

降尺度技术在月降水预报中的应用*

陈丽娟^{1),2),3)} 李维京¹⁾ 张培群¹⁾ 王锦贵¹⁾

¹⁾ (国家气候中心,北京100081)

²⁾ (中国科学院大气物理研究所,北京100029)

³⁾ (中国科学院研究生院,北京100039)

摘 要

着重介绍月动力延伸数值预报模拟技巧较高的大气环流在局域降水方面的降尺度(downscaling)应用。克服动力降尺度和统计降尺度技术的缺点,从动力与统计相结合的角度,给出月尺度大气环流与局地降水之间的关系,该联系有清楚的动力学背景和天气学意义。120个月的历史实况资料回报试验证明了该关系的合理性。T63/NCC月动力延伸形势场集合预报进行中国降水的降尺度应用亦取得了较好的结果。

关键词:降尺度 动力与统计相结合 降水预报

引 言

在月气候预测业务中,降水等地面要素的预报是人们关注的重点也是难点。降水预报方法一般有动力学和统计学方法。由于传统统计方法无法解释物理机制的缺陷,使得大气环流模式(GCM)越来越被更多的气象工作者作为预测工具。但是多数研究工作表明:GCM对大尺度环流的特征模拟较好,而对于温度、降水等地表气候要素的模拟技巧很低^[1-2]。同样,月动力延伸模式对各要素的预报技巧也说明了这一点。因而如何利用模式预报技巧较高的大尺度信息给出降水、温度等小尺度预报,即降尺度(downscaling)方法就显得十分重要。

目前国内外主要有两种降尺度方法:动力降尺度法(dynamical downscaling)和统计降尺度法(statistical downscaling)。动力法有两个发展方向,一种是提高GCM的水平分辨率,这无疑会大大增加计算量,提高对计算机性能的要求。另一个方向是在低分辨率GCM中嵌套高分辨率有限区域模式(LAM),这是一个有生命力的发展方向。但是LAM的边值条件的确定、与GCM的嵌套技术以及局地模式系统性误差的减少都是难点,同时会影响预报效果。此外,该方法的计算量也比较大。相比之下,统计降尺度法计算量小而易于操作。一般是建立预报因子(GCM模拟效果好的大尺度变量)和预报对象(小尺度变量如降水)之间的统计关系。此方面的工作已取得了许多成果^[3-4]。不过,统计降尺度模

* 本文得到国家“九五”攻关加强课题96-908-06-1和96-908-06-3、中国气象局预测减灾应用技术开发推广项目(T63月动力延伸预报解释应用技术面向省级短期气候预测业务的推广)及国家自然科学基金项目(40035010)的资助。

2002-08-27收到,2003-02-18收到修改稿。

式无法克服其固有的两个基本假设:历史资料不足和不发生气候突变,这就使得已建立的统计关系在作预报时往往出现不稳定。因而寻求预报因子和预报对象之间的动力学关系是克服统计模式不足的一条重要途径。

李维京等(1999)从一组大气动力学方程组出发,采用大气的相当正压假设、Burger 近似、定常(略去时间变化项)假设等一系列合理简化,推导出局地月平均降水距平与月平均环流场距平的关系。本文则是以此关系为基础,设计了一种月降水的降尺度模型。该模型充分考虑到动力降尺度和统计降尺度各自的优缺点,实现了动力与统计的有机结合,是一种既包含明确动力学意义、又利用大量历史气候资料、同时计算简单快捷的降尺度方法。本文首先对该模型做简要的介绍,然后利用 NCEP/NCAR 再分析高度场资料、中国 160 站月降水资料和 T63 月动力延伸集合预报结果对模型进行应用试验,以期验证理论部分的合理性和在业务中的应用价值。

1 降尺度模型

降水距平与位势高度场之间的关系式可以简化为^[5]:

$$R' = A_1 \nabla^2 \phi' + A_2 \frac{\partial \phi'}{\partial x} + A_3 \frac{\partial \phi'}{\partial y} + A_4 \phi' + A_5 \quad (1)$$

其中 R' 表示降水距平百分率, ϕ' 指 500 hPa 高度场距平, $A_1 \sim A_5$ 是系数。从式(1)可以看到局地降水距平不仅与该地上空形势场距平(第四项)有关,还受到形势场距平的拉普拉斯(第一项)和纬向切变(第二项)与经向切变(第三项)的影响,有清晰的天气学意义。如果考虑散度方程的零级简化,则第一项反映了大气的辐合、辐散情况,从而反映了与降水有关的大气垂直运动;采取相当正压大气假设,则第二、三项反映了地面要素的切变情况,尤其是第三项体现了冷暖空气交汇对降水的影响。总之,利用式(1)建立降尺度模型,比利用大气环流模式或区域尺度模式简单清晰,计算量小;同时比一般统计方法有明确的动力学意义,一般的业务方法只考虑式(1)右端第四项与降水的相关,没有充分利用环流提供的其它信息。在下面的应用试验里,将说明式(1)右端各项对降水的贡献。

2 资料的选取和系数的确定

所用资料为 1951 ~ 2001 年 NCEP/NCAR 再分析资料北半球月平均 500 hPa 位势高度场(水平分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$)和国家气候中心气候诊断预测室整理的中国 160 站月降水资料。多年平均值均取 1961 ~ 1990 年共 30 年的平均。国家气候中心 T63 月动力延伸集合预报是滞后平均法(lagged average forecasting, 中旬末 4 天 4 个时次共 16 个个例)和奇异向量法(singular vectors, 中旬末 4 天的 GMT 12:00 生成 4 组初值,共计 16 组个例)生成初值,分别积分 30 天的集合平均结果^[6]。

利用 NCEP/NCAR 500 hPa 月平均高度场、中国 160 站月降水资料和文献[7]提供的反演系数的方法确定式(1)的系数,该方法在确定参数值时使用了大量历史资料,从而可以吸收统计方法的长处。具体计算步骤如下:首先将式(1)差分得:

$$\begin{aligned}
 R' = & A_1 \left[\frac{\phi'(x + \Delta x, y) - 2\phi'(x, y) + \phi'(x - \Delta x, y)}{\Delta x^2} \right. \\
 & \left. + \frac{\phi'(x, y + \Delta y) - 2\phi'(x, y) + \phi'(x, y - \Delta y)}{\Delta y^2} \right] \\
 & + A_2 \frac{\phi'(x + \Delta x, y) - \phi'(x - \Delta x, y)}{2\Delta x} \\
 & + A_3 \frac{\phi'(x, y + \Delta y) - \phi'(x, y - \Delta y)}{2\Delta y} + A_4 \phi'(x, y) + A_5 \quad (2)
 \end{aligned}$$

式(2)中 Δx 、 Δy 均取一个格距(本文 2.5° 为一个格距), (x, y) 取距离降水观测站点最近的格点, 以该点作为基准点进行差分运算。首先利用 1951~1991 年共 41 年 1~12 月中国 160 站各月的降水距平百分率和 NCEP/NCAR 形势场距平资料确定各月 160 站的方程系数, 然后将 NCEP/NCAR 1992~2001 年形势场资料代入方程, 计算 1992~2001 年各月各站的降水距平百分率, 将该结果与实况降水距平百分率进行比较, 分析该降尺度方法的应用效果(该试验称 NCEP/NCAR 应用试验)。

3 结果分析

计算的 1992~2001 年共计 120 个月的 NCEP/NCAR 应用试验结果表明所推导出的形势场和降水场之间有非常密切的关系, 多数应用试验个例中根据方程计算的站点降水距平量值与实况比较接近, 尤其能比较好地反映全国多雨区和少雨区的分布趋势。为了定量地衡量 NCEP/NCAR 应用试验效果, 采用我国业务上常用的准确率(P_c)和国际上通用的距平相关系数(ACC)方法^[8]对 120 个个例进行评估, 得到 1~12 月的平均应用试验结果(图 1a、图 1b)。

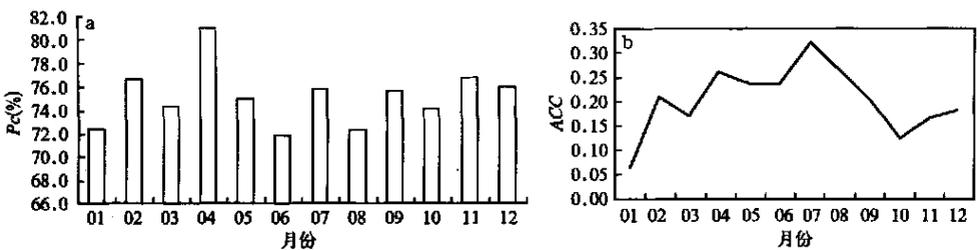


图 1 NCEP/NCAR 应用试验平均结果——月降水距平百分率评估

(a) 准确率(P_c %) (b) 距平相关系数(ACC)

从图 1 可以看到, 由 NCEP/NCAR 应用试验得到的降水评分 1~12 月都比较稳定, 4 月份 P_c 得分最高, 平均约为 81 分, 其余各月平均得分均在 71 分以上, 全年平均约 75 分; 以 ACC 方法衡量, 全年平均为 0.2, 显示出较高的预报技巧。其中夏半年(4~9 月)结果比冬半年的效果好, 原因有待于进一步分析。而 1992~2001 年业务月降水预报的 P_c 得分全年平均为 61 分; ACC 得分全年平均为 0.05, 接近于无技巧。总体来讲, 在 120 个 NCEP/NCAR 应用试验个例中, P_c 得分在 70 分以上的占 70%, ACC 值在 0.1 以上的约

占 70%。这说明该降尺度模型较好地体现了形势场与降水的关系,达到了降尺度应用的目的。此外,利用式(1)还可以分析右端各项对降水的贡献,从而了解影响降水的主要原因。下面分别给出 NCEP/NCAR 应用试验中 1998 年 7 月和 2000 年 7 月两个个例。

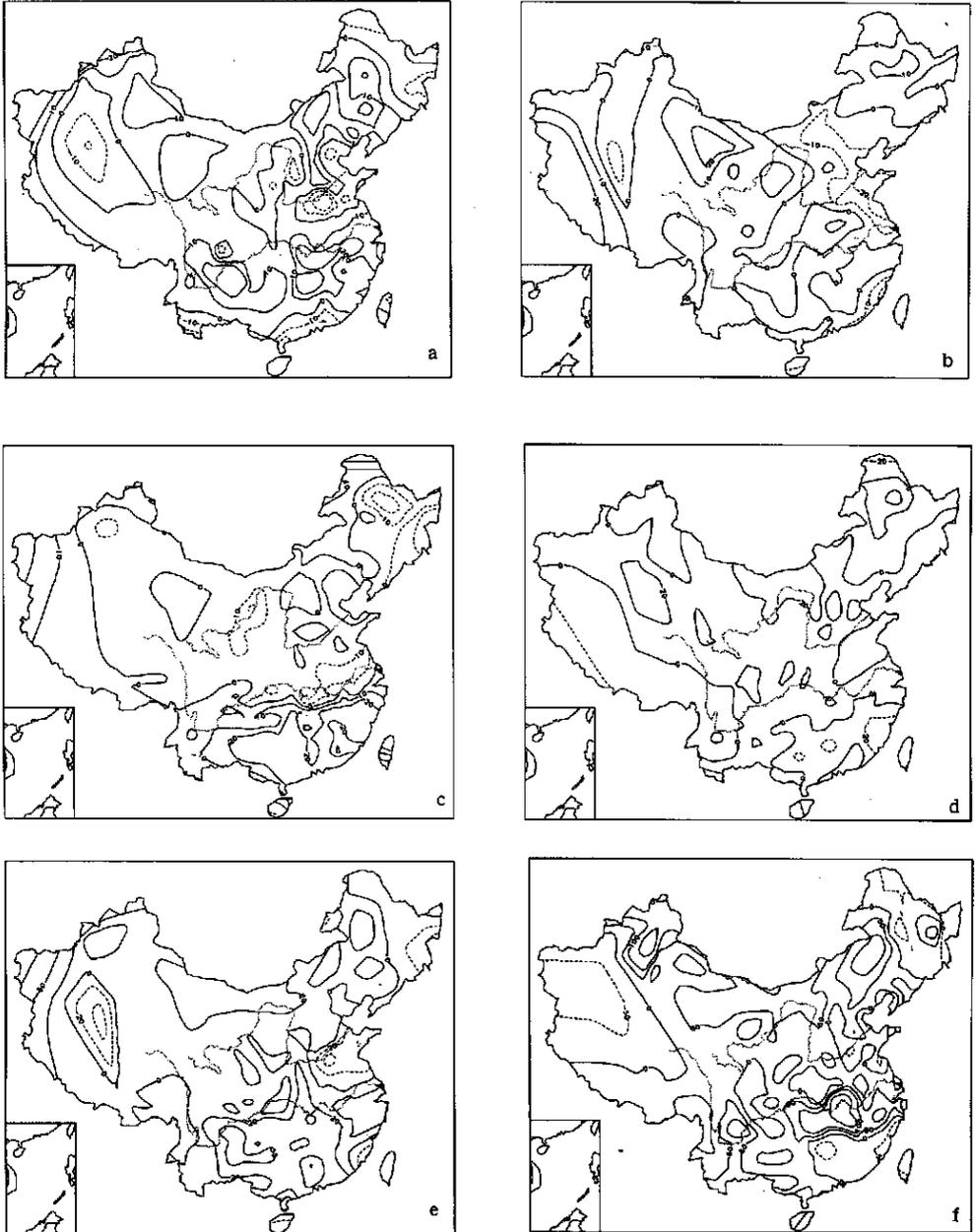


图 2 1998 年 7 月 NCEP/NCAR 应用试验结果与实况(均为降水距平百分率)
(a) 表示式(1)右端第一项的贡献,(b) 表示式(1)右端第二项的贡献,
(c) 表示式(1)右端第三项的贡献,(d) 表示式(1)右端第四项的贡献,
(e) 表示式(1)右端五项相加的结果,(f) 表示实况

1998年夏季受 El Nino 事件和其它大气因素的影响,降水量和降水范围明显大于常年,7月的实况降水距平百分率(图 2f)体现了这一特征。NCEP/NCAR 应用试验结果(图 2e)也清楚地反映了全国大部地区降水偏多的趋势。我们分别计算式(1)右端五项,发现各项对月总降水距平的贡献是不一样的:第五项(常数项)的量值很小,对月总降水的影响可近似忽略(图略);对月降水分布影响较大的为第一、二、三、四项(图 2a~d)。其中第一项(辐散项,图 2a)的干湿区分布最接近实况,体现全国大范围多雨的特征;第二项(纬向切

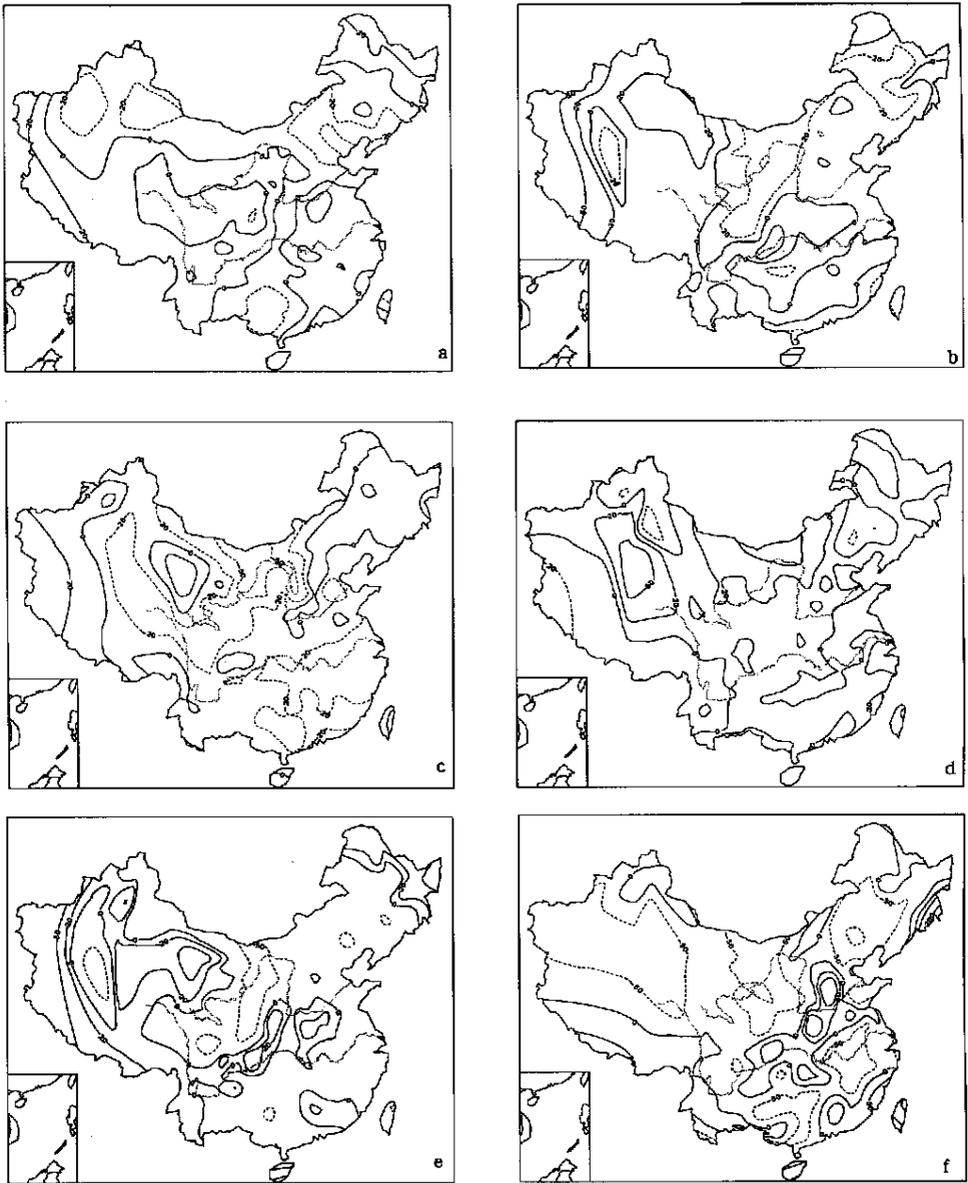


图3 2000年7月 NCEP/NCAR应用试验结果与实况
(说明同图2)

变项,图 2b) 的分布体现了该项对西部地区降水有贡献;第三项(经向切变项,图 2c)加重了长江以南大范围多雨的特点,同时给出江南南部偏多的假象;第四项(距平项,图 2d)主要体现北方大部偏多、南方部分地区偏少的趋势,对第三项华南南部的错误预报有所抵消;五项的综合结果(图 2e)更接近实况(图 2f)。

与 1998 年夏季全国降水偏多相反,2000 年夏季旱情比较明显,尤其是 7 月降水异常偏少(图 3f),由 NCEP/NCAR 应用试验得出的降水(图 3e)也清楚地反映了全国大部地区降水偏少的实情。同样,我们分别计算式(1)右端五项,忽略第五项(常数项),具体分析第一、二、三、四项(图 3a~d)。与 1998 年 7 月不同,2000 年 7 月第二项和第三项(切变项,图 3b~c)的干湿区分布最接近实况,体现全国降水明显偏少的特征;第一项(辐散项,图 3a)过分夸大了江南地区多雨;第四项(图 3d)则给出全国大范围多雨的假象;而五项的综合结果(图 3e)比较接近实况(图 3f)。

由以上两个个例可以看到,降尺度技术不仅较好地体现了形势场和降水场之间的关系,还有利于分析造成降水异常的主要原因。以往的工作中,一般只考虑式(1)右端第四项(距平项),很容易造成错报、漏报。对其它个例的分析也体现了类似结果。

4 业务应用试验

既然环流能够提供比较多的降水信息,对环流的正确预测就很重要。值得指出的是,国家气候中心(NCC) T63 月动力延伸集合预报技巧较高的产品就是位势高度场,因而将模式预报的形势场代入降尺度的降尺度模型,即可得出降水预报。当然由于模拟的形势场与实况还有一定的差距,从而利用预报的形势场和降尺度模型作降水预报时的效果会比 NCEP/NCAR 应用试验效果降低。本文借用完全预报法(PPM)的思想,将 2002 年 1~6 月的 T63 月动力延伸集合预报 500 hPa 位势高度场代入根据 NCEP/NCAR 应用试验中确定的预报方程,得到各站降水距平百分率预报(该试验称 T63 预报试验),并与国家气候中心对外发布的业务预报进行比较。表 1 列举了 6 个个例的比较情况。

表 1 2002 年 1~6 月 T63 预报试验的降水预报与业务预报的评估对比

	Pc		ACC	
	降尺度	业务预报	降尺度	业务预报
1 月	74.41	66.67	0.36	0.13
2 月	45.45	67.48	0.12	0.05
3 月	62.64	57.58	0.25	-0.1
4 月	72.73	60.00	0.43	0.14
5 月	71.08	67.50	0.33	0.01
6 月	67.47	54.39	0.12	-0.06
平均	65.63	62.27	0.27	0.03

由表 1 可以看到,将 T63 的形势预报降尺度分析后得到的降水预报(T63 预报试验)结果得分明显低于 NCEP/NCAR 应用试验结果,但仍高于业务预报,且预报效果比较稳定。图 4 给出 2002 年 5 月份的预报与实况图。由于 T63 较好地模拟出 5 月份北半球欧亚地区两槽一脊形势(图略)以及降尺度模型的解释能力,2002 年 5 月份的降水预报体现

了5月全国的降水分布特点,即全国大范围多雨,尤其是河套、黄淮、长江中下游降水偏多。对降水趋势的模拟与实况非常接近,但是由于模式预报技巧、降尺度技术的局限和模式系统性偏差的影响,预报的降水距平百分率量值大大小于实况值。为了使降尺度技术在业务预报中得到更好的应用,还应对 T63 月动力延伸预报进行大量的历史回算,对回算结果进行细致的分析,订正模式的系统性偏差,以期得到更好的降水预报结果。

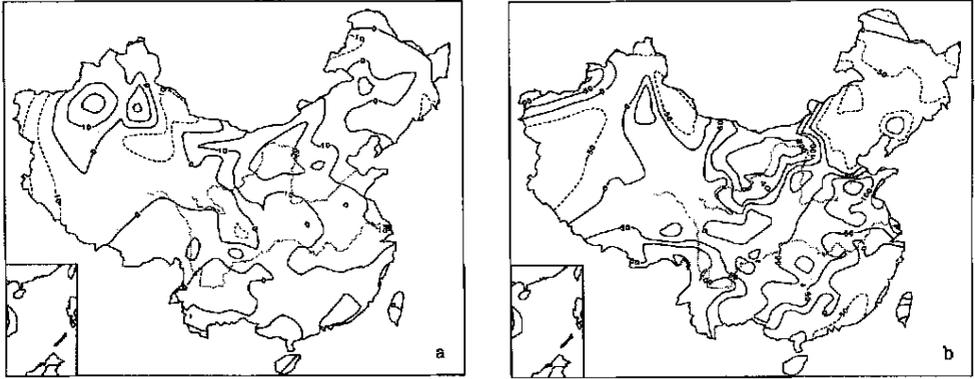


图4 采用 T63 形势预报的 2002 年 5 月降水预报图(a)和实况(b)

5 总结与讨论

本文在前期理论工作的基础上,首先利用历史资料确定出降水预报方程系数,并进行了大量的实况形势场应用试验,试验结果表明所建立的降尺度模型反映了形势场和降水场的紧密联系,并体现出应用潜力。随后将 T63/ NCC 月动力延伸形势预报结果——形势场代入用实况历史资料确定的降水方程后得到的月降水预报也体现了较高的预报技巧,表明该方法在业务预报中的应用价值。同时对造成月降水异常的各项进行分析有利于检查预报失败的原因。

当然,该方法也存在一定的局限性,首先是降水预报技巧本质上依赖于降尺度技术和 T63 形势预报技巧。虽然本文的降尺度模型具有一定的优越性,但 NCEP/ NCAR 应用试验中全年的平均 Pc 得分为 75%,仍有 25%的改进空间。此外,在分析局部地区的降水预报效果时,发现该模型对不同地区的模拟能力是不同的;文中所用的站点资料比较稀疏,无法细致描述降水偏多和偏少的邻近地区;T63 形势场预报存在明显的系统偏差。因而,为了使降尺度模型在业务中更好地应用,需要对 T63 进行大量回算,订正系统偏差;采用加密的站点资料;进一步深入分析,明确该方法的适用范围并合理利用。

致谢:十分感谢国家气候中心陈桂英和许力同志分别为本文提供降水评分程序、业务预报评分结果和部分绘图软件。

参考文献

- observed local climate . Part I : Seasonal statistics . *Journal of Climate* , 1990 , 1 : 1057 ~ 1064 .
- 2 Palutikof J P , Winkler J A , Goodess C M , et al . The simulation of daily temperature time series from GCM output . Part I : comparison of model data with observations . *Journal of Climate* , 1997 , 10 : 2497 ~ 2513 .
- 3 Zorita E , von Storch H . The analog method as a simple statistical downscaling technique : comparison with more complicated methods . *Journal of Climate* , 1999 , 12 : 2474 ~ 2489 .
- 4 Aristita Busuioac , Deliang Chen , Cecilia Hellström . Performance of statistical downscaling models in GCM validation and regional climate change estimates : application for Swedish precipitation . *International Journal of Climatology* , 2002 , 21 : 557 ~ 578 .
- 5 李维京 , 陈丽娟 . 动力延伸预报产品释用方法的研究 . 气象学报 , 1999 , 57(3) : 338 ~ 344 .
- 6 陈丽娟 , 李维京 . 月动力延伸预报产品的评估和解释应用 . 应用气象学报 , 1999 , 10(4) : 486 ~ 490 .
- 7 丑纪范 , 郜吉东 . 长期数值天气预报 . 北京 : 气象出版社 , 1995 . 124 ~ 128 .
- 8 陈桂英 , 赵振国 . 短期气候预测评估方法和业务初估 . 应用气象学报 , 1998 , 9(2) : 178 ~ 185 .

APPLICATION OF A NEW DOWNSCALING MODEL TO MONTHLY PRECIPITATION FORECAST

Chen Lijuan^{1),2),3)} Li Weijing¹⁾ Zhang Peiqun¹⁾ Wang Jingui¹⁾

¹⁾ (*National Climate Center , Beijing 100081*)

²⁾ (*Institute of Atmospheric Physics , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100029*)

³⁾ (*Graduate School of the Chinese Academy of Sciences , Beijing 100039*)

Abstract

A relationship between monthly mean precipitation and monthly mean circulation represented by 500hPa geopotential height was given to combine dynamical and statistical approaches . The physical explanations of monthly mean circulation and precipitation were also presented . Statistical weights of each item of the relationship (the downscaling model) were derived from the monthly NCEP/ NCAR reanalysis data (500hPa) and China's observed precipitation data during the control period from January of 1951 to December of 1991 . The hindcast test was conducted using those data from January of 1992 to December of 2001 . The test indicates that the method (new model) has a high score skill for monthly mean precipitation forecast . Comparison of monthly forecast of precipitation amounts between the issued operational forecast and the new model using the 500 hPa height forecast obtained from T63/ NCC GCM from January to June 2002 shows that the new model forecast has a higher score than the issued operational forecast result .

Key words : Downscaling Dynamical and statistical approaches Precipitation forecast