

我国夏季降水与全球海温的耦合关系分析

陈文 康丽华 王珩

中国科学院大气物理研究所季风系统研究中心, 北京 100080

摘要 利用我国160个台站从1951~2000年的月降水观测资料和NCEP/NCAR的全球海表温度(SST)资料, 分析了我国夏季(6、7、8月)降水的时空变化特征及其与海温的相关, 并应用奇异值分解(SVD)方法研究了我国夏季降水分布异常与海温变化的耦合关系。结果表明, 我国夏季降水异常的雨型分布主要有3种, 这些雨型的时间变化除了有明显的年际变化外, 还存在显著的年代际变化。尤其是华北地区的降水从1965年左右开始减少, 特别是大约1976年后有显著的减少。SVD分析揭示的我国夏季降水和全球海温异常的耦合关系表明, 这种耦合关系最主要的时空变化特征表现在年代际变化的时间尺度上。我国华北和东北南部的夏季降水从1976年前后明显减少, 与之显著关联的海温异常的关键区包括太平洋、印度洋以及热带和南大西洋。特别是热带中、东太平洋, 印度洋, 以及热带和南大西洋海水, 从1976年前后也明显增暖。本研究揭示的华北持续干旱与印度洋和大西洋海温的年代际变化的耦合关系, 在以往的研究中还未见到, 因而有必要在今后的研究中加以重视。我国夏季降水和海温的耦合关系, 还表现在长江中下游地区的降水异常与太平洋和大西洋海温异常的显著相关上。当南海和黑潮区域以及相邻的热带西太平洋海区海温为正异常时, 热带和北大西洋海温也为正异常; 而热带中、东太平洋海温为负异常时, 长江中下游地区往往偏涝; 反之, 该地区则偏旱。

关键词 夏季降水 海温 年际变化 年代际变化

文章编号 1006-9585 (2006) 03-0259-11 **中图分类号** P461 **文献标识码** A

The Coupling Relationship Between Summer Rainfall in China and Global Sea Surface Temperature

CHEN Wen, KANG Li-Hua, and WANG Ding

Center for Monsoon System Research, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080

Abstract By using the monthly rainfall in 160 stations of China and the sea surface temperature (SST) data from NCEP/NCAR, the spatial and temporal distributions of summer (JJA) rainfall and their correlations with SST are analyzed. The coupling relationship between the anomalous distribution in summer rainfall and the variations of SST has been studied with the Singular Value Decomposition (SVD) analysis. The results show that there are mainly three patterns in the anomalous distributions of summer rainfall. Their temporal variations present the time scales of not only interannual but also interdecadal. Especially, the rainfall in North China decreases from about 1965 and more obviously after 1976. The coupling relationship between the summer rainfall and global SST with SVD analysis presents a dominate time scales of interdecadal variation. The remarkable decrease of summer rainfall in North China and southern part of Northeast China after 1976 has been shown to be closely associated with the SST anomalies in Pacific Ocean, Indian Ocean and the tropical and south of Atlantic Ocean. Particularly, the SST becomes warmer obviously from 1976 in the tropical central and eastern Pacific Ocean, nearly the whole Indian Ocean and the tropical

收稿日期 2006-04-08 收到, 2006-04-28 收到修定稿

资助项目 中国科学院知识创新工程重要方向项目 KZCX3-SW-218 和国家重点基础研究发展计划 2004CB418303

作者简介 陈文, 男, 1966年11月出生, 博士, 研究员, 主要从事气候动力学与季风研究。E-mail: chenw@lasg.iap.ac.cn

and south of Atlantic Ocean. The relationship between persistent drought in North China and the interdecadal variations of SST in Indian and Atlantic Oceans has not been revealed before. The coupling relationship between the summer rainfall and SST has also been presented in the significant correlations between the rainfall anomalies in the middle and lower reaches of the Yangtze River and the SST anomalies in the Pacific and Atlantic Oceans. When the SST anomalies are positive in South China Sea, Kuroshio region and the neighbouring area, and in the tropical and north of Atlantic Ocean, and negative in the tropical central and eastern Pacific Ocean, the rainfall in the middle and lower reaches of the Yangtze River tends to be above normal. In the reverse situation, the rainfall tends to be below normal.

Key words summer rainfall, sea surface temperature, interannual variation, interdecadal variation

1 引言

我国地处东亚季风区, 季风年际变化很大, 而引起大范围旱涝等气候灾害频繁发生。比如, 华北地区从 1977 年以后, 降水连年减少, 20 世纪 80 年代的年平均降水量约比 50 年代减少了 1/3, 形成了严重干旱^[1]。而 1998 年夏季长江流域和东北嫩江、松花江流域汛期降水量约为常年的 2 倍, 发生了特大洪涝, 经济损失超过 2 600 亿元, 死亡人数超过 3 000 人。黄荣辉等^[2]统计和研究了我国主要气候灾害的时空分布特征, 指出我国的干旱主要发生在西北和华北地区, 而雨涝则主要发生在长江中下游地区和东南沿海。因此, 对我国降水时空变化的研究一直是气象学家关注的问题。

我国的降水主要发生在夏季, 早在 70 多年前, 人们就认识到中国降水与东亚夏季风有关^[3]。在对影响东亚夏季风进而影响我国降水的因子中, 有关海温与我国夏季降水关系的研究已有不少。通过这些研究我们知道, ENSO 循环对东亚夏季风降水有很大影响^[4], 而热带西太平洋海温通过影响对流亦可造成江淮夏季降水异常^[5]。最近的研究还发现, 当夏季黑潮海温正异常年时, 长江流域降水偏多, 负异常年时则反之^[6]。从 20 世纪 90 年代中期起, 年代际气候变化开始成为国际上研究的热点问题之一。研究表明, 我国降水也有明显的年代际变化, 华北地区发生的持续性干旱可能跟热带中、东太平洋海温的年代际变化有关^[7]。

然而, 以往的研究主要侧重于相关分析和合成研究, 特别是华北干旱与热带太平洋海温的关系缺乏统计上的显著性检验。奇异值分解方法能

有效地分离出两个物理量场的大尺度耦合关系模式, 已被广泛应用于气候研究中。但在我国夏季降水场和海温场的关系上, 采用奇异值分解方法的研究还不多见。魏风英^[8]曾利用奇异值分解方法讨论了全球海表温度变化与中国夏季降水异常的分布, 但其结论认为海温对中国夏季降水的作用从统计上看不显著, 明显与以往的研究结果不一致。因此, 很有必要利用更新、更精确、更长的资料序列进行更深入的分析研究。为此, 本文采用我国 160 个台站 1951~2000 年夏季降水的观测资料来分析中国降水的时空变化特征, 并利用 NCEP 海温资料在研究了降水变化和海温异常相关的基础上, 来分析我国夏季降水与全球海温的耦合关系, 以期对海温和我国夏季降水的关系有更清晰和深入的了解。

2 资料和方法

本文所用的资料包括我国 160 个台站 50 年 (1951~2000 年) 的月平均降水资料和 NCEP/NCAR 再分析资料中的月平均海温资料。对降水资料采用 6~8 月的总和做为夏季降水; 对海温资料除求得夏季平均的海温场外, 还分别用 3~5 月的平均和 12 月至次年 2 月的平均做为春季和前冬平均的海温场。

研究中采用的方法主要有经验正交函数 (Empirical Orthogonal Function, EOF) 分解、相关分析和奇异值分解 (Singular Value decomposition, SVD) 方法。EOF 分析又称为主分量分析或主成分分析, 它是用来将大量初始信息资料 (矩阵) 加以压缩, 并从中求得能最大限度地捕获初始方差的正交线性组合, 即出现频率最高的时空变化型或主导的时空变化型的一

种分析方法^[9]。SVD 方法用于分析两个气象要素场序列之间的相关关系，即它可最大限度地从两个要素场分离出多个相互独立的耦合模态，从而揭示出两个要素场所存在的时域相关性的空间联系，这种耦合的空间分布型能最大限度地解释两场的交叉协方差。由于奇异值分解是以两个场之间的最大协方差为基础的展开，它在研究两个要素场序列之间时空关系时是一个有力的工具。目前，该方法已被广泛应用于两个要素场的气候诊断分析中。

3 我国夏季降水的时空特征

为了了解我国夏季降水的主要分布特征，应

用 EOF 分析方法对 1951~2000 年 160 个站的夏季降水距平场做展开。前 3 个特征向量的方差贡献率分别为 16%、12.2% 和 6.8%，都通过了 North 检验^[10]。图 1a 和 1b 分别是中国夏季降水 EOF 分析第 1 模态（即 EOF1）的空间分布和时间系数序列。正如图 1a 所示，中国夏季降水 EOF1 的空间分布及其统计信度表明，最强的正信号位于长江中下游地区，而最大的负信号位于华南地区。这说明华南地区夏季降水异常往往与长江中下游地区的夏季降水异常相反。若长江中下游地区夏季降水偏多，则华南地区夏季降水往往偏少；反之，若长江中下游地区夏季降水偏少，则华南地区夏季降水往往偏多。并且，从图 1b 所

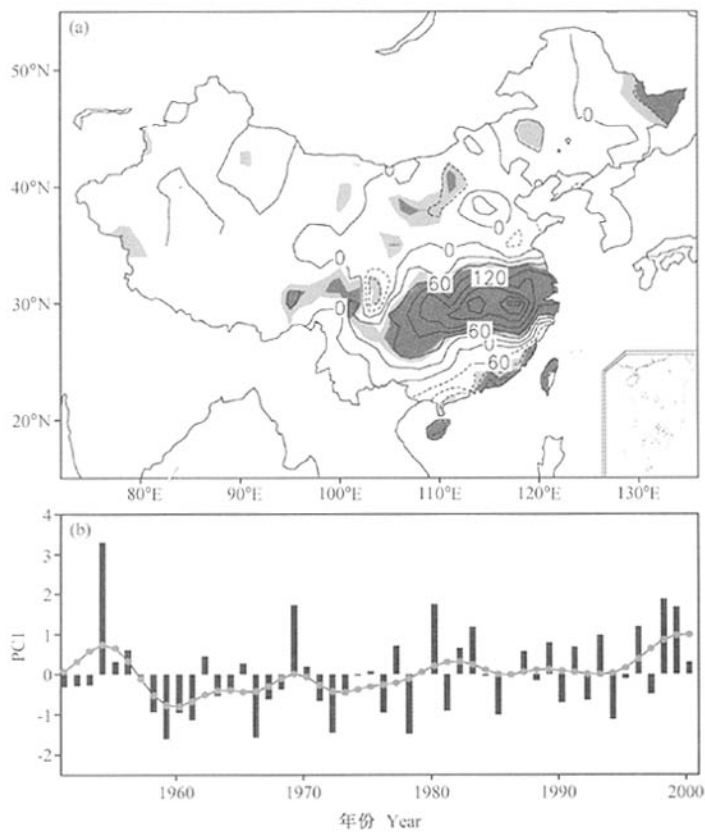


图 1 1951~2000 年中国夏季（6~8 月）降水 EOF 分析第 1 主分量（EOF1）的空间分布（a）和时间系数序列（b）。（a）中实线与虚线分别表示正、负信号，深和浅阴影区分别代表超过 99% 和 95% 信度检验的区域；（b）中带实心圆的曲线表示 11 年滑动平均的结果
Fig. 1 The EOF1 of summer (Jun—Aug) rainfall for 1951—2000 in China, (a) spatial pattern of EOF1 shown as regression map based on the standardized PC time series. Heavy and light shadings indicate statistical significance at the 99% and 95% levels, respectively. Contour intervals are 30 mm, (b) standardized PC time series (bars) and its 11-year running mean (curve)

示的中国夏季降水 EOF 分析第 1 主分量时间序列的变化可以看到,从 20 世纪 60 年代到 90 年代末,长江中下游地区的夏季降水有增加的趋势,而华南地区夏季降水则有减少的趋势。

图 2a 和 2b 分别给出了中国夏季降水 EOF2 的空间分布和时间系数序列。图 2a 显示,长江以南地区的夏季降水异常与黄河、长江之间的地区降水异常存在着反位相的关系。而且 EOF2 时间序列的变化表明(图 2b),在 20 世纪 90 年代初这种降水分布异常发生了突然的变化,长江以南地区的夏季降水明显增加,而黄河、长江之间地区的夏季降水则显著减少。

很显然,EOF3 的空间分布(见图 3a)主要表示了华北地区和东北南部的夏季降水异常,同时在我国东南沿海地区降水异常有相反的变化关系。图 3b 所示的 EOF3 的时间序列的变化表明,

在大约 1965 年前我国华北地区和东北南部地区有比较充沛的降水,随后开始进入了一个比较干旱的时期。这种降水分布的异常变化与以往针对华北地区夏季降水的分析也是一致的^[7]。

4 我国夏季降水异常分布与全球海温的相关

在了解我国夏季降水的主要分布特征及其时间变化的基础上,本节分析我国夏季降水异常分布与海温的关系。为此我们计算了我国夏季降水 EOF 的前 3 个时间序列与全球同期海温的相关。

图 4 是 1951~2000 年我国夏季降水 EOF1 的时间序列和夏季海温相关系数的空间分布。由图可见,与 EOF1 型降水关系最密切的地区是热带西太平洋海区以及南海和一部分黑潮区域,其最

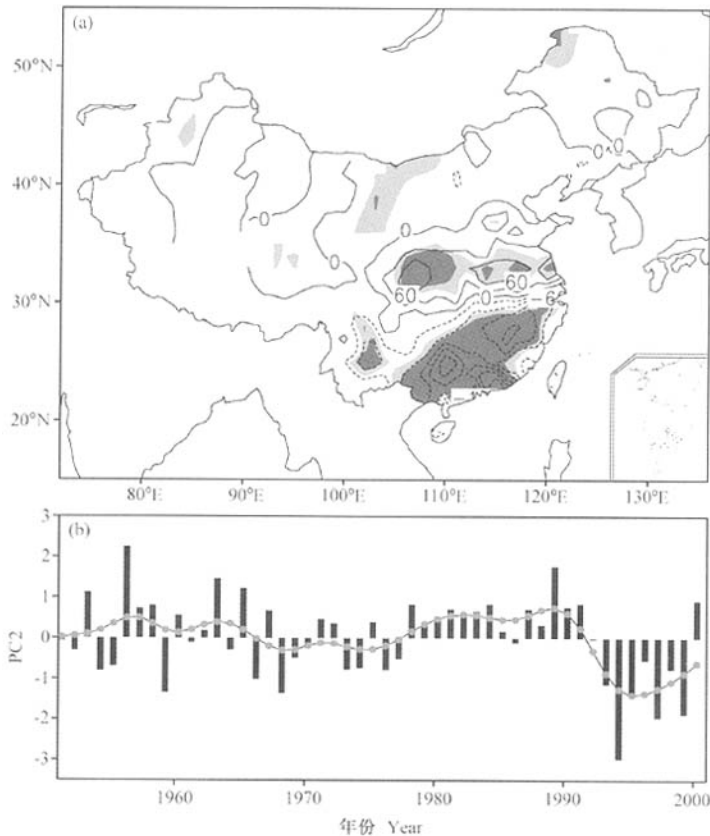


图 2 1951~2000 年中国夏季(6~8 月)降水 EOF2 的空间分布(a)和时间系数序列(b)。其余说明同图 1

Fig. 2 As in Fig. 1, but for the EOF2

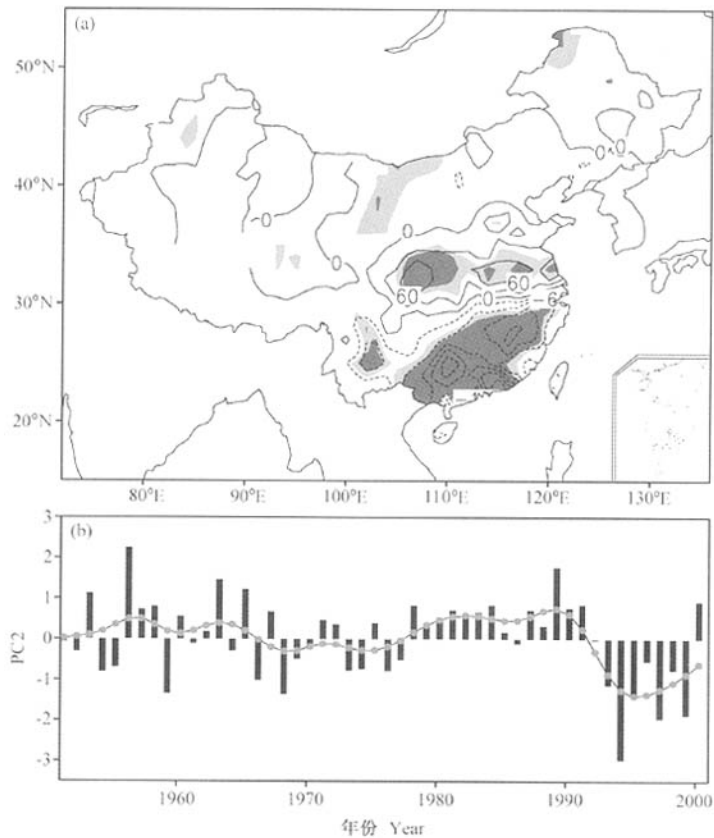


图 3 1951~2000 年中国夏季（6~8 月）降水 EOF3 的空间分布（a）和时间系数序列（b）。其余说明同图 1
Fig. 3 As in Fig. 1, but for the EOF3

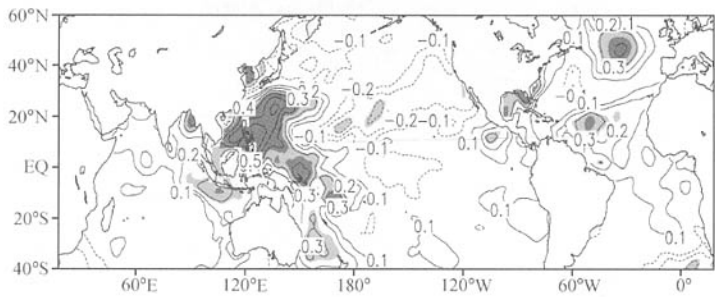


图 4 1951~2000 年中国夏季降水 EOF1 时间系数序列和同期海温相关系数的空间分布。深和浅阴影区分别代表超过 99% 和 95% 信度检验的区域
Fig. 4 Correlation map of concurrent SST with the time series of EOF1 for the summer (Jun—Aug) rainfall in China from 1951 to 2000. Heavy and light shadings indicate statistical significance at the 99% and 95% levels, respectively

大的正相关超过 0.6。在副热带太平洋中部和墨西哥湾附近也有达到 95% 置信水平的相关出现，但其相关值仅为 0.3 左右，相关区域也较小。因此，当南海和黑潮区域以及相邻的热带西太平洋海区

海温为正异常时, 长江中下游地区往往降水偏多; 反之, 降水则偏少。该结果与倪东鸿等^[6]揭示的夏季黑潮区域海温异常与长江流域降水的关系也是一致的。事实上, 上述的显著正相关可以向前追溯到前一个冬季, 如图 5 所示, 前冬的南海和黑潮区域的海温异常与随后夏季长江中、下游地区的降水存在显著的正相关。这种前期海温与我国夏季降水之间很好的时滞关系与罗绍华等^[11]的研究和 Chen 等^[12]揭示的前期东亚冬季风异常-南海海温异常持续-东亚夏季风异常的关系亦可以互相验证。

与我国夏季降水 EOF1 的时间系数序列和同期海温的相关比较, 我国夏季降水的 EOF2 和同期海温的相关则很小 (见图 6), 只是在热带西太平洋和赤道中太平洋海区有大范围的弱的负相关, 并且只在很小的海区达到 95% 置信水平的相关。也就是说, 当该地方的海温出现负异常时, 会有利于黄河、长江之间夏季降水增加以及长江以南夏季降水减少。

图 7 是 1951~2000 年我国夏季降水 EOF3 的时间系数序列和同期海温的相关系数空间分布。很显然, 图 7 中显示的是与 ENSO 循环相联系的

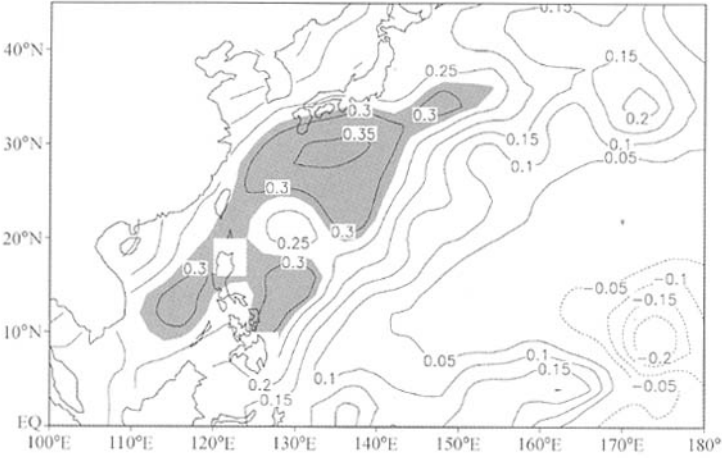


图 5 1951~2000 年中国夏季降水 EOF1 时间系数序列和前冬 (12 月和次年 1、2 月平均) 海温相关系数的空间分布。阴影区代表超过 95% 信度检验的区域

Fig. 5 Correlation map of the preceding winter (Dec-Feb) SST with the time series of EOF1 for the summer (Jun-Aug) rainfall from 1951 to 2000. Shadings indicate statistical significance at the 95% level

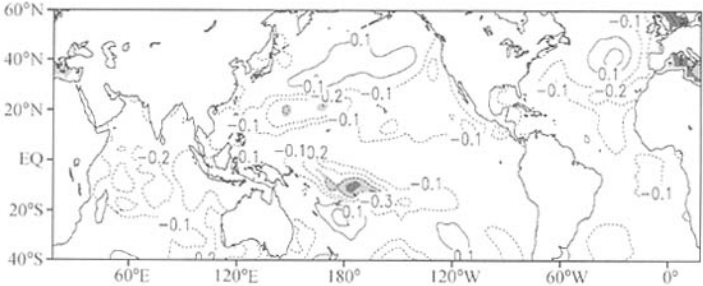


图 6 1951~2000 年中国夏季降水 EOF2 时间系数序列和同期海温相关系数的空间分布。深和浅阴影区分别代表通过 99% 和 95% 信度检验的区域

Fig. 6 As in Fig. 4, but for the EOF2

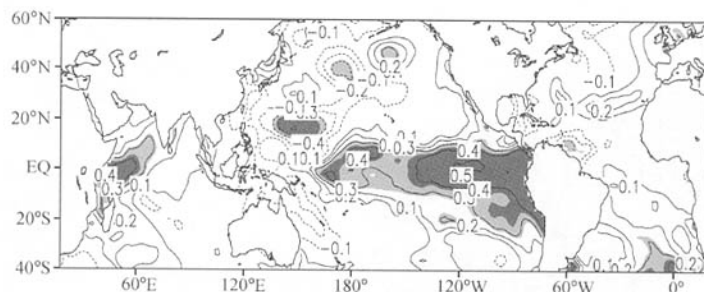


图 7 1951~2000 年中国夏季降水 EOF3 时间系数序列和同期海温相关系数的空间分布。深和浅阴影区分别代表通过 99% 和 95% 信度检验的区域

Fig. 7 As in Fig. 5, but for the EOF3

海温异常分布。在赤道中、东太平洋海区有大范围显著的正相关，并且最大的相关系数超过了 0.5；而在热带西太平洋海区则有显著的负相关。由此可见，当热带太平洋出现暖事件（El Niño）时，我国华北地区和东北南部地区往往会有较少的降水；而当热带太平洋出现冷事件（La Niña）时，该地区则往往会有较充沛的降水。我国夏季降水 EOF3 的时间序列变化（图 3b）揭示出从 20 世纪 60 年代中期开始我国华北地区和东北南部地区进入了一个比较干旱的时期，黄荣辉等^[1]的研究认为，降水的这种变化与热带中、东太平洋发生的年代际 El Niño 现象有关。因此，无论在年际还是年代际时间尺度上，华北地区的夏季降水都与热带中、东太平洋的海温异常有着密切的联系。

5 我国夏季降水与海温的耦合关系

上述研究表明，我国长江中下游地区的夏季降水以及华北地区的夏季降水都与海温有着非常密切的关系。这里我们用 SVD 方法来分析我国夏季降水场和海表温度变化（SSTA）之间的耦合关系。把我国夏季降水场作为左场，同期的全球海表温度作为右场进行奇异值分解。通过奇异值分解，可以获得两者显著耦合的关键区及时空变化特征。

图 8 是海温场和我国夏季降水场 SVD 分解的第 1 模态时空分布，它解释了总方差的 26.2%，海温场与降水场时间系数之间的相关系数为 0.76，远远超过 99% 的显著性水平。从图 8a 的我国夏季

降水空间分布特征来看，在华北和东北南部出现了显著的负相关，并在其南、北分别有比较弱的正相关。与之对应的海温场的分布（见图 8b）在太平洋呈现出 El Niño 型，在热带中、东太平洋是很高的正相关区，而在北太平洋中部是比较高的负相关区，并且在南太平洋中部副热带地区也有显著的负相关，从而在北、南太平洋分别形成三明治式的海温分布。由此可见，我国华北及东北南部地区的夏季降水与热带中、东太平洋的海温异常确实存在着显著的耦合关系，而且它们随时间的变化也存在着非常好的一致性（见图 8c）。即在 1976 年前后我国夏季降水发生了一次明显的跃变，华北地区的降水明显减少，而热带中、东太平洋海水也从 1976 年前后明显增暖，这些都与已揭示的华北降水和海温年代际变化的关系是一致的^[7]，特别是图 8b 中 SVD 分析的太平洋海温的异常，与用 1977~2000 年和 1967~1976 年期间平均的夏季太平洋海温距平之差的分布非常类似（见文献 7 中图 7b）。然而，我们还要看到与华北降水的跃变相联系的海温异常并不局限于太平洋，图 8b 表明在整个印度洋和热带及南大西洋同样有显著的正相关，尤其是印度洋的正相关与热带中、东太平洋不相上下。因此，海温场和我国夏季降水场 SVD 分解的第 1 模态表明，华北地区的降水从 1976 年前后明显减少，它不但跟热带中、东太平洋海温的年代际变化有关，而且与印度洋和大西洋海温的年代际变化有密切的联系。

海温场和我国夏季降水场 SVD 分解的第 2 模态解释了总方差的 14.2%，其空间分布型时间系数之间的相关系数为 0.73，也达到了 99% 的显著

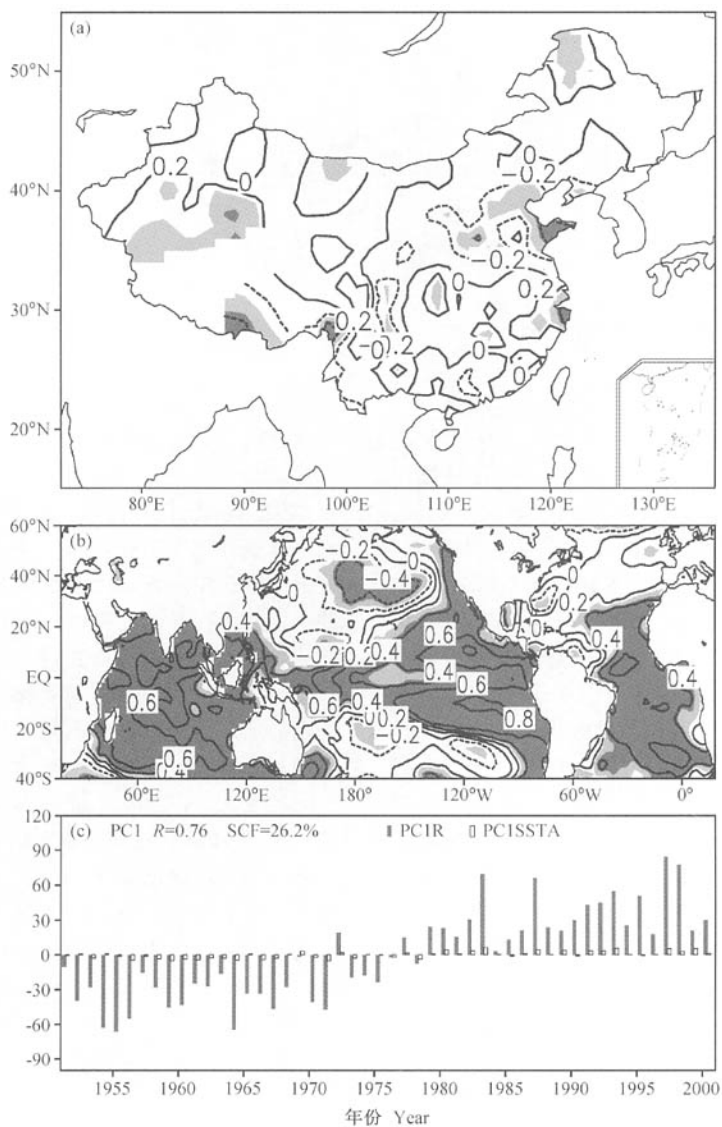


图8 海温异常和我国夏季降水 SVD 分解的第 1 模态时空分布。深和浅阴影区分别代表超过 99% 和 95% 信度检验的区域

Fig. 8 The spatial and temporal patterns of SVD1, (a) the spatial rainfall pattern in China. The contour interval is 0.2 mm, (b) the spatial SST pattern. The contour interval is 0.2°C, (c) the temporal coefficients of the SVD1 for the rainfall in China and the global SST. Heavy and light shadings in (a) and (b) indicate statistical significance at the 99% and 95% levels, respectively

性水平。在降水场中（见图 9a），有显著的正相关出现在长江中下游地区，其空间分布特征与中国夏季降水 EOF1 的空间分布非常相似。与之对应的海温场的分布（见图 9b）在热带西太平洋海区以及南海和黑潮区域也有很高的正相关区，这与

我国夏季降水 EOF1 与海温的相关（见图 4）是一致的；同时，在赤道中太平洋至东太平洋还有显著的负相关，表明热带西太平洋海区以及南海和黑潮区域与赤道中、东太平洋之间的海温差别可能对长江中下游地区的夏季降水有重要的影响。

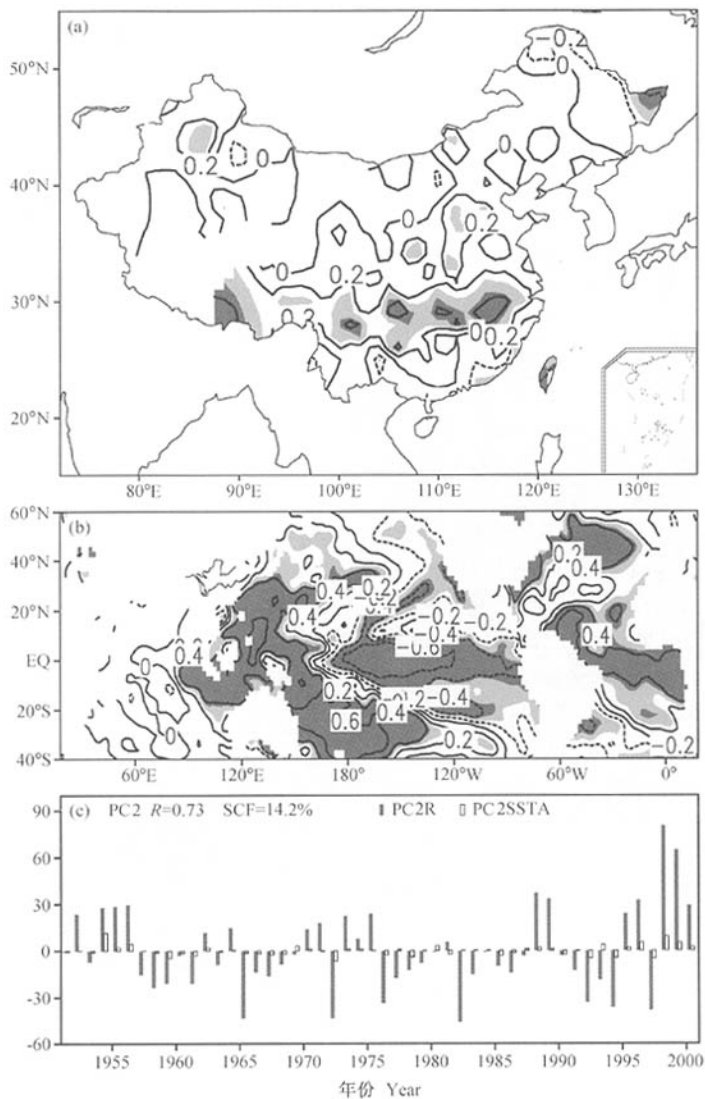


图9 海温异常和我国夏季降水 SVD 分解的第 2 模态时空分布。深和浅阴影区分别代表超过 99%和 95%信度检验的区域
Fig.9 Same as in Fig. 8, but for SVD2

当南海和黑潮区域以及相邻的热带西太平洋海区海温为正异常，而热带中、东太平洋海温为负异常时，长江中下游地区往往降水偏多；反之，降水则偏少。事实上，长江中下游地区的夏季降水与海温的耦合关系也并不局限于太平洋，在热带和北大西洋同样有比较高的正相关，表明该海区的海温异常可以和太平洋的海温异常结合在一起

对长江中下游地区的夏季降水产生影响。

6 结论

本文利用我国 160 个观测站 1951~2000 年的月降水资料分析了夏季降水的时空变化特征，并采用 NCEP/NCAR 再分析资料中的海温场讨论了

我国不同降雨型与海温的相关,在此基础上应用 SVD 方法研究了我国夏季降水分布异常与海温变化的耦合关系。EOF 分析的结果表明,我国夏季降水的年际变化最主要的雨型分布有 3 种:其一是长江中下游地区多(少)雨,而华南地区少(多)雨;其二是长江以南地区多(少)雨,而黄河、长江之间的地区少(多)雨;其三则是华北地区和东北南部降水的多或少。这些雨型的时间变化除了有明显的年际变化外,还存在一定的年代际变化。从比较长的时间尺度来看,华北地区的降水从 1965 年左右开始减少,特别是大约 1976 年后有显著的减少。我国夏季降水异常分布的时间变化和全球海温的相关分析表明,南海和黑潮区以及相邻的热带西太平洋海区的海温与长江中下游地区的降水关系最密切。当该海区海温异常偏暖时,长江中下游地区往往降水偏多;反之,降水则偏少。我国华北和东北南部地区的降水异常则跟热带中、东太平洋海温变化显著相关,当热带中、东太平洋海温偏暖(El Niño)时,华北和东北南部地区易发生干旱;当该海区海温偏冷(La Niña)时,华北和东北南部地区就容易发生洪涝。比较而言,黄河、长江之间和长江以南部分地区的降水异常与海温的关系不太显著,其成因还有待进一步研究。

我国夏季降水和全球海温异常的 SVD 分析,进一步揭示了两者之间的耦合关系,这种耦合关系最主要的时空变化特征表现在年代际变化的时间尺度上。我国华北和东北南部的夏季降水从 1976 年前后明显减少,与之显著关联的海温异常关键区包括太平洋、印度洋以及热带和南大西洋。其中热带中、东太平洋海水从 1976 年前后也明显增暖,这在以往的研究中已有所揭示,但我们还应注意中纬度太平洋海温的年代际变化。特别值得关注的是,在目前的已有研究中都没有涉及到印度洋以及热带和南大西洋海水的增暖。本文的研究揭示出华北的持续干旱与印度洋和大西洋海温的年代际变化显著相关,这非常需要在今后的研究中加以重视。我国夏季降水和海温的耦合关系还表现在长江中下游地区的降水异常,与之相联系的海温异常关键区在太平洋和大西洋,而印度洋的海温与我国长江中下游降水并没有显著的相关。当南海和黑潮区域以及相邻的热带西太平

洋海区海温为正异常,而热带中、东太平洋海温为负异常,并且热带和北大西洋海温也异常暖时,长江中下游地区往往偏涝;反之,该地区则偏旱。

参考文献 (References)

- [1] 黄荣辉,徐予红,周连童. 我国夏季降水的年代际变化及华北干旱化趋势. 高原气象, 1999, **18** (4): 465~475
Huang Ronghui, Xu Yuhong, Zhou Liantong. The inter-decadal variation of summer precipitations in China and the drought trend in Northern China. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 1999, **18** (4): 465~475
- [2] 黄荣辉,陈际龙,周连童,等. 关于中国重大气候灾害与东亚气候系统之间关系的研究. 大气科学, 2003, **27** (4): 770~787
Huang Ronghui, Chen Jilong, Zhou Liantong, et al. Studies on the relationship between the severe climatic disasters in China and the East Asia climate system. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2003, **27** (4): 770~787
- [3] 竺可桢. 东南季风与中国之雨量. 地理学报, 1934, **1**: 1~27
Zhu Kezhen. The enigma of southeast monsoon in China. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 1934, **1**: 1~27
- [4] 黄荣辉,陈文. 关于亚洲季风与 ENSO 循环相互作用研究最近的进展. 气候与环境研究, 2002, **7** (2): 146~159
Huang Ronghui, Chen Wen. Recent progresses in the research on the interaction between Asian monsoon and ENSO cycle. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2002, **7** (2): 146~159
- [5] Huang Ronghui, Sun Fengying. Impact of the tropical western Pacific on the East Asian summer monsoon. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1992, **70** (1B): 243~256
- [6] 倪东鸿,孙照渤,陈海山,等. 夏季黑潮区域 SSTA 及其与中国夏季降水的联系. 南京气象学院学报, 2004, **27** (3): 310~316
Ni Donghong, Sun Zhaobo, Chen Haishan, et al. Spatial/Temporal features of summer SSTA in the Kuroshio current region and its relation to summer precipitation in China. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 2004, **27** (3): 310~316
- [7] 周连童,黄荣辉. 关于我国夏季气候年代际变化特征及其可能成因的研究. 气候与环境研究, 2003, **8**: 274~290
Zhou Liantong, Huang Ronghui. Research on the characteristics of interdecadal variability of summer climate in China and its possible cause. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2003, **8**: 274~290
- [8] 魏风英. 全球海表温度变化与中国夏季降水异常分布. 应

- 用气象学报, 1998, **9** (增刊): 100~107
- Wei Fengying. Global sea surface temperature and summer precipitation anomaly distribution over China. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 1998, **9** (Suppl.): 100~107
- [9] 黄嘉佑. 气象统计分析与预报方法. 北京: 气象出版社, 2004. 298pp
- Huang Jiayou. *Statistical Analysis and Forecasting Method in Meteorology* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2004. 298pp
- [10] North G R, Bell T L, Cahalan R F, et al. Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions. *Mon. Wea. Rev.*, 1982, **110**: 699~706
- [11] 罗绍华, 金祖辉, 陈烈庭. 印度洋和南海海温与长江中下游夏季降水的相关分析. 大气科学, 1985, **9** (3): 409~418
- Luo Shaohua, Jin Zhuhui, Chen Lieting. Analysis of the correlation between the SST in Indian Ocean and South China Sea and the summer precipitation in the middle and lower reaches of Yangtze River. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 1985, **9** (3): 409~418
- [12] Chen Wen, Graf H F, Huang Ronghui. The interannual variability of East Asian winter monsoon and its relation to the summer monsoon. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2000, **17** (1): 48~60