

阮能, 游庆龙, 陈翊昉, 等. 2016. ECC 方法在中国夏季气温预测研究中的应用 [J]. 气候与环境研究, 21 (2): 221–235. Ruan Neng, You Qinglong, Chen Xiaoyang, et al. 2016. Application of an ensemble canonical correlation method in summer temperature prediction over China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 21 (2): 221–235, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2015.15053.

ECC 方法在中国夏季气温预测研究中的应用

阮能^{1,2} 游庆龙^{1,2,3} 陈翊昉^{1,2} 谭桂容¹

¹ 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室, 南京 210044

² 南京信息工程大学中英气候变化与评估研究所, 南京 210044

³ 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044

摘 要 以中国夏季气温为预测对象, 选取东亚地区冬季 500 hPa 高度场、海平面气压场、地表温度场和 850 hPa 温度场为预测因子, 采用 1951~2009 年去趋势处理后的资料, 通过变形的典型相关分析 (Barnett-Preisendorfer Canonical Correlation Analysis, BP-CCA) 方法分别建立单因子预测模型, 再利用集合典型相关分析 (Ensemble Canonical Correlation, ECC) 方法建立集合预测模型, 对中国夏季气温进行基于交叉检验方法的预测试验, 然后利用 2010~2014 年的资料对中国夏季气温进行独立样本检验。通过分析 BP-CCA 模态可知, 一对 BP-CCA 模态的空间型在一定程度上可以反映预报因子场和对象场的遥相关特征。通过基于交叉检验方法的预测试验表明环流场和热力场均能为气温提供预测信息。ECC 预测模型综合了各个预报因子的在不同地区的预报技巧, 比单因子 BP-CCA 预测模型有更高、更稳定的预报技巧。独立样本检验表明 ECC 模型与单因子 BP-CCA 预测模型相比, 对中国夏季气温有更高、更稳定的实际预测能力, 对气温季节预测具有参考价值。

关键词 夏季气温 季节预测 集合典型相关分析 典型相关分析

文章编号 1006-9585 (2016) 02-0221-15

中图分类号 P456

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2015.15053

Application of an Ensemble Canonical Correlation Method in Summer Temperature Prediction over China

RUAN Neng^{1,2}, YOU Qinglong^{1,2,3}, CHEN Xiaoyang^{1,2}, and TAN Guirong¹

¹ Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

² Institute of Climate Change and Evaluation between China and United Kingdom, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

³ Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

Abstract Using geopotential height at 500 hPa, sea level pressure, surface temperature, and temperature at 850 hPa in winter over East Asia as predictors, predictability in summer temperature over China is analyzed. Based on the detrended datasets during the period 1951–2009, individual forecasting models produced separately by Barnett-Preisendorfer

收稿日期 2015-03-11; 网络预出版日期 2015-12-03

作者简介 阮能, 女, 1991 年出生, 硕士研究生, 主要从事短期气候预测研究。E-mail: ruanneng271@126.com

通讯作者 游庆龙, E-mail: qinglong.you@nuist.edu.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 41230528, 江苏省特聘教授项目 R2013T07, 江苏省杰出自然科学基金 BK20140047, 江苏高校优势学科建设工程资助项目 PAPD

Funded by National Natural Science Foundation of China (NSFC, Grant 41230528), Jiangsu Specially-Appointed Professor (Grant R2013T07), Jiangsu Natural Science Funds for Distinguished Young Scholar (Grant BK20140047), The Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions (PAPD)

canonical correlation analysis (BP-CCA) are established, and the ensemble canonical correlation (ECC) prediction based on one-year-out cross validation is used to predict the summer temperature over China during the same period. Independent sample tests are then performed based on these datasets over the period 2010–2014. Analyzing the BP-CCA mode shows that the spatial patterns of BP-CCA can in general reflect the remote correlation characteristics between predictor and predictand. By the prediction test based on one-year-out cross validation, it is confirmed that circulation and thermal fields can provide effective information for temperature prediction. Since ECC prediction collected the skill of each predictor in different areas, its skill is higher and more stable than any individual BP-CCA prediction. Compared with these individual BP-CCA models, the ECC model in the independent sample test shows a better and more stable performance in predicting summer temperature, which is effective for seasonal temperature prediction.

Keywords Summer temperature, Seasonal prediction, Ensemble canonical correlation, Canonical correlation analysis

1 引言

气候变化已成为一个全球性的问题,其导致的一系列灾害性天气气候事件对社会造成巨大的影响。夏季高温作为这些灾害性事件之一,同样受到高度关注,因此提高夏季气温预报和高温气象灾害预测的水平,对保障人民生命财产安全有重大的意义(孙建奇等, 2011)。

在统计预测方法中,陈红(2013)采用年际增量预测的方法通过多元线性回归方法建立淮河流域夏季极端降水事件的统计预测模型,该预测方法因能够放大年际信号同时再现年代际趋势,在短期气候预测中表现出较好的优势(范可等, 2007)。陈晓龙和智协飞(2014)基于 TIGGE 资料利用插值技术与回归分析,并引入多模式超级集合等方法进行了北半球地面气温统计降尺度预报研究。韩荣青等(2014)基于主成分回归(Principal Component Regression, PCR)预测方法的思想,用同年 1~5 月北半球大气环流和全球海表温度(Sea Surface Temperature, SST)场建立了东北地区夏季气温的统计预测模型。而典型相关分析(Canonical Correlation Analysis, CCA)方法既考虑现象联系又考虑成因特征而被国内外广泛应用(Barnston et al., 1996; Tomozeiu et al., 2007; 崔妍等, 2010; 杜良敏等, 2011)。但 CCA 作为单因子预报,具有一定的局限性,为此国外开始采用集合典型相关分析(Ensemble Canonical Correlation, ECC)预报, ECC 是对同一预报对象采用多个预报因子场基于 CCA 方法得到的一套预报(吴洪宝和吴蕾, 2005)。ECC 方法最先由 Lau et al. (2002) 提出,并将其应用于美国夏季降水预报中。此后 Mo (2003) 利用 ECC 方法对美国夏季和冬季的地面气温进行预报,取得了

较好的效果。国内 ECC 方法在气候预测方面的应用也有相应的研究,王蕾等(2004)、朱蒙等(2014)利用 ECC 方法研究了中国夏季降水。陈小兰等(2007)和贺晓霞等(2008)利用 ECC 方法分别对中国冬季气温和中国东南部夏季干旱指数进行了预测。王佳津等(2013)将 ECC 方法用于四川盆地日降水的预报中,取得了一定的预测效果。而将 ECC 方法用于中国夏季气温预测的研究尚少,为了给夏季气温业务预测提供依据,因此有必要进行这方面的研究。

一般用于气温预测主要考虑的因子有环流因子和热力因子。环流场在气候系统中占据非常重要的地位,气候的任何变化将在大尺度环流上有相应的体现,而环流场的变化将直接或间接影响气候要素(贾小龙等, 2010)。作为全球大尺度环流系统的重要组成部分,东亚季风环流异常不仅制约着我国气候,而且在全球气候变化中同样有着十分重要的作用(晏红明等, 2005)。梁红丽等(2010)研究表明年际尺度上冬夏季环流的变化有明显的隔季相关,冬季的大气环流变化在一定程度上会影响夏季环流的变化。众所周知, 500 hPa 位势高度场和海平面气压的变化可以表征大气环流的变化特征,从而影响到气温、降水、风场等气候要素的变化。影响季风活动的原因极其复杂,海陆分布是季风现象产生的重要因子,其热力差异的季节性变化是季风产生的原始驱动力,作为季风形成的一个重要因子,大陆的热力状况对气候变化有着非常重要的作用,地温和陆地表面气温的变化在一定程度上也代表陆地热力状况(晏红明等, 2005)。汤懋苍等(1988)研究发现中国地温与后期气候要素有密切关系,认为地温是气候预测的重要因子。晏红明等(2005)、梁红丽等(2010)发现冬季亚洲大陆热力差异与冬季风的活动有关,且会持续影响到东

亚夏季风, 进而影响中国夏季气候。由于冬季风的爆发过程就是北方冷空气向南推进的过程, 会伴随着气温的下降, 因此气温距平在很大程度上也反映了冬季风的强弱。此外, 就环流形势而言, 东亚冬季风强度高层主要表现为 500 hPa 东亚大槽和低层地面蒙古冷高压的强弱变化 (晏红明等, 2003)。因此, 本文选取前冬东亚地区 500 hPa 高度场、海平面气压、地表温度和 850 hPa 温度场为预报因子, 然后分别用变形的典型相关分析 (Barnett-Preisendorfer Canonical Correlation Analysis, BP-CCA) 和 ECC 方法建立中国夏季气温的单因子预测模型和集合预测模型, 其中集合预测模型中各成员的权重系数用多元线性回归方法确定。比较单因子和多因子集合预测模型对中国夏季气温的预报技巧, 考察 ECC 方法的预测能力, 以期为中国夏季气温预测业务提供依据。

2 资料与方法

预测对象为中国夏季气温, 所用到的站点资料来自国家气候中心提供的中国区域 160 站 1951~2014 年 6~8 月月平均气温时间序列, 可以得到每个站点的夏季平均气温 (每年 6、7、8 月气温的平均值) (黎洛丝等, 2010)。预测因子选取 4 个, 分别为 500 hPa 位势高度场 (Z500)、地表温度场 (Ts)、850 hPa 温度场 (T850) 和海平面气压场 (SLP), 选取区域为东亚地区 (10°N~60°N, 70°E~150°E), 因为要建立预测关系, 预测因子场的实际时间应在预测对象场之前, 所以预测因子场采用美国 NCEP/NCAR 发布的水平分辨率为 2.5° (纬度) × 2.5° (经度) 的 1950~2013 年冬季 (每年的 12 月和次年的 1、2 月) 月平均全球再分析资料 (Kalnay et al., 1996), 其中冬季的年份由 12 月所在的年份确定。

文中采用 BP-CCA 方法, 分别建立 4 份预测对象与预测因子的单因子 BP-CCA 预测模型, 然后利用 ECC 集合 4 份单因子预测建立集合预测模型。预测因子场和预测对象场在建模和独立样本检验前均进行了去趋势处理, 以去除两场在年代际尺度上的线性趋势。建立的一个预测方法是否实用, 要估计方法的预测技巧, 估计预测技巧的方法采用交叉验证 (one-year out cross validation), 即每次预测方程由所有可用资料中去掉第 M 年的资料建立, 然后将保留的第 M 年的预测因子资料代入预

测方程进行预测, 而保留的第 M 年的预测对象资料作为观测值, 重复以上过程, 使 M 取遍所有的年份, 最后得到预测值和观测值序列, 按这样的方法, 则样本检验是相对独立的, 预测检验的结果接近实际预测情况, 而不是事后预测 (贾小龙等, 2010)。

2.1 单因子典型相关分析法

CCA 能识别出两个场或两个随机变量之间在时间上相关的模态, 其基本思想是分别在两组随机变量间做线性组合, 构成各自有代表性的综合变量, 使两组间成对的综合变量的相关系数达到最大、次大……, 这种综合变量称为典型相关变量, 然后通过典型相关变量间的相关系数代替原来两个场之间的相关关系。由于 CCA 识别出的模态数很多, 导致反应的信息不集中。本文采用 BP-CCA, BP-CCA 是在对两个场做主成分分析基础上的 CCA, 即先用经验正交函数 (Empirical Orthogonal Function, EOF) 分析方法对资料进行预过滤后再进行 CCA 步骤。这样经过 EOF 分析后, 能够提取场的时空变化的主要信息, 消除一些小尺度的变化或噪声的影响, 此外还能降低维数, 减小矩阵运算的阶数 (吴洪宝和吴蕾, 2005)。

2.2 集合典型相关分析

本文采用回归集合平均建立集合预测。回归集合平均与集合的成员应满足以下线性关系 (陈小兰等, 2007):

$$\hat{\mathbf{Z}}_{j,t} = \sum_{m=1}^M \left(\mathbf{b}_{m,j} \mathbf{Z}_{j,t,m}^{\wedge} \right), \quad (1)$$

其中, $\hat{\mathbf{Z}}_{j,t}$ 为第 j 个格点、第 t 个时次的集合平均预报; 对于第 m 个因子场, $\mathbf{Z}_{j,t,m}^{\wedge}$ 是第 j 个格点、第 t 个时次通过 BP-CCA 方法得到的预测值, 其在集合预测中为回归因子, 集合平均预测值 $\hat{\mathbf{Z}}_{j,t}$ 是回归对象; $\mathbf{b}_{m,j}$ 是回归系数, 采用多元线性回归方法 (徐士良, 1995) 确定, 即根据最小二乘法原则, 使集合平均预报 $\hat{\mathbf{Z}}_{j,t}$ 与对应的实测值 $\mathbf{Z}_{j,t}$ 在训练期的误差的方差 V_j 最小, V_j 表示为

$$V_j = \sum_{t=1}^N \left(\hat{\mathbf{Z}}_{j,t} - \mathbf{Z}_{j,t} \right)^2. \quad (2)$$

2.3 预测评估参数

本文选取了几种评估参数来检验预测模型的预测效果。这几种评估参数分别为距平相关系数 (Anomaly Correlation Coefficient, ACC)、距平同号

率 (Percentage of the same anomaly sign, P) 和预测评分 (Prediction score, S_p)。ACC 是国际上常用的用于检测预报效果的方法, 是预测距平场和实测距平场之间的相关系数, 空间场的平均距平相关系数可以反映系统整体的预测效果 (李清泉等, 2004)。 P 以百分率的形式表现预报与实况的相似程度, 是过去我国长期天气预报中用来检验的一种有效方法 (何慧根等, 2014)。 S_p 立足于对大范围距平趋势预测能力的评估, 是中国业务预测常用的评分方法 (陈桂英和赵振国, 1998)。

3 中国夏季气温的变率特征

对中国 1951~2014 年夏季平均气温标准化距平场进行 EOF 分解, 并将时间系数标准化、空间型乘以特征值的平方根, 得到的空间型的值就是气温距平序列与对应时间序列的相关系数, 其平方值为该模态对应站点上标准化距平场的方差贡献率 (陈小兰等, 2007)。第一模态的方差贡献率为 33.9%, 由图 1a 可以看出, 空间型在整个中国区域均为正值, 表现为中国夏季气温变化全区一致的特征。在

青藏高原、黄河流域、内蒙古以及东北的西南部, 空间型的值在 0.6 以上, 表明 EOF 第一模态能解释这一带地区气温距平局地方差的 36% 以上。而在中国西北和南部部分地区空间型的值较小, 在 0.3 以下。结合其 EOF 时间系数序列 (图 1b) 可知, 中国夏季气温总体有上升的趋势, 但在 20 世纪 90 年代之前, 气温无明显的上升趋势, 基本上在低值区波动。20 世纪 90 年代中期开始, 气温表现出明显的上升趋势, 到 21 世纪初期, 气温基本在高值区波动, 且波动振幅较小。第二模态的方差贡献率为 14.4%, 空间型在中国区域表现出北负南正的分布, 即南北反位相的特征, 其中大值区位于东北地区、长江流域及其周围地区, 绝对值最大可达 0.6, 表明 EOF 第二模态能解释这一带地区气温距平局地方差的 36% 以上。结合对应的时间系数序列来看, 20 世纪 60 年代至 21 世纪初期中国夏季气温北部总体有上升趋势、南部有下降趋势。结合 EOF 第一、二模态来看, 从 1951~2014 年中国夏季气温在北部地区有明显的上升趋势, 相比而言南部地区上升趋势较小, 这与周鑫 (2013) 的研究结果较为一致。

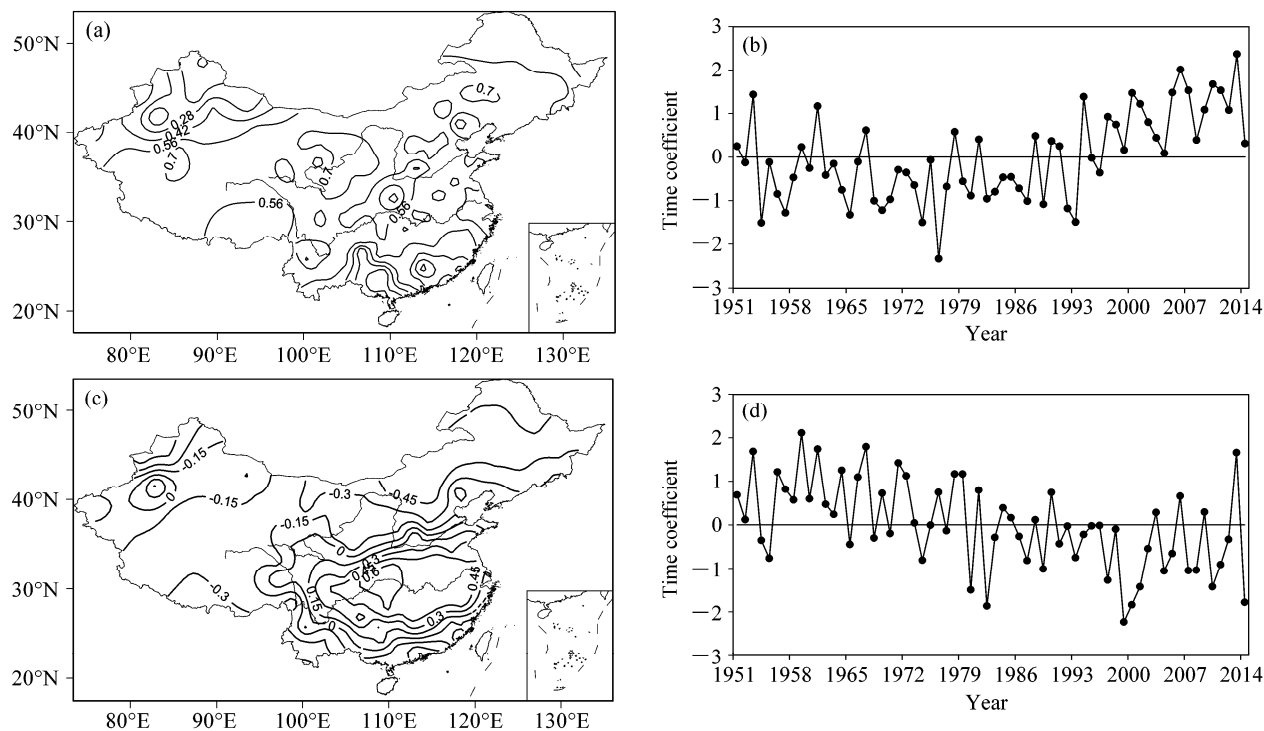


图 1 1951~2014 年中国夏季气温标准化距平场 EOF 分解 (a) 第一模态空间型及其 (b) 时间系数序列、(c) 第二模态空间型及其 (d) 时间系数序列

Fig. 1 (a) First Empirical Orthogonal Function (EOF) spatial pattern and (b) the corresponding standardized amplitude, (c) second EOF spatial pattern and (d) the corresponding standardized amplitude for standardized summer temperature anomaly field over China during 1951–2014

4 预报技巧来源

由于 ECC 预测是集合多个单因子 BP-CCA 预测信息所得, 通常使用预测对象场与预测因子场之间的 CCA 模态来表示该预测因子场的预测技巧来源 (吴洪宝和吴蕾, 2005)。一对 CCA 模态的空间型 (或 CCA 载荷型) 分别是预报因子场各格点序列与对应模态的典型相关系数之间的相关系数和预报对象场各站点序列与对应模态的典型相关系数之间的相关系数, 即两场的空间相关分布模态, 相当于奇异值分解 (Singular Value Decomposition, SVD) 中的一对同类相关图, 它们在一定程度上可以反映两场的遥相关特征。一对 CCA 模态的时间系数序列分别为预报因子场和对象场对应模态的典型相关变量, 可以反映出它们时间变化的同步性 (贺晓霞等, 2008)。下面通过分析前冬环流因子 (500 hPa 高度场和海平面气压场)、热力因子 (地表温度和 850 hPa 温度场) 分别与中国夏季气温的 CCA 第一模态来揭示预测因子场与对象场之间的内在联系以及可能的物理机制讨论。

4.1 环流因子

图 2 为冬季 500 hPa 高度场和中国夏季气温的 CCA 第一模态的载荷型。500 hPa 位势高度场和中国夏季气温的 CCA 第一模态解释了两场总协同变率的 26.43%，对应模态的典型相关系数为 0.83。500 hPa 位势高度场的 CCA 第一模态载荷型（图 2a）基本为正载荷，表明 500 hPa 高度场在东亚地区为正距平，对应中国夏季气温场的 CCA 模态载荷型（图 2b）可以看出夏季气温距平场以 35°N 为界南北反位相变化的特征，即北低南高的分布型。东亚冬季 500 hPa 高度场和中国夏季气温这一对 CCA 模态表明，当东亚大槽偏弱时，对应中国夏季气温以 35°N 为界，北部地区气温偏低，南部地区气温偏高的分布型。结合其时间系数演变曲线（图 2c）可看出两场时间系数变化趋势较一致，可以说明前冬东亚 500 hPa 高度场与我国夏季气温对应关系较好。

图 3 为冬季海平面气压场和中国夏季气温的 CCA 第一模态的载荷型。冬季海平面气压场和中国夏季气温的 CCA 第一模态解释了两场总协同变率的 22.10%，对应模态的典型相关系数为 0.88。冬季

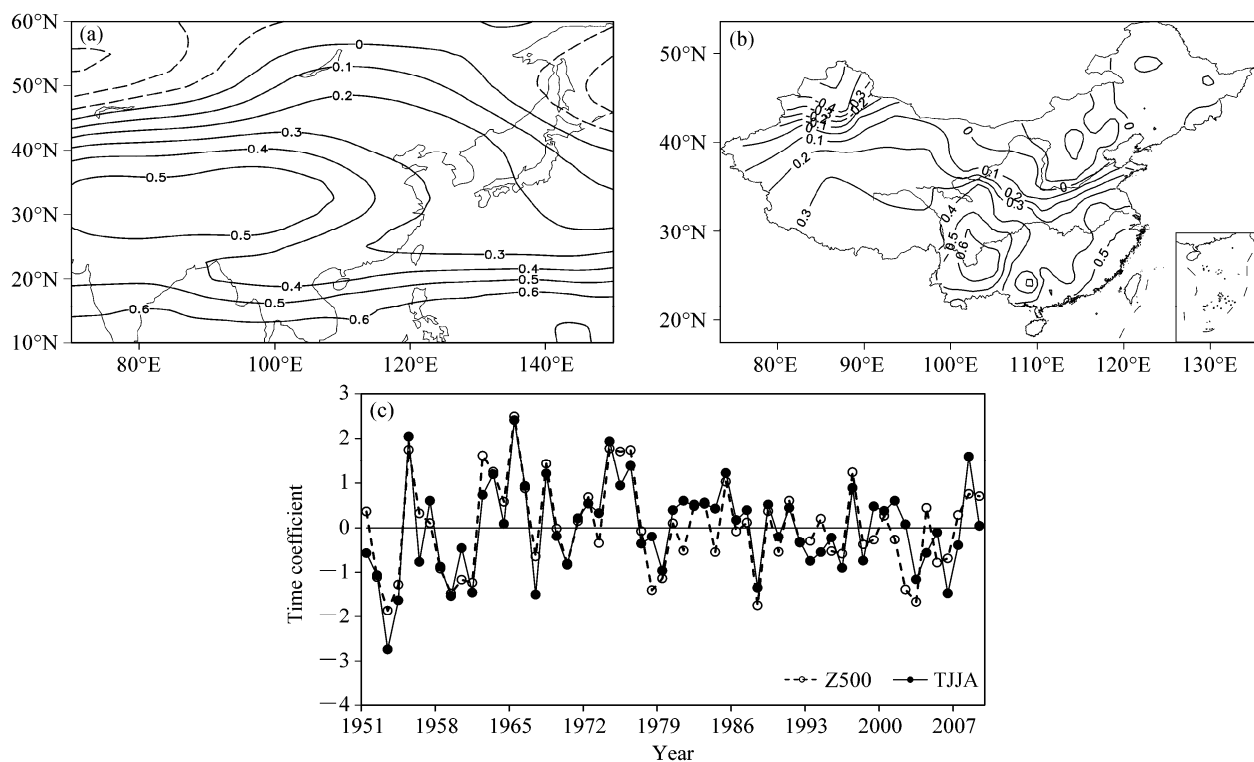


图2 (a) 东亚冬季 500 hPa 高度场 (Z500) 和 (b) 中国夏季气温 (TJJA) 第一个 BP-CCA 模态的空间型及 (c) 第一个 BP-CCA 模态的时间系数序列

Fig. 2 (a) The first spatial pattern of BP-CCA mode for winter geopotential height at 500 hPa (Z500) over East Asia, (b) the first spatial pattern of BP-CCA mode for summer temperature (TJJA) over China and (c) the first BP-CCA time coefficient series of winter Z500 over East Asia and summer temperature over China

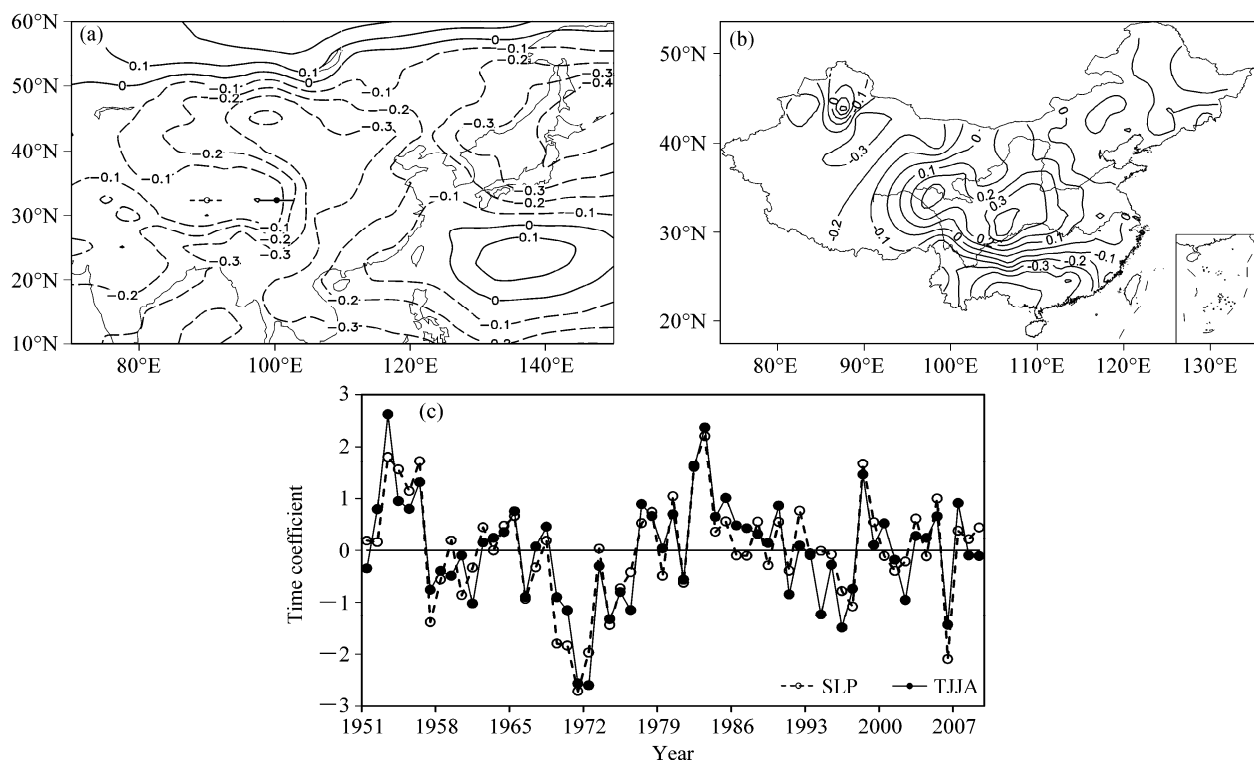


图 3 (a) 东亚冬季海平面气压场 (SLP) 和 (b) 中国夏季气温 (TJJ) 第一个 BP-CCA 模态的空间型及其 (c) 第一个 BP-CCA 模态时间系数序列

Fig. 3 (a) The first spatial pattern of BP-CCA mode for winter sea level pressure (SLP) over East Asia, (b) the first spatial pattern of BP-CCA mode for summer temperature (TJJ) over China and (c) the first BP-CCA time coefficient series of winter SLP over East Asia and summer temperature over China

海平面气压场的 CCA 第一模态载荷型 (图 3a) 在中纬度地区基本为负载荷, 表明海平面气压场在东亚地区为负距平, 对应中国夏季气温场的 CCA 模态载荷型 (图 3b) 可以看出, 中国夏季气温距平场表现出从黄河流域至长江流域之间的地区与其余地区位相相反的分布型。东亚冬季海平面气压场和中国夏季气温这一对 CCA 模态表明, 当冬季蒙古高压偏弱时, 对应黄河流域至长江流域之间的地区夏季气温偏高、全国其余地区夏季气温偏低的分布特征。结合其时间系数演变曲线 (图 3c) 可看出两场时间系数匹配较好, 可以说明前冬东亚海平面气压场与我国夏季气温有较好的相关性。

由于东亚冬、夏季风之间存在隔季相关, 冬季大气环流异常可以持续影响夏季大气环流变化 (孙淑清和陈隽, 2005), 这也许可以解释环流因子与中国夏季气温之间遥相关型的可能机制。晏红明等 (2003) 在研究东亚冬季风与中国夏季气候变化时指出, 东亚冬季风强度高层主要表现为 500 hPa 东亚大槽和低层地面蒙古高压的强弱变化, 前冬为弱

冬季风的夏天, 孟加拉湾和南海西南夏季风以及东亚副热带季风减弱, 夏季风向北扩展的纬度较低, 而东亚中高纬地区冷空气的活动相对比强冬季风年夏季冷空气偏强且向南伸展到较低的纬度。此外, 东亚冬季风的异常活动对后期海温变化以及与之相联系的夏季风活动有重要作用。因此环流因子与夏季气温的遥相关特征可以通过冬季风—夏季风这种隔季相关的机制进行一定的解释。

4.2 热力因子

图 4 为冬季地表气温和中国夏季气温的 CCA 第一模态的载荷型。冬季地表气温和中国夏季气温的 CCA 第一模态解释了两场总协同变率的 20.40%, 对应模态的典型相关系数为 0.92。冬季地表气温的 CCA 第一模态空间型 (图 4a) 正载荷大值区主要位于南亚以西地区, 其余地区载荷较小。对应中国夏季气温场的 CCA 模态载荷型 (图 4b) 可以看出中国区域基本为正载荷, 表现为整体位相一致, 表明中国夏季气温距平场基本为正。东亚冬季地表温度场和中国夏季气温的这一对 CCA 模态表明, 当

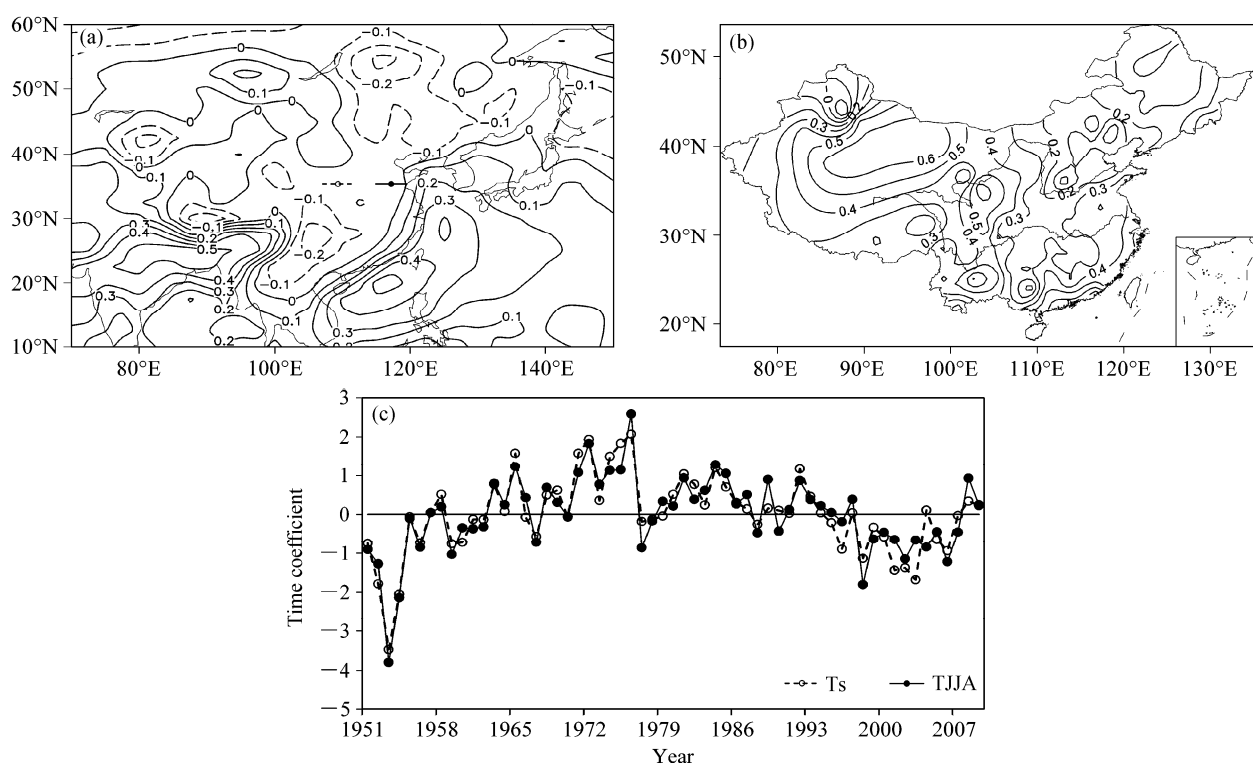


图4 (a) 东亚冬季地表温度场(Ts)和中国夏季气温(TJJA)第一个BP-CCA模态的空间型以及(c)第一个BP-CCA模态的时间系数序列

Fig. 4 (a) The first spatial pattern of BP-CCA mode for winter surface temperature (Ts) over East Asia, (b) the first spatial pattern of BP-CCA model for summer temperature (TJJA) over China and (c) the first BP-CCA time coefficient series of winter surface temperature over East Asia and summer temperature over China

南亚西部地区地表温度偏高、其余地区偏低时,对应中国夏季气温整体偏高的分布特征。结合其时间系数演变曲线(图4c)可看出两场时间系数变化趋势较一致,可以说明前冬东亚地表温度场与我国夏季气温对应关系较好。

图5为冬季850 hPa温度场和中国夏季气温的CCA第一模态的载荷型。冬季850 hPa温度场和中国夏季气温的CCA第一模态解释了两场总协同变率的18.92%,对应模态的典型相关系数为0.87。冬季850 hPa温度场的CCA第一模态载荷型(图5a)表现为北负南正的分布形势。其中负载荷大值区位于南亚西部地区,对应中国夏季气温场的CCA模态载荷型(图5b)可以看出,中国区域基本为负载荷,表现为整体位相一致,表明中国夏季气温距平大部分为负。东亚冬季850 hPa气温场和中国夏季气温的这一对CCA模态表明,当冬季南亚西部地区低层850 hPa气温偏低时,对应中国夏季气温整体偏低。结合其时间系数演变曲线(图5c)可看出,两场时间系数变化趋势较一致,可以说明前冬东亚

850 hPa温度场与我国夏季气温对应关系较好。

对于热力因子与夏季气温这种遥相关特征的可能机制,晏红明等(2005)研究表明亚洲冬季地面热力状况与冬季风活动有关,并用EOF方法分析了亚洲冬季地面气温的时空特征,发现第二模态表明东北亚(30°N~50°N, 100°E~130°E)和南亚地区(15°N~30°N, 75°E~100°E)的地面气温有反相变化的特征,且这种南亚东北亚的热力差特征与亚洲夏季风强弱有非常好的对应关系,籍此定义了一个大陆冬季南亚—东北亚热力差指数。梁红丽等(2010)通过研究该热力指数发现在正指数年代,在经向上从冬至夏东亚大陆由冷变暖,25°N以北中高纬度对流层高层有气温正距平下传,纬向上高原东侧我国大陆地区春夏季迅速增温。相比之下,海洋上的热力变化不明显,一直维持负距平,海陆热力差异偏大,东亚初夏季风建立偏早,夏季风强度偏强;相反地,负指数年代海陆热力差异的变化将会减弱海陆之间的热力对比,不利于初夏季风的建立和夏季风加强。而夏季风的异常意味着夏

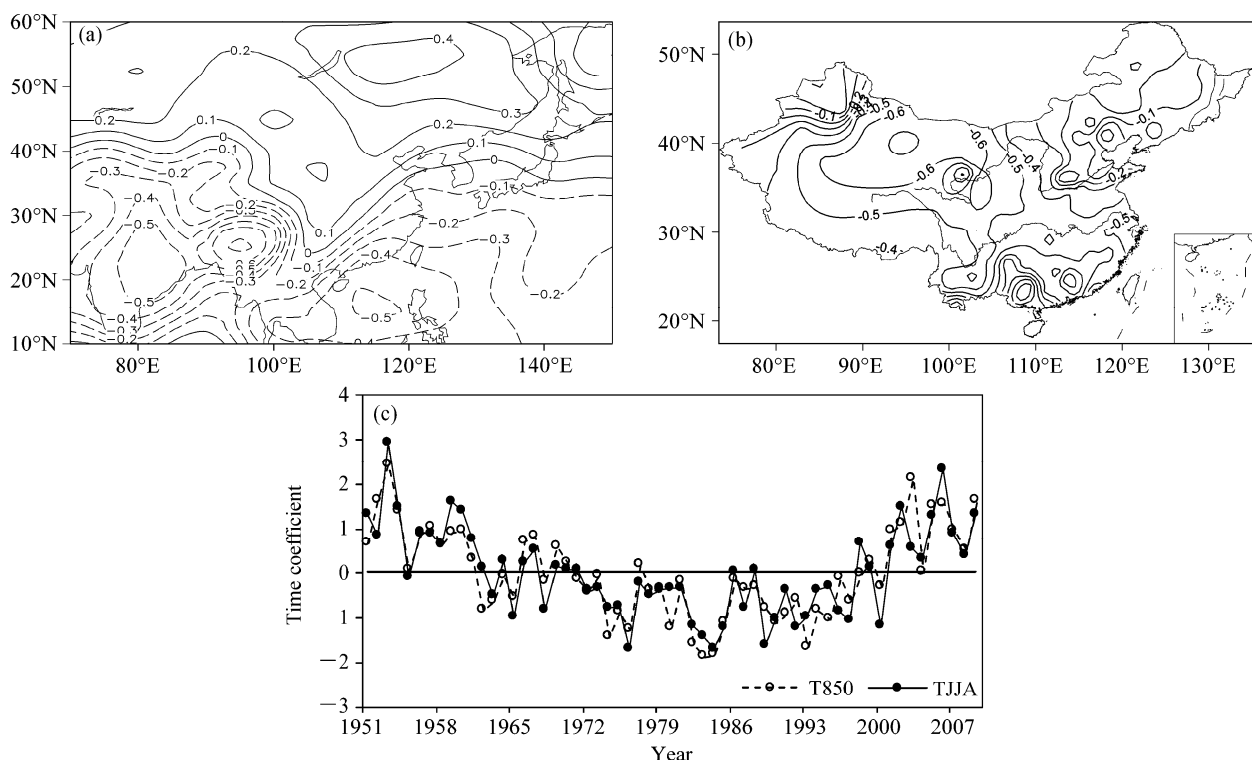


图5 (a) 东亚冬季 850 hPa 气温场 (T850) 和 (b) 中国夏季气温 (TJJA) 第一个 BP-CCA 模态的空间型以及 (c) 第一个 BP-CCA 模态时间系数序列
Fig. 5 (a) The first spatial pattern of BP-CCA mode for winter temperature at 850 hPa (T850) over East Asia, (b) the first spatial pattern of BP-CCA mode for summer temperature (TJJA) over China and (c) the first BP-CCA time coefficient series of winter temperature at 850 hPa over East Asia and summer temperature over China

季环流的异常,因此前冬东亚地表温度的异常会影响到夏季气温,本文中地表温度场的 CCA 第一模态空间型就是对应的正指数年代的温度分布。此外,晏红明等(2005)的研究发现在正指数年代,南亚地区冬季高低层气温距平的垂直结构是一致的,即地表温度距平为正时,850 hPa 温度距平也为正。本文中 850 hPa 温度场的 CCA 第一模态空间型就是对应的负指数年代的温度分布,因此前冬 850 hPa 温度场、地表温度场与夏季气温的遥相关特征都能通过这一机制进行一定的解释。

5 基于交叉验证的预测试验

首先利用去趋势后的 1951~2009 年的样本资料通过 BP-CCA 和 ECC 方法建立气温预测模型,再利用这 59 年的资料通过交叉验证进行预测试验,并利用距平相关系数 (ACC)、距平同号率 (P) 和预测评分 (S_p) 3 个评估参数检测模式的预报效果。在对中国夏季气温和各个预测因子场进行 EOF 分析时,截取 EOF 前几个模态使累计方差贡献率超过

80%。其中,中国夏季气温取前 9 个模态,500 hPa 位势高度场取前 13 个模态,地表温度场取前 20 个模态,850 hPa 温度场取前 20 个模态,海平面气压场取前 14 个模态。建立预测关系时,CCA 模态均取前 9 个,使解释两场的总同变率达到 90%以上。

将通过 BP-CCA 方法和 ECC 方法得到的中国 160 站各站在 1951~2009 年的夏季气温距平预测场与观测场求相关,可得中国 160 站的空间 ACC,并得到 160 站 ACC 的平均值,即平均 ACC,它可以反映系统整体的预报技巧。分析得到 500 hPa 高度场、海平面气压场、地表温度场和 850 hPa 温度场的平均 ACC 分别为 0.37、0.38、0.45 和 0.40,可知在交叉检验的方法下,地表温度场具有较高的预报技巧,其次为 850 hPa 温度场。图 6 的阴影区为距平相关系数通过 95%信度 t 检验的地区,分析图 6 可知,4 个单因子 BP-CCA 预测得到的距平相关系数场基本均为正值,表明预测场与观测场之间为正相关,具有实际意义。500 hPa 高度场对应的距平相关系数场通过 95%信度检验的区域主要在中国中部以及西北部分地区,其中距平相关系数最大可

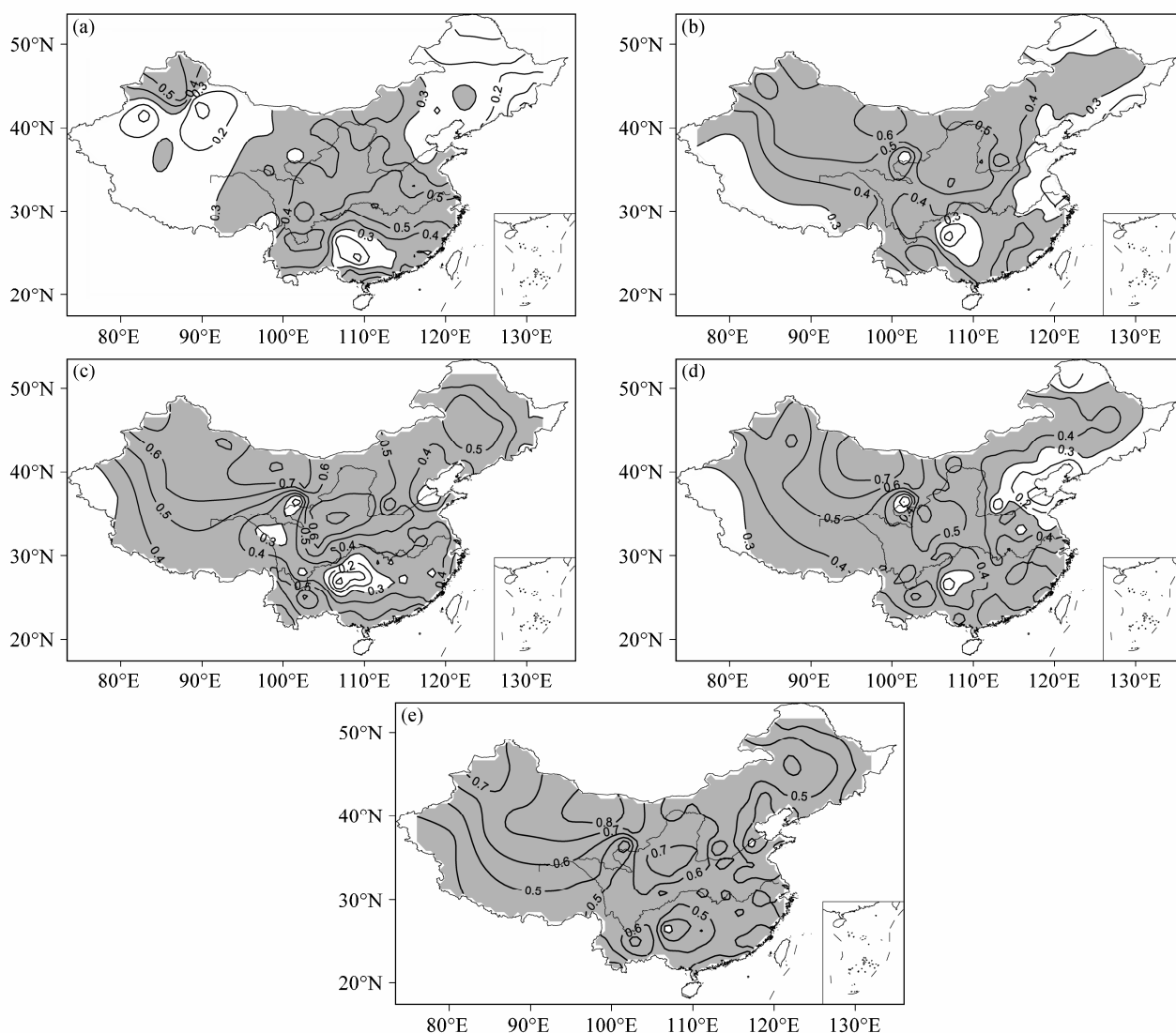


图 6 基于以 (a) 500 hPa 高度场、(b) 海平面气压场、(c) 地表温度场、(d) 850 hPa 温度场为预测因子的 BP-CCA 方法和 (e) ECC 方法得到的 160 站 1951~2009 年夏季气温距平预测场与观测场之间相关系数 (ACC) 的空间分布。阴影区通过 95% 信度的 t 检验

Fig. 6 Spatial distributions of temporal anomaly correlation coefficient between summer temperature anomaly predicted fields and observations at 160 stations during 1951–2009 with BP-CCA methods using (a) geopotential height at 500 hPa, (b) sea level pressure, (c) surface temperature, and (d) temperature at 850 hPa as predictors and (e) with ECC method. Shadings pass t test at 95% confidence level

达 0.5~0.6 左右, 位于长江中下游地区及西北部分地区, 表明 500 hPa 高度场在这些地方的预报技巧较高。与 500 hPa 高度场相比, 海平面气压场对应的距平相关系数场通过 95% 信度检验的区域较大, 除了西藏的西南部、贵州以及东部沿海和东北的部分地区未通过检验, 其余地区基本均通过 95% 信度检验, 其中距平相关系数最大可达 0.5~0.6 左右, 位于西北地区 and 黄河流域中部, 表明海平面气压场在这些地方的预报技巧较高。而地表温度对应的距平相关系数场通过 95% 信度检验的区域更大, 除了在贵州和新疆等部分地区未通过 95% 信度检验, 中

国其余地区基本均通过检验。其中距平相关系数最大可达 0.7~0.8 左右, 位于西北地区 and 甘肃等地, 表明地表温度在这些地方有较高的预报技巧。850 hPa 温度对应的距平相关系数场通过 95% 信度检验的区域与地表气温的相比稍小, 除了在西藏的西南部分地区和渤海周围地区未通过 95% 信度检验, 其余区域基本均通过了检验, 其中距平相关系数最高可达 0.7~0.8 左右 (位于西北等地)。综上可以看出不同的预报因子在不同地区其预报技巧不同。将单因子 BP-CCA 预报与 ECC 预报对比, ECC 预报对应的距平相关系数场均通过了 95% 信度检验。此

外, ECC 方法得到的平均距平相关系数为 0.54, 比 4 个单因子预报的平均距平相关系数均高。通过分析图 6 e 可知, 除了西藏的西南部分地区、贵州以及东北、山东等地, 中国大部分地区的相关系数均在 0.5 以上, 相关系数最大可达 0.8 以上 (位于西北地区), 表明 ECC 方法能综合多个预测因子在不同地区的预报技巧, 故在中国大部分地区均有较高的预报技巧。与 4 个单因子场的预测效果相比, 多因子集合的 ECC 预报效果整体有一定提升。

将通过基于交叉检验的单因子 BP-CCA 方法和 ECC 方法得到的 1951~2009 年每年的中国 160 站夏季气温距平预测场与观测场求相关, 得到 1951~2009 年的空间距平相关系数的时间序列。如图 7 中虚线所示, 首先分析 4 个单因子 BP-CCA 预测, 可知 500 hPa 高度场、海平面气压场、地表温度和 850 hPa 温度场的相关系数在大多数年份均为正值, 预报效果较为稳定, 当相关系数为负值时说明这些年份的预测场与观测场距平符号相反, 预报效果不佳。图中直实线对应 95% 信度单侧 t 检验的临界值, 500 hPa 高度场、海平面气压场、地表温度场和 850

hPa 温度场 4 个单因子 BP-CCA 预报对应的距平相关系数时间序列通过检验的年份数分别为 42、49、50 和 45 年, 可以看出地表温度场通过检验的年份最多, 表明地表温度场的预报技巧较高。为了对比 BP-CCA 与 ECC 预报效果的差异, 将 ECC 预报对应的距平相关系数时间序列分别叠加在 4 个单因子 BP-CCA 图中, 如图 7 实线所示, ECC 预报对应的距平相关系数在所有年份均为正值, 基本上在 0.1 以上, 最高可达 0.8, 表明预测场与观测场在所有年份有很好的正相关, 预报效果较好。此外, 相关系数在大多数年份均通过了 95% 的信度检验, 只有 5 年未通过。由图 7a~7d 可知, 与 4 个因子相比, ECC 预测对应的相关系数在所有年份均有一定的提升, 尤其对于 500 hPa 高度场、海平面气压场和 850 hPa 温度场而言, 预报技巧有较大幅度的提高, 表明 ECC 的预报技巧比单因子预报更高、更稳定。此外还可以看出, 地表温度场的时间相关系数变化趋势与 ECC 的最为相似、差异最小, 说明 4 个因子中地表温度场的预报技巧较高。

图 8、9 分别为 1951~2009 年 4 个单因子

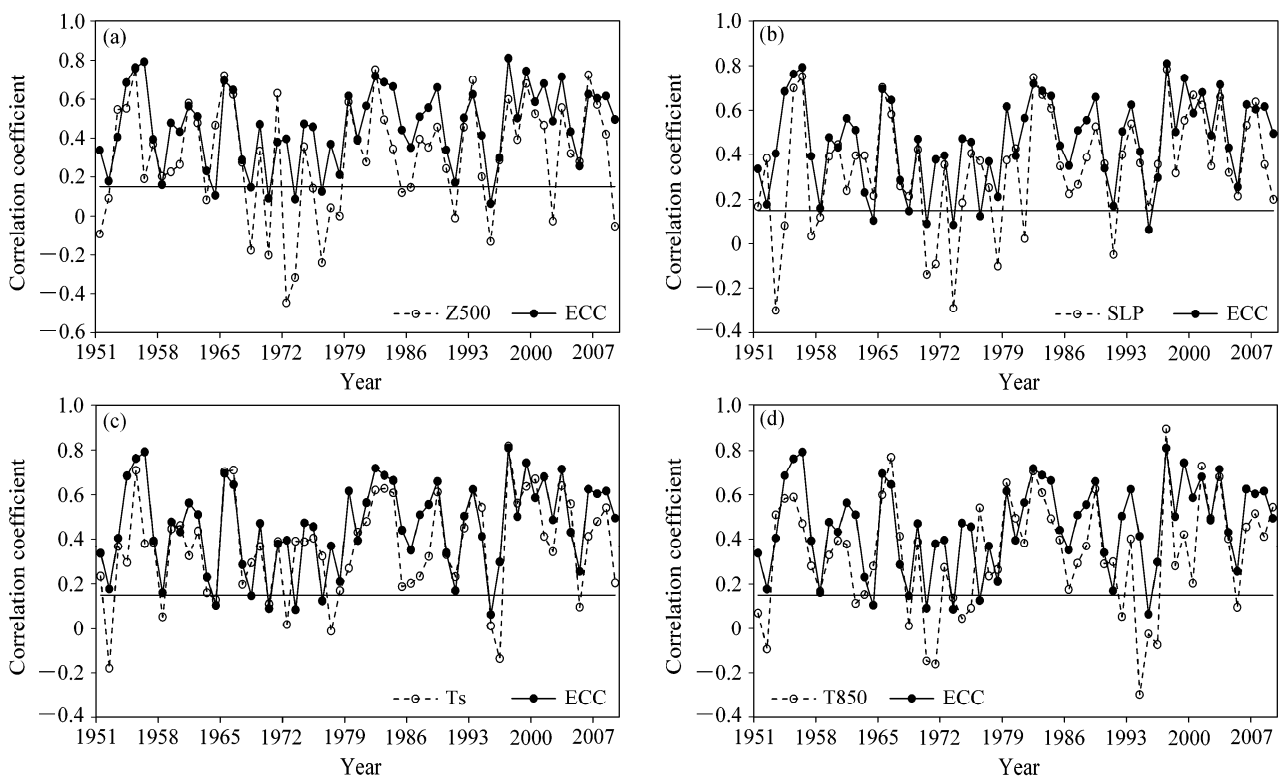


图 7 基于以 (a) 500 hPa 高度场、(b) 海平面气压场、(c) 地表温度场、(d) 850 hPa 温度场为预测因子的 BP-CCA 方法与 ECC 方法得到 160 站夏季气温距平的预测场与观测场相关系数 (ACC) 的时间序列。实线以上的部分 ($r \geq 0.15$) 通过 95% 信度 t 检验

Fig. 7 Time series of spatial anomaly correlation coefficients between summer temperature anomaly predicted fields and observations at 160 stations during 1951–2009 with BP-CCA method using (a) geopotential height at 500 hPa, (b) sea level pressure, (c) surface temperature, (d) temperature at 850 hPa as predictors and ECC method. Above solid lines ($r \geq 0.15$) pass t test at 95% confidence level

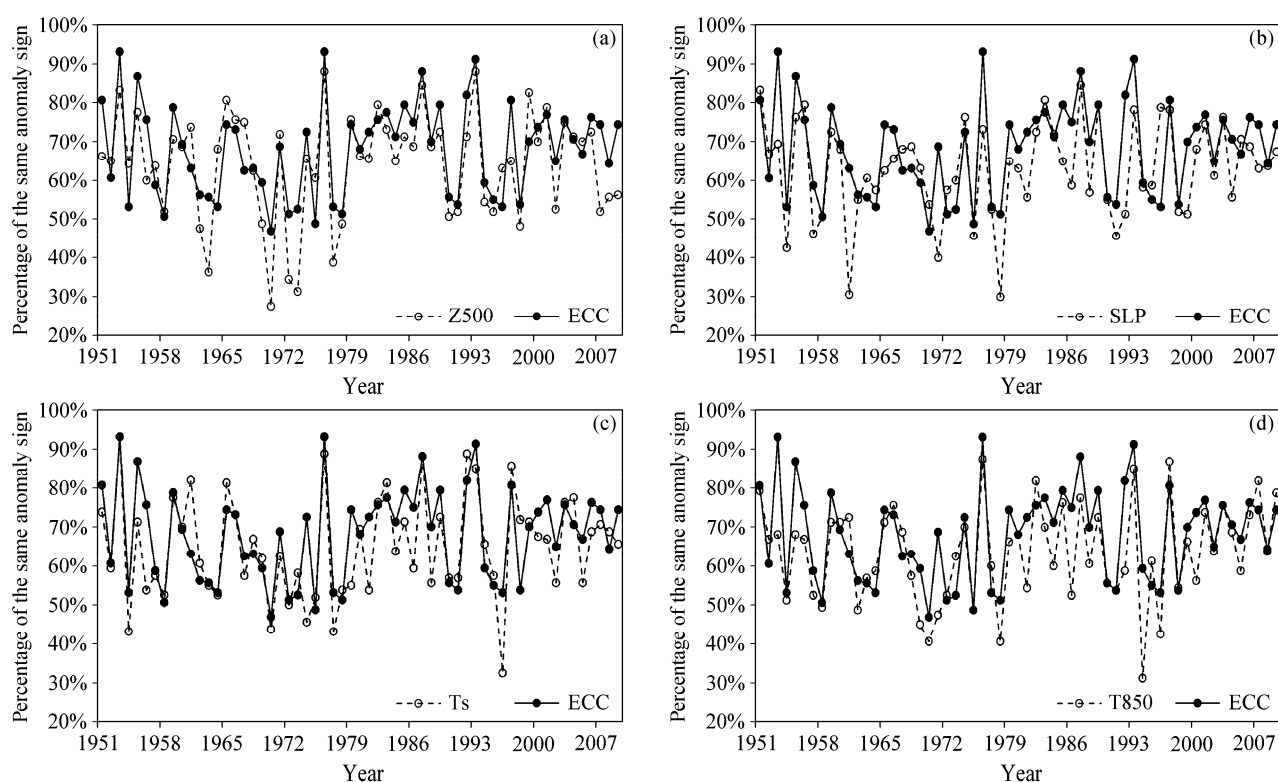


图 8 基于以 (a) 500 hPa 高度场、(b) 海平面气压场、(c) 地表温度场、(d) 850 hPa 温度场为预测因子的 BP-CCA 方法与 ECC 方法得到的 160 站 1951~2009 年夏季气温预测场与实测场的距平同号率 P

Fig. 8 Time series of percentage of the same anomaly sign (P) between summer temperature predicted fields and observations at 160 stations during 1951–2009 with BP-CCA method using (a) geopotential height at 500 hPa, (b) sea level pressure, (c) surface temperature, and (d) temperature at 850 hPa as predictors separately and ECC method

BP-CCA 预测和 ECC 预测所得的距平同号率 P 和预测评分 S_p 时间序列, 可以看到 4 个单因子 BP-CCA 的距平同号率大多数年份均在 50% 以上, 说明单因子 BP-CCA 对气温预报有一定的预报技巧。为了对比 BP-CCA 与 ECC 预报效果的差异, 将 ECC 预报对应的距平同号率 P 和预测评分 S_p 时间序列分别叠加在 4 个单因子 BP-CCA 图中 (如图 8、9 实线所示)。对比 ECC 预报可知, 热力因子 (地表温度场和 850 hPa 温度场) 与 ECC 预报的结果差异较小, 尤其是地表温度场的时间相关系数变化趋势与 ECC 的差异最小, 说明 4 个因子中地表温度场的预报技巧较高。集合多因子的 ECC 预报对应的距平同号率在所有年份基本均在 50% 以上, 比所有的单因子的都高, 最高可达 93%。从图 8 可以看到在 20 世纪 80 年代左右, 与环流因子 (500 hPa 高度场、海平面气压场) 相比, ECC 预报效果有较好地提升。在 20 世纪 90 年代左右, 与热力因子 (地表温度场、850 hPa 温度场) 相比, ECC 预报效果也有一定的提升, 这些都表明了 ECC 预报比单因子的预报效

果更高、更稳定。

从图 9 可知, 1951~2009 年 4 个单因子 BP-CCA 的预测评分基本上均在 80 分以上, 表明单因子 BP-CCA 对气温预报均有一定的预报技巧。对比单因子 BP-CCA 与 ECC 预测可以得出, ECC 的预测评分基本上高于 4 个单因子的得分, 尤其在 20 世纪 80、90 年代, ECC 预测效果明显要好于单因子 BP-CCA。此外, ECC 预测对应的技巧评分与地表温度场的变化趋势差异最小, 反映出单因子预报中地表温度场的预报效果较好。综合距平同号率和预测评分来看, 与 BP-CCA 相比, ECC 的预测效果更高更稳定, 有一定的优越性。

6 独立样本检验

为了检测 ECC 模式的实际预报能力, 将前面用 1951~2009 年去趋势后的样本资料建立的 BP-CCA 和 ECC 预测模型, 用于预报后 5 年 (2010~2014 年) 的中国夏季气温, 由于后 5 年的样本资料

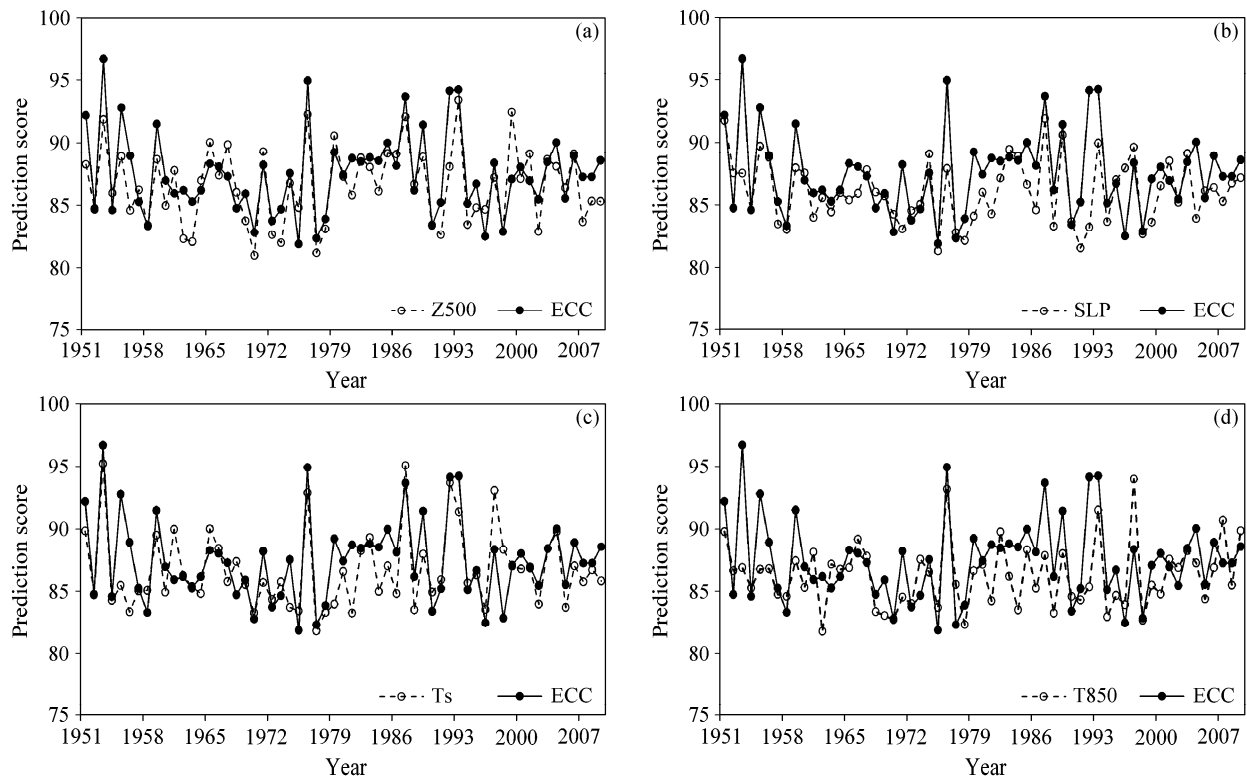


图9 基于以(a) 500 hPa 高度场、(b) 海平面气压场、(c) 地表温度场、(d) 850 hPa 温度场为预测因子的 BP-CCA 方法与 ECC 方法预测的 160 站 1951~2009 年夏季气温的预测评分 S_p

Fig. 9 Time series of prediction score (S_p) of summer temperatures at 160 stations during 1951–2009 predicted by BP-CCA method using (a) geopotential height at 500 hPa, (b) sea level pressure, (c) surface temperature, and (d) temperature at 850 hPa as predictor separately and ECC method

并没有参与建立预测模型,从而认为这是独立样本检验,相当于实际预测。通过对比单因子 BP-CCA 与 ECC 的预测效果,来考察 ECC 在实际预测中是否具有优越性。从 4 个单因子 BP-CCA 预测对应的空间平均距平相关系数(表 1)来看,4 个单因子 BP-CCA 预测对应的平均 ACC 均为正,海平面气压场的预报技巧较高,地表温度次之,可以说明单因子 BP-CCA 预测模型均具有一定的预测技巧。与 4 个单因子 BP-CCA 预测相比, ECC 的平均 ACC 最高,表明 ECC 预测效果有显著的提升,集合多因子的 ECC 预测模型预报效果一般要好于单因子 BP-CCA 预测模型。对比 4 个单因子 BP-CCA 预测和 ECC 预测的时间平均距平相关系数、距平同号率和预报技巧(表 1), ECC 预测模型的平均 ACC 相对较大,相对单因子 BP-CCA 有一定的提升。从距平同号率、预报技巧来看, ECC 预测模型的预测评分要稍高于以海平面气压场、地表温度和 850 hPa 温度场为因子的 BP-CCA 模型,而略低于以 500 hPa 高度场为因子的 BP-CCA 模型,这可能是由于综合

多个因子的预报技巧进行气候预测时会不可避免引进一定的噪声影响综合预测效果。但从整体预测效果来看, ECC 模型的预测效果比 BP-CCA 更高、更稳定,具有一定的优越性。此外还可以看出在独立性检验时单因子 BP-CCA 预报技巧较高的是海平面气压场因子,而不是交叉检验中提到的地表温度场因子,其具体原因还需进一步研究。

7 结论与讨论

本文利用去趋势后的 1951~2009 年的样本资料通过 BP-CCA 方法建立了中国夏季气温的单因子预测模型,再利用 ECC 方法建立集合预测模型,进行了从 1951~2009 年的交叉检验的预测试验,再利用 2010~2014 年的样本资料对 ECC 模型进行独立样本检验,以考察 ECC 的实际预测能力。得到以下结论:

(1) 分析 CCA 模态可以得出 ECC 预测中各个预测因子的预测技巧来源。通过分析 CCA 模态的

表 1 基于以 500 hPa 高度场、海平面气压场、地表温度场、850 hPa 温度场为预测因子的 BP-CCA 方法和 ECC 方法得到的 160 站 2010~2014 年夏季气温距平预测场与观测场之间的空间、时间平均距平相关系数 (ACC) 以及时间平均距平同号率 (P)、预报技巧 (S_p)

Table 1 Spatial- and temporal-average anomaly correlation coefficients and temporal averaged percentage of the same anomaly sign (P) and prediction scores (S_p) between summer temperature anomaly predicted fields and observations at 160 stations during 2010–2014 with BP-CCA method using geopotential height at 500 hPa, surface temperature, temperature at 850 hPa, and sea level pressure as predictors and ECC method

预测方法	预测因子	空间平均		时间平均	
		ACC	ACC	P	S_p
BP-CCA	500 hPa 高度场	0.16	0.04	59.5%	86.86
BP-CCA	海平面气压场	0.23	0.08	57.5%	85.68
BP-CCA	地表温度场	0.20	0.07	57.1%	85.85
BP-CCA	850 hPa 温度场	0.14	0.06	55.5%	85.24
ECC	多因子集合	0.28	0.11	59.3%	86.31

空间型, 可以识别出两场相互作用的敏感区域。CCA 模态的空间型在一定程度上可以反映两场的遥相关特征。CCA 模态的时间系数序列可以反映出它们时间变化的同步性。

(2) 环流场和热力场均能为气温提供预测信息。不同的预测因子对于不同地区的预测技巧不同。与 4 个单因子 BP-CCA 预测模型相比, 用 ECC 方法建立的集合预测模型的预测技巧更高、更稳定, 这是因为集合预测能综合各个预测因子在不同地区的预测技巧。

(3) 通过用 2010~2014 年的样本资料对 BP-CCA 预测模型和 ECC 预测模型进行独立样本检验, 表明与 BP-CCA 预测模型相比, ECC 预测模型对中国夏季气温有较高、较稳定的实际预测能力, 对气温季节预测具有参考价值。

长期以来, 热带海洋温度异常对季风活动和全球气候的影响一直是气候研究的热点问题, 对 ENSO 事件的研究成为了气候变化和气候预测中的关键 (晏红明等, 2005), 尤其用海温作为气候预测的关键信号建立的相关预测模型, 在中国夏季气温预测业务中具有重要作用。相比之下, 陆面热力状况对中国夏季气候影响的研究还不够, 有必要进行相关的工作。因此在本文中选取陆面热力因子作为热力因子进行预测, 并发现在交叉预测实验中地表温度因子具有较好的预报效果。与前人的

研究相比, 该 ECC 预测模型的预测效果具有一定的优越性。如在独立性检验中, ECC 模型预测的 2010~2014 年中国夏季气温场与实测场的距平同号率在 85% 以上, 而何慧根等 (2014) 利用动力预测模式得到的距平同号率在 60%~65% 左右; 孙林海和刘一鸣 (2008) 利用区域气候模式得到的距平相关系数在 0.1 以下, 而本文利用 ECC 模型得到的距平相关系数要高于 0.1。在交叉试验中, ECC 模型对应的预测场与实测场之间的距平相关系数空间分布在全国均为正, 平均距平相关系数为 0.54, 且均通过了 0.05 显著性水平检验, 而李焕连等 (2010) 通过数值预测试验所得到的相关系数空间分布在我国部分地区出现负值。

虽然 ECC 模型被证明具有一定的实际预测能力, 由于短期气候预测具有不确定性, 尤其对于东亚气候区很难预测 (王会军, 1997), 而本文中选取的预报因子主要考虑的是东亚前期冬季气候状况, 从预报思路来说具有一定的局限性, 因此本文中建立的 ECC 预测模型可以看做是利用 ECC 方法预测中国夏季气温的初步试验, 文章主要是介绍和说明 ECC 方法作为集合预测的优越性及其在短期气候预测中的应用, 以期为我国短期气候业务预测提供一定的参考依据。在预测模型建立的过程中, 仍存在一些值得探讨的问题。如预报因子的选择和因子的选取范围对模型的预报效果都有所影响。对于热力因子, 还可以考虑海温场。此外, 也可以考虑环流、热力因子之外的预测因子以解释剩余的气候变率, 如北极海冰等 (Fan and Wang, 2010; 张若楠, 2011)。对于因子的选取范围, 可以考虑不同的区域, 有研究表示东亚地区的环流要比整个东半球的环流的预报效果要好 (Barnett and Preisendorfer, 1987)。这可能是由于预报因子的选择范围扩大, 在增加预报信息的同时也会不可避免的引入噪声, 从而影响预报效果。如何选取不同的因子和因子场的范围以使 ECC 模型的预测效果达到更好, 这些是下一步将要探讨的问题。对于 BP-CCA 方法来说, 如何确定预报因子和预报对象的 EOF 模态数和 CCA 模态数以获得最优的预测模型是值得进一步讨论的问题, 也有学者进行过这方面的研究, 但目前未得出最佳的方案 (Chen and Chen, 2003; Busuioc et al., 2008; 贾小龙等, 2010)。此外, ECC 从数学角度而言是一种线性方法, 而短期气候变化包含了许多非线性成分, 将非线性项引入 ECC 模型能否提高短期气候

预测水平也是一个值得研究的课题。

参考文献 (References)

- Barnett T P, Preisendorfer R. 1987. Origins and levels of monthly and seasonal forecast skill for United States surface air temperatures determined by canonical correlation analysis [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 115 (9): 1825–1847, doi: 10.1175/1520-0493(1987)115<1825:OALOMA>2.0.CO;2.
- Barnston A G, Thiao W, Kumar V. 1996. Long-lead forecasts of seasonal precipitation in Africa using CCA [J]. *Wea. Forecasting*, 11 (4): 506–520, doi: 10.1175/1520-0434(1996)011<0506:LLFOSP>2.0.CO;2.
- Busuioac A, Tomozeliu R, Cacciamani C. 2008. Statistical downscaling model based on canonical correlation analysis for winter extreme precipitation events in the Emilia-Romagna region [J]. *International Journal of Climatology*, 28 (4): 449–464, doi: 10.1002/joc.1547.
- Chen D L, Chen Y M. 2003. Association between winter temperature in China and upper air circulation over East Asia revealed by canonical correlation analysis [J]. *Global and Planetary Change*, 37: 315–325, doi: 10.1016/S0921-8181(02)00206-0.
- 陈桂英, 赵振国. 1998. 短期气候预测评估方法和业务初估 [J]. *应用气象学报*, 9(2): 178–185. Chen Guiying, Zhao Zhenguo. 1998. Assessment methods of short range climate prediction and their operational application [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese)*, 9 (2): 178–185.
- 陈红. 2013. 淮河流域夏季极端降水事件的统计预测模型研究 [J]. *气候与环境研究*, 18 (2): 221–231. Chen Hong. 2013. Statistical prediction model for summer extreme precipitation events over Huaihe River valley [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 18 (2): 221–231, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2012.11088.
- 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 [J]. *南京气象学院学报*, 30 (5): 623–631. Chen Xiaolan, Wu Hongbao, Ding Liuguan, et al. 2007. Ensemble canonical correlation prediction method of winter temperature over China [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese)*, 30 (5): 623–631.
- 陈晓龙, 智协飞. 2014. 基于 TIGGE 资料的北半球地面气温预报的统计降尺度研究 [J]. *大气科学学报*, 37 (3): 268–275. Chen Xiaolong, Zhi Xiefei. 2014. A statistical downscaling study on the surface temperature forecast in the Northern Hemisphere using the TIGGE data [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 37 (3): 268–275.
- 崔妍, 江志红, 陈威霖. 2010. 典型相关分析方法对 21 世纪江淮流域极端降水的预估试验 [J]. *气候变化研究进展*, 6 (6): 405–410. Cui Yan, Jiang Zhihong, Chen Weilin. 2010. Projection of extreme precipitation events in the 21st century in the Changjiang-Huaihe River Valley based on canonical correlation analysis [J]. *Advances in Climate Change Research (in Chinese)*, 6 (6): 405–410.
- 杜良敏, 张培群, 周月华, 等. 2011. 基于非负矩阵和典型相关的场定量预测方法研究 [J]. *高原气象*, 30 (1): 103–108. Du Liangmin, Zhang Peiqun, Zhou Yuehua, et al. 2011. Non-negative matrix and canonical correlation method of field quantitative prediction [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 30 (1): 103–108.
- Fan K, Wang H J. 2010. Seasonal prediction of summer temperature over Northeast China using a year-to-year incremental approach [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 24 (3): 269–275.
- 范可, 王会军, Choi Y J. 2007. 一个长江中下游夏季降水的物理统计预测模型 [J]. *科学通报*, 52 (24): 2900–2905. Fan Ke, Wang Huijun, Choi Y J. 2007. A physical statistical model of predicting summer precipitation over the middle and lower reaches of the Yangtze River basin [J]. *Chinese Science Bulletin (in Chinese)*, 52 (24): 2900–2905.
- 韩荣青, 高辉, 李维京. 2014. 旋转经验正交函数分解回归方法在东北夏季气温季节预测和成因诊断中的应用 [J]. *气象学报*, 72 (2): 291–305. Han Rongqing, Gao Hui, Li Weijing. 2014. An application of the REOF and stepwise regression to seasonal forecast and cause diagnosis for summer temperature anomaly in northeast China [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 72 (2): 291–305.
- 何慧根, 李巧萍, 吴统文, 等. 2014. 月动力延伸预测模式业务系统 DERF2.0 对中国气温和降水的预测性能评估 [J]. *大气科学*, 38 (5): 950–964. He Huigen, Li Qiaoping, Wu Tongwen, et al. 2014. Temperature and precipitation evaluation of monthly Dynamic Extended Range Forecast operational system DERF2.0 in China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 38 (5): 950–964.
- 贺晓霞, 吴洪宝, 陈小兰. 2008. 我国东南夏季干旱指数的 ECC 预测方法 [J]. *南京气象学院学报*, 31 (1): 10–17. He Xiaoxia, Wu Hongbo, Chen Xiaolan. 2008. Ensemble canonical correlation forecasting of summer drought index over southeastern China [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese)*, 31 (1): 10–17.
- 贾小龙, 陈丽娟, 李维京, 等. 2010. 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 [J]. *气象学报*, 68 (3): 398–410. Jia Xiaolong, Chen Lijuan, Li Weijing, et al. 2010. Statistical downscaling based on BP-CCA: Predictability and application to the winter temperature and precipitation in China [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 68 (3): 398–410, doi: 10.11676/qxxb2010.039.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77: 437–471, doi: 10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2.
- Lau K M, Kim K M, Shen S S P. 2002. Potential predictability of seasonal precipitation over the United States from canonical ensemble correlation predictions [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 29 (7): 1-1–1-4, doi: 10.1029/2001GL014263.
- 李焕连, 李清泉, 王兰宁, 等. 2010. 跨季度汛期气候数值预测试验 [J]. *气象科学*, 30 (6): 745–753. Li Huanlian, Li Qingquan, Wang Lanning, et al. 2010. Transseasonal numerical prediction experiment of rainy season climate [J]. *Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 30 (6): 745–753.
- 黎洛丝, 郑细华, 李勇增, 等. 2010. 我国东部夏季气温特征分析 [J]. *气象科技*, 38 (5): 537–542. Li Luosi, Zheng Xihua, Li Yongzeng, et al. 2010. Characteristic analysis of summer temperature in East China [J]. *Meteorological Science and Technology (in Chinese)*, 38 (5): 537–542.
- 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 [J]. *气象学报*, 62 (6): 740–751. Li Qingquan, Ding Yihui, Zhang Peiqun. 2004. Primary verification and assessment on the extra-seasonally predictive capability of a global atmospheric-oceanic coupled model in raining season [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 62 (6): 740–751.
- 梁红丽, 晏红明, 肖子牛, 等. 2010. 冬季亚洲大陆年际热力差异与中国气候的关系 [J]. *气象科学*, 30 (6): 754–762. Liang Hongli, Yan

- Hongming, Xiao Ziniu, et al. 2010. Relationship between interannual variation of wintertime thermal contrast over Asian continent and the climate in China [J]. *Scientia Meteorologica Sinica* (in Chinese), 30 (6): 754–762.
- Mo K C. 2003. Ensemble canonical correlation prediction of surface temperature over the United States [J]. *J. Climate*, 16 (11): 1665–1683, doi: 10.1175/1520-0442(2003)016<1665:ECCPOS>2.0.CO;2.
- 孙建奇, 王会军, 袁薇. 2011. 我国极端高温事件的年代际变化及其与大气环流的联系 [J]. *气候与环境研究*, 16 (2): 199–208. Sun Jianqi, Wang Huijun, Yuan Wei. 2011. Decadal variability of the extreme hot event in China and its association with atmospheric circulations [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 16 (2): 199–208.
- 孙林海, 刘一鸣. 2008. 区域气候模式对中国夏季平均气温和降水的评估分析 [J]. *气象*, 34(11): 31–39. Sun Linhai, Liu Yiming. 2008. Assessment analysis of summer temperature and rainfall over China from regional climate model [J]. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 34 (11): 31–39.
- 孙淑清, 陈隽. 2005. 异常东亚冬季风对夏季南海地区风场及热力场的影响 [J]. *气候与环境研究*, 5 (4): 400–416. Sun Shuqing, Chen Juan. 2005. The variations of wind and thermodynamics fields in the South China Sea in summer during the anomaly winter monsoon [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 5 (4): 400–416.
- 汤懋苍, 张建, 王敬香, 等. 1988. 我国季平均的 0.8 m 地温距平场与后一季降水场的相关分析 [J]. *气象学报*, 46 (4): 481–485. Tang Maocang, Zhang Jian, Wang Jingxiang, et al. 1988. The similarity between the seasonal anomalous maps of soil temperature and the precipitation of the subsequent season [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 46 (4): 481–485.
- Tomozeiu R, Cacciamani C, Pavan V, et al. 2007. Climate change scenarios for surface temperature in Emilia-Romagna (Italy) obtained using statistical downscaling models [J]. *Theor. Appl. Climatol.*, 90: 25–47, doi: 10.1007/s00704-006-0275-z.
- 王会军. 1997. 试论短期气候预测的不确定性 [J]. *气候与环境研究*, 4 (2): 333–338. Wang Huijun. 1997. A preliminary study on the uncertainty of short-term climate prediction [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 4 (2): 333–338.
- 王佳津, 陈朝平, 王春学. 2013. BP-CCA 方法用于四川盆地夏季日降水量的可预报性研究 [J]. *高原山地气象研究*, 33 (4): 35–41. Wang Jiajin, Chen Chaoping, Wang Chunxue. 2013. Statistical downscale based on BP-CCA for daily precipitation over Sichuan Basin in summer [J]. *Plateau and Mountain Meteorology Research* (in Chinese), 33 (4): 35–41.
- 王蕾, 张人禾, 黄嘉佑. 2004. 春季海温对中国夏季降水影响的诊断研究和预测试验 [J]. *气象学报*, 62 (6): 851–859. Wang Lei, Zhang Renhe, Huang Youjia. 2004. Diagnostic analyses and hindcast experiments of spring SST on summer precipitation in China [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 62 (6): 851–859.
- 吴洪宝, 吴蕾. 2005. 气候变率诊断和预测方法 [M]. 北京: 气象出版社, 144–168. Wu Hongbao, Wu Lei. 2005. *Diagnosis and Predicting Methods for Climate Variability* (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 144–168.
- 徐士良. 1995. FORTRAN 常用算法程序集(第二版) [M]. 北京: 清华大学出版社, 372–376. Xu Shiliang. 1995. *The Common Algorithm Assembly of FORTRAN* (2nd ed.) (in Chinese) [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 372–376.
- 晏红明, 段玮, 肖子牛. 2003. 东亚冬季风与中国夏季气候变化 [J]. *热带气象学报*, 19 (4): 367–376. Yan Hongming, Duan Wei, Xiao Ziniu. 2003. A study on relation between East Asian winter monsoon and climate change during raining season in China [J]. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 19 (4): 367–376.
- 晏红明, 杞明辉, 肖子牛, 等. 2005. 冬季亚洲大陆的热力差异对亚洲季风活动的影响 [J]. *大气科学*, 29 (4): 549–564. Yan Hongming, Qi Mingfei, Xiao Ziniu, et al. 2005. The influence of wintertime thermal contrast over the Asian Continent on Asian Monsoon [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 29 (4): 549–564.
- 张若楠. 2011. 北极海冰异常对中国夏季气候的可能影响 [D]. 中国气象科学研究院硕士学位论文, 58pp. Zhang Ruonan. 2011. The possible effect of anomalous Arctic Sea SIC on summer climate of China [D]. M. S. thesis (in Chinese), Chinese Academy of Meteorological Science, 58pp.
- 周鑫. 2013. 中国气温的年际—年代际变化特征及其模拟检验研究 [D]. 南京信息工程大学硕士学位论文, 63pp. Zhou Xin. 2013. Analysis on interannual and interdecadal variability of temperature over China and its simulation [D]. M. S. thesis (in Chinese), Nanjing University of Information Science and Technology, 63pp.
- 朱蒙, 陈海山, 蒋薇, 等. 2014. 陆面热力因子应用于中国夏季降水预测的初步试验 [J]. *气象学报*, 72 (6): 1135–1142. Zhu Meng, Chen Haishan, Jiang Wei, et al. 2014. A preliminary test of the summer rainfall prediction in China based on the land surface thermal factors [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 72 (6): 1135–1142.