and Aug (JJA) during 1949 - 2001

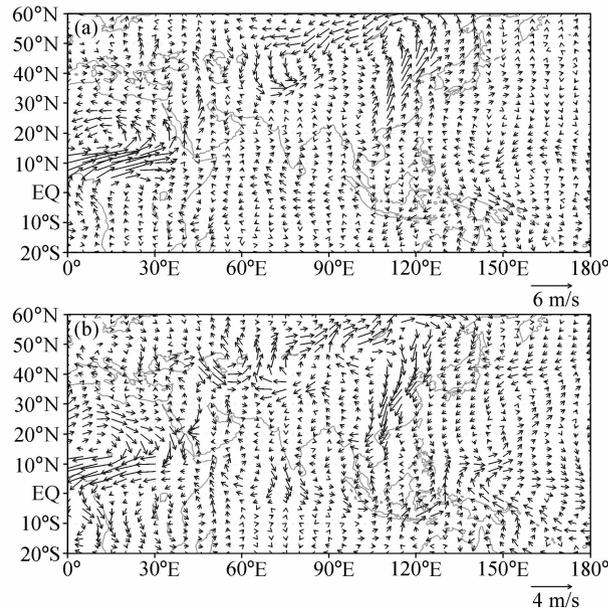


图4 北半球夏季 850 hPa 风场距平合成: (a) 1950~1965 年平均; (b) 1980~1997 年平均

Fig. 4 Composite wind anomalies at 850 hPa in Northern summer averaged over (a) 1950 - 1965 and (b) 1980 - 1997

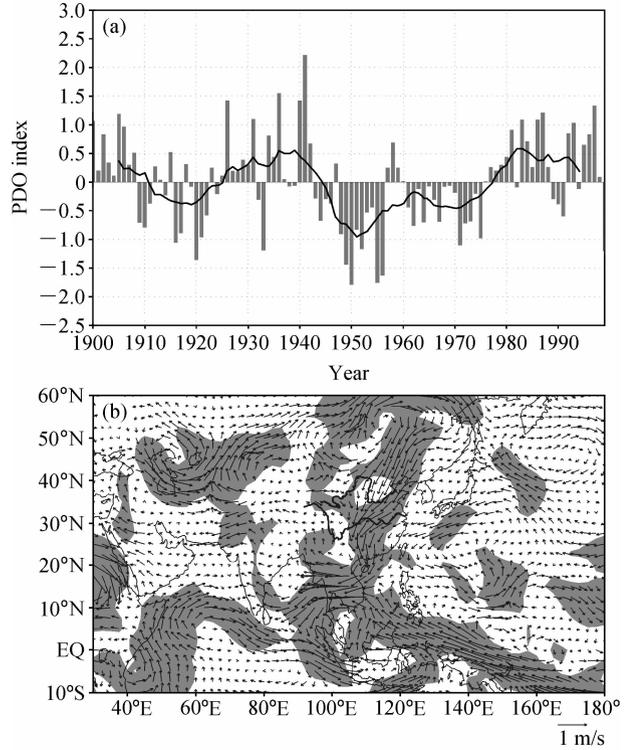


图5 (a) 北太平洋 20°N 以北的 SST 场第一特征向量的时间序列 (直方条: 年平均的 PDO 指数, 实线: 11 年滑动平均曲线); (b) 冬季 PDO 指数对夏季 850 hPa 风距平场的回归系数的分布 (阴影为 t 检验达到 95% 显著性水平的区域)

Fig. 5 (a) Temporal series of annual PDO index (histogram) and 11-year running average (solid line) of EOF1 for SST to the north of 20°N over the Pacific; (b) the regression patterns based on the PDO (Pacific Decadal Oscillation) index in winter and wind anomalies at 850 hPa in summer (areas with statistical significance level exceeding 0.05 are shaded)

中直方条是年平均的 PDO 指数, 实线是 11 年滑动平均曲线)。可以看到, 年平均的 PDO 指数有显著的年代际变化趋势, 20 世纪 50~70 年代, PDO 指数处于年代际负位相, 80~90 年代处于年代际的正位相。对春 (3~5 月)、夏 (6~8 月)、秋 (9~11 月)、冬 (12~2 月) 四个季节的 PDO 指数滑动平均 (图略), 发现各个季节滑动平均的年代际变化特征都非常相近, 这说明 PDO 的季节变化不明显, 它是一个常年存在、较为稳定的气候态。对 1949~2001 年期间冬季、春季和夏季 PDO 指数的变化与中国东部夏季风降水年代际变化的时间序列分别计算了滑动相关, 三条曲线均超过了 95% 的显著性检验 (图略), 说明冬到夏的 PDO 指数与东亚夏季风降水年代际变异具有显著的相关性。因此, 我们用

冬季 PDO 指数对夏季 850 hPa 风场做回归分析, 其目的是想了解冬季 PDO 异常对夏季东亚大气环流的影响。

图 5b 给出 1949~2001 年冬季 PDO 指数对夏季 850 hPa 风距平场回归的系数分布, 阴影是达到 95% 显著性水平的区域。图 5b 中最显著的特征是: 中国东部 (20°N~45°N, 105°E~120°E) 范围内出现偏北风气流 (达到 95% 显著性水平), 回归方法得到的风异常场与东亚夏季风降水年代际正、负异常年合成的 850 hPa 风距平场环流特征 (见图 4a、b) 非常相似。用类似的方法对其它层的环流做回归, 所激发出来的东亚大气环流的特征 (图略) 与东亚夏季风降水年代际的正、负异常年合成的环流型没有显著的相似。这说明 PDO 年代际变化对低层东亚环流的变化有直接影响。陆日宇^[23] 在研究年代际和年际尺度的华北汛期降水变化的物理原因时也曾指出, 与华北年代际降水相关联的大气环流异常主要表现在对流层的下层。

为了清楚地看出 PDO 正、负指数的冬季海洋

异常特征, 我们做了冬季 SST 的距平合成图 (图 6, 阴影为达到 95% 显著性水平的区域)。图 6a 是 PDO 负指数年合成 (小于 PDO 指数冷位相期平均值 -0.5 的年份), 图中海温的正异常出现在北太平洋中纬度地区 (30°N~40°N, 180°~150°W), 而赤道中、东太平洋为负异常, 这种海洋分布对应夏季东亚季风环流南风偏强; 图 6b 是正指数年合成 (大于 PDO 指数暖位相期平均值 0.6 的年份), 海温的负异常出现在北太平洋中纬度地区 (30°N~40°N, 180°~150°W), 赤道中、东太平洋为正异常, 这种海洋分布对应夏季东亚季风环流南风偏弱。

20 世纪 50~70 年代, PDO 基本以负指数为主 (PDO 正、负指数与赤道中、东太平洋海温的正、负距平符号一致), 北太平洋中纬度海温出现年代际正异常, 这种海温型有利于东亚夏季风区南风加强 (见图 5b); 80~90 年代 PDO 基本以正指数为主 (北太平洋中纬度海温出现年代际负异常), 这种海温型对应东亚夏季风区的南风减弱 (见图 5b)。从东亚夏季风环流强度、中国东部夏季降水

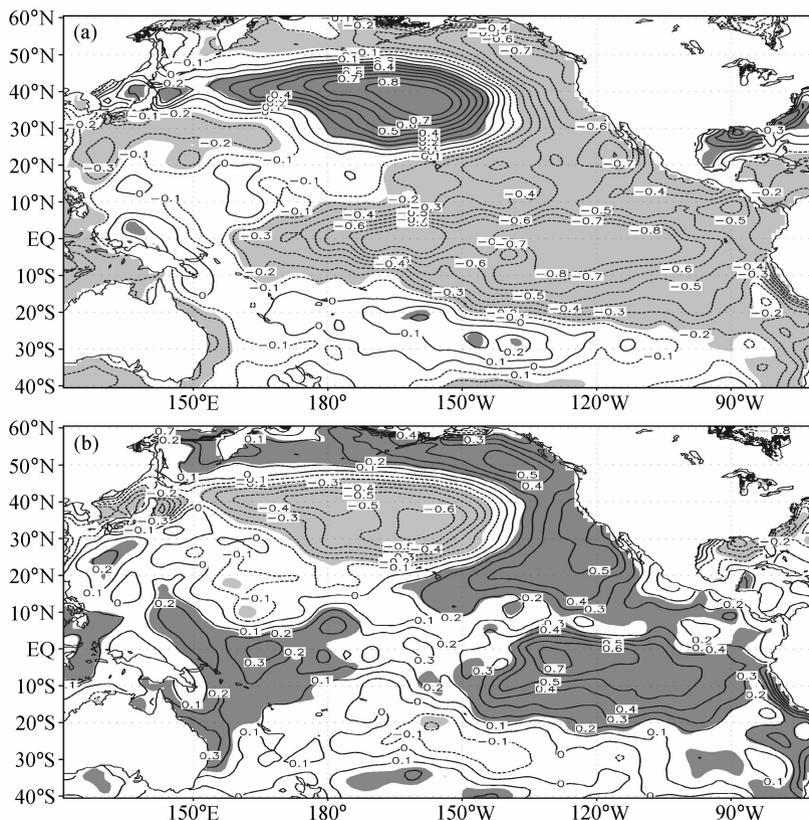


图 6 冬季 SST 的距平合成图 (单位: °C): (a) PDO 负指数年合成; (b) PDO 正指数年合成。阴影为 t 检验达到 95% 显著性水平的区域
Fig. 6 The composite SSTA (°C) in winter for negative (a) and positive (b) PDO indexes years (areas with statistical significance level exceeding 0.05 are shaded)

年代际变化以及 PDO 时间演变特征可见, 它们的年代际变化趋势具有相同的转折点。特别是冬季 PDO 指数对夏季 850 hPa 风距平场的回归特征与东亚夏季风环流强弱变化的年代际特征完全一致, 这说明北太平洋中纬度海温的年代际变化对东亚夏季风环流以及中国东部夏季降水的年代际变化有重要的影响, 北太平洋中纬度海温的年代际变化可能是东亚夏季风环流与中国东部夏季降水型年代际变化的重要外强迫因子。

5 夏季中国西北地区降水年代际变化环流特征及与大气内部动力过程的关系

上节分析表明, 与中国东部夏季降水型年代际变化密切相关的东亚夏季风环流的年代际显著特征是: 850 hPa 风场上中国东部 $110^{\circ}\text{E}\sim 120^{\circ}\text{E}$ 范围内的偏南气流比气候平均态偏强或偏弱, 造成向华北

地区输送的水汽出现正或负异常。那么西北地区少雨和相对多雨期的大气环流的年代际变化有何显著特征? 对 1960~2003 年新疆 75 个气象站夏季降水量标准化值进行经验正交函数分解, 第一模态占总方差的 22.5%, 其空间分布表现为全疆降水变化一致, 时间序列为显著的线性增加趋势和年代际变化特征, 即 1964~1987 年为全疆降水偏少时段, 1988~2000 年为全疆降水偏多时期 (图略), 这与图 2d 所示新疆 8 个代表站夏季降水变化的年代际变化一致。因此本节重点探讨新疆降水年代际变化环流异常特征及可能成因机理。

新疆位于青藏高原北侧, 西南有伊朗高原 (高度约 1000~2000 m), 西面有帕米尔高原 (高度约 1000~2000 m), 进入新疆的水汽主要集中在 850~500 hPa。图 7a 给出新疆多雨期 (1988~2001 平均) 与少雨期 (1973~1987 年平均) 的地面到 500 hPa 水汽通量矢量距平差, 从图可见, 沿着赤

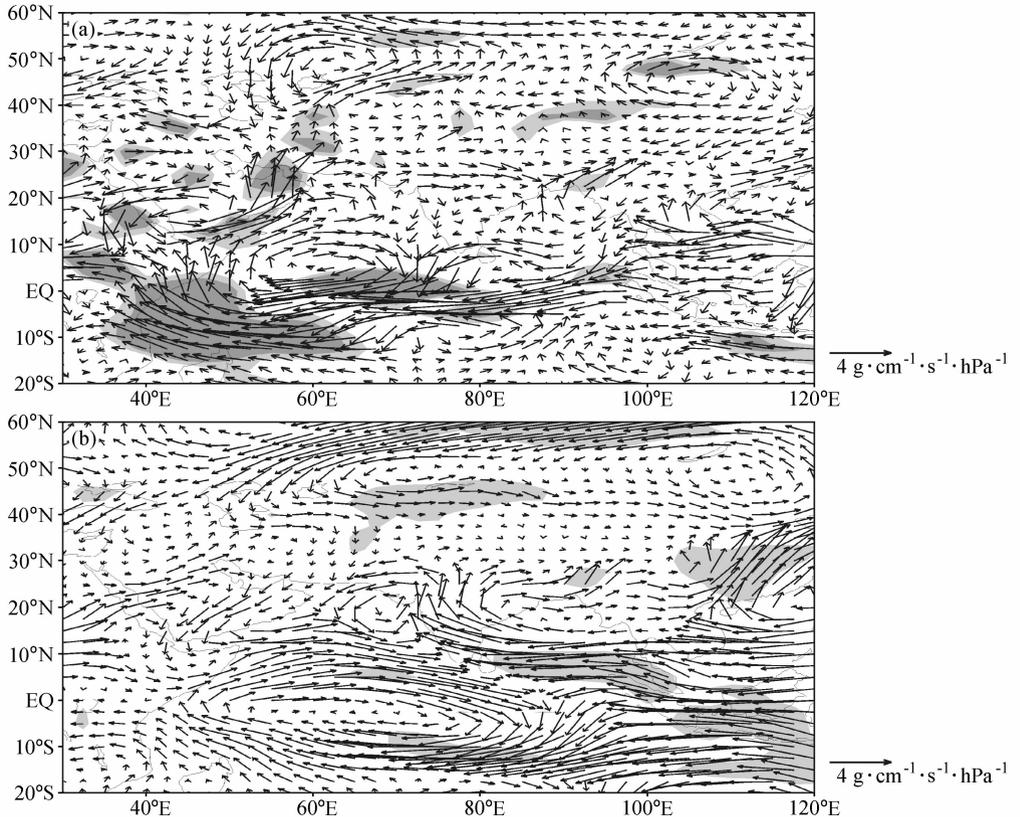


图 7 地面到 500 hPa 水汽通量差值: (a) 新疆多雨期减少雨期; (b) 去除年代际变化后 10 个降水偏多年与 7 个偏少年差。浅、深阴影区表示通过 0.05、0.01 显著性 t 检验

Fig. 7 The differences of moisture fluxes from surface to 500 hPa; (a) More precipitation period minus less precipitation period in Northwest China; (b) the ten more precipitation years minus the seven less precipitation years for removing the interdecadal variation. Light and heavy shadings are for exceeding 0.05 and 0.01 statistical significance levels, respectively

道从印度尼西亚到印度洋范围内出现了显著的偏东风距平, 在 50°E~60°E 区域转成偏南风气流后, 从索马里经阿拉伯半岛东南部到中亚和新疆北部形成南北长达约 50 个纬距、宽约 10 个经距的偏南风水汽输送通道 (偏南气流的水汽输送通道通过 0.05 显著性 *t* 检验)。可见, 新疆降水年代际变化显著特征是: 来自印度尼西亚的偏东风气流沿赤道把水汽带到印度洋后, 在索马里转成偏南风气流继续向北经过阿拉伯半岛东南部输送到中亚和新疆北部地区。

为了说明这是年代际变化的现象, 我们进一步分析了去除年代际变化后年降水偏多年与偏少年地面到 500 hPa 水汽通量矢量距平差。降水大于 0.5 个标准差的年为偏多年: 1964、1967、1970、1977、1981、1984、1988、1993、1998、2001 年共 10 年; 降水小于 -0.5 个标准差为偏少年: 1968、1974、1978、1986、1989、1997、2000 年共 7 年。图 7b 给出去除年代际变化后 10 个降水偏多年与 7 个偏少年地面到 500 hPa 水汽通量矢量距平差, 从图可见, 来自印度尼西亚的偏东风气流沿赤道把水汽带到 80°E 就转成偏南气流, 而在 40°N 以南 50°E~60°E 出现偏北风气流, 表明在该经度范围内的 40°N 以南地区偏南水汽输送减弱, 新疆北部地区的水汽主要来源于里海和咸海, 即中纬度偏西气流把里海、咸海上空的水汽向东输送到新疆地区 (里海、咸海到新疆地区的水汽通道通过 0.05 显著性 *t* 检验)。这说明新疆降水年代际偏多与水汽来源关系密切, 即新疆降水年代际变化偏多的水汽来源与来自印度尼西亚的偏东风气流沿赤道把水汽带到印度洋后, 在索马里转成偏南风气流继续向北经过阿拉伯半岛东南部输送到中亚和新疆北部地区有关。

由上可见, (10°N~40°N, 50°E~60°E) 的偏南气流的加强是新疆降水年代际变化的显著特征之一。分析发现, 对流层中层 (10°N~40°N, 50°E~60°E) 的偏南气流的加强、减弱与高层南亚高压强度、东西振荡有关。南亚高压是位于 200~100 hPa 的行星尺度热力高压。杨莲梅等^[24] 研究指出, 南亚高压南北位置变化小, 东西振荡和强度变化非常明显。

图 8 给出 200 hPa 位势高度距平变化特征。图 8a 是新疆多雨期 (1988~2001 平均) 与少雨期 (1973~1987 年平均) 夏季差值, 从图可见, 35°N

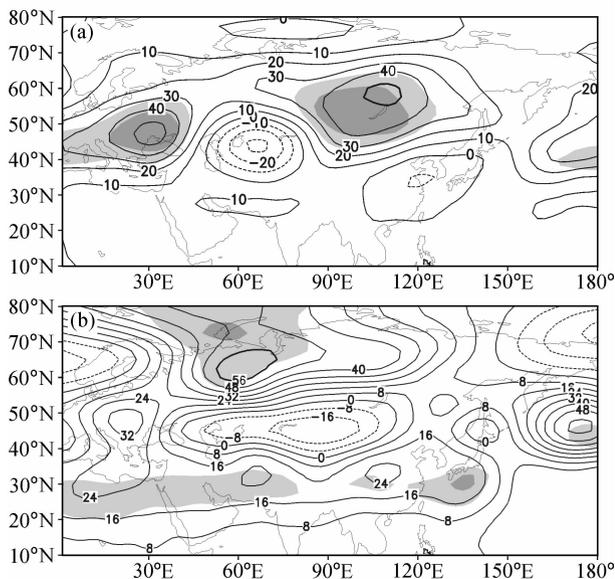


图 8 200 hPa 位势高度距平差值 (单位: gpm): (a) 1988~2001 年与 1973~1987 年夏季平均差; (b) 去除年代际变化后 10 个降水偏多年与 7 个偏少年平均差。浅、深阴影区为通过 0.05 和 0.01 显著性 *t* 检验

Fig. 8 The differences of geopotential height (gpm) at 200 hPa: (a) 1988 - 2001 summer mean minus 1973 - 1987 summer mean; (b) the ten more precipitation years minus the seven less precipitation years for removing the interdecadal variation. Light and heavy shadings are for exceeding 0.05 and 0.01 statistical significance levels, respectively

以南的南亚地区存在 2 个低值中心, 分别位于 60°E 和 120°E 附近, 表明南亚高压相对偏弱; 中纬度副热带西风急流上 30°E 和 110°E 分别为正距平中心, 50°E~80°E 为负距平区, 亚洲中纬度地区出现东西向的“+ - +”的距平波列, 500 hPa 高度距平场也出现这种环流型分布 (图略), 即这种经向型环流具有相当正压结构。可见南亚高压相对偏弱, 有利于水汽向北输送到中亚和新疆北部地区。图 8b 是去除年代特征后 10 个降水偏多年与 7 个偏少年平均的差值, 从图可见, 35°N 以南的南亚地区有 2 个高值中心, 分别位于 60°E 和 110°E 附近, 表明南亚高压偏强, 亚洲地区从高纬到低纬呈现南北向的“+ - +”的距平波列, 亚洲环流呈纬向型分布, 500 hPa 高度距平场类似 (图略)。从上可见, 南亚高压相对偏强, 亚洲易出现纬向型分布的环流场, 不利于南面的水汽向北输送; 南亚高压偏弱, 亚洲中纬度易出现经向型分布的环流场, 有利南面的水汽向北输送到达中亚和新疆北部地区。

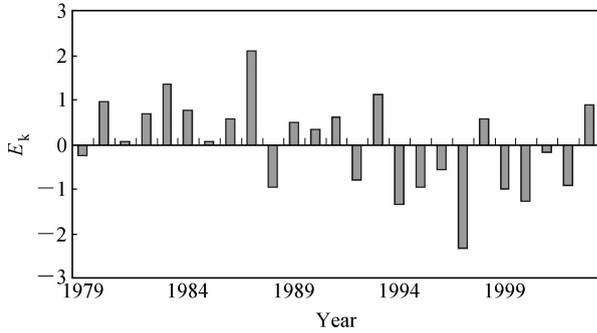


图9 1979~2003年6~8月东亚(100°E~140°E)急流扰动动能 E_k 标准化序列

Fig. 9 Temporal series of standardized disturbance kinetic energy E_k in East Asia (100°E-140°E) for JJA during 1979-2003

研究表明, 亚洲地区高度距平场纬(经)向型环流除了与南亚高压强(弱)变化有关外, 夏季中纬度西风急流的强弱变化对亚洲环流型的形成有重要影响^[25~26]。为了说明中纬度西风急流的强弱变化, 我们对夏季200 hPa风速进行傅里叶变换, 定义波数 $k < 3$ 为基本气流场 (\bar{u}, \bar{v}) , $k \geq 3$ 为扰动风速 $(u', v') = (u, v) - (\bar{u}, \bar{v})$, 扰动动能 $E_k = (u' \cdot u' + v' \cdot v') / 2$, 把急流风速最大值所在纬度作为急流轴, 并将(100°E~140°E)区域的急流轴±5个纬度区域平均的扰动动能标准化定义为东亚急流定常扰动, 用这个方法定义的 E_k 指数较好地综合了急流位置、强度和定常扰动的变化特征。

图9给出1979~2003年东亚夏季西风急流扰动动能标准化序列, 把 E_k 大于0.8个标准差的年定义为扰动动能强年, 小于-0.8标准差的年定义为扰动动能弱年。扰动动能强年有1980、1983、1987、1993、2003年; 扰动动能弱年有1988、1992、1994、1995、1997、1999、2000、2002年。

分别对东亚夏季中纬度西风急流扰动强、弱年200 hPa高度进行合成, 分析表明, 扰动动能偏弱年西风弱, 即西风 ≥ 25 m/s 的范围出现在中纬度30°E~105°E和150°E~180°E(图10a阴影区); 35°N以南的南亚地区出现低值(南亚高压偏弱), 中纬度副热带西风急流上30°E和110°E经度分别为正距平中心, 50°E~70°E经度为负距平区, 亚洲地区环流为东西向的“+ - +”距平波列, 为经向型分布特征(图10a), 这与新疆降水年代型(图8a)类似。扰动动能强年西风强, 西风 ≥ 25 m/s 的范围出现在中纬度30°E~180°E内(图10b中阴

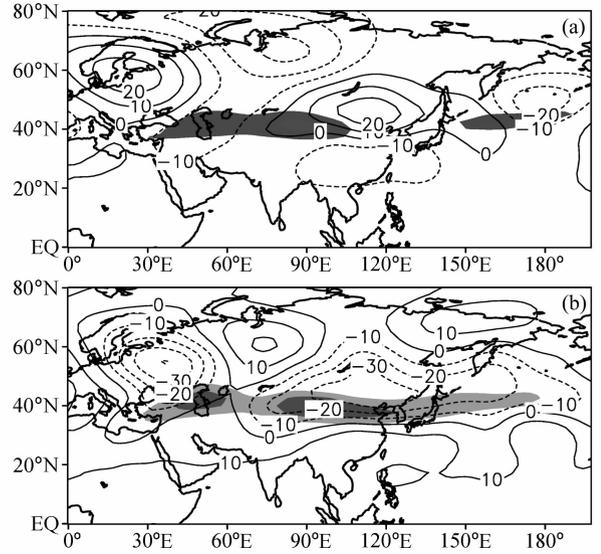


图10 200 hPa高度距平分布(单位: gpm): (a)扰动动能弱年; (b)扰动动能强年。阴影区表示纬向风速大于25 m/s

Fig. 10 The composite geopotential height anomalies (gpm) at 200 hPa (gpm) for weak (a) and strong (b) disturbance kinetic energy years. The areas with the zonal wind speed > 25 m/s are shaded

影), 35°N以南的南亚地区出现高值(南亚高压强度偏强), 亚洲高度距平场呈南北向的“+ - +”距平波列分布, 为纬向型特征(图10b), 这与新疆降水年际变化型(图8b)类似。

综上所述, 1988年以来亚洲中纬度西风急流扰动动能处于年代际变化的偏弱期(见图9), 亚洲中纬度西风急流扰动动能偏弱, 有利亚洲中纬度地区出现东西向的“+ - +”距平波列, 即亚洲中纬度经向型环流加强, 这是夏季新疆降水年代际变化偏多型的环流特征。可见, 夏季新疆降水年代际偏多的环流特征与亚洲中纬度西风带扰动动能处于年代际变化的偏弱期有关, 这表明夏季新疆降水年代际变化可能与大气环流内部动力过程的年代际异常关系更密切。

6 结论与讨论

本文探讨了大气环流内部动力过程亚洲西风带扰动动能以及大气外强迫因子(海温)的年代际变化特征与中国夏季降水型年代际变化的关系。分析指出, 中国东部、西北地区夏季降水型有各自不同的年代际变化趋势。东亚夏季风环流以及中国东部夏季降水型的年代际变化与PDO的年代际位相变化

具有相同的转折点; 冬季 PDO 指数对夏季 850 hPa 风距平场的回归特征与东亚夏季风环流年代际变化一致, 表明北太平洋中纬度海温的年代际变化可能是东亚夏季风环流及中国东部夏季降水型年代际变化的重要外强迫因子。中国西北地区夏季降水偏多的年代际环流主要特征是: 来自印度尼西亚的偏东风气流沿赤道把水汽输送到印度洋后, 在索马里转成偏南风气流继续向北经过阿拉伯半岛东南部输送到中亚和新疆北部地区; 1988 年以来亚洲西风急流区扰动动能及南亚高压强度都处于年代际变化的偏弱期, 有利于偏南风气流加强北上到达中亚和新疆北部地区, 也就是说夏季新疆降水年代际偏多与亚洲中纬度西风带扰动动能及南亚高压强度的年代际偏弱有关, 可见夏季新疆降水的年代际变化与亚洲大气环流内部动力过程的年代际变化密切相关。

需要指出的是: 气候年代际变化是全球海-陆-气系统相互作用的结果, 天气气候的演变特征受大气内部动力过程和大气外强迫因子的共同作用。本文结果表明, 东亚夏季风环流以及中国东部降水型的年代际变化对外强迫因子即北太平洋中纬度海温的年代际变化响应更显著, 而中国西北地区夏季降水年代际变化与大气环流内部动力过程即亚洲中纬度西风带扰动动能的年代际变化更密切。

参考文献 (References)

[1] 王绍武, 蔡静宁, 朱锦红, 等. 19 世纪 80 年代到 20 世纪 90 年代中国年降水量的年代际变化. 气象学报, 2002, **60** (5): 637~639
Wang Shaowu, Cai Jingning, Zhu Jinhong, et al. The interdecadal variations of annual precipitation in China during 1880's - 1990's. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2002, **60** (5): 637~639

[2] 张庆云, 陶诗言, 张顺利. 夏季长江流域暴雨洪涝灾害的天气气候条件. 大气科学, 2003, **27** (6): 1018~1030
Zhang Qingyun, Tao Shiyan, Zhang Shunli. The persistent heavy rainfall over the Yangtze River valley and its associations with the circulations over East Asian during summer. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2003, **27** (6): 1018~1030

[3] 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
Zhang Qingyun. The variations of the precipitation and water resources in North China since 1880. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 1999, **18** (4): 486~495

[4] 陈烈庭. 华北各区夏季降水年际和年代际变化的地域性特征.

高原气象, 1999, **18** (4): 477~485
Chen Lieting. Regional features of interannual and interdecadal variations in summer precipitation anomalies over North China. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 1999, **18** (4): 477~485

[5] 李栋良, 魏丽, 蔡英, 等. 中国西北现代气候变化事实与未来趋势展望. 冰川冻土, 2003, **25** (2): 135~142
Li Dongliang, Wei Li, Cai Ying, et al. The present facts and the future tendency of the climate change in Northwest China. *Journal of Glaciology and Geocryology* (in Chinese), 2003, **25** (2): 135~142

[6] 施雅风, 沈永平, 李栋良, 等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨. 第四纪研究, 2003, **23** (2): 152~164
Shi Yafeng, Shen Yongping, Li Dongliang, et al. Discussion on the present climate change from warm-dry to warm-wet in northwest China. *Quaternary Sciences* (in Chinese), 2003, **23** (2): 152~164

[7] 杨莲梅, 张庆云. 新疆北部汛期降水年际和年代际异常的环境特征. 地球物理学报, 2007, **50** (2): 412~419
Yang Lianmei, Zhang Qingyun. Circulation characteristics of interannual and interdecadal anomalies of summer rainfall in north Xinjiang. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 2007, **50** (2): 412~419

[8] 李崇银, 廖清海. 东亚和西北太平洋地区气候的准 10 年尺度振荡及其可能机制. 气候与环境研究, 1996, **1** (2): 124~133
Li Chongyin, Liao Qinghai. Quasi-decadal oscillation of climate in East Asia/northwestern Pacific region and possible mechanism. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 1996, **1** (2): 124~133

[9] Li Chongyin. The quasi-decadal oscillation of air-sea system in the northwestern Pacific region. *Adv. Atmos. Sci.*, 1998, **15** (1): 31~40

[10] 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
Li Feng, He Jinhai. The decadal change of the interaction between northern Pacific SSTA and East Asian summer monsoon. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), **16** (3): 260~271

[11] 徐建军, 王东晓. 印度洋-太平洋海温的年际、年代际异常及其对亚洲季风的影响. 海洋学报, 2000, **22** (3): 34~43
Xu Jianjun, Wang Dongxiao. Diagnosis of interannual and interdecadal variation in SST over Indian-Pacific Ocean and numerical simulation of their effect on Asian summer monsoon. *Acta Oceanologica Sinica* (in Chinese), 2000, **22** (3): 34~43

[12] Huang R H. Decadal variability of the summer monsoon rainfall in East Asia and its association with the SST anomalies in the tropical Pacific. *CLIVAR Exchange*, 2001, **2**: 7~8

[13] Xue Feng. Interannual to interdecadal variation of East Asian

- summer monsoon and its association with the global atmospheric circulation and sea surface temperature. *Adv. Atmos. Sci.*, 2001, **18** (4): 567~575
- [14] 谷德军, 王东晓, 李春晖. PDO 源地与机制的若干争论. 热带气象学报, 2003, **19** (增刊): 136~144
Gu Dejun, Wang Dongxiao, Li Chunhui. Some debates upon the originating region and mechanism of PDO. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese) 2003, **19** (Supplement): 136~144
- [15] 吕俊梅, 琚建华, 张庆云. 太平洋海温场两种不同时间尺度气候模态的分析. 海洋学报, 2005, **27** (5): 30~37
Lü Junmei, Ju Jianhua, Zhang Qingyun. The analysis of two climate patterns on different time scales in Pacific sea temperature fields. *Acta Oceanologica Sinica* (in Chinese), 2005, **27** (5): 30~37
- [16] Trenberth K E, Hurrell J W. Decadal atmosphere-ocean variation in the Pacific. *Climate Dyn.*, 1994, **9** (6): 303~319
- [17] Latif M, Barnett T P. Causes of decadal climate variability over the North Pacific and North America. *Science*, 1994, **266**: 634~637
- [18] Latif M, Barnett T P. Decadal climate variability over the North Pacific and North America; Dynamics and predictability. *J. Climate*, 1996, **9** (10): 2407~2423
- [19] Minobe S A. 50 - 70 year climatic oscillation over the North Pacific and North America. *Geophys. Res. Lett.*, 1997, **24** (6): 683~686
- [20] Mantua N J, Hare S R, Zhang Y, et al. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1997, **78** (6): 1069~1079
- [21] Zhang Y, Wallace J M, Battisti D S. ENSO-like interdecadal variability: 1900 - 93. *J. Climate*, 1997, **10** (5): 1004~1020
- [22] Bond N A, Harrison D E. The Pacific decadal oscillation, air-sea interaction and central North Pacific winter atmospheric regimes. *Geophys. Res. Lett.*, 2000, **27** (5): 731~734
- [23] 陆日宇. 华北汛期降水量变化中年代际和年际尺度的分离. 大气科学, 2002, **26** (5): 611~624
Lu Riyu. Separation of interannual and interdecadal variations of rainfall in North China. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2002, **26** (5): 611~624
- [24] 杨莲梅, 张庆云. 夏季东亚西风急流扰动异常与副热带高压关系研究. 应用气象学报, 2007, **18** (4): 452~459
Yang Lianmei, Zhang Qingyun. Relationships between perturbation kinetic energy anomaly along East Asian westerly jet and subtropical high in summer. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 2007, **18** (4): 452~459
- [25] 吕俊梅, 琚建华, 张庆云, 等. 热带西太平洋海温距平与 Rossby 波传播对 1993 和 1994 年东亚夏季风异常影响的差异. 大气科学, 2006, **30** (5): 977~987
Lü Junmei, Ju Jianhua, Zhang Qingyun, et al. Differences of influences of tropical western Pacific SST anomaly and Rossby wave propagation on East Asian monsoon in the summers of 1993 and 1994. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2006, **30** (5): 977~987
- [26] 杨莲梅, 张庆云. 夏季东亚西风急流 Rossby 波扰动异常与中国降水. 大气科学, 2007, **31** (4): 586~595
Yang Lianmei, Zhang Qingyun. Anomalous perturbation kinetic energy of Rossby wave along East Asian westerly jet and its association with summer rainfall in China. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2007, **31** (4): 586~595