

动力延伸(月)数值天气预报中的 信息提取和减小误差试验*

张道民 纪立人

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

摘要 用一个全球谱模式通过较多个月的月数值天气预报试验, 研究了预报结果的有用信息提取问题。模式预报误差的谱分析表明, 纬向平均(零波)场误差占很大比例, 试验了两种用气候倾向改善纬向平均(零波)场误差的方案, 一是对逐日预报结果进行订正, 二是在积分过程中进行订正, 两种方案都取得了一定成效。

关键词: 信息提取; 加权平均; 误差订正

1 引言

随着国民经济的发展和人民日常生活的需要, 月数值天气预报越来越受到人们的关注。目前所用的方法多半都是中期数值天气预报的动力延伸, 即用某个时刻的气象观测资料做初值, 积分 30 d, 由于小尺度分析误差随积分时间的增长, 因此对两周以上的瞬时数值预报很少有实际意义。因此, 月数值天气预报不是预报未来一个月的逐日形势变化, 而是由 30 d 的逐日预报求平均, 得到未来一个月的平均形势场, 这种平均经过时间滤波, 滤去了高频噪声, 保留了对月时间尺度的有用信息, 在一定程度上是可用的。目前, 在求平均预报时, 一般采用算术平均(权重 $W=1$), 然而, 由于积分误差的积累, 逐日预报精度的降低, 用算术平均得到的结果较差, 因此目前的月形势预报评分较低。我们曾提出用加权平均代替算术平均, 明显地提高了预报效果。

本文用过去已经做的 36 个月预报例子, 分析了不同波段的误差, 发现纬向平均(零波)场误差占很大比例, 因此用气候倾向对逐日预报结果的纬向平均场进行订正, 然后再用订正过的逐日预报求月预报, 其月预报结果得到了改善。另外, 还试验了在时间积分过程中用气候倾向代替计算的零波时间倾向, 用这种方案做了 17 个例子, 使月预报结果也得到了改善, 对这 17 个例子的原预报结果也同 36 个例子的处理一样, 进行了结果订正, 并将结果订正和积分过程中的订正做了比较。

2 基本方程

本文用中国科学院大气物理研究所的经过静力扣除的全球谱模式, 所使用的基本方程组为^[1,2]

2000-01-24 收到, 2000-06-19 收到修改稿

* 国家“九五”重中之重项目“我国短期气候预测系统的研究”资助

$$\begin{aligned} \frac{\partial \zeta'}{\partial t} &= \frac{1}{a(1-\mu^2)} \frac{\partial}{\partial \lambda} (F_v + P_v) - \frac{\partial}{a \partial \mu} (F_u + P_u) + K_\zeta, \\ \frac{\partial D}{\partial t} &= \frac{1}{a(1-\mu^2)} \frac{\partial}{\partial \lambda} (F_u + P_u) + \frac{\partial}{a \partial \mu} (F_v + P_v) - \nabla^2 \left[\phi' + \frac{U'^2 + V'^2}{2(1-\mu^2)} \right] + K_D, \\ \frac{\partial T'}{\partial t} &= - \frac{1}{a(1-\mu^2)} \frac{\partial}{\partial \lambda} (U'T') - \frac{\partial}{a \partial \mu} (V'T') + DT' \\ &\quad - \sigma \frac{\partial T'}{\partial \sigma} + \left(\frac{C_0^2}{R} + \frac{R}{c_p} T' \right) \frac{\omega}{P} + P_T + K_T, \\ \frac{\partial q}{\partial t} &= - \frac{1}{a(1-\mu^2)} \frac{\partial}{\partial \lambda} (Uq) - \frac{\partial}{a \partial \mu} (Vq) + Dq - \sigma \frac{\partial q}{\partial \sigma} + P_q + K_q, \\ \frac{\partial (\ln P \cdot Y)}{\partial t} &= - \mathbf{V} \cdot \nabla \ln P \cdot Y - D - \frac{\partial \sigma}{\partial \sigma}, \\ \frac{\partial \phi'}{\partial \ln \sigma} &= - RT'. \end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned} F_u &= V(\zeta' + f) - \sigma \frac{\partial U'}{\partial \sigma} - RT' \frac{\partial \ln P \cdot Y}{a \partial \lambda}, \\ F_v &= -U(\zeta' + f) - \sigma \frac{\partial V'}{\partial \sigma} - RT'(1-\mu^2) \frac{\partial \ln P \cdot Y}{a \partial \mu}, \\ P_T &= \frac{1}{c_p} \left\{ Q_R + Q_L + Q_D - \frac{g}{P_*} \left[\frac{\partial J_T}{\partial \sigma} - (\delta - 1) c_{p,d} T' \frac{\partial J_q}{\partial \sigma} \right] \right\}, \\ P_u &= \frac{g}{P_*} \frac{\partial J_u}{\partial \sigma}, \quad P_v = \frac{g}{P_*} \frac{\partial J_v}{\partial \sigma}, \quad P_q = S_q - \frac{q}{P_*} \frac{\partial J_q}{\partial \sigma}. \end{aligned}$$

利用 $\omega = dP/dt$ 和上下边界条件, 可以求出 ω/P 和 σ 的诊断表达式, 预报变量为涡度(ζ'), 散度(D), 温度偏差(T'), 比湿(q)和地面气压对数的偏差($\ln P \cdot Y$), 其他为气象常用符号或与物理过程(如辐射、凝结降水、扩散、地面过程及次网格尺度地形重力波阻等)有关的项, 而对预报变量水平方向用谱展开, 即

$$X(\lambda, \mu, \sigma, t) = \sum_{n=-M}^M \sum_{m=-m}^m X_{m,n}(\sigma, t) P_{m,n}(\mu) c^{imj},$$

将基本方程变为谱系数的预报方程。

3 有用信息的提取

如何从逐日预报中得到客观的评分较高的月平均形势预报, 这是一个值得研究的问题。我们用 T42L9 全球谱模式做的 1994 年的 36 个月预报结果(1994 年每月 1 日和前后各一天 12 时的资料为初值, 每月 3 个)来做一些分析。现在的月预报一般是由逐日的动力延伸预报采取算术平均(权重 $W=1$), 即得到月平均形势预报, 但由于预报误差的积累, 实际上由逐日预报的 30 d 平均得到月平均预报, 有时还不如前 7~8 d 平均

得到的月平均预报评分高。图 1 中 $W=1$ 的曲线是 500 hPa 高度场(1~ N) d ($N=1, 2, \dots, 30$) 逐日预报的平均场与 30 d 实况平均场得到的距平相关系数 (AC) 的演变 (36 例平均)。由图可见, 北半球 ($20\sim 90^\circ\text{N}$) $N=8\sim 9$ d, AC 最大 ($=0.518$); 而南半球 ($20\sim 90^\circ\text{S}$) $N=7$ d 时, AC 最大 ($=0.466$); 全球 $N=7\sim 8$ d, AC 最大。这同文献[3]的结果相似。但这并不表明现在的月预报只要取前 7~8 d 的平均就够了, 其原因在于: (1) $N=7\sim 8$ d, AC 达最大, 这是一个统计的结果。实际上, 对不同的个例 AC 达最大的 N 是不同的, 有时 N 相差甚大, 即使初值相邻的月预报, 有时 N 也有较大的差别。图 2 是 36 个例子, 每个例子最大的 AC 和相应的 N 值 (图中为 $N/30$)。

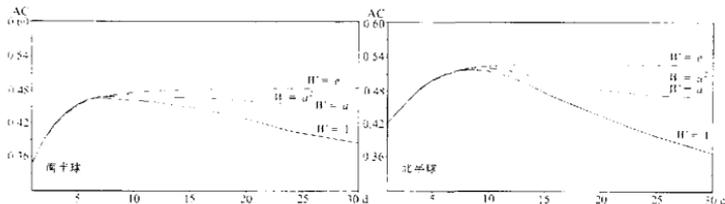


图 1 (1~ N) d 500 hPa 平均高度预报与 30 d 平均实况之间 AC 的变化 (36 例平均)

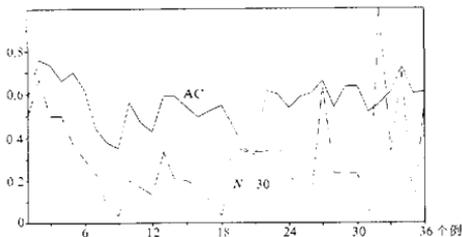


图 2 不同个例北半球 500 hPa (1~ N) d 平均高度预报与 30 d 平均实况的 AC 最大值和相应的 N ($N/30$)
纵坐标为 AC 或 $N/30$

(2) 我们曾提出用加权平均代替算术平均可以提高预报效果, 权重可以简单地取线性权重, 例如, 取 $W=a$, 而 $a=1+(15.5-N)/15.5$, N 为预报时间 (d), 效果明显提高^[4]。根据逐日预报的 AC 随预报时间的演变趋势 (图 3), 取为抛物线权重 $W=a^2$ 和 $W=e$, $e=0.05+(N-22)^2/(N+50)$ ^[4] 效果则更好, 其结果如表 1 所示。

由表 1 可以看出加权平均比一般算术平均得到的月平均预报的评分有较明显的提高。 $W=a$ 同 $W=1$ 相比, 所有的个例 AC 都有改善; 而 $W=a^2$ 同 $W=a$ 相比, AC 提高的个例达 89%; 同前 7 d (文献[3]中 108 个例子的统计结果) 算术平均结果相比, 北半球 $W=a^2$ 时的月平均预报有 58% 的个例高于 $N=7$ d 时的 AC。更值得注意的是, 对于 $W=a$ 和 $W=a^2$, 北半球有 8% 的个例 AC 比 $W=1$ 时的最大值还大; 南半球, $W=a$ 时有 14%, $W=a^2$ 时则有 25% 超过 $W=1$ 时 AC 的最大值。而 $W=e$ 时, AC 比 $W=1$ 时最大值大的个例在北 (南)

半球为 13% (36%), 全球范围则达 47%。这表明最大的 AC 所对应的 N 之后的那些动力延伸预报中, 尽管误差较大, 瞬时预报评分很低, 但仍然包含着对月平均预报有用的信息。由图 1 可见, 以 $W = a$ 、 $W = a^2$ 和 $W = e$ 为权重的 3 种平均方案, 得到的预报明显地改变了曲线的形状, 同 $W = 1$ 相比, 显著地提高了月平均预报的评分。

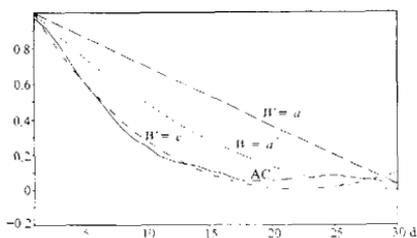


图 3 北半球逐日预报 500 hPa 高度 AC (36 例平均) 和权重
纵坐标为 AC 或权重, 权重已用 $N = 1$ 时的相应值可视化

表 1 北半球 500 hPa 月预报高度场评分 (36 例平均)

评分 \ 方案	$W = 1$	$W = a$	$W = a^2$	$W = e$
AC	0.367	0.470	0.509	0.527
RMS	58.9	53.5	53.6	55.7

4 误差分析

表 2 是 36 个例子平均的月预报的 500 hPa 高度场 0 波 (纬向平均场)、1~3 波 (超长波)、4~9 波 (天气尺度波) 和 1~42 波 (对纬向平均场的扰动) 的距平相关系数 AC 的值。由表 2 可以看出, 对月预报而言, 在北半球, 超长波高于天气尺度波, 而南半球则相反, 全球平均而言, 两者的预报精度没多少差别。对本模式来说, 预报最差的是纬向平均场, 但从中期 (3~9 d) 预报看, 不论北半球还是南半球, 超长波的 AC 都明显高于天气尺度波的 AC。

图 4 是北半球逐日预报的 500 hPa 高度场所有波、纬向平均场和扰动场的 AC 随时间的演变, 由图可以看出, 在前 5 d, 纬向平均场的预报相对其他场还是比较好的, 特别是前 4 d, 但在 7~8 d 之后, 它的效果越来越差, 其相关系数 AC 在零附近及其以下, 就是说模式对这部分预报基本没有什么技巧。

表 2 500 hPa 月预报高度场各波段 AC (36 例平均)

区域 \ 波段	整场	0 波	1~3 波	4~9 波	1~42 波
北半球	0.367	0.096	0.451	0.418	0.444
南半球	0.385	0.261	0.417	0.457	0.424
全球	0.367	0.159	0.436	0.438	0.441

5 预报结果的误差订正

如何改进纬向平均场的误差, 我们采取了两种办法, 一是令逐日预报的纬向平均场

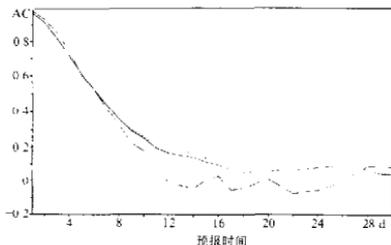


图4 北半球逐日预报不同波段的 500 hPa 高度 AC (36 例平均)

实线: 整场, 点线: 扰动场, 长虚线: 纬向平均场

$\bar{H}_i = \bar{H}_i + N \times d\bar{H}_c$, 其中 \bar{H}_i 为初值的纬向平均值 (也可取为初值前若干天平均场的纬向平均值), $d\bar{H}_c$ 为气候纬向平均值的每天变率, N 为预报时间 (d) (简称 RIC 方案)。另一是根据中期逐日预报尚好, 随着时间的延长误差逐渐增大的事实, 只对某个时间 (这里取为 10 d) 以后的逐日预报的纬向平均进行订正, 将上式的 \bar{H}_i 换为 \bar{H}_{j10} (第 10 天的预报场的纬向平均值), 则上式变为 $\bar{H}_j = \bar{H}_{j10} + (N - 10) \times d\bar{H}_c$ (简称 RFC 方案), 这样得到的逐日预报再

取不同的权重得到月平均预报, 其结果如表 3 所示。由表 3 可以清楚地看出, 经过对逐日预报的纬向平均场进行订正后, 再求月平均预报, 其效果显著。例如, RIC 方案比原方案 AC 提高平均超过 10%, 当 $W=1$ 时提高达 30%, 这是相当可观的, 尤其是当取抛物线权重 ($W=a^2$) 时, 其 AC (=0.544) 已接近逐日预报的纬向平均取为实测值时的 AC (=0.555) 值。当然对 RIC 方案中逐日预报的订正范围, 可以从第 1 天开始, 也可以从某个时间以后 (比如第 10 天) 开始, 评分大致与 RIC 相当或略高。

表 3 北半球 500 hPa 月预报高度场评分 (36 例平均)

方案	评分	$W=1$		$W=a$		$W=a^2$	
		AC	RMS	AC	RMS	AC	RMS
原方案		0.367	58.9	0.470	53.5	0.509	53.6
RFC 方案		0.410	54.0	0.493	51.2	0.521	52.6
RIC 方案		0.483	51.5	0.533	51.3	0.544	53.9

图 5 是不同方案北半球 500 hPa 月预报高度场 AC 的季节变化 (每季 9 例)。由图 5a 可以看出, 加权平均比一般算术平均明显地改进了预报技巧, 对逐日预报结果的纬向平均场的订正, 夏半年, 特别是当 $W=1$ 时, 效果明显。

6 积分过程中的订正试验

一般未来时刻的预报值为

$$F_{n+1} = F_{n-1} + 2\Delta t(\partial F / \partial t)_n,$$

n 表示时间层, Δt 为时间步长, $\partial F / \partial t$ 表示时间倾向值, 由预报方程得到。这里的订正试验仍然针对零波 (纬向平均) 场误差较大的情况进行, 类似上节的结果订正。取两种试验, 一是由于误差积累, 积分时间越长预报结果越差的事实, 前 10 d 取正常时间积分, 而后 20 d, 对零波时间倾向用气候倾向值代替, 其他波仍由方程计算 (简称 IFC 方案); 第二种试验方案是从开始对零波倾向 $\partial F / \partial t$ 就取为气候倾向值 (简称 IIC 方

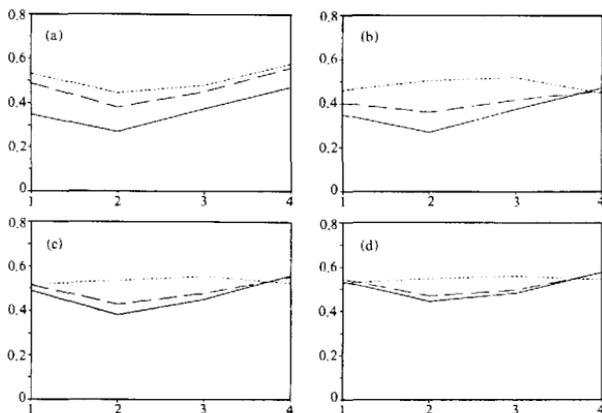


图5 不同方案北半球500 hPa月预报高度AC的季节变化(每季9例)

纵坐标: AC, 横坐标: 季度

- (a) 原方案(实线: $W=1$, 长虚线: $W=a$, 点线: $W=a^2$); (b) $W=1$ (实线: 原方案, 长虚线: RFC, 点线: RIC); (c) $W=a$ (实线: 原方案, 长虚线: RFC, 点线: RIC); (d) $W=a^2$ (实线: 原方案, 长虚线: RFC, 点线: RIC)

案)。这两种时间积分方案与结果订正不同在于, 由于零波场的改变, 通过非线性相互作用可以影响其他波的未来变化。用这两种方法, 我们做了17个例子的月预报试验, 其结果如表4所示。由表4可以清楚地看出, 对于用算术平均方法($W=1$)得到的月预报, 两种积分订正方案的距平相关系数(AC)较之原方案都有明显的提高, 对IFC方案, AC由0.301到0.370, 提高23%, 而对IIC方案AC提高45%。由表3还可以看出, 对订正方案(IFC和IIC)加权平均($W=a$ 和 $W=a^2$)相对于算术平均比原方案改进较小, 这表明订正方案提高了后期的预报效果, 这可从北半球500 hPa高度场后两时段(11~20 d和21~30 d)的平均场距平相关系数看出, 例如在 $W=1$ 时对11~20 d时段, 表4中3种方案的AC依次为0.079, 0.129和0.282, 而对于21~30 d时段, 则依次为0.081, 0.103和0.162。同时, 订正方案通过改进纬向平均场的计算, 也提高了对月尺度预报效果起主导作用的超长波(1~3波)的计算精度。对上述3种方案1~3波的AC, 17个例子平均依次为0.333, 0.365和0.397。

表4 北半球500 hPa月预报高度场评分(17例平均)

方案	评分	$W=1$		$W=a$		$W=a^2$	
		AC	RMS	AC	RMS	AC	RMS
原方案		0.301	55.9	0.432	49.5	0.500	48.1
IFC方案		0.370	52.4	0.466	48.6	0.517	48.0
IIC方案		0.438	53.7	0.489	52.0	0.510	52.7

上面给出了积分过程中订正试验的预报结果同原方案的比较, 就相同的个例而言,

这种订正同原方案的逐日预报结果的订正相比如何呢? 表 5 给出了上述 17 个例子对原方案结果订正的评分。由表 5 可以看出, 原方案逐日预报结果经过订正的月平均预报, 不论取算术平均还是加权平均都明显地提高了月平均预报的评分。比较表 4 和表 5, 可以看出 IFC 和 RFC 得到的月平均预报的评分, 特别是相关系数 AC 大致相当, 而且评分提高的个例数也大体相近, 约为 70% 左右。但对具体个例有些差别, 多数差别较小, 有的则相差较大, 可达 40%, 甚至更大, 而 IIC 和 RIC 的差别相对较大。

表 5 北半球 500 hPa 月预报高度场评分 (17 例平均)

方案	评分		$W=1$		$W=a$		$W=a^2$	
	AC	RMS	AC	RMS	AC	RMS	AC	RMS
原方案	0.301	55.9	0.432	49.5	0.500	48.1		
RFC 方案	0.371	52.5	0.467	48.1	0.518	47.5		
RIC 方案	0.427	47.9	0.496	46.4	0.528	47.5		

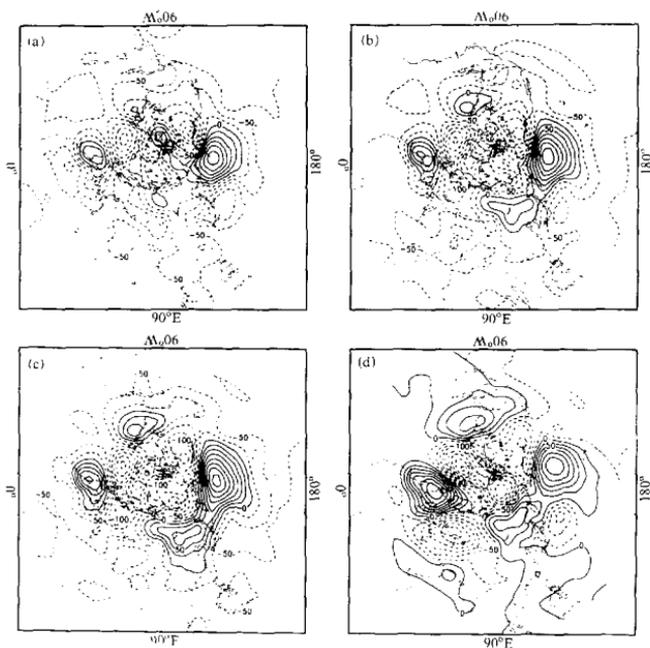


图 6 1994 年 11 月 14 日北半球 500 hPa 月平均高度距平
(a) $W=1$; (b) $W=a$; (c) $W=a^2$; (d) 实况;

7 预报实例

图6给出了以1994年11月14日12时观测资料为初值,用不同方案得到的北半球500 hPa月预报和实况高度距平。图6a~c为原方案而权重分别取为 $W=1$ 、 $W=a$ 和 $W=a^2$ 得到的月预报。同实况(图6d)相比,图6b($W=a$)和图6c($W=a^2$)较之图6a($W=1$)有明显的改进,主要表现在北美东岸、西欧沿岸和贝加尔湖附近的正距平中心明显加强,极地靠北美一侧的正距平中心消失,这都更接近实况。但预报的北美沿岸和西欧沿岸的正距平中心同实况相比较弱,阿拉伯海附近的正距平中心未预报出来,里海的负距平中心预报太弱。图6e~h分别为用RFC、RIC、IFC和IIC方案取 $W=1$ 时得到的预报图。同原方案(图6a)相比,它们都有不同程度的改进,特别是图6f和6h,阿拉伯海附近的正距平中心也基本上报出来了;图6e和6g是从第10天开始

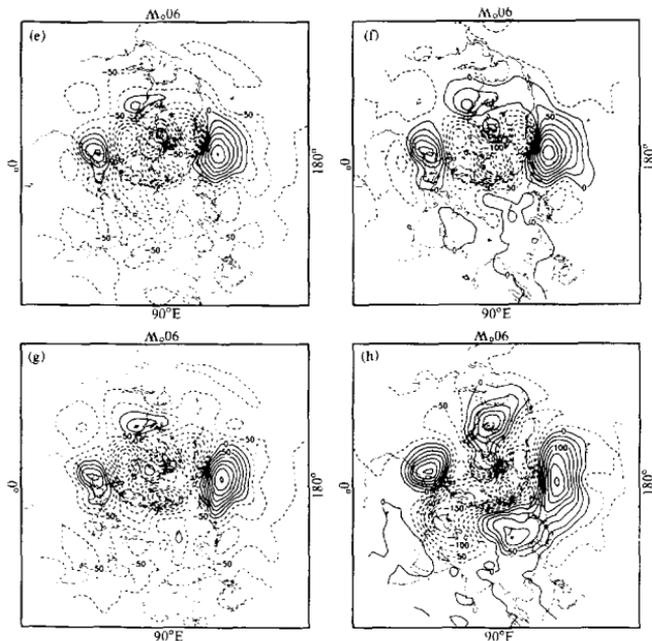


图6(续) 1994年11月14日北半球500 hPa月平均高度距平

(e) RFC; (f) RIC; (g) IFC; (h) IIC

分别对逐日预报结果和积分过程中的纬向平均场订正后得到的月预报距平图,可以看出其距平形状大致相似,但强度略有不同。而图 6f 和 6h 是从第 1 天开始就分别对逐日预报结果和积分过程中的纬向平均场订正得到的结果,其距平形式也大致相似,但强度差别较为明显。IFC 和 IIC 试验已超出预报结果的信息提取,实际上是经验(或统计)方法和动力方法的一种结合。

8 结 论

由上面的分析可以得到如下基本结论:

(1) 从以上共 50 余例的月预报结果看出,加权平均有效地提高了月平均预报的评分。从 AC 看,所有例子 $W = a$ 时都高于 $W = 1$ 。36 例平均 AC 高 28%; 而近 90% 的例子 $W = a^2$ 时的 AC 高于 $W = a$, 平均提高 8% 左右。

(2) 月预报的纬向平均(零波)场误差最大。本文试验了两种用气候变率改进纬向平均(零波)场误差的方法,一是对逐日预报结果纬向平均场进行订正,二是在积分过程中进行订正。对每一种订正,又可采用两种方法,一是从一开始就进行订正,另一是考虑到中期预报精度较高,误差较小,不做订正,从某个时间以后再进行。两种方案都取得了一定成效,提高了月预报精度,特别是相对 $W = 1$ 时,AC 平均提高 30% 以上。

参 考 文 献

- 1 纪立人, 陈嘉滨, 张道民, 吴万里等, 一个包含非绝热物理过程的全球谱模式及其初步试验结果, 中期数值天气预报成果汇编, 北京: 气象出版社, 1990, 27~40.
- 2 Zhang Daomin, Li Jinlong, Ji Liren et al., A global spectral model and test of its performance, *Advances in Atmospheric Sciences*, 1995, 12, 67~78.
- 3 Tracton, M. S. et al., Dynamical extended range forecasting (DERF) at the National Meteorological Center, proceedings of workshop held at ECMWF 16~18 May, 1988, 153~198.
- 4 张道民, 纪立人, 李金龙, 月数值天气预报的试验研究, 大气科学, 1996, 20(4), 429~438.

A Study of Information on the Extraction to Reduce Errors in Dynamic Extended (Monthly) Numerical Weather Prediction

Zhang Daomin and Ji Liren

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

Abstract A number of monthly numerical weather prediction cases based on a global spectral model have been used to study the extraction of useful information in the predicted results. Spectral analysis of model prediction errors shows that the zonal symmetric part ("wave-number zero") accounts for a large portion of the total error. Using climatic tendency, two approaches have been tested to reduce this part of error. The first is to correct the final forecast result by replacing the zonal symmetric component by its climatic counterpart. The second is to proceed the correction of this part during the integration process. Both approaches prove effective.

Key words: monthly prediction; extraction of information; reduction of error