

长江中下游汛期降水模式预测误差相似性及其可预报度*

王启光¹⁾ 苏海晶²⁾⁴⁾ 支蓉^{2)†} 冯爱霞³⁾

1)(中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081)

2)(国家气候中心预测室, 北京 100081)

3)(国家气象信息中心, 北京 100081)

4)(扬州大学物理科学与技术学院, 扬州 225002)

(2013年11月21日收到; 2014年2月7日收到修改稿)

对数值模式预测误差进行相似预报进而订正模式预报结果, 是提高模式预报水平的有效手段之一. 本文从数值模式预测误差场存在相似性的角度出发, 研究了长江中下游汛期降水逐年模式误差场间的相似性及其可预报性, 探讨了数值模式预测误差在历史资料中的相似信息量, 发现利用相似误差订正可以明显提高模式预报水平. 进一步对历史模式预测误差场进行经验正交函数(EOF)分解, 着重研究了误差场前三个特征向量的空间分布及其时间系数演化规律, 发现对各分量分别进行相似预报可以简化预报对象, 并且针对性更强, 可以提高其潜在预报水平. 在研究数值模式预测误差场相似性的基础上, 定义了数值模式预测误差的相似可预报度, 用以衡量逐年模式预测误差的可预测性, 发现模式预测误差场前三个分量的相似可预报度明显高于原始模式误差场, 揭示出有针对性地分别预报模式预测误差各分量的潜在应用价值.

关键词: 汛期降水, 模式预测误差, 相似性, 可预报度

PACS: 92.60.Wc

DOI: 10.7498/aps.63.119202

1 引言

季节降水预测特别是夏季汛期降水预测一直是人们关注的研究热点之一. 中国汛期降水预测问题既是关乎国计民生的重大课题, 也是存在许多困难的科学难题. 中国地处东亚, 气候条件复杂多变, 夏季汛期降水的年际变率大, 区域间差异明显, 时空演化规律难以把握. 但是在诸多不利因素下, 我国学者仍然坚持不懈地进行研究, 其中对于长江中下游地区汛期降水的研究尤为引人注目. 这不仅因为该地区人口密集, 而且还是我国重要的经济支柱产业区. 通过一系列研究使得人们对该地区汛期降水的前期影响机理有了一定的认识^[1-3], 并且

随着数值预报模式的发展和可用资料的日益丰富, 近几年来对该地区的汛期降水的预测方法和技巧都有了新的提高^[4-9]. 此外, 长期的研究还表明动力和统计相结合是提高短期气候预测准确率比较有效的途径之一^[10-12]. 丑纪范^[13,14]从理论上探讨了在长期预报中实现动力和统计相结合的做法; 曹鸿兴^[15]进而提出一种基于大气自记忆原理的方法并建立了自忆谱模式; 封国林和曹鸿兴等^[16-18]在此基础上求出了自忆方程的解析解; 任宏利、丑纪范和郑志海等^[19-23]最近发展了一种适用于动力季节预测的相似误差订正方法, 预报结果显示该方法能有效提高热带降水和环流的预报技巧. 近年来, 基于客观定量化的动力统计内结合的中国汛

* 国家自然科学基金(批准号: 41305100 和 41105055)、公益性行业科研专项(批准号: GYHY201306021) 和全球变化重大研究计划(批准号: 2012CB955902) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: zhirong@cma.gov.cn

期降水预测工作取得了一定进展^[24–29]工作针对中国的不同区域,考察了前期关键气候因子的演化规律、异常状况及其在汛期预测中的动态配置情况,制定了有针对性的汛期降水预测方案.已有汛期降水预测业务实践表明该套思路和方法可以有效地改进数值模式的预测结果,比较成功地预测了2009年和2010年汛期降水,PS评分分别为79分和72分.但相关工作中对长江中下游地区汛期降水的模式预测误差自身时空演化规律的研究尚为欠缺,历史资料中模式预测误差相似的信息量如何,误差相似预报的潜力如何,误差的相似可预报性如何衡量,区域逐年误差的相似可预报性是否存在变化,这些问题都需要进行深入的探讨,以便为更好地提高汛期降水预报水平提供技术支持.

模式的预测误差主要有三个来源,模式初值的不准确、模式本身的缺陷和数值计算误差.以往的研究中,主要针对以上三个方面采用不同的技术手段减小模式预报误差,如资料同化技术、集合预报技术、物理参数化方案和数值计算方法的改进以及模式结果后处理等.但由于现有的观测资料和数值模式相对于大气的真实状态而言仍然十分粗糙,模式内部非线性相互作用极其复杂,致使数值模式预测误差特别是长期天气和气候预测模式的预测误差仍然存在且相当明显,严重制约着数值预报模式的预报水平.前人对模式预测误差的研究主要集中在其产生的可能机理和误差增长对模式可预报性的影响方面^[30–33],对于模式预测误差特别是汛期降水的预测误差自身时空演化规律的研究,以及定量衡量其相似性和可预报性方面的工作还很鲜见.本文从利用历史资料中的相似信息对模式预测误差进行预报的思路出发,研究了长江中下游汛期降水模式预测误差的历史相似信息量和理想状况下的预报效果,并基于相似性定义了模式预测误差的相似可预报度,阐述了有针对性分别预报模式预测误差各主模态时间系数的优越性.

2 资料和方法

2.1 资料介绍

本文根据国家气候中心海气耦合模式(CGCM)回报和预报的1983—2009年降水资料集,该季节预报模式采用逐月滚动预报的方法预报未来11个月的情况,并且由海洋和大气初始场经组合构成48个集合季节预报结果.本文选用2月底起

报的48个初始场每年6—8月集合平均结果作为模式预报结果.将美国气候预报中心的格点降水资料(CMAP)作为实况观测资料,减去历年模式预测结果得到模式的预测误差.文中研究的长江中下游区域范围为:110°E—122.5°E, 27.5°N—32.5°N.

2.2 EOF分解及误差的相似预报

EOF分解无固定的函数形式,具有收敛快又能客观地反映出场的基本时空结构的特征^[34].它既可对不同空间点上的要素进行分解,也可以对同一点的不同时间、不同高度的多种要素进行综和分析,因此它在气象中具有广泛的应用.其基本思想是把包含 p 个空间点(或 p 个变量)的 n 个时次的观测场随时间进行分解.气象要素场 $F_{p \times n}$ 可以表示为

$$F_{p \times n} = V_{p \times p} T_{p \times n}, \quad (1)$$

其中 $V_{p \times p}$ 为空间模态,反映变量场典型的分布结构; $T_{p \times n}$ 为时间系数(一般记为PC),代表了空间模态的时间变化特征.

大气数值预报模式可以简化表示为

$$\begin{aligned} \frac{\partial \psi}{\partial t} + L(\psi) &= 0, \\ \psi(x, t_0) &= \psi_0(x), \end{aligned} \quad (2)$$

其中 $\psi(x, t)$ 为模式预报变量, x 和 t 分别表示空间坐标和时间, 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.长期业务预报的经验表明,在相似的初始值和边界条件下,大气的演变在一定的时间内状况往往也相近^[21,22].据此在相似动力模式中,可以将当前的预报场 ψ 看成是历史相似 $\tilde{\psi}$ 加上一个小扰动 $\hat{\psi}$,即 $\psi = \tilde{\psi} + \hat{\psi}$,历史参考态 $\tilde{\psi}$ 代入(2)式可得

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

E 为模式的误差算子.经推导模式预报结果则可表示为^[23]

$$\hat{R}(\psi_0) = R(\psi_0) + \check{R}(\tilde{\psi}_j) - R(\tilde{\psi}_j), \quad (4)$$

其中 $\hat{R}(\psi_0)$ 为进行误差项相似估计的情况下所得到的预报结果, $R(\psi_0)$ 为数值预报模式对当前初值 ψ_0 的预报结果, $\check{R}(\tilde{\psi}_j)$ 为历史相似对应的实况, $R(\tilde{\psi}_j)$ 为历史相似初值的预报结果.将(4)式在预

报时段上取季节的平均, 即可得到

$$\hat{R}_{SM}(\psi_0) = R_{SM}(\psi_0) + \check{R}_{SM}(\tilde{\psi}_j) - R_{SM}(\tilde{\psi}_j). \quad (5)$$

(5) 式即为季节平均的相似误差订正方程. 相似误差订正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, 即(4)式右端的 $\check{R}(\tilde{\psi}_j) - R(\tilde{\psi}_j)$, 从而减小数值模式预测误差, 此时动力预报问题即转化为预报误差的估计问题.

3 误差场相似性

3.1 模式预测误差场的相似性

利用历史资料对模式预测误差进行预报, 仅直接将所有历史资料误差的平均值作为误差的预报结果, 往往很难达到较为理想的效果. 例如图1所示1983—2009年长江中下游汛期降水逐年误差场距平值中, 有许多年份误差距平值仍然很大. 特别是历史上几个降水异常的年份, 1985年、1998年、1999年, 即使已经减去误差的历史均值, 其绝对值仍然在100 mm以上, 可见将系统误差作为每一年的模式预测误差对数值模式进行订正并不理想. 若在误差场历史资料中存在预报年份模式预测误差的相似信息, 并能有效提取出这部分相似误差场进行合成, 即可较好地预报模式预测误差对模式的结果进行预测, 从而提高数值模式的预报水平.

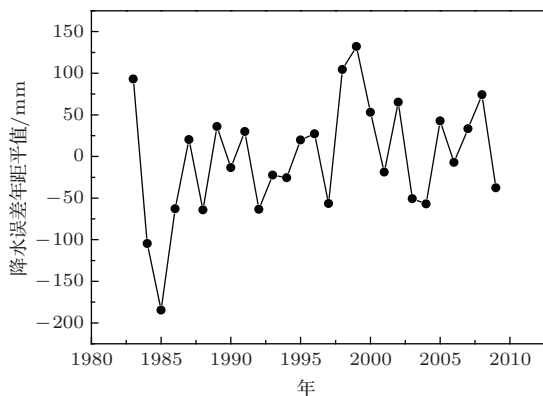


图1 长江中下游汛期降水模式预测误差的逐年距平序列

分析图1可知, 若能在历史资料中确定出误差相近的年份作为某年模式的预测误差, 则可以避免历史资料中误差差异较大甚至完全相反的資料的影响, 更为准确地预报模式预测误差, 从而改善模式预报效果. 采用以上方案进行误差预报, 首先要

考虑历史资料中是否存在相似的误差场, 图1中虽然存在误差距平值较为接近的年份, 例如1993年和1994年、1995年和1996年、2003年和2004年, 但两者实际的误差空间分布型却并不相似, 存在较大差异(图略). 这是因为模式预测误差的空间分布年际变化很大, 图2以该区域的三个格点为例(110°E, 27.5°N; 115°E, 30°N; 122.5°E, 32.5°N), 给出了各格点逐年误差距平值, 可以发现, 不同年份中各格点误差距平值差异比较明显, 例如2002, 2004年三个不同格点的模式预测误差距平值最大可以相差200 mm以上. 所以虽然区域的平均误差值可能相近, 但是误差场的分布型很可能不同, 仅用整个区域的距平值来衡量误差的预报效果尚存在不足之处. 因此本文采用距平相关系数(ACC)来衡量两个误差场间的相似程度.

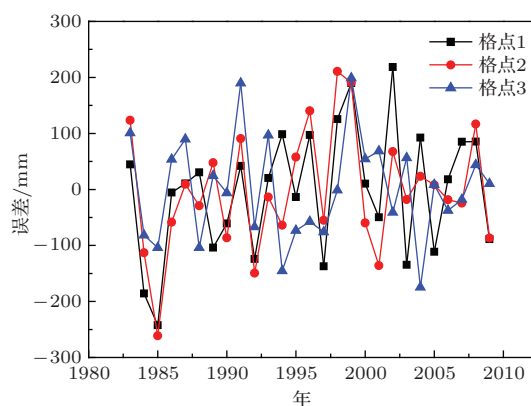


图2 (网刊彩色) 长江中下游地区三个格点的历年模式预测误差距平序列

图3(a)采用27年交叉检验的方式计算了2000—2009年模式预测误差场与历史资料中其他年份误差场之间ACC, 并按照从大到小进行了排序(其中横坐标代表历史资料场的个数). 可以发现在26年的误差场历史资料中, 2000—2009年都能找到ACC较高的模式预测误差场相似年, 相似年ACC最大值都在0.5以上, 有的年份与其他误差场间的ACC甚至接近0.9(如2000年). 对于2000—2009年各回报年, 与其误差场ACC能达到0以上的其余26年历史资料中的年份都在10个以上, 其中2007年误差场可以在历史资料中找到17个ACC大于0的相似场, 2000年以前交叉检验的结果类似(图略). 以上结果说明, 对于长江中下游地区汛期降水模式预测误差场而言, 历史资料中相似误差场的信息量是相当充足的.

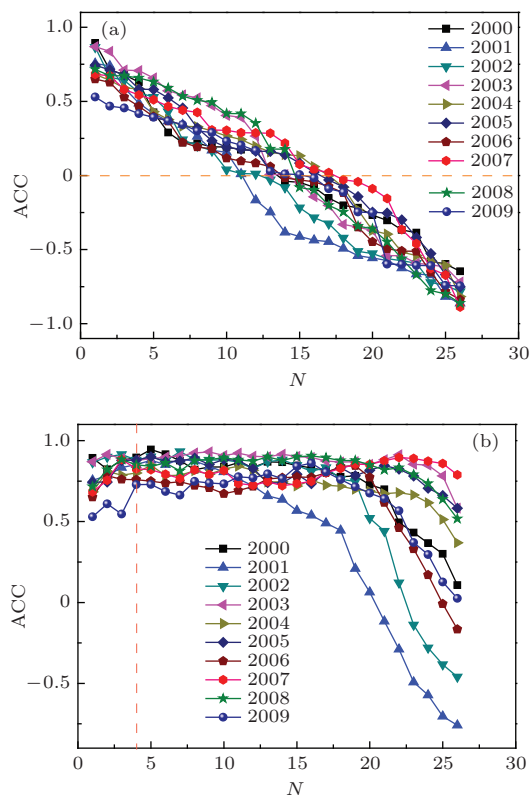


图3 (网刊彩色) ACC排序 (a) 2000—2009 年与历史资料中其他年份模式预测误差 ACC; (b) 利用累积相似误差回报 2000—2009 年模式预测误差时 ACC

由图 3(a) 的分析得知, 长江中下游汛期降水模式预测误差场在历史资料中客观存在着较好的相似场。但在利用相似误差场预报模式预测误差时, 是否仅选择历史资料中与之 ACC 最大的误差

场就能得到最佳的预报效果? 首先确定单独一个 ACC 最大值相似年份的概率较小, 此外数值试验可以证明, 单独的一个相似年份得到预测效果并非最好的 (如图 3(b)). 图 3(b) 显示在理想情况下, 2000—2009 年选取前四个 ACC 最大的相似年来平均合成预报年的误差, 误差的预报结果和当年误差实况 ACC 基本可以达到最大, 并且都在 0.7 以上, 当合成的误差场增多时, 预报效果反而会变差, 这与图 3(a) 中 ACC 有许多年份为负值有关. 表 1 列出 2000—2009 年在 26 年历史资料中相似误差场前四个 ACC 最大年份, 从中可以看出, 因为每个年份的误差场都有各自的空间分布特征, 致使在历史资料中得到的相似年差别也很明显. 囿于模式回报资料较短的原故, 文中采用了交叉检验的方式来确定相似误差场, 即将历史资料中的单独一年视为回报年, 利用剩余所有年份的资料逐个计算与该年份资料的 ACC. 但从表 1 中可以发现, 回报年的模式预测误差场在其之前的年份中都存在 ACC 很高的相似场. 通过进一步计算可以得知, 2000—2009 年利用前四个 ACC 最大的相似年误差场对模式进行相似误差订正, 10 年模式预报结果与降水实况 ACC 平均值为 0.76. 而对同样 10 年采用除回报年外, 其他所有年份的误差场进行平均的系统误差订正 ACC 仅为 0.15, 由此可见利用历史相似信息预报模式预测误差有较好应用前景.

表 1 2000—2009 年模式误差场与历史各年模式误差场 ACC 前四位相似年

		2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
1	year	1990	1997	1994	1991	2007	1990	1997	2004	1996	1990
	ACC	0.89	0.75	0.86	0.87	0.68	0.74	0.65	0.68	0.71	0.53
2	year	2005	1992	1988	1984	1988	2000	1994	2008	1986	1984
	ACC	0.71	0.74	0.66	0.84	0.64	0.71	0.63	0.67	0.67	0.47
3	year	1985	1999	1995	1987	2008	1984	2002	2005	2007	2005
	ACC	0.68	0.59	0.64	0.71	0.59	0.68	0.53	0.58	0.67	0.45
4	year	1992	1985	1998	1986	1996	1989	1992	2003	2003	2001
	ACC	0.63	0.49	0.56	0.70	0.58	0.58	0.46	0.54	0.66	0.41

3.2 模式预测误差场 EOF 分解各分量的相似性

以往的研究表明, 利用 EOF 分解可以得到更为细致的降水场的时空演化特征, 可以抓住其主要的空间分布状态和演变规律. 因此本节对降水误差

场采用类似的处理手段, 考察各分量空间模态分布特征和时间系数演变规律, 并研究其相似性情况. 图 4 为 1983—2009 年长江中下游降水误差场 EOF 分解后各分量所占的解释方差, 其中前三个分量解释方差分别是 42%, 25%, 13%, 三者累积解释方差达到 80%, 从第四模态开始, 各分量解释方差都小

于0.1, 特别是从第六模态往后, 基本接近于0. 这说明对于长江中下游地区汛期降水模式预测误差场而言, 前三个分量的作用极为重要. 因此下面将对前三个空间模态分布及其时间系数的演化规律做一详细分析.

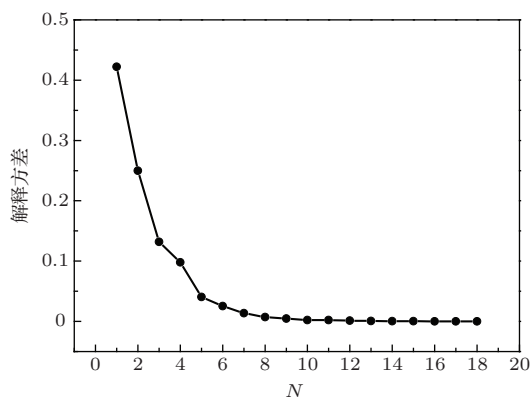


图4 长江中下游汛期降水模式预测误差场 EOF 各分量所占的解释方差

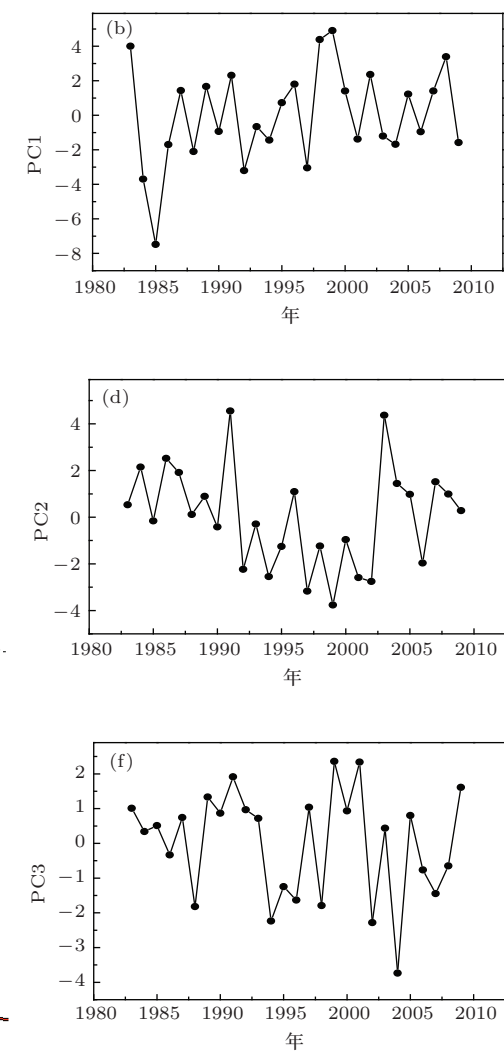
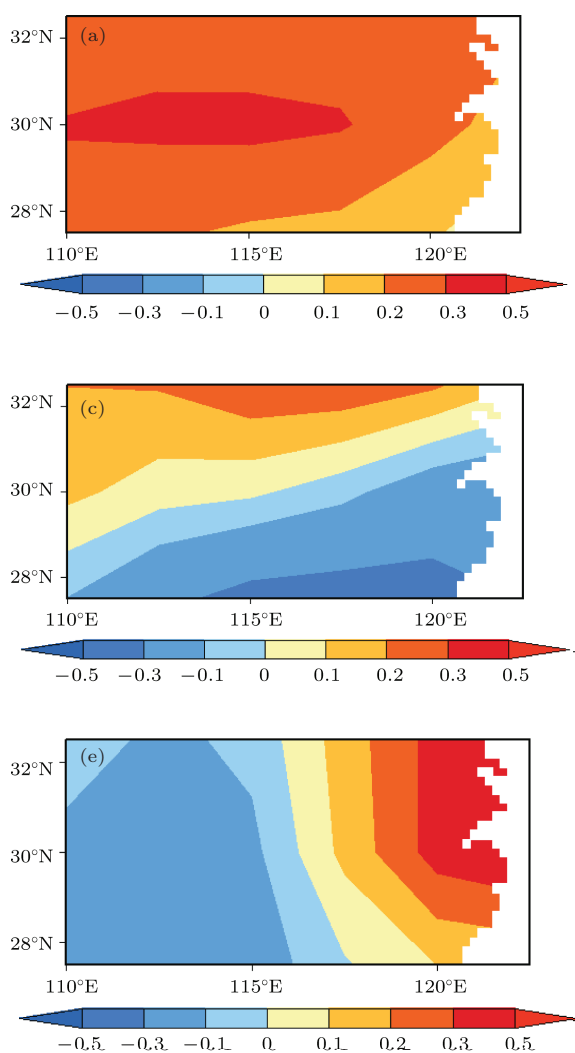


图5 (网刊彩色) 模式预测误差场前三个分量的空间模和相应的时间系数

图5给出了该地区降水误差场前三个EOF空间模态及其对应的时间系数. 从图中可以发现, 第一模态在整个区域的分布均为正值, 说明其随时间变化具有空间一致性(图5(a)), 其对应的时间系数具有一定的准两年周期振荡的特征(图5(b)), 并且演化曲线和逐年误差距平序列基本一致, 仅在量级上有所差别(图1), 这说明误差场第一分量反映了模式预测误差的平均状态. 第二分量空间模态呈现北正南负的情景(图5(c)), 这反映了该区域误差场在某些年份中存在的南北异常状况. 从图5(d)中可以推测出, 该分量的时间系数具有10年左右的阶段性变化特征, 即在1990年前, 该分量时间系数基本都为正值, 1991—2002年间的情景基本与之相反, 而进入2003年后, 第二分量的时间系数又呈现正值为主的状态, 这说明模式预测误差的南北异常状况可能具有准10年周期的持续性. 第三分量空

间模态呈现东正西负分布, 时间系数以年际振荡为主. 从前三个分量的分析可以发现, 第一主分量反映了长江中下游地区降水模式预测误差具有总体的一致性, 反映该区域气候背景状态是一致的. 在此基础上, 第二、第三主分量反映了误差场又存在一定的南北和东西差异, 这在一定程度上反映了降水异常年份的误差分布特征.

模式预测误差场经过 EOF 分解后, 三个主模态的空间分布基本稳定 (利用 27 年资料进行交叉检验时各模态分布和对应年份的时间系数基本完全一致, 图略). 此时若要确定各分量的历史相似年份, 仅通过各个分量时间系数的欧氏距离的大小进行判断即可, 无需考虑不同年份空间模态分布的差异, 此时将时空相似的判断转化为判断时间系数的相近程度, 消除了不同年份误差空间分布不均匀对相似误差预报造成的不利影响, 并减少了计算量. 表 2 以 2009 年为例展示前三个分量在历史资料所对应的分量的前四个相似年, 为与原始误差场统一衡量标准, 此处仍然以各分量恢复场 (各空间特征向量乘以对应的时间系数) 间的 ACC 的大小来排序. 可以发现各分量间前四个相似年基本没有重复的情况出现, 这一结果表明即使对于同一个预报年, 不同的分量其历史相似年的差别也是明显的. 由此可以推断, 利用各分量分别确定相似年比通过误差场直接确定相似年更具针对性, 更能抓住其主要的时空匹配形态. 理想数值试验表明, 将各分量前 4 个相似年误差场时间系数的平均值作为预报年该分量的时间系数, 再对预报场进行恢复, 得到的效果优于直接利用历史相似场进行订正, 2000—2009 年交叉检验的回报 ACC 均接近于 1 (图略). 这与在各分量的相似预报过程中, 考虑了各分量时间系数具有不同时间尺度特征的差异, 但无需考虑不同格点变量值逐年空间分布不一致是密不可分的, 因此在相似误差预报的过程中, 对各分量的时间系数分别有针对性的利用历史相似信息进行预报, 具有更重要的应用价值.

表 2 2009 年误差场前三个分量相似误差预报时前四位相似年

	1	2	3	4
PC1	2004	1986	1994	2001
PC2	1988	1983	1985	1993
PC3	1989	1991	1997	1983

4 误差场可预报度

在研究误差场相似性的基础上, 可以发现不同年份的误差相似预报的效果是不同的, 这与历史资料中包含的相似误差场信息量的多少有密切关系, 为区分不同年份相似误差预报的难易程度, 从而在模式结果评估、有针对性的误差预报方案制定等方面提供定量化判断依据, 本文定义了相似可预报度 P_A 为

$$P_A = \frac{N_A}{N} \times \bar{A}, \quad (6)$$

其中, N 为历史资料总的年数, N_A 为当年在历史资料中找到的 ACC 值大于 0 的相似年数, \bar{A} 为所有 ACC 值大于 0 的相似年 ACC 的均值, P_A 的定义既考虑了历史资料中的误差场相似年存在的数量 (N_A), 又考虑了其质量 (\bar{A}). 显而易见, 当历史资料中所有年份与预报年份误差场分布完全一致, 其相似可预报度为 1, 代表利用相似误差预报误差场时, 是完全可以预报的, 但实际预报过程中, 不可能出现所有年份预报误差场完全相同的情况; 当历史资料中不存在与回报年 ACC 大于 0 的相似年, 此时历史资料中不存在可用的预报信息, 利用相似关系来预报模式预测误差场将完全不可行, 其相似可预报度为 0. 因而 P_A 的值域为 $[0, 1)$. P_A 定量化地衡量了利用相似关系进行降水误差预报时的总体的难易程度. 图 6 给出了利用 27 年误差场历史资料交叉检验得到的各年误差场的 P_A , 其平均值约为 0.19, 这与实际季节预测中降水本身的可预报性较低是相对应的. 从图中可以看出, 误差场的逐年 P_A 存在类似于误差场第二主分量时间系数的变化特征.

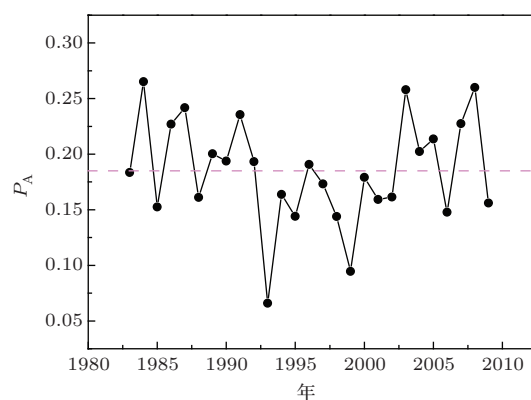


图 6 长江中下游汛期降水模式预测误差的历年相似可预报度

27 年的 P_A 可根据均值分为三段, 其中

1983—1992年10年间,该地区 P_A 较大,表明利用相似误差来预报误差场相对较容易;而在1993—2002年这10年, P_A 基本都在均值以下,说明此段时间误差场利用相似来预报相对较困难;自2003年以后,该地区 P_A 又基本高于平均值,说明近些年的误差场更易于利用历史相似信息予以预报,这与进入21世纪后,长江中下游地区的降水状况相对较为稳定,主雨带基本位于江淮之间,近几年来业务预报相对较准确是一致的.由此可见,相似误差预报有其内在的规律性,汛期降水的模式预报水平与预报地区的年代际背景有很大关系.

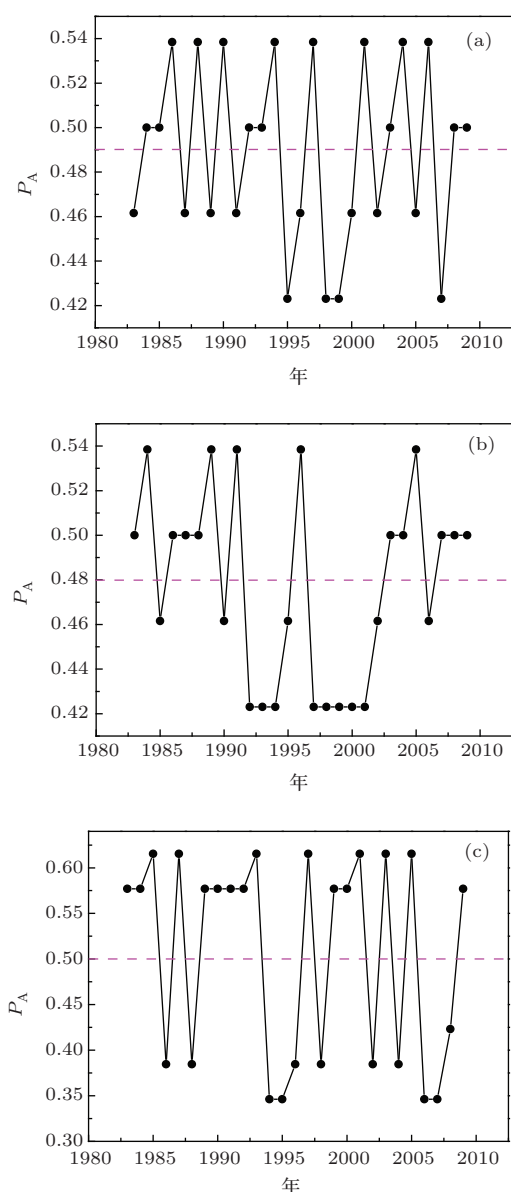


图7 模式预测误差场前三个分量的相似可预报度 (a) 第一分量; (b) 第二分量; (c) 第三分量

类似于原始误差场,对EOF分解后的误差场的各分量的恢复场也可以利用(6)式分别求得各年

相似可预报度(如图7),从图7可以看出,前三个分量的相似可预报度都比原始误差场显然要大的多,都在0.3以上.前三个分量可预报度平均值分别为0.49, 0.48, 0.50.其中第一分量可预报度存在一定的年际变化特征;第二分量相似可预报度的演化存在10年左右的阶段性变化特征,和原始误差场可预报度分为三段基本匹配,其中1983—1991年相似可预报度相对较大,1992—2002年间相似可预报度总体相对偏小,而2003年后相似可预报度又处于相对较高的水平.与图5对比可以发现,前三个分量的相似可预报度与其时间系数的演化规律较为一致.以上结果进一步验证了各分量进行相似误差预报时历史资料中可用于预报的相似信息量更为充分,再次说明有针对性的对误差场各分量分别进行相似预报,是十分必要的.

5 结论与讨论

本文从国家气候中心CGCM的降水预测误差场在历史资料中客观存在相似场入手,阐述了利用相似信息对模式预测误差场进行预报的优越性.文中利用误差场间的距平相关系数来衡量不同年份两误差场间相似程度,通过交叉检验发现长江中下游地区2000—2009年汛期降水的数值模式预测误差场都存在较多相似性较好的年份,并对历史相似误差场累积合成,计算得知该地区利用历史资料中4个相似年即可得到很好的相似预报效果.进一步将误差场利用EOF方法展开,着重分析了解释方差所占比重大大的前三个分量的空间模态分布状况和时间系数演化规律,发现模式预测误差场中存在不同时间尺度的变率,利用各分量时间系数的历史相似信息分别对其进行有针对性预报,可以在一定程度上克服原始误差场存在的格点变量值空间分布的年际变率大的问题,将误差场的时空相似预报转化成只对时间系数进行相似预报,简化了预报对象,对提高相似误差预报水平更具应用价值.最后文中利用模式预测误差场的相似性定义了相似可预报度,提供了量化比较不同年份模式预测误差可预报性的指标.比较了相似误差预测的难易程度,发现该地区相似可预报度具有明显的10年左右阶段性维持的特征.文中继而分析了模式预测误差场前三个分量的相似可预报度,发现各分量相似可预报度比原始误差场更高,同时还表现出不同的时间尺度特征,因此模式预测误差的相似预报应该

有针对性的对各分量分别进行. 文中利用距平相关系数判断两场相似情况在实际应用中需要注意所分析的区域的具体情况, 当区域范围较小或数据站点较少时, 利用距平相关系数判断两个场的相似程度会存在一定的虚假信息, 即有可能出现距平相关系数较大但是实际两距平场的数值正负相反的情况, 需要利用具体分布图形或结合两场间的均方根误差进行再次判断和剔除.

本文的研究方法可以应用于其他模式的季节或月预测的误差预报中, 还可用来研究不同地区不同气象要素模式预测误差场相似性及其可预报性. 诚然, 文中的相似误差预报效果是在理想状况的基础上得到的, 用以揭示模式的降水误差相似预报中存在的潜在应用价值, 为更有效、更有针对性地预报模式预测误差, 进而提高数值模式预报水平提供技术支持. 在实际操作过程中, 如何利用外强迫气候因子结合已有的成熟的数理统计方法确定出历史资料中的误差相似年, 从而准确地预报模式预测误差, 仍有大量富有意义和充满挑战的工作要做.

参考文献

- [1] Chen L X 1984 *Acta oceanologica Sinica* **6** 744 (in Chinese) [陈隆勋 1984 海洋学报 **6** 744]
- [2] Wu G X, Liu H Z 1995 *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* **19** 422 (in Chinese) [吴国雄, 刘还珠 1995 大气科学 **19** 422]
- [3] Wei F Y 2006 *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* **30** 202 (in Chinese) [魏凤英 2006 大气科学 **30** 202]
- [4] Feng G L, CAO H X 1998 *Journal of Applied Meteorological Science* **9** 119 (in Chinese) [封国林, 曹鸿兴 1998 应用气象学报 **9** 119]
- [5] Feng G L, Dong W J, Gong Z Q, Hou W, Wan S Q, Zhi R 2006 *Non-linear Theories and Methods on Spatial-Temporal Distribution of the Observational Data* (Beijing: the Weather Publishing Company) pp135–148 (in Chinese) [封国林, 董文杰, 龚志强, 侯威, 万仕全, 支蓉 2006 观测数据非线性时空分布理论和方法 (北京: 气象出版社) 第135—148页]
- [6] Feng G L, Gong Z Q, Zhi R, Zhang D Q 2008 *Chin. Phys. B* **17** 2745
- [7] Wang H J, Fan K 2009 *Weather and Forecasting* **24** 548
- [8] Gao L, Ren H L, Li J P, Chou J F 2006 *Chin. Phys.* **15** 882
- [9] Ke Z J, Zhang P Q, Dong W J, Wang J 2009 *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* **33** 994 (in Chinese) [柯宗建, 张培群, 董文杰, 王瑾 2009 大气科学 **33** 994]
- [10] Chao J P, Guo Y F, Xin R N 1982 *Meteor. Soc. Japan* **60** 282
- [11] Huang J P, Yi Y H, Wang S W, Chou J F 1993 *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* **119** 547
- [12] Van H M 1994 *Tellus* **46A** 314
- [13] Chou J F 1974 *Science in China (Ser. A)* **6** 635 (in Chinese) [丑纪范 1974 中国科学(A辑) **6** 635]
- [14] Chou J F 1986 *Plateau Meteorology* **5** 367 (in Chinese) [丑纪范 1986 高原气象 **5** 367]
- [15] Cao H X 1993 *Science in China Ser. B* **23** 104 (in Chinese) [曹鸿兴 1993 中国科学(B辑) **23** 104]
- [16] Feng G L, Dong W J 2003 *Chin. Phys.* **12** 1076
- [17] Feng G L, Dong W J, Li J P 2004 *Chin. Phys.* **13** 1582
- [18] Feng G L, Cao H X, Wei F Y, Chou J F 2001 *Acta Meteorologica Sinica* **59** 206 (in Chinese) [封国林, 曹鸿兴, 魏凤英, 丑纪范 2001 气象学报 **59** 206]
- [19] 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]
- [20] Zheng Z H, Ren H L, Huang J P 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 7359 (in Chinese) [郑志海, 任宏利, 黄建平 2009 物理学报 **58** 7359]
- [21] Ren H L, Chou J F 2007 *Advances in Earth Science* **22** 376 (in Chinese) [任宏利, 丑纪范 2007 地球科学进展 **22** 376]
- [22] Ren H L, Chou J F 2007 *Science in China (Ser. D)* **37** 988 (in Chinese) [任宏利, 丑纪范 2007 中国科学(D辑) **37** 988]
- [23] Zheng Z H, Ren H L, Huang J P 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 7359 (in Chinese) [郑志海, 黄建平, 任宏利 2009 物理学报 **58** 7359]
- [24] Yang J, Wang Q G, Zhi R, Feng G L 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 029204 (in Chinese) [杨杰, 王启光, 支蓉, 封国林 2011 物理学报 **60** 029204]
- [25] Yang J, Zhao J H, Zheng Z H, Xiong K G, Sheng B Z 2012 *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* **36** 11 (in Chinese) [杨杰, 赵俊虎, 郑志海, 熊开国, 沈柏竹 2012 大气科学 **36** 11]
- [26] Wang Q G, Feng G L, Zheng Z H, Zhi R 2011 *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* **35** 287 (in Chinese) [王启光, 封国林, 郑志海, 支蓉 2011 大气科学 **35** 287]
- [27] Wang Q G, Feng G L, Zhi R, Zhao J H 2012 *Acta Meteorologica Sinica* **70** 789 (in Chinese) [王启光, 封国林, 支蓉, 赵俊虎 2012 气象学报 **70** 789]
- [28] Xiong K G, Feng G L, Huang J P, et al 2011 *Acta Meteorologica Sinica* **25** 316
- [29] Zhao J H, Feng G L, Wang Q G, Yang J, Gong Z Q 2011 *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* **35** 1069 (in Chinese) [赵俊虎, 封国林, 王启光, 杨杰, 龚志强 2011 大气科学 **35** 1069]
- [30] Hamill T M, Whitaker J S 2005 *Mon. Wea. Rev.* **133** 3132
- [31] Mutemi J N 2007 *Meteorol Atmos Phys* **95** 87
- [32] Li J P, Ding R Q 2008 *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* **32** 975 (in Chinese) [李建平, 丁瑞强 2008 大气科学 **32** 975]
- [33] Ding R Q, Li J P 2009 *Acta Meteorologica Sinica* **67** 241 (in Chinese) [丁瑞强, 李建平 2009 气象学报 **67** 241]
- [34] Shi N 1992 *The Multianalysis Method of Meteorological Research and Prediction* (Beijing: China Meteorological Press) p210–227 (in Chinese) [施能 1992 气象统计预报中的多元分析方法 (北京: 气象出版社) 第210—227页]

The analogy and predictability of the forecasting model error for the precipitation over the mid-lower reaches of the Yangtze River in summer^{*}

Wang Qi-Guang¹⁾ Su Hai-Jing²⁾⁴⁾ Zhi Rong^{2)†} Feng Ai-Xia³⁾

1) (*China Meteorological Administration Training Center, CMA, Beijing 100081, China*)

2) (*Laboratory for Climate Studies, National Climate Center, CMA, Beijing 100081, China*)

3) (*National Meteorological Information Center, CMA, Beijing 100081, China*)

4) (*Physical Science and Technology College of Yangzhou University, Yangzhou 225002, China*)

(Received 21 November 2013; revised manuscript received 7 February 2014)

Abstract

This paper reports an effective method to improve the forecasting level of the numerical model through analogue prediction of errors and correction of the results. The analogy of the precipitation model errors and its predictability are studied for the mid-lower reaches of the Yangtze River in summer time in the perspective of analogy, which exists in the error field in the forecasting numerical model. The content of the analogy is also investigated according to the historical data. It is found that the forecasting errors could be improved remarkably by analogue error prediction over the regions researched in summer time. The forecasting error field is decomposed by EOF, and then the geographic distribution and time coefficient evolution of the first three principal components are analyzed. The prediction of the precipitation could be simplified by analogue forecasting of the principal components separately, and it is more targeted to improve the potential forecasting level. On the basis of the analogy of the forecasting error field, its analogue predictability is defined to measure the predictability of the errors. The analogue predictability of the first three principal components is significantly higher than that of the original field. It has potential applications to precipitation prediction by forecasting the error field principal components.

Keywords: summer precipitation, forecasting errors of a model, analogy, predictability

PACS: 92.60.Wc

DOI: 10.7498/aps.63.119202

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 41305100, 41105055), Meteorological Special Project of China (Grant No. GYHY201306021), and the Global Change Study of Major National Scientific Research Plan of China (Grant No. 2012CB955902).

[†] Corresponding author. E-mail: zhirong@cma.gov.cn