

BP-CCA 方法用于中国冬季温度和降水的可预报性研究和降尺度季节预测^{* 1}

贾小龙¹ 陈丽娟¹ 李维京¹ 陈德亮²
JIA Xiaolong¹ CHEN Lijuan¹ LI Weijing¹ CHEN Deliang²

1. 国家气候中心, 中国气象局气候研究开放实验室, 北京, 100081

2. 哥德堡大学地球科学系, 瑞典哥德堡, 40530

1. *National Climate Center, Laboratory for Climate Studies, CMA, Beijing 100081, China*

2. *Earth Science Center, Gothenburg University, Gothenburg 40530, Sweden*

2008-08-04 收稿, 2008-09-18 改回.

Jia Xiaolong, Chen Lijuan, Li Weijing, Chen Deliang. 2010. Statistical downscaling based on BP-CCA: Predictability and application to the winter temperature and precipitation in China. *Acta Meteorologica Sinica*, 68(3):398-410

Abstract The BP-CCA is used to build the optimal statistical downscaling model between the large scale circulation over East Asia and the temperature/precipitation over China in boreal winter based on one year out cross validation. The predictability of temperature/precipitation in winter is analyzed. It shows that the average anomaly correlation coefficient (ACC) between the 500 hPa circulation and the temperature in winter is 0.7 with the highest ACC of 0.9. And the average ACC between the 500 hPa circulation and the precipitation in winter is 0.3 with the highest ACC being 0.7. Though the predictability of temperature/precipitation over China shows regional features, the 500 hPa potential heights still have close relationship with the temperature/precipitation in winter. The East Asia trough and western Pacific subtropical high are the most important systems which affect the temperature/precipitation in winter. Combining the BP-CCA method with the hindcast results of CGCM/NCC, we can obtain higher skill of forecasting temperature/precipitation via downscaling temperature/precipitation by means of the BP-CCA downscaling model than that in case only the CGCM/NCC model is used. The ability of the downscaling model comes from the high forecast skill of large scale circulations by the CGCM/NCC.

Key words Predictability, BP-CCA downscaling, CGCM seasonal prediction

摘要 使用变形的典型相关分析(BP-CCA)方法, 基于交叉检验的结果建立了东亚冬季 500 hPa 大尺度环流和中国冬季温度、降水的最优 BP-CCA 降尺度预测模型, 并在此基础上进行了中国冬季温度和降水的可预报性研究, 表明用东亚冬季 500 hPa 高度场降维后的大尺度环流来解释中国冬季温度, 平均距平相关系数(ACC)为 0.7 左右, 最高可达 0.9, 解释中国冬季降水的平均 ACC 为 0.3 左右, 最高可达 0.7, 温度的可预报性远高于降水, 且二者的可预报水平存在明显的区域差异。可预报性研究表明东亚冬季 500 hPa 大尺度环流异常与中国冬季温度、降水异常有密切的联系, BP-CCA 方法可以很好地揭示大尺度环流与温度、降水的内在联系, 并且物理意义清晰。在东亚大尺度环流系统中, 东亚大槽和西太平洋副热带高压是影响中国冬季温度、降水异常的重要系统。进一步利用国家气候中心海气耦合模式(CGCM/NCC)回报和预测的 500 hPa 环流场和 BP-CCA 方法对温度和降水进行降尺度预测应用, 对温度和降水的预测效果明显高于模式直接输出的结果, 而且对温度预测的改善高于对降水的改善。对模式预测的环流进行 EOF(经验正交函数)分析, 表明 BP-CCA 方法对降尺度要素预报的可预报性来源于 CGCM/NCC 对 500 hPa 高度场主要大尺度特征的模拟能力较好。

关键词 可预报性, BP-CCA, 降尺度, 海气耦合模式, 季节预测

中图法分类号 P456.7 P467

* 资助课题: 国家自然科学基金项目(40905035, 40805027)、国家科技部科技支撑计划项目(2006BAC02B04, 2007BAC29B04)、公益性行业科研专项(200906021)。

作者简介: 贾小龙, 从事气候预测研究和应用。E-mail: jiaxl@cma.gov.cn

1 引言

季节气候预测方法可以分为两大类:经验方法和理论方法(Stockdale, 2000)。由于短期气候预测的难度和不确定性,气候预测业务仍然以两种方法结合的方式制作预测。20世纪90年代中后期以来,季节-年度气候预测的研究取得较大的发展(Palmer, et al, 1994; Goddard, et al, 2001; Wang, et al, 2001),动力气候模式成为季节气候研究和试验性业务的重要工具,并以“两步法”(Bengtsson, et al, 1993)和“一步法”(Ji, et al, 1994)两条思路发展。但是受数值模式动力框架、物理过程参数化等条件的限制,在现有模式水平情况下,模式对大尺度环流的特征模拟较好,而对于温度、降水等区域尺度气候要素的模拟技巧不理想,无法满足业务的需要。因此从动力模式的大尺度变量中获取局地尺度信息的降尺度方法逐渐发展起来。目前应用的降尺度法可分为三类(Busuioc, et al, 2001a):动力降尺度、统计降尺度(Wilby, et al, 2000, 2002)、统计与动力相结合的降尺度(Frey-Buness, et al, 1995; Fuentes, et al, 1996, 2000)方法,其中统计降尺度法由于计算量小、易于操作而被广泛应用(Wilby, et al, 1997; 范丽军等, 2005),取得了许多研究和应用成果(李维京等, 1999; Wilby, et al, 2000, 2002; Hellström, et al, 2003; Busuioc, et al, 2001a, 2001b; Willem, et al, 2000)。常用的统计降尺度方法很多,其中变型的典型相关分析(也称为BP-CCA或EOF-CCA)是一种既考虑现象联系又考虑成因特征的统计预测方法,它是在对两个场做主成分分析的基础上的典型相关分析(Canonical Correlation Analysis, 简称CCA),与其他统计预报方法的对比发现,BP-CCA预报模型具有很好的预报效果(陈友民, 1996; 严华生, 2004)。国内外关于BP-CCA方法在短期气候方面的预测研究比较广泛(毛恒青等, 1997; 黄茂怡等, 1997, 2001; Chen, et al, 2003; Barnston, et al, 1994, 1996a, 1996b, 1996c)。本文试图以BP-CCA方法作为工具,研究利用该方法解释中国冬季气候的可预报性,以及利用国家气候中心海气耦合模式(CGCM/NCC)的回算和预测结果进行冬季降水和温度的降尺度预测能力。

一般用于降尺度预测因子的大尺度变量有海平面气压(Busuioc, et al, 2001)、位势高度场(李维京等, 1999; Chen, et al, 2003)等变量,其中环流场在气候系统中占据非常重要的地位,气候的任何变化都将在大尺度的环流上有相应的体现,而环流的变

化又将直接或间接地影响气温、降水等要素的变化。中国地处东亚季风区,冬季气候异常主要受冬季风环流系统的影响。本文即以500 hPa高度场作为预测因子,分析500 hPa大尺度环流异常与中国冬季温度和降水异常的关系,探讨利用实况冬季高度场解释降水和温度的能力,获得中国冬季温度和降水的可预报性信息。在此基础上,将BP-CCA方法应用于国家气候中心“九五”期间发展的海气耦合模式(CGCM/NCC)(丁一汇等, 2004)的冬季环流回算和预测结果,李清泉等(2004)、张礼平等(2005)曾经分析模式的夏季回报、预测结果并进行评估和适当订正,证明模式结果有一定的参考价值。本文利用模式回算资料建立温度和降水的最佳BP-CCA降尺度预测模型,对预测效果进行检验,最后分析降尺度预测高技巧信息的可预报性来源。

2 资料

文中使用站点资料为国家气候中心整理的中国地区160站冬季温度和降水时间序列(1951—2007年)。格点资料为NCEP/NCAR发布的水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 的月平均全球再分析资料(Kalney, et al, 1996),使用的变量为1951—2006年56个冬季的500 hPa高度场,区域为东亚地区(10° — 60° N, 70° — 150° E),冬季定义为当年12月—次年2月的平均。模式回算和预测资料为国家气候中心海气耦合模式CGCM/NCC 10月起报的冬季平均500 hPa高度场,回算时段为1983—2006年,共计24个冬季。另外,还用到了CGCM/NCC直接输出的冬季平均的温度和降水,用于对比预测结果。

3 方法

文中使用的典型相关分析(CCA)方法的基本思想是:分别在两组随机变量内做线性组合构成各自有代表性的综合变量,使两组间成对的综合变量之间的相关达最大、次大……,这种综合变量称为典型相关变量,然后通过对它的研究,代替原来两组变量之间相关关系的研究。这样,只需着重研究前几对相关关系强的典型变量,就能把原来两组变量间复杂的联系简要地表达出来。在使用典型的典型相关分析时,要求样本量 n 大于两组变量的个数或两个变量场空间点数,以保证典型变量的稳定性。而在大气科学中分析场的格点数往往远大于样本容量,BP-CCA方法是在对两个场作主成分分析的基础上的CCA,即先对两个场做经验正交函数(Em-

pirical Orthogonal Function,简称 EOF)分析,截取前几个标准化的主成分,然后进入 CCA 步骤。这样截取了两个场的主要大尺度时空变化信息,滤去了小尺度振动和噪声的干扰,减少了资料中不必要的“噪音”部分,同时也降低了维数,减少了计算量。BP-CCA 方法的详细介绍可参见魏凤英(2007)、吴洪宝等(2005)编写的书籍,计算步骤概括如下:

(1)对预报因子和预报对象分别计算出标准化距平。

(2)将因子和对象的标准化距平分别做 EOF 分析,分别截取前几个 EOF 标准化的时间系数 $\alpha_i(t)$ 和 $\beta_i(t)$,构造主分量矩阵 **A** 和 **B**。

(3)计算主分量矩阵 **A** 的协方差阵 $S_{\alpha\alpha}$,主分量矩阵 **B** 的协方差阵 $S_{\beta\beta}$,两个主分量矩阵的交叉协方差矩阵 $S_{\alpha\beta}$ 。

(4)用奇异值分解计算方法求 $S_{\alpha\alpha}^{-1}S_{\alpha\beta}S_{\beta\beta}^{-1}S_{\beta\alpha}$ 矩阵的特征值,得到左右奇异向量 L_k 、 R_k 和奇异值 σ_k 。

(5)以 L_k 和 R_k 为权重系数向量分别将 $\alpha_i(t)$ 和 $\beta_i(t)$ 做线性组合,得到典型相关变量 $a_k(t)$ 和 $b_k(t)$, $a_k(t)$ 和 $b_k(t)$ 间的相关系数为 σ_k 。

最后,由回归分析的原理,建立统计预报关系:

$$\hat{Z}_{jt} = \sum \sigma_k a_k(t) \langle Z_j(t) b_k(t) \rangle, j = 1, 2 \dots N.$$

其中: t 表示年份($t = 1, 2 \dots N$); j 是预报对象场的离散的空间位置序号; $Z_j(t)$ 和 \hat{Z}_{jt} 分别为预报对象的实际场和预报场在第 j 格点的分量; $\langle \rangle$ 表示时间平均; $\langle Z_j(t) b_k(t) \rangle$ 是样本平均量,与预报时间无关。

利用该方法进行中国冬季温度和降水的可预报性分析及降尺度预测应用。

4 中国冬季温度和降水的可预报性分析

根据 BP-CCA 方法的步骤,首先将中国 1951—2006 年 160 站温度和降水作为预报对象,NCEP/NCAR 再分析资料同时段的东亚地区(10° — 60° N, 70° — 150° E)500 hPa 高度场作为预报因子,将预报因子和预报对象场进行距平标准化,然后进行 EOF 分析。

首先分析东亚地区 500 hPa 环流的主要变化模态,图 1 给出了 500 hPa 高度距平场 EOF 分析的前 4 个模态。第 1 模态反映了东亚地区 500 hPa 高度场变化整体一致的特征,载荷大值区位于副热带地区,这一模态解释方差为 45.1%;第 2 模态反映了东亚地区高纬和中低纬地区高度场反相变化的特

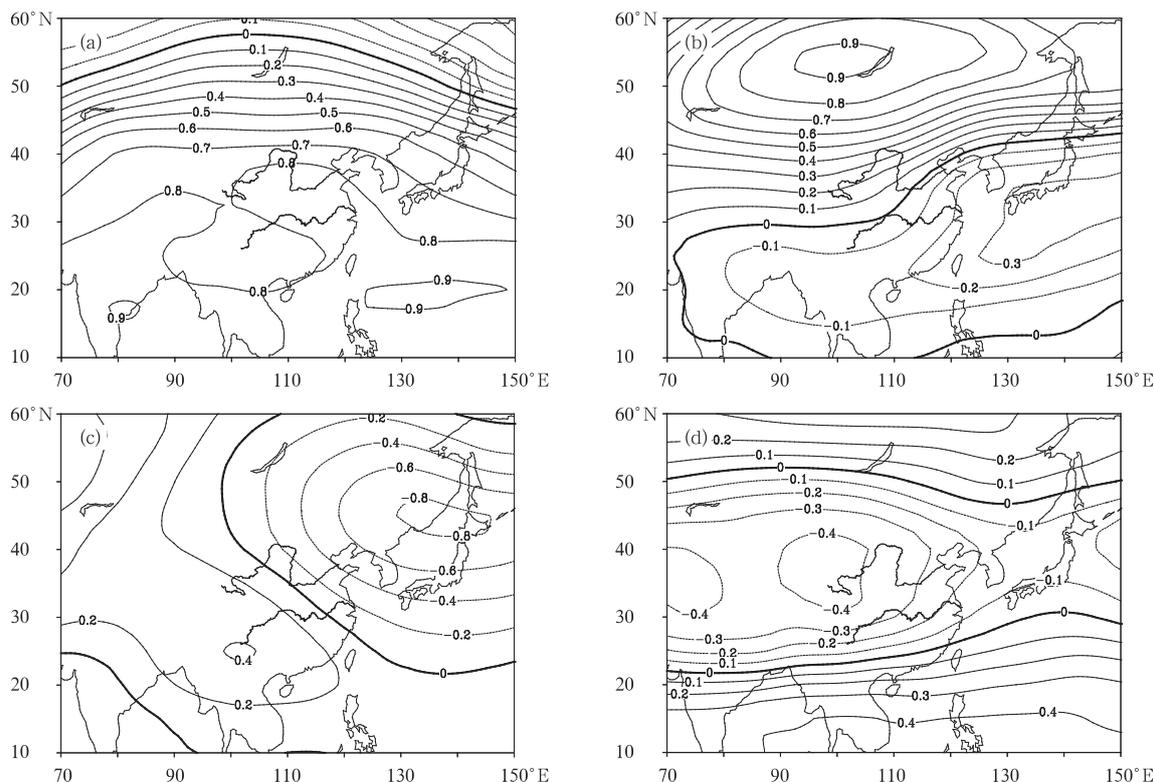


图 1 NCEP 再分析资料冬季标准化 500 hPa 高度距平场 EOF 分析的前 4 个模态 (a—d 分别为第 1、2、3、4 模态)

Fig. 1 The leading four EOF patterns of the winter normalized 500 hPa geopotential height from NCEP data (a. the first pattern, b. the second pattern, c. the third pattern, and d. the fourth pattern)

征,正载荷中心位于贝加尔湖附近,载荷中心位于中国东部-朝鲜-日本附近的东亚东部地区,两者分别对应了西风带平均环流上贝加尔湖脊和东亚大槽的位置,因此这一模态反映了东亚地区冬季500 hPa西风带平均槽脊,即贝加尔湖和阿留申地区槽脊的变化特征,解释方差为 18.7%;第3模态解释方差为 12.2%,主要反映了东亚地区东部和西部地区高度场反相变化的特征,可以看到这一模态也与东亚大槽的变化有关;第4模态解释的方差比较少(7.7%),反映了东亚高度场由北向南“+ - +”的纬向型变化特征。前4个模态累计方差贡献达到 83.7%,反映了东亚冬季500 hPa环流的主要变化特征。

然后截取预报因子和预报对象场 EOF 分析的前几个模态来进行 CCA 分析,并截取前几个 CCA 模态来建立预测模型,由于用 BP-CCA 方法建立两场关系模型的预测技巧与各场截取 EOF 模态的个数以及用来进行建模的 CCA 模态个数有关,为使建立的预测模型得到最佳的预测技巧,这里截取

EOF 模态的个数以及用来建立预报关系的 CCA 模态个数都通过“One year out cross validation”(Barnston, et al, 1996a) 的交叉检验方法来确定(吴洪宝等, 2005)。具体做法是,每次模型预报方程由所有可用资料中去掉第 M 年的资料建立,然后用保留的第 M 年的因子资料作为因子观测值进行预报,而保留的第 M 年的预报对象资料作为实况。重复以上过程,使 M 取遍所有可能的取值,可以得到预报值序列和实况序列,通过计算两个序列的时间相关系数,然后以 160 站平均的相关系数作为衡量预报效果的标准,它反映了系统整体的预测技巧,同时计算 160 站通过 5% 显著性检验水平的站数。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,可以认为样本检验是相对独立的。按照这种做法,预报检验的结果接近实际预报情况,而非事后预报。

对预报对象和预报因子分别截取前 1—25 个 EOF 模态,重复进行交叉检验,图 2 给出了截取不

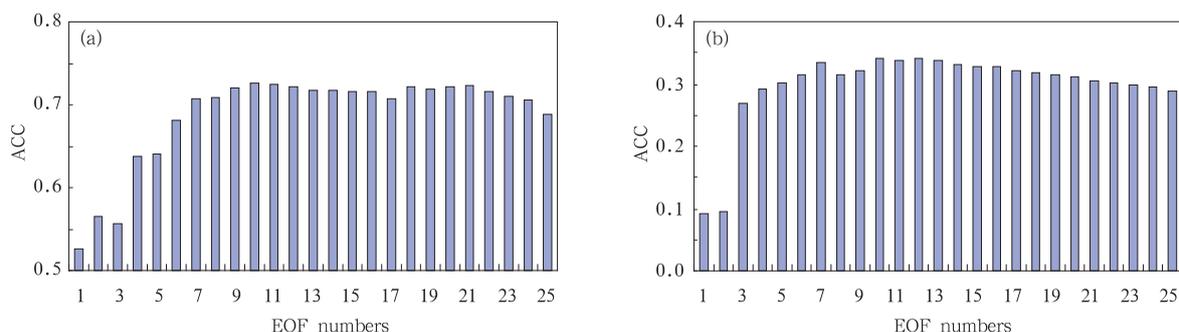


图 2 NCEP 冬季 500 hPa 高度场和 160 站温度(a)、降水(b)取不同 EOF 模态个数进行 CCA 重建(取所有 CCA 模态)的交叉检验结果

Fig. 2 Cross-validation of the CCA reconstruction using the NCEP winter 500 hPa height with the observed temperature (a), and with the observed rainfall (b) over the different numbers of leading EOF patterns (all CCA patterns are used). (The vertical axis is the 160 station averaged anomaly correlation coefficients between the BP-CCA reconstructed and observed data. The horizontal axis is the EOF numbers used)

同 EOF 模态个数,并取所有 CCA 模态建立 BP-CCA 预测模型的交叉检验的结果。可以看到,当截取的 EOF 模态个数增加时,建立的 CCA 预报关系的距平相关系数(ACC)起初是迅速增加的,但直到达到一个最大值后,随着截断模态个数的增加,ACC 将趋于相对稳定并有所减小,这也说明 BP-CCA 模型只能识别大尺度的气候,无法识别小尺度特征(吴洪宝等, 2005)。对温度和降水而言,都是截取前 10 个 EOF 模态时,ACC 达到最大,分别为 0.73 和 0.34。为进一步确定用来建立预报模型的 CCA 模态个数,图 3 进一步给出了预报对象和预报

因子截取前 10 个 EOF 模态进行 CCA 分析后,建立预报模型的 CCA 模态个数对应的 ACC,我们用使 ACC 达到最大的模态个数来建立最后的预报关系,得到最优的降尺度预测模型。这里温度和降水都是截取所有的 CCA 模态(前 10 个)时 ACC 最大(分别为 0.73 和 0.34)。通过交叉检验的方法确定了温度和降水的预测模型都是截取因子场和预报对象场前 10 个 EOF 模态进行 CCA 分析,然后取前 10 个 CCA 模态用来建立预报关系。图 4 分别给出据此建立的 BP-CCA 预报模型对冬季温度和降水的预测效果交叉检验结果的区域差异特征,分别是 160

站预测值和观测值时间相关系数的空间分布和空间相关系数序列。可以看到,对温度预测而言,中国160个站的相关系数都超过了5%的显著性检验水平,平均ACC为0.73,东部大部分地区相关系数都在0.75以上,河套地区超过0.8。从空间相关系数

序列看,56年只有2年相关系数为负,2年未达到5%的显著性检验水平,其余大部分年份都超过了1%的显著性检验水平,ACC最高达到0.9。对降水而言,预报技巧要比温度低得多,160站平均的ACC为0.34,通过5%显著性检验水平的站数为

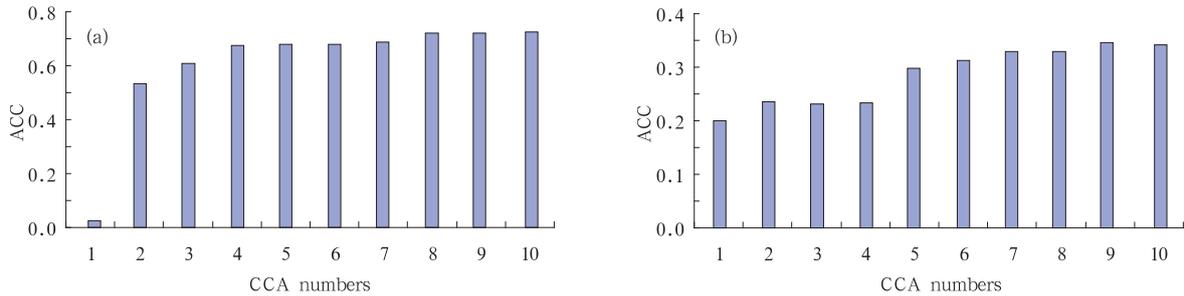


图3 NCEP 冬季 500 hPa 高度场和 160 站温度(a)和降水(b)用前 10 个 EOF 模态进行 CCA 分析,取不同的 CCA 模态数进行重建的交叉检验结果

Fig.3 Cross-validation of the CCA reconstruction using the NCEP winter 500 hPa height with the observed temperature (a), and with the observed rainfall (b) over the different numbers of CCA patterns (leading ten EOF patterns are used). (The vertical axis is the 160 station averaged anomaly correlation coefficients between the BP-CCA reconstructed and observed; the horizontal axis is CCA numbers used)

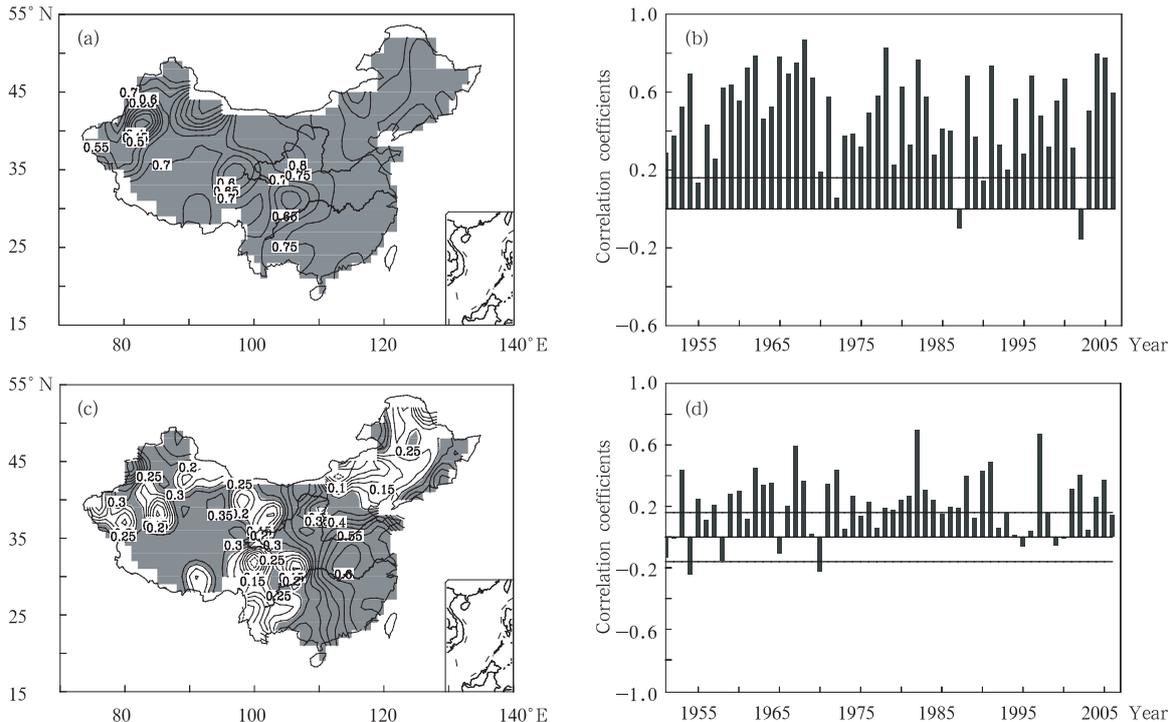


图4 冬季 500 hPa 高度场为预报因子使用最优 BP-CCA 模型对 160 站冬季温度和降水预测效果的交叉检验结果 (a. 预测的温度和实况温度的相关系数分布(阴影为达到 5%显著性检验水平的区域); b. 预测的温度和实况温度的空间相关系数序列;c. 预测的降水和实况降水的相关系数分布(阴影为达到 5%显著性检验水平的区域); d. 预测的降水和实况降水的空间相关系数序列)

Fig.4 Cross-validation of the predicted temperatures and rainfalls of the 160 stations using the 500 hPa height data based on the optimal BP-CCA model (a. correlation coefficient distributions of the predicted and observed temperatures of the 160 station (the areas that are significant at the 5% level are shaded; b. spatial correlation coefficients between the predicted and observed rainfalls of the 160 stations), (c) same as in (a) but for rainfalls; and (d) same as in (b) but for rainfalls)

106 站,空间分布上预报技巧最高的地区是中国东部大部分地区,相关大多在 0.4 以上,相对较低的地区在东北和西南地区。从空间相关序列看,大多数年份都为正相关,有 35 年通过 5% 的显著性检验水平,最高为 0.7,只有 8 年为负相关。

从以上分析可以看出,中国冬季的温度和降水与大尺度环流有密切的关系,BP-CCA 方法建立的冬季 500 hPa 环流和温度、降水的降尺度预测模型对冬季的温度和降水有很好的预测效果。冬季温度和降水的可预报性用相关系数(ACC)来表示的话,冬季温度的平均 ACC 在 0.7 左右,最高可以达到 0.9,降水的可预报性为 0.3 左右,最高可以达到 0.7,温度的可预报性要明显高于降水,而且可预报水平存在明显的区域差异。这一结果也表明,受可预报性的限制,即使数值模式对大尺度环流的预报与实况完全一致,也不可能预测出与实况完全一致的温度和降水分布。

5 东亚冬季 500 hPa 环流与中国同期温度和降水的关系及主要模态

为进一步分析东亚地区冬季环流与中国温度和降水的关系,下面对 BP-CCA 分析的结果做进一步的诊断,由交叉检验的结果(图 3)可以看到,在建立 BP-CCA 预测模型时,对温度的预测取前 4 对 CCA 模态建模之后,降水在取前 5 对 CCA 模态之后,预测技巧的变化就不太明显了,因此,下面将对 500 hPa 环流与温度的前 4 对 BP-CCA 模态的空间载荷型和 500 hPa 环流与降水的前 5 对模态的载荷型进行分析(图 5 和 6)。从温度的前 4 对 CCA 模态的典型载荷特征向量看(图 5),第 1 对模态的 500 hPa 高度场载荷向量为东亚大陆整体一致的变化,与之对应,温度载荷型也为全国一致的变化,载荷大值区与高度场相一致,这一对模态表明东亚大陆高度场整体偏高,高纬和极区的冷空气受到阻挡,中国大部分地区温度偏高,反之亦然。第 2 对 CCA 模态的 500 hPa 高度场载荷向量东亚中高纬呈西高东低的分布,而低纬高度场偏低,反映了东亚大槽和贝加尔湖脊的变化,因此,这种环流型表明东亚大槽偏深、贝加尔湖脊偏强、亚洲大陆环流经向度加大,高纬度的冷空气易于侵入到低纬度地区,因而与此环流型相对应,冬季温度的模态为全国大部分地区是负距平,大的负值区主要分布在中国东部地区,反映了东亚大槽对中国温度的影响。但在中国中部地

区有一小范围的温度正值区,可能与局地气候特征有关。第 3 对 CCA 模态的 500 hPa 高度场载荷向量东亚大陆北部为高度场负异常,南部为正异常,此种环流型也表明北方的冷空气较为活跃,容易侵入到南方地区,中国的温度变化表现为西南地区温度偏高,其他地区温度易偏低,偏低最明显的区域在中国的北方地区。第 4 对 CCA 模态的高度场特征主要是高纬和低纬偏高,而中纬度地区相对偏低的分布,这种环流形势下,中国北方地区和西南地区温度偏高,南方地区温度偏低。

从环流和降水的前 5 对 CCA 模态看(图 6),第 1 对 CCA 模态的 500 hPa 高度场载荷特征向量反映了东亚地区高度场西低东高的分布,东亚大槽偏弱,并且西太平洋副热带高压也较为偏强,这种形势下西路冷空气较为活跃,容易南下影响中国,同时低纬副热带系统较强,有利于海洋上水汽向大陆的输送,造成中国大部分地区降水偏多,与以往的分析结果一致(何溪澄,2006)。第 2 对 CCA 模态的高度场载荷型反映了东亚高度场北负南正的分布,北方冷空气活跃,而中低纬副热带系统偏强,使得冬季雨带主要在长江中下游及以北的中国北方地区。第 3 对 CCA 模态的高度场载荷型与第 1 模态有相似之处,东亚地区也为西低东高的分布,但东亚大陆都偏低,海洋上偏高,东亚大槽偏弱偏东,主要降水偏多的区域在中国东部地区。第 4 对 CCA 模态的高度场载荷型从高纬到低纬为“+ - +”的分布,中国北方地区冷空气活跃,而副高偏南,使得北方地区降水偏少,江南、华南降水偏多。第 5 对 CCA 模态的高度场异常反映了在东亚大陆中纬度地区西低东高的分布,而高纬和低纬地区高度场偏低,这种分布易造成中国东部地区从南到北降水呈“+ - +”分布。

BP-CCA 型的分析表明东亚地区 500 hPa 环流的变化与中国冬季的温度和降水的变化有密切的联系,并且 BP-CCA 分析得到的 500 hPa 高度场和中国温度异常有很好的对应关系,并且有清晰的物理含义。前 4—5 对 CCA 模态揭示了东亚冬季大尺度环流对中国冬季温度、降水的主要影响关系,其中东亚大槽和西太平洋副热带高压是影响中国冬季温度、降水的最重要的系统。使用 BP-CCA 方法利用 500 hPa 环流对中国温度和降水有比较好的预测效果,因此下一节我们将利用此方法使用模式预测的环流实现对中国 160 站温度和降水的降尺度解释应用。

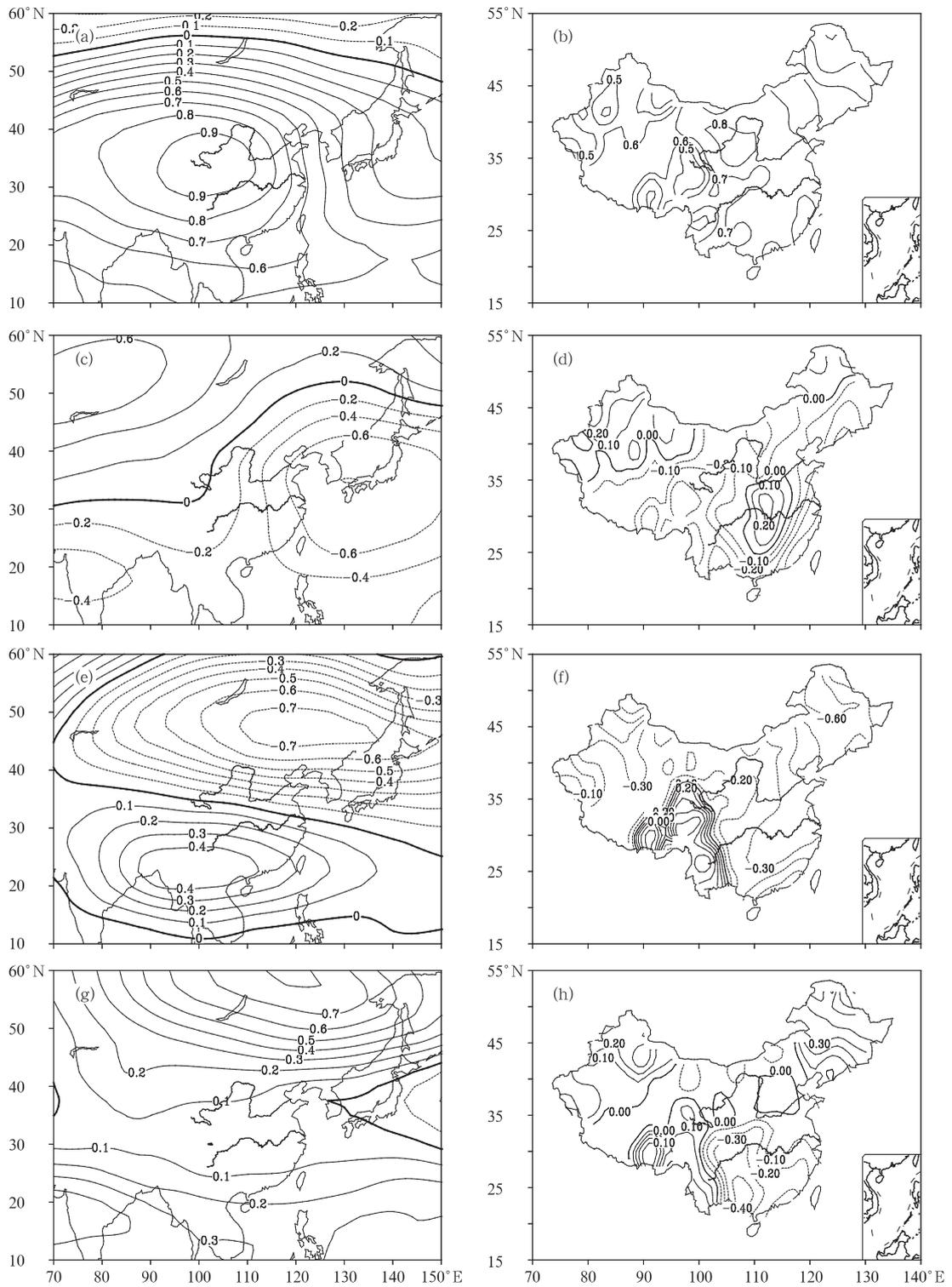


图5 NCEP 的冬季 500 hPa 高度场距平(a,c,e,g) 和冬季 160 站温度距平(b,d,f,h) BP-CCA 分析的前 4 对模式的载荷特征向量
 Fig.5 The first four BP-CCA patterns for the NCEP winter 500 hPa height anomalies (a,c,e,g) and the observed temperature anomalies (b,d,f,h) of the 160 stations

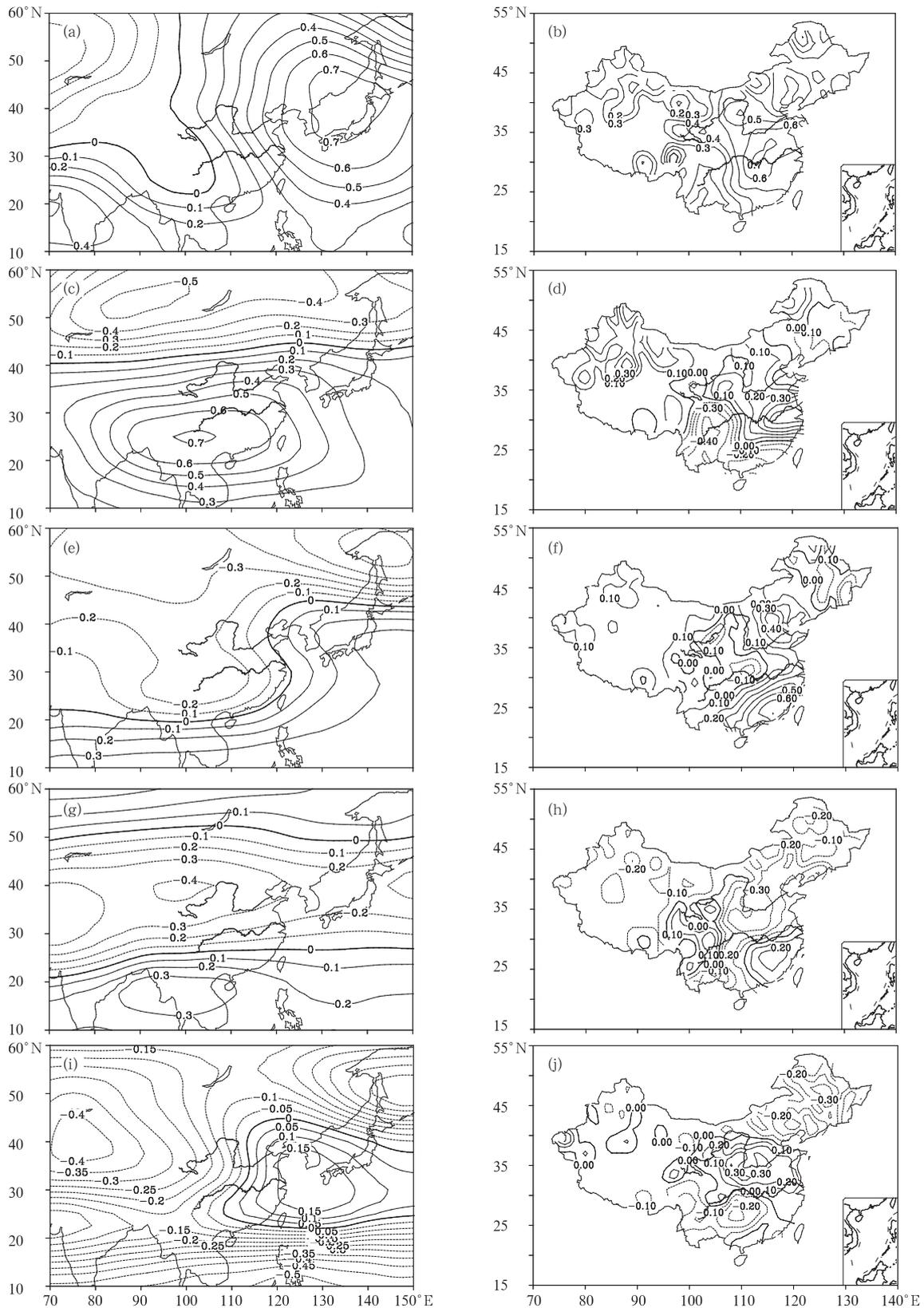


图6 NCEP 冬季 500 hPa 高度场距平(a,c,e,g,i)和

冬季 160 站降水距平(b,d,f,h,j)BP-CCA 分析的前 5 对模式的载荷特征向量

Fig. 6 Fig. 5 The first five BP-CCA patterns for the NCEP winter 500 hPa height anomalies (a,c,e,g,i) and the observed rainfall anomalies (b,d,f,h,j) of the 160 stations

6 BP-CCA 用于 CGCM/NCC 环流对冬季温度和降水的降尺度季节预测

6.1 模式直接输出的温度和降水的预测检验

首先对国家气候中心海气耦合模式 (CGCM/

NCC) 10 月起报预测的 1983—2006 年冬季的温度和降水进行效果检验, 将输出的格点温度和降水用双线性法插值到 160 个台站上, 得到台站上的预测值, 然后计算了与 160 站实况资料的相关系数和空间相关系数序列 (图 7)。可以看到, CGCM/NCC 对

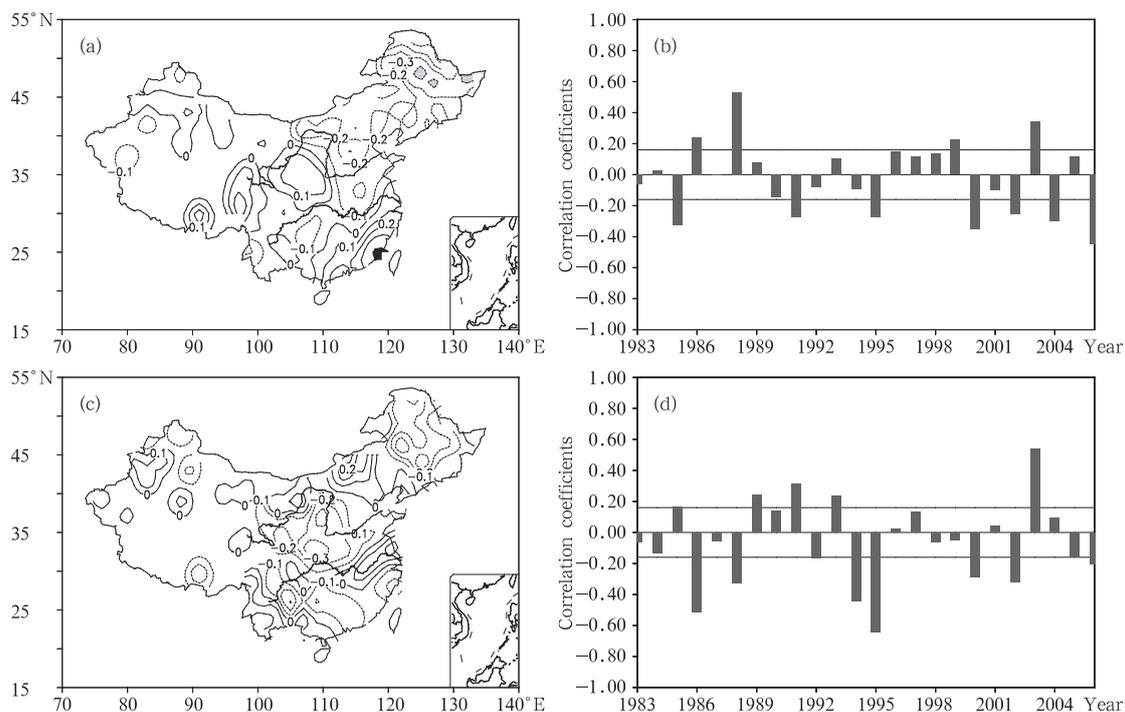


图 7 CGCM/NCC 预测的冬季温度和降水与实况的相关系数空间分布和空间相关系数序列

(a. 预测的温度和实况温度的相关系数分布 (阴影为达到 5% 显著性检验水平的区域);
b. 预测的温度和实况温度的空间相关系数序列; c. 预测的降水和实况降水的相关系数分布
(阴影为达到 5% 显著性检验水平的区域); d. 预测的降水和实况降水的空间相关系数序列)

Fig. 7 Correlation coefficient distributions and spatial correlation series of the predicted temperatures and rainfalls of the 160 stations by the CGCM/NCC. (a. Correlation coefficient distributions of the predicted and observed temperatures of the 160 station (the areas that are significant at the 5% level are shaded); b. spatial correlation coefficients of the predicted and observed rainfalls of the 160 stations; c) same as in (a) but for rainfalls; and (d) same as in (b) but for rainfalls)

冬季温度和降水的预测均较差, 对温度的预测除了东南沿海和西北地区东部外, 其余地区均为负相关, 尤其在东北和华北负相关值较高。160 站平均的 ACC 为 -0.04 , 相关达到通过 5% 显著性检验水平的站点数为 5 个, 空间相关系数最大的为 0.55。而降水的预测与实况以负相关为主, 160 站平均的 ACC 为 -0.1 , 没有通过 5% 的显著性检验的站点, 空间相关系数最大为 0.5。从上面模式直接输出的温度和降水的检验来看, 预测技巧都很低。

6.2 BP-CCA 降尺度预测模型效果检验

利用第 4 节 BP-CCA 的方法分别建立模式预测

的 500 hPa 环流和观测的 160 站温度和降水场的最优 BP-CCA 降尺度预测模型。预测模型建立的方法同第 4 节的方法一样, 只是用 CGCM/NCC 预测的 1983—2006 年冬季 500 hPa 高度距平代替 NCEP 的 500 hPa 高度场, 分别和中国 160 站实况冬季温度及降水距平进行 BP-CCA 分析。进行 BP-CCA 分析时截取的预报因子和预报量的 EOF 模态数以及用来建立预测模型的 CCA 模态数的方法同第 4 节一样使用交叉检验的方法来确定。对温度的预测而言, 高度场和温度场截取前 15 个 EOF 模态进行 CCA 分析, 并且取前 13 个 CCA 模态建立的预测模型的预测技巧

最佳, ACC 为 0.23, 通过 5% 显著性检验水平的正相关站点数为 36 个; 对降水而言, 截取前 20 个 EOF 模态进行 CCA 分析, 并且取前 7 个 CCA 模态建立的预测模型的预测技巧最佳, ACC 为 0.08, 通过 5% 显著性检验水平的正相关站点为 29 个。图 8 进一步给出了交叉检验的 160 站 24 年相关系数的空间分布和 24

年空间相关系数序列。可以看到, 与模式直接输出的结果相比, BP-CCA 模型对温度和降水的预测技巧都有明显的提高, 对温度的预测在东北部分地区、华北、江淮、东南沿海的部分地区和西南部分地区技巧都有很大的提高, 对降水的预测在江南和华南地区技巧有较明显的提高。

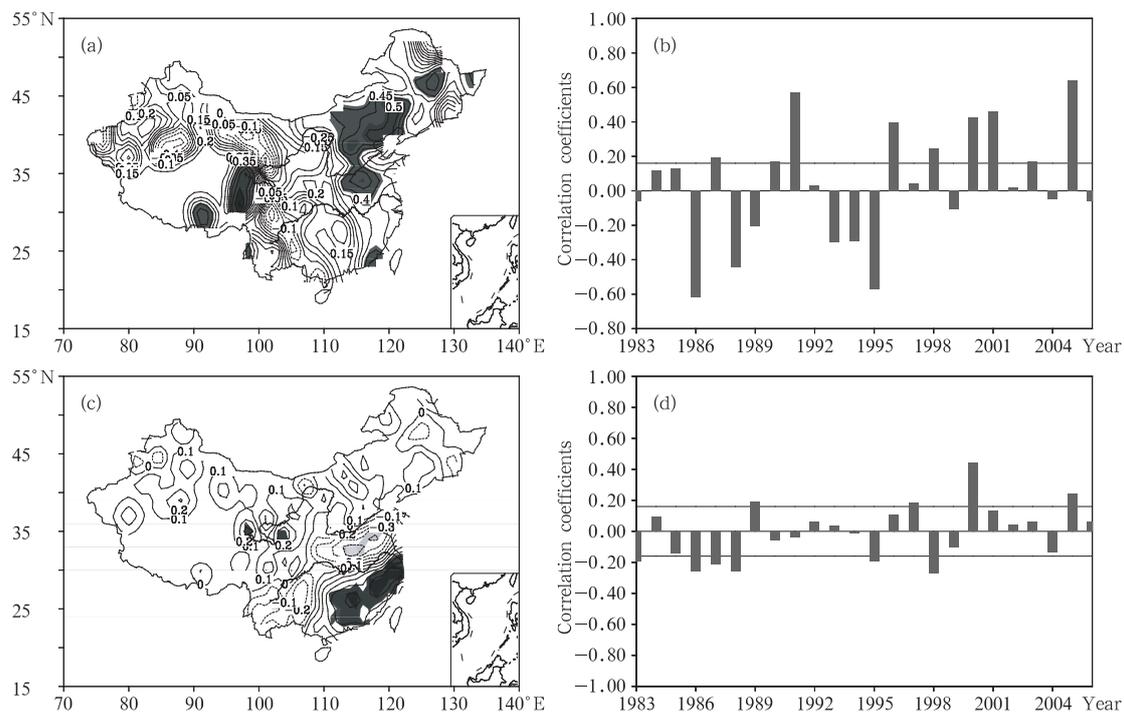


图 8 BP-CCA 预测模型用于 CGCM/NCC 的预测高度场对 1983—2006 年冬季温度和降水预测效果的交叉检验, 160 站温度 (a) 和降水 (c) 的预测和实况的相关系数分布 (阴影为通过 5% 显著性检验水平的区域); (b) 和 (d) 是预测的 160 站温度和降水和实况之间的空间相关系数序列

Fig. 8 Cross-validation of the predicted temperatures and rainfalls of the 160 stations using the CGCM/NCC 500 hPa height data based on the optimal BP-CCA model. (a) Correlation coefficient distributions of the predicted and observed temperatures of the 160 stations (the areas that are significant at the 5% level are shaded); (b) spatial correlation coefficients of the predicted and observed rainfalls of the 160 stations; (c) same as in (a) but for rainfalls; and (d) same as in (b) but for rainfalls

7 降尺度预测技巧的可预报性来源

BP-CCA 方法从大尺度异常环流型的角度来实现对温度和降水的降尺度预测, 因此模式对大尺度环流型的模拟能力是首要因素。首先检验一下模式对 500 hPa 高度场的预测技巧, 图 9 给出了模式预测的 500 hPa 高度场和 NCEP 结果之间的相关系数场, 可以看到, 模式对 500 hPa 环流的预测技巧在东亚地区并不好, 在东北地区甚至是较为显著的负相关, 这也是为什么模式直接输出的温度在中国北方

地区与观测结果为弱的负相关的原因之一 (图 7)。虽然模式对环流的整体预测并不好, 但 BP-CCA 方法是从大尺度环流型的角度建立模式预测的环流型和观测的预报对象场空间型之间的关系模型, 从而提高预报要素场的预报效果, 因此模式能否再现观测的 500 hPa 主要环流型对 BP-CCA 模型能否提高预测效果来说更为重要。因此, 图 10 给出了 CGCM/NCC 预测的 1983—2006 年冬季东亚地区 500 hPa 高度距平场 EOF 分析的前 4 个模态, EOF 第 1 模态反映了东亚大陆大部分高度场变化一致的

特征,这一模态解释了 58.6% 的方差贡献。第 2 模态类似 NCEP 再分析结果的 3 模态,解释了 14.4% 的方差;第 3 模态解释了 8.5% 的方差贡献,空间分布上类似 NCEP 500 hPa 高度场的第 2 模态;第 4 模态则与 NCEP 500 hPa 高度场的第 4 模态非常一致,解释方差贡献为 5%。前 4 个模态累积解释方差贡献达 86.5%。从模式预测的 500 hPa 环流异常的主要 EOF 模态来看,模式对 500 hPa 的主要环流型还是有一定的预测能力。因此,利用 BP-CCA 方法在大尺度环流识别上的特点,同时利用模式对主要大尺度环流型的再现能力,相对于模式直接输出的要素预报效果不佳的实际情况,可以对要素的预报有较明显的提高。上面的分析表明,CGCM/NCC 应用 BP-CCA 方法预测效果提高的原因,并不是模式对 500 hPa 环流的预报技巧较高,而是对 500 hPa 主要环流型的预报能力较高。受环流解释温度和降水的可预报性以及模式预测的大尺度环流型实际上与观测还有一定差异的限制,用 BP-CCA 建立的预测模型的预测技巧比观测的环流来降尺度

解释温度和降水的技巧明显偏低,但是与模式直接输出的要素预报的技巧相比,用 BP-CCA 方法还是可以明显改善模式对温度和降水的预测效果。

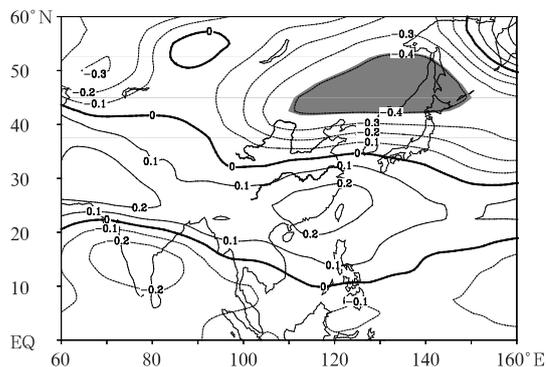


图 9 CGCM/NCC 预测的冬季 500 hPa 高度场与 NCEP 资料的相关系数空间分布 (阴影为达到 5% 显著性检验水平的区域)
Fig. 9 Correlation coefficient distributions of the 500 hPa geopotential heights predicted by the CGCM/NCC with the NCEP data (the areas that are significant at the 5% level are shaded)

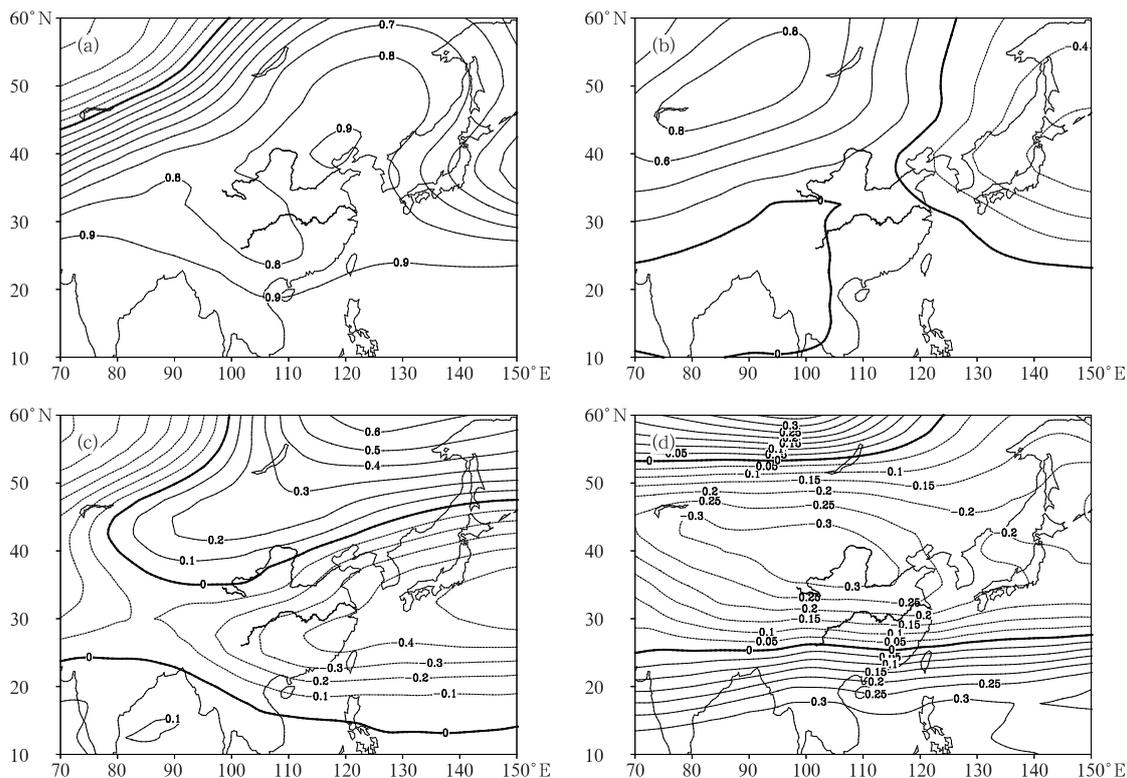


图 10 CGCM/NCC 预测的冬季 500 hPa 高度距平场 EOF 分析的前 4 个模态
Fig. 10 The leading four EOF patterns ((a) - (d)) of the winter normalized 500 hPa geopotential heights predicted by the CGCM/NCC

8 结论与讨论

使用BP-CCA方法基于交叉检验结果建立了东亚冬季大尺度环流和中国冬季温度、降水的最优BP-CCA降尺度预测模型,研究了冬季温度和降水的可预报性,并进一步分析了500 hPa主要大气环流型与中国冬季温度和降水分布的关系;最后将BP-CCA方法应用于国家气候中心海气耦合模式(CGCM/NCC)的降尺度应用中,并取得了较好的效果,得到以下结论:

(1) 应用BP-CCA方法基于交叉检验建立的东亚冬季500 hPa环流和中国冬季温度、降水异常的最优BP-CCA降尺度预测模型对温度和降水的预测有很好的效果。用500 hPa大尺度环流来解释温度和降水,冬季温度的可预报性平均ACC为0.7左右,最高可以达到0.9,降水的可预报性平均ACC为0.3左右,最高可以达到0.7,温度的可预报性要远高于降水。温度和降水的可预报水平存在明显区域差异。

(2) 东亚冬季500 hPa环流异常与中国冬季温度和降水异常有密切的联系,BP-CCA方法揭示的大尺度环流与温度、降水的关系有明确的物理含义。前4—5对CCA模态揭示了东亚冬季大尺度环流对中国冬季温度、降水的主要影响关系,其中东亚大槽和西太平洋副热带高压是影响中国冬季温度、降水的最重要的系统。

(3) 应用BP-CCA方法建立了CGCM/NCC大尺度环流对温度和降水的降尺度预测模型,模型对温度和降水的预测效果明显高于模式直接输出的结果,对温度的改善要高于对降水的改善。降尺度预测技巧的可预报性来源于模式对大尺度环流主要异常模态的模拟,这是降尺度预测模型取得较好效果的前提条件之一。

利用BP-CCA方法可以较好地数值模式预报产品进行降尺度地解释应用,但在建立预测模型的过程中仍存在一些值得探讨的问题。首先就是预报因子的选取,比如与大尺度环流相联系的预测因子中除500 hPa高度场外,海平面气压(SLP)也是常用的因子(Zorita, et al, 1992; Chen, et al, 2000),尽管有研究表明就单因子而言用500 hPa高度场作预测因子的预测技巧要高于用SLP(Barnett, et al, 1987; Huth, 1999),这也是本文使用500 hPa高度

场的原因。也有研究表明,对于特定地区和特定时期优选的因子场组合,可以取得较为满意的预报效果(毛恒青等, 1997),因此目前国外一些单位(比如NCEP/CPC)已经开始采用集合典型相关分析预报方法(ECC),它是基于典型相关分析(CCA)方法,对同一预报对象场采用多个预报因子场进行预报分析,然后通过适当的方法合成而得到的一套预报方法。目前ECC方法在国内还少有应用(陈小兰等, 2007),这可能是以后BP-CCA方法在气候预测上的应用趋势。另外,除了因子的选取外,因子的区域范围选择也是一个值得讨论的问题,本文选取的范围是东亚地区(10° — 60° N, 70° — 150° E),与Chen等(2003)选取一致,因为有研究显示选择东亚地区的环流比选择整个东半球的环流的预报效果要好(Barnett, et al, 1987)。因此如何选取最佳预报因子范围是利用BP-CCA预报模型的重要问题。上述问题有待进一步研究。

参考文献

- 陈小兰,吴洪宝,丁留贯等. 2007. 中国冬季气温的集合典型相关分析和预报. 南京气象学院学报, 30(5): 623-631
- 陈友民. 1996. 月平均大气环流变率及气候可预报性的诊断研究[D]. 北京: 北京大学
- 丁一汇,李清泉,李维京等. 2004. 中国业务动力季节预报的进展. 气象学报, 62(5): 598-612
- 范丽军,符淙斌,陈德亮. 2005. 统计降尺度法对未来区域气候变化情景预估的研究进展. 地球科学进展, 20(3): 320-329
- 何溪澄,丁一汇,何金海等. 2006. 中国南方地区冬季风降水异常的分析. 气象学报, 64(5): 594-604
- 黄茂怡,黄嘉佑. 2000. CCA对中国夏季降水场的预报试验和诊断结果. 应用气象学报, 11(1): 31-39
- 黄茂怡,黄嘉佑,王勇等. 2001. 近年来CCA在气候分析与气候预测中的应用. 北京大学学报(自然科学版), 37(1): 128-135
- 李维京,陈丽娟. 1999. 动力延伸预报产品释用方法的研究. 气象学报, 57(3): 338-344
- 李清泉,丁一汇,张培群. 2004. 一个全球海-气耦合模式跨季度汛期预测能力的初步检验和评估. 气象学报, 62(6): 740-751
- 毛恒青,李清泉. 1997. 典型相关分析(CCA)对我国冬季气温的短期气候预测试验. 应用气象学报, 8(4): 385-392
- 魏凤英. 2007. 现代气候统计诊断与预测技术(第二版). 北京: 气象出版社, 146-160
- 吴洪宝,吴蕾. 2005. 气候变率诊断和预测方法. 北京: 气象出版社, 131-145
- 严华生,孟捷,李艳. 2004. CCA与SVD分析方法比较研究. 气象学报, 62(1): 71-76
- 张礼平,丁一汇,李清泉等. 2005. 国家气候中心海气耦合模式汛期

- 降水预报的一种订正方案及其试验. 气候与环境研究, 10(2): 209-219
- Barnett T P, Preisendorfer R O. 1987. Origins and levels of monthly and seasonal forecast skill for United States surface air temperature determined by canonical correlation analysis. *Mon Wea Rev*, 115 (9): 1825-1847
- Barnston A G. 1994. Linear statistical short-term climate predictive skills in the northern hemisphere. *J Climate*, 10:1513-1564
- Barnston A G, He Y. 1996a. Skill of CCA forecasts of 3-month mean surface climate in Hawaii and Alaska. *J Climate*, 9(10): 2579-2605
- Barnston A G, Thiao W, Kumar V. 1996b. Long-lead forecasts of seasonal precipitation in Africa using CCA. *Wea Foreca*, 11: 506-520
- Barnston A G, Smith T M. 1996c. Specification and prediction of global surface temperature and precipitation from global SST using CCA. *J Climate*, 9: 2660-2697
- Busuioac A, Chen D, Hellström C. 2001a. Performance of statistical downscaling models in GCM validation and regional climate change estimates: Application for Swedish precipitation. *Int J Climatol*, 21: 557-578
- Busuioac A, Chen D, Hellström C. 2001b. Temporal and spatial variability of precipitation in Sweden and its link with the large scale atmospheric circulation. *Tellus*, 53A:348-367
- Chen D. 2000. A monthly circulation climatology for Sweden and its application to a winter temperature case study. *Int J Climatol*, 20:1067-1076
- Chen D, Chen Y. 2003. Association between winter temperature in China and upper air circulation over East Asia revealed by canonical correlation analysis. *Global Planetary Change*, 37: 315-325
- Frey-Buness A, Heinmann D, Sausen R. 1995. A statistical-dynamical downscaling procedure for global climate simulations. *Theoretical Appl Climatol*, 50:117-131
- Fuentes U, Heimann D. 1996. Verification of statistical dynamical downscaling in the Alpine region. *Clim Res*, 7: 151-168
- Fuentes U, Heimann D. 2000. An improved statistical dynamical downscaling scheme and its application to the Alpine precipitation climatology. *Theor Appl Climatol*, 65:119-135
- Goddard L, Mason S J, Zebiak S E, et al. 2001. Current approaches to seasonal-to-interannual climate predictions. *Int J Climatol*, 21:1111-1152
- Hellström C, Chen D. 2003. Statistical downscaling based on dynamically downscaled predictors: Application to monthly precipitation in Sweden. *Adv Atmos Sci*, 20: 951-958
- Huth R. 1999. statistical downscaling in central Europe: evaluation of methods and potential predictors. *Clim Res*, 13:91-101
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull Amer Meteor Soc*, 77:437-471
- Landman W A, Tennant W J. 2000. Statistical downscaling of monthly forecast. *Int J Climatol*, 20: 1521-1532
- Palmer T N, Anderson D L T. 1994. The prospects for seasonal forecasting-A review paper. *Quart J Roy Meteor Soc*, 120, 755-793
- Stockdale T N. 2000. An overview of techniques for seasonal forecasting, stochastic. *Environ Res Risk Assessment*, 14:305-318
- Wilby R L, Wigley T M L. 1997. Downscaling general circulation model output: A review of methods and limitations. *Progress Phys Geography*, 21: 530-548
- Wilby R L, Wigley T M. 2000. Precipitation predictors for downscaling: Observed and general circulation model relationships. *Int J Climatol*, 20 (5): 641-661
- Wilby R L, Dawson C W, Barrow E M. 2002. SDSM-A decision support tool for the assessment of regional climate change impact. *Environ Modeling Software*, 17: 145-157
- Zorita E, Kharin V, von Storch H. 1992. The atmospheric circulation and sea surface temperature in the North Atlantic area in winter: their interaction and relevance for Iberian precipitation. *J Climate*, 5:1097-1108