

基于季节气候可预报分量的相似误差订正方法和数值实验^{*}

郑志海¹⁾ 任宏利^{1)†} 黄建平¹⁾

1) 兰州大学大气科学学院, 兰州 730000)

2) 中国气象局国家气候中心, 北京 100081)

(2008 年 12 月 16 日收到, 2009 年 2 月 10 日收到修改稿)

基于由历史相似信息对模式预报误差进行预报的思路, 发展了一种针对季节气候可预报分量的相似误差订正新方法 (FACEPC), 目的是识别模式预报结果中对初值相对不够敏感的可预报分量, 将其作为对象进行历史相似选取和误差订正. 该方法被应用到国家气候中心业务季节预报模式实验中, 对不同区域给出有针对性的相似选取指标和预报方案. 25 年的交叉检验结果表明, 夏季降水和环流的预报技巧评分相对于系统误差订正有明显提高, 在发生中等及以上强度 ENSO 事件年和可预报分量贡献较大地区的预报技巧提高更为显著. 特别是中国区域降水和关键区环流的预报技巧均有提高, 显示出业务气候预测应用前景. 同时, 初步敏感性实验显示相似因子和资料长度的改变对 FACEPC 预报均有显著影响.

关键词: 短期气候预测, 相似误差订正, 可预报分量

PACC: 9260X, 9260Y

1. 引 言

汛期降水异常可引发大范围的旱涝灾害, 给社会、经济和人民生活带来重大影响. 短期气候预测对防御和减轻气象灾害造成的损失有着重要作用, 逐渐成为国际上广泛关注的研究课题. 近年来, 随着观测资料的增多和模式性能的不断改进, 短期气候预测业务发展很快, 但目前的应用水平依然不高, 仍需进一步提升预报能力^[1].

短期气候预测通常依赖于动力和统计两种方法, 普遍共识是将二者的优点加以结合来提高预测水平^[2]. 围绕如何更有效结合的问题, 国内外开展了广泛研究^[3-5]. 我国学者做出了很有特色的工作, 例如使用过去演变资料的多时刻预报方法^[6,7]、相似动力方法^[8-11]、基于大气自记忆原理的方法^[12,13]、回溯阶差分格式^[14,15]、模式统计后处理^[16,17]等. 数值实验证明这些方法都显示了一定的预报技巧, 但要应用于实际业务仍需进一步加以研究. 近期, 一种基于动

力相似预报策略的相似误差订正方法被提出^[18-20], 旨在将大量历史相似性信息有效运用到现有复杂的数值模式中, 业务模式季节预测实验显示出令人鼓舞的预报技巧提高.

但根据可预报性理论研究成果^[21-24], 数值模式对初值很敏感, 特别是热带外地区, 利用相似年的信息改进气候模式预测仍存在不确定性. 如能预先识别出数值模式对初值相对不够敏感的可预报分量, 然后再用其相似年信息来进行相似误差订正, 有望减小不确定性, 改进当前预报. 按照这一思路, 本文将着眼亚洲、特别是中国区域, 基于已有统计-动力预报方法和可预报性研究成果, 发展针对季节气候可预报分量的相似误差订正新方法, 并根据各区域特点给出有针对性的相似选取指标和预报方案, 在业务模式上进行季节预测实验.

2. 资 料

目前, 国家气候中心 (NCC) 已经建立了包含季

^{*} 公益性行业 (气象) 科研专项基金 (批准号: GYHY200806005) 国家自然科学基金 (批准号: 40805028, 40675039, 40575036) 和国家科技支撑计划 (批准号: 2006BAC02B04) 资助的课题.

[†] 通讯联系人, E-mail: renhl@cma.gov.cn

节尺度在内的短期气候预测业务系统^[25], 季节预测模式(CGCM)由全球大气环流模式(T63L16)与全球海洋环流模式(L30T63)耦合而成. 大气模式初值采用每月最后 8 天 00 时的美国国家环境预报中心和美国国家大气研究中心(NCEP/NCAR)再分析资料; 海洋初值为经过扰动的 NCC 海洋同化资料(1 个控制场加上 5 个扰动场)海洋和大气初始场经组合构成 48 个成员的集合季节预报, 每月滚动向前预报 11 个月. 本文利用 CGCM 模式生成的 1983—2007 年共 25 年回报数据, 选用 5 月底为初值的每年 6—8 月的预报结果. 用重建的海表温度(ERSST)资料选取相似. 从 25 年模式回报数据中提取夏季总降水量和 500 hPa 高度场, 用美国气候预报中心组合降雨分析(CMAP)资料的总降水量和 NCEP/NCAR 再分析资料的 500 hPa 高度场作为实况检验资料. 青藏高原积雪资料用 NCC 公布的冬季青藏高原积雪面积指数.

3. 相似误差订正方法

3.1. 基本原理

一般来讲, 数值预报是作为偏微分方程的初值问题提出来的, 可表示为

$$\begin{aligned} \frac{\partial \psi}{\partial t} + L(\psi) &= 0, \\ \psi(\mathbf{x}, t_0) &= \psi_0(\mathbf{x}), \end{aligned} \quad (1)$$

其中 $\psi(\mathbf{x}, t)$ 为模式预报变量, \mathbf{x} 和 t 分别表示空间坐标向量和时间, L 是 ψ 的微分算子, 对应于实际的数值模式. t_0 为初始时刻, ψ_0 为初值. $t > t_0$ 时刻的值可由初值进行数值积分得到 ψ 或者其泛函 $P(\psi)$. 实际大气所满足的准确模式表示为

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} + L(\psi) = E(\psi), \quad (2)$$

其中 E 为模式的误差算子, 反映模式中未知的总误差项, 即模式误差. 从动力学观点来看, 我们所掌握的历史资料就是满足(2)式的一系列特解.

通过将当前的预报场 ψ 看成是历史相似上的一个小扰动^[8-10], $\psi = \tilde{\psi} + \tilde{\varphi}$. 将历史参考态 $\tilde{\varphi}$ 代入(2)式, 有

$$\begin{aligned} \frac{\partial \tilde{\varphi}}{\partial t} + L(\tilde{\varphi}) &= E(\tilde{\varphi}) \\ \tilde{\varphi}(\mathbf{x}, 0) &= \tilde{\varphi}_0(\mathbf{x}). \end{aligned} \quad (3)$$

采用历史相似提供的模式误差 $E(\tilde{\varphi})$ 估计当前误差 $E(\psi)$, 可得到相似误差订正方程^[18]

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} + L(\psi) = \frac{\partial \tilde{\varphi}}{\partial t} + L(\tilde{\varphi}), \quad (4)$$

上式相当于在原模式中添加了一个相似误差订正项 $E(\tilde{\varphi})$. 对相似误差订正方程进行时间积分后, 可推导得到动力相似预报方程^[20]

$$\hat{P}(\psi_0) = P(\psi_0) + \hat{P}(\tilde{\varphi}_j) - P(\tilde{\varphi}_j). \quad (5)$$

(5) 式表示在模式预报结果中加入了历史相似预报的误差项 $\hat{P}(\tilde{\varphi}_j) - P(\tilde{\varphi}_j)$, 相当于用历史相似对应的预报误差信息来估计当前的预报误差.

月、季平均量的预报是短期气候预测的核心^[11], 将(5)式在预报时段上取月或季节的平均, 即可得到

$$\hat{P}_{MM}(\psi_0) = P_{MM}(\psi_0) + \hat{P}_{MM}(\tilde{\varphi}_j) - P_{MM}(\tilde{\varphi}_j) \quad (6)$$

$$\hat{P}_{SM}(\psi_0) = P_{SM}(\psi_0) + \hat{P}_{SM}(\tilde{\varphi}_j) - P_{SM}(\tilde{\varphi}_j). \quad (7)$$

分别为月平均和季节平均的动力相似预报方程. 该方程的本质是引入历史相似对应的预报误差信息来估计当前的预报误差, 减小数值模式误差. 这一事后相似误差订正方法(FACE)的优势在于, 与统计相似预报相比, 多了气候模式的贡献; 与系统性误差订正相比, 多了历史相似信息的贡献. 应用到跨季节的夏季气候预测实验得到了令人鼓舞的结果^[20].

3.2. 基于季节可预报分量的新方法

相似误差订正依赖于数值模式, 数值模式的固有缺陷之一是对初值敏感, 初始非常小的误差在非线性的系统中会迅速放大, 并很快在气候尺度表现出来, 使预报结果有很大的差别. 由于数值模式的可预报期限依赖于初始误差^[26], 如果季节时间尺度的预测结果对初值很敏感, 相似年之间初值的差异所产生的误差分布的不确定性将掩盖相似年提供的误差修正信息, 那么基于相似的误差订正会受到影响. 为了减小这种误差分布不确定性的影响, 本文利用 CGCM 集合预报结果和再分析资料, 用方差分析的方法来提取数值模式对初值相对不够敏感的可预报分量. 在此基础上提出基于季节可预报分量的相似误差订正新方法(FACEPC), 即用相似误差订正方法订正可预报分量的预报误差.

将 20 年(1983—2002 年)的观测要素值的距平场进行经验正交函数 EOF 展开, 得到一组线性无关的基底, 每个模态对应的时间系数用 A_k ($K = 20$)

表示. 将 CGCM 的 48 个成员 ($N_e = 48$) 的距平场 (均值为模式的气候态) 以该基底展开, 得到每个成员的时间系数, 以 F_{ij} 表示第 j 回报年某次集合预报的第 i 个集合成员要素值的时间系数. 则观测的气候平均 \bar{A} 和第 j 回报年该季节预报的集合平均 F_j 分别为

$$\bar{A} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K A_k, \quad (8)$$

$$F_j = \frac{1}{N_e} \sum_{i=1}^{N_e} F_{i,j}. \quad (9)$$

分别定义内部方差 σ_1 、外部方差 σ_E 以及此二者之比 R 表示为

$$\sigma_1^2 = \frac{1}{N_e \times K} \sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^{N_e} (F_{i,j} - F_j)^2, \quad (10)$$

$$\sigma_E^2 = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K (A_k - \bar{A})^2, \quad (11)$$

$$R = \sigma_1 / \sigma_E, \quad (12)$$

其中, 内部方差由初始扰动和模式系统误差造成的集合成员之间的离散度加以度量, 反映了由大气内部的动力不稳定和非线性相互作用引起的自然变率. 外部方差反映外界强迫引起的年际变率. 当 R 很大时, 表示集合成员之间的内部方差远大于外部方差, 即外强迫信号被混沌系统的不确定性几乎完全掩盖, 有用的信息甚至低于气候态提供的信息, 因此则认为该分量对初值敏感. 这一思路在中期逐日可预报分量分析中已显示出有效性^[27].

图 1 给出了由 (8)–(12) 式计算的 CGCM 各区域 (每次所选区域为 2×2 格点范围) 夏季降水量和平均 500 hPa 高度场距平 EOF 第一模态时间系数的内部方差和外部方差之比. 可以看出, 降水量在热带海洋上方差比很小, 在陆地和中高纬度海洋上较大, 特别是中国地区中部尤为突出, 说明在这些区域该模式预测结果的不确定性很大, 从另一个方面反映了由于中国地区季风气候的复杂性, 数值模式对该区域的预报技巧偏低. 夏季平均 500 hPa 高度场的方差比呈现明显的纬度分布, 这与利用非线性动力系统理论进行的可预报性研究结果一致^[28], 在低纬度地区方差比几乎都小于 1, 中高纬度只有蒙古地区的方差比小于 1, 说明 CGCM 对这些区域的可预报性较强. 本文以方差比小于 1 的模式为可预报分量, 鉴于降水量和环流场在中高纬度所有模态的方差比几乎都大于 1, 因此将这些区域方差比相对较小的第一模态也认为是可预报分量进行相似误差订正.

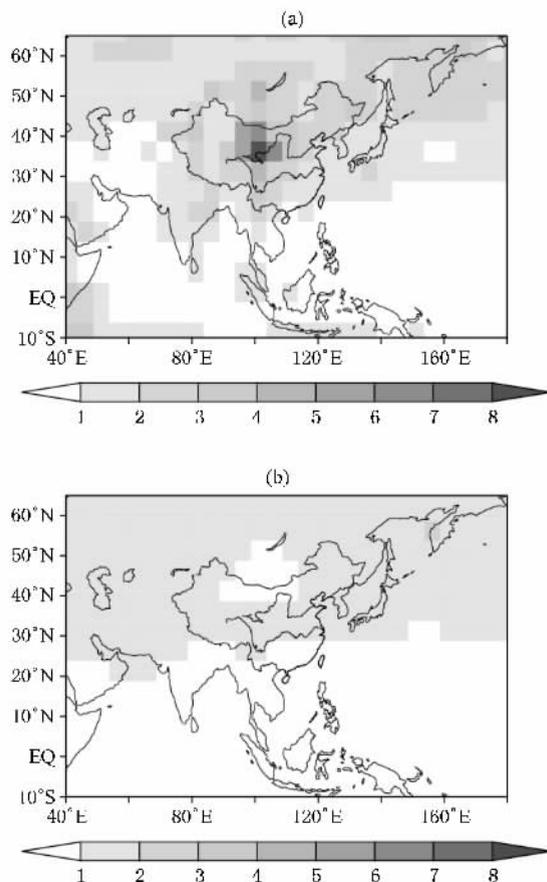


图 1 CGCM 各区域距平场 EOF 第一模态时间系数的内部方差和外部方差之比 (a) 降水量 (b) 500 hPa 高度场

4. 季节预测实验

4.1. 相似选取

相似误差订正的一个关键问题是历史相似的选取. 相似预报一直是气象学中的经典方法, 广泛应用于气象学中的很多领域. 其基本依据是初始很接近的大气状态, 在未来一段时间内也会保持接近. 对长期预报而言, Barnett 和 Preisendorfer^[29]的工作最具有代表性, 他们使用包括北半球 700 hPa 高度场、表面气温、降水、1000—700 hPa 厚度以及海表温度在内的多种数据选取相似来预报美国的季节温度, 其方法是通过在经验正交函数支撑的多维超空间中识别气候系统时间演变的“气候状态矢量”来间接实现, 取得了良好的效果, 从而推动了相似预报在其后十几年的蓬勃发展, 并最终在美国国家气象中心实现业务化.

由于数值模式的初始条件的自由度相当大(~ 10^6) ,要想对这么大自由度变量在历史上找到很好的相似 ,在现有的历史资料条件下是不可能的 .对特定地区的特定预报变量 ,并不是前期所有的初始条件都有着同等重要的作用 ,客观存在着前期关键变量和关键区域 ,但直接确定关键变量和区域是相当困难的 .数值模式本质是初值问题 ,未来的演变异常信息包含在初值异常中 ,而初值的异常是前期外强迫作用的结果 ,因此包含了前期外强迫异常的信息 ,统计方法正是由历史资料统计建立前期外强迫异常与未来异常的联系 ,即认为前期关键因子异常决定了未来演变的异常 .因此可用这些关键因子来选取相似 ,这样既抓住了初始条件的主要信息 ,同时又大大地减小了自由度 .大量研究表明 ,对季节预测而言 ,海表温度(SST)异常是已知的最重要的可预报源^[1] ,同时 ,我国东部的夏季降水与前期海温异常有密切的联系^[30] ,并且 ENSO 循环与气候模式误差分布存在显著统计关系^[31] .因此 ,本文用前期 SST 异常作为选取相似的关键变量 .

4.2. 实验方案

夏季环流和降水的 FACEPC 预报实验方案主要包括 :1) 从 25 年历史回报资料和观测资料中提取总降水量和 500 hPa 高度场 ;2) 利用(8)—(12)式的方法提取总降水量和 500 hPa 高度场对初值不敏感的可预报分量 ,为了结合各区域特点给出有针对性的相似选取指标和预报方案 ,并尽量保持预报区域在同一气候分区中 ,每次的预报区域为 2×2 格点范围 ;3) 将可预报分量对应时间系数的时间序列与前秋、前冬和春季的月平均海温场求取相关 ,确定各个月份的关键区域 ;4) 用关键区域的 SST 确定相似年份 ,度量标准为欧氏距离 ,取其多个最好相似^[32] ;5) 对可预报分量 ,采用(7)式进行误差订正 ,对误差估计理论参见文献 [18—20] ,本文采用线性等权重估计 ,对初值敏感的分量用系统误差订正(SPEC) ;6) 预报实验采用交叉检验 ,即每次取出一一年夏季为预报目标 ,其他年份为已知信息来预报目标年份的夏季降水和环流 .预报结果检验评分采用时间相关系数(TCC) ,空间距平相关系数(ACC) 以及平均均方根误差技巧评分(MSSS) ,FACEPC 预报结果与模式的 SPEC 作为对比 .SPEC 的作用是剔除模式气候与实际气候之间(不包括预报年) 的偏差 .本文关心区域主要是亚洲地区($40^{\circ}\text{E}—180^{\circ}\text{E}$, $10^{\circ}\text{S}—65^{\circ}\text{N}$) ,特别是

中国地区($75^{\circ}\text{E}—135^{\circ}\text{E}$, $20^{\circ}\text{N}—55^{\circ}\text{N}$) .

4.3. 降水

图 2 给出了夏季降水的预报技巧分布 .从图中可以看出 ,SPEC 对亚洲地区夏季降水预报效果并不理想 ,仅有少数区域达到显著性水平 ,而且有较多的负相关区域 .FACEPC 的 TCC 有较大提高 ,负相关区域显著减小 ,达到显著性的范围明显扩大 .值得注意的是 ,FACEPC 对 SPEC 预报较好的区域均得到了保持并有所增强 ,这从另一个方面说明了 FACEPC 能有效结合动力和统计的优点 .改进最明显的地区主要位于海洋上 ,特别在西太平洋地区 ,而在部分大陆

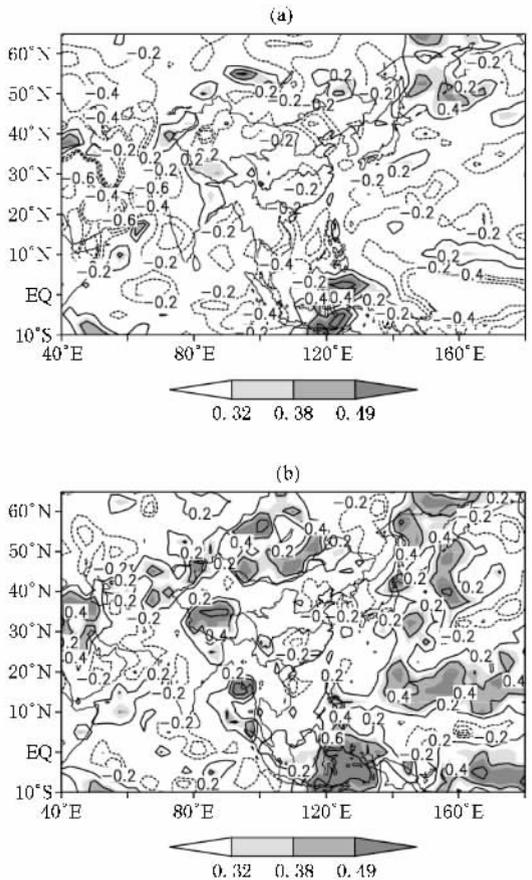


图 2 夏季降水量预测与实况的 TCC 分布 标记阴影层次的相关系数为 0.32 ,0.38 和 0.49 分别对应 90% ,95% 和 99% 的 t 检验信度水平 ,等值线间隔为 0.2 .(a) SPEC (b) FACEPC

表 1 给出了不同区域夏季降水量的预测与实况的 25 年平均 ACC 评分比较 ,可以看到 ,与 SPEC 相比 ,FACEPC 的预报性能有明显改善 .SPEC 在各个区域的 25 年平均 ACC 几乎都小于零 ,FACEPC 在 3 个区域都提供了正技巧 .其中亚洲地区的 25 年平均

ACC 从 -0.08 提高到了 0.19, 提高了 0.27. 对中国而言, 关键的东部地区降水也提高了 0.1, 显示出将该方法应用到实时预测中的前景. 同时表 1 还给出了 25 年中 FACEPC 的预报评分高于 SPEC 的个数, 可以看到, 对亚洲、中国和中国东部三个地区预报技巧提高年数分别为 23 年、14 年和 15 年, 提高比例分别为 92%、56% 和 60%.

表 1 不同区域夏季降水量的预测与实况的 25 年平均 ACC 评分比较

预测方案	亚洲	中国	中国东部
	40°E—180°E, 75°E—135°E, 105°E—120°E, 10°S—65°N	20°N—55°N	20°N—45°N
SPEC	-0.08	-0.01	-0.08
FACEPC	0.19	0.04	0.02
$ACC_{FACEPC} - ACC_{SPEC}$	0.27	0.05	0.10
ENSO 年 $ACC_{FACEPC} - ACC_{SPEC}$	0.33	0.10	0.27
$ACC_{FACEPC} - ACC_{SPEC} > 0$ 年数	23	14	15

注: ENSO 年代表发生中等及以上强度的 ENSO 事件年

图 3 给出了各区域基于 FACEPC 的 ACC 评分相对于 SPEC 改进的年度变化情况. 从图 3 中可以看出, 对亚洲区域几乎所有的年份 FACEPC 均优于 SPEC. 对中国东部地区, 在发生了中等及以上强度 ENSO 事件的 1983, 1987, 1988, 1992, 1997, 1998, 1999 和 2000 年中, 除 1997 年外的其他年份, FACEPC 与 SPEC 的 ACC 之差均超过了 0.15, 提高非常明显. 从表 1 中还可看出, 亚洲地区、中国地区和中国东部地区在发生中等及以上强度的 ENSO 事件年的平均 ACC 分别提高了 0.33, 0.1 和 0.27, 都高于 25 年的平均提高值. 已有研究表明在外强迫异常(特别是 SST 异常)较强的年份, 全球部分地区的可预报性更强, 而 FACEPC 在外强迫异常信号较强的年份提高更多, 这表明 FACEPC 能有效利用历史相似信息改进模式可预报分量的预报, 部分弥补数值模式对外强迫异常响应不足的缺点.

4.4. 500 hPa 高度场

图 4 给出了夏季平均 500 hPa 高度场的预报评分情况. 从图 4(a) 中可看出, SPEC 的夏季环流与实况的 TCC 大部分地区都显示出正的技巧, 但量值不高, 仅有较少区域达到 95% 的信度水平, 并主要集中在低纬度地区. 与图 2(a) 对比可以看出, 该模式对环流的预报要优于对降水的预报. 基于 FACEPC 的预测结果在整个低纬度地区都有显著提高, 几乎都通过了 99% 的信度水平, SPEC 在中纬度的几个

显著中心在 FACEPC 中几乎都得到了保持, 范围明显扩大. 西太平洋副高区和我国华南地区的时间相关系数都通过了 99% 的信度水平, 同时蒙古地区的环流预报也通过了 99% 的信度水平, 而这些地区的环流形势一直为我国夏季降水预测重点关注对象, 这为我国季风区的季节预测提供了信心. 与图 1(b) 比较可看出, 二者的分布非常类似, FACEPC 预报技巧最高的热带和蒙古地区正好是方差比小于 1 的地区, 表明 FACEPC 能显著提高可预报分量的预报技巧.

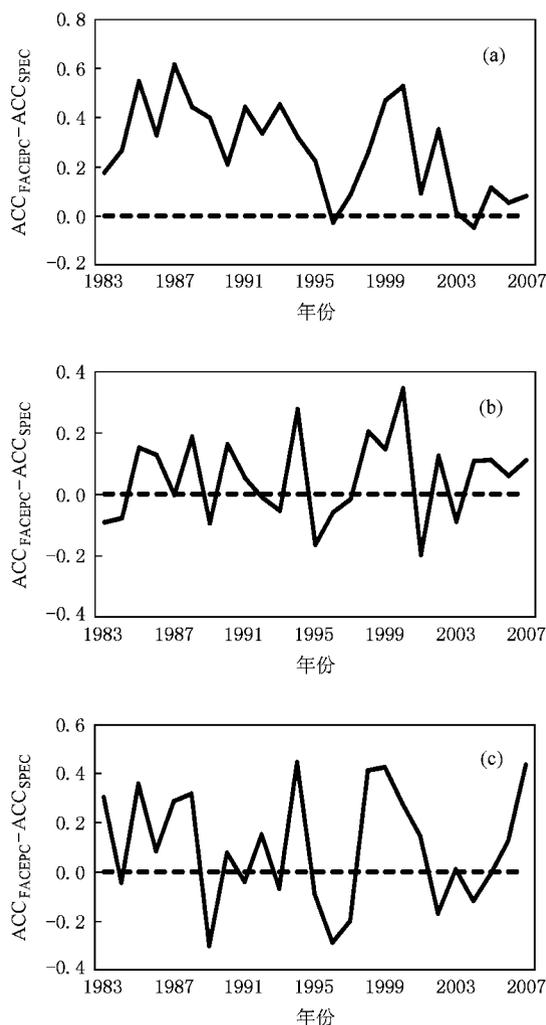


图 3 基于 FACEPC 与 SPEC 的夏季降水预测和实况的 ACC 之差 (a) 亚洲(40°E—180°E, 10°S—65°N) (b) 中国(75°E—135°E, 20°N—55°N) (c) 中国东部(105°E—120°E, 20°N—45°N)

图 5 进一步给出了 MSSS 评分 V_{MSSS} , 它定义为

$$V_{MSSS} = 1 - \frac{MSE_f}{MSE_c}, \quad (13)$$

这里 MSE_f 和 MSE_c 分别为基于 FACEPC 和 SPEC 预

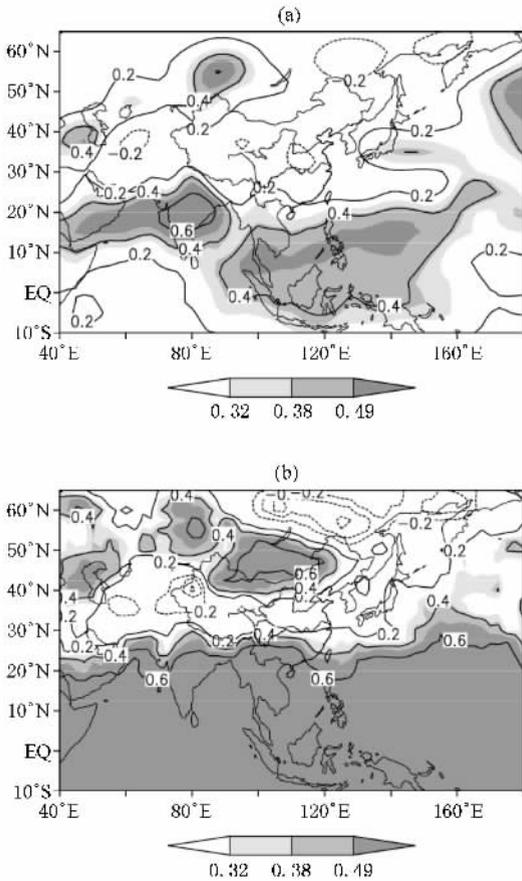


图4 夏季平均 500 hPa 高度场预测与实况的 TCC 分布 标记阴影层次的相关系数 0.32、0.38 和 0.49 分别对应 90%、95% 和 99% 的 t 检验信度水平;等值线间隔为 0.2。(a) SPEC (b) FACEPC

测的平均均方根误差, MSSS 评分值越大, 表示 FACEPC 相对于 SPEC 预测的均方根误差越小。从图 5 可以看出, MSSS 评分高技巧分布与图 4(b) 类似, 表明在 CGCM 可预报性较强的地区, FACEPC 相对

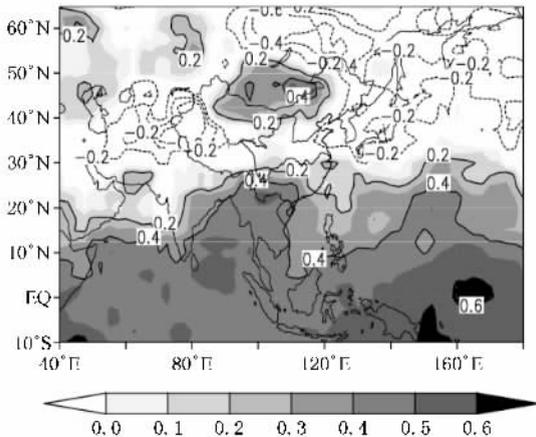


图5 FACEPC 相对于 SPEC 的 MSSS 评分

于 SPEC 不但对分布型有较好的预报, 而且均方根误差也有着明显的减小。

具体的区域评分情况参见表 2, CGCM 对 500 hPa 高度场的预测能力要优于降水场, SPEC 在各区域都显示出正的预报技巧。在亚洲、中国和中国东部地区, FACEPC 相对于 SPEC 的平均距平相关系数分别提高了 0.09、0.19 和 0.24; 三个地区分别有 17 年、19 年和 19 年的预报技巧得到了提高, 提高比例分别为 68%、76% 和 76%, 更进一步说明 FACEPC 能有效提高预报技巧, 显示出一定的性能优势。

表 2 不同区域夏季平均 500 hPa 高度场的预测与实况的 25 年平均 ACC

预测方案	亚洲	中国	中国东部
	40°E—180°E, 75°E—135°E, 105°E—120°E, 10°S—65°N	20°N—55°N	20°N—45°N
SPEC	0.10	0.04	0.07
FACEPC	0.19	0.23	0.31
$ACC_{FACEPC} - ACC_{SPEC}$	0.09	0.19	0.24
ENSO 年 $ACC_{FACEPC} - ACC_{SPEC}$	0.18	0.36	0.52
$ACC_{FACEPC} - ACC_{SPEC} > 0$ 年数	17	19	19

注: ENSO 年代表发生中等及以上强度的 ENSO 事件年

图 6 给出了各区域 FACEPC 与 SPEC 的 ACC 之差的年际变化图。可以看出, 在发生中等及以上强度的 ENSO 事件年, 亚洲地区、中国地区和中国东部地区的 ACC 几乎均有提高。从表 2 中可看出, 发生中等及以上强度的 ENSO 事件年的平均 ACC 分别提高了 0.18、0.36 和 0.52, 明显高于 25 年的平均。

4.5. 敏感实验

4.5.1 相似因子对 FACEPC 的影响

相似因子反映了前期的外强迫异常情况, 在很大程度上代表了初始状态信息, 选用不同的相似因子会对动力相似预报产生显著影响^[20]。为此, 表 3 给出了分别用冬季青藏高原积雪面积、关键区 SST 以及综合二者选取相似的 FACEPC 实验结果。从 25 年平均来看, 综合考虑冬季青藏高原积雪面积和前期关键区 SST 来选取相似的预报效果比只考虑单个因子要好。各区域变量的未来演变是前期多因子综合作用的结果, 因此, 除了考虑对全球有重要作用的 SST 的影响之外, 还应用具有区域特性的关键因子来选取相似。下一步工作中将针对中国各区域, 用更多的有一定物理意义的因子来选取相似, 改进动力模式预报。

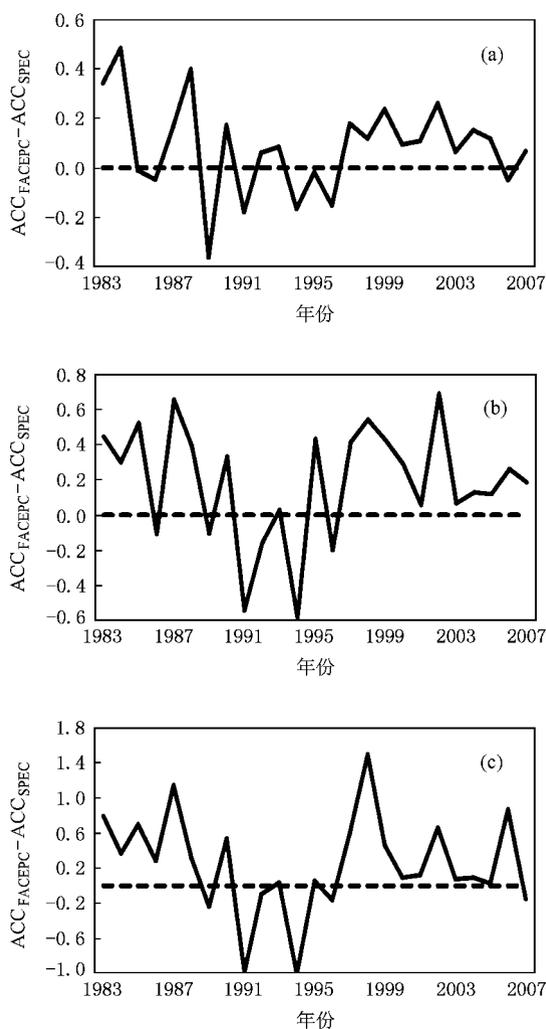


图 6 基于 FACEPC 与 SPEC 的夏季平均 500 hPa 高度场预测和实况的 ACC 之差 (a) 亚洲(40°E—180°E, 10°S—65°N) (b) 中国(75°E—135°E, 20°N—55°N) (c) 中国东部(105°E—120°E, 20°N—45°N)

表 3 不同因子选取相似的夏季降水和环流的预测与实况的 25 年平均 ACC

相似因子选取	降水		500 hPa 高度场	
	中国	中国东部	中国	中国东部
	75°E—135°E, 20°N—55°N	105°E—120°E, 20°N—45°N	75°E—135°E, 20°N—55°N	105°E—120°E, 20°N—45°N
冬季青藏高原积雪面积	-0.02	0.08	-0.01	0.12
关键区 SST	0.04	0.02	0.23	0.31
冬季青藏高原积雪面积和关键区 SST	0.09	0.11	0.20	0.32

表 4 不同资料长度选取相似的夏季降水和环流的预测与实况的 25 年平均 ACC

资料长度	降水			500 hPa 高度场		
	亚洲	中国	中国东部	亚洲	中国	中国东部
	40°E—180°E, 10°S—65°N	75°E—135°E, 20°N—55°N	105°E—120°E, 20°N—45°N	40°E—180°E, 10°S—65°N	75°E—135°E, 20°N—55°N	105°E—120°E, 20°N—45°N
10 年	0.08	0.00	-0.01	0.12	0.06	0.22
15 年	0.11	0.02	-0.01	0.15	0.15	0.27
20 年	0.16	0.02	-0.01	0.18	0.23	0.32
24 年	0.19	0.04	0.02	0.19	0.23	0.31

4.5.2 资料长度对 FACEPC 的影响

统计相似预报方法往往受到资料长度的限制, 资料长度客观上决定了可供使用的相似个数, 预报技巧和历史资料的长度密切相关. 表 4 给出了用 SST 选取相似的情况下, FACEPC 随着资料长度变化的预报技巧变化情况. 从表中可以看出, 随着资料长度的增加, FACEPC 的效果越好, 表明该方法与纯统计方法一样也依赖于历史资料的长度. 由此可见, 随着历史资料的不断增多, 统计和动力相结合的预测方法将具有更广阔的发展前景.

综上所述, 在改进预报方面, FACEPC 要优于传统的 SPEC. 针对可预报分量, 能有效用历史相似提供的误差信息提高预报技巧. 特别是在中等及以上强度的 ENSO 事件年, FACEPC 相对于 SPEC 改进更为明显. FACEPC 对我国东部地区降水和对其有重要影响的关键区的环流预测都有着明显的提高, 显示出对潜在业务的应用前景.

5. 结 论

本文结合动力和统计方法优势, 针对数值模式对初值极为敏感的问题, 采取方差分析方法分离出对初值相对不够敏感的可预报分量, 利用历史相似年的误差信息估计预报年稳定分量的误差信息, 提出了一种基于气候可预报分量的相似误差订正新方法(FACEPC). 并且, 面向所研究的不同区域, 能有针对性地制定相似选取指标和预报方案. 在业务气候预测模式的实验结果显示, 该方法能显著提高亚洲区域的预报技巧, 比系统误差订正预报有明显改善,

具有提高亚洲地区和我国的降水和环流预报技巧的潜力.特别是可预报分量贡献较大的地区和发生中等及以上强度 ENSO 事件年时期,FACEPC 对预报技巧改进更为明显.同时,初步敏感性实验显示相似因子和资料长度对 FACEPC 预报有显著影响,还有待更全面的研究.

目前,使用数值模式和统计方法进行短期气候预测都具有相当的预报技巧,结合统计性经验方法,从历史资料中提取信息来提高动力模式预报的预报

技巧是一条行之有效的途径.当然,模式性能和历史资料数量也会有很大影响.本文方法还存在着一些不足之处,比如,预报技巧显著提高主要在可预报分量贡献较大地区,在弱 ENSO 事件和正常年预报能力还有待改善,这主要取决于数值模式可预报分量的多寡,以及用于选取相似的因子是否是预报区域的关键因子,同时模式对这些因子异常是否有异常的预报结果.这些问题将在下一步工作中加以研究.

感谢丑纪范院士、封国林教授给予的有益建议和帮助.

- [1] Barnston A G , Kumar A , Goddard L , Hoerling M P 2005 *Bull. Amer. Met. Soc.* **86** 59
- [2] Goddard L , Mason S J , Zebiak S E , Ropelewski C F , Basher R , Cane M A 2001 *Int. J. Climatol.* **21** 1111
- [3] Kang I S , Lee J Y , Park C K 2004 *J. Climate* **17** 834
- [4] Feddersen H , Navarra A , Ward M N 1999 *J. Climate* **12** 1974
- [5] Mo R P , Straus D M 2002 *Mon. Wea. Rev.* **130** 2167
- [6] Chou J F 1974 *Sci. Chin.* 635 (in Chinese) [丑纪范 1974 中国科学 635]
- [7] Zheng Q L , Du X Y 1973 *Sci. Chin.* 289 (in Chinese) [郑庆林、杜行远 1973 中国科学 289]
- [8] Qiu C J , Chou J F 1989 *Chin. J. Atmos. Sci.* **13** 22 (in Chinese) [邱崇践、丑纪范 1989 大气科学 **13** 22]
- [9] Huang J P , Wang S W 1991 *Sci. Chin. Ser. B* 216 (in Chinese) [黄建平、王绍武 1991 中国科学, B 辑 216]
- [10] Huang J P , Yi Y H , Wang S W , Chou J F 1993 *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* **119** 547
- [11] Bao M , Ni Y Q , Chou J F 2004 *Chin. Sci. Bull.* **49** 1112 (in Chinese) [鲍 名、倪允琪、丑纪范 2004 科学通报 **49** 1112]
- [12] Cao H X 1993 *Sci. Chin. Ser. B* **23** 104 (in Chinese) [曹鸿兴 1993 中国科学, B 辑 **23** 104]
- [13] Feng G L , Cao H X , Gao X Q , Dong W J , Chou J F 2001 *Adv. Atmos. Sci.* **18** 701
- [14] Feng G L , Dong W J 2003 *Chin. Phys.* **12** 1076
- [15] Feng G L , Dong W J , Jia X J 2004 *Chin. Phys.* **13** 413
- [16] Wang H J , Zhou G Q , Zhao Y 2000 *Adv. Atmos. Sci.* **17** 234
- [17] Chen H , Lin Z H 2006 *Adv. Atmos. Sci.* **23** 425
- [18] Ren H L , Chou J F 2005 *Acta Meteorologica Sinica* **63** 988 (in Chinese) [任宏利、丑纪范 2005 气象学报 **63** 988]
- [19] Gao L , Ren H L , Li J P , Chou J F 2006 *Chin. Phys.* **15** 882
- [20] Ren H L , Chou J F 2007 *Sci. Chin. Ser. D* **50** 1589
- [21] Ding R Q , Li J P 2007 *Phys. Lett. A* **364** 396
- [22] Chen B H , Li J P , Ding R Q 2006 *Sci. Chin. Ser. D* **49** 1111
- [23] Ding R Q , Li J P , Ha K J 2008 *Chin. Phys. Lett.* **25** 1919
- [24] Mu M , Duan W S , Xu H , Wang B 2006 *Adv. Atmos. Sci.* **23** 992
- [25] Li W J , Zhang P Q , Li Q Q , Wang L N , Liu Y M , Shi X L , Zhang Z Q , Liu Y M , Hu G Q , Dang H Y , Zhang F , Chen L J , Sun C R , Zhao Q G , Dong M 2005 *Journal of Applied Meteorological Science* **16** (Suppl.) 1 (in Chinese) [李维京、张培群、李清泉、王兰宁、刘益民、史学丽、张祖强、刘一鸣、胡国权、党鸿燕、张 芳、陈丽娟、孙除荣、赵其庚、董 敏 2005 应用气象学报 **16** (增刊) 1]
- [26] Ding R Q , Li J P 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 7494 (in Chinese) [丁瑞强、李建平 2008 物理学报 **57** 7494]
- [27] Fan X Q , Li W J , Zhang P Q 2003 *Journal of Applied Meteorological Science* **14** 49 (in Chinese) [范晓春、李维京、张培群 2003 应用气象学报 **14** 49]
- [28] Li J P , Ding R Q 2008 *Chin. J. Atmos. Sci.* **32** 975 (in Chinese) [李建平、丁瑞强 2008 大气科学 **32** 975]
- [29] Barnett T P , Preisendorfer R W 1978 *J. Atmos. Sci.* **35** 1771
- [30] Chen L T , Wu R G 1998 *Chin. J. Atmos. Sci.* **22** 718 (in Chinese) [陈烈庭、吴仁广 1998 大气科学 **22** 718]
- [31] Ren H L 2008 *Prog. Natl. Sci.* **18** 129
- [32] Ren H L , Zhang P Q , Li W J , Chou J F 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 4388 (in Chinese) [任宏利、张培群、李维京、丑纪范 2006 物理学报 **55** 4388]

Analogue correction of errors based on seasonal climatic predictable components and numerical experiments^{*}

Zheng Zhi-Hai¹⁾ Ren Hong-Li^{1)‡} Huang Jian-Ping¹⁾

¹⁾ *College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China*

²⁾ *National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China*

(Received 16 December 2008; revised manuscript received 10 February 2009)

Abstract

Based on the idea of using historical-analogue information to predict the prediction errors of model, a new method named analogue correction of errors by predictable component (FACEPC) was developed. This method is adopted to identify the predictable components for which the prediction result is relatively not quite sensitive to the initial values. And then for predictable components, an associated scheme is chosen for historical-analogue selection and error correction. This method was further applied to experiments on operational seasonal prediction model of National Climate Center. By selecting suitable analogues and prediction schemes for different regions, the results from cross-validation indicate that the predictive skill scores of summer precipitation and circulation have got significant improvement relative to systematic error correction, which looks more obvious in ENSO episodes and over regions with more predictable components. Especially, the skill scores over China area have also been clearly improved, exhibiting its potential application perspective to operational seasonal prediction. Besides, preliminary sensitive experiments show that the FACEPC-based predictions are also obviously influenced by the analogue-selected factors and the length of historical data.

Keywords : short-term climate prediction, analogue correction of errors, predictable component

PACC : 9260X, 9260Y

^{*} Project supported by the Special Scientific Research Fund of Meteorological Public Welfare Profession of China (Grant No. GYHY200806005), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 40805028, 40675039, 40575036), and the National Key Technology Research and Development Program of the Ministry of Science and Technology of China (Grant No. 2006BAC02B04).

[‡] Corresponding author. E-mail: renhl@cma.gov.cn