

# REM 模式伴随系统的建立及其四维变分 资料同化初步试验<sup>\* 1</sup>

王 铁<sup>1,2</sup> 穆 穆<sup>1</sup>

WANG Tie<sup>1,2</sup> MU Mu<sup>1</sup>

1. 中国科学院大气物理研究所, LASG, 北京, 100029

2. 解放军理工大学气象学院, 南京, 211101

1. LASG, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Science, Beijing 100029, China

2. Institute of Meteorology, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101, China

2007-06-26 收稿, 2007-08-19 改回.

**Wang Tie, Mu Mu. 2008. A REM adjoint system and its data assimilation experiments of 4D-VAR. *Acta Meteorologica Sinica*, 66 (6): 955—967**

**Abstract** The Regional Eta-Coordinate Model(REM)has shown an acceptable good forecast ability to the regional heavy rainfall of China in recent years, and developing a Four-Dimension Data assimilation system(4D-Var) for the REM is an important step to consummate the model as well as to improve its forecast ability. The tangent linear model and adjoint model codes were written according to the “code to code” rule, and the establishment process of the REM adjoint modeling system is introduced in details. The verification of the tangent linear model and adjoint model of the REM model was performed using a lot of observational data, and the correctness of the gradient of the given cost function was also checked. In the verifications of the tangent linear model and cost function, when the magnitude of perturbations reduced, the verification results approached to 1.0, and when the rounding error of computer increased, the verification results departed off 1.0, thus showing that the coding of the tangent linear model is successful and the gradient of cost function is correct calculated. In the verification of the adjoint model, the values at left- and right-hand-side of algebraic formula are the same with 13 digit accuracy. The above results indicate that the REM adjoint modeling system is successfully established. Applying the REM adjoint modeling system, two 4D-Var experiments and extended forecast were performed using the Observational data of two weather cases (00:00 UTC 8 June 1998 to 12:00 UTC 8 June 1998 and 00:00 UTC 1 August 20:00 to 12:00 UTC 1 August 2000). The results show that forecasts of temperature, wind speed and specific humidity using the 4D-Var-assimilated initial data are all improved at both the end of the assimilation window and the end of the forecast time. But forecast results of rainfall are different in the two cases: the location and amount of the accumulated rainfall are closer to the observation in the first case, while in the second case there is no significant improvement. The reason for results in the second case maybe two aspects: the first is that the definition of the cost function is too simple during the primary numerical experiments of 4D-Var, the background term was not considered in the cost function, the errors caused by the numerical model during the 4D-Var were not controlled. And further more the accumulated rainfall was not considered in the cost function too, which affected the 4D-Var-assimilated initial data, and especially in the convective weather process, the effect was more obviously; the second aspect is that the observational data used during the 4D-Var was fewer in the assimilation windows, just one at the end of the assimilation windows. This case will be studied in the further research.

**Key words** REM model, Adjoint system, 4D-Var data assimilation

<sup>\*</sup> 资助课题:国家自然科学基金项目(40233029,40221503),中国科学院知识创新工程方向项目(KZCX2-208),大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室开放课题。

作者简介:王铁,主要从事中尺度数值天气预报与模拟和四维变分资料同化的研究。E-mail: wtlxq@mail.iap.ac.cn

**摘要** Regional-Eta-Coordinate-Model(REM)中尺度模式对中国区域性降水显示出公认的较高预报能力,建立其四维变分资料同化系统是完善该模式,进一步提高其预报效果的重要工作。本研究编写了 REM 模式的切线性模式和伴随模式,介绍了建立 REM 模式伴随系统的过程,并利用实际天气个例资料,分别对 REM 模式的切线性模式、伴随模式及定义的目标函数梯度进行了正确性检验,检验结果表明对 REM 模式的切线性模式及伴随模式编写是成功的。利用 REM 模式的伴随系统,对 1998 年 06 月 08 日 00 时到 09 日 00 时和 2000 年 08 月 01 日 00 时到 02 日 00 时两个实际天气个例进行了四维变分资料同化试验。从数值试验的结果分析可以看到,进行四维变分资料同化后,两个天气个例在预报结束时刻其预报结果对风场和湿度场的预报都有明显改善,对温度场和高度场的预报也有所改善。对于累积降水的预报,两个个例利用四维变分资料同化后得到的初始场进行的预报结果则有较大不同,在个例 1 中,变分同化后对降水中心的位置和降水强度的预报都有明显改善,预报结果更接近于观测场;个例 2 中,变分同化后对降水中心位置和强度的预报则没有改善,产生这种现象的原因可能是由于定义的目标函数中没有加进背景场项,也可能是由于采用的观测资料时次比较少,还需要进一步进行研究和试验。

**关键词** REM 模式,伴随系统,四维变分资料同化

**中图法分类号** P435

## 1 引言

近年来,为了充分利用观测资料,提供准确反映大气运动状态的数值模式初始场,资料同化的理论和方法被广泛地研究与应用。其中,四维变分资料同化方法,由于其利用数值模式本身作为约束条件对多时空分布的观测资料进行同化,使得同化后的数值模式初始场在准确反映大气运动状态的同时,与数值模式本身有着良好的协调性,自 20 世纪 80 年代以来受到更多的关注和应用(Ledimet, et al, 1986; Navon, et al, 1992; Lu Chungu, et al, 2000; Bin Wang, et al, 2000)。

欧洲中期天气预报中心于 1996 年底最先采用四维变分资料同化系统作为业务系统(Courtier, 1997);法国气象局也已经采用了四维变分资料同化系统作为业务化系统,英国气象局和加拿大气象局也准备采用此方法作为业务系统。中国目前还没有自己的中小尺度数值模式四维变分资料同化系统,重大基础研究规划项目(973)“我国灾害性天气形成机理和预测理论研究”将发展中国科学院大气物理研究所 Regional-Eta-Coordinate-Model(REM)中尺度模式及其伴随模式作为研究项目之一。REM 模式是由中国科学院大气物理研究所开发研制的中小尺度数值模式。在过去的近 10 年中,REM 模式得到了广泛的应用和发展,经过实际检验,对中国区域性降水显示出公认的较高预报能力(宇如聪, 1994a, 1994b)。建立其四维变分资料同化系统是完善该模式,进一步提高其预报效果的重要工作,建立其伴随系统则是其中一个重要的环节。

本研究编写了 REM 模式的切线性模式和伴随

模式,建立了 REM 模式的伴随系统并利用实际观测报文资料进行了四维变分资料同化的初步试验。

## 2 REM 模式的伴随系统

对于大气科学中使用的描写大气运动的控制方程组,通常其变量比较多,伴随方程很难用直接推导的方法得出,即使能够导出其伴随方程,再将伴随方程写成离散化的数值模式,也需要很大的工作量。通常采用将现有的数值模式进行切线性处理,得到原数值模式的切线性模式(Marchuk, 1974),再由切线性模式的程序代码逐句转置得到伴随模式的程序代码的方法,这种方法利用了原非线性模式的离散格式,从而简化了伴随模式的创建过程。

建立 REM 模式的伴随系统,也是按照上述方法进行的。先将 REM 模式切线性化,编写 REM 模式的切线性模式,再由切线性模式程序代码一一对应编写伴随模式程序语句,得到 REM 模式的伴随模式。

### 2.1 REM 切线性模式的编写与检验

在编写 REM 模式的切线性模式时,为了便于切线性模式的编写,在不影响模式性能的前提下,对非线性模式的子程序和程序语句进行了必要的修改。然后按照切线性模式的编写规则,分两步编写了 REM 模式的切线性模式:(1)先写出 REM 模式动力框架部分的切线性模式,对其进行正确性检验;(2)在对 REM 模式动力框架部分切线性模式检验正确的基础上,再编写加上物理过程后的切线性模式,并进行正确性检验。其中物理过程部分中的“开关”问题采用了传统的处理方法(Mu Mu, et al, 2003, 2005)。编写完 REM 模式的切线性模式后,使用常规观测资料并利用大量的实际天气个例对其

正确性进行验证,表 1 和表 2 分别给出 1995 年 8 月 5 日 00 时这个个例动力框架部分和加上物理过程后的切线性模式的检验结果。在对切线性模式的动力框架部分进行检验时,只考虑了干过程,没有

考虑湿度场的扰动。在加上物理过程后,考虑了湿物理过程并给出了对湿度场的检验结果。从表中可以看到,对 REM 切线性模式的检验结果符合检验规律,对 REM 模式的切线性模式编写是成功的。

表 1 REM 模式动力框架部分的切线性模式检验(1995 年 8 月 5 日 00 时积分 6 h)  
Table 1 Verification of the tangential linear model(TLM) of the dynamic frame of the Regional-Eta-Coordinate Model (REM); 6 h from 00:00 UTC 5 August 1995

扰动幅度	温度	地面气压	纬向水平风速	经向水平风速
$1.0 \times 10^{-1}$	0.967629407446299	1.00250157850938	0.998218117630411	0.975679956368173
$1.0 \times 10^{-2}$	0.996837821214428	1.00025152727235	0.999868016591361	0.997396968477456
$1.0 \times 10^{-3}$	0.999684779121171	1.00002481780164	0.999985667139007	0.999723409803474
$1.0 \times 10^{-4}$	0.999968514653349	1.00000240275064	0.999998393078696	0.999967773123062
$1.0 \times 10^{-5}$	0.999996850440606	1.00000024733715	0.999999848806606	0.999997314551728
$1.0 \times 10^{-6}$	0.999999675345747	1.00000005425198	0.999999985282715	0.999999752814711
$1.0 \times 10^{-7}$	0.999999918654270	0.999999924551678	1.00000000029423	1.00000010353686
$1.0 \times 10^{-8}$	0.999999698853330	1.00000042452615	1.00000007496549	1.00000045241134
$1.0 \times 10^{-9}$	0.999992640013106	1.00000884771956	0.999999367763444	0.999995175613934
$1.0 \times 10^{-10}$	1.00001177521242	0.999757128776892	1.00004604385874	1.00003306710502
$1.0 \times 10^{-11}$	0.999823355649134	0.999020931904529	1.00022288004106	1.00129365333401
$1.0 \times 10^{-12}$	0.998378586825846	1.01708839314484	1.00171279746822	1.00791786258410
$1.0 \times 10^{-13}$	0.982670391409980	0.937341132423279	0.978011091951416	1.28495060933452
$1.0 \times 10^{-14}$	0.926997990827693	1.16779117871777	1.08377614380438	2.58252103558510

注:随着扰动幅度的减小,检验结果趋近于 1.0,然后随着计算机舍入误差的增加又偏离 1.0,证明切线性模式是正确的。

表 2 REM 模式加进物理过程后的切线性模式检验(1995 年 8 月 5 日 00 时积分 6 h)  
Table 2 Verification of the TLM of the REM; 6 h from 00:00 UTC 5 August 1995

扰动幅度	温度	比湿	纬向水平风速	经向水平风速
$1.0 \times 10^{-1}$	0.727088114001285	1.03133070458107	0.835399536036573	1.19630955490079
$1.0 \times 10^{-2}$	1.12625456673335	0.625510355116609	0.740162865965076	-3.22818602197860
$1.0 \times 10^{-3}$	-11.3999981807482	-0.13409891740872	-4.01920563495824	-6.82563022953560
$1.0 \times 10^{-4}$	-0.233057158207555	1.86190702608599	1.40595724453458	5.43059736769414
$1.0 \times 10^{-5}$	0.991447036612988	0.990027852241076	0.999098612453407	0.988388494381103
$1.0 \times 10^{-6}$	0.972674579411831	0.973148589286850	1.00131906991473	0.993710339458535
$1.0 \times 10^{-7}$	0.999913233943090	1.00092761547106	0.999989223620014	0.999860994647119
$1.0 \times 10^{-8}$	0.999910531502326	1.00092880817893	0.999988335788242	0.999853502578478
$1.0 \times 10^{-9}$	0.999930344923647	1.00092481614724	0.999989991320694	0.999766422296452
$1.0 \times 10^{-10}$	0.999593037017334	1.00104497933675	0.999825699086312	1.00063788679894
$1.0 \times 10^{-11}$	0.997670528927425	1.00084434195019	0.999749748654028	1.00041780570155
$1.0 \times 10^{-12}$	0.975938568306723	1.00547467335557	1.00593029370172	0.921807944511714
$1.0 \times 10^{-13}$	0.688824953427434	1.06347011485484	0.959823376848095	0.569519972397423
$1.0 \times 10^{-14}$	2.59061683130236	1.17953681729014	1.47302468391820	-10.6513608682727

注:同表 1。

## 2.2 REM 伴随模式的编写与检验

在编写 REM 模式的伴随模式时,采用的是从切线性模式程序代码到伴随模式程序代码逐句对应的编写方法。REM 模式的伴随模式编写与检验也分两步进行:(1)首先编写 REM 模式动力框架部分的伴随模式,对其进行正确性检验;(2)在检验正确

的基础上,再编写加上所有物理过程后的伴随模式,并对其正确性进行检验。在对这两部分伴随模式进行检验时,同样使用常规观测资料,利用大量的天气个例进行了验证。对切线性模式检验时使用的天气个例进行伴随模式检验的结果见表 3。

从以上给出的正确性检验结果看,在 6 h 时间

窗口内, REM 动力框架部分伴随模式和加进物理过程后伴随模式的检验结果在检验公式的左端项与右端项二者都能达到 13 位的有效数字相等。结果符合检验公式, 表明 REM 模式的伴随模式编写是成功的。

表 3 REM 模式的伴随模式检验

(1995 年 8 月 5 日 00 时积分 6 h)

Table 3 Verification of the Adjoint model of the REM: 6 hours from 00:00 UTC 5 August 1995

	REM 模式动力框架部分	REM 模式
左端项	820099.1597535404	1143769.549091516
右端项	820099.1597535380	1143769.549091521

### 2.3 目标函数的梯度检验

在完成 REM 模式的切线性模式和伴随模式的编写, 并进行了正确性检验后, 还需要进一步进行梯度检验, 对切线性模式及伴随模式进行综合检验。对目标函数的梯度进行检验, 也是基于目标函数小扰动上的泰勒展开(Taylor)定理进行的。

目标函数取为以下形式:

$$J(\mathbf{X}_0) = \frac{1}{2}(\mathbf{M}_t(\mathbf{X}_0) - \mathbf{X}_{\alpha_1})^T \mathbf{W}_x^{-1}(\mathbf{M}_t(\mathbf{X}_0) - \mathbf{X}_{\alpha_1}) + \frac{1}{2}(\mathbf{M}_t(\mathbf{X}_0) - \mathbf{P}_{\alpha_1})^T \mathbf{W}_p^{-1}(\mathbf{M}_t(\mathbf{X}_0) - \mathbf{P}_{\alpha_1}) \quad (1)$$

其中,  $M_t$  代表采用的数值模式 REM, 式中右端第 1 项中的  $X$  代表气象上通常的物理量场, REM 模式中的基本变量有 5 个, 温度场( $T$ )、水平风场( $U, V$ )、水汽场( $Q$ )和地面气压场( $p_s$ ); 式中右端第 2 项中的  $P$  代表累积降水。下标 0 代表初始时间, 下标  $t_1$  代表最终预报时间, 下标  $\alpha$  代表插值到模式格点上的观测,  $X_{\alpha_1}$  为  $t_1$  时刻的观测场,  $X_0$  为数值模式的初始场,  $W_x$  代表数值模式 5 个基本变量的预报场与相应的观测场差值的协方差矩阵,  $W_p$  代表降水预报场与观测场差值的协方差矩阵。

对于目标函数梯度的检验, 也是分两步进行的: (1) 对只用 REM 模式动力框架部分进行预报时的目标函数进行检验; (2) 对利用 REM 模式进行预报时的目标函数进行检验(表 4)。

从给出的 REM 模式的切线性模式、伴随模式及定义的目标函数梯度各部分的检验结果可以看到, 对 REM 模式的切线性模式及伴随模式编写是成功的。

表 4 REM 模式的目标函数梯度检验

(2000 年 6 月 25 日 00 时积分 6 h)

Table 4 Gradient verification of the cost function using the REM: 6 hours from 00:00 UTC 25 June 2000

扰动幅度	REM 模式动力框架部分	REM 模式
$1.0 \times 10^{-3}$	1.500781932131500	0.1596400824702615
$1.0 \times 10^{-4}$	1.050078193212365	-0.1560636225656181
$1.0 \times 10^{-5}$	1.005007819311845	-2.243309460004021
$1.0 \times 10^{-6}$	1.000500781969694	0.0144216905421128
$1.0 \times 10^{-7}$	1.000050076954398	19.56378462454570
$1.0 \times 10^{-8}$	1.000004996591630	0.9960293298939181
$1.0 \times 10^{-9}$	1.000000376252268	1.017617625117375
$1.0 \times 10^{-10}$	0.9999990518500473	1.000000885506630
$1.0 \times 10^{-11}$	0.9999926173013963	1.000016515093965
$1.0 \times 10^{-12}$	0.9999072760201720	1.000027443284019
$1.0 \times 10^{-13}$	0.9991256222341979	1.004207324092256
$1.0 \times 10^{-14}$	0.9908914340362552	1.016470801334036
$1.0 \times 10^{-15}$	0.9073675227977576	1.020868367755654

注: 随着扰动系数的减小, 检验结果趋近于 1.0, 然后随着计算机舍入误差的增加又偏离 1.0, 证明关于目标函数的梯度检验是正确的。

### 3 四维变分资料同化试验

下面利用 REM 模式的伴随系统和两个实际天气个例的观测资料进行了四维变分资料同化的数值试验。

#### 3.1 试验设计

试验中, REM 模式水平格点数取为 (41, 31), 水平格距取为  $0.5^\circ$ , 模式区域的左上角经纬度值分别取为 ( $40^\circ\text{N}, 105^\circ\text{E}$ )。垂直  $\eta$  层取为 20 层, 为均匀分布。

所选天气个例为 1998 年 6 月 8 日 00 时到 9 日 00 时(所用时间均为世界时, 下同), 和 2000 年 8 月 1 日 00 时至 2 日 00 时的两个天气过程。试验所使用的观测场资料为常规获得的报文资料, 观测时次为每天 00 和 12 时两个时次。

作为 REM 模式四维变分资料同化的初步研究, 在目标函数中暂没有考虑背景场项。同时, 由于在 12 时的观测场中降水为 24 h 累积降水量, 试验中取 06 时—12 时为同化时间窗口, 故目标函数中没有考虑同化降水资料。目标函数取为

$$J(\mathbf{X}_0) = \frac{1}{2}(\mathbf{M}_t(\mathbf{X}_0) - \mathbf{X}_{\alpha_1})^T \mathbf{W}_x^{-1}(\mathbf{M}_t(\mathbf{X}_0) - \mathbf{X}_{\alpha_1}) \quad (2)$$

试验中  $t_1$  取为 12 时。由于常规报文观测资料为 00 和 12 时(世界时), 为 12 h 间隔, 为了计算  $W$  矩阵和  $S$  矩阵方便 (Mu Mu, et al, 2003), 先利用 REM 数值模式将 00 时的观测场积分 6 h, 用 06 时

的模式输出场作为四维变分资料同化的初猜场,分别计算出  $W$  矩阵和  $S$  矩阵(Navon, et al,1992),再利用初猜场将数值模式继续积分 6 h,到 12 时,利用此时的报文观测场进行变分资料同化试验。REM 模式同化前预报的 24 h 累积降水是数值模式从 00 时积分到次日 00 时获得的,同化后的 24 h 累积降水则是将数值模式 00—06 时的积分结果与数值模式利用同化后 06 时的初始场积分到次日 00 时的结果相加得到的。

本文进行非线性优化试验中采用的优化程序是 L-BFGS-B 程序。

### 3.2 结果分析

#### 3.2.1 个例 1

天气过程简介:在 1998 年 06 月 08 日 00 时的 500 hPa 温度场上,西北地区和辽东半岛为冷中心,河北和山西地区为一暖中心,长江以南地区则为暖区。到 8 日 12 时,西北地区的冷中心略向东移,河北与山西的暖中心则与长江南部的暖区合并,中国

大部分地区为暖区控制。到 9 日 00 时,西北地区的冷中心加强东进,东部的暖中心减弱东移(图 1)。在 500 hPa 位势高度场图上可见,在渤海以北有一低压,低压槽沿黄河流域向西南延伸,在河南地区的低压槽中有一弱的低压中心,长江以南为平直西风。到 8 日 12 时,河南地区的弱低压中心与东北地区的低压系统合并并发展东移,河北地区为一高压脊,山东与河南地区为一低压槽。到 9 日 00 时,山东与河南地区的低压槽移到海面上,黄河河套地区有低压槽移进并发展(图 2)。

以 1998 年 6 月 8 日 00 时的观测资料作为模式初始场,利用 REM 模式积分 6 h 并将其输出结果作为同化起始时刻的初猜场,计算目标函数中  $W$  矩阵及量纲矩阵  $S$ 。采用定义的目标函数式(2)并利用 6 月 8 日 12 时的观测资料和非线性优化程序 L-BFGS-B,进行了四维变分资料同化试验,在预报结束时间 6 月 9 日 00 时,将变分同化前后的预报结果与观测场进行了比较分析。

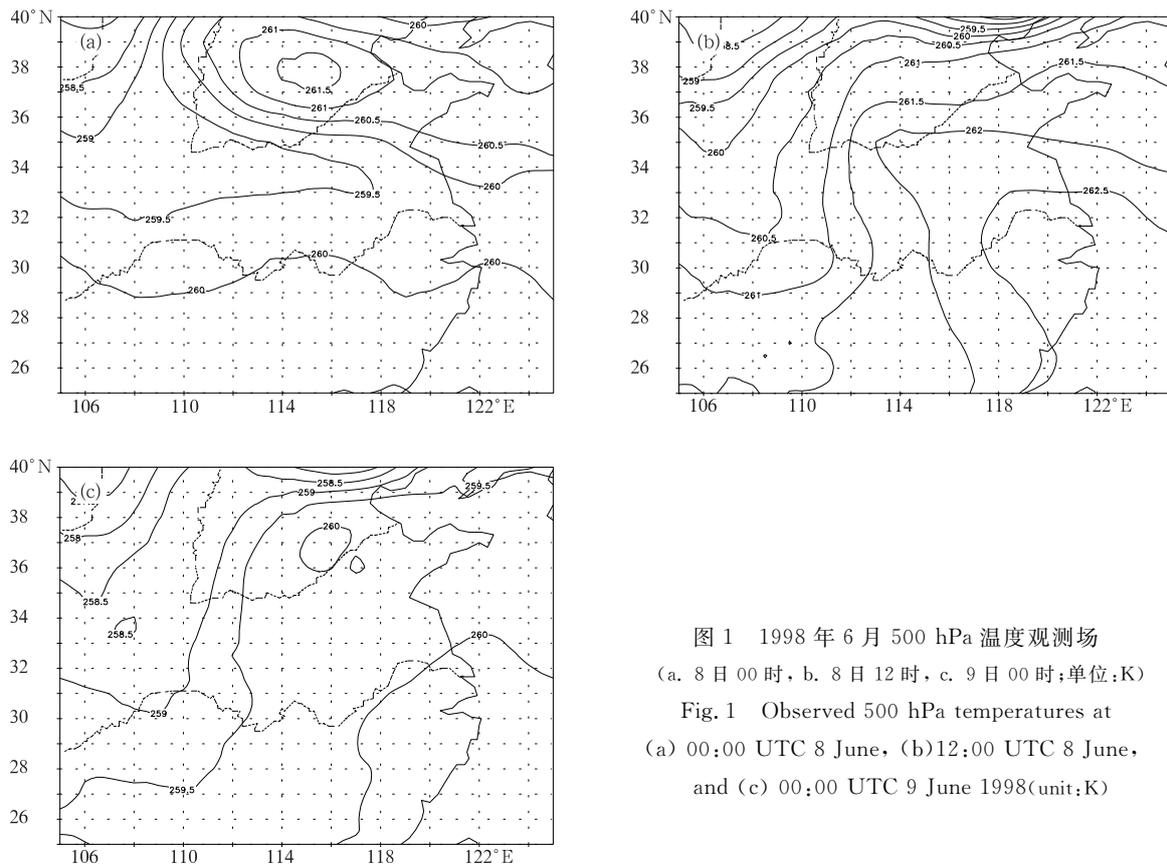


图 1 1998 年 6 月 500 hPa 温度观测场  
(a. 8 日 00 时, b. 8 日 12 时, c. 9 日 00 时;单位:K)  
Fig. 1 Observed 500 hPa temperatures at  
(a) 00:00 UTC 8 June, (b) 12:00 UTC 8 June,  
and (c) 00:00 UTC 9 June 1998(unit:K)

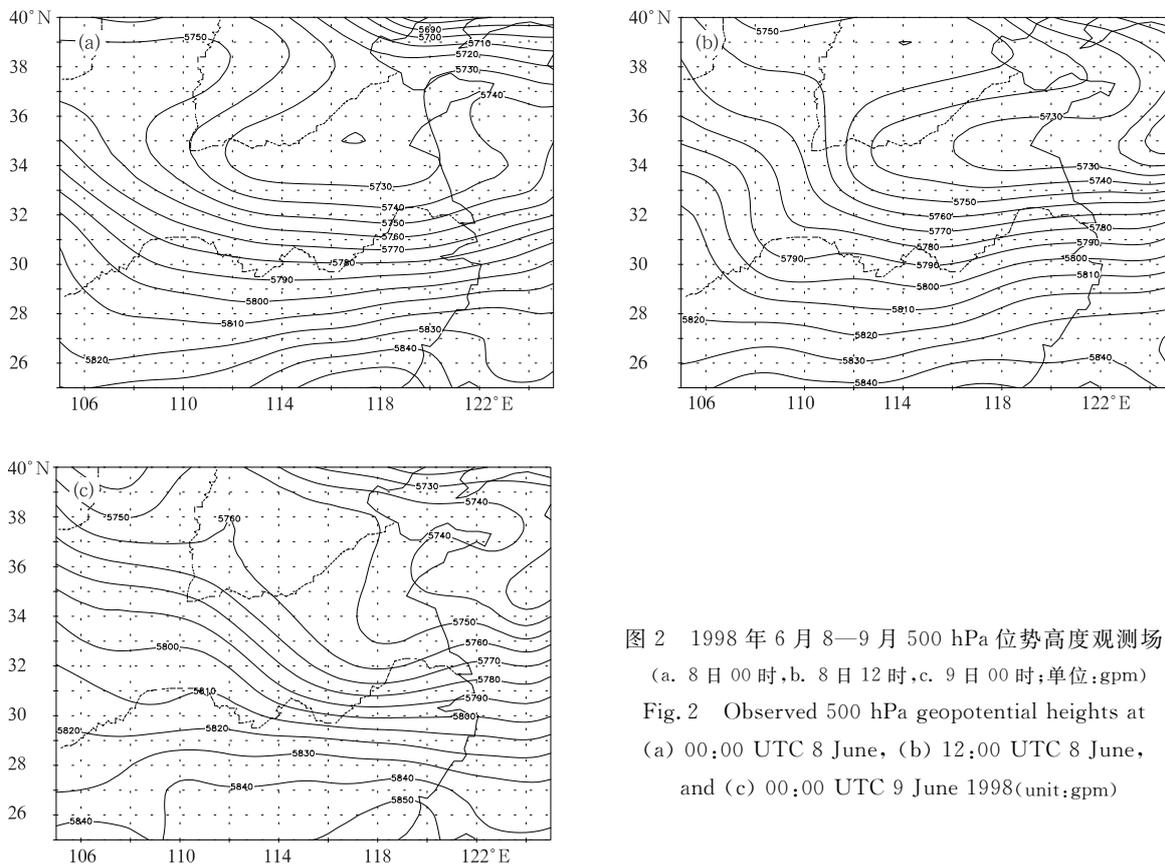


图2 1998年6月8—9日500 hPa位势高度观测场  
(a. 8日00时, b. 8日12时, c. 9日00时;单位:gpm)  
Fig. 2 Observed 500 hPa geopotential heights at  
(a) 00:00 UTC 8 June, (b) 12:00 UTC 8 June,  
and (c) 00:00 UTC 9 June 1998(unit:gpm)

从6月9日00时的500 hPa温度场上可以看到,同化前预报结果中冷中心仍存在模式预报区域中,预报区域西边的冷中心没有预报出来,暖脊的强度和范围偏弱,进行四维变分资料同化后,预报结果在这几方面更接近观测(图3)。在500 hPa位势高度场上,同化前的预报结果同样在东边界存在堆积,低压中心仍在模式区域内,四维变分资料同化后,对于黄河下游的脊线位置及整个位势场的强度预报,都有了明显的改善(图4)。四维变分资料同化后对风场的预报改善同样体现在对中低层气流的强度和方向预报上,明显好于同化前的预报(图略)。同化后对于湿度场的预报明显优于同化前的预报,在700 hPa湿度场上,观测场在山东半岛以南有一个干中心,同化前的预报结果没有该中心,而同化后的预报结果则预报了出来,只是位置偏南,中心强度大于观测场。长江以南的湿度场,变分同化前的预报偏弱,并存在一些扰动中心,而变分同化后的预报结果则与观测场基本一致(图5)。到预报时段结束时

刻,对降水场的预报也进行了比较(图6)。从9日00时24 h累积降水量的观测场上看有一降水区域中心(26.5°N, 119°E),强度达80 mm。在同化前的预报场上,降水区域位于(27°N, 112—118°E),中心位于(27°N, 113°E),中心强度达110 mm。变分同化后的降水预报范围则与观测场基本相同,而且降水中心的位置(28°N, 120°E),明显好于同化前。只是同化后降水中心的强度仍弱于观测场。变分同化后在海上还有一个强降水中心,由于没有观测,无法验证。

从个例1的四维变分资料同化效果来看,在最终预报结束时刻,进行四维变分同化后,REM模式对温度场、位势高度场、风场、湿度场和24 h累积降水量的预报效果相对于同化前都有明显改善,更加接近于实际观测场。在这个个例的数值试验中,可以认为四维变分资料同化发挥了有效的作用,使得数值模式在预报结束时刻的预报效果提高。

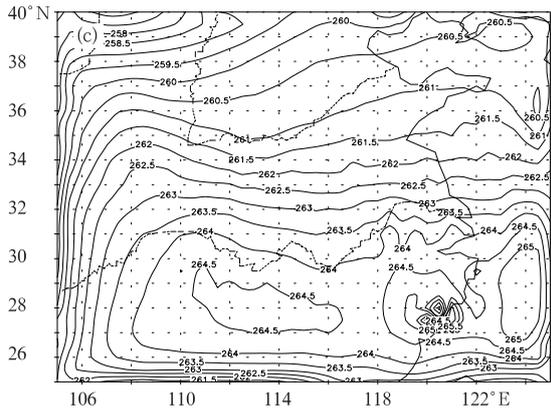
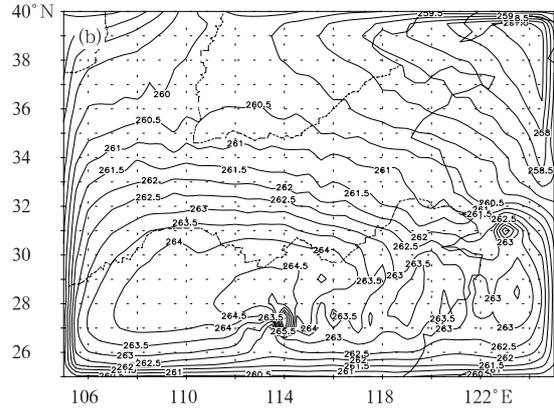
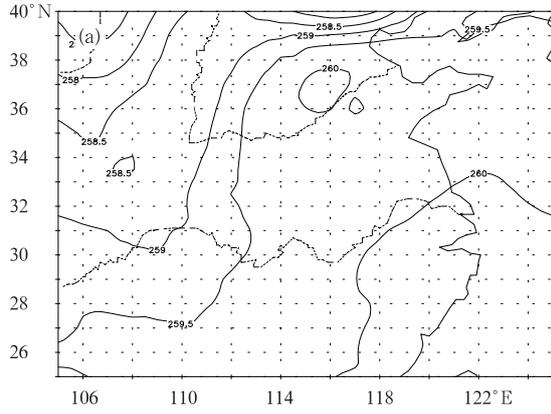


图3 1998年6月9日00时500 hPa温度场  
预报效果的比较

(a. 观测场, b. 同化前预报场, c. 同化后预报场;单位:K)

Fig. 3 Comparison of 500 hPa temperatures at  
00:00 UTC 9 June 1998

(a. observations, b. prediction before the 4D-Var,  
c. prediction after the 4D-Var; unit:K)

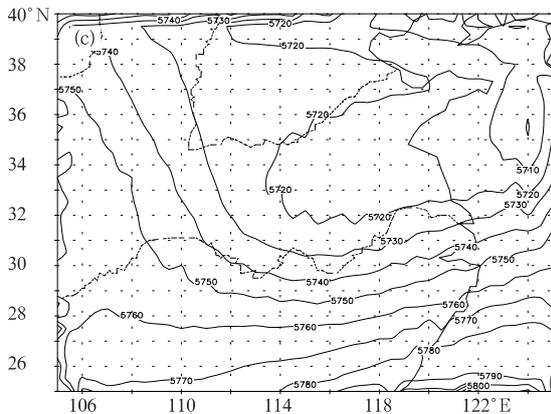
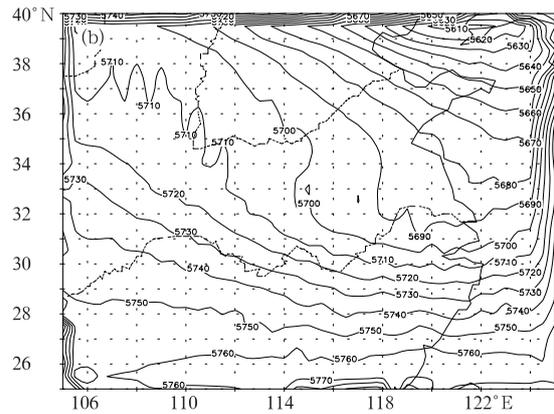
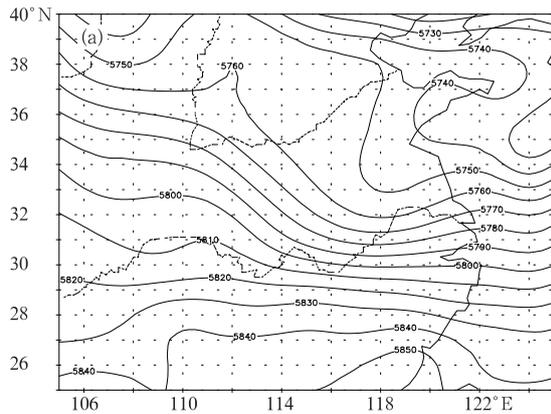


图4 1998年6月9日00时500 hPa位势高度场  
预报效果的比较

(a. 观测场, b. 同化前预报场, c. 同化后预报场;单位:gpm)

Fig. 4 Comparison of 500 hPa geopotential heights  
at 00:00 UTC 9 June 1998

(a. observations, b. prediction before the 4D-Var,  
c. prediction after the 4D-Var; unit:gpm)

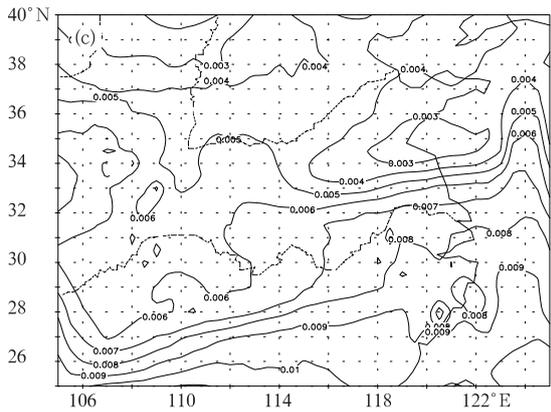
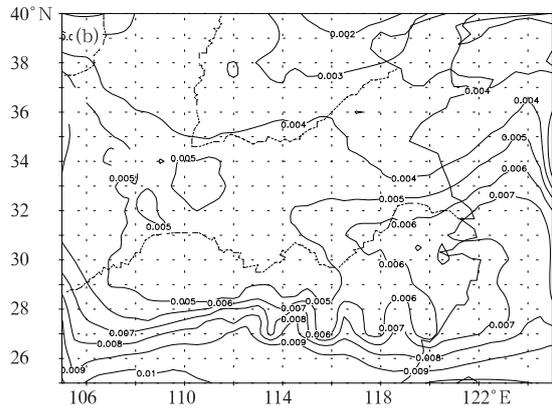
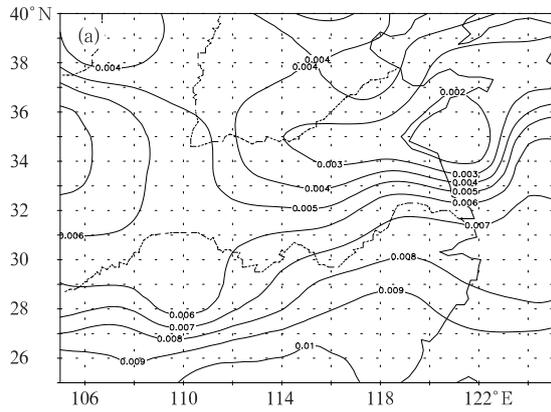


图5 1998年6月9日00时700 hPa湿度场  
预报效果的比较

(a. 观测场, b. 同化前预报场, c. 同化后预报场; 单位: kg/kg)

Fig. 5 Comparison of 700 hPa specific humidity  
at 00:00 UTC 9 June 1998

(a. observations, b. prediction before the 4D-Var,  
c. prediction after the 4D-Var; unit: kg/kg)

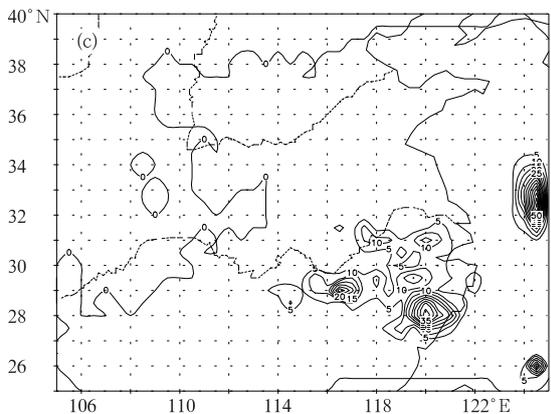
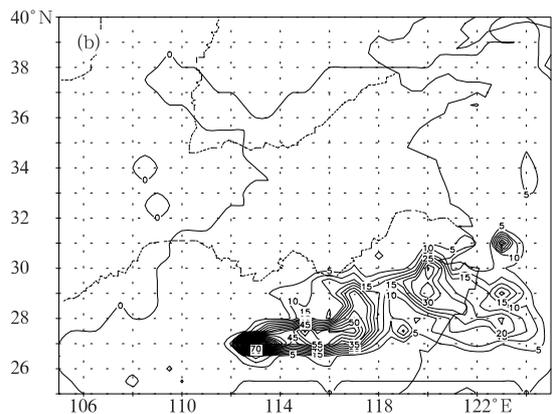
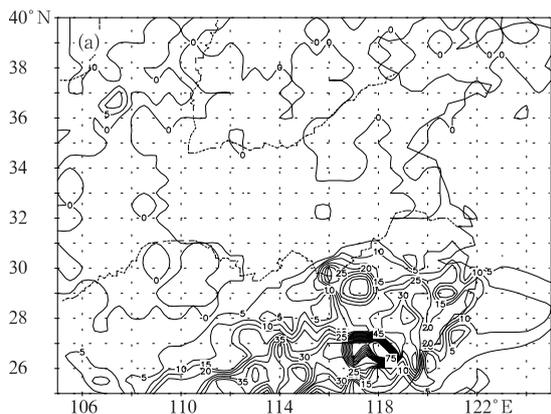


图6 1998年6月9日00时24 h累积降水量  
预报效果的比较

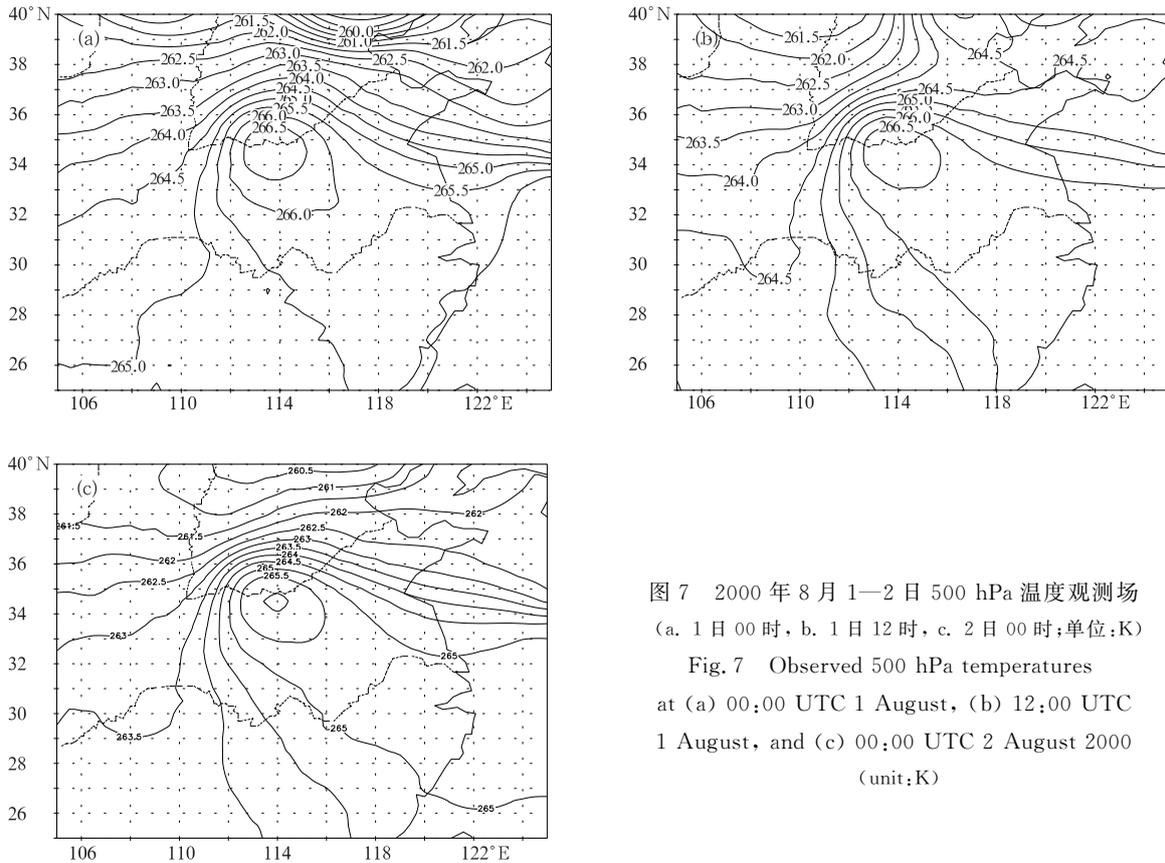
(a. 观测场, b. 同化前预报场, c. 同化后预报场; 单位: mm)

Fig. 6 Comparison of 24-h accumulated  
rainfalls at 00:00 UTC 9 June 1998

(a. observations, b. prediction before the 4D-Var,  
c. prediction after the 4D-Var; unit: mm)

### 3.2.2 个例 2

从 2000 年 8 月 1 日 00 时的 500 hPa 温度场上看, 中国大部分地区为一暖中心控制, 在河北和宁夏地区有一冷中心, 处于模式区域的北边界。到 1 日 12 时, 暖中心的强度和位置没有变化, 西北地区的冷中心加强东进, 东北地区的冷中心已经移出模式区域。到 2 日 00 时, 暖中心的强度和位置没有变化, 冷中心加强, 移到暖中心的东北面(图 7)。500



hPa 位势高度场上, 中国大部分地区为一高压脊控制, 东北和西北地区为两个低压系统。到 1 日 12 时, 控制中国大部分地区的高压脊向东移动, 西北地区的低压系统发展加强。到 2 日 00 时, 高压脊继续向东移动, 西北地区的低压系统发展东移(图 8)。

四维变分同化方法步骤同个例 1, 并在预报结束时间 8 月 2 日 00 时, 将同化前后的预报结果与观测场进行了比较。

图 7 2000 年 8 月 1—2 日 500 hPa 温度观测场  
(a. 1 日 00 时, b. 1 日 12 时, c. 2 日 00 时; 单位: K)

Fig. 7 Observed 500 hPa temperatures  
at (a) 00:00 UTC 1 August, (b) 12:00 UTC  
1 August, and (c) 00:00 UTC 2 August 2000  
(unit: K)

从 8 月 2 日 00 时 500 hPa 温度场上可以看到, 同化后的预报结果相对于同化前都略有提高, 提高不是非常大, 对于观测场上的暖中心, 同化前后都没有预报出来(图 9)。对位势高度场强度的预报结果明显优于同化前的预报, 在 500 hPa 位势高度场上, 四维变分资料同化后, 对于黄河下游的脊线位置及整个位势场的强度预报, 都明显好于同化前的预报, 但仍落后于观测场的位置(图 10)。同化后, 对 700 hPa 风场的预报比同化前要好, 与观测场基本一致(图略)。对于湿度场的预报比同化前有明显改善, 在 8 月 2 日 00 时 700 hPa 湿度观测场上, 山东和河南各有一个干中心, 同化前没有预报出该中

心, 并在长江以南产生一些湿中心, 同化后则预报出了这个干中心, 只是位置比观测略偏西, 对长江以南湿度场的预报也消除了不正确的湿度中心(图 11)。到预报结束时刻, 同样对降水场的预报也进行了比较, 在 2 日 00 时 24 h 累积降水量的观测场上看, 在浙江和四川各有一降水区域, 强度分别是 40 和 25 mm。在同化前的预报场上, 降水区域出现在山东半岛, 中心强度达 80 mm。变分同化后的降水预报出现在陕西, 中心强度为 40 mm。这个个例在进行四维变分资料同化后, 预报结束时刻 24 h 累积降水的预报并没有改善(图 12)。

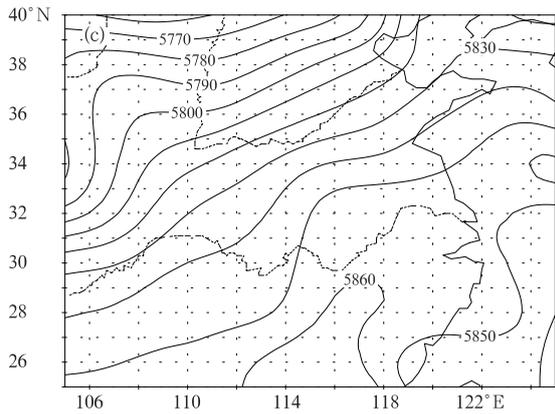
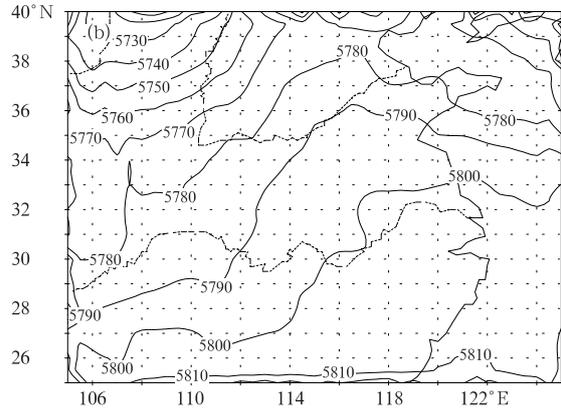
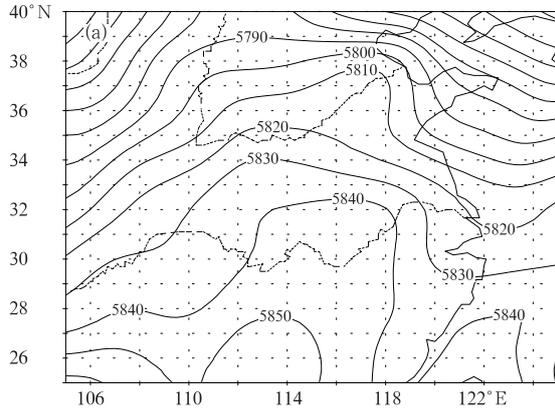


图8 2000年8月1—2日500 hPa位势高度观测场  
(a. 1日00时, b. 1日12时, c. 2日00时;单位:gpm)  
Fig. 8 Observed 500 hPa geopotential heights  
at (a) 00:00 UTC 1 August, (b) 12:00 UTC  
1 August, and (c) 00:00 UTC 2 August 2000  
(unit:gpm)

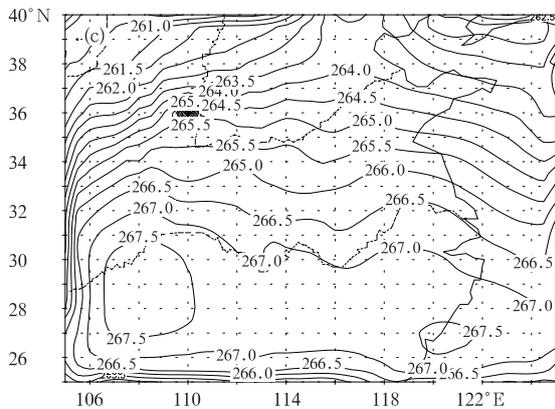
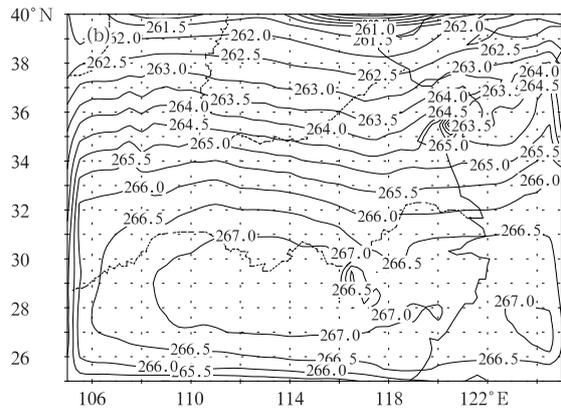
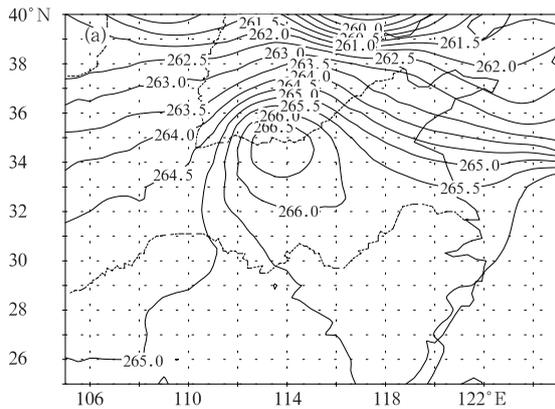


图9 2000年8月2日00时500 hPa温度场  
预报效果的比较  
(a. 观测场, b. 同化前预报场, c. 同化后预报场;单位:K)  
Fig. 9 Comparison of 500 hPa temperature  
at 00:00 UTC 2 August 2000  
(a. observations, b. prediction before the 4D-Var,  
c. prediction after the 4D-Var; unit:K)

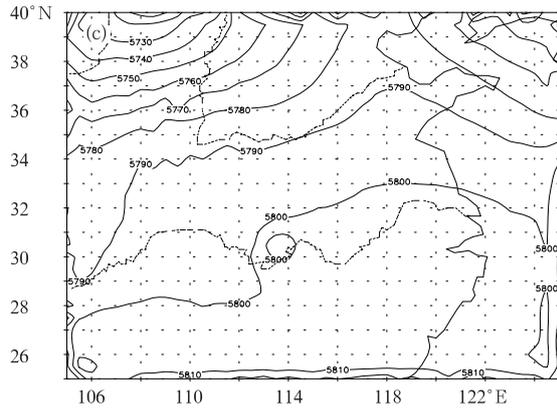
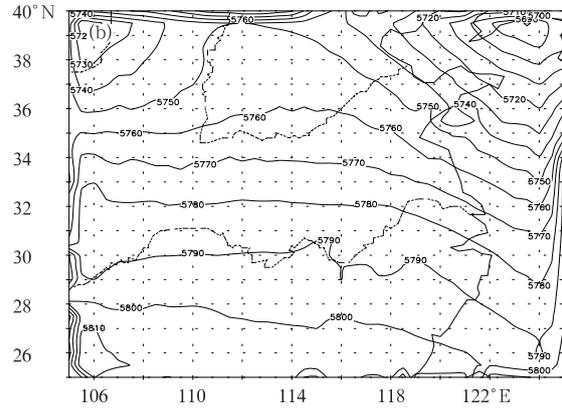
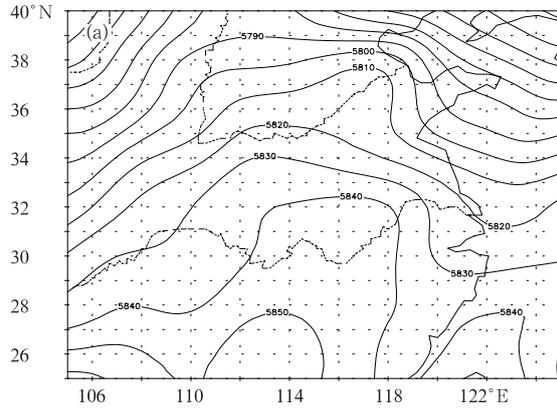


图 10 2000 年 8 月 2 日 00 时 500 hPa 位势高度场  
 预报效果的比较  
 (a. 观测场, b. 同化前预报场, c. 同化后预报场;单位:gpm)  
 Fig. 10 Comparison of 500 hPa geopotential height  
 at 00:00 UTC 2 August 2000  
 (a. observations, b. prediction before the 4D-Var,  
 c. prediction after the 4D-Var;unit:gpm)

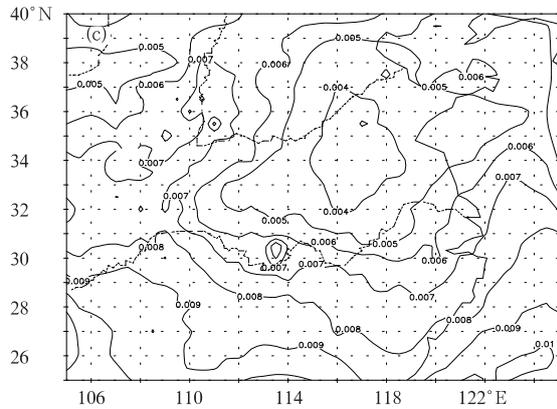
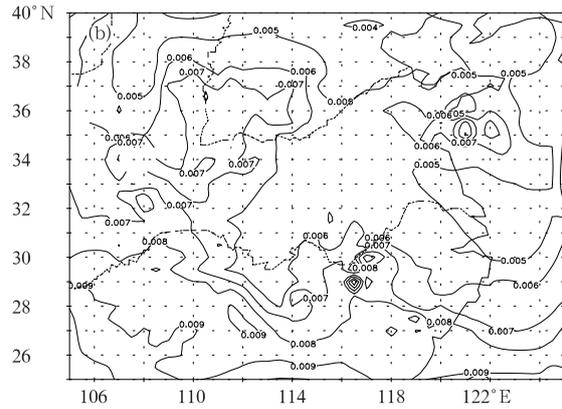
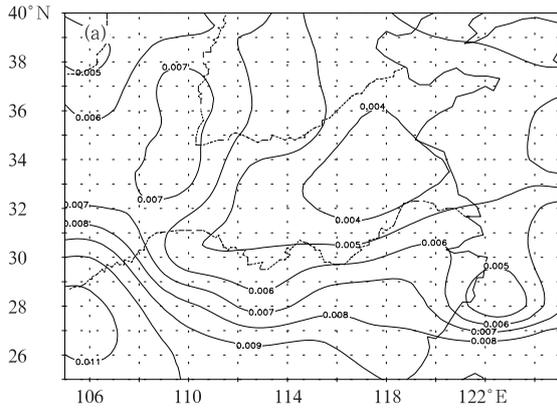


图 11 2000 年 8 月 2 日 00 时 700 hPa 湿度场  
 预报效果的比较  
 (a. 观测场, b. 同化前预报场, c. 同化后预报场;单位:kg/kg)  
 Fig. 11 Comparison of 700 hPa specific humidity  
 at 00:00 UTC 2 August 2000  
 (a. observations, b. prediction before the 4D-Var,  
 c. prediction after the 4D-Var;unit:kg/kg)

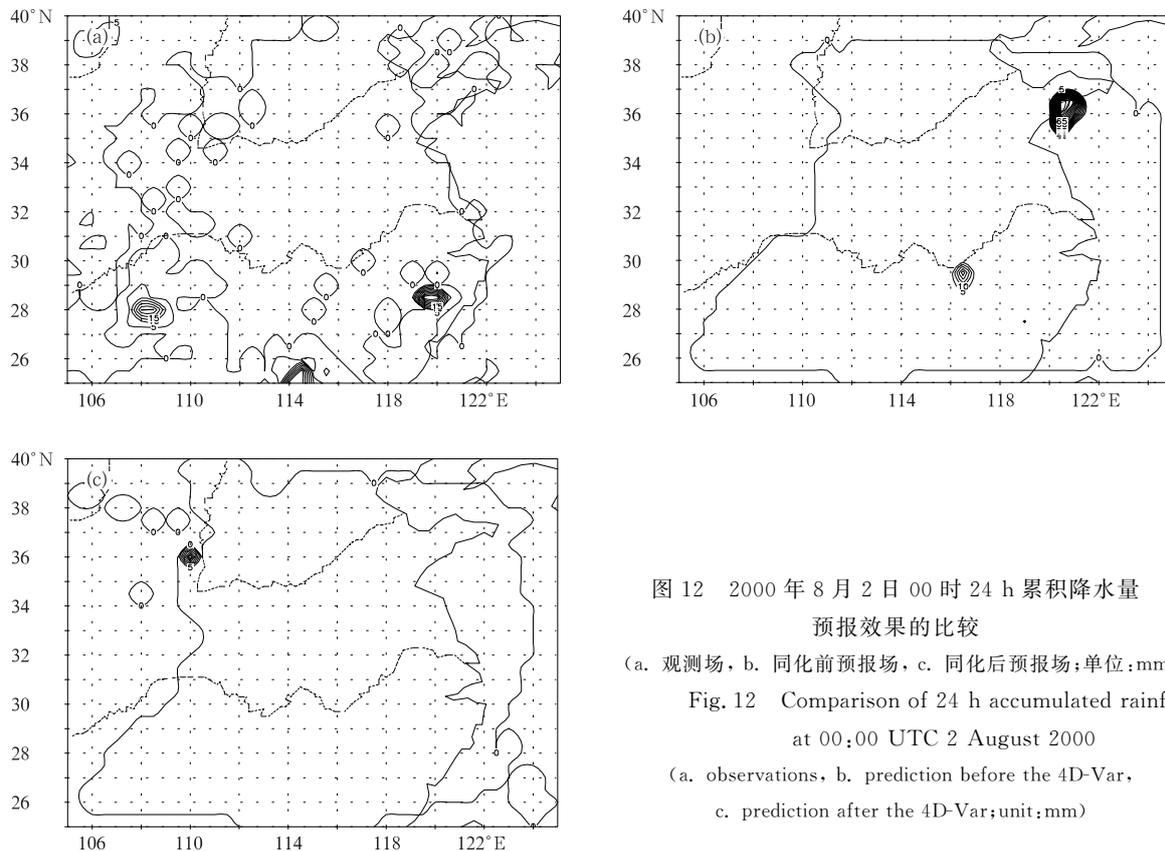


图 12 2000 年 8 月 2 日 00 时 24 h 累积降水量  
预报效果的比较

(a. 观测场, b. 同化前预报场, c. 同化后预报场; 单位: mm)

Fig. 12 Comparison of 24 h accumulated rainfalls  
at 00:00 UTC 2 August 2000

(a. observations, b. prediction before the 4D-Var,  
c. prediction after the 4D-Var; unit: mm)

从个例 2 四维变分资料同化前后的预报效果来看, 在最终预报结束时刻, 进行变分同化后的数值模式预报结果在温度场、位势高度场、风场、湿度场的预报效果相对于同化前略有提高。对于 24 h 累积降水量的预报相对于同化前则没有改善, 对降水中心的位置和强度没有作出准确预报。

这个试验中导致同化后预报效果没有改善的原因可能是: (1) 目标函数的构造偏于简单, 本试验是 REM 模式四维变分资料同化初步试验, 在目标函数中没有加入背景场项及重力波控制项; (2) 使用的观测资料在时间和空间分布上偏少, 目前只使用了两个时次的探空观测资料; (3) 本个例为中小尺度降水, REM 模式中对对流性降水物理过程的预报还需要改善, 数值模式本身存在误差时会对同化后的预报结果产生影响(王铁, 2006)。对于这个天气个例还需要在上述几个方面进一步进行数值试验。

#### 4 结 论

通过上面对两个实际天气个例的四维变分资料同化试验及延伸预报效果的比较, 可以得到以下

结论:

本文建立了 REM 模式的伴随系统, 并利用实际天气个例分别对 REM 模式的切线性模式、伴随模式及定义的目标函数梯度进行了正确性检验。从给出的各部分检验结果可以看到, 对 REM 模式的切线性模式及伴随模式编写是成功的。

通过对两个天气个例进行四维变分资料同化试验, 表明在最终预报结束时刻, 两个个例进行四维变分资料同化后的预报结果在风场和湿度场的预报上都有明显改善, 对温度场和高度场的预报也有所改善。对于累积降水的预报, 两个个例利用四维变分同化后的初始场进行的预报则有很大不同: 在个例 1 中, 变分同化后对降水中心的位置和降水强度的预报都有明显改善, 预报结果更接近于观测场; 个例 2 中, 变分同化后对降水中心位置和强度的预报则没有改善, 对于个例 2 还需要进一步研究。

本文进行的四维变分资料同化试验是初步的, 仍需要进一步作大量的天气个例实验。但结果表明, 进一步建立完整的 REM 四维变分资料同化系统是一项有意义、有价值的工作。

在将来的工作中,将考虑背景场的作用和各种非常规观测资料的使用,进而建立完整的 REM 模式四维变分同化系统,提高 REM 模式的预报技巧。

## References

- Bin Wang, Zou Xiaolei, Zhu Jiang. 2000. Data assimilation and its applications. *Proc Natl Acad Sci*, 97(21):11143-11144
- Courtier P. 1997. Dual formulation of four-dimensional variational assimilation. *Quart J Roy Meteor Soc*, 123: 2449-2461
- Ledimet F X, Talagrand O. 1986. Variational algorithms for analysis and assimilation of meteorological observations: theoretical aspects. *Tellus*, 38A: 97-110
- Lu Chungu, Browning, Gerald L. 2000. Four-dimensional variational data assimilation for limited-area models: lateral boundary conditions, solution uniqueness, and numerical convergence. *J Atmos Sci*, 57(9):1341-1353
- Marchuk G J. 1974. Numerical solution of the problem of the dynamics of the atmosphere and the ocean. *Gidrometeoizd at Leningrad*,
- Mu Mu, Wang Jiafeng. 2003. A method for adjoint variational data assimilation with physical "on-off" processes. *J Atmos Sci*, 60(16):2010-2018
- Mu Mu, Zheng Q. 2005. Zigzag oscillations in variational data assimilation with physical "on-off" processes. *Mon Wea Rev*, 133(9): 2711-2720
- Navon I M, Zou X, Derber J, et al. 1992. Variational data assimilation with an adiabatic version of the NMC spectral model. *Mon Wea Rev*, 120:1433-1446
- Wang Tie, Duan Wansuo, Zheng Qin. 2006. The effect of model errors on the 4D-Var and forecast of rainfall. *Climatic Environ Res (in Chinese)*, 11(5): 605-615
- Yu Rucong. 1994a. A test for numerical weather prediction of real-time for China flood season precipitation in 1993 by a regional  $\eta$  coordination model. *Scientia Atmospherica Sinica (in Chinese)*, 18(3):284-292
- Yu Rucong. 1994b. Real-time precipitation freacasting experiments in the summer China of 1994 by the LASG-REM. *Scientia Atmospherica Sinica (in Chinese)*, 18(Supp):801-809

## 附中文参考文献

- 王铁,段晚锁,郑琴. 2006. 数值模式误差对降水四维变分资料同化的影响. *气候与环境研究*, 11(5):605-615
- 宇如聪. 1994a. 一个  $\eta$  坐标有限区域数值预报模式对 1993 年中国汛期降水的实时预报试验. *大气科学*, 18(3):284-292
- 宇如聪. 1994b. LASG-REM 对 1994 年中国汛期的实时预报实验. *大气科学*, 18(增刊):801-809