

一种四维同化方法的试验研究^{*}

郝永斌

(中国气象科学研究院,北京 100081)

张玉玲

(北京大学地球物理系,北京 100871)

提 要

文章利用一个有限区模式对一种资料四维同化过程作了试验研究,以考察四维资料同化对模式的预报过程的作用. 试验结果表明:四维资料同化可以为模式提供一组四维动力协调的积分初值. 对由于资料或模式原因造成的积分开始时的高频振荡有很好的抑制作用,使模式的积分稳定性增强.

关键词: 四维资料同化; 牛顿张弛逼近技术; 动力协调; 积分初值.

1 引 言

早在 1959 年顾震潮就提出用历史资料、用动力方法推测大气的初始状态. 1969 年 Charney^[1]等提出将现时资料和过去资料同时用于一个显式的动力模式中,使得模式的预报方程能够保证不同变量场的时间连续性和动力耦合. 这个观点就是后来的四维同化. 在最近的 20 多年里,许多研究提出了将资料插入到具有不同复杂性的动力模式中的方法. McPherson^[2](1975)指出,如果一种方法可提供一个最优的三维初始态,而使得相应的模式在整个积分时段中最适于观测值,即使得模式的误差在围绕观测值的时间段中可以忽略,那么这个方法就是一个很好的四维资料同化的方法. 在最近的几年中,人们研究了应用牛顿张弛逼近技术的四维同化方法,将其用于全球模式(Lyne et. al 1982)^[3], (Stern and Plosky, 1983)^[4]和有限区模式(Anthes, 1974; Moke and Anthes, 1977)^[5].

本文在一个有限区模式中,采用含有牛顿张弛逼近技术的四维同化方法对模式的预报过程作试验研究,以考察同化方法对预报效果的影响.

2 模式概述

本文采用的有限区模式^[6]的基本方程水平取球坐标,垂直方向为 σ 坐标,即 $\sigma =$

1993 年 1 月 12 日收到,1993 年 7 月 30 日收到修改稿.

* 本文得到《七五》攻关课题资助.

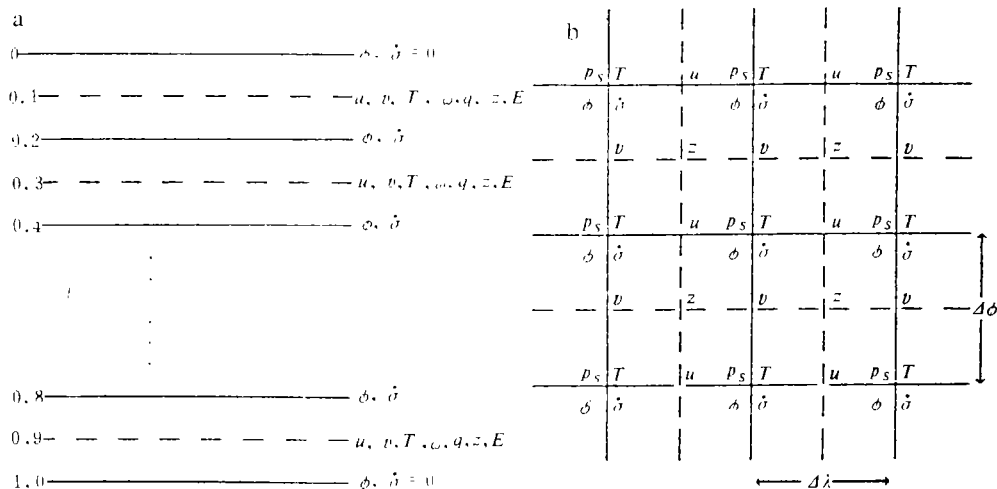


图1 变量的垂直分布(a)和水平分布(b) ($\Delta\lambda=1.875^\circ, \Delta\varphi=1.875^\circ$)

p/p_s , 其中 p_s 为地面气压. 垂直分层为 10 层. 模式变量采用空间上的交错分布, 水平方向为 Arakawa C 方案分布; 垂直方向取 u, v, q, T, ω 在模式层的中间, 而 $\varphi, \dot{\sigma}$ 则在模式层与模式层的交界面上(图 1a, b).

时间积分是以 Euler 向前差起步而后采用蛙跃格式, 在每步的积分过程中加入时间滤波. 水平侧边界做 Davies 边界处理, 以减少边界上波反射造成的影响.

模式的物理过程包括大尺度凝结和液态水在降落过程中的蒸发, 郭氏积云对流参数化(包括凝结与蒸发), 水平扩散以及边界层的湍流摩擦.

模式所采用的差分格式可以保证总质量守恒、位涡守恒、位涡拟能守恒和正确的动能与全位能之间的转换关系^[7].

3 试验方案设计

3.1 同化逼近技术

本文的四维资料同化试验采用牛顿张弛逼近技术. 所谓牛顿张弛逼近技术, 就是通过在一个或几个预报方程中增加一个与预报和实况的差值成比例的虚假倾向项, 来使模式态逼近实况态. 即在可使用观测资料的时段内, 模式解逼近实测资料的网格分析值, 并使变量之间达到动力协调. 用这样的模式解作为模式的预报初值, 以求得模式预报效果的提高^{[8][9]}.

对于一个给定的预报变量, 在其预报方程中加入一个分析逼近项, 它与该变量在每个网格点上的模式计算值和分析值的差成正比. 设预报变量为 $\alpha(X, t)$, 适于有限区模式预报方程的牛顿张弛逼近的计算公式为:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} = F(\alpha, X, t) + G_\alpha \cdot W_\alpha(X, t) \cdot \varepsilon(X) \cdot (\alpha_a - \alpha) \tag{1}$$

其中 α 是模式的积分变量, X 是空间自变量, t 是时间. $F(\alpha, X, t)$ 为物理强迫项(平流、科氏力、物理过程等), 式(1)右端第二项为同化项, 其中 G_0 称逼近因子, 它决定了模式中同化项相对于 $F(\alpha, X, t)$ 中所有其它的模式物理过程的大小; W 为四维权重函数, 其决定着同化的空间、时间的变化; ϵ 称分析质量因子, 取决于分析所用数据的质量和分布, 取值在 0—1 之间. $\hat{\alpha}_0$ 是变量 α 的观测资料经客观分析所得到的网格点值, 其数值由相邻时刻的观测分析值内插得到. 逼近因子 G_0 的量纲为 s^{-1} , 它的选择必须使同化项与模式中最慢的物理过程调整的时间尺度相当, 并且要满足数值稳定度判据 $G_0 \leq 1/\Delta t$. 对于气象系统, 其经验值为 $10^{-5}s^{-1} \sim 10^{-3}s^{-1}$. 一般取为 $10^{-4}s^{-1}$.

3.2 试验方案设计

在用个例进行资料同化和预报试验之前, 曾用 FGGE-IIIb 资料进行了不同变量的同化试验和采用不同的同化系数的试验. 结果表明: (1) 选用变化的逼近因子, 而非恒定值, 可避免模式态过强或过弱地逼近观测值, 积分效果好. (2) 对变量 u, v, T 做同化, 由 u, v 协调流场, 由 T 协调质量场. 对精度较差的湿度资料 q 不做同化, 同时对 p 不做同化, 原因是 p 的同化会引起垂直方向的不稳定^[10].

本文选取 1990 年 3 月 22 日和 3 月 23 日的个例对模拟的四维同化过程做试验. 个例采用国家气象中心客观分析的网格点资料, 水平格距为 $1.875^\circ \times 1.875^\circ$. 资料选取的时段为世界时 1990 年 3 月 21 日 12 时到 3 月 23 日 00 时. 共做了两个预报试验, 一是控制试验 (E_c), 用 3 月 22 日 00 时格点分析资料作初值, 积分到 3 月 23 日 00 时, 做 24 小时预报; 另一个是同化试验 (E_a), 积分是从 3 月 21 日 12 时起, 前 12 小时加入同化过程, 然后从 3 月 22 日 00 时开始, 做 24 小时预报. 同化变量取 u, v, T . 由于温度场和质量场之间的静力关系, 因而对温度场 T 做同化相当于对质量场做同化.

本模式预报方程为: $\frac{\partial \alpha}{\partial t} = F(\alpha, X, t)$, 对应的加入同化项的方程为 $\frac{\partial \alpha}{\partial t} = F(\alpha, X, t) + G(X, t) \cdot (\hat{\alpha}_0 - \alpha)$. 其中 $G(X, t) = G_0 \cdot W(X, t) \cdot \epsilon(X)$, $\hat{\alpha}_0$ 代表预报变量在给定网格上的观测分析值, 由初始时刻和第 12 小时的观测分析值内插得到每个时间步长上的值. 取同化因子

$$G_0 = 10^{-4} \times \begin{cases} 0 & (0h \leq t < 6h) \\ 0 \text{ 线性增加到 } 1.0 & (6h \leq t < 9h) \\ 1.0 & (9h \leq t \leq 12h) \end{cases}$$

$$W(X, t) = 1.0, \epsilon(X) = 1.0$$

作为初步试验并考虑前期试验的结果, 本文没有对 p 和 q 做同化.

4 结果分析与讨论

4.1 形势场比较

本文选用的个例的环流演变如下: 1990 年 3 月 22 日 00 时(图略)在 500hPa 上 $100^\circ E$,

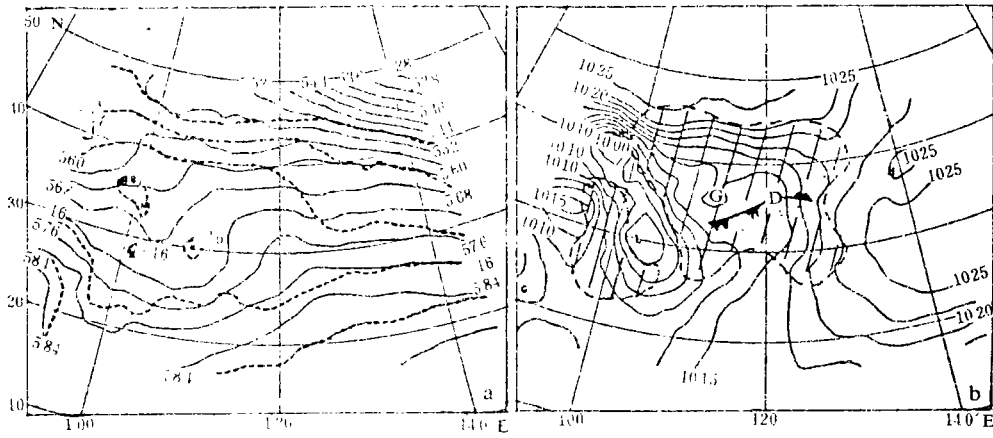


图2 1990年3月23日00时500hPa(a)以及地面(b)实况场(阴影区为降水区)

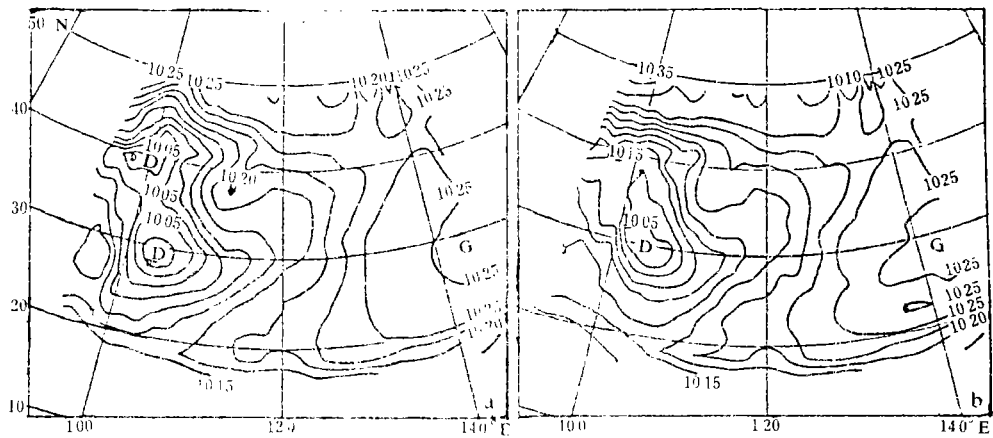


图3 1990年3月23日00时的初始场做的24小时地面气压预报图(a)同化试验 (b)控制试验

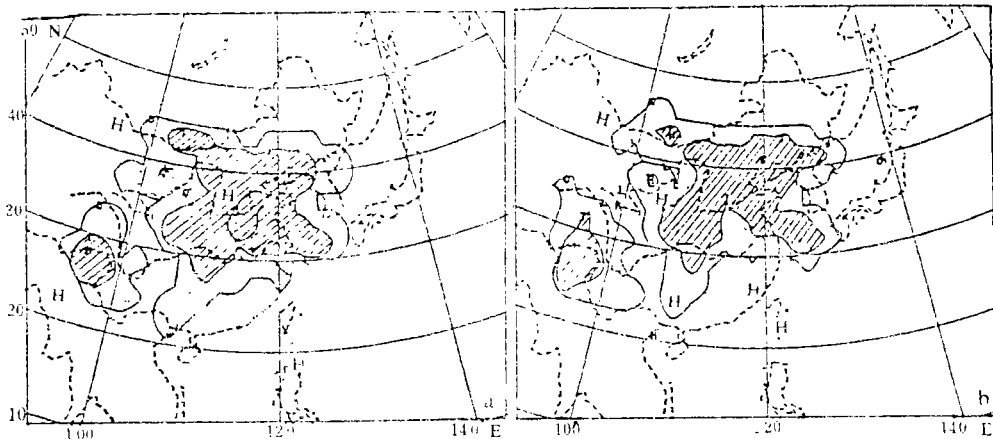


图4 1990年3月23日00时的初始场做的24小时降水量预报图(a)同化试验 (b)控制试验

30°N 附近有弱槽,地面图上对应槽前是低压区,在这个低压内未来产生降水系统.到了 23 日 00 时,从 500hPa 图上(图 2(a)),可看出在 115°E、20°—40°N 有一个明显的低槽;在地面图上(图 2(b))与高空槽相对应,在 121°E、34°N 附近是一个低压区,并有比较清楚的冷暖锋面,锋后是一个冷高压区.同时在 30°N、103°E 和 39°N、98°E 有两个低压中心.

将控制试验和同化试验的预报图与实况图相比较,可以看出同化试验的结果较控制试验更接近实况.两种试验 500hPa 的预报情况(图略)同实况相比,控制试验预报的低槽要浅,而同化试验结果与实况非常接近.最明显的改进是对位于 100°E 附近的地面低压系统的预报,同化试验(图 3a)预报出两个低压中心,位置与实况吻合很好.而控制试验(图 3b)则只预报出一个低压中心.对上述提到的锋后的冷高压的预报也是同化试验比控制试验的效果好.两种试验所做的降水预报差别不大(图 4a 和图 4b),与实况相比降水区域都相吻合,但量级都略偏小,这可能与采用的降水方案有关.

4.2 误差统计分析

表 1 给出了控制试验(E_c)与同化试验(E_a)的 24 小时预报结果与实况相比较的距平误差、距平均方根误差和距平相关系数.从表中可以看出,不论是风场(u, v)还是质量场(z, T, p_s),同化试验 E_a 都比控制试验 E_c 有较小的误差和较高的相关系数,特别是地面气压 p_s 的预报相关提高明显.这也说明加入资料的四维同化过程对模式的预报效果有一定的改进.

表 1 控制试验(E_c)和同化试验(E_a)的误差分析

		z		u		v		p_s (hPa)
		500(hPa)	850(hPa)	500(hPa)	850(hPa)	500(hPa)	850(hPa)	
距平误差	E_c	2.04	1.67	2.24	1.88	1.76	1.39	2.74
	E_a	1.94	1.66	2.20	1.80	1.81	1.36	2.31
距平均方根误差	E_c	2.80	2.36	3.09	2.49	2.53	2.06	4.18
	E_a	2.69	2.33	2.93	2.36	2.57	2.02	3.22
距平相关系数	E_c	0.66	0.71	0.91	0.89	0.87	0.89	0.47
	E_a	0.67	0.71	0.92	0.90	0.86	0.90	0.66

4.3 变量积分的振荡分析

预报变量在积分过程中往往会出现一种振荡现象.考察这种振荡可以看出模式在积分过程中预报变量是否协调,如果出现大振幅、高频率振荡,则说明初值变量之间不很协调.

图 5a 和图 5b 分别给出了处于低压中心及降水区域中某点的高低层垂直运动(ω)在 24 小时积分过程中的振荡情况.实线代表控制试验 E_c .而虚线代表同化试验 E_a .很明显地可以看出不论是低层($\sigma = 0.9$)还是中层($\sigma = 0.5$)上,控制试验 E_c 的 ω 振幅都比同化试验 E_a 的振幅要显著得多.特别是在 $\sigma = 0.9$ 层上(图 5a),控制试验 E_c 中,在最初阶段 ω 出现了较强的振荡.相比之下,加入同化过程的积分情况要稳定得多;而在 $\sigma = 0.5$ 层上(图 5b),控制试验 E_c 中, ω 的振荡一直存在,而加入同化过程则非常有效地抑制了这种振荡.

图 6a 和图 6b 分别是低压区内位于 33.75°N、120°E 和 33.75°N、121.875°E 两个点

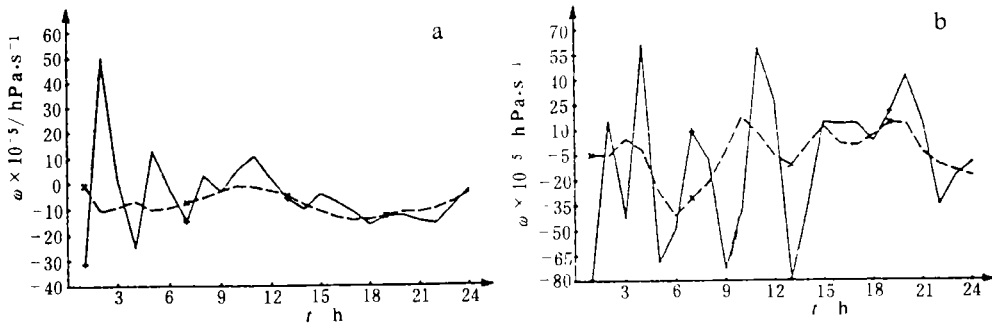


图5 $\omega(\sigma = 0.9)$ (a)和 $\omega(\sigma = 0.5)$ (b)的积分振荡图
(实线:控制试验,虚线:同化试验)

的地面气压值(p_s)在积分过程中的变化情况.由图可见控制试验的 p_s 振幅都比同化试验的振幅要显著得多.而且,控制试验 E_c 中 p_s 的振荡在初始时很明显,而同化试验 E_a 则完全改变了这种情况.这表明了在模式中加入同化过程可以增强模式中各预报变量的协调性,进而使得积分的稳定性和预报的准确性有了一定程度的提高.

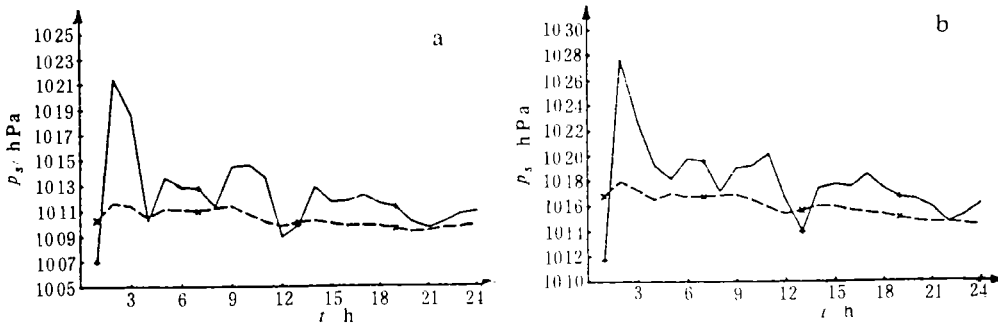


图6 在 $33.75^{\circ}\text{N}, 120^{\circ}\text{E}$ 处(a)和 $33.75^{\circ}\text{N}, 121.875^{\circ}\text{E}$ 处(b)地面气压 p_s 的积分振荡图(说明同图5)

5 小 结

本文选用的是牛顿张弛逼近技术,对风场(变量 u, v)和质量场(变量 T)做资料的四维同化.模式经过24小时的积分预报结果,同化试验比控制试验预报效果有明显的改进,这一点在形势场比较、误差统计分析以及积分变量在积分过程中的稳定性等方面都得到了证明.特别是预报变量在积分过程开始时有一定程度的振荡,而加入同化过程之后,这种振荡明显地减小了.这说明同化过程对这种变量的虚假增长有很好的抑制效果,这无疑是对模式预报效果的一个改进.

参 考 文 献

- 1 Charney J. G., Halem M., Jastrow R. Use of incomplete historical data to infer the present state of the atmosphere. *J. Atmos. Sci.*, 1969, **26**:1160—1163.
- 2 McPherson R. D. Progress, problems and prospects in meteorological data assimilation. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1975, **56**:1151—1166.
- 3 Lyne W. H., Swinbank R., Birch N. T. A data assimilation experiment and the global circulation during the FGGE special observation period. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1982, **108**:575—594.
- 4 Stern W. F., Plosky J. J. A Newtonian “nudging” approach to fourdimensional data assimilation: Use of SESAME-IV data in a mesoscale model. Preprints, Seventh Conf. on Numerical Weather Prediction, Montreal, *Amer. Meteor. Soc.*, 1983, 77—82.
- 5 Anthes R. A. Data assimilation and initialization of hurrican prediction model. *J. Atmos. Sci.*, 1974, **31**:702—719.
- 6 张玉玲等. 十层有限区细网格模式的试验研究.《七·五》国家科技攻关课题.《中期数值天气预报研究》成果汇编(一),北京:气象出版社,1990,152—168.
- 7 张玉玲,吴辉旋,王晓林. 数值天气预报. 北京:科学出版社,1986.
- 8 Wand W. and Warner T. T. Use of the four dimensional data assimilation by Newtonian relaxation and latent heat forcing to improve a mesoscale-model precipitation forecast: A case study. *Mon. Wea. Rev.*, 1988, **116**: 2593—2613.
- 9 Stuffer D. R. and Seaman N. L. Use of the four-dimensional data assimilation in a limited-area mesoscale model. Part I: Experiment with synoptic-scale data. *Mon. Wea. Rev.*, 1990, **118**:1250—1277.
- 10 Kuo, Y-H. and Chen, S. Four-dimensional data assimilation of TAMEX special observations. Proceedings, Workshop on TAMEX Scientific Result, Bolder, Colorado, 1989.

EXPERIMENTS OF A FOUR DIMENSIONAL
DATA ASSIMILATION SCHEME

Hao Yongbin

(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

Zhang Yuling

(Department of Geophysics, Peking University, Beijing 100871)

Abstract

A four-dimensional data assimilation(FDDA)scheme has been studied to investigate the effect of the FDDA on the numerical prediction, using a limited-area model.

The results show that FDDA can provide a integrated first guess with four-dimensional dynamic consistency for the model and suppress the high frequency fluctuation caused by the data or the model itself at the begining of the integration, and thus raise the stability of the model.

Key words: Four-dimensional data assimilation (FDDA) ; Newtonian relaxation or nudging; Dynamic consistency; Integrated first guess.