

邓伟涛, 孙照渤, 曾刚, 等. 2009. 中国东部夏季降水型的年代际变化及其与北太平洋海温的关系 [J]. 大气科学, 33 (4): 835-846. Deng Weitao, Sun Zhaobo, Zeng Gang, et al. 2009. Interdecadal variation of summer precipitation pattern over eastern China and its relationship with the North Pacific SST [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (4): 835-846.

# 中国东部夏季降水型的年代际变化及其与北太平洋海温的关系

邓伟涛 孙照渤 曾刚 倪东鸿

南京信息工程大学 气象灾害省部共建教育部重点实验室, 南京 210044

**摘 要** 采用中国 160 站降水资料、NOAA ERSST 海温资料以及 ERA-40 大气再分析资料, 分析了中国东部夏季降水型的年代际变化特征及其与北太平洋海温的可能联系。结果表明: 中国东部夏季降水型在近 50 年中经历了两次年代际变化, 第 1 次发生在 20 世纪 70 年代中后期, 北太平洋中纬度地区冬季海温由正距平向负距平转变, 太平洋年代际振荡 (PDO, Pacific decadal oscillation) 由负位相向正位相转变, 通过影响东亚夏季风环流, 使东亚夏季风减弱, 中国东部夏季降水从北到南呈现出“+ - +”转变为“- + -”的三极分布形态, 这次年代际变化体现了同一模态正负位相的转变; 第 2 次发生在 20 世纪 80 年代末 90 年代初, 北太平洋海温转变为日本以南西北太平洋的正距平分布, 同时菲律宾群岛附近海温偏暖, 西太平洋副热带高压偏南偏西, 使得中国东部夏季降水由北至南转变成“- +”的偶极分布形态, 这次年代际变化体现了一种模态向另一种模态的转变。

**关键词** 中国东部 夏季降水型 北太平洋海温 年代际变化

**文章编号** 1006-9895 (2009) 04-0835-12 **中图分类号** P461 **文献标识码** A

## Interdecadal Variation of Summer Precipitation Pattern over Eastern China and Its Relationship with the North Pacific SST

DENG Weitao, SUN Zhaobo, ZENG Gang, and NI Donghong

*Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044*

**Abstract** By use of monthly precipitation at 160 stations over China, ERA-40 reanalysis data and NOAA ERSST extend-reconstructed global sea surface temperature data, the authors find that the precipitation pattern over eastern China experiences two interdecadal variation processes in recent 50 years, and has close relation to interdecadal variation of the North Pacific SST. In the interdecadal variation process of the mid- and late-1970s, the precipitation pattern from north to south over eastern China changes from “+ - +” to “- + -” tripole distributions, and has close relation to the PDO (Pacific decadal oscillation) phase, with SST anomaly from positive to negative in the mid-latitude area of the North Pacific. East Asian summer monsoon circulation is a main bridge of PDO influencing the precipitation pattern. In the interdecadal variation process of the late 1980s and early 1990s, the precipitation pattern changes from “- + -” tripole to “- +” dipole distributions, and has close relation to higher SST from the

**收稿日期** 2008-01-28, 2008-05-23 收修定稿

**资助项目** 国家自然科学基金资助项目 40775059, 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目 CX07B\_044z, 中国气象局气候研究开放实验室开放课题 LCS-2006-09, 江苏省高校自然科学基金基础研究项目 07KJ170067, 江苏省气象灾害重点实验室课题 KLME060302, KLME050104

**作者简介** 邓伟涛, 男, 1982 年出生, 博士研究生, 目前从事短期气候预测研究工作。E-mail: nimmaojy@163.com

northwestern Pacific to the south of Japan and round the Philippines. The first interdecadal variation shows that the same mode changes from one phase to another, and the second one exhibits the changes between different modes.

**Key words** eastern China, summer precipitation pattern, North Pacific sea surface temperature, interdecadal variation

## 1 引言

夏季降水对我国国民经济和人民生活有重要影响,尤其是干旱和洪涝灾害常常造成严重经济损失。关于夏季降水及洪涝灾害的研究一直是我国气象科学研究的重要课题(黄荣辉等,2002,2003,2007)。中国夏季降水具有多时间尺度变化特征,不仅具有季节变化、年际变化,而且还有明显的年代际变化。平凡等(2006)指出,影响中国降水的年代际和年际变化因子不同,在预测中国汛期降水时,必须将年代际变化和年际变化这两种时间尺度进行分离。

中国东部夏季降水具有明显的年代际变化特征(黄荣辉等,1999,2007;戴新刚等,2003;陆日宇,2003;张庆云等,2003,2007;平凡等,2006),华北地区在近50年中主要经历了两次变干过程,一次发生在20世纪60年代中期,另一次发生在70年代中后期;长江流域主要在20世纪70年代中后期由少雨阶段向多雨阶段转变。中国夏季降水的年代际变化与东亚夏季风环流系统关系密切,东亚夏季风在20世纪70年代由强变弱,中国雨带位置也由华北地区向江淮流域移动(Wang,2001;Zhu et al.,2001;郭其蕴等,2004;Ding et al.,2007;Zeng et al.,2007)。中国夏季降水的年代际变化与海温也存在显著关系,黄荣辉等(1999)和周连童等(2003)指出,年代际的“ENSO现象”减弱了东亚夏季风,引起长江流域降水明显增加,而华北地区明显减少;朱益民等(2003)和张庆云等(2007)指出,太平洋海温的年代际变化(Pacific decadal oscillation,简称PDO)处于正位相时东亚夏季风减弱,使得华北地区偏旱,而江淮流域偏涝。

陈兴芳等(2000)根据中国东部夏季降水的分布特征,将其分为3种主要的“雨型”。中国东部夏季“雨型”也具有年代际变化特征(陈兴芳等,2002;顾薇等,2005;张庆云等,2007;Ding et al.,2008)。研究中国东部夏季“雨型”的年代际变化趋势,对降水的年代际气候预测和短期气候预测均具有重要意义。

有关中国东部夏季降水年代际变化的研究很多,但绝大多数都是针对某一具体的区域进行分析。本文拟将中国东部作为整体来研究其夏季(6~8月)降水型的年代际变化特征,以及与北太平洋海温年代际变化的可能关系。

## 2 资料和方法

所用资料有:(1)中国气象局整编的1951~2006年160站降水资料;(2)欧洲中期天气预报中心1957~2002年EAR-40再分析数据集(Uppaa et al.,2005)的850 hPa水平风场(2.5°纬度×2.5°经度);(3)1950~2006年NOAA ERSST的海面温度资料(Smith et al.,2003),分辨率为2°纬度×2°经度。

本文使用了合成分析、经验正交函数(EOF)分解以及奇异值分解(SVD)等方法。

## 3 近50年中国东部夏季降水型的两次年代际变化

### 3.1 中国东部夏季降水型的年代际变化

将夏季站点降水资料均匀插值到 $1^\circ \times 1^\circ$ 的网格点上。由于中国东部夏季雨带具有纬向分布特点,所以对中国东部(105°E~122°E)夏季降水的年代际分量(即11年滑动平均值)进行纬向平均。由图1可见,20世纪70年代中后期之前,中国东部由北至南夏季降水型表现出“+ - +”的三极分布形态(简称“T+”),华北和华南地区为正降水距平,长江流域为负降水距平,与陈兴芳等(2000)定义的I类雨型分布类似;70年代中后期至80年代末90年代初,中国东部夏季降水型表现出“- + -”的三极分布形态(简称“T-”),华北和华南地区为负降水距平,长江流域为正降水距平,与II类雨型分布(陈兴芳等,2000)类似;80年代末90年代初以后,中国东部夏季降水型表现出“- +”的偶极分布形态(简称为“B”),江淮流域及其以南地区为正降水距平,淮河以北大部分地区为负降水距平,与III类雨型分布(陈兴芳等,2000)类似。Ding et al.(2008)分别对3个时段的

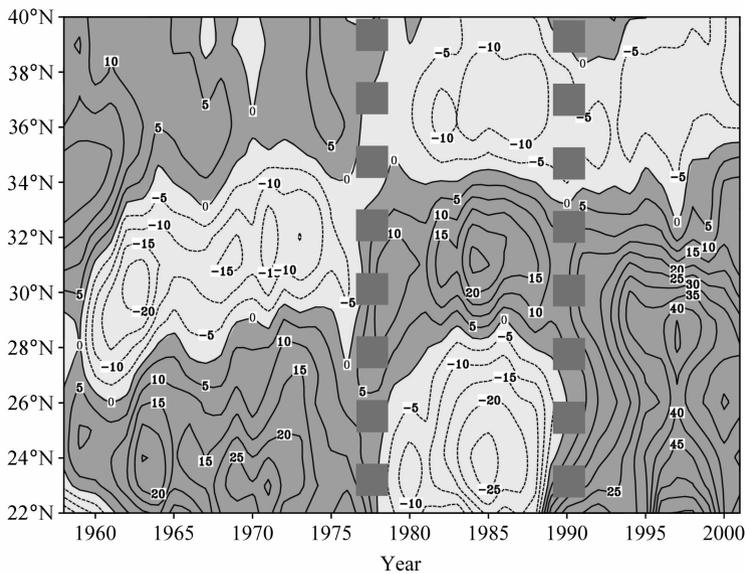


图1 11年滑动平均的中国东部(105°E~122°E)纬向平均夏季降水距平的纬度-时间剖面图(单位: mm)。深、浅阴影表示正、负距平  
Fig. 1 The latitude-time cross section of 11-year running mean summer rainfall anomalies (mm) averaged over 105°E–122°E in eastern China. Dark (light) shaded areas denote positive (negative) departures

夏季降水距平进行合成, 得到一致的降水空间分布特征。

### 3.2 中国东部夏季降水主要模态的年代际变化

对中国东部夏季降水进行 EOF 分解, 其中, 第 1、2 特征向量 (EOF1、EOF2) 的方差贡献分别为 17.69% 和 13.06%, 均通过了 North 准则检验 (North et al., 1982)。由图 2a 可见, EOF1 空间模态呈现出长江流域与其南北两侧降水的反位相空间分布, 即三极型分布。由图 2c 可见, EOF1 的时间系数不仅具有年际变化特征, 而且还具有年代际变化特征; 11 年滑动平均的时间系数在 20 世纪 60 年代至 70 年代中后期以正值为主; 70 年代中后期至 80 年代末以负值为主, 与中国东部夏季降水型第 1 次年代际变化的转变时间相吻合。由图 2b 可见, EOF2 空间模态呈现出南方与北方降水的反位相空间分布, 即偶极型分布。由图 2d 可见, EOF2 的时间系数不仅具有年际变化特征, 而且还具有年代际变化特征; 11 年滑动平均的时间系数在 20 世纪 80 年代末之前以正值为主; 90 年代初以后以负值为主, 与中国东部夏季降水型第 2 次年代际变化的转变时间相吻合。

利用中国东部夏季降水的年代际变化部分, 分别与 EOF1 (图 2a) 和 EOF2 (图 2b) 求空间相似系数  $r$ :

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (1)$$

式中,  $x_i$ 、 $\bar{x}$  为中国东部各站夏季降水的年代际变化分量及其空间平均值;  $y_i$ 、 $\bar{y}$  为 EOF1 (或 EOF2) 中各站点值及其空间平均值;  $N$  为中国东部地区总站数。由图 3 可见, 两条相似系数曲线存在两个交点, 与中国东部夏季降水型的两次年代际变化时间一致。20 世纪 60 年代初至 70 年代中后期, 中国东部夏季降水的年代际变化分量与 EOF1 为正相似关系 (通过 0.01 的显著性水平检验), 呈现出 “T+” 型分布; 60 年代中后期至 70 年代中后期, 与 EOF2 为负相似关系, 呈现出 “B” 型分布, 说明在该时段内中国东部夏季降水在 “T+” 型的基础上又叠加了 “B” 型, 使得 60 年代中后期华北地区出现了一次变干的过程。70 年代中后期至 80 年代末, 中国东部夏季降水的年代际变化分量与 EOF1 为负相似关系 (通过 0.01 的显著性水平检验), 与 EOF2 的相似系数没有通过显著性检验, 因此在该时段内主要为 “T-” 型分布。90 年代以后, 中国东部夏季降水的年代际变化分量与 EOF2 为负相似关系 (通过 0.01 的显著性水平检验), 与 EOF1 的相似系数没有通过显著性检验, 因此在该时段内主要为 “B” 型分布。

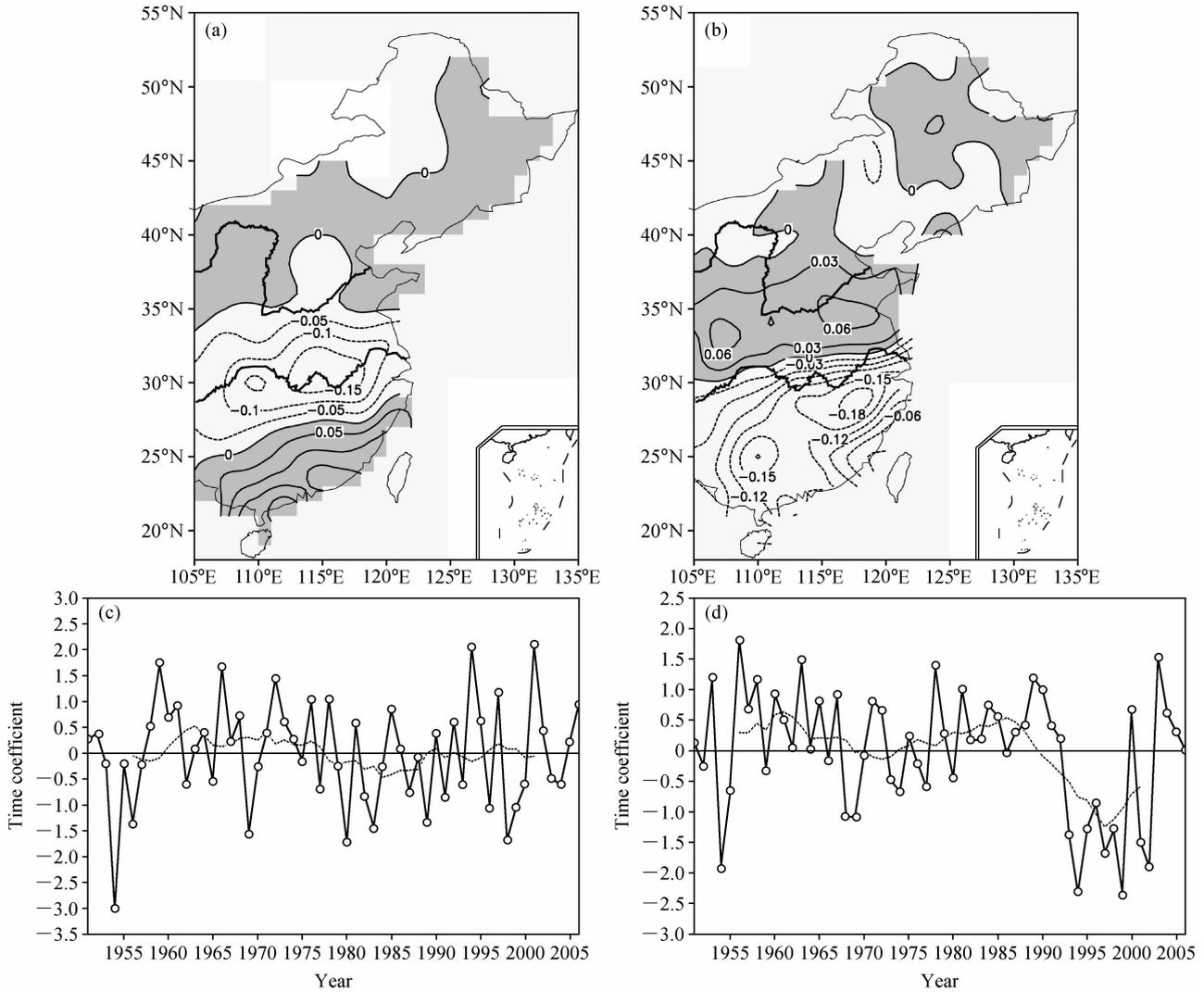


图2 中国东部夏季降水距平的 EOF 特征向量 (a, b, 阴影表示正距平) 及其相应时间系数 (c, d, 虚线表示 11 年滑动平均): (a, c) EOF1; (b, d) EOF2

Fig. 2 (a, b) EOF eigenvectors and (c, d) their time series of summer rainfall anomaly over eastern China; (a, c) First EOF eigenvector; (b, d) second EOF eigenvector. (a, b) Shaded areas denote positive departures; (c, d) dashed lines denote 11-year running averages

综上所述, 20 世纪 70 年代中后期中国东部夏季降水型的年代际变化主要由“T+”向“T-”型转变, 是同一模态中正负位相的转换; 80 年代末 90 年代初中国东部夏季降水型的年代际变化主要由“T-”向“B”型转变, 是一种模态向另一种模态的转变。

## 4 中国东部夏季降水型与北太平洋冬季海温的年代际变化关系

### 4.1 北太平洋冬季海温主要模态的年代际变化

将北太平洋 ( $20^{\circ}\text{N}\sim 70^{\circ}\text{N}$ ,  $100^{\circ}\text{E}\sim 120^{\circ}\text{W}$ ) 冬季海温场进行 EOF 分解, EOF1、EOF2 方差贡献分别为 24.7% 和 17.8%, 均通过了 North 准则检

验 (North et al., 1982)。由图 4a 可见, EOF1 空间模态表现为北太平洋中纬地区海温的一致变化特征, 体现了 PDO (Trenberth et al., 1994; Mantua et al., 1997; Zhang et al., 1997; 吕俊梅等, 2005) 的分布特征, 其 11 年滑动平均时间系数 (图 4c) 在 20 世纪 70 年代中后期前、后呈现出反位相的变化特征。EOF1 时间系数与 PDO 指数的相关系数很高, 达 -0.85 (通过 0.01 的显著性水平检验)。由图 4b 可见, EOF2 空间模态表现为日本以南西北太平洋、鄂霍次克海、白令海、阿留申群岛以南东北太平洋海温的一致分布特征 (Hare et al., 2000; Mochizuki et al., 2003; 武炳义等, 2007), 其 11 年

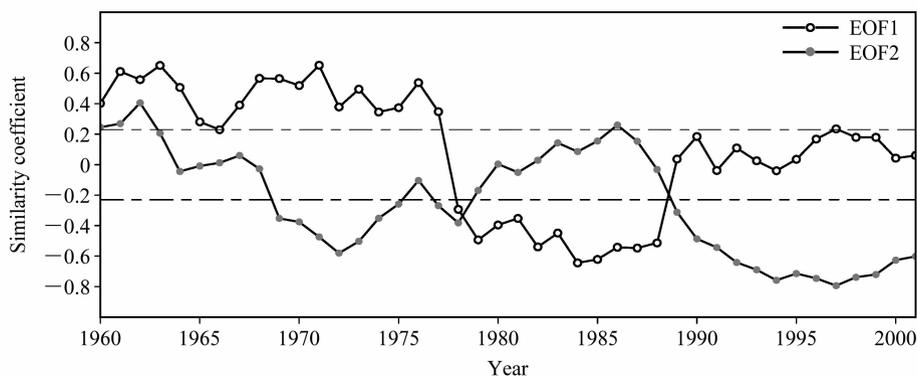


图 3 中国东部夏季降水距平年代际分量与 EOF1 (空心圆)、EOF2 (实心圆) 的相似系数曲线。虚线表示通过 0.01 的显著性水平检验  
 Fig. 3 Similarity coefficient curves of the interdecadal component of summer rainfall anomalies and the first and second EOF eigenvectors. Dashed lines denote 0.01 significance level

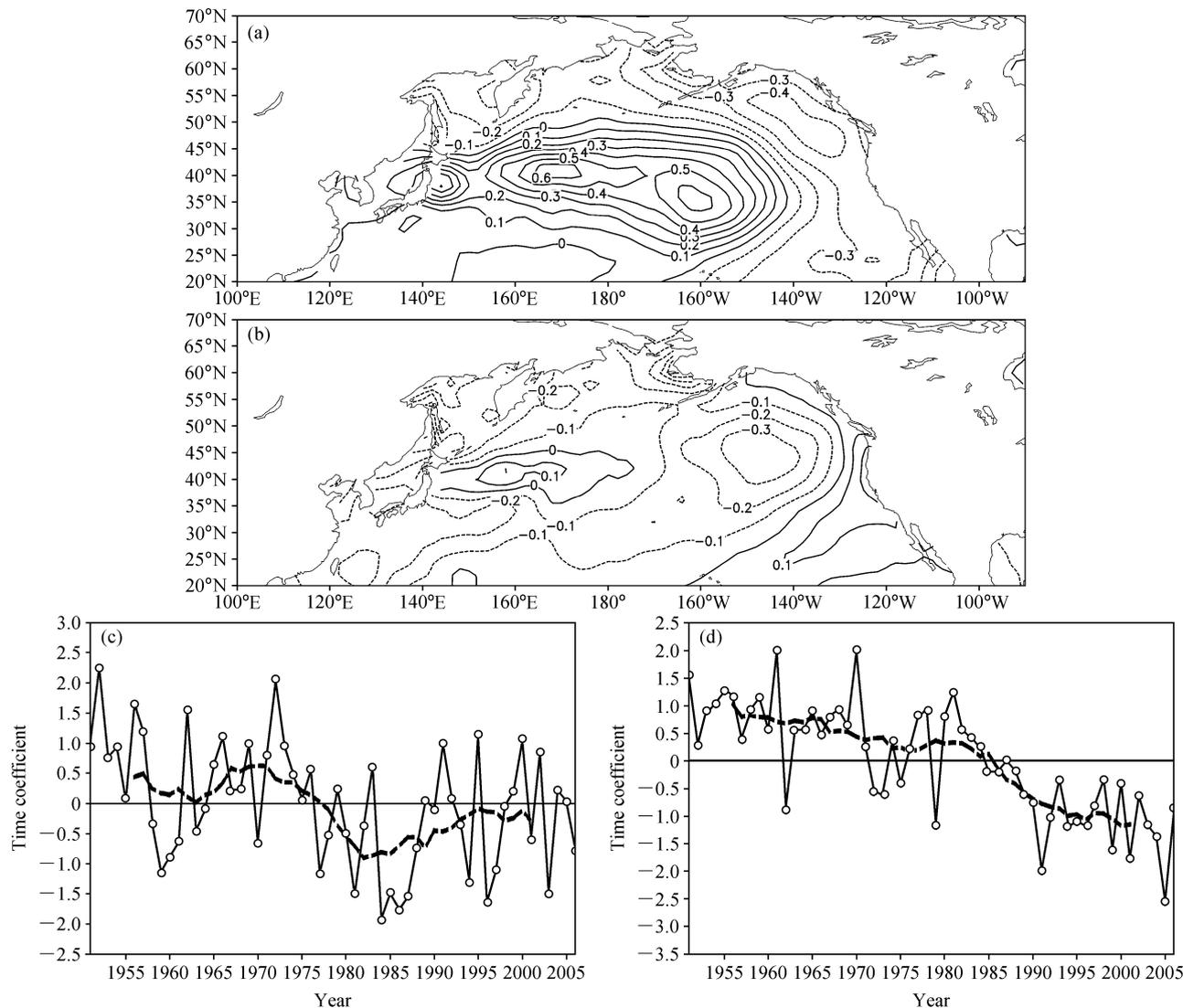


图 4 北太平洋海温的 EOF 特征向量 (a, b) 及其相应的时间系数 (c, d, 虚线表示 11 年滑动平均): (a, c) 第 1 特征向量; (b, d) 第 2 特征向量  
 Fig. 4 (a, b) EOF eigenvectors and (c, d) their time series of the North Pacific SST; (a, c) First EOF eigenvector; (b, d) second EOF eigenvector. (c, d) Dashed lines denote 11-year running averages

滑动平均时间系数(图 4d)在 20 世纪 80 年代末前、后呈现出反位相的变化特征。EOF2 时间系数与 PDO 指数的相关系数很低,仅为  $-0.05$  (未通过显著性检验),说明它与 PDO 关系不密切。

总之,北太平洋冬季海温的两种主要模态都具有明显的年代际变化特征,20 世纪 70 年代中后期北太平洋中纬地区海温由正距平向负距平转变(即 PDO 模态),80 年代末日本以南西北太平洋海温由负距平向正距平转变。

#### 4.2 中国东部夏季降水型与北太平洋冬季海温的年代际变化关系

为了分析北太平洋冬季海温与中国夏季降水的耦合关系,将中国东部夏季降水与前冬北太平洋海温场进行 SVD (奇异值分解, singular value decomposition) 分析。SVD1 (SVD 的第一对奇异向量) 方差贡献为 27.9%, 由其时间系数演变(图略)可知,没有出现上述两次年代际变化的特征,故本文未作进一步讨论。SVD2 (SVD 的第二对奇

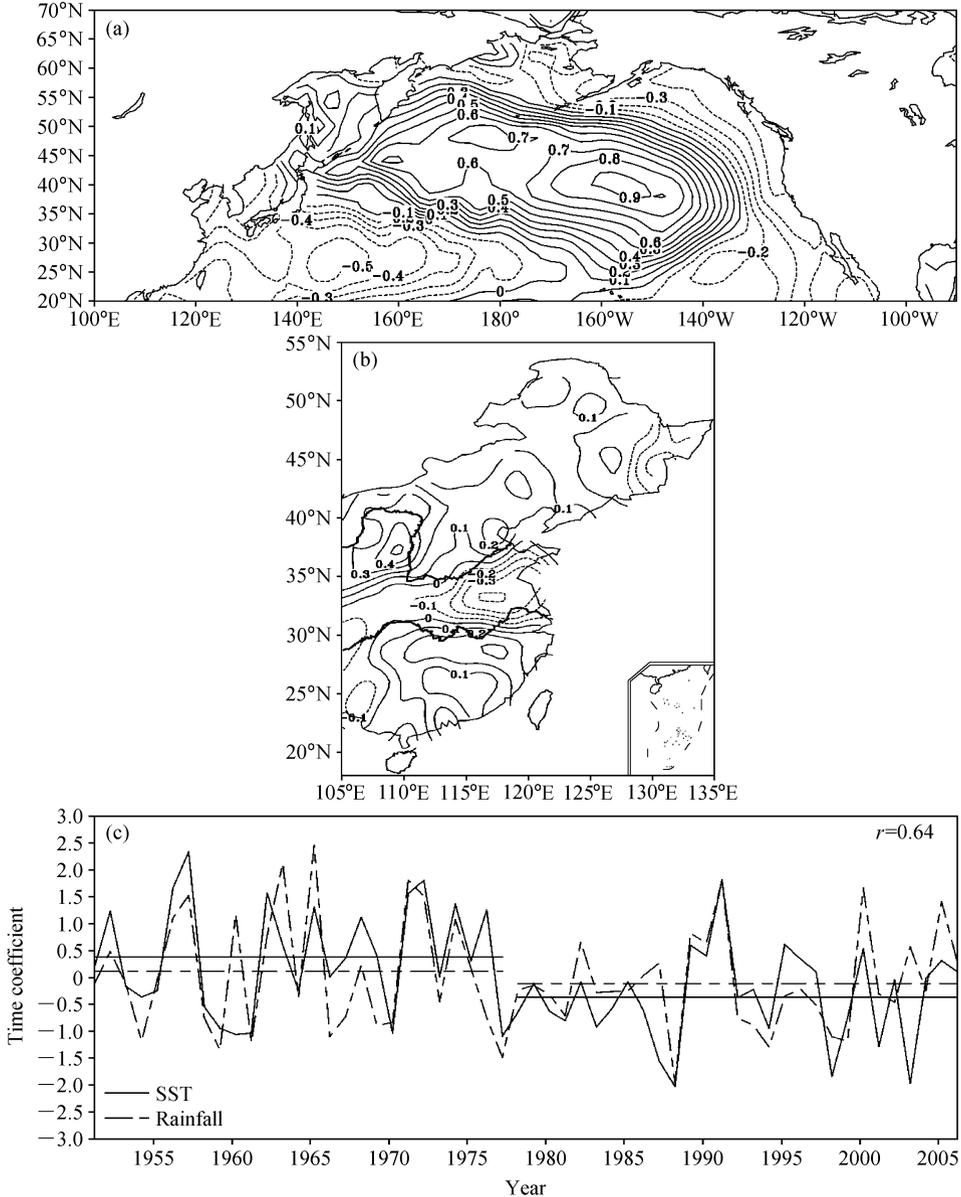


图 5 (a) 北太平洋海温场 SVD2 的空间分布; (b) 中国东部夏季降水 SVD2 的空间分布; (c) 它们的时间系数(实线: 海温; 虚线: 降水; 直线: 平均值)

Fig. 5 SVD2 (second SVD eigenvector) spatial patterns of (a) the North Pacific SST and (b) summer rainfall in eastern China, and (c) their temporal coefficients (straight lines; averages)

异向量) 方差贡献为 19.1%，其时间系数表现出了年代际变化特征(图 5c)，即 20 世纪 70 年代中后期前、后 SVD2 表现出反位相的年代际变化特征。由图 5a 可见，北太平洋冬季海温 SVD2 体现了 PDO 的空间分布特点。由图 5b 可见，中国东部夏季降水 SVD2 体现了降水的三极分布特征，即江淮流域与华北、华南降水呈反位相的分布特征。由此可见，在年代际时间尺度上，冬季北太平洋中纬地区正(负)海温距平与中国东部夏季降水“T+ (T-)”型相关联。

中国东部夏季降水与北太平洋冬季海温 SVD3 (SVD 的第三对奇异向量) 的方差贡献为 14.6%，其时间系数(图 6c) 也表现出了年代际变化特征，即 20 世纪 80 年代末 90 年代初前、后 SVD3 呈现出反位相的年代际变化特征。由图 6a 可见，北太平洋冬季海温 SVD3 体现了日本以南西北太平洋海温的空间分布特征。由图 6b 可见，中国东部夏季降水 SVD3 表现了降水的偶极分布特征，即中国东部南方与北方降水呈反位相的分布特征。由此可见，在年代际时间尺度上，日本以南西北太平洋的

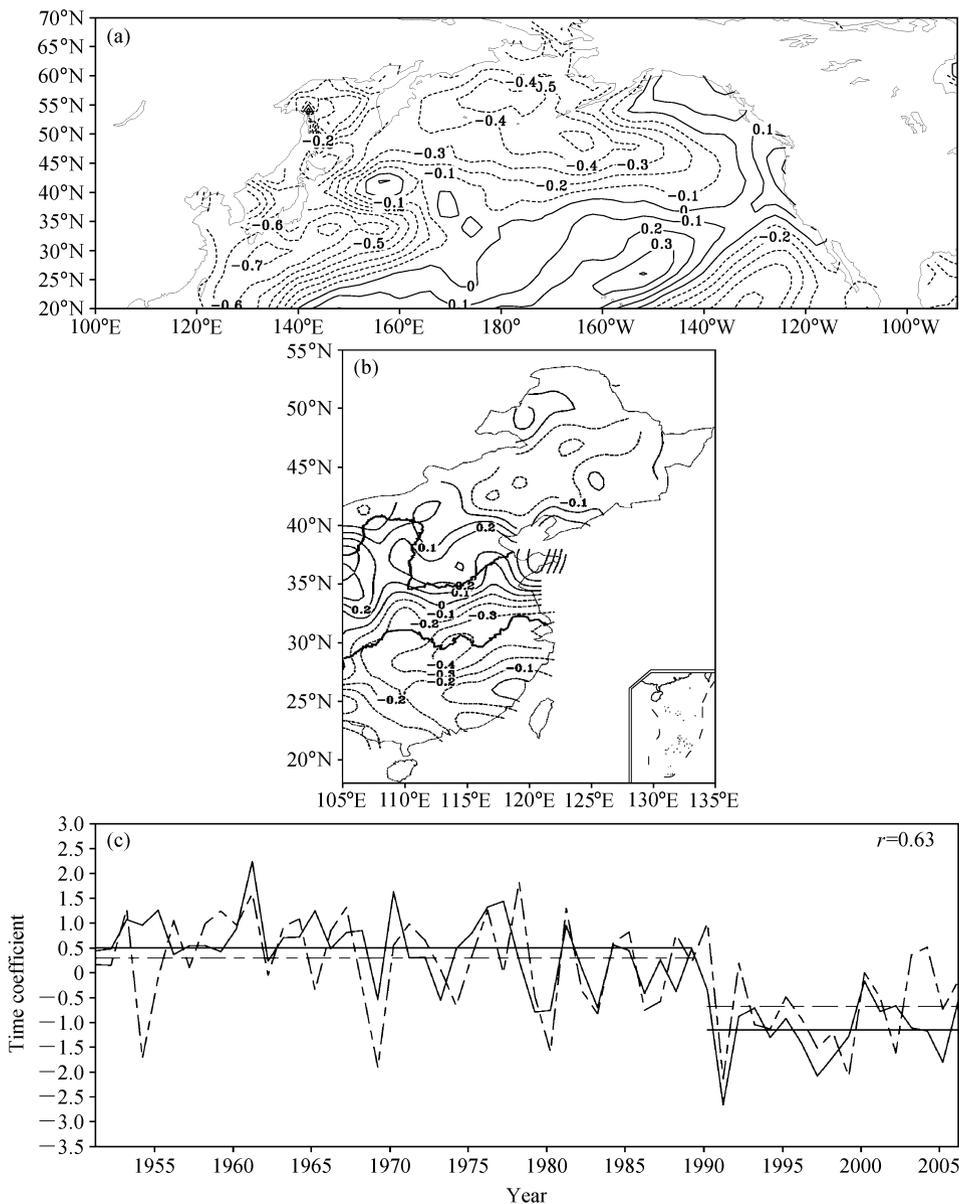


图 6 同图 5，但为 SVD3

Fig. 6 Same as Fig. 5, but for SVD3 (third SVD eigenvector)

正海温距平与中国东部夏季降水“B”型相关联。

根据两次年代际变化的不同时段,对前冬太平洋海温进行合成分析。由图 7 可见,20 世纪 70 年代中后期以前,北太平洋中纬度地区海温偏暖,而赤道东太平洋海温偏冷(图 7a),具有 PDO 冷位相的分布特征;70 年代中后期至 80 年代末,北太平洋中纬度地区海温偏冷,而赤道中东太平洋海温偏暖(图 7b),具有 PDO 暖位相的分布特征;90 年代

以后,日本以南西北太平洋、鄂霍次克海以及白令海都具有较明显的正海温距平,菲律宾群岛附近的海温也明显偏高(图 7c)。在这两次年代际变化过程中,太平洋冬季海温场的特征不一样,即 20 世纪 70 年代中后期,北太平洋中纬度海温场由正距平转变为负距平,PDO 由负位相转变为正位相;90 年代以后,北太平洋海温从 PDO 模态转变为日本以南西北太平洋海温增暖的模式。

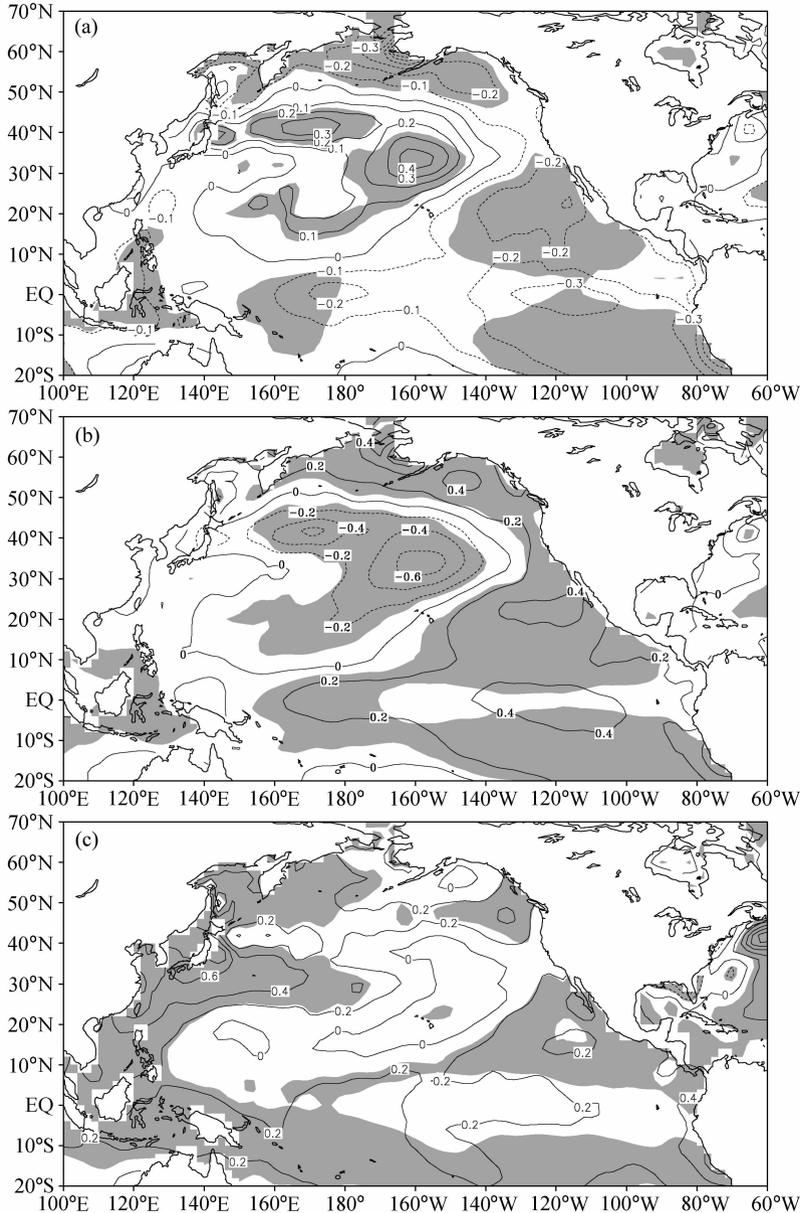


图 7 (a) 1960~1976 年、(b) 1978~1988 年和 (c) 1990~2002 年平均的北太平洋海温距平(单位:  $^{\circ}\text{C}$ )。阴影: 通过 0.10 的显著性水平检验

Fig. 7 The North Pacific SST anomalies ( $^{\circ}\text{C}$ ) averaged over (a) 1960–1976, (b) 1978–1988, and (c) 1990–2002. Shaded areas pass the Student  $t$ -test at 0.10 significance level

同样,对夏季 850 hPa 风场进行合成分析。由图 8 可见,20 世纪 70 年代中后期以前,中国东部为南风距平(图 8a),东亚夏季风较强,向北输送的水汽较强,使得中国东部雨带位置偏北,水汽在华北地区辐合,华北地区降水偏多,而江淮流域降水偏少(顾薇等,2005);70 年代中后期至 80 年代末,中国东部为北风距平(图 8b),东亚夏季风较

弱,向北输送的水汽偏弱,使得中国东部雨带位置偏南,水汽在江淮流域辐合,华北地区降水偏少,而江淮流域降水偏多(顾薇等,2005)。张庆云等(2007)指出,北太平洋中纬度海温的年代际变化(PDO)可能是东亚夏季风环流与中国东部夏季降水三极型年代际变化的重要外强迫因子之一。总之,20 世纪 70 年代中后期 PDO 出现反位相变化,

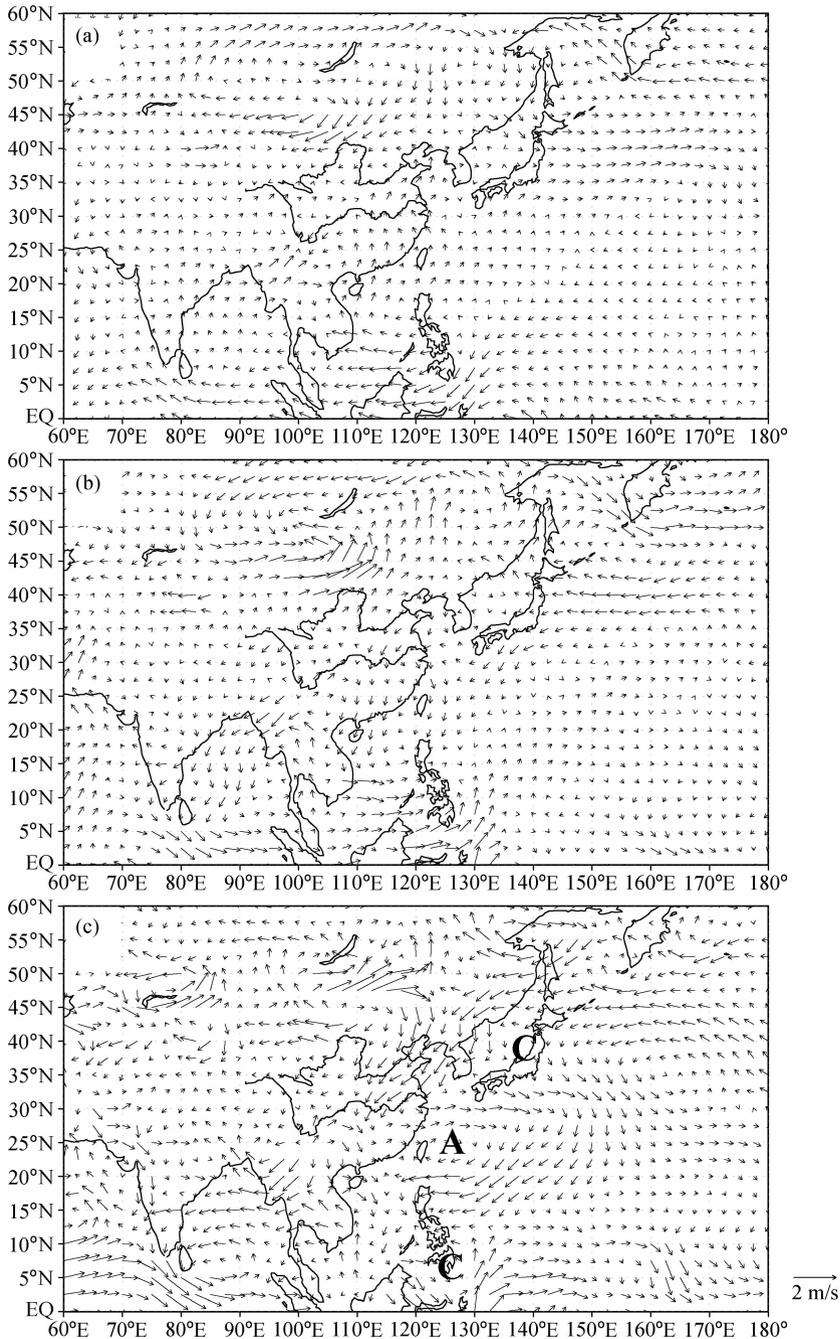


图 8 (a) 1960~1976 年、(b) 1978~1988 年和 (c) 1990~2002 年平均的 850 hPa 风场距平

Fig. 8 850-hPa wind field anomalies averaged over (a) 1960–1976, (b) 1978–1988, and (c) 1990–2002

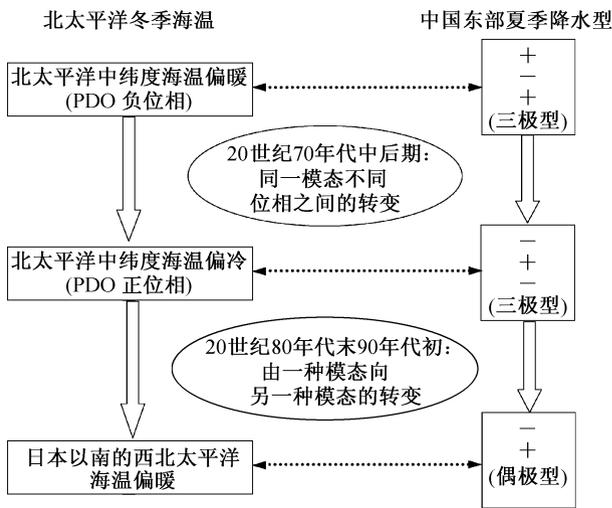


图9 北太平洋冬季海温与中国东部夏季降水型年代际关系的示意图

Fig. 9 Schematic diagram of interdecadal variation relationship between the North Pacific winter SSTs and eastern China summer precipitation patterns

东亚夏季风由强变弱, 导致了三极型降水的位相转变。由图 8c 可见, 20 世纪 90 年代以后, 日本以南西北太平洋海温较暖, 同时赤道地区菲律宾群岛附近的海温也明显偏高, 西太平洋副热带高压偏南偏西; 中国台湾以东洋面出现一个明显的反气旋距平, 来自西北太平洋地区的水汽输送得到增强, 南方地区降水易增多, 而北方地区仍被较强偏北风距平控制, 易持续干旱, 因此中国东部降水呈“B”型分布。总之, 90 年代以后, 日本以南西北太平洋和菲律宾群岛附近较暖海温可能导致了西太平洋副热带高压偏南偏西, 使得中国东部夏季降水偶极型的年代际变化。

图 9 给出了北太平洋海温与中国东部夏季降水型年代际的可能关系, 在 20 世纪 70 年代中后期的年代际变化中, 海温场和降水场都表现出了同一种模态间不同位相的转变; 而在 20 世纪 80 年代末 90 年代初的年代际变化中, 海温场和降水场均呈现出由一种模态向另一种模态的转变。

对于 20 世纪 70 年代中后期我国东部夏季降水型的年代际变化以前讨论较多, 本文暂不讨论。对于 20 世纪 80 年代末 90 年代初我国东部夏季降水型的年代际变化, 从以上分析可知, 日本以南西北太平洋和菲律宾群岛附近海温的增暖是我国东部夏季降水型发生年代际变化的原因之一, 武炳义等

(2007) 也指出夏季西北太平洋海温的年代际变化可能是造成我国长江流域以南的夏季降水偏多的可能原因。此外, 东亚夏季风的年代际变化也是 20 世纪 80 年代末 90 年代初我国东部夏季降水型发生年代际变化的原因之一, Wu et al. (2008) 揭示出东亚夏季风第一模态在 20 世纪 80 年代后期出现了年代际变化。总之, 20 世纪 80 年代末 90 年代初, 西北太平洋海温增暖和东亚夏季风减弱可能都是我国东部夏季降水型年代际变化的原因。

## 5 结论

采用中国 160 站降水资料、NOAA ERSST 海温资料以及 ERA-40 再分析资料, 分析了中国东部夏季降水型的年代际变化特征及其与北太平洋海温的可能联系, 得到以下结论:

(1) 利用中国 160 站降水资料发现, 近 50 多年中国东部夏季降水型经历了两次年代际变化, 第 1 次发生在 20 世纪 70 年代中后期, 中国东部夏季降水从北到南呈现出由“+ - +”转变为“- + -”三极的分布形态; 第 2 次发生在 20 世纪 80 年代末 90 年代初, 由北向南呈现出“- + -”三极转变为“- +”偶极的分布形态。

(2) 中国东部夏季降水型的年代际变化与北太平洋海温之间可能存在着以下的联系: 20 世纪 70 年代中后期, 北太平洋中纬度海温由正距平向负距平转变, PDO 由负位相向正位相转变, 通过影响东亚夏季风环流系统, 使东亚夏季风由强变弱, 中国东部降水呈现出由“+ - +”转变为“- + -”三极的分布形态; 20 世纪 80 年代末 90 年代初以后, 日本以南的西北太平洋具有较暖的海温, 同时菲律宾群岛附近海温偏暖, 容易导致西太平洋副热带高压偏南、偏西, 使得台湾以东洋面产生反气旋距平环流, 从而来自西北太平洋地区的水汽输送得到增强, 于是南方地区降水易增多; 由于中国北方受偏北风距平控制, 降水偏少, 因此, 中国东部地区降水分布转变成“- +”的偶极形态。

## 参考文献 (References)

- 陈兴芳, 赵振国. 2000. 中国汛期降水预测研究和应用 [M]. 北京: 气象出版社. Chen Xingfang, Zhao Zhenguo. 2000. Research and Application on Prediction of Rainfall during Flood Season in China (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press.

- 陈兴芳, 孙林海. 2002. 我国年、季降水的年代际变化分析 [J]. 气象, 28 (7): 3-8. Chen Xingfang, Sun Linhai. 2002. An analysis on decadal variation of annual and seasonal rainfall in China [J]. Monthly Meteorology (in Chinese), 28 (7): 3-8.
- 戴新刚, 汪萍, 丑纪范. 2003. 华北汛期降水多尺度特征与夏季风年代际衰变 [J]. 科学通报, 48 (23): 2483-2487. Dai Xin'gang, Wang Ping, Chou Jifan. 2003. Multiscale characteristics of the rainy season rainfall and interdecadal decaying of summer monsoon in North China [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 48 (23): 2483-2487.
- Ding Yihui, Wang Zhunya, Sun Ying. 2008. Inter-decadal variation of the summer precipitation in East China and its association with decreasing Asian summer monsoon. Part I: Observed evidences [J]. International Journal of Climatology, 28: 1139-1161, doi: 10.1002/joc.1615.
- 顾薇, 李崇银, 杨辉. 2005. 中国东部夏季主要降水型的年代际变化及趋势分析 [J]. 气象学报, 63 (5): 728-739. Gu Wei, Li Chongyin, Yang Hui. 2005. Analysis on interdecadal variation of summer rainfall and its trend in East China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 63 (5): 728-739.
- 郭其蕴, 蔡静宁, 邵雪梅, 等. 2004. 1873~2000年东亚夏季风变化的研究 [J]. 大气科学, 28 (2): 206-215. Guo Qiyun, Cai Jingning, Shao Xuemei, et al. 2004. Studies on the variations of East-Asian summer monsoon during A D 1873-2000 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 28 (2): 206-215.
- Hare S R, Mantua N J. 2000. Empirical evidence for North Pacific regime shifts in 1977 and 1989 [J]. Prog. Oceanogr., 47: 103-145.
- 黄荣辉, 徐予红, 周连童. 1999. 我国夏季降水的年代际变化及华北干旱化趋势 [J]. 高原气象, 18 (4): 465-476. Huang Ronghui, Xu Yuhong, Zhou Liantong. 1999. The interdecadal variation of summer precipitations in China and the drought trend in North China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 18 (4): 465-476.
- 黄荣辉, 周连童. 2002. 我国重大气候灾害特征、形成机理和预测研究 [J]. 自然灾害学报, 11 (1): 1-9. Huang Ronghui, Zhou Liantong. 2002. Research on the characteristics, formation mechanism and prediction of severe climatic disasters in China [J]. J. Natural Disasters (in Chinese), 11 (1): 1-9.
- 黄荣辉, 陈际龙, 周连童, 等. 2003. 关于我国重大气候灾害与东亚气候系统之间关系的研究 [J]. 大气科学, 27 (4): 770-787. Huang Ronghui, Chen Jilong, Zhou Liantong, et al. 2003. Studies on the relationship between the severe climatic disasters in China and the East Asia climate system [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 27 (4): 770-787.
- 黄荣辉, 蔡榕硕, 陈际龙, 等. 2007. 我国旱涝气候灾害的年代际变化及其与东亚气候系统变化的关系 [J]. 大气科学, 30 (5): 730-743. Huang Ronghui, Cai Rongshuo, Chen Jilong, et al. 2007. Interdecadal variations of drought and flooding disasters in China and their association with the East Asian climate system [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (5): 730-743.
- 陆日宇. 2003. 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, 48 (7): 718-722. Lu Riyu. 2003. Linear relationship between the interdecadal and interannual variabilities of North China rainfall in rainy season [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 48 (7): 718-722.
- 吕俊梅, 琚建华, 张庆云. 2005. 太平洋海温场两种不同时间尺度气候模态的分析 [J]. 海洋学报, 27 (5): 30-37. Lü Junmei, Jü Jianhua, Zhang Qingyun. 2005. The analysis of two climate patterns on different time scales in Pacific sea temperature fields [J]. Acta Oceanologica Sinica (in Chinese), 27 (5): 30-37.
- Mantua N J, Hare S R, Zhang Y, et al. 1997. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 78 (6): 1069-1079.
- Mochizuki T, Kida H. 2003. Maintenance of decadal SST anomalies in the midlatitude North Pacific [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 81 (3): 477-491.
- North G, Bell T, Cahalan R, et al. 1982. Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal function [J]. Mon. Wea. Rev., 110 (7): 699-706.
- 平凡, 罗哲贤, 琚建华. 2006. 长江流域汛期降水年代际和年际尺度变化影响因子的差异 [J]. 科学通报, 51 (1): 104-109.
- Ping Fan, Luo Zhexion, Jü Jianhua. 2006. Differences between dynamics factors for interannual and decadal variations of rainfall over the Yangtze River valley during flood seasons [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 51 (1): 104-109.
- Smith T N, Reynolds R W. 2003. Extended reconstruction of global sea surface temperature based on COADS data (1854-1997) [J]. J. Climate, 16 (10): 1495-1510.
- Trenberth K E, Hurrell J W. 1994. Decadal atmosphere-ocean variations in the Pacific [J]. Climate Dyn., 9 (6): 303-319.
- Uppala S M, Kallberg P W, Simmons A J, et al. 2005. The ERA-40 reanalysis [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 131 (1): 1-10.
- Wang Huijun. 2001. The weakening of the Asian monsoon circulation after the end of 1970's [J]. Adv. Atmos. Sci., 18 (3): 376-386.
- 武炳义, 张人禾. 2007. 20世纪80年代后期西北太平洋夏季海表温度异常的年代际变化 [J]. 科学通报, 52 (10): 1190-1194. Wu Bingyi, Zhang Renhe. 2007. The inter-decadal variation of western North Pacific summer sea surface temperature anomaly in the late 1980s [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 52 (10): 1190-1194.
- Wu Bingyi, Zhang Renhe, Ding Yihui, et al. 2008. Distinct modes of the East Asian summer monsoon [J]. J. Climate, 21 (5): 1122-1138.
- Zeng Gang, Sun Zhaobo, Wang Wei-Chyung, et al. 2007. Interdecadal variability of the East Asian summer monsoon and associated atmospheric circulations [J]. Adv. Atmos. Sci., 24 (5): 915-

926.

- 张庆云, 陶诗言, 张顺利. 2003. 夏季长江流域暴雨洪涝灾害的天气气候条件 [J]. 大气科学, 27 (6): 1018 - 1030. Zhang Qingyun, Tao Shiyang, Zhang Shunli. 2003. The persistent heavy rainfall over the Yangtze River valley and its associations with the circulations over East Asian during summer [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 27 (6): 1018 - 1030.
- 张庆云, 吕俊梅, 杨莲梅, 等. 2007. 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 [J]. 大气科学, 30 (6): 1290 - 1300. Zhang Qingyun, Lü Junmei, Yang Lianmei, et al. 2007. The interdecadal variation of precipitation pattern over China during summer and its relationship with the atmospheric internal dynamic processes and extra-forcing factors [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (6): 1290 - 1300.
- Zhang Y, Mallace J M, Battisti D S. 1997. ENSO-like interdecadal variability: 1900 - 93 [J]. J. Climate, 10 (5): 1004 - 1020.
- 周连童, 黄荣辉. 2003. 关于我国夏季气候年代际变化特征及其可能成因的研究 [J]. 气候与环境研究, 8 (3): 274 - 290. Zhou Liantong, Huang Ronghui. 2003. Research on the characteristics of interdecadal variability of summer climate in China and its possible cause [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 8 (3): 274 - 290.
- Zhu Jinhong, Wang Shaowu. 2001. 80 a-oscillation of summer rainfall over the east part of China and East-Asian summer monsoon [J]. Adv. Atmos. Sci., 18 (5): 1043 - 1051.
- 朱益民, 杨修群. 2003. 太平洋年代际振荡与中国气候变率的联系 [J]. 气象学报, 61 (6): 641 - 654. Zhu Yimin, Yang Xiuqun. 2003. Relationships between Pacific decadal oscillation (PDO) and climate variabilities in China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 61 (6): 641 - 6549.