

东亚夏季风降水年代际变异模态及其 与太平洋年代际振荡的关系

唐 民^{1,2,3} 吕俊梅²

(1. 北京大学物理学院大气科学系, 100871;

2. 中国气象科学研究院; 3. 民航华东空管局)

提 要: 利用全球陆地月平均降水资料、英国气象局哈德莱中心的月平均海表温度距平(SSTA)资料及 NCEP/NCAR 再分析大气环流资料, 探讨东亚夏季风降水年代际变率及其与太平洋年代际振荡(PDO)的联系。研究指出: 东亚夏季风降水年代际变异模态以及 PDO 均在 1976 年前后呈现显著的年代际转折, 并且东亚夏季风降水与 PDO 在年代际尺度上具有较好的相关关系。PDO 能够在对流层低层激发出与年代际东亚夏季风环流较为相似的大气环流异常特征, 表明东亚夏季风环流的年代际变化可能受大气外强迫因子 PDO 在对流层低层的外源强迫作用影响, 最终导致东亚夏季风降水发生年代际变化。

关键词: 夏季风 降水 年代际变异模态 太平洋年代际振荡

The Inter-decadal Mode of the Summer Monsoon Rainfall in East Asia and Its Association with Pacific Decadal Oscillation

Tang Min^{1,2,3} Lu Junmei²

(1. Department of Atmospheric Science, School of Physics, Peking University, Beijing 100871;

2. Chinese Academy of Meteorological Sciences; 3. Air Traffic Management Bureau of East China)

Abstract: The inter-decadal variation of summer monsoon rainfall in East Asia and its relationship with Pacific Decadal Oscillation (PDO) are investigated by using monthly precipitation reconstruction over global land, the monthly sea surface temperature anomaly (SSTA) of Hadley Center for Climate Prediction and Research, and the National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR) reanalysis dataset. It is revealed that both the inter-decadal mode of the summer monsoon rainfall in East Asia and PDO occurred ap-

资助项目: 本文得到中国气象局气候变化专项(CCSF2006-14)资助

收稿日期: 2007年5月10日; 修定稿日期: 2007年8月7日

parent inter-decadal shift around 1976. Moreover, there exists close relation between summer monsoon rainfall and PDO on inter-decadal time scale. PDO can generate anomalous atmospheric circulation in the low-level troposphere, which is homologous with the inter-decadal variability of summer monsoon circulation in East Asia. It suggests that the external forcing of PDO in lower troposphere possibly exerts influences on the inter-decadal variability of the East Asia summer monsoon circulation, and finally leads to the inter-decadal variability of the summer monsoon rainfall in East Asia.

Key Words: summer monsoon rainfall inter-decadal mode Pacific decadal qscillation

引 言

随着年代际气候变率研究的兴起,大量研究结果显示,中国的气候变化具有明显的年代际特征^[1-2]。然而迄今为止有关年代际气候变化的原因仍然不是很清楚。近年来,海洋在全球年代际气候变化中的作用引起了人们的普遍关注。Huang 等人发现赤道中、东太平洋 SST 类似年代际的“ENSO”现象与东亚夏季风降水年代际变率有着密切联系^[3];Xue^[4]指出西太平洋和印度洋上的海气相互作用很可能对东亚夏季风年代际变异起着重要的作用;徐建军等人^[5]研究发现,在印度洋和太平洋 SST 的不同年代际背景下,ENSO 对亚洲季风的影响存在显著不同。

北太平洋海温异常与东亚夏季风相互作用的年代际变化特征的研究表明,影响东亚天气气候的北太平洋海温关键区会随着海-气相互作用的年代际变化而发生转移^[6]。而且,西北太平洋地区海-气系统的准 10 年振荡对东亚气候变化有重要影响^[7]。随着北太平洋年代际气候变率研究的深入,人们已经意识到北太平洋是年代际尺度上全球气候变化的关键区^[8]。因此深入研究北太平洋年代际海洋变率有助于解释东亚和西北太平洋地区气候的准十年尺度的变化^[9],这对于进一步了解东亚-西北太平洋地区气候变化成因

是十分重要的。

太平洋年代际振荡(PDO)是北太平洋 SST 场中一种缓变的年代际气候模态。PDO 之所以成为当前气候研究的一大热点,是由于 PDO 不仅对北美气候、生态乃至整个北半球大气环流有重要影响^[10-13],而且 ENSO 对气候的影响受到 PDO 的调制,例如, Gershunov 和 Barnett^[14]发现 PDO 不同位相阶段 ENSO 事件对北美天气气候的影响明显不同;Power 等^[15]指出 ENSO 对澳洲降水的影响依赖于 PDO 的位相;朱益民和杨修群^[16]指出处于不同阶段的 ENSO 事件对中国夏季气候异常的影响明显受到 PDO 的调制。北半球中纬度大气环流与太平洋 SST 的典型相关分析表明其第一模态类似于 PDO 变化^[17],说明欧亚大陆上空大气环流变化可能与太平洋 SST 年代际变率相联系。杨修群更进一步指出,由于中纬度海洋异常可以直接影响西风带槽脊系统,北太平洋 SST 的年代际振荡使得阿留申低压和蒙古高压具有年代际“Seesaw”同步变化特征,这是 PDO 影响我国气候年代际变化的一个切入点^[18]。朱益民等人^[16]发现 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,但是并未解释 PDO 影响中国降水年代际变化的物理过程。

本文利用 11 年滑动平均、经验正交函数分解、合成以及回归分析等方法,获得东亚夏

季风降水年代际变异模态,并深入研究东亚夏季风降水年代际变率与北太平洋 SST 场的年代际气候模态 PDO 的关系,探讨 PDO 影响东亚夏季降水年代际变异的可能过程和机制。

1 资料

本文资料包括:分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 的全球陆地降水资料^[19] (PRECipitation RE-Construction over Land);英国气象局哈德莱中心的全球海冰和海表面温度 (GISST) 数据集 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 网格点上的月平均 SST 距平资料^[20]; $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ NCEP/NCAR 的再分析大气环流资料^[21]。降水和大气环流资料为 1949—2001 年的月平均资料, SST 资料时段最长为 1900—1999 年。

2 东亚季风区夏季降水的年代际变化及其异常环流特征

根据 1949—2001 年全球陆地降水资料,对夏季 (6—8 月) 东亚季风区 ($20^{\circ} \sim 45^{\circ} \text{N}$, $105^{\circ} \sim 130^{\circ} \text{E}$) 的降水进行 11 年滑动平均,滤去 10 年尺度以下的变化,对滤波后的降水场进行经验正交函数展开,这样就得到东亚夏季风降水年代际变异的主模态。以该模态处于正位相时为例,东亚夏季风降水年代际变异模态呈现负、正、负、正的纬向分布型 (图 1a),即长江中下游、东北南部及朝鲜半岛南部地区降水为正值区,华南、华北地区的降水为负值区。

图 1b 是对应东亚夏季风降水年代际变异模态的标准化时间序列 (实线) 及 3 次多项式趋势线 (虚线)。可以看出,这种降水模态具有非常明显的年代际变化特征。20 世纪

70 年代中期前的时间序列为负,这说明 20 世纪 70 年代中期以前长江中、下游地区降水相对偏少,华南和华北降水相对偏多;20 世纪 70 年代中期以后时间序列转为正,即长江中、下游地区降水相对偏多,华南和华北降水相对偏少。

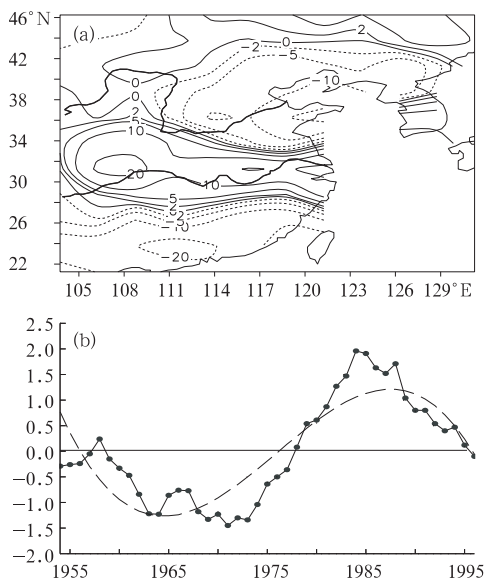


图 1 东亚夏季风降水年代际变异模态 (a) 其标准化时间序列 (b) (累计方差贡献率为 34%)

东亚夏季风降水年代际变异模态的时间序列表明,1976 年左右夏季降水发生了年代际变化。对 1954—1976 和 1977—1996 年两个时段的时间序列分别求平均,以前、后两个阶段的平均值 (分别为 -0.75 和 0.86) 为标准得到东亚夏季风降水年代际变化的正异常年 (1981—1989 年) 和负异常年 (1962—1974 年)。根据正、负异常年份对夏季大气环流做合成分析,即可得到影响东亚夏季风降水年代际变异的大气环流异常型。

图 2a 是夏季东亚降水年代际变化正异常年 850hPa 位势高度距平合成。东亚大陆地区位势高度出现正异常,其东侧太平洋地区的位势高度为负异常。夏季大陆为热源,

海洋为冷源,在气候平均状态下,东亚大陆热低压与其东侧太平洋上冷高压之间的气压梯度力的大小反映了东亚夏季风环流的强弱。因此夏季东亚大陆上空位势高度为正异常,表明东亚大陆热低压强度减弱,其东侧太平洋冷高压地区位势高度为负异常,表明太平洋冷高压强度减弱,两者间的气压梯度力减小,表明东亚夏季风环流减弱。可见东亚夏季风环流减弱是东亚夏季风降水年代际变化正异常年的主要环流特征。图 2c 是夏季东亚降水年代际变化正异常年 850hPa 风场距平合成图。平均而言,夏季东亚地区低层盛行偏南气流,当东亚地区(105~120°E)出现偏北距平风(见图 2c),表明夏季东亚低层偏

南气流减弱,即 1970 年代中期后,东亚夏季风环流减弱。图 2b 和图 2d 分别是东亚夏季风降水年代际变化负异常年 850hPa 位势高度和风场距平的合成图。负异常年位势高度场和风场异常分布特征与正异常年相反(图 2b 和 2d),表明 1970 年代中期以前东亚夏季风环流处于年代际变化加强期。对流层中层(500hPa 的风场和位势高度场)环流的合成分析结果(图略)表明:东亚夏季风降水年代际变化的正异常年,东亚夏季风环流处于年代际变化的减弱期;负异常年东亚夏季风环流处于年代际变化的增强期。可见东亚夏季风降水年代际尺度的正、负异常确实与东亚夏季风环流年代际尺度强、弱变化密切相关。

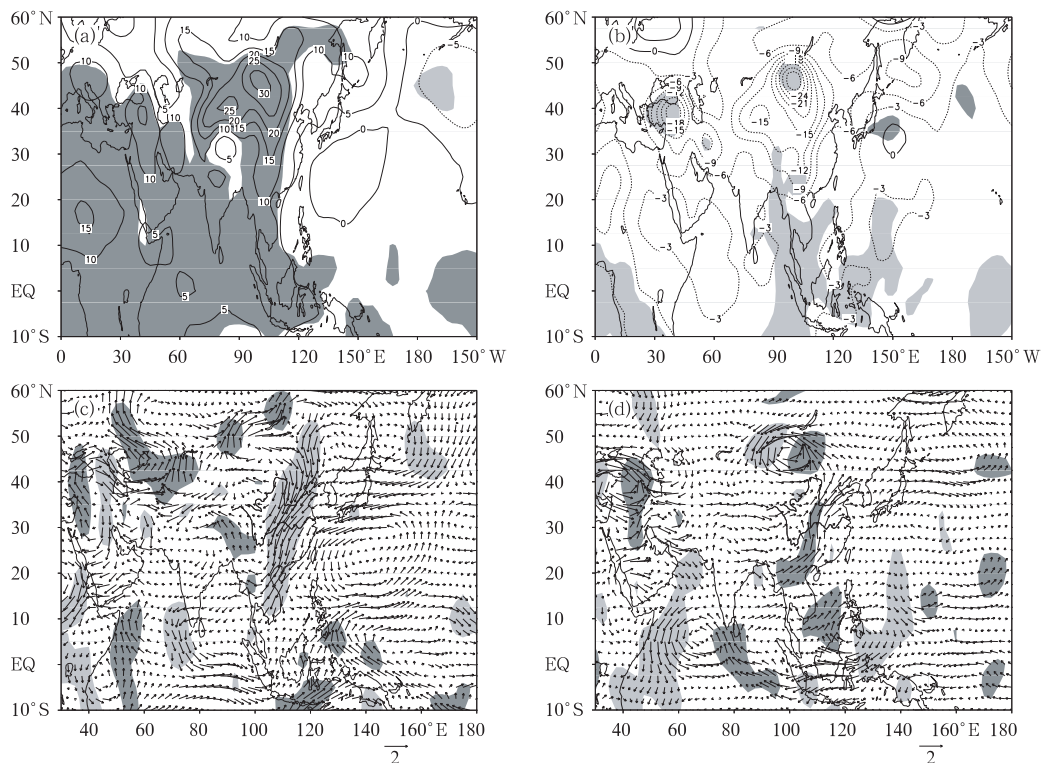


图 2 东亚夏季风降水年代际变异主模态正、负异常年位势高度以及风场的距平合成图

(a)正异常年 850hPa 位势高度;(b)负异常年 850hPa 位势高度;(c)正异常年 850hPa 风场;
(d)负异常年 850hPa 风场,阴影区表示环流异常的 Student t 检验超过了 0.05 的信度检验。

3 北太平洋海温年代际振荡特征

根据 Zhang 等人^[22]的 PDO 指数计算方法的定义,将北太平洋 20°N 以北的 SST 场中每个网格点上的月平均 SST 距平值减去相应月份全球平均的 SST 距平值,以便去除 SST 资料中的全球增暖趋势;对去除全球增暖趋势的 1900 年 1 月至 1999 年 12 月北太平洋 20°N 以北的 SST 场进行经验正交函数分解,第一特征向量场的时间序列代表 PDO 指数。由于 PDO 是一个常年存在的气候态,季节变化不明显,图 3 仅给出 1900 年至 1999 年共 100 年标准化的年平均 PDO 指数及 11 年滑动平均曲线。PDO 的变化呈现出非常清楚的年代际特征,20 世纪 PDO 完成了两次完整的周期循环^[23],1900—1924 年和 1946—1976 年 PDO 呈现为冷位相,1925—1945 年和 1977—1999 年为 PDO 的暖位相。

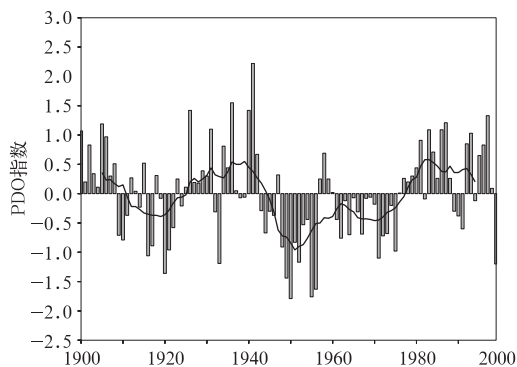


图 3 年平均的 PDO 指数(直方条)
及其相应的 11 年滑动平均曲线

本文的降水和大气环流资料始于 1949 年,由于受降水和大气环流资料时间长度的限制,为了方便比较,本文将在 20 世纪 PDO 的后一个循环周期中,也即 1949—1999 年,来研究 PDO 的空间分布特征。图 3 清楚表明,PDO 指数在 1976 年发生了显著的位相变化,1949—1976 处于冷位相,1977—1999

年处于暖位相。分别计算 1949—1976 年及 1977—1999 年冷、暖位相时期 PDO 指数的平均值,将 PDO 指数小于冷位相平均值 -0.5 的年份定义为 PDO 冷位相异常年(1949—1952、1954、1956、1957、1962、1965、1968、1971、1972、1974、1976 年),同样将 PDO 指数大于暖位相平均值 0.6 的年份定义为 PDO 暖位相异常年(1977、1978、1980—1988、1994、1996、1997、1998 年)。分别对 PDO 冷、暖位相异常年的冬季太平洋 SST 距平场做合成,图 4a 和 4b 分别是 PDO 冷、暖位相异常年冬季北太平洋 SST 异常型的空间分布特征。PDO 冷位相异常年的主要特征是:北美沿岸至赤道中、东太平洋地区的 SST 为负异常,北太平洋中纬度地区 SST 为正异常(图 4a);PDO 暖位相异常年冬季 SST 异常型的主要空间分布特征与 PDO 冷位相异常年相反(图 4b)。Student t 检验表明,PDO 冷、暖位相异常年 SST 的正、负异常中心超过 0.05 的信度水平,说明 PDO 冷、暖位相异常年 SST 异常特征通过显著性检验。PDO 冷、暖位相异常年 SST 空间分布型的合成与 Zhang 等人^[22]用 PDO 指数对全球海温场做回归分析得到的结果一致。PDO 冷、暖位相异常年 SST 的合成空间分布型不仅说明北太平洋 SST 的变化确实存在显著的年代际振荡,而且不同位相的 SST 空间分布型的物理意义十分清楚。

4 东亚夏季风降水年代际变化与太平洋年代际振荡的关系

上述分析表明,东亚夏季风降水及 PDO 在 1976 年左右均发生了显著的年代际转变,转折点及位相持续时期都相似。因此我们进一步研究了 1949—1999 年间 PDO 的冷、暖位相变化与东亚夏季风降水年代际变异的关

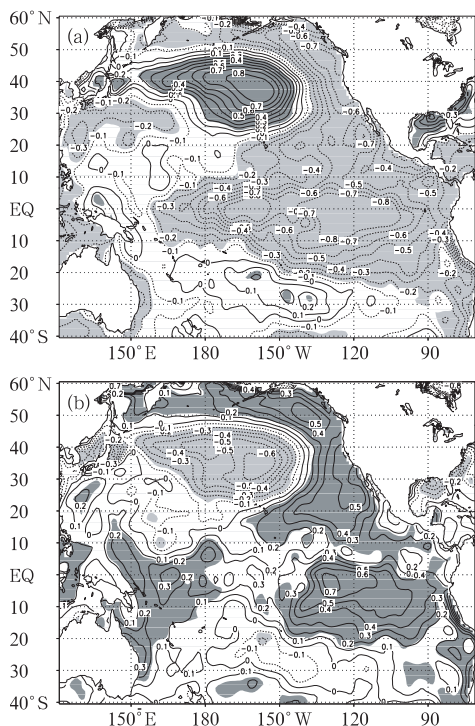


图 4 PDO 冷、暖位相异常年冬季 SST 的距平合成图
(a) 为冷位相异常年; (b) 为暖位相异常年,
阴影为 SST 异常的 Student t 检验超过 0.05
统计信度的区域

系。图 5 给出东亚夏季风降水年代际变异模态的时间序列与冬、春和夏季 PDO 指数的 21 年滑动相关曲线。在计算 21 年滑动相关的时段内,大部分时期(1965—1985)三条曲

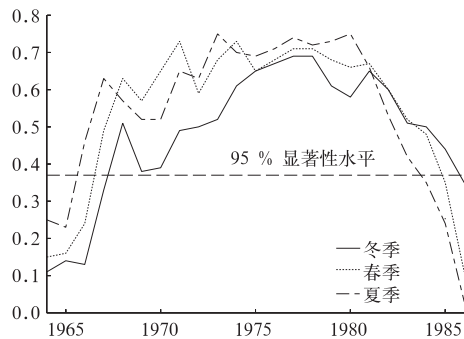


图 5 东亚夏季风降水年代际变异主模态的时间序列与冬季(实线)、春季(点线)以及夏季(虚线)PDO 指数的 21 年滑动相关,水平线为 95% 的显著性水平

线均超过了 95% 的显著性检验,说明 PDO 和东亚夏季风降水年代际变异模态在年代际时间尺度上具有显著相关关系,从冬季到夏季 PDO 与降水之间都有着密切的联系。

如果用冬季的 PDO 指数对夏季 850hPa 的位势高度场和风场做回归分析,就得到 PDO 影响作用下激发出来的东亚大气环流的异常变化特征。当 PDO 处于正的位相时,850hPa 位势高度场中,东亚大陆主要为正位势高度异常控制,北太平洋中纬度地区 180° 以东地区为负位势高度异常(图 6a)。风场的异常分布型中最明显的特征是东亚地区起源于贝加尔湖以东的反气旋性异常环流,并且从中、高纬度吹向低纬度地区强盛的偏北异常气流。此外,在里海、印度尼西亚附近以及台湾以东的西太平洋上分别有一个气旋性异常环流(图 6b)。我们发现这儿所得到的位势高度和风场回归系数的异常分布型与东

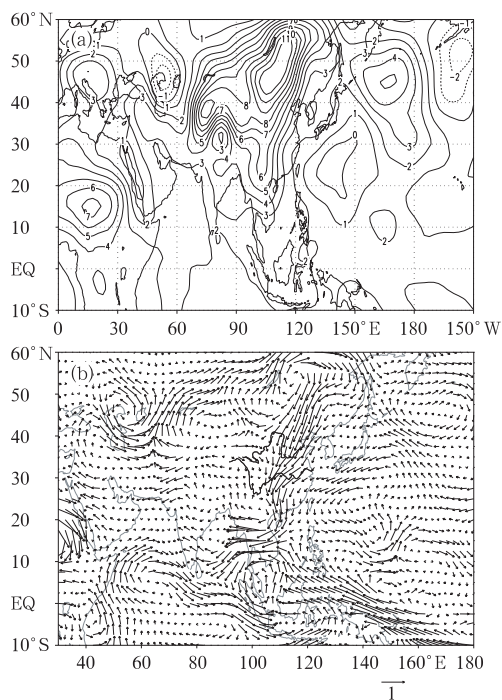


图 6 冬季 PDO 指数对夏季 850hPa 位势高度场和风场的回归分析
(a) 位势高度场; (b) 风场

亚夏季风降水年代际变化正异常年份合成的环流特征有着惊人的相似之处,也即正位相的 PDO 能够使得对流层低层东亚夏季风环流发生年代际的减弱。与之相反, PDO 的负位相能够增强对流层下层的东亚夏季风环流。

采用类似的方法,可以获得 PDO 在对流层中、上层所激发出来的东亚大气环流的异常型(图略),此时的大气环流异常型与影响东亚夏季风降水年代际变异的东亚夏季风环流异常型没有十分密切的联系。

PDO 的年代际变化能够在对流层低层,而不是中、上层,激发出与影响东亚夏季风降水年代际变化的大气环流异常型相类似的环流特征,这说明北太平洋 SST 的年代际变化与对流层低层东亚夏季风环流的年代际变异有着密切的关系。因此, PDO 作为大气外强迫因子对东亚夏季风的年代际变异的影响作用主要反映在对流层低层。陆日宇^[24-25]在研究年代际和年际不同尺度下华北汛期降水变化的物理原因时同样发现,与华北降水年代际变化相关联的大气环流异常主要表现在对流层的下层。

5 结 论

本文对东亚夏季风降水年代际变异模式及其与 PDO 之间的联系进行探讨,得到以下结论:

(1) 东亚夏季风降水年代际变异模式与 PDO 具有相同的位相转折点及位相变化时期。1976 年左右,东亚夏季风降水及 PDO 均发生了明显的年代际变化。1976 年以前,长江中下游地区降水相对偏少,华南和华北降水相对偏多,太平洋 SST 场表现为赤道中、东太平洋偏冷,北太平洋中纬度地区偏暖的空间分布型。1976 年以后,东亚夏季风降水型及太平洋 SST 的空间分布特征与 1976

年前相反。

(2) 影响东亚夏季风降水年代际变异的大气候环流异常表现为,在对流层低层,夏季东亚季风降水年代际变异模态正异常年和负异常年具有相反的大气环流特征。正异常年东亚夏季风环流发生年代际的减弱,负异常年东亚夏季风环流发生年代际的增强。

(3) PDO 的年代际变化能够在对流层低层激发出类似于影响东亚夏季风降水年代际变异的大气环流异常特征,说明 PDO 与东亚夏季风环流的年代际变化有密切的联系,东亚夏季风及其降水年代际变异的物理成因可能受 PDO 外强迫因子在对流层低层的外源强迫作用影响。

(4) PDO 与东亚夏季风年代际变异的密切联系说明,太平洋中纬度地区海-气相互作用过程中存在显著的年代际变化,这是导致东亚地区气候变化出现年代际变率的重要原因。

参考文献

- [1] 丁锋,周顺武. 近 50 年青岛夏季降水变化趋势及其可能原因[J]. 气象, 2004, 30(5): 3-7.
- [2] 胡桂芳,李芸,李德萍. 山东近百年来的最高、最低温度变化[J]. 气象, 2004, 30(11): 43-46.
- [3] Huang, R. H.. Decadal variability of the summer monsoon rainfall in East Asia and its association with the SST anomalies in the tropical Pacific[J]. CLIVAR Exchange, 2001, 2: 7-8.
- [4] Xue Feng. Interannual to Interdecadal Variation of East Asian Summer Monsoon and its Association with the Global Atmospheric Circulation and Sea Surface Temperature[J]. Adv. Atmos. Sci., 2001, 18(4): 567-575.
- [5] 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[J]. 海洋学报, 2000, 22(3): 34-43.
- [6] 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[J]. 热带气象学报, 2000, 16(3): 260-271.
- [7] Li Chongyin. The Quasi-Decadal Oscillation of Air-

- Sea System in the Northwestern Pacific Region[J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 1998, 15(1): 31-40.
- [8] 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.
- [9] 李崇银, 廖清海. 东亚及西北太平洋地区气候的准 10 年尺度振荡及其可能机制[J]. *气候与环境研究*, 1996, 2: 124-133.
- [10] Mantua, N. J., S. R. Hare, Y. Zhang, et al. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1997, 78: 1069-1079.
- [11] Bond, N. A., Harrison, D. E. The Pacific Decadal Oscillation air-sea interaction and central north Pacific winter atmospheric regimes [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2000, 27(5): 731-734.
- [12] Gershunov, A., T. Barnett and D. Cayan. North Pacific interdecadal oscillation seen as factor in ENSO-related north American climate anomalies [J]. *EOS*, 1999, 80: 25-30.
- [13] Gutzler, D. S., Kann, D., Thornbrugh, C. Modulation of ENSO — Based Long — Lead Outlooks of Southwestern U. S. Winter Precipitation by the Pacific Decadal Oscillation [J]. *Weather and Forecasting*, 2002, 17(6): 1163-1172.
- [14] Gershunov, A., Barnett, T. P., Interdecadal modulation of ENSO teleconnections [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1998, 79(12): 2715-2725.
- [15] Power S., Casey T., Folland C., et al, Interdecadal modulation of the impact of ENSO on Australia [J]. *Climate Dyn.*, 1999, 15: 319-324.
- [16] 朱益民, 杨修群. 太平洋年代际振荡与中国气候变率的联系 [J]. *气象学报*, 2003, 61(6): 641-654.
- [17] Frauenfeld, O. W., Davis, R. E. Midlatitude circulation patterns associated with decadal and interannual Pacific Ocean variability [J]. *Geophys. Res. Lett.* 2002, 29 (24): 2221. doi: 10. 1029/2002GL015743.
- [18] 杨修群, 朱益民, 谢倩, 等. 太平洋年代际振荡的研究进展 [J]. *大气科学*, 2004, 28(6): 979-992.
- [19] Chen, M., P. Xie, J. E. Janowiak, and P. A. Arkin. Global Land Precipitation: A 50-yr Monthly Analysis Based on Gauge Observations [J]. *J. of Hydrometeorology*, 2002, 3: 249-266.
- [20] Rayner, N. A., Horton, E. B., Parker, et al. Version 2. 2 of the Global sea-Ice and Sea Surface Temperature Data Set, 1903-1994 [J]. *Climate Research Technical Note 74*, unpublished document available from Hadley Centre for Climate Prediction and Research, 1996, Meteorological Office, London Road, Bracknell, RS12 2SY, U. K.
- [21] Kalnay, E., M. Kanamitsu, R. Kistler et al.. The NCEP/NCAR 40-year Reanalysis Project [J]. *Bull. Am Meteor Soc.*, 1996, 77: 437-472.
- [22] Zhang, Y., J. M. Wallace, D. S. Battisti. ENSO-like interdecadal variability: 1900-93 [J]. *J. Climate*, 1997, 10: 1004-1020.
- [23] Minobe, S. A 50-70 year climatic oscillation over the North Pacific and North America [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1997, 6: 683-686.
- [24] 陆日宇. 华北汛期降水量变化中年代际和年际尺度的分离 [J]. *大气科学*, 2002, 26(5): 611-624.
- [25] 陆日宇. 华北汛期降水量年代际和年际变化之间的线性关系 [J]. *科学通报*, 2003, 48(7): 718-722.