

魏凤英, 黄嘉佑. 2010. 大气环流降尺度因子在中国东部夏季降水预测中的作用 [J]. 大气科学, 34 (1): 202-212. Wei Fengying, Huang Jiayou. 2010. A study of downscaling factors of atmospheric circulations in the prediction model of summer precipitation in Eastern China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (1): 202-212.

大气环流降尺度因子在中国东部 夏季降水预测中的作用

魏凤英¹ 黄嘉佑²

1 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

2 北京大学物理学院大气科学系, 北京 100871

摘要 本文将1951~2007年500 hPa格点资料构成的表征区域系统的环流特征量作为降尺度因子, 使用降尺度技术和偏最小二乘回归方法, 以环流特征量作为因子场, 建立逐月的我国东部夏季降水量的预报模型。从最佳预报模型中的环流特征量出现频率的角度, 对大气环流降尺度因子在我国东部夏季降水预测中的作用进行分析研究。结果表明, 在夏季各月份的预报模型中, 出现频率表现最突出的因子是北半球和东半球副高系统。此外, 东亚地区副高系统也起十分重要的作用, 特别是西太平洋副高强度和面积指数。

关键词 夏季降水量 统计降尺度 环流特征量 偏最小二乘回归

文章编号 1006-9895 (2010) 01-0202-11

中图分类号 P426

文献标识码 A

A Study of Downscaling Factors of Atmospheric Circulations in the Prediction Model of Summer Precipitation in Eastern China

WEI Fengying¹ and HUANG Jiayou²

1 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, China Meteorological Administration, Beijing 100081

2 Department of Atmospheric Science, School of Physics, Peking University, Beijing 100871

Abstract The factors of atmospheric circulations in the prediction model, which is built by the downscaling techniques and the partial least square regression for summer precipitation in eastern China, are studied by using the monthly data of the 74 characteristic quantities of the northern hemispheric circulations, and the precipitation at 160 stations over eastern China. The study is based on the occurrence frequency of the characteristic quantity in the best prediction model. The results show that the factors with higher occurrence frequency are the subtropical high systems in the Northern Hemisphere and the Eastern Hemisphere. Next, the subtropical high systems in East Asia also play very important roles, especially the strength and area index of the subtropical high in the western Pacific.

Key words summer precipitation prediction, downscaling techniques, characteristic quantities of atmospheric circulations, partial least square regression

1 引言

我国东部地区人口密集, 经济和科技文化发

达, 是我国重要的工农业生产基地; 同时, 受东亚季风影响 (严华生等, 2007; 刘飞等, 2006; 魏凤英等, 2006; Wei et al., 2008), 也是我国降水量多,

洪涝灾害较为严重的地区之一。因此,我国东部地区夏季降水量的短期气候预测是气候研究中的重要课题之一(彭京备等,2006;Wei,2007;Fan et al.,2008;贾建颖等,2009)。

对于预测未来全球大尺度天气变化,数值预报模式是目前最重要也是最可行的方法。数值模式能相当好地模拟出大尺度最重要的平均特征,特别是能较好地模拟高层大气场、近地面温度和大气环流。但是由于目前数值模式输出的空间分辨率较低,缺少区域信息,很难对区域气象要素做出精确的预测。由于提高数值模式的空间分辨率需要的计算量很大,降尺度法是更为可选的方法(Palmer et al.,2000;Feddersen,2003;Zhu et al.,2008)。

降尺度法是基于这样一种观点:即区域气候变化情景受大尺度(如大陆尺度,甚至行星尺度)系统所控制,同时也受到区域尺度的因子的调制,因此,应采用降尺度方法把大尺度、低分辨率的数值模式输出信息转化为区域尺度的地面气候变化信息(如气温、降水),从而弥补数值模式对区域气候预测的局限。统计降尺度法是利用多年的观测资料,建立大尺度系统(主要是大气环流)和区域气候要素之间的统计关系模型,来预估和预测区域未来的气候变化(陈丽娟等,2003;Zwiers and van Storch,2004;范丽军等,2007;李江萍和王式功,2008)。

500 hPa 高度场是中层大气环流场的代表,也是一般气候数值模式输出的主要高度场之一。在使用统计降尺度法的大尺度的环流因子中,主要有两种类型的因子:一种是直接利用高度场的网格点的高度值;另一种是利用网格点的高度值,构成具有天气气候学意义的区域天气系统指标,称为环流特征量(施能和朱乾根,1996)。它们是间接利用高度场网格点的高度值组成的区域综合因子。这些环流特征量的组成过程,实际上是一种大气环流降尺度的过程。本文研究是利用后一种类型因子,来建立预测中国东部夏季(6~8月)降水量的统计降尺度预测模型。

利用环流特征量,建立预报模型进行气候要素的预测,已经有很多的研究。但是,一般仅使用相关系数进行因子与预报量关系分析,而使用相关较好的因子建立回归预报模型(张旭辉等,2006;Wei,2007;王慧等,2008),并利用预测模型对因

子进行分析研究还很少。

本文提出使用偏最小二乘回归方法,利用北半球环流特征量,建立关于我国东部夏季降水量的预测模型。进一步利用交叉检验方法,对建立的预报模型进行检验,确定最佳的预报模型。然后,利用所确定的最佳预报模型中因子场中不同环流特征量的贡献大小,分析研究因子在所有独立预报年份中的贡献大小,从预报角度研究影响我国东部夏季降水量的大气环流因子。

2 资料与方法

2.1 资料

本文使用的大气环流因子是1951~2007年6~8月74个特征量序列,其中绝大多数特征量是由500 hPa位势高度计算整理的。降水量资料是中国160站同期逐月降水资料。以上资料均由国家气候中心气候预测室提供。环流特征量由国家气候中心气候预测室计算、整理,并在<http://ncc.cma.gov.cn>和《气象》杂志每月公开发布。本文取中国东部(105°E以东)120个测站的夏季降水量作为预测对象。120个测站的站点分布见图1。

2.2 统计降尺度方法

本文采用的统计降尺度方法预测模型是使用偏最小二乘回归方法建立的。偏最小二乘回归方法提供的是一种多因变量对多自变量的回归建模方法,当变量之间存在高度相关性时,所建立的模型,其

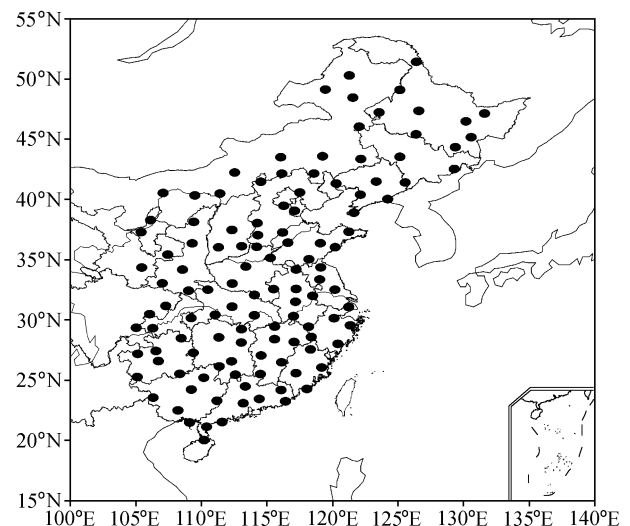


图1 中国东部120站的站点分布

Fig. 1 The distribution of the observation stations over eastern China

分析结论更可靠,整体性更强。此方法适合在样本容量小于变量个数的情况下进行回归建模。可以实现多种多元统计分析方法综合应用,并可以把建模类型的预测分析与非模型式数据内涵分析有机结合。它还可以同时实现回归建模(回归分析)、数据结构简化(主成分分析)以及两组变量间相关分析(典型相关分析)。偏最小二乘回归方法与传统回归分析不同,它对因子场和预报场的变量进行标准化处理,形成对应因子场和预报场的变量标准化矩阵 \mathbf{E}_0 , \mathbf{F}_0 , 对因子场作主分量分析,提取其与预报场有最密切关系的最大特征值对应的主分量和对应的荷载向量,以此主分量与因变量作回归,求预报场和因子场的残差矩阵,然后把残差矩阵作为新的预报场和因子场,重复上述过程,如此逐次进行,求得因子场的主分量和对预报场的回归,最后得到:

$$\begin{cases} \mathbf{E}_0 = t_1 \mathbf{p}'_1 + t_2 \mathbf{p}'_2 + \cdots + t_s \mathbf{p}'_s, \\ \mathbf{F}_0 = t_1 \mathbf{r}'_1 + t_2 \mathbf{r}'_2 + \cdots + t_s \mathbf{r}'_s + \mathbf{F}_s, \end{cases} \quad (1)$$

式中, t_i 表示逐次 (i) 提取的因子场变量组与预报场变量组关系最密切的主分量, p_i 为自变量荷载向量, r_i 为预报场在主分量轴上的投影向量, 符号 ($'$) 表示转置。由于因子场变量组与预报场变量组之间的关系是通过主分量 t_i 进行传递的。其自变量荷载是反映因子场变量在偏最小二乘回归中起的重要作用,它可以在一定程度上反映因子场变量与预报场变量传递的相关关系,由它与主分量构成对自变量矩阵的拟合。而自变量矩阵主分量向量与逐次得到的向量 r_i 构成对预报场矩阵的拟合,其拟合程度取决于逐次选取主分量的个数 (Huang et al., 2007)。

2.3 预测效果检验方法

在预测模型建立以后,本文采用预测场与实况场的距平符号一致率(简称同号率,以下用 PSS 表示)(彭京备等,2006)和国际上通用的两个场的距平相关系数(以下用 ACC 表示)(柳艳香等,2007)来检验其预测效果。因为短期气候预测业务要求能够预测出旱涝趋势,强调的是降水量的距平符号。而预测场与观测场的相关系数则可以度量两个场的距平分布形势相似程度。距平同号率仅比较距平符号,如果实况值与预测值差别很多,只要符号相同,则认为是预测正确,而 ACC 则考虑实况值与预测值的相似程度,其中也考虑数值的大小和符号

的相似程度。

对于预报模型优劣的测度,是使用交叉检验方法,即在资料样本的样本容量 N 中,首先选择一个样品(年)为独立样本,用其余 $N-1$ 年资料作为依赖样本,建立统计降尺度模型后,并对所选择的独立样本进行估计,这个过程重复 $N-1$ 次,直到所有样本都被选择并检验。最后,以所有交叉检验得到的同号率和相关系数的平均值来反映因子场的可预测性程度。交叉试验后所产生评分统计量的平均值,可以进一步对其作平均值的显著性检验,使用 t 检验进行检验,即

$$t = \frac{\bar{x} - \mu}{\sigma / \sqrt{n-1}} \quad (2)$$

遵从自由度为 $n-1$ 的 t 分布。式中, n 为交叉试验总次数, \bar{x} 和 σ 分别为评分统计量在交叉试验序列中的平均值和标准差, μ 为期望值。对距平符号试验,随机试验的同号率的期望值为 0.5,对 ACC,随机试验的期望值为 0.0。当交叉试验次数在 60 附近时,当统计量 t 的计算值超过 2.0 时,可以认为评分统计量的平均值在 0.05 显著性水平下是显著的。

由于预报模型的建立是在提取的自变量组与预报场组关系最密切的主分量上逐次进行,一般前几次分量的提取具有较大的解释方差,为了比较方便,在交叉检验预报中,对每 1 年的预报,取各月份提取最佳次数的主分量的因子荷载场[公式(1)中的 p_i],从场中找出荷载绝对值最大的环流特征量,定义为预报模型中与预报场最佳回归关系中贡献较大的环流因子。然后,在逐年的交叉检验的独立样本中找出预报模型中在某选择次数和所有独立预报年份中出现的频率顺次最大的环流因子,这些因子被认为是对预报场影响最重要的因子。

3 中国东部夏季降水量逐月预报模型的确定

由于预报模型的建立,是逐次提取的自变量组与预报场组关系最密切的主分量,其提取次数[公式(1)的 s]可能会影响预测的效果。因此,使用不同的提取次数,试验次数 $s=2\sim 20$,对 57 年资料作交叉检验。图 2 给出对 6 月份作交叉预测检验情况。

在图 2 中,从交叉检验指标平均值来看, PSS

平均值变化不大，在次数 3~11 上均有较大的值，但是 ACC 平均值有较大的变化，在 $s=4$ 时有最大值，PSS 的平均值达到 55.0%，ACC 平均值达到 0.082。因此，选取次数 4 的预报模型，作为对 6 月份的基本预报模型。用此模型作逐年交叉检验的情况由图 3 给出。

从图 3 可以看出，不少年份的 PSS 都超过 60%。例如，1954 年是出现江淮流域大水的年份，PSS 可以达到 63.3%，ACC 达到 0.212。1956 年黄淮降水异常偏多，PSS 甚至达到 75.8%，ACC 达到 0.486。在所有检验的年份中，PSS 有 44% 能够超过 55.0%。

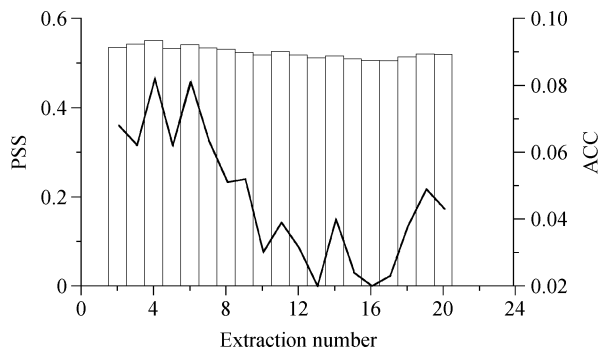


图 2 预测我国东部 6 月份降水量的 PSS (直方图) 和 ACC 随提取次数的变化

Fig. 2 The variations with the extraction number for the percentage of the same symbol (PSS) of anomaly signs (histogram) and the anomaly correlation coefficient (ACC) for the prediction model of the precipitation over eastern China in Jun

对 7 月份作类似分析，在 PSS 和 ACC 随提取次数变化的图 (图略) 上，发现次数 $s=7\sim 19$ 上，PSS 均有较大的值。ACC 由 0.129 逐步增加，到 $s=8$ 时有最大值，然后逐步下降，因此选取次数 $s=8$ 作为 7 月份的基本预报模型。对应的检验指标是：PSS 平均值为 54.6%，ACC 平均值达到 0.143。用该模型作逐年交叉检验 (图略)，也发现大多数年份有较好的预测效果。在检验的年份中，PSS 有 50% 能够超过 55.0%。

对 8 月份也作类似分析，在 PSS 和 ACC 随提取次数的变化图 (图略) 上，发现次数 $s=3\sim 16$ 上，PSS 的平均值均较大，ACC 平均值均大于 0.12，其中在 $s=4$ 时有最大值，PSS 平均值达到 55.6%，ACC 平均值为 0.155。因此选取次数 4 作为 8 月份的基本预测模型。用该模型作逐年交叉检验 (图略)，也发现大多数年份月份有较好的预测效果。在检验的年份中，PSS 有 54% 能够超过 55.0%。

整个夏季各月使用的预报模型，PSS 平均能够接近或超过 55%，ACC 平均值能够接近或超过 0.10，到达较好的预测效果，可以确定为中国东部夏季降水逐月的基本预报模型。

4 大气环流因子在月际预报中的表现

为了寻找重要因子，从因子场中找出荷载绝对值最大的 10 个环流特征量，它们是在各月基本预报模型中与预报场最佳回归关系中贡献较大的环流

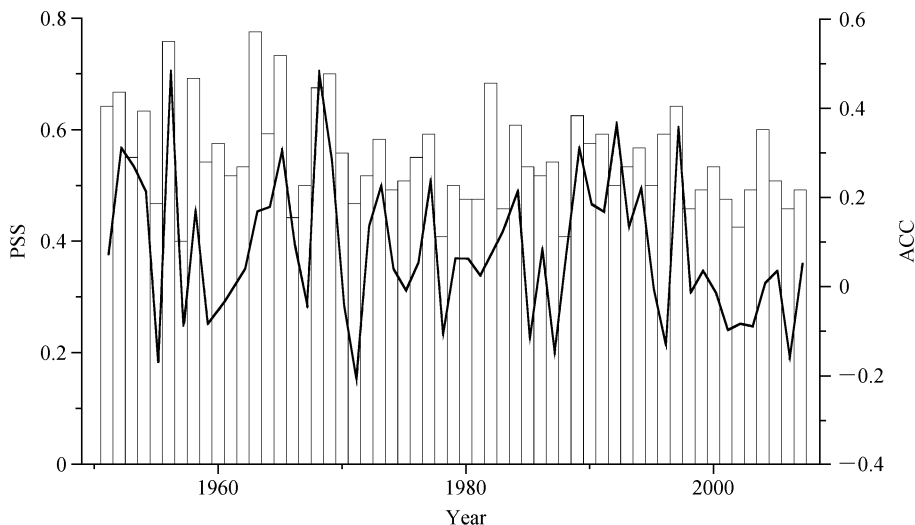


图 3 预测我国东部 6 月份降水量的 PSS (直方图) 和 ACC 逐年的变化

Fig. 3 The variations with years of the PSS of anomaly signs (histogram) and the ACC for the prediction model of the precipitation over eastern China in Jun

表 1 基本预报模型中出现的频率最大的环流因子

Table 1 The circulation factors occurring with high frequencies in the basic prediction model

	顺序号	频率	因子序号	名称
6 月	1	50%	23	北半球副高脊线 (5°E~360°)
	2	40%	61	欧亚纬向环流指数 (0°~150°E)
	3	37%	1	北半球副高面积指数 (5°E~360°)
	4	36%	3	北非大西洋副高面积指数 (110°W~60°E)
	5	35%	12	北半球副高强度指数 (5°E~360°)
7 月	1	35%	24	北非副高脊线 (20°W~60°E)
	2	35%	29	北美副高脊线 (110°W~60°W)
	3	33%	32	北美大西洋副高脊线 (110°W~20°W)
	4	33%	63	亚洲纬向环流指数 (60°E~150°E)
	5	32%	25	北非大西洋副高脊线 (110°W~60°E)
8 月	1	49%	23	北半球副高脊线 (5°E~360°)
	2	46%	45	西太平洋副高西伸脊点
	3	43%	44	太平洋副高北界 (110°E~115°W)
	4	38%	46	亚洲区极涡面积指数 (60°E~150°E)
	5	33%	32	北美大西洋副高脊线 (110°W~20°W)

因子。然后,在选取的不同次数与在交叉检验的所有独立样本(年份)中,找出预报模型中出现的频率最高的环流因子。表 1 给出 6~8 月各个月份基本预测模型中出现的频率顺次最大的 5 个环流因子的比较。

从表 1 可见,6 月份,随着全球副高系统的北进,我国雨带出现在长江以南。此时,全球大尺度副高系统因子起主要作用。例如,北半球副高脊线、副高面积和副高强度均起重要作用,同时,出现频率也是欧亚纬向环流指数起重要作用。实际上,虽然选择的副高系统主要表现在北半球副高系统,但是这些系统也与东亚地区的环流系统有密切相关。例如,频率最高的因子北半球副高脊线与太平洋副高脊线、副高面积和副高北界的相关系数,分别高达 0.69、0.56 和 0.52,均超过 0.05 显著性水平。欧亚纬向环流指数也是出现频率很高的因子,它与亚洲纬向环流指数的相关系数也有 0.43。说明北半球和欧亚环流系统也能够反映东亚地区的环流系统状态。

进入 7 月份,随着副高北上,我国雨带出现在长江与淮河一带,能够产生降水的环流因子,副高北上的指标(副高脊线)是重要因子,东半球副高脊线系统也起重要作用。此外,亚洲纬向环流系统也起很大作用。同样,这些系统与东亚地区的环流系统也有密切相关。例如,频率最高的因子与东太

平洋副高脊线相关系数为-0.40,出现频率也很大的北美大西洋副高脊线与青藏高原环流系统相关系数达到 0.53。亚洲纬向环流指数则与西太平洋副高西伸脊点有密切关系(相关系数为-0.52)。

到了 8 月份,随着副高进一步北上,我国雨带出现在黄河流域,反映副高活动的因子仍然是我国盛夏的主要因子,但是,因子中仍然是北半球副高脊线起重要作用。同时,东亚地区的西太平洋副高西伸脊点决定我国雨带的位置,也是十分重要的因子。此外,反映东亚北方冷空气活动的亚洲区极涡面积指数也是我国东部降水产生的动力因子。尽管影响我国降水的是北半球副高系统,但它们也能够反映东亚地区的副高活动情况。例如,频率最高的因子北半球副高脊线与太平洋副高脊线的相关系数为 0.48。频率次高的因子西太平洋副高西伸脊点,与南海副高脊线和副高北界相关系数分别高达-0.65 和-0.68。太平洋副高北界则与南海副高面积指数相关系数达到-0.45。

实际上,整个夏季的不同月份,北半球和东半球副高系统在我国降水预报中起主要作用。当然,东亚地区的环流因子也起一定的作用。例如,在 6 月份,没有列在表 1 中反映东亚地区的西太平洋副高强度指数也是重要因子,它的顺序号为 11,出现频率为 25%。另外,顺序号为 12,出现频率也为 25%的南海副高强度指数也是重要因子。7 月份,

顺序号为 6，出现频率为 29% 的西太平洋副高脊线，和顺序号为 9，出现频率为 28% 的西太平洋副高北界，也是影响我国降水的重要因子。8 月份，反映北方冷空气活动的亚洲区极涡强度指数也是重要因子，它的顺序号为 6，出现频率为 32%，西太平洋副高脊线，它的顺序号为 8，出现频率为 26%。

5 中国东部夏季降水预测模型中的主要环流因子

由于出现频率能够反映不同的环流因子在预测模型中的作用，我们首先选取出现频率顺次最大的前 60 个环流因子，它们包含了东亚地区的重要环流因子，作为从 74 个环流特征量中筛选的因子。第二步，从它们中按出现频率大小顺序，再选择其中若干个重要因子参加到预测模型中，选择时也使用逐次分量数来建立预报模型。

6 月份，按出现频率大小顺序，选择 20、30 和 40 个环流因子进入预测模型，作次数 $s=2\sim 20$ 进行预测试验，然后对 57 年资料作交叉检验。发现选入因子个数 30 有较好的效果。图 4 给出对 6 月份在 $s=2\sim 20$ 下作交叉预测检验情况。

从图 4 可见，当 s 变化时，PSS 平均值变化不大，在次数 3~7 上均有较大的值，但是 ACC 平均值有较大的变化，在 $s=4$ 时有最大值，PSS 平均值能够达到 56.7%，ACC 达到 0.128，它们对应的 t 值分别为 5.124 和 5.317，均超过 0.05 的显著性检

验水平。与图 2 比较，也可以看见预测效果有明显提高。因此，选取次数 $s=4$ ，重要因子数为 30 的预报模型，作为对 6 月份的最后的预报模型。用此模型作逐年交叉检验的情况在图 5 中显示。

从图 5 可以看出，大部分的年份的 PSS 都超过 60%，ACC 超过 0.20。57 年的平均值，PSS 达到 56.7%，ACC 为 0.128。例如，1954 出现江淮大水年份，中国东部地区 PSS 达到 69%，ACC 达到 0.37，其中长江地区 PSS 达到 63%，ACC 达到 0.28，东北地区 PSS 高达 73%，ACC 也高达 0.66。另一大水年——1998 年，中国东部地区 PSS 达到 53%，ACC 达到 0.20，其中长江地区 PSS 达到 59%，ACC 达到 0.20。在所有独立预报试验年份

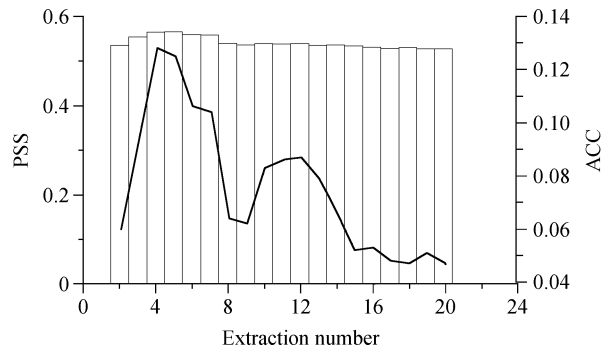


图 4 预测 (选入因子个数 30) 我国东部 6 月份降水量的 PSS (直方图) 和 ACC 随提取次数的变化
Fig. 4 The variations with the extraction number of the PSS of anomaly signs (histogram) and the ACC for the prediction model (30 factors selected) of the precipitation over eastern China in Jun

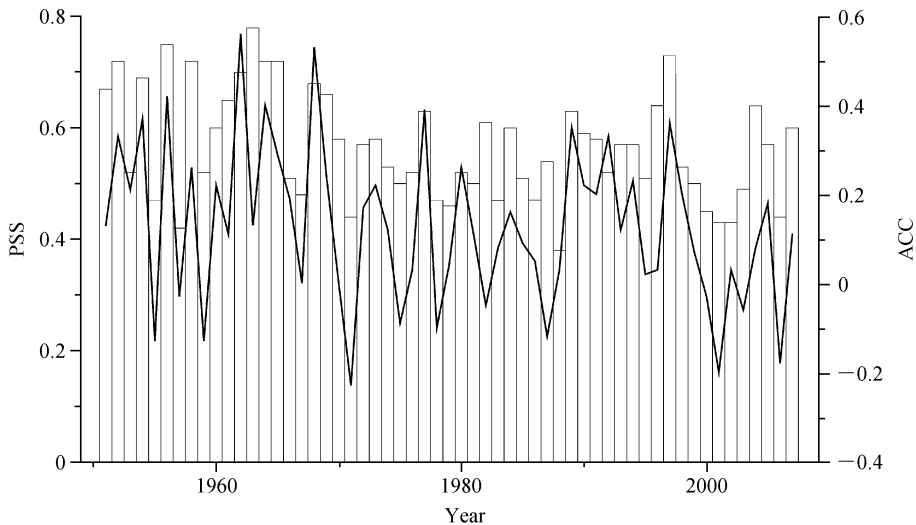


图 5 预测 (选入因子个数 30) 我国东部 6 月份降水量的 PSS (直方图) 和 ACC 逐年的变化
Fig. 5 The variation with years of the PSS of anomaly sign (histogram) and the ACC for the prediction model (30 factors selected) of the precipitation over eastern China in Jun

中, 1962 年报得最好, 中国东部地区 PSS 达到 70%, ACC 达到 0.56, 其中长江地区 PSS 高达 78%, ACC 也高达 0.62。因此, 确定此预报模型为 6 月份最佳因子集和最佳次数预报模型。

类似地, 对 7 月份的基本预报模型, 按出现频率大小顺序, 选择 20~60 个环流因子进入预测模型, 作次数 $s=2\sim 20$ 的预报试验, 并对 57 年资料作交叉检验。发现 $s=8$, 选入重要因子个数 50 有较好的效果(图略)。发现在 $s=8$ 时, 中国东部地区 PSS 和 ACC 的平均值均达到最大值, PSS 平均值达到 55.2%, ACC 达到 0.152, 经过检验, 它们也超过 0.05 的显著性检验水平。预报效果比基本预报模型要好。该模型在逐年的预报中也有较好的预报效果。例如, 1954 年, PSS 达到 67%, ACC 达到 0.43。另一大水年——1998 年, PSS 达到 55%, ACC 也达到 0.12。均有较好预报效果。其中, 1971 年报得最好, PSS 达到 75%, ACC 达到 0.43。确定它为 7 月份最佳预报模型。

类似地, 对 8 月份的基本预报模型作类似的因子集和分量次数的试验, 发现 $s=4$, 选入 40 个因子有最佳的预报效果。中国东部地区, 符号同号率平均值达到 55.4%, ACC 达到 0.146。经过检验, 它们也超过 0.05 的显著性检验水平。预报效果与基本预报模型预测效果差不多。说明所选择的 40

个重要因子是主要影响因子, 可以达到 69 个环流特征量所作预测的效果。该模型在逐年的预报中也有较好的预测效果。例如, 1991 出现江淮大水年份, PSS 达到 65%, ACC 达到 0.44。最后, 确定它为 8 月份最佳预报模型。从各月份确定的最佳因子集和最佳次数预报模型中, 与表 1 的做法类似, 在选取的不同次数中, 从预报场回归关系中贡献较大的环流因子中, 找出预报模型中出现的频率顺次最大的环流因子。表 2 给出 6、7、8 月中, 各个月份最佳预测模型中, 出现的频率顺次最大的 5 个环流因子的比较。

从表 2 可见, 6 月份, 因子经过筛选, 北半球副高面积指数从出现频率顺序号为 3 的位置转变为最重要的因子, 顺序号为 11 的西太平洋副高强度指数则排第 2 位, 说明北半球和东亚地区的西太平洋副高强度是 6 月份影响我国降水的重要因子。7 月份, 南海副高面积指数从出现频率顺序号为 49 的位置转变为最重要的因子, 顺序号为 21 的南海副高脊线则排第 5 位, 说明东亚地区南海副高是 7 月份的重要因子。8 月份, 北半球副高面积指数从出现频率顺序号为 14 的位置转换为最重要的因子, 顺序号为 32 的西太平洋副高面积指数则排第 3 位, 说明北半球和东亚地区副高面积是 8 月份影响我国降水的重要因子。

表 2 最佳因子集和最佳次数预报模型中出现的频率顺次最大的环流因子

Table 2 The circulation factors occurring with high frequencies in the prediction model with the best factors and extraction number

月份	顺序号	频率	因子序号	名称
6 月	1	57%	1	北半球副高面积指数(5°E~360°)
	2	46%	16	西太平洋副高强度指数(110°E~180°E)
	3	43%	8	大西洋副高面积指数(55°W~25°W)
	4	41%	23	北半球副高脊线(5°E~360°)
	5	40%	18	北美副高强度指数(110°W~60°W)
7 月	1	42%	9	南海副高面积指数(100°E~115°W)
	2	40%	13	北非副高强度指数(20°W~60°E)
	3	36%	35	北非副高北界(20°W~60°E)
	4	35%	29	北美副高脊线(110°W~60°W)
	5	34%	31	南海副高脊线(100°E~115°W)
8 月	1	40%	1	北半球副高面积指数(5°E~360°)
	2	38%	7	北美太平洋副高面积指数(110°W~60°W)
	3	35%	5	西太平洋副高面积指数(110°E~180°)
	4	29%	2	北非副高面积指数(20°W~60°E)
	5	28%	6	东太平洋副高面积指数(175°E~115°W)

经过因子筛选后的因子集, 在各个月份的预报模型中, 表现最突出的因子, 仍然是北半球, 或者东半球副高系统。但是, 除北半球的大尺度副高系统的作用外, 东亚地区局地副高系统也起十分重要的作用。特别是西太平洋副高强度和面积指数, 在夏季降水的预报中均起重要作用。

另外, 从表 2 还可以看出, 在不同月份的预报模型中, 初夏的 6 月份, 北半球副高面积系统起决定性作用, 反映 6 月份我国的降水是受大尺度副高因子的作用。但是, 进入 7 月份, 副高的北跳是雨带位置的決定因素, 这时东亚地区的南海副高面积和脊线起重要作用, 到 8 月份, 副高系统的面积又起重要作用。

值得注意的是, 比较表 1 和表 2, 经过筛选后的因子在提高预报效果的同时, 在预报模型贡献最大的因子中突出了副高系统的作用。

6 环流因子在中国东部夏季降水预测中的作用及其物理意义

在预测模型和进入模型中的因子确定后, 还需要进一步研究使用此模型进行预测试验的效果, 以及环流因子的作用。

为了比较, 我们使用逐步回归方法, 利用大气环流特征量作为因子, 建立对中国东部夏季降水量的回归预测模型, 进行预测。还分别对中国东部全区, 以及东部不同的地区进行预测效果的检验。分区原则是按中国夏季降水量气候区划进行划分(黄茂怡和黄嘉佑, 2000)。表 3 给出使用本文的最佳预测模型和传统回归模型在 6、7、8 月中, 各个月份的预测的同号率的比较, 表中还给出根据公式(2) 计算各区对应同号率平均值的 t 值。

从表 3 可见, 本文的最佳预测模型预测效果在

大部分地区比传统回归模型都要好。传统回归模型检验的 t 值, 6 月份和 7 月份在黄淮和长江地区的平均同号率出现是负值, 即比随机预测的 50% 还要低。另外, 比较还发现本文的最佳预测模型在不同月份对黄淮、长江和华南地区的预测均有较好的效果, 也说明以副高为主的组合环流因子(本文的模型)的预测效果, 要比单独选入的环流因子(逐步回归模型)好。

与彭京备等(2006)的工作比较, 他们使用高原雪盖和海温因子所做的预测中, 在 1990、1991 年预测效果较低(低于或接近 50%), 而本文利用 6、7、8 月的预测模型, 相应年份预测同号率能够分别达到 59% 和 58%、52% 和 62%、50% 和 65%。可见, 使用大气环流因子, 可以补充使用外强迫因子的不足。当然, 使用本文的预测模型, 在预测效果中也出现较差的年份。例如, 1988 年 6 月份, 同号率只达到 38%, 其原因是分区预测效果差异很大。东北地区预测最差, 仅为 0%, 而长江和华南地区却能够达到 56% 和 52%。1951 年 7 月份, 同号率只达到 41%, 但是在黄淮地区, 却能够达到 59%。1984 年 8 月份, 同号率亦只达到 44%, 但是在黄淮地区却能够达到 67%。这说明副高因子是影响中国南方降水的主要环流因子。

虽然各月份最佳预测模型选取的主要因子不是东亚地区的环流因子, 但是它们与东亚地区的环流因子有十分密切关系。表 4 给出在 6 月份中, 本文的最佳预测模型前 5 个重要因子(见表 2)与东亚地区的环流因子的相关系数。

从表 4 可见, 最佳预测模型前 5 个重要因子(见表 2)与东亚地区的环流因子的相关系数, 大部分超过 0.05 显著性水平(0.25), 相关系数绝对值的平均值也均超过 0.05 显著性水平, 相关较为密

表 3 不同预测模型的预测平均 PSS 比较

Table 3 Comparison of the average PSSs of anomaly signs for different prediction models

	6 月最佳模型		6 月回归模型		7 月最佳模型		7 月回归模型		8 月最佳模型		8 月回归模型	
	PSS	t 值	PSS	t 值	PSS	t 值	PSS	t 值	PSS	t 值	PSS	t 值
全区	0.567	5.124	0.520	2.100	0.552	4.535	0.530	4.177	0.554	4.877	0.528	3.731
东北	0.551	3.409	0.532	2.043	0.553	3.037	0.508	0.561	0.538	2.144	0.536	2.133
华北	0.513	0.848	0.516	1.070	0.531	1.616	0.500	0.000	0.577	3.888	0.517	1.056
黄淮	0.555	2.549	0.492	-0.428	0.511	0.583	0.498	-0.128	0.548	2.402	0.524	0.524
长江	0.529	1.868	0.497	-0.243	0.549	2.447	0.566	4.208	0.568	3.632	0.522	1.389
华南	0.567	3.255	0.527	1.756	0.581	4.135	0.531	1.650	0.553	2.601	0.543	3.090

表 4 6 月份最佳预测模型中前 5 个重要因子与东亚地区的环流因子的相关系数

Table 4 Correlation coefficients between the first five factors in the best prediction model in Jun and the circulation factors over East Asia

因子名称	1	2	3	4	5	绝对值平均
西太平洋副高面积指数	0.83	0.91	0.36	-0.21	0.52	0.57
西太平洋副高强度指数	0.81	0.99	0.35	-0.31	0.58	0.61
西太平洋副高脊线	-0.22	-0.39	0.17	0.54	0.09	0.28
西太平洋副高北界	0.18	0.15	0.34	0.27	0.34	0.26
西太平洋副高西伸脊点	-0.52	-0.67	-0.17	0.27	-0.38	0.40
南海副高面积指数	0.55	0.73	0.14	-0.33	0.38	0.43
南海副高强度指数	0.54	0.75	0.15	-0.30	0.44	0.44
亚洲区极涡面积指数	-0.37	-0.28	-0.26	-0.22	-0.35	0.30
西藏高原北部位势高度	0.56	0.43	0.51	0.14	0.45	0.42
西藏高原南部位势高度	0.42	0.31	0.42	0.10	0.37	0.32
印缅槽	0.56	0.53	0.31	-0.13	0.42	0.39

切的是西太平洋副热带高压、南海副热带高压的各项指数、西藏高原位势高度和印缅槽。7、8 月份的计算也发现情况类似,只是相关程度比 6 月份稍低。说明本文的最佳预测模型选取的主要因子是能够反映东亚地区的环流因子作用。

表 4 表明,本文建立的最佳预测模型选取的因子可以反映东亚环流重要系统对中国东部夏季降水的影响。西藏高原位势高度在一定程度上反映了青藏高原的热源状况,其持续时间长,是夏季降水短期气候业务预测中考虑的重要因素。高原位势高度偏高,表示热源强,有利于东亚夏季风强,西太平洋副热带高压位置偏西、偏北,而西太平洋副热带高压位置偏西、偏北,有利于中国东部夏季主要雨带偏北,反之亦然。

7 结论与讨论

本文使用 1951~2007 年逐月 500 hPa 环流特征量,使用降尺度技术和偏最小二乘回归方法,以环流特征量作为降尺度因子场,建立逐月的我国东部 120 站夏季降水量的预报模型。从最佳预报模型中的环流特征量中选择贡献较大的因子,且出现的频率较大,进行因子筛选,最后建立含因子个数较少的最佳预报模型,再根据模型中因子出现的频率对影响我国东部的夏季降水的影响因子进行分析研究,结果如下:

(1) 在夏季各个月份的预报模型中,出现频率表现最突出的因子是北半球和东半球副高系统。但

是,除北半球的大尺度副高系统的作用外,东亚地区局地副高系统也起十分重要的作用,特别是西太平洋副高强度和面积指数。

(2) 在不同月份的预报模型中,初夏 6 月份,北半球和东亚地区的西太平洋副高强度是重要因子。进入 7 月份,东亚地区的南海副高是影响我国的重要因子。8 月份与 6 月份相似,北半球和东亚地区的西太平洋副高强度是重要因子。

(3) 在不同月份的预报模型中,反映北方冷空气活动的经向度的环流特征量和东亚地区极涡也是重要因子。但是,它们对我国夏季降水量的影响要比副高系统作用要小些。

在本文分析中,发现影响我国夏季降水的环流因子中,副高系统起十分重要的作用。这与前人研究的结论是一致的(黄嘉佑等,2003;陶云等,2007),但是也与一些研究结论有不同之处,他们认为极涡和北极涛动是我国夏季降水的重要因子(黄嘉佑等,2004;龚道溢等,2002)。这可能是由于以前的研究是使用前期的大气环流因子与降水量相关进行研究,而本文则着重研究的是预报模型中因子对同期降水量的预报贡献。这种因子分析将对数值模式的降尺度预报的改善有重要参考价值。

虽然,在贡献最大的因子中突出了副高系统的作用,但是,影响东亚季风区降水的因子非常复杂,既包括海气相互作用也包括南北半球环流系统相互作用。我们这里仅考虑了气候业务中常用的北半球环流特征量,从分析结果来看,副高是比较重

要的环流系统。但这并不能说其它因素不重要, 还可能存在着更重要的影响系统, 此结果仅仅是从北半球特征量这一角度得到的。事实上, 要提高我国夏季降水的短期气候预测水平还有很多很多的研究工作要做。

参考文献 (References)

陈丽娟, 李维京, 张培群, 等. 2003. 降尺度技术在月降水预报中的应用 [J]. 应用气象学报, 14 (6): 648 - 655. Chen Lijuan, Li Weijing, Zhang Peiqun, et al. 2003. Application of a new downscaling model to monthly precipitation forecast [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 14 (6): 648 - 655.

范丽军, 符淙斌, 陈德亮. 2007. 统计降尺度法对华北地区未来区域气温变化情景的预估 [J]. 大气科学, 31 (5): 887 - 897. Fan Lijun, Fu Congbin, Chen Deliang. 2007. Estimation of local temperature change scenarios in North China using statistical downscaling method [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 31 (5): 887 - 897.

Fan Ke, Wang Huijun, Choi Young-Jean. 2008. A physically-based statistical forecast model for the middle-lower reaches of the Yangtze River valley summer rainfall [J]. Chinese Science Bulletin, 53 (4): 602 - 609.

Feddersen H. 2003. Predictability of seasonal precipitation in the Nordic region [J]. Tellus, 55A: 385 - 400.

龚道溢, 朱锦红, 王绍武. 2002. 长江流域夏季降水与前期北极涛动的显著相关 [J]. 科学通报, 47 (7): 546 - 549. Gong Daoyi, Zhu Jinhong, Wang Shaowu. 2002. Relationship between the summertime precipitation over the reaches of Changjiang River and Arctic Oscillation of the previous season [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 47 (7): 546 - 549.

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 [J]. 应用气象学报, 11 (增刊): 31 - 39. Huang Maoyi, Huang Jiayou. 2000. Forecasting experiments and diagnostic results of the CCA model on summer precipitation of China [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 11 (Suppl.): 31 - 39.

黄嘉佑, 高守亭. 2003. 影响长江地区夏季洪涝的大气环流因子研究 [J]. 自然科学进展, 13 (2): 206 - 209. Huang Jiayou, Gao Shouting. 2003. A study on the effects of factors of atmosphere general circulation on the precipitation anomaly over the reaches of Changjiang River in summer [J]. Progress in Natural Sciences (in Chinese), 13 (2): 206 - 209.

黄嘉佑, 刘舸, 赵昕奕. 2004. 副高、极涡因子对我国夏季降水的影响 [J]. 大气科学, 28 (4): 517 - 526. Huang Jiayou, Liu Ge, Zhao Xinyi. 2004. The influence of subtropical high indexes and polar vortex indexes on the summertime precipitation in China [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 28 (4): 517 - 526.

Huang Jiayou, Tan Benkui, Suo Lingling, et al. 2007. Monthly

changes in the influence of the Arctic Oscillation on surface air temperature over China [J]. Adv. Atmos. Sci., 24 (5): 799 - 807.

贾建颖, 孙照勃, 刘向文, 等. 2009. 中国东部夏季降水准两年周期振荡的长期演变. 大气科学, 33 (2): 397 - 407. Jia Jianying, Sun Zhaobo, Liu Xiangwen, et al. 2009. Evolution of summer precipitation quasi-biennial oscillation in eastern China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (2): 397 - 407.

刘飞, 何金海, 姜爱军. 2006. 亚洲夏季西风指数与中国夏季降水的关系 [J]. 南京气象学院学报, 29 (4): 517 - 525. Liu Fei, He Jinhai, Jiang Aijun. 2006. Relationship between Asian summer westerly wind index and summer rainfall in China [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 29 (4): 517 - 525.

李江萍, 王式功. 2008. 统计降尺度法在数值预报产品释用中的应用 [J]. 气象, 34 (6): 41 - 45. Li Jiangping, Wang Shigong. 2008. Application of statistical downscaling method to numerical weather forecast [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 34 (6): 41 - 45.

柳艳香, 王凌, 赵振国, 等. 2007. 2006 年中国夏季降水预测回顾 [J]. 气候变化研究进展, 3 (4): 243 - 245. Liu Yanxiang, Wang Ling, Zhao Zhenguo, et al. 2007. Review of precipitation prediction for summer 2006 [J]. Adv. Climate Change Res. (in Chinese), 3 (4): 243 - 245.

彭京备, 陈烈庭, 张庆云. 2006. 多因子和多尺度合成中国夏季降水预测模型及预报试验 [J]. 大气科学, 30 (4): 596 - 608. Peng Jingbei, Chen Lieting, Zhang Qingyun. 2006. The statistic prediction model and prediction experiments of the summer rain over China by multiple factors and multi-scale variations [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 30 (4): 596 - 608.

Palmer T N, Brankovic C, Richardson D S. 2000. A probability and decision-model analysis of PROVOST seasonal multi-model ensemble integrations [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 126: 2035 - 2067.

施能, 朱乾根. 1996. 北半球大气环流特征量的长期趋势及年代际变化 [J]. 南京气象学院学报, 19 (3): 283 - 289. Shi Neng, Zhu Qiagen. 1996. Secular trends and interdecadal variation of characteristic quantities of atmospheric circulation for northern winter [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 19 (3): 283 - 289.

陶云, 赵荻, 杨明. 2007. 1998 年长江流域夏季降水异常的一个物理机制 [J]. 热带气象学报, 23 (1): 41 - 46. Tao Yun, Zhao Di, Yang Ming. 2007. A possible mechanism for the abnormal summer rainfall over Yangtze River valley in 1998 [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 23 (1): 41 - 46.

王慧, 谭艳梅, 毛炜峰, 等. 2008. 环流特征量指数在新疆汛期降水趋势预测中的应用 [J]. 干旱区研究, 25 (4): 485 - 491. Wang Hui, Tan Yanmei, Mao Weiyi, et al. 2008. Application of indexes of characteristic quantities of atmospheric circulation in precip-

- itation trend prediction in Xinjiang in flood season [J]. *Arid Zone Research* (in Chinese), 25 (4): 485–491.
- 魏凤英, 宋巧云, 韩雪. 2006. 近百年北半球海平面气压分布结构及其对长江中下游梅雨异常的影响 [J]. *自然科学进展*, 16 (2): 215–222. Wei Fengying, Song Qiaoyun, Han Xue. 2006. Distributive of Northern Hemisphere and sea level pressure in the past 100 years and their potential influence on Meiyu in middle and lower reaches of Yangtze River [J]. *Progress in Natural Science* (in Chinese), 16 (2): 215–222.
- Wei Fengying. 2007. An integrative estimation model of summer rainfall-band pattern in China [J]. *Progress in Natural Science*, 17 (3): 280–288.
- Wei Fengying, Xie Yu, Mann Michae E. 2008. Probabilistic trend of anomalous summer rainfall in Beijing: Role of interdecadal variability [J]. *J. Geophys. Res.*, 113, D20106, doi: 10.1029/2008JD010111.
- 严华生, 胡娟, 范可, 等. 2007. 50 年来夏季西风指数变化与中国夏季降水的关系 [J]. *大气科学*, 31 (4): 717–726. Yan Hua-sheng, Hu Juan, Fan Ke, et al. 2007. The analysis of relationship between the variation of westerly index in summer and precipitation during the flood period over China in the last 50 years [J]. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 31 (4): 717–726.
- 张旭晖, 高苹, 许祥, 等. 2006. 江苏雷暴日发生规律及其大气环流预报模型的建立 [J]. *气象科技*, 34 (5): 532–537. Zhang Xu-hui, Gao Ping, Xu Xiang, et al. 2006. Statistical characteristics and atmospheric circulation patterns of thunder days in Jiangsu Province [J]. *Meteorological Science and Technology* (in Chinese), 34 (5): 532–537.
- Zhu C W, Park C-K, Lee W-S, et al. 2008. Statistical downscaling for multi-model ensemble prediction of summer monsoon rainfall in the Asia-Pacific region using geopotential height field [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 25 (5): 867–884.
- Zwier F W, van Storch H. 2004. On the role of statistics in climate research [J]. *International Journal of Climatology*, 24: 665–680.