

NWP 模式热量系统误差的动力诊断分析^{*}

刘还珠 张绍晴

(国家气象中心,北京 100081)

提 要

文章证明了模式在预报时段的位温误差,是由于在模式大气和真实大气中,该时段内位温变化过程的不同而造成的.还证明了原始方程的无加速定理对各强迫因子的线性分解同样适用于研究 NWP 模式热量误差的成因.

对国家气象中心 T42L9 模式 1992 年 1 月和 7 月预报结果的动力诊断表明,模式对纬向位温分布具有较好的预报能力,但在各纬带也存在明显的误差.通过无加速定理的分解分析,研究了这些误差的成因及改善模式的可能途径.

关键词:热量变化;模式系统误差;无加速定理.

1 引 言

60 年代, Eliassen 和 Palm(1960)^[1], Charney 和 Drazin(1961)^[2]提出了 EP 理论和无加速定理. 70 年代, Andrews 和 McIntyre(1976)^[3]推导出了传输的平均流方程系统,并定义了 EP 通量和余差经圈环流. 80 年代初, Edmon、Hoskins 和 McIntyre^[4](简称 EHM)发展了准地转的无加速理论,可用来研究任何尺度的涡动与平均流的相互作用,并发展了推广的 EP 通量. 近来, 吴国雄、Tibaldi(1988)^[5]研究了大气的非绝热加热和涡动热通量与平均经圈环流的关系, 吴国雄、陈彪(1989^[6], 1990^[7])利用传统的欧拉观点,建立了原始方程系中的无加速理论,他们所用的出发方程与我们的业务模式是相同的.

作者在文献[8]中,已论证了模式大气与实际大气西风加速过程的不同是模式预报西风误差的原因,并利用原始方程无加速定理中各强迫因子的线性迭加性,提出了一套诊断模式西风系统误差成因的客观分析方法. 本文的目的,是欲论证该理论对分析 NWP(数值天气预报)模式热量系统误差的适用性. 通过对国家气象中心业务模式 T42L9 热量系统误差的成因分析,建立对模式热量预报系统误差成因的诊断分析方法,以求进一步改善中期数值预报模式. 本文扼要介绍了基本原理,并分析模式的系统误差,及在真实大气和

1993 年 4 月 27 日收到, 1993 年 9 月 21 日收到修改稿.

* 国家“八五”攻关项目 85-906--03 课题资助.

模式大气中热量变化过程的差异对系统误差的影响. 最后, 将利用无加速定理中热力强迫因子和动力强迫因子去分析热量系统误差的原因.

2 原 理

在文献[6,7]中, 已推导得原始方程系中的动量和热量变化方程:

$$[u]_t = f^{-1}C\psi_p + [f + 2a^{-1}utan\varphi]^{-1}B\psi_p + f^{-1}(F_1 + F_2 + F_3) \quad (1a)$$

$$[\theta]_t = -(\text{acos}\varphi)^{-1}[\theta]_{\psi p} + (\text{acos}\varphi)^{-1}[\theta]_{\psi p_0} + \frac{ap}{R} \left(\frac{p_0}{p}\right)^{\epsilon} (H_1 + H_2 + H_3) \quad (1b)$$

式中平均经圈环流函数 ψ 可以由以下方程求解而得.

$$(A\psi_p)_p + 2B(\psi_{pp}) + (C\psi_p)_p + B_p\psi_p + B_{\psi p} = (F_1 + F_2 + F_3)_p + (H_1 + H_2 + H_3)_p = F_p + H_p \quad (2)$$

其中

$$F_1 = -\frac{f}{\text{acos}\varphi} [u^*v^* \cos^2\varphi]_p, \quad F_2 = -f[u^*\omega^*]_p, \quad F_3 = fF,$$

$$H_1 = -\frac{R}{ap} \left(\frac{p}{p_0}\right)^{\epsilon} (\text{acos}\varphi)^{-1} [v^*\theta^* \cos\varphi]_p, \quad H_2 = -\frac{R}{ap} \left(\frac{p}{p_0}\right)^{\epsilon} [\omega^*\theta^*]_p, \quad H_3 = \frac{R}{ap} \left(\frac{p}{p_0}\right)^{\epsilon} \theta_m.$$

方程(2)中的系数 A, B, C 分别表示静力稳定度、斜压稳定度和惯性稳定度, 它们仅与基本气流的状态有关, 与 ψ 无关, 因而式(2)满足线性叠加原理. 对于方程(2), 大气环流参数总体满足 $B^2 - AC < 0$, 故该方程在通常情况下为椭圆型方程. 如果方程(2)右边各项为零 ($H_i = F_i = 0, i = 1, 2, 3$), 又有齐次边界条件, 则方程(2)的解为齐次解, 即: $\psi \equiv 0$, 则式(1a)及(1b)变为 $[u]_t = [\theta]_t = 0$. 因而原始方程中的无加速定理与 EHM 发展的准地转的无加速理论有相似的意义. 在式(2)中, 除动力外源 F_i 及热力外源 H_i 外, 其它各量均可通过对数值模式输出资料进行处理而获得, 而外源项可通过计算动量方程和热量方程的余差而获得. 其中热力外源又可通过对模式输出的水汽及温度资料进行处理, 而将潜热项分离出来. 这样, 建立在一组数值模式输出资料的基础上, 我们可以获得影响热量变化的 7 个强迫因子. 通过方程(2)解得每一强迫因子所激发出来的经圈环流函数 ψ , 并可将方程(1b)简写为

$$[\theta]_t = \theta_0(F_i, H_i) + \theta_1(F_i, H_i) + \theta_2(H_3) \quad i = 1, 2, 3 \quad (3)$$

由方程(1b)分别估计每一因子所激发的经圈环流对热量变化的作用, 热力内强迫因子对热量变化的直接作用, 以及热力外强迫对热量变化的直接作用. 于是, 由给定的 F_i, H_i 可计算出其对热量变化的直接和间接效应.

与文献[8]中的推导类似, 设在 $t = 0$ 到 $t = T$ 期间, 模式大气(预报)及“真实大气”(分析)中, 某物理量的“平均变率”分别记为 $\frac{\overline{\partial A_f^T}}{\alpha}$ 及 $\frac{\overline{\partial A_a^T}}{\alpha}$, 于是有:

$$\overline{\Delta A^T} = \frac{\overline{\partial A_f^T}}{\alpha} - \frac{\overline{\partial A_a^T}}{\alpha} \quad (4)$$

式(4)表明, 从某一初始场出发并积分 T 时段后, 模式预报的平均误差 $\overline{\Delta A^T}$ 是由于模式大

气和真实大气在该时段内平均变率的不同所造成的.

如取 $A = [\theta]$, 根据式(3) 并代入式(4) 有

$$\overline{\Delta[\theta]}^T \approx \overline{\Delta\theta_0}^T + \overline{\Delta\theta_1}^T + \overline{\Delta\theta_2}^T \tag{5}$$

上式取近似号, 是因为只有当 $T \rightarrow 0$ 时, 式(5)才严格成立.

式(4)、(5)于是成为应用无加速定理去分析模式热量误差原因的物理基础. 通过比较预报时段模式大气中和实际大气中式(5)右端各项的相对大小, 我们便可以分析模式大气中各内、外强迫作用项对模式预报热量误差的相对贡献, 从而诊断出导致模式系统误差的物理原因.

3 T42L9 模式中纬向平均位温的系统误差及模式对热量变化的影响

本文中, 我们将利用国家气象中心(NMC)存档的 1992 年 1 月和 7 月的分析资料及相应的 120h($T=5d$) 预报资料, 对该模式的纬向平均位温(以下简称位温)的月平均误差进行检验. 在进行统计时, 我们首先计算逐日的 5 天预报误差 $\Delta[\theta]$, 再计算模式大气和真实大气在 5 天预报期间每一天的位温变化因子 θ_0, θ_1 及 θ_2 , 并求 5 天平均, 从而得到该天式(5)右端各位温变化因子的分布. 最后将逐日的结果求月平均, 从而得到月平均误差分布及月平均位温变化因子的分布.

图 1 为 1992 年 1 月和 7 月月平均的位温预报、分析和误差场的空间分布. 图中显示,

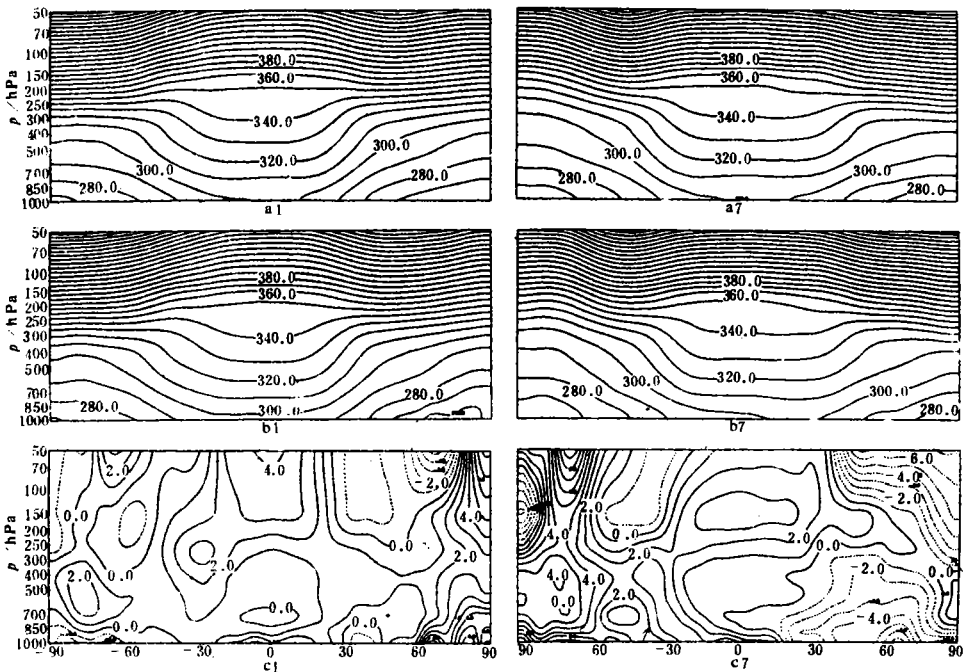


图 1 1992 年 1 月(左)和 7 月(右)月平均 5 天预报的位温分布(a1 和 a7)、相应的分析值(b1 和 b7)和它们的差异分布(c1 和 c7)(等值线间隔, a, b 为 10.0K, c 为 1.0K)

模式预报与分析的平均纬向位温分布是很相似的, 高低位温的分布都对对应得很好. 然而, 在预报场和分析场之间也存在若干误差. 其总的特征是模式预报在热带偏暖, 中高纬度偏冷, 冬半球高纬地区误差较大, 北极区季节变化特点显著. 上述误差场可以分解为模式大气中和实际大气中纬向位温在预报时段(T)内总变化之差. 图 2 分别给出 1 月和 7 月模式大气(a1 和 a7)及真实大气(b1 和 b7)中月平均位温的平均变化率, 以及两者之差(略 c1 和 c7), 此图与图 1c 完全相同. 这是因为, 模式大气和实际大气中位温平均变率之差异精确地等于模式的位温平均误差, 或者说“热量系统误差”. 由图 1c 显示, 在对流层上层和平流层中, 模式大气在热带偏暖, 7 月一个暖中心位于赤道附近的 200—100hPa 上空, 20°N—20°S 范围内; 另一暖中心位于 50°S 附近的对流层低层. 1 月一个暖中心位于赤道上空 70hPa 以上, 另一暖中心则位于 30°S 附近对流层中上层. 中高纬带气温偏低, 尤以 7 月北

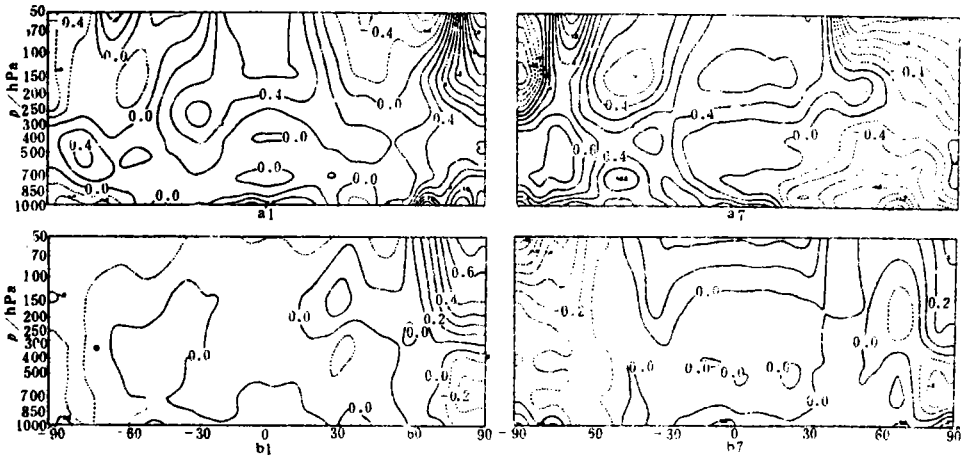


图 2 1992 年 1 月和 7 月 T42L9 模式大气(a1 和 a7)和真实大气(b1 和 b7)中月平均位温 5 天平均变率 M (等值线间隔 a 为 0.2K/d , b 为 0.1K/d)

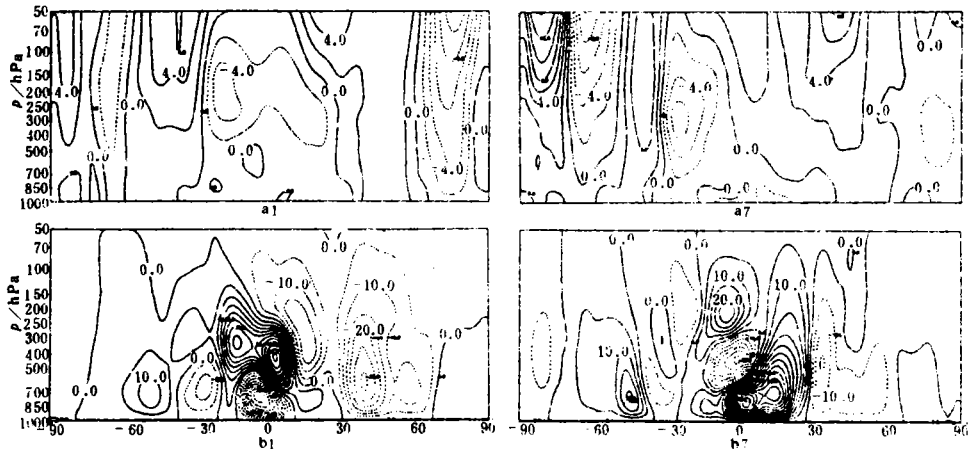


图 3 1992 年 1 月和 7 月 T42L9 模式 5 天预报的月平均系统误差分布 (a) 纬向平均西风(等值线间隔为 2.0m/s) (b) 纬向平均经圈环流(等值线间隔为 $5 \times 10^{-4}\text{s}^{-1}$)

半球最为显著,除极地对流层中上层 30° — 60° N 小范围的正偏差外,其余均为负偏差,且在 300hPa 附近最小,但随高度分别向地面和平流层方向加剧。

为分析热量误差,在图 3 中展示了 T42L9 模式大气中 1992 年 1 月和 7 月纬向平均西风 [U] (a) 和经圈环流 [χ] (b) (即纬向平均经向质量通量^[9]) 5 天预报的月平均误差。图中显示,模式大气在热带东风偏强,中纬度西风偏强,冬半球高纬带东风强且跨度大,而中纬度的偏强西风跨度小;反之,夏半球偏强西风跨度大,偏强东风跨度小;南半球极区无论 1 月还是 7 月均有一西风偏强中心。上述分析可以看到, T42 模式 120 小时位温预报在副热带地区有一个梯度偏大区,而在近极地附近有一个梯度偏小区,南极地区误差较大。这种温度场误差导致模式大气西风在低纬偏弱,中纬度偏强,与图 3a 的结果一致。1 月份直接环流 (Hadley 环流) 及中纬度的间接环流 (Ferrel 环流) 均比分析要强 (图 3b1), 直接 (间接) 环流的质量通量中心数值均比分析大一倍,相应北半球副热带下沉运动亦偏强,7 月份 (图略) 赤道附近有较强的上升运动,而北半球副热带地区亦存在比实况强得多的下沉运动。过强的下沉运动导致这里有过强的质量辐散,因而在位势高度场上,无论是 1 月还是 7 月都表现出 T42 预报的副高过强,副热带急流偏强。模式中 7 月副热带地区长期被强大的副高控制,大大削减了模式对季节的调整和主要雨带的预报能力。这种经圈环流误差分布的原因我们将另文分析。其直接效果之一,如我们即将看到的,是损害了热带的加热场分布,并导致西风预报的误差。为检验无加速定理在模式位温误差检验中的可行性,首先,我们计算出模式大气和真实大气中的位温变化情况,以及它们之间的差异。然后与上节得到的相应大气的位温变化率和平均系统误差相比较。

根据计算所有因子共同作用下 1992 年 1 月和 7 月 T42 的月平均位温 5 天平均变化率的分布特点可知 (图略), 热带、副热带地区以正变率为主,且数值较小,中高纬度变率较大,以负变率占优势,冬半球尤为突出。与图 2 比较可见,两者有十分相似之处,即模式大气和实际大气之间位温变化差异的正 (负) 变率区也与误差场中位温的正 (负) 误差区有良好的对应关系。这一方面是由于解方程 (2) 时的边界处理所造成的,另一方面还由于在 T 较大时,式 (5) 并不是一个全等式。但总体来说,分析和预报均呈类似的位温变化分布,说明 T42 模式的动力框架和对各种物理过程的处理是基本合理的。因此,无加速定理作为一个诊断工具,分析 NWP 模式热量的系统误差的成因是可行的。

4 模式热量误差的成因分析

4.1 热力强迫对位温变化的作用

图 4 为模式大气和实际大气中,热力强迫激发的位温变化差异 (7 月图略)。图 4 表明,热力强迫对位温变化的作用是以外强迫为主,内强迫总体上比外强迫作用小一个量级,非绝热加热 H31 (包括感热加热和次网格尺度凝结潜热加热) 作用与网格尺度湿非绝热加热 H32 作用对位温变化的贡献呈反相,尤其在对流层中下层。

由图 4a 可见,对冬半球的中高纬带,热力内强迫作用对位温变率的误差影响较大,但这种作用在 1 月份又为非绝热加热 H31 的作用相抵消。因此,图 4d 中在所有热力因子综

合作用下造成的位温变化差异对内强迫作用特点反应不十分突出. 比较图 4d 和图 4b、4c 可以看出, 在对流层上层到平流层, 无论南北半球, 非绝热加热 H31 对模式中位温变率起了主导作用, 在对流层中、下层, 则是受 H31 和 H32 共同的加热作用影响; 尤其在 700hPa 以下的近地层, 热带和副热带地区 1 月份是网格尺度湿非绝热加热作用略占优势, 7 月则以非绝热加热 H31 作用略占优势; 而在中高纬地区, 1 月份是非绝热加热 H31 作用略占优势, 7 月份是网格尺度湿非绝热加热 H32 略占优势. 由此看来, 改进辐射等过程的参数化、积云对流参数化、以及非对流降水过程, 不仅对改善热带大气预报至关重要, 而且也将对全球预报的改善起作用.

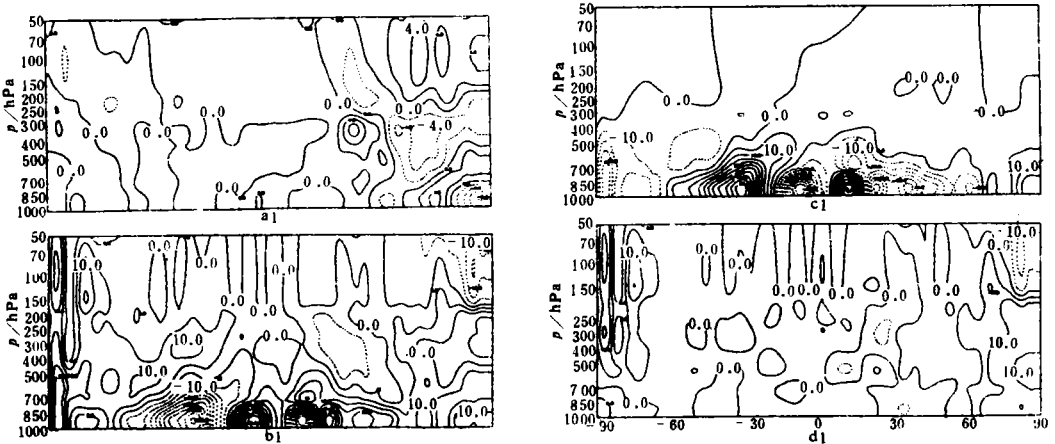


图 4 1992 年 1 月 T42L9 模式大气和“真实大气”中热力强迫激发的位温变化差异 (a) 热力内强迫的情形 (b) 非绝热加热 H31 的情形 (c) 网格尺度湿非绝热加热 H32 的情形 (d) 热力内外强迫之和的情形 (等值线间隔 a 为 $2.0 \times 10^{-6} \text{K}$, b, c, d 为 $5.0 \times 10^{-6} \text{K}$)

4.2 动力强迫对位温变化的作用

动力强迫对位温变化的贡献是通过其激发的次级环流 θ 来实现的. 一般地, 动力强

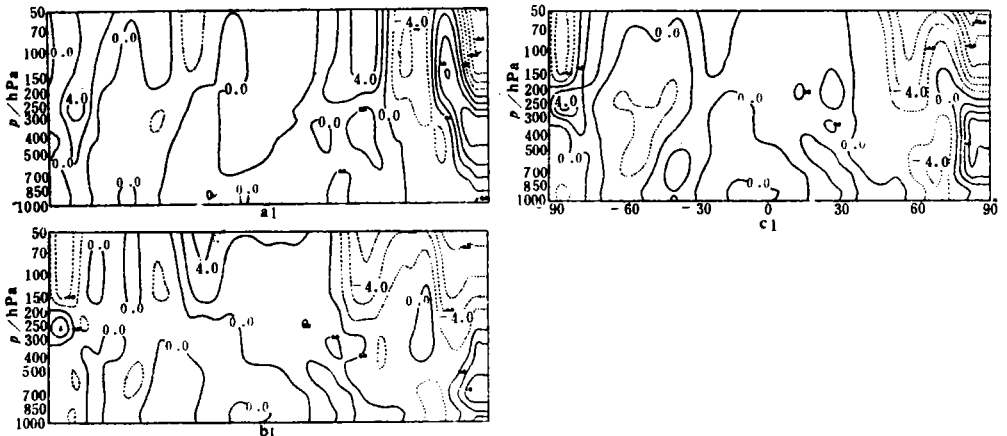


图 5 1992 年 1 月 T42L9 模式大气和“真实大气”中动力强迫激发热量变化的差异 (a) 动力内强迫 (b) 动力外强迫 (c) 动力内外强迫之和. (等值线间隔为 $2.0 \times 10^{-6} \text{Ks}^{-1}$)

迫的作用要比热力强迫的作用数值小得多。图5给出了模式大气和“真实大气”中动力内强迫作用(a1)、动力外强迫作用(b1)及总动力强迫(c1)引起的位温变化的差异(7月略)。动力强迫对位温误差的贡献主要是在中高纬度的对流层中层以上,且冬半球强于夏半球。此外,动力外强迫造成的位温变化误差分布,与总因子作用下位温变化的误差分布十分相似,强度受动力内强迫作用的影响而有所变化。因此表现为 30°N — 30°S 的热带、副热带地区为位温变化正误差区。对于 30°N 以北的中高纬带地区,无论1月、7月,除北极附近对流层中下层和 55°N — 70°N 的对流层上层、平流层为正误差外,其余均为位温负误差。在对流层上层和平流层这种正负偏差中心随纬度增加而交替出现的特点,从位置和分布特征来分析,它可能是青藏高原的大地形作用处理失当的结果。模式未加入重力波拖曳过程,使得传播到那里的地形激发重力波得不到合理抑制,造成该处热量的涡动输送过强。

5 结论与讨论

在模式大气和真实大气中,整个预报时段内,位温变化的差异反应了温度预报误差的特征。由于原始方程的无加速定理对各强迫因子具有良好的线性迭加性,能够清楚地将造成模式温度系统误差的物理因子分解开来,通过对T42L9模式的分析,说明原始方程的无加速定理,可以为模式温度系统误差动力成因的分析提供有效的工具。

用无加速定理对T42L9模式动力诊断分析的结果表明,T42L9模式的5天预报能报出大气中温度的基本结构,但也存在着一定的误差。其总体特征是,热带和副热带地区温度偏高,中纬度温度偏低,极地温度偏高。

应用无加速定理对上述误差的分析表明,在热带,模式温度误差主要是由于热力外强迫引起的,进一步改善辐射加热过程以及积云对流参数化会有助于减少热带温度的预报误差。在中高纬带对流层中低层温度误差主要由于网格尺度湿非绝热加热强迫诱发,这种网格尺度湿非绝热加热主要与大尺度凝结降水相联系。对流层高层的温度误差是由动力外强迫所致,动力内强迫和热力内强迫作补偿,因此,改善摩擦过程、海气、陆气耦合及地形效应等将有助于热带近地层及高层温度的预报。在中高纬度地区,模式的水平热量辐合过强,不能为热量输送所激发的次级环流效应所抵消。这表明模式中扰动的水平倾斜过强,进一步完善模式的动力框架,提高分辨率将有助于中高纬度温度预报的改进。

本文的工作仅仅是对模式输出的一些基本量进行处理、各种强迫作用对模式系统误差的贡献作了初步探讨。各种与热量、水汽、动量有关的物理过程,只能分析它们的综合效果,特别是文中大尺度凝结加热H32是依据预报结果直接计算而得,而H31是包含了除H32的所有非绝热加热项,两项之间有比较强的反相差异,还有待进一步研究。

在不久的将来,当一个用户界面比较灵活的数值预报模式并行试验的支持系统建立起来的时候,我们将可以直接从模式里输出各种物理过程所产生的强迫,计算并比较它们对误差的贡献。对那些误差贡献比较大的物理过程进行深入研究,设计出新的参数化方案。然后进行再试验、再比较,以便进一步改善我国的中期业务数值预报模式。

参 考 文 献

- 1 Eliassen A. and Palm E. On the transfer of energy in stationary mountain wave. *J. Geof. Publ.*, 1960, **22** (3):1—22.
- 2 Charney J. G. and Drazin P. G. Propagation of the planetary-scale disturbance from the lower into the upper atmosphere. *J. Geof. Res.*, 1961, **66**:83—109.
- 3 Andrews D. G. and McIntyre M. E. Planetary waves in horizontal and vertical shear, the generalized Eliassen-Palm relation and the mean zonal acceleration. *J. Atmos. Sci.*, 1976, **33**:2031—2048.
- 4 Edmon H. S., Hoskins B. J. and McIntyre M. E. Eliassen-Palm cross sections for the troposphere. *J. A. S.*, 1980, **37**:2600—2616.
- 5 吴国雄, Tibaldi. 平均经圈环流在大气角动量和感热收支中的作用. *大气科学*, 1988, **12**(1):8—17.
- 6 吴国雄, 陈彪. Non-acceleration theorem in a primitive equation system I: Acceleration of zonal mean flow. *Adv. Atmos. Sci.*, 1989, **6**:1—20.
- 7 吴国雄, 陈彪. 原始方程系统中的无加速定理 II: 纬向平均温度的变化. *大气科学*, 1990, **14**(2):143—154.
- 8 张绍晴, 刘还珠, 吴国雄, 杨云峰. NWP 模式纬向平均环流系统误差的动力诊断. *气象学报*, 待发表.
- 9 吴国雄, 刘还珠. 《全球大气环流时间平均统计图集》. 北京: 气象出版社, 1987. 1—7.

A DIAGNOSTIC STUDY OF NUMERICAL WEATHER PREDICTION SYSTEMATIC FORECAST ERRORS IN HEAT

Liu Huanzhu Zhang Shaoqing

(National Meteorological Center, Beijing 100081)

Abstract

It is proved, that NWP systematic forecast errors in heat are due to the differential equivalent potential temperature variation processes between the model atmosphere and real atmosphere during the period of validity. And, it is also proved that these forcing factors which evoke the thermal variation can be split into various linear terms according to the non-acceleration theorem in a primitive equation.

By applying this scheme to diagnose the forecast products of the T42L9 model (the operational model of NMC in China) in January and in July 1992, it was indicated that the model has the ability of forecasting thermal reasonable zonal mean, but there are still great errors in zonal belts, especially in the upper troposphere and low stratosphere levels in mid-latitude as well as near surface. The results of analysis by employing this scheme give reasons for the systematic forecast errors and the potential way of improving the model.

And it is also shown that this scheme by applying non-acceleration theorem is an efficient tool to diagnose the NWP models physical processes.

Key words: Thermal variation; Model systematic errors; Non-acceleration theorem.