

不同区域海温异常对中国夏季旱涝影响的 诊断研究和预测试验

王 蕾¹ 张人禾²

1 国家气象中心, 北京 100081

2 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

摘 要 利用季降水异常的典型集合相关预测模式, 研究了前期和同期不同季节全球海表温度距平场与中国夏季旱涝的遥相关分布特征以及这种相关型随季节的变化, 揭示了全球海温的异常变化在中国夏季旱涝中的信号特征。研究表明, 全球不同区域海温对我国夏季降水的影响存在着明显的季节差异。全球特定的海温分布可以作为我国夏季旱涝预报的信号因子。选取不同区域及不同时段的海温场作为因子场分别对 1998、1999 年这两个典型年份的我国夏季降水进行了诊断研究和预测试验, 并通过不同区域海温的影响权重做集成预测。试验结果表明: 不同区域海温的集成预测不仅可以有效地提高预测的准确性, 而且可以揭示不同时段不同区域海温的异常变化在夏季旱涝中的强信号现象。

关键词 典型集合相关预测模式 海表温度异常 中国夏季旱涝 遥相关 最优集成预测

文章编号 1006-9895 (2006) 06-1147-13

中图分类号 P461

文献标识码 A

Diagnostic Researches and Forecasting Experiments of the Various Regional Sea Surface Temperature Anomaly on Summer Precipitation in China

WANG Lei¹ and ZHANG Ren-He²

1 *National Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081*

2 *State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081*

Abstract Based on a canonical ensemble correlation prediction (CECP) model for seasonal precipitation anomaly, diagnostic analyses and forecast experiments are conducted on JJA (June, July and August) precipitation in China, using various seasons and different regional sea surface temperature anomalies (SSTA) as predictor fields. The results show that the CECP scheme with an area-factor is a useful method for both researches and predictions, which not only can make out some typical spacial patterns in the precipitation and sea surface temperature (SST) fields, but also has high forecast skill on summer precipitation in China. The teleconnection characteristics between global SSTA in various seasons and summer (JJA) precipitation in China are analyzed. The analyses show that the impacts of global SSTA on summer precipitation in China have significant seasonal changes. Particularly, SST anomaly distributions in the southern Indian Ocean, the equatorial eastern Pacific Ocean and the North Atlantic Ocean have good correlation with summer precipitation in China. The special global SSTA distribution pattern might be used as a predictor of JJA precipitation in China. In addition, selecting different regional and various seasonal SSTA as predictor fields, diagnostic analyses and forecast experiments are conducted on JJA precipitation in 1998 and 1999 respectively, and then their individual impacts on JJA precipitation in China are weighted to combine optimally the forecasting

results. The series tests show that ensemble prediction of various regional SSTA on summer precipitation in China can not only greatly increase predictability of summer precipitation in China, but also uncover the notable signals of SSTA in different regions and various seasons associated with the regional drought/flood of summer in China. Thus, the ensemble forecast method can reveal the contributions of interannual changes of SST in different areas to summer precipitation in China, optimal combination prediction can efficiently improve forecasting skill.

Key words canonical ensemble correlation prediction (CECP) model, sea surface temperature anomaly (SSTA), summer drought/flood in China, teleconnection, ensemble prediction

1 引言

对于长期天气过程,海洋的作用是一个非常重要的因素。过去有关海温异常对中国夏季降水的影响,国内已有不少研究。许多研究^[1~5]表明,赤道东太平洋海温的异常变化(如 El Niño 或 La Niña 现象)以及西太平洋暖池与中国夏季降水有一定的对应关系,它主要通过影响具有行星尺度的高低纬度亚洲季风系统的相互作用来影响中国夏季雨带及降水的变化。近些年来,国内对印度洋海温的异常对我国夏季雨带的影响也做过资料分析和数值模拟的研究工作^[6~8],然而,这些研究都着眼于个别海区或洋流的作用,缺乏对海温影响的总体考虑和定量估测。美国 NASA Goddard 空间飞行中心最新研制的用于季降水异常预测的“典型集合相关预测模型”^[9],通过对不同海域的海表温度各自对区域气候的影响权重综合作出预测,大大提高了各季降水的可预测性。我们曾基于典型集合相关预测方案,研究了全球春季海温异常变化对中国夏季旱涝的影响,并进行了预测试验^[10],发现此模式对中国夏季旱涝具有较强的预测能力。本文将研究全球前期至同期不同季节海温与中国夏季降水的遥相关分布特征,全面分析海温与中国夏季降水的关系。特别是通过研究不同海区海温对中国夏季降水作用的基础上,进行海温的分区预测集成试验,来进一步考察此集合预测模式的预测能力,寻找影响中国夏季降水的强信号因子。

2 资料和预处理

本文利用美国气候预测中心 Smith 等^[11]重建的 1951 年 1 月~2000 年 12 月 $2^\circ \times 2^\circ$ 的月平均海面温度 (SST) 资料 ($45^\circ\text{S} \sim 69^\circ\text{N}$) 作为因子场。预测量场资料是基于最新版的 1951 年 1 月~2000 年 12 月全球陆地月降水资料集 (PREC/L)^[12],空间分

辨率是 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 。模式输入时,分别将月平均海温和降水资料进行了季节滑动平均的处理。为消除小尺度噪音影响,模式中将海温资料进一步平滑成了 6° (经度) $\times 4^\circ$ (纬度) 的资料集,海温距平场共有 1074 个格点 (60×28 经纬距),其中格点资料是剔除缺测资料后得到的;在模式移植中构造了中国地形文件,夏季 (6~8 月) 降水距平场中有 157 个格点 (28×17 经纬距),平均值用的是 1961~1990 年的气候值,在模式进行 EOF 分解时,进一步作了标准化处理。

3 集合典型相关预测模式算法的改进和计算步骤

最优集合典型相关预测模式是 Barnett 和 Preisendorfer^[13] 典型相关方案 (简称 CCA) 的一种改进,每个预测都是基于对两个连续场进行 EOF 分解的典型相关分析,而且该方法引进了集成预测的概念,集成预测的最优权重主要取决于每个预测场的均方误差,均方误差愈小,权重愈大。为了减少较高纬度的资料带来的噪音,程序中还考虑了面积因子。因此,新的 CCA 模式的改进包括以下几点: (1) 计算中考虑了面积因子; (2) 预测产品的检验和评价; (3) 通过均方误差场计算预测误差,可进行定量的预测质量评估。 (4) 多种预测的最优集成。预测的具体步骤如下。

3.1 典型场的分析及预测

(1) 对因子场和预测场分别进行 EOF 分解,计算 EOF 的系数 $\mathbf{X}_n(t)$ 和 $\mathbf{Y}_m(t)$ 作为 CCA 的输入场。其中

$$\mathbf{X}_n(t) = \sum_{n=1}^{J_X} \frac{1}{\sqrt{\lambda_n^x}} \phi_n(x_i) \mathbf{X}(x_i, t) A_i, \quad A_i = \cos \phi_i \Delta \theta \Delta \phi, \quad (1)$$

式中, $\phi_n(x_i)$ 是因子场的第 n 个特征向量, λ_n^x 是第 n 个特征值, $\mathbf{X}(x_i, t)$ 是因子场, J_X 是因子场中格

点的总数。 A_i 为第 i 个网格点所代表的经纬度范围的面积, ϕ_i 是第 i 个网格点的纬度, $\Delta\theta$ 和 $\Delta\phi$ 分别是此面积范围的经度与纬度间隔。对预测量场的系数 $\mathbf{Y}_m(t)$ 可用同样的方法求得。在本文的试验中选取的前特征向量的个数: 因子场为 p , 预测场为 q , 实际选取为 $p=q=15$, $k=\min(p, q)$ 。

(2) 计算谱空间的交叉协方差矩阵

$$\tilde{\Sigma}_{XY} \approx \frac{1}{K} \sum_{t=1}^K \mathbf{X}_n(t) \mathbf{Y}_m(t), \quad (2)$$

$$\tilde{\Sigma}'_{XY} = \tilde{\Sigma}_{YX}, \quad (3)$$

其中, K 为资料的长度。

(3) 对两场分别进行 CCA 分析, 并保证特征值是非负的, 且两矢量是相互正交的。

(4) 考虑面积因子后, 分别计算两场的第 k 个空间模态。

$$u_k(x_i) = \sum_{n=1}^p u_{n,k} e_n^X(x_i) / \sqrt{\lambda_n^X}, \quad (4)$$

$$v_k(y_j) = \sum_{m=1}^q v_{m,k} e_m^Y(y_j) / \sqrt{\lambda_m^Y}, \quad (5)$$

其中,

$$\begin{cases} e_n^X(i) = \phi_n(x_i) \sqrt{A_i}, \\ e_m^Y(j) = \phi_m(y_j) \sqrt{B_j}, \end{cases} \quad (6)$$

这里, $u_{n,k}$ 和 $v_{m,k}$ 分别为因子场和预测场中第 k 个模态的权重; $\phi_m(y_j)$ 为预测场第 m 个特征向量。

(5) 分别计算两场第 k 个典型变量 $\mathbf{U}_k(t)$ 、 $\mathbf{V}_k(t)$:

$$\mathbf{U}_k(t) = \int_{\Omega_X} \mathbf{X}(x_i, t) u_k(x_i) d\Omega_X, \quad (7)$$

$$\mathbf{V}_k(t) = \int_{\Omega_Y} \mathbf{Y}(y_j, t) v_k(y_j) d\Omega_Y. \quad (8)$$

其中, Ω_X 和 Ω_Y 分别为因子场和预测场的面积。

(6) 计算两场第 k 个典型相关系数 ρ_k , 使得

$$\rho_k = \max R(\mathbf{U}_k, \mathbf{V}_k). \quad (9)$$

(7) 计算 t' 时刻预测量场

$$\hat{\mathbf{Y}}(y_i, t') = \sum_{n=1}^p \left(\sum_{k=1}^p v_{n,k} \rho_k \mathbf{U}_k(t) \right) \sqrt{\lambda_n^Y} \phi_n(y_i). \quad (10)$$

3.2 预测技巧的评估

模式预测技巧的估计采用两种检验方法。第一种被称为“型相关”(Pattern Correlation) 的评估方法。表达式为

$$r = \frac{\sum_i R_i \hat{R}_i}{\sqrt{\sum_i R_i^2} \sqrt{\sum_i \hat{R}_i^2}}, \quad (11)$$

其中, R_i 为第 i 年预测场的观测距平值, $\hat{R}_i$ 为第 i 年的预测距平值。

具体做法是: 每次模式预测方程的建立, 是由所有可用资料中去掉第 k 年的资料, 然后用保留的第 k 年的因子资料作为因子场观测值进行预测, 而保留的第 k 年的预测对象资料作为实况。重复以上过程, 使 k 取遍所有可能的取值, 可以得到预测值序列和实况序列。通过计算两个序列的相关系数(称为预测技巧)来衡量预测的效果。因为保留的资料没有参与任何与模式方程建立有关的过程, 所以这些资料可以认为是独立的。按照这种做法, 预测检验的结果接近实际预测情况, 而非事后预测。第二种被称为“Heidke Score”的评估技巧(简称 HS 评分), 采用两级评估, 表达式为

$$H_s = \frac{H-E}{T-E} \times 100, \quad (12)$$

其中, T 为预测的总数, E 是正确随机预测的期望值, H 是正确预测的实际数。当预测距平值和观测距平值同号时, 认为预测是正确的。如果每种预测都是正确的, 那么 H_s 为 100, 如果全部错报, 则 H_s 为 -100。

3.3 预测的最优集成

本方法是通过计算均方误差的大小来进行最优集成预测的权重计算的。集合预测的误差计算公式为: $E^2(y) = \sum_n E_n^2 \phi_n^2(y)$, 第 n 个模态的集合预测误差公式为

$$E_n^2 = \left(\sum_{h=1}^H \frac{1}{(\epsilon_n^{(h)})^2} \right)^{-1}.$$

以上的数学原理和方法可详看文献[8], 这里不再赘述。

4 全球海温与中国夏季降水的遥相关分布特征

本文用 1951~1997 年秋季(9~11 月)和 1951~1998 年冬季(12 月至翌年 2 月)、春季(3~5 月)和夏季(6~8 月)四季的全球 1074 个格点分别构成前期秋、冬、春季及当年夏季的季节滑动平均的海温场作为因子场, 对四季海温场与中国夏季降水场分别做 EOF 和 CCA 分析。分别提取各季 SSTA 场与中国夏季降水距平场累计方差贡献占

85%以上的前几个主分量进行典型相关分析。各场累计方差贡献占 85%以上主分量的个数如表 1 所示,可以看到各要素场收敛速度较快,前 17 个主分量就提取了原场 85%以上的信息(前 9 个主分量提取超过原场 70%的信息)。前两对典型因子占较大方差,涵盖两场耦合的主要信号,第一、二对典型相关场的典型相关系数超过了 0.86,其中转换季节 3~5 月 SSTa 与中国夏季降水相关最好,由于文章篇幅的限制,本文仅对方差贡献最大的第一对典型遥相关场进行讨论。

图 1 为秋季(前一年 9~11 月)全球海温与中国夏季降水的第一对典型相关场,可以看出,赤道太平洋、印度洋及大西洋海温为一致的偏低(高),SSTA 相关最明显的区域分别位于西北太平洋、美国大陆南部附近的大西洋区及南印度洋区的海洋性大陆附近。印度洋海温表现为明显的东暖西冷的海温分布。对应中国夏季雨带大致呈南北经向分布,降水最明显区位于西南地区西部。当海温相反变化时,江淮流域、东北北部、新疆西部及华南降水偏多。秋季是夏季向冬季转换的过渡季节,在夏半

表 1 各要素场累计方差贡献占 85%的主分量个数
Table 1 The number of principal component that variance contributes 85%

	6~8 月降水 JJA rainfall	9~11 月 SSTa SON SSTa	12~2 月 SSTa DJF SSTa	3~5 月 SSTa MAM SSTa	6~8 月 SSTa JJA SSTa
主分量个数 The number of principal component	19	18	18	17	19

Note: JJA: Jun, Jul, Aug; SON: Sep, Oct, Nov; DJF: Dec, Jan, Feb; MAM: Mar, Apr, May.

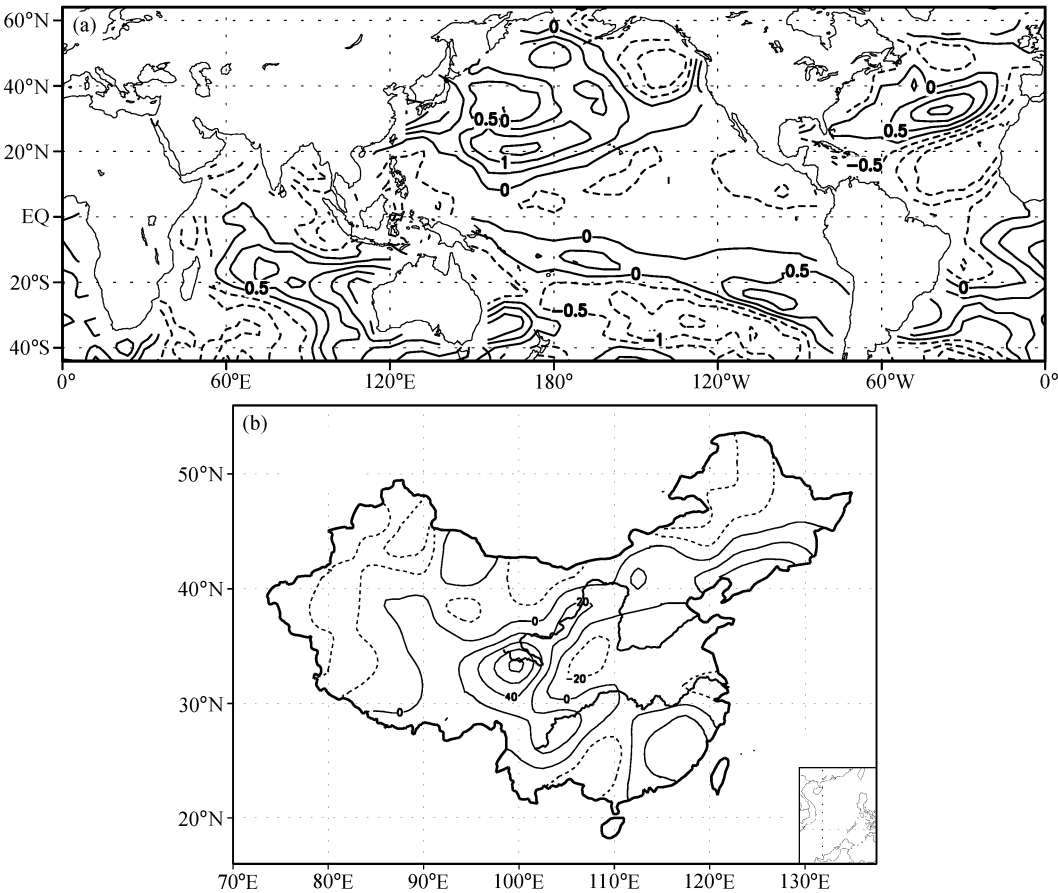


图 1 前一年秋季(9~11 月)海温(a)与中国夏季(6~8 月)降水(b)的第一对典型相关场
Fig. 1 The first couple of canonical correlation field between the previous SON SSTA (a) and JJA precipitation (b) in China

年，大陆比海洋暖，低层大气由海洋指向陆地，即盛行所谓的夏季风，随着秋季的到来，大气长波调整，冷空气活动频繁，大陆降温迅速，而海温的持续性使得海温相对较高，海陆两地的热力温差减小，夏季风减弱，冬季风渐渐明显。上述较明显区域海温的变化反应了秋季向冬季转换时海陆热力差异引起的局地海气耦合特征对于亚洲季风及中国夏季降水的影响。Saha^[14]发现印度洋海温东暖西冷的分布对季风气流的结构产生东西方向上的差异，有利于形成次一级的垂直环流和赤道西风。严邦良和张人禾^[15]研究指出赤道纬向西风异常激发的开尔文波对暖水东移起着重要的作用，这可能是冬季赤道东太平洋海温出现了异常增暖的 El Niño 现象的原因(图 2a)。

图 2 为冬季(前一年 12 月至当年 2 月)全球海温与中国夏季降水的第一对典型相关场。冬季海温和夏季降水的第一典型因子场与秋季相比有明显变

化。西北太平洋海温正负相关区东移，印度洋海温由东暖西冷的海温梯度变为东冷西暖的异常分布，赤道中东太平洋海温为正相关，表现出明显的 El Niño 特征，大西洋 30°N 正相关区变为负相关区。对应中国夏季降水基本为纬向分布，江淮流域-华中-西南地区北部至青藏高原、东北北部及华南沿海降水偏多，其他大部分地区降水偏少，当上述海温相反变化时，对应中国夏季降水也出现相反分布。冬季风盛行期间，海洋比陆地暖得多，印度洋海温由东暖西冷的温度梯度转为东冷西暖的分布，不难看出海陆热力差异可能对印度洋海温偶极子振荡有一定的影响。

图 3 给出春季(当年 3~5 月)第一对典型相关场，与冬季相比，太平洋和印度洋海温均为纬向分布，赤道太平洋海温虽仍为正距平，但相关最明显区域向南偏移，赤道东太平洋附近出现了一个狭长的负相关区。赤道印度洋海温表现为东西一致的单

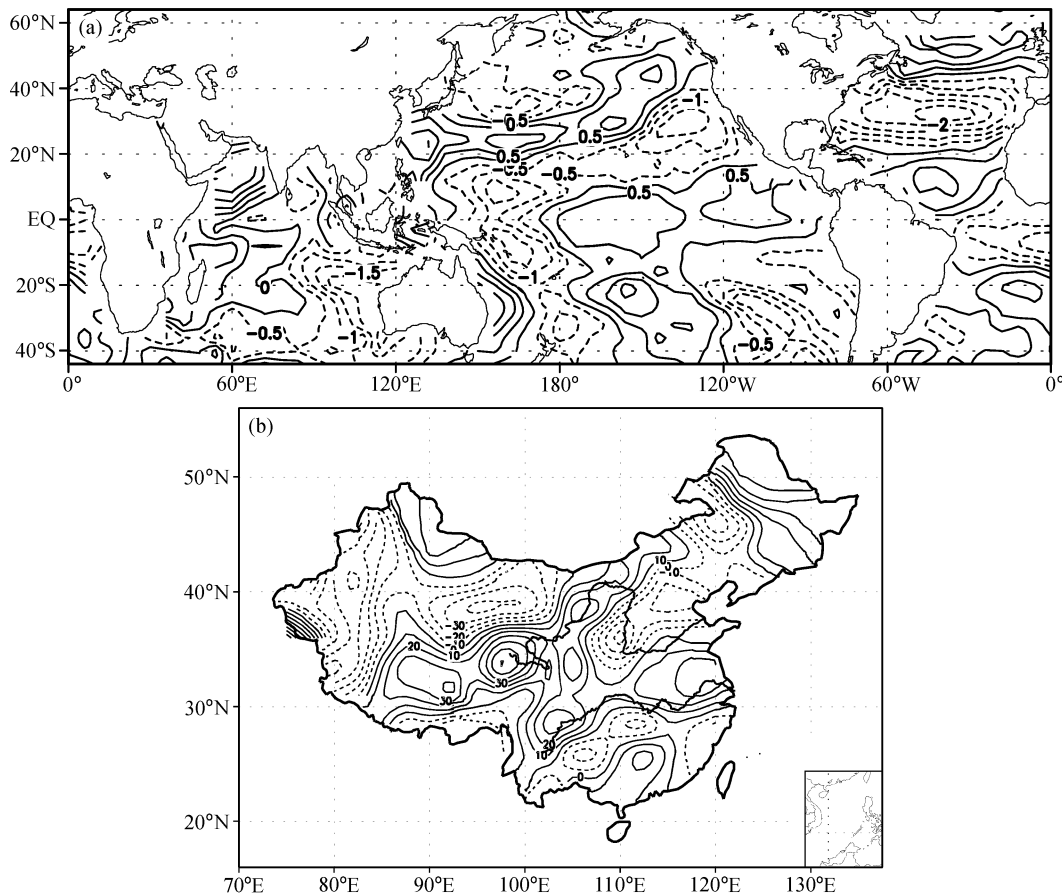


图 2 前期全球冬季(12 月~2 月)海温(a)与中国夏季(6~8 月)降水(b)的第一对典型相关场
Fig. 2 The first couple of canonical correlation field between the SSTA over the globe (a) in the previous winter (DJF) and summer (JJA) precipitation (b) in China

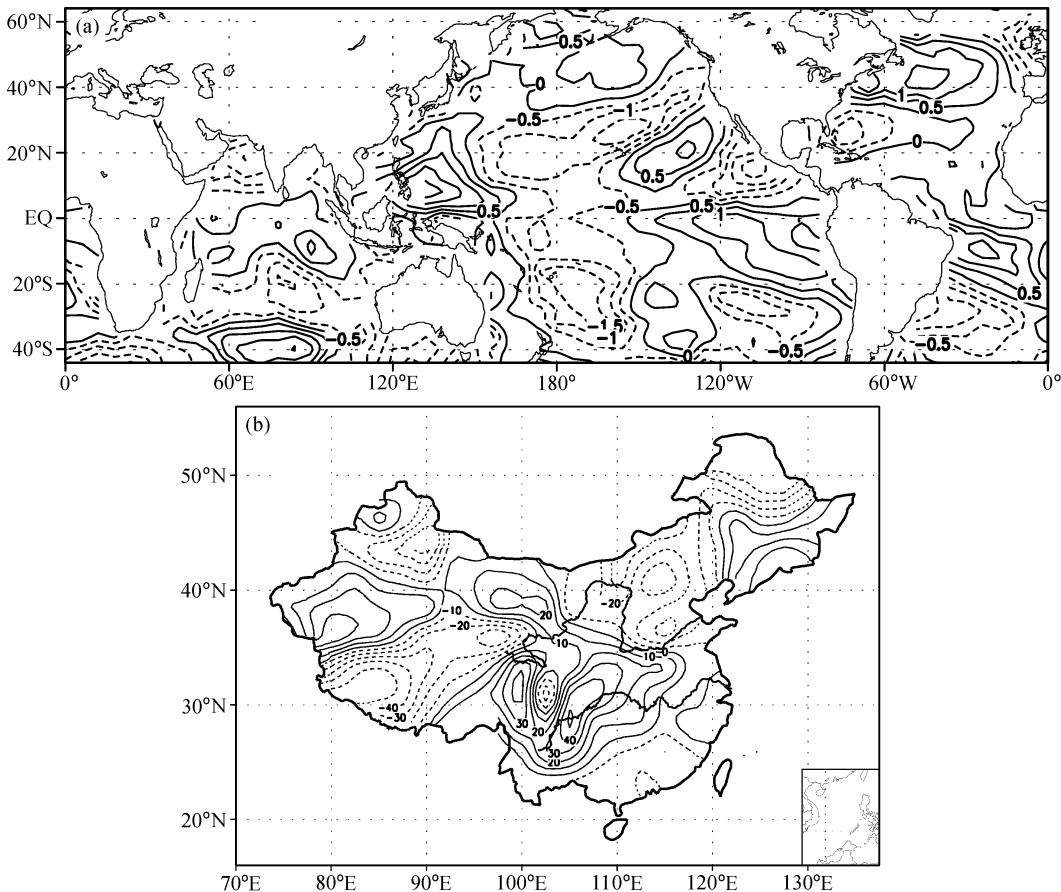


图3 全球春季(3~5月)海温(a)与中国夏季(6~8月)降水(b)的第一对典型相关场
Fig. 3 The first couple of canonical correlation field between MAM SSTA (a) over the globe and JJA precipitation (b) in China

表2 典型遥相关场前两个典型相关系数(C₁、C₂)

Table 2 The first two canonical correlation coefficients (C₁, C₂) for the canonical correlation field

	C ₁	C ₂
Sep - Nov	0.94367	0.90118
Dec - Feb	0.93778	0.91037
Mar - May	0.94996	0.86796
Jun - Aug	0.90719	0.87141

极型。大西洋海温 SSTA 最明显区域位于美国大陆东岸约 40°N 附近。对应中国夏季降水基本为纬向分布,且相关最明显的区域位于西南地区西部及华中至江淮流域。四川成都附近有一个小的负相关区。华北大部及华南降水呈负相关。春季是冬季风向夏季风转换的关键季节,海温异常变化对初夏季风的影响尤为重要,从 3 月份开始,印度洋海温的变化已基本由冬季风转为夏季风。从表 2 典型相关场的相关系数可看出春季海温变化与夏季降水最明显。

图 4 为夏季(6~8月)第一对典型相关场,印度洋和太平洋海温仍为南北纬向分布,不同的是,赤道印度洋和中东太平洋变化一致均由正相关变为负相关,大西洋海温变化较小,北太平洋和黑潮西风区正相关区变为负相关区。对应夏季降水在 108°E 以西为南北经向雨带,108°E 以东雨带为纬向变化。降水响应最明显的区域位于江淮华东沿海、西北地区东部及华南地区。当海温呈相反分布时,上述响应最明显区域的降水分布发生相反变化。从夏季同期的第一对典型相关场的分布,可以看到其存在的天气学意义也很明显。对于印度洋海温(如图 4a),夏季风期间阿拉伯海和孟加拉湾海温与赤道印度洋海温变化相反,当阿拉伯海和孟加拉湾海温上升,赤道印度洋西部低层的辐散气流加强,相应加强了反 Walker 环流的下沉气流,沿赤道的西风气流加强(西南季风加强),因而使得雨带向北向东伸展,造成青藏高原、华东沿海及华北

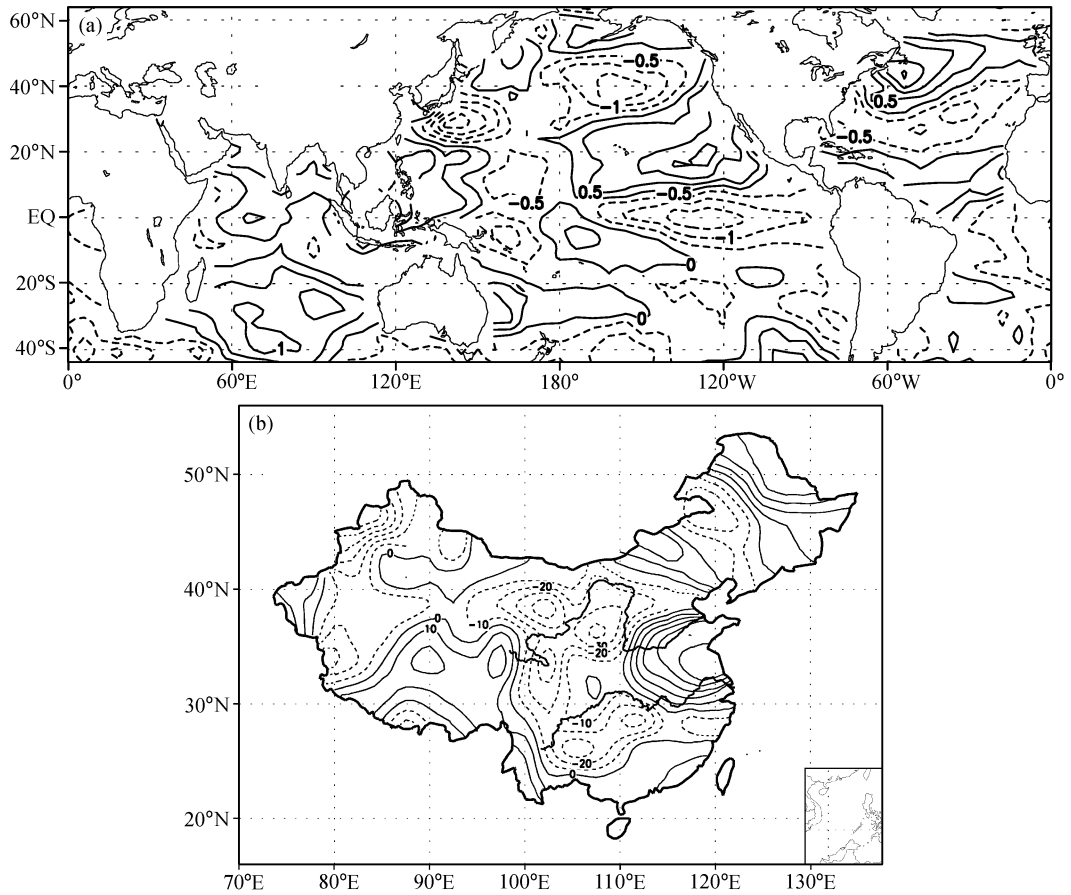


图 4 同期全球夏季(6~8月)海温(a)与中国夏季降水(b)的第一对典型相关场

Fig. 4 The first couple of canonical correlation field between JJA SSTA (a) over the globe and JJA precipitation (b) in China

大部降水偏多,这与文献[16]的分析是一致的。另外,对北太平洋和黑潮西风区,沿海海温与东部海温变化相反,沿海海温上升,东部海温降低,使得偏东气流加强,造成东北北部和华南沿海多雨。因此,亚洲季风的异常变化是控制中国气候异常的主要因素之一,该典型相关场的分布特征进一步表明了全球海温的异常变化对中国夏季降水影响的重要性。

总之,从秋、冬、春、夏季全球海温与中国夏季降水的第一对典型相关场的空间结构可明显看出,与中国降水相关的印度洋、太平洋和大西洋海温存在着明显的季节变化,这种季节变化对中国夏季纬向和经向雨带有着一一定的影响。印度洋海温存在着明显的偶极子现象,一般在秋、冬季主要表现为东西相反的偶极振荡,春、夏季印度洋海温主要表现为东西一致的南北振荡。Webster等^[17]和 Saji等^[18]根据海表温度距平分析的结果,指出印度洋

海温存在偶极子现象,并指出印度洋偶极子在季节到年际尺度的气候变率中,印度洋起到了非常积极而独立的作用,并阐述了偶极子对周边地区气候的影响;Behera等^[19]利用2.5层海洋模式研究热带印度洋海表温度的年际变化,揭示了热带印度洋西部和东南部海表温度具有很大的季节和年际变化。谭言科和张人禾^[20]利用长期观测资料分析了印度洋海温距平的年际变化及其海气耦合特征,结果表明热带印度洋海温距平的变化存在显著的距平符号东西一致的单极型和距平符号东西相反的偶极型,其出现的概率分别为67%和33%。李崇银等^[21]对近百年的观测资料的分析表明,赤道印度洋海温存在着偶极子型振荡的变化特征,它在9~11月最强,而在1~4月最弱。因此,赤道印度洋在春、夏季主要表现为南北振荡。陈烈庭^[6]的分析研究指出,在El Niño期间,印度洋东暖西冷的海温梯度是减弱的,而在反El Niño时期这种东暖西冷的温

度梯度是加强的。张人禾^[22~24]和黄荣辉等^[25]的研究表明,印度季风区的水汽输送和东亚季风区的水汽输送与中国的降水有密切联系,并指出了印度洋上的对流加热异常对水汽输送和中国降水有重要影响。这些研究结论与全球海温和中国夏季降水的遥相关特征是一致的。太平洋海温主要表现为南北纬向振荡,赤道中东太平洋海温的异常偏暖(或偏冷)对江淮流域降水有着明显的正(负)相关。另外,美国大陆附近的大西洋海温也在不同季节以某种配置与中国降水有关。不同季节 SSTA 分布特征表明,印度洋、太平洋和大西洋海温的异常变化通过海气耦合作用可能影响中国夏季雨带的移动。本文的研究进一步表明了亚洲季风和全球海温的异常变化对中国夏季降水的重要影响,其所包含的天气学含义也是清晰的。

5 全球海温的分区预测试验

虽然海温变化具有全球结构,但各个海区的变化既相互联系又各有特点。各个海区的海温在不同时段对中国夏季旱涝的影响也是不同的^[26]。究竟哪个区域的海温在不同季节起着主要的作用,这一点很难从海温的空间分布型看出。下面将利用“典型集合相关预测模型”的预测功能,选择 1998 及 1999 这两个典型年份,通过对全球海温的分区对这两年进行预测试验,以此来研究不同海域在我国夏季降水异常中的作用,并根据不同海区的影响权

重综合作出预测,检验此集合预报模式的预测能力。

5.1 全球海温的分区

对 1951~1998 年全球春季海温(45°S~69°N, 0°~360°E)做自然正交函数分解,由于前 16 个主分量提取了原场 83% 以上的信息(前 9 个主分量提取超过原场 70% 的信息)。第一个主分量其方差贡献最大为 22%,第二个主分量其方差贡献为 9.7%。因此,第一主分量在较大程度上反映原场的信息。由于主分量变化仅与空间有关,而与时间无关,其他季节的 EOF 分解,其全球海温的分布型大致相同。根据第一个主分量的大值中心,在全球海温场中选择如下六个区域:(5°S~3°N, 210°E~270°E)赤道东太平洋区(1 区);(27°N~39°N, 192°E~228°E)北太平洋区(2 区);(23°N~31°N, 132°E~162°E)黑潮西风区(3 区);(21°S~13°S, 54°E~108°E)南印度洋区(4 区);(31°N~39°N, 282°E~330°E)北大西洋区(5 区);(30°S~21°S, 204°E~264°E)南太平洋区(6 区)。具体如图 5 所示。

5.2 不同海区海温对中国夏季降水的预测试验

下面,分别用六个海区的春季海温与中国夏季降水场做 EOF 和典型相关预测。预测中一改传统用均方误差的大小做集合权重的做法,改用以各个海区预测时,正的型相关系数的大小来做权重集成。具体做法是:对六个海区分别作预测时型相关系数为正的预测进行集成,这种集成是一个插值的

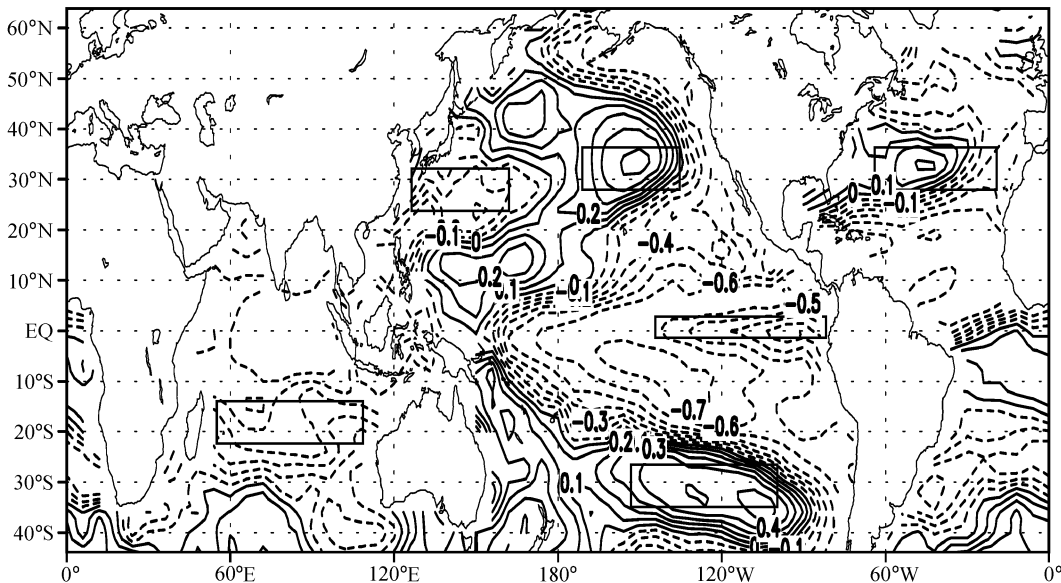


图 5 全球春季海温的分区图

Fig. 5 The division of the global MAM SSTA field

过程，由于北大西洋区、北太平洋区及黑潮-西风漂流区型相关系数为负，所以不参与集成。图 6a~c 分别是赤道东太平洋、南印度洋和南太平洋春季海温对 1998 年夏季降水的预测，赤道东太平洋型相关和 HS 评分分别为 0.13 和 0.02，南印度洋型相关和 HS 评分分别为 0.27 和 0.27，南太平洋型相关和 HS 评分分别为 0.11 和 0.13。这说明南印度洋春季海温在 1998 年中国夏季旱涝预测中起着主要的作用，并且从南印度洋区（图 6b）、Niño 3

区（图 6a）可看出，春季海温主要对东北地区 and 江淮流域及华南大部预报较好。集成预测（图 6f）型相关和 HS 评分分别为 0.28 和 0.27，与图 6e 的观测场相比，集成预测比各个分区预测更接近观测场，预测评分也有所提高。将图 6f、d 与图 6e 相比，不难看出集成后的预测结果虽与全球春季海温所做的预测（图 6d）（型相关系数为 0.19，HS 评分为 0.13）在中国东部的江淮流域-华南沿海、东北地区以及新疆西部地区的雨带预测基本与实况一

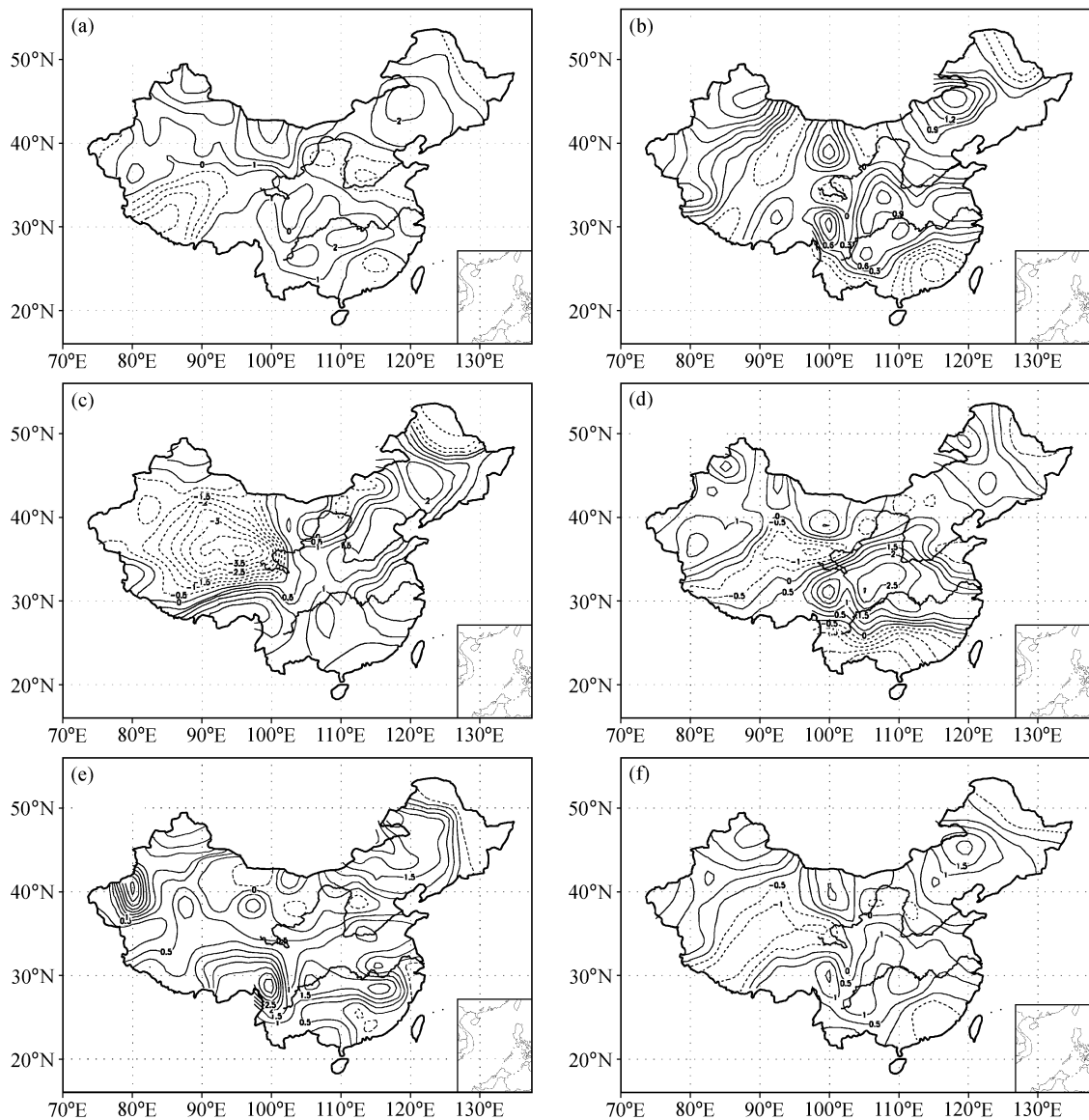


图 6 不同海区春季（3~5 月）海温对 1998 年中国夏季（6~8 月）降水的集成预测图：（a）赤道东太平洋；（b）南印度洋；（c）南太平洋；（d）1998 年的预测场；（e）1998 年的观测场；（f）集成预测场

Fig. 6 The ensemble forecasting tests of MAM SSTA in different oceanic regions on 1998 JJA precipitation in China: (a) The equatorial eastern Pacific; (b) the southern Indian Ocean; (c) the southern Pacific; (d, e) the forecasted (d) and observed (e) JJA precipitation in China in 1998; (f) the ensemble forecast field

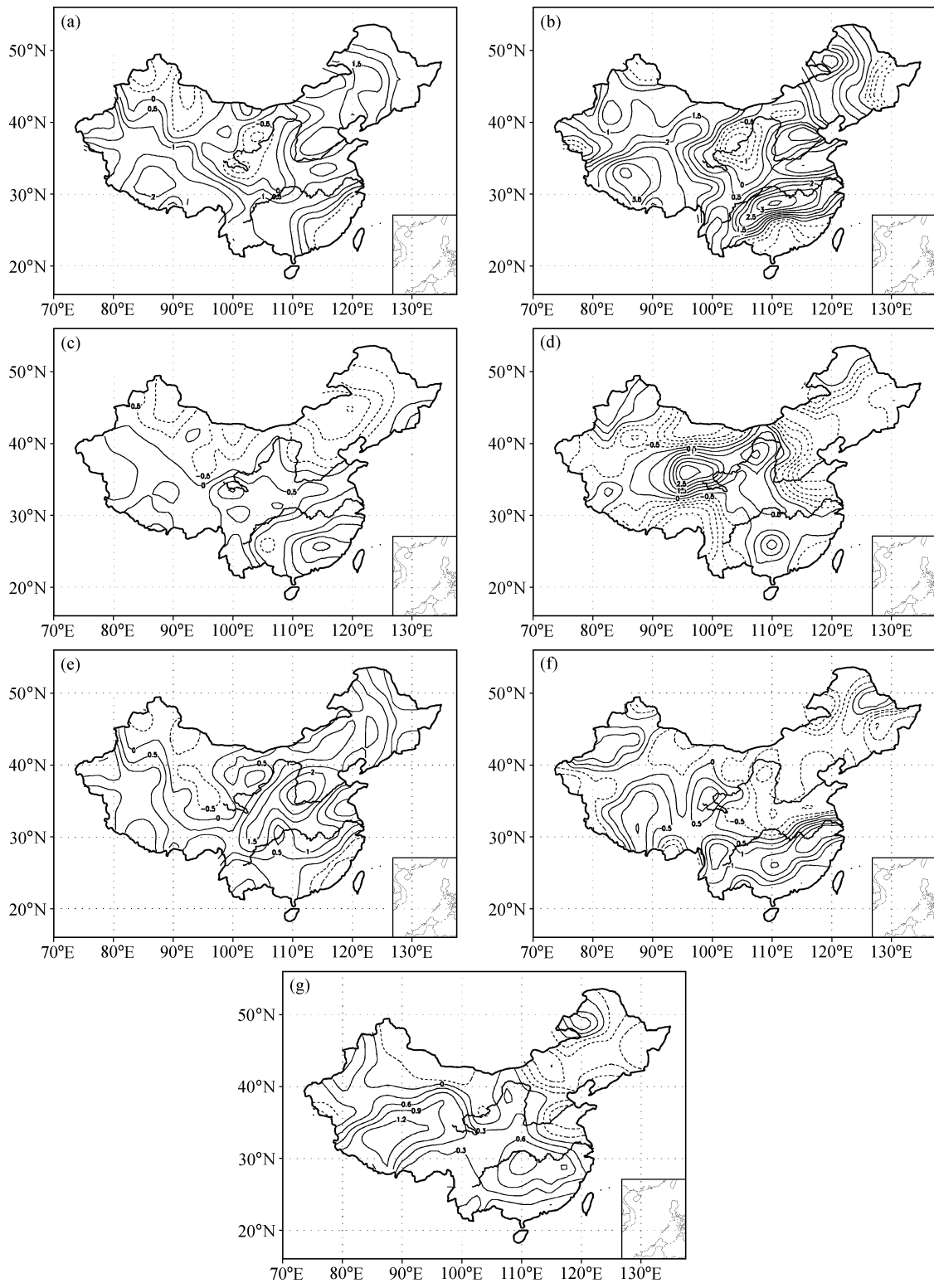


图 7 不同海区春季 (3~5 月) 海温对 1999 年中国夏季 (6~8 月) 降水的集成预测试验: (a) 赤道东太平洋; (b) 北太平洋; (c) 南印度洋; (d) 北大西洋; (e) 1999 年的预测场; (f) 1999 年的观测场; (g) 集成预测场
Fig. 7 The ensemble forecasting tests of MAM SST in different oceanic regions on 1999 JJA precipitation in China: (a) The equatorial eastern Pacific; (b) the North Pacific; (c) the southern Indian Ocean; (d) the North Atlantic; (e, f) the forecasted (e) and observed (f) JJA precipitation in China in 1999; (g) the ensemble forecast field

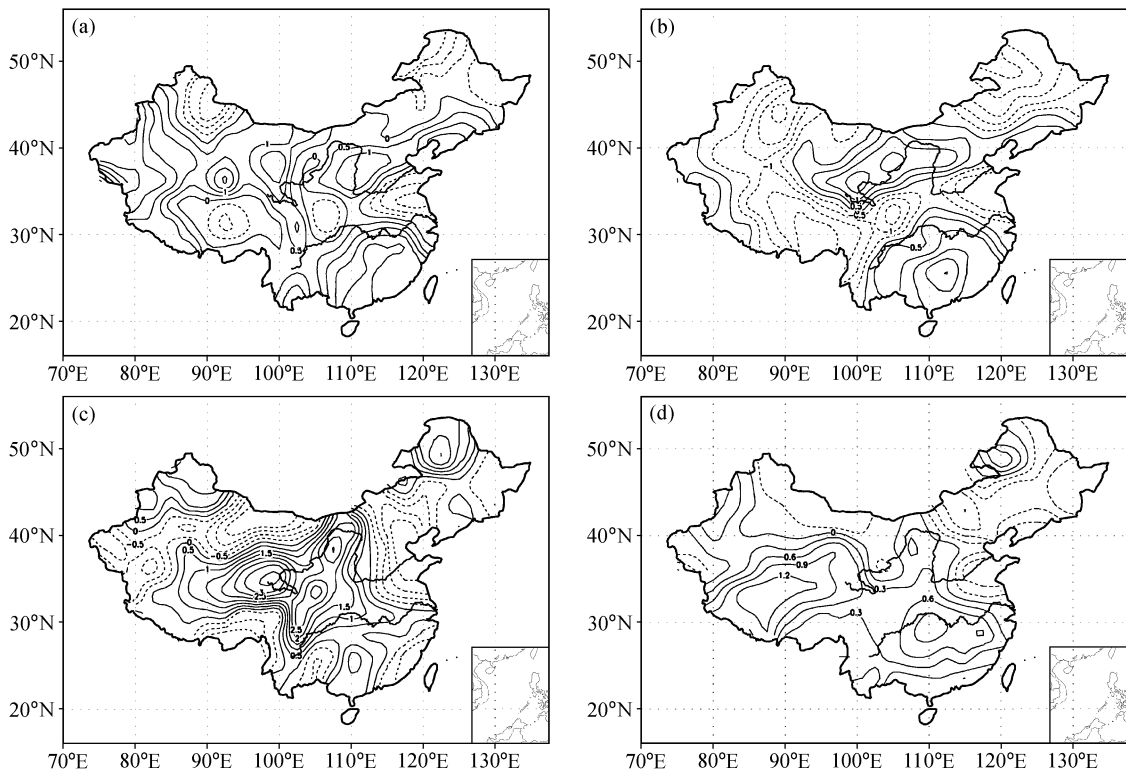


图 8 冬季 (DJF) 海温对 1999 年中国夏季 (6~8 月) 降水的集成预测试验: (a) 赤道东太平洋; (b) 南印度洋; (c) 北大西洋; (d) 集成预测场

Fig. 8 The ensemble forecasting tests of DJF SSTa on JJA precipitation in China in 1999; (a) The equatorial eastern Pacific; (b) the southern Indian Ocean; (c) the North Atlantic; (d) the ensemble forecast field

致,但集成预测在华南沿海、河套及内蒙古的少雨带的分布比全球海温所做的预测 (图 6d) 更接近实况。

为了进一步检验这个集成预测系统,又用这六个海区的春季海温分别对 1999 年夏季降水做预测。预测中,由于黑潮-西风区及南太平洋区的型相关系数为负,所以不参与集成。与图 7f (观测场) 相比,赤道东太平洋区 (图 7a) 和北太平洋区 (图 7b) 均对华南-青藏高原雨带及新疆北部和河套附近的旱情预报较好,但对江淮及黄河以北的旱情预报与实况相反;图 7c (南印度洋区) 中,100°E 以西及黄河以北地区对南印度洋海温有较好的响应,大西洋区 (图 7d) 海温则对华南大部,尤其 110°E 以东的黄淮及以北的旱情预报较好。从四个海区的集成预测 (图 7g) 来看,除河套和华中部分地区外,其余大部地区的旱涝均与实况一致,尤其华南-青藏高原新疆西部雨带以及黄淮及以北的旱情预测尤为明显。将全球春季 (3~5 月) 海温对 1999 年中国夏季降水的预测 (图 7e) 与实况场 (图 7f) 相比,很

显然,全球春季海温对 1999 年的预测是不成功的,尤其在中国东部地区的预报与实况完全相反,但分区集成预测却在江淮及黄河以北地区的预报得到了很大改善,而且长江以南及青藏高原的多雨中心也预报得比较好。这说明分区集成预测由于突出了敏感海区的预测,避免了不敏感海区所带来的噪音,从而有效地提高了预测的准确性,这可能是 1999 年夏季降水的海温分区集成预测明显优于全球春季海温预测的可能原因。在海温的分区集成预测中,上述四个海区的型相关系数和 HS 评分分别为北大西洋区为 0.32 和 0.24;南印度洋区为 0.26 和 0.15;北太平洋区为 0.22 和 0.19;赤道东太平洋区为 0.05 和 -0.10。显然,北大西洋春季海温在 1999 年夏季预测中起着主要的作用,南印度洋、北太平洋区海温的异常变化对 1999 年夏季预测也起了重要的作用。

用以上四个海区的冬季海温对 1999 年中国夏季的集成预测试验 (图 8) 可看出,东北北部和江淮流域及华南大部地区对 Niño 3 区 (图 8a) 和南

印度洋区(图 8b)的冬季海温有很好的响应,但到了春季 Niño 3 区和南印度洋区海温对这些地区的响应信号已经减弱,尤其春季 Niño 3 区海温不再对中国 110°E 以东地区的旱涝预报表现出正反馈的信号,南印度洋(图 7c)春季海温则对 1999 年夏季整个华北、河套及以西地区的旱涝有较好的响应,北大西洋冬春季海温都对 1999 年江淮及华北的旱情预测起到了积极的作用,并表现出较强的信号。大西洋海温在 1998 及 1999 年夏季降水预测中的不同作用说明大西洋海温对我国降水的影响存在着明显的年际差异。过去,国内外学者对太平洋海温尤其 ENSO 现象及印度洋海温的异常对中国夏季降水的研究甚多,但对大西洋海温对我国夏季雨带的影响研究甚少,本文从全球海温的典型因子场的配置及海温的分区预测试验发现,大西洋海温的异常变化也对我国夏季降水有着某种联系,只是这种联系是通过怎样的机理影响中国夏季旱涝尚不清楚,还有待于进一步的研究。

6 结论与讨论

(1) 利用最优集合相关预测模式对中国夏季降水进行了诊断分析和分区集成预测试验。结果表明:改进的 CCA 方案不仅可以诊断出降水场和海温场中一些比较典型的空间模态,而且可以揭示海温的年际变化对中国夏季降水的影响,发现影响中国夏季旱涝的信号因子。

(2) 选取不同时段的海温对中国夏季降水的预测试验表明, Niño 3 区和南印度洋区春季海温与 1998 年长江流域和江南大部分地区洪涝灾害有密切联系,而北大西洋冬春季海温与 1999 年中国东部旱涝密切相关。

(3) 不同季节全球海温与中国夏季降水的遥相关特征表明,当不同季节的全球海温呈某种特定配置时,中国夏季降水具有不同的分布形式,特别是南印度洋海温、赤道东太平洋海温及北大西洋海温的异常变化对中国夏季降水的异常分布有着较好的相关关系。各大洋区海温与中国夏季降水之间的联系存在着明显的季节变化。

(4) 集合预测方法突出了不同区域海温的年际变化特征对我国季降水预测的贡献大小,发现影响我国区域性旱涝的强信号因子,并有效地提高了预测的准确性。

本文研究表明,虽然典型集合相关预测方法只是预测场和观测场两场之间非线性关系的一种线性近似,但它有效地提高了季降水的预测能力。本文只研究了海温与中国夏季降水的联系,而短期气候变化包含着大量的影响因素。我国夏季降水异常不仅受到海温和季风的影响,而且还受到积雪和陆面等过程的影响,因此,如何充分考虑其他因子,从不同角度研究影响中国夏季区域性旱涝的因子,进一步提高模式的可预测性,对于提高短期气候预测能力具有重要意义,也是今后需要深入研究的问题。

致谢 在本文的完成过程中,黄嘉佑教授提出了许多有益的建议,在此深表感谢!

参考文献 (References)

- [1] 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): 314~320
Luo Shaohua, Jin Zuhui, Chen Lieting. The correlation analysis of Indian ocean and sea surface temperature in south China sea with summer precipitation over Yangtze River. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (*Scientia Atmospherica Sinica*) (in Chinese), 1985, **9** (3): 314~320
- [2] 陈月娟,丁明. 太平洋海温异常对其上空环流影响的分析及数值试验. 大气科学, 1992, **16** (5): 592~600
Chen Yuejuan, Ding Ming. Influence of the pacific sea surface temperature anomalies on the circulation and its numerical experiments. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (*Scientia Atmospherica Sinica*) (in Chinese), 1992, **16** (5): 592~600
- [3] 费亮,王玉清. 赤道东太平洋海温与长江下游地区降水异常的相关分析. 气象学报, 1993, **51** (4): 442~447
Fei Liang, Wang Yuqing. The correlation analysis between the sea temperature on the equatorial east Pacific and the anomalous rainfall in the lower reaches of the Yangtze River. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1993, **51** (4): 442~447
- [4] 黄荣辉,孙凤英. 热带西太平洋暖池的热状态及其上空的对流活动对东亚夏季气候异常的影响. 大气科学, 1994, **18**: 141~151
Huang Ronghui, Sun Fengying. Impacts of the thermal state and the convective activities in the tropical western warm pool on the summer climate anomalies in east Asia. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (*Scientia Atmospherica Sinica*) (in Chinese), 1994, **18**: 141~151
- [5] 林学椿. 北太平洋海表持续加热对夏季中国降水及大气环流的影响. 热带气象学报, 1999, **15** (3): 258~266

- Lin Xuechun. The sea surface temperature sustained heating in the North Pacific influence on flood season rainfall in China and general circulation. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 1999, **15** (3): 258~2663
- [6] 陈烈庭. 热带印度洋-太平洋海温纬向异常及其对亚洲季风的影响. 大气科学, 1988, 特刊: 142~148
- Chen Lieting. Latitudinal anomaly of tropical Indian Ocean - Pacific Ocean and its impacts on Asian monsoon, *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (*Scientia Atmospherica Sinica*) (in Chinese), 1988, Special: 142~148
- [7] 郭其蕴, 王继琴. 中国与印度夏季风降水的比较研究. 热带气象学报, 1988, **4** (1): 53~60
- Guo Qiyun, Wang Jiqin. A comparative study on summer monsoon in China and India. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 1988, **4** (1): 53~60
- [8] 肖子牛, 晏红明. El Niño 位相期间印度洋海温异常对中国南部初夏降水及初夏亚洲季风影响的数值模拟研究. 大气科学, 2001, **25**(2): 173~183
- Xiao Ziniu, Yan Hongming. A numerical simulation of the Indian ocean SSTA influence on the early summer precipitation of the southern China during an El Niño year. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2001, **25**(2): 173~183
- [9] Shen S S P, Lau W K M. A Canonical Ensemble Correlation Prediction Model for Seasonal Precipitation Anomaly. NASA/TM, 2001, 209989
- [10] 王蕾, 张人禾, 黄嘉佑. 春季海温对中国夏季降水影响的诊断研究和预测试验. 气象学报, 2004, **62**(6): 851~859
- Wang Lei, Zhang Renhe, Huang Jiayou. Diagnostic analyses and hindcast experiments of spring SST on summer precipitation in China. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2004, **62** (6): 851~859
- [11] Smith T M, Reynolds R W, Livezey R E, et al. Reconstruction of historical sea surface temperature using empirical orthogonal functions. *J. Climate*, 1996, **9**: 1403~1420
- [12] Chen M, Xie P, Janowiak J E, et al. Global land precipitation: a 50-yr monthly analysis based on gauge observations. *J. Hydrometeorology*, 2002, **3**: 249~266
- [13] Barnett T P, Preisendorfer R. Origins and levels of monthly and seasonal forecast skill for United States surface air temperatures determined by canonical correlation analysis. *Mon. Wea. Rev.*, 1987, **115** (9): 1825~1847
- [14] Saha K. Zonal anomaly of sea surface temperature in equatorial Indian Ocean and its possible effect on monsoon circulation. *Tellus*, 1970, **22** (4): 403~409
- [15] 严邦良, 张人禾. 热带西太平洋风应力异常在 ENSO 循环中作用的数值试验. 大气科学, 2002, **26** (3): 315~329
- Yan Bangliang, Zhang Renhe. A numerical test of the effects of wind anomaly over the equatorial western Pacific on ENSO cycle. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2002, **26** (3): 315~329
- [16] 晏红明, 严华生, 谢应齐. 中国汛期降水的印度洋 SSTA 信号特征分析. 热带气象学报, 2001, **17** (2): 109~116
- Yan Hongming, Yan Huasheng, Xie Yingqi. The SSTA signal characteristic analysis over India Ocean during flood season in China. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 2001, **17** (2): 109~116
- [17] Webster P J, Moore A M, Loschnigg J P. Coupled ocean - atmosphere dynamics in the Indian Ocean during 1997 - 98. *Nature*, 1999, **401**: 356~360
- [18] Saji N H, Goswami B N, Vinayachandran P N, et al. A dipole in the tropical Indian Ocean. *Nature*, 1999, **401**: 360~363
- [19] Behara S K, Salvekar P S, Yamagata T, et al. Simulation of interannual SST variability in the tropical Indian Ocean. *J. Climate*, 2000, **13** (19): 3487~3499
- [20] 谭言科, 张人禾. 热带印度洋海温的年际异常及其海气耦合特征. 大气科学, 2003, **27** (1): 53~66
- Tan Yanke, Zhang Renhe. Features of the interannual variation of sea surface temperature anomalies and the air-sea interaction in tropical Indian Ocean. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2003, **27** (1): 53~66
- [21] 李崇银, 穆明权. 印度洋海温偶极子和太平洋海温异常. 科学通报, 2001, **46** (20): 1747~1751
- Li Chongyin, Mu Mingquan. Dipole in India Ocean and SSTA in Pacific Ocean. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 2001, **46** (20): 1747~1751
- [22] Zhang Renhe. Relations of water vapor transports from Indian monsoon with those over East Asia and the summer rainfall in China. *Adv. Atmos. Sci.*, 2001, **18**: 1005~1017
- [23] 张人禾. El Niño 盛期印度夏季风水汽输送在我国华北地区夏季降水异常中的作用. 高原气象, 1999, **18** (4): 567~574
- Zhang Renhe. The role of Indian summer monsoon water vapour transportation on the summer rainfall anomalies in the northern part of China during the El Niño mature phase. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 1999, **18** (4): 567~574
- [24] Zhang Renhe. A diagnostic study of the impact of El Niño on the precipitation in China. *Adv. Atmos. Sci.*, 1999, **16** (2): 229~241
- [25] Huang Ronghui, Zhang Renhe. The 1997/98 ENSO cycle and its impact on summer climate anomalies in East Asia. *Adv. Atmos. Sci.*, 2000, **17** (3): 348~362
- [26] 邹力, 倪允琪. ENSO 期热带太平洋和印度洋海温异常对亚洲夏季风变异影响的数值研究. 海洋预报, 1998, **15** (1): 19~31
- Zou Li, Ni Yunqi. Numerical research of effects of SSTA anomalies over tropical Pacific and Indian Ocean during ENSO on the variation of Asian summer monsoon. *Marine Forecasts* (in Chinese), 1998, **15** (1): 19~31