

伴随系统及非线性优化方法在 REM 模式 可预报性研究中的实际个例应用

王铁^{1, 2} 穆穆¹

1 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

2 中国人民解放军理工大学气象学院, 南京 211101

摘 要 利用 REM 模式的伴随系统和非线性优化方法, 通过三个实际天气个例, 对 REM 模式的可预报性问题进行了研究。结果表明, REM 模式在给定的实际应用中可接受的预报误差范围内, 对三个天气个例都具有预报能力。对于个例一, 利用现有的常规报文初始观测场, 进行简单的插值处理 (最优插值等), REM 数值模式就可以得到比较满意的预报结果; 对于个例二和个例三, 对现有的报文初始观测场进行处理 (如四维变分资料同化) 后, REM 模式在给定的误差允许范围内, 对这两个天气个例仍得到满意的预报。研究结果不仅对改进数值模式具有一定的指导意义, 而且对如何改进数值模式的初值问题, 特别是在中尺度天气预报中如何改进具有一定的参考价值。

关键词 REM 模式 伴随系统 非线性优化 可预报性

文章编号 1006-9895 (2007) 05-0987-12

中图分类号 P456

文献标识码 A

The Application of the Adjoint Modeling System and Nonlinear Optimization Method in the Study of Predictability of the REM with Observational Data

WANG Tie^{1, 2} and MU Mu¹

1 National Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Science and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

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

Abstract For a meso-scale numerical model, how to evaluate the error in the numerical model and how to evaluate the error in the initial data? In order to perform the best prediction to a given synoptic system, what kind of initial data is suited to the numerical model? Those are the key problems in the study of the predictability. Recent studies indicate that the nonlinear optimization method, which uses the numerical model's adjoint modeling system, is a useful way to evaluate the error in the model and the initial data. With the nonlinear optimization method and the adjoint modeling system of the Regional Eta-coordinate Model (REM), a study of the predictability of REM is conducted using the daily observational data in this paper. Three numerical tests are performed, the results suggest that the REM can give an acceptable forecast with the allowed forecast errors in the three synoptic tests. The first test suggests that the REM can give a satisfactory simulation just using the initial data by interpolation (such as, the optimal interpolation method) from daily station data. The second and the third tests suggest that the REM can give a satis-

收稿日期 2006-03-23, 2006-06-15 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 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, 男, 1970 年出生, 博士, 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

factory simulation by using improved initial data (via the four-dimensional variational data assimilation method).

Key words the Regional Eta-coordinate Model (REM), adjoint modeling system, nonlinear optimization, predictability

1 引言

对于一个中尺度模式而言,如何评测该数值模式对某一天气过程是否具有预报能力?对数值模式是否存在模式误差作出评测?该数值模式需要什么样的初始场才能最好地预报出某一给定时刻的观测场?如何对数值模式初始场中存在的误差进行评测?以上这些问题是数值天气预报中可预报性研究的重要内容。Thompson^[1]和Lorenz^[2, 3]在可预报性问题方面进行了开创性的研究,其后,国内外的气象工作者在这一领域进行了不懈的努力。我国丑纪范^[4]、郜吉东等^[5]、范新岗等^[6]和穆穆等^[7~10]在这方面也做了许多有益的工作。穆穆等对非线性最快增长扰动与第一类可预报性问题进行了研究^[8],提出了数值天气预报与气候预测中可预报性问题的三类子问题,即:最大可预报时间、最大预报误差和初值与参数的最大允许误差^[9],还给出了使用非线性优化模式敏感性分析的思路^[10],但没有进行相应的数值试验。徐辉等^[11]在穆穆等^[9]的工作基础上,利用二维准地转模式,使用非线性优化与伴随方法进行了敏感性分析,用理想场对数值模式及初始场是否存在误差问题进行了研究。

目前,中小尺度数值模式得到不断发展和应用,最新的中尺度模式相继采用非静力平衡模式。Regional Eta-coordinate Model (REM 模式)^[12]是中国科学院大气物理研究所研制的中小尺度数值模式,虽然它是一个静力平衡模式,在暴雨业务预报中尤其是在中国范围内的暴雨业务预报中,显示出公认的良好预报技巧,国家重点基础研究发展规划项目(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 REM 中尺度模式及其伴随模式作为研究项目之一,开发了 REM 模式的伴随系统。本文在以上工作基础上,利用 REM 模式的伴随系统和非线性优化方法,通过实际天气个例对 REM 模式的可预报性问题进行了研究。

2 方法介绍

为了考查一个数值模式的预报能力及数值模式

本身与模式初始场中存在的误差,对于任一数值模式 M_t ,我们定义如下的目标函数^[9~11]:

$$J(\mathbf{X}_0) = \frac{1}{2} (M_{T_1}(\mathbf{X}_0) - \mathbf{X}_{oT_1})^T \mathbf{W}^{-1} \cdot (M_{T_1}(\mathbf{X}_0) - \mathbf{X}_{oT_1}), \quad (1)$$

其中,下标 0 代表初始时间,下标 T_1 为预报时间,下标 o 代表观测场, $\mathbf{X}_{oT_1}$ 为 T_1 时刻的观测场, $\mathbf{X}_0$ 为数值模式的初始场, $\mathbf{W}$ 为观测误差的协方差矩阵。

利用非线性优化理论求上述目标函数的极小值,其中会用到伴随模式的方法,可以求得 $J(\mathbf{X}_0)$ 的最小值和使得 $J(\mathbf{X}_0)$ 有最小值的初始场 $\mathbf{X}_0$ 。

假设目标函数的最小值为 E :

$$E = \min J(\mathbf{X}_0). \quad (2)$$

对于给定的一个预报误差允许范围 ϵ ,关于 E 有两种情况:

$$\begin{cases} E > \epsilon, \\ 0 \leq E \leq \epsilon. \end{cases} \quad (3)$$

2.1 第一种情况 $E > \epsilon$

对于第一种情况, E 大于所给定的允许误差,说明即使我们能够获得最优的数值模式的初始场,该数值模式也不能预报出实际观测场。换一种角度来说,就是无论我们怎么调节数值模式的初始场,都不能得到很好的预报结果。在这种情况下,说明数值模式本身的误差比较大,需要对该数值模式进行大的修改,比如,对模式中采用的物理过程进行完善,对模式中采用的各种参数进行调整,从而改进数值预报的效果,使预报结果达到最优。对数值模式中误差的研究可以通过常用的数值模拟的方法进行研究,也可以用伴随的方法来进行研究。

2.2 第二种情况 $0 \leq E \leq \epsilon$

对于第二种情况, E 满足我们给定的误差范围,说明该数值模式得到的预报结果与实际观测场比较接近,即该数值模式对 T_1 时刻的观测场有预报能力。从可预报性角度来讲,如果我们调节初始场,就能改进预报效果。这时,可以将求得的数值模式的最优初始场 $\mathbf{X}_{*0}$ 与初始时刻插值到网格点上的实际观测场 $\mathbf{X}_{o0}$ 作一比较,对二者的差异进行分

析。为便于比较, 将最优初始场与初始观测场之间差值的目标函数值记为 E_0 :

$$J(\mathbf{X}_0) = \frac{1}{2}(\mathbf{X}_{*0} - \mathbf{X}_{o0})^T \mathbf{W}^{-1}(\mathbf{X}_{*0} - \mathbf{X}_{o0}). \quad (4)$$

这时, 再给定一个初始观测场的最大允许误差 ϵ_0 , 又有以下三种情况:

$$E_0 \ll \epsilon_0, \quad (5.1)$$

$$E_0 \approx \epsilon_0, \quad (5.2)$$

$$E_0 \gg \epsilon_0. \quad (5.3)$$

2.2.1 初始观测场 $\mathbf{X}_{o0}$ 的误差比较小

如果初始时刻观测场 $\mathbf{X}_{o0}$ 的误差比较小 (如加密观测试验资料), 则可以利用初始观测场, 基于上面三种情况对数值模式的准确性进行评测。

(1) 对于 (5.1) 式, 说明所使用的数值模式是比较准确的。利用现有的观测资料, 该模式完全有能力对这一天气过程进行预报。

(2) 对于 (5.2) 式, 说明所使用的数值模式存在一定的模式误差。这时可以在误差允许范围内对模式初始场进行一些调整, 从而使这一天气过程可以达到比较满意的预报效果。

(3) 对于 (5.3) 式, 说明所使用的数值模式中存在的误差比较大。这时利用该数值模式进行预报时, 虽然能够通过调节模式初始场而对这一天气个例得到满意的预报效果, 但是需要利用偏离真实场比较大的数值模式初始场进行预报才能得到。这时, 应该对数值模式进行修正。

2.2.2 数值模式误差比较小

如果使用的数值模式误差比较小, 这时, 可以通过上面三种情况对初始时刻的观测场 $\mathbf{X}_{o0}$ 进行评测。

(1) 对于 (5.1) 式, 说明现有的初始观测资料是比较可信赖的, 从现有的观测资料进行简单的插值, 该模式就可以得到比较理想的预报结果。

(2) 对于 (5.2) 式, 说明现有的初始观测资料存在一定误差, 从现有的观测资料还不能得到比较理想的预报结果, 如果改进该数值模式的初始场, 例如, 对该数值模式的初始场进行四维变分资料同化处理, 该模式则可以得到比较理想的预报结果。

(3) 对于 (5.3) 式, 说明现有的初始观测资料存在比较大的误差, 还需要对现有的观测资料进行很大的改进。可能是初始场的信息太少, 从现有的观测资料和观测手段还不能反映出中小尺度天气过

程的变化。需要对现有的观测网进行加密, 得到更加详细的观测资料; 或者增加观测时效, 缩短资料的观测周期; 增加新的观测手段, 获得新的观测信息。

3 利用 REM 模式进行个例试验

下面, 利用 REM 模式的伴随模式和非线性优化方法, 使用实际报文资料, 对 REM 模式的可预报性问题进行实际个例的试验研究。

3.1 目标函数的选取

取目标函数如以下形式:

$$J(\mathbf{X}_0) = \frac{1}{2}(M_{T_a}(\mathbf{X}_0) - \mathbf{X}_{oT_a})^T \cdot \mathbf{W}^{-1}(M_{T_a}(\mathbf{X}_0) - \mathbf{X}_{oT_a}), \quad (6)$$

其中, M_i 代表采用的数值模式 REM, $\mathbf{X}$ 代表气象上通常的物理量场, 下标 0 代表初始时刻, 下标 T_a 代表最终预报时刻, 下标 o 代表插值到模式格点上的观测场。在 REM 模式中, 基本变量有五个, 温度场 (T)、水平风场 (U 、 V)、水汽场 (Q) 和地面气压场 (p_s)。 $\mathbf{W}$ 代表数值模式预报场与观测场之间差值的协方差矩阵。

3.2 预报误差允许范围 ϵ

对于衡量数值预报模式预报能力的标准, 目前还没有一个统一的定量标准, 本文采用美国海军评测数值模式预报准确性时使用的标准^[13], 该标准中没有给出水汽场的误差允许标准, 本文取为水汽观测场的 10% (如表 1)。

根据表 1 给出的数值模式预报误差允许标准和最终预报时刻的实际观测场, 针对不同天气个例, 在最终预报时刻 T_a , 可以得到相应的预报误差允许标准 $\Delta\mathbf{X}$, $\mathbf{X}$ 代表 REM 模式的五个基本变量。

为便于与目标函数 E 进行比较, 使用 $\Delta\mathbf{X}$ 和数值模式预报场与观测场之间差值的协方差矩阵 $\mathbf{W}$, 计算出误差允许范围 ϵ :

表 1 数值模式预报误差允许标准
Table 1 The allowed forecast error

模式变量	误差允许标准
温度场 T	2.0℃
速度场 U 、 V	
当 U 、 V < 10 m/s	1 m/s
当 U 、 V ≥ 10 m/s	2.5 m/s
地面气压场	1.7 hPa
水汽场 Q	0.1 Q_0

$$\epsilon = \frac{1}{2}(\Delta\mathbf{X})^T\mathbf{W}^{-1}(\Delta\mathbf{X}). \tag{7}$$

3.3 初始观测场误差允许范围 ϵ_0

在参考数值模式预报误差允许标准^[13]和观测误差允许标准^[14]的基础上,考虑初始观测场误差允许标准不应该大于模式预报误差允许标准,将表1中温度场和地面气压场的允许标准作了修改(如表2)。

根据表2给出的初始观测场误差允许标准和初始预报时刻的实际观测场,针对不同天气个例,在初始预报时刻 T_0 ,可以得到相应的初始观测场误差允许标准 $\Delta\mathbf{X}_0$ 、 $\mathbf{X}_0$ 代表 REM 模式的五个基本变量。

同样,为便于同最优初始场与实始观测场差值 E_0 进行比较,使用 $\Delta\mathbf{X}_0$ 和数值模式预报场与观测场之间差值的协方差矩阵 $\mathbf{W}$,计算出初始观测场误差允许范围 ϵ_0 :

$$\epsilon_0 = \frac{1}{2}(\Delta\mathbf{X}_0)^T\mathbf{W}^{-1}(\Delta\mathbf{X}_0). \tag{8}$$

3.4 试验设计

本试验的主要目的是利用 REM 模式的伴随模式和非线性优化方法,使用实际报文观测资料,对数值模式的预报能力,数值模式中存在的误差及初始观测场中的误差进行判断。

REM 模式水平格点取为 (41, 61), 水平格距取为 0.5° , 模式区域的左上角经纬度取为 (40°N , 105°E)。垂直 η 层取为 20 层,为均匀分布。试验所采用的观测观资料是实际报文资料,观测时次为每天 00 时和 12 时(国际协调时,下同)两个时次。试验所采用的个例为 2000 年 8 月 6 日 00~12 时、2000 年 8 月 8 日 00~12 时和 2002 年 6 月 24 日 00~12 时三个天气个例。

试验中,参考了 Navon 等^[15]工作中的方法,利用 12 时的实际观测场和 06 时的 REM 模式预报

场计算了数值模式预报场与观测场之间差值的协方差矩阵 $\mathbf{W}$ 和量纲矩阵 $\mathbf{S}$ 。试验中采用的非线性优化程序为 L-BFGS-B。

首先,利用 REM 模式的伴随模式及非线性优化方法,求出使得目标函数(6)有极小值时的模式初始场 $\mathbf{X}_{*0}$,并计算这时的目标函数值 E 。将 E 与给定的预报误差允许范围 ϵ 进行比较。

然后,再将通过非线性优化获得的数值模式初始场 $\mathbf{X}_{*0}$ 与初始观测场 $\mathbf{X}_{00}$ 进行比较,计算出 E_0 。将 E_0 与给定的初始场允许误差 ϵ_0 进行比较,对观测场或数值模式中存在的误差进行简单判断。

3.5 数值试验

3.5.1 个例一

2000 年 8 月 6 日 00~12 时的天气个例:首先利用 12 时的观测资料,利用 REM 模式的伴随模式及非线性优化方法对定义的目标函数(6)式进行了优化,找到使得目标函数有极小值时的模式初始场 $\mathbf{X}_{*0}$,并计算出目标函数极小值 E 。再根据表2和公式(7),计算了该个例在 12 时预报误差允许范围 ϵ 。二者的对比如表3。

从表3可以看到,进行非线性优化后,目标函数的极小值 E 小于给定的误差允许范围 ϵ ,属于理论分析中的第二种情况,REM 模式对这个天气个例具有预报能力。

图1给出了2000年8月6日12时利用实际报文资料得到的观测场与 REM 模式利用非线性优化后得到的模式初始场作出的预报场。在 500 hPa 温度场(图1a、d)上,进行非线性优化后 REM 模式对河北北部的冷中心和中国中部的暖区作出了正确预报,在 500 hPa 风场(图1b、e)上,预报场与观测场的流场基本相同,在 700 hPa 湿度场(图1c、f)上,对湿中心也给出了比较准确的预报。可以认为进行非线性优化后,REM 模式对这个个例具有预报能力。

表 3 目标函数极小值与预报误差允许范围

Table 3 The minimum of cost function (E) and allowed forecast error (ϵ)

个例	E	ϵ
2000-08-06T1200 UTC	5321.218917361186	13346.06810086604
2000-08-08T1200 UTC	3762.698499101452	7523.913339624445
2002-06-24T1200 UTC	2031.928214990503	4522.652186408853

表 2 初始观测场误差允许标准

Table 2 The allowed initial data error

模式变量	误差允许标准
温度场 T	1.0°C
速度场 U 、 V	
当 U 、 $V < 10\text{ m/s}$	1 m/s
当 U 、 $V \geq 10\text{ m/s}$	2.5 m/s
地面气压场	1.5 hPa
水汽场 Q	$0.1Q_0$

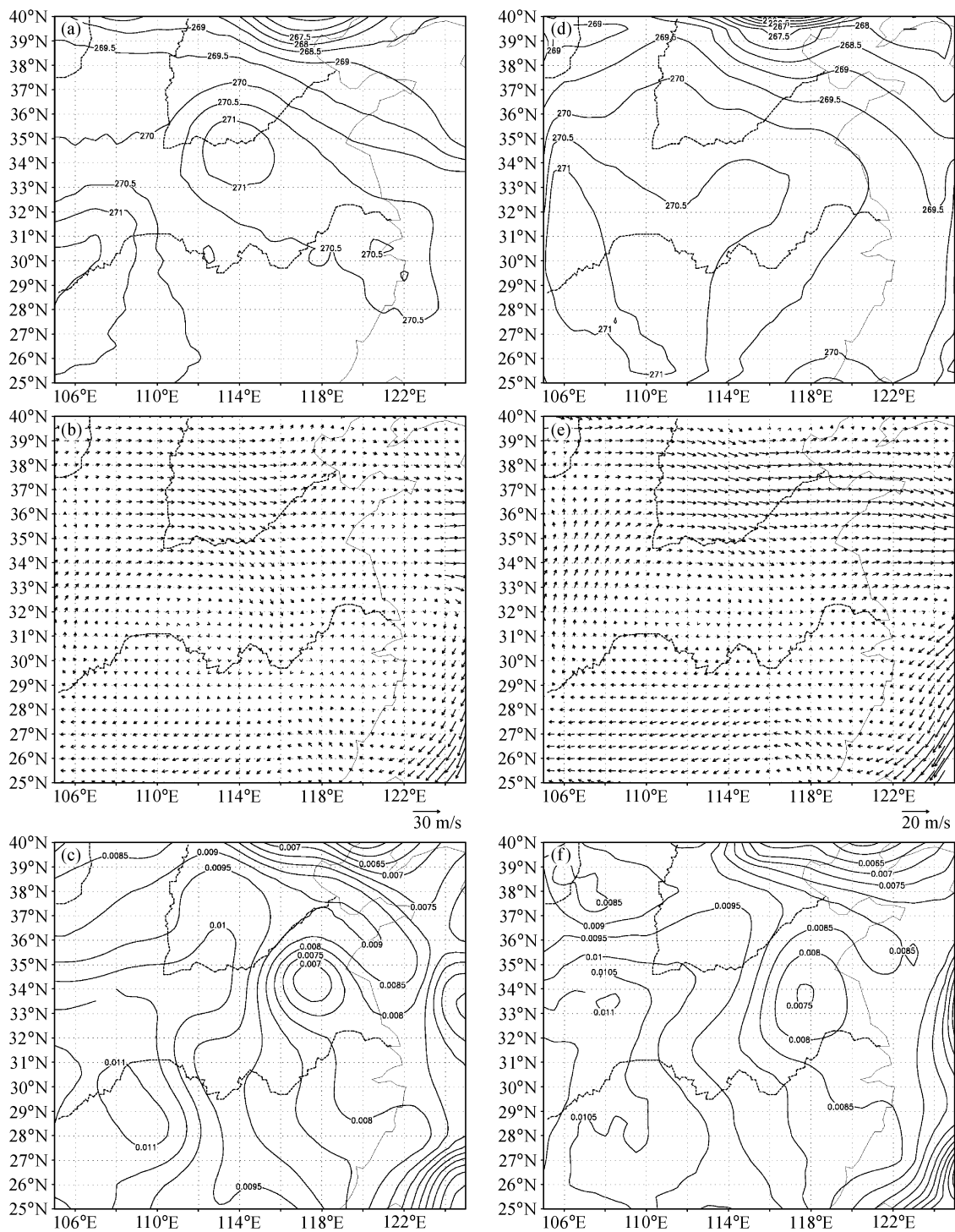


图1 2000年8月6日12时的观测场(a~c)及由优化后的初始场作出的预报场(d~f): (a, d) 500 hPa 温度场(单位: K); (b, e) 500 hPa 风场; (c, f) 700 hPa 湿度场(单位: g/g)

Fig. 1 The observations (a~c) and the forecast results of REM with the optimal initial fields (d~f) at 1200 UTC 6 Aug 2000: (a, d) 500 hPa temperature (K); (b, e) 500 hPa wind field; (c, f) 700 hPa specific humidity (g/g)

下面, 将非线性优化得到的最优初始场 $\mathbf{X}_{*0}$ 与 00 时的观测场 $\mathbf{X}_{o0}$ 进行比较。首先, 计算出最优初始场与初始观测场差值 E_0 , 再根据表 3 和公式 (8), 计

算该个例在 00 时的初始观测场误差允许范围 ϵ_0 , E_0 和 ϵ_0 的对比如表 4。

从表 4 可以看到, 00 时最优初始场和初始观测

表 4 最优初始场和初始观测场的差值与初始观测场误差允许范围

Table 4 The differences (E_0) between the optimal initial data and the observational initial data and the allowed error of initial data (ϵ_0)

个例	E_0	ϵ_0
2000-08-06T0000 UTC	1505.738672351934	5126.974628234686
2000-08-08T0000 UTC	2378.578463834010	2969.320741242575
2002-06-24T0000 UTC	2579.281718071818	2272.360491166645

场之间的差值 E_0 明显小于给定的误差范围 ϵ_0 , 属于第二种情况下的(5.1)式。可以认为, 对于这个天气个例, 利用现有的数值模式和现有的观测场, 只要对观测场进行简单的插值处理, 如 REM 模式目前采用的最优插值处理, 该模式就能够得到比较理想的预报效果。

图 2 给出了 2000 年 8 月 6 日 00 时利用实际报文资料得到的观测场和利用非线性优化后得到的模式初始场, 从图上可以看到, 在 500 hPa 温度场(图 2a、d)上, 优化后的初始场与观测场的暖中心位置基本相同, 优化后初始场强度略强; 500 hPa 风场(图 2b、e)上, 二者的流场形势基本相同; 在 700 hPa 湿度场(图 2c、f)上, 山东半岛以南的干中心及一直伸向山西地区的湿度脊也与观测场一致。可以认为, 利用非线性优化得到的模式初始场与初始观测场非常接近。

3.5.2 个例二

2000 年 8 月 8 日 00~12 时的天气个例: 试验步骤同个例一, 利用 REM 模式的伴随模式及非线性优化方法找到使得目标函数(6)式有极小值时的模式初始场 $\mathbf{X}_{*0}$, 计算出目标函数的极小值 E 与允许预报误差范围 ϵ , 二者的对比如表 3, 可以看到, 进行非线性优化后, 目标函数的极小值 E 小于给定的误差允许范围 ϵ , 属于理论分析中的第二种情况, REM 模式对这个天气个例具有预报能力。

图 3 给出了 2000 年 8 月 8 日 12 时利用实际报文资料得到的观测场和 REM 模式利用非线性优化后的模式初始场作出的预报场。从图的对比可以看到, 优化后的预报场在 500 hPa 温度场(图 3a、d)上对中国大部的暖区给出了正确预报; 在 500 hPa 流场(图 3b、e)上, 对河套地区的气旋流场及黄海地区的反气旋流场都给出了正确预报; 在 700 hPa 湿度场(图 3c、f)上, 对于黄河中游的湿中心及陕西地区的

干中心也给出了准确的预报。从以上的对比结果来看, 认为进行非线性优化后 REM 模式对这个个例具有预报能力。

下面, 将非线性优化得到的最优初始场 $\mathbf{X}_{*0}$ 与 00 时的观测场 $\mathbf{X}_{00}$ 进行比较。计算出最优初始场与初始观测场的差值 E_0 和 00 时的初始观测场误差允许范围 ϵ_0 , E_0 和 ϵ_0 的对比如表 4, 可以看到, 00 时最优初始场和观测场之间的差值 E_0 与给定的允许误差范围 ϵ_0 相当, 略小于给定的误差范围, 属于第二种情况下的(5.2)式。对于这个天气个例, 若想利用 REM 模式得到改善的预报结果, 需要对 REM 数值模式进行修正或者对初始观测场进行处理, 如进行四维变分资料同化。

图 4 给出了 2000 年 8 月 8 日 00 时利用实际报文资料得到的场观测场和利用非线性优化后得到的模式初始场。从图的对比来看, 初始时刻的观测场与优化得到的模式初始场在 500 hPa 温度场(图 4a、d)和 500 hPa 流场(图 4b、e)上有一定差别, 在 700 hPa 湿度场(图 4c、f)上二者基本相同。

3.5.3 个例三

2002 年 6 月 24 日 00~12 时的天气个例。分析方法同前两个个例, 目标函数的极小值 E 与允许预报误差范围 ϵ 二者的对比如表 3, 可以看到, 进行非线性优化后, 目标函数的极小值 E 小于给定的误差允许范围 ϵ , REM 模式对这个天气个例具有预报能力。

图 5 给出了 2002 年 6 月 24 日 12 时利用实际报文资料得到的观测场和 REM 模式利用非线性优化后得到的模式初始场作出预报场。在这组图上可以看到, 在 500 hPa 温度场(图 5a、d)上, 优化后对河北到山西的温度冷槽的位置预报结果与观测场基本相同, 在 500 hPa 风场(图 5b、e)上预报结果与观测场的流场也基本相同, 在 700 hPa 湿度场(图 5c、f)上, 优化后的预报结果对黄河中下游的两个干中心也给出了准确预报。可见, REM 模式对这个天气个例具有预报能力。

下面, 将最优初始场与初始观测场差值 E_0 和 00 时的初始观测场误差允许范围 ϵ_0 进行比较, 对比结果如表 4, 可以看到, 00 时最优初始场和观测场之间的差值 E_0 与给定的初始观测场允许误差范围 ϵ_0 相当, 略大于给定的误差范围, 同样属于第二种情况的(5.2)式。对于这个天气个例, 若想 REM 模式得到改善的预报结果, 需要对现有的初始观测

模式初始场。从这组图上可以看到, 在 500 hPa 温度场 (图 6a、d) 上观测场与最优初始场基本相同, 500 hPa 风场 (图 6b、e) 上观测场的流场与最优初

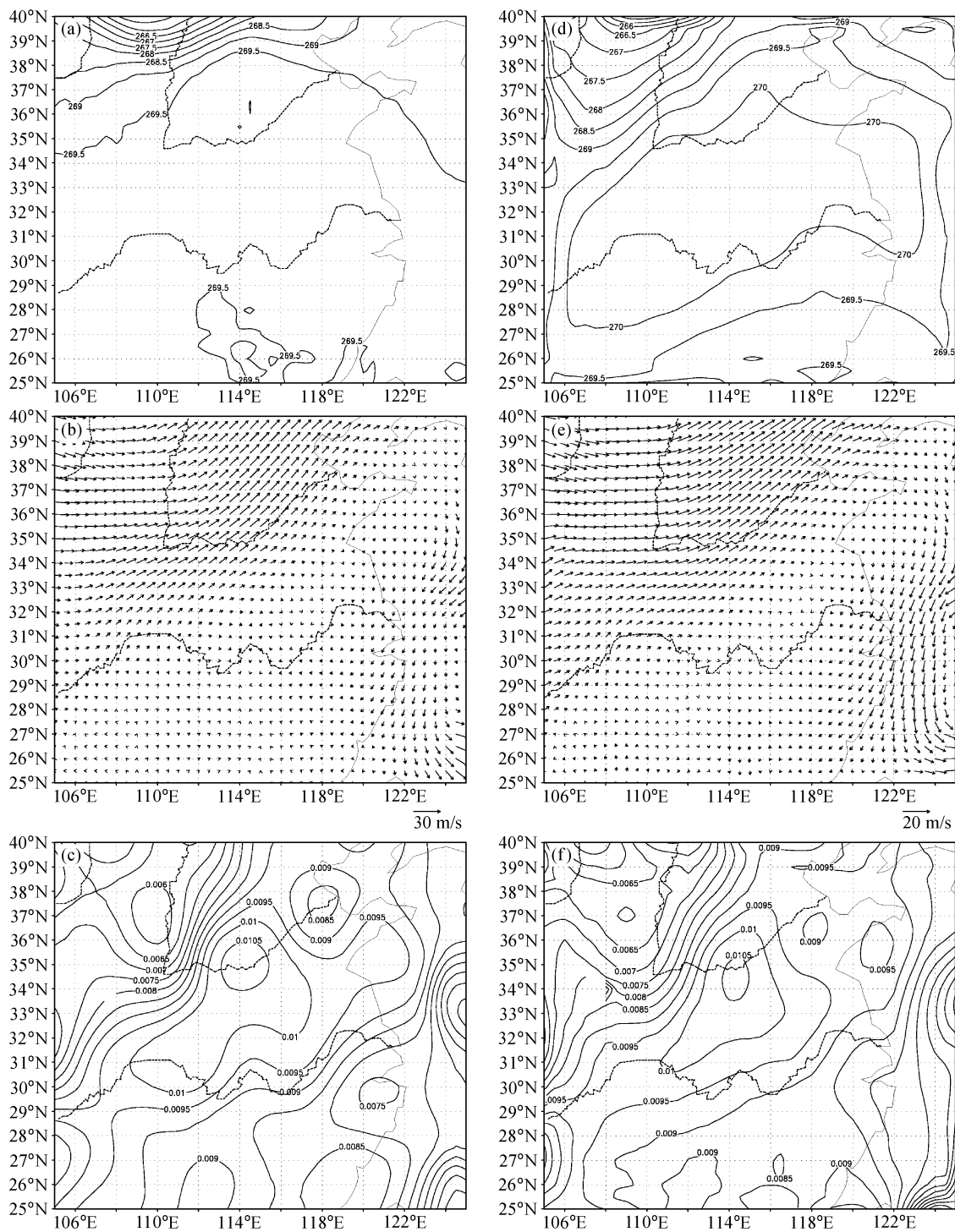


图3 2000年8月8日12时的观测场(a~c)及由优化后的初始场作出的预报场(d~f): (a, d) 500 hPa 温度场(单位: K); (b, e) 500 hPa 风场; (c, f) 700 hPa 湿度场(单位: g/g)

Fig. 3 The observations (a~c) and the forecast results of REM with the optimal initial fields (d~f) at 1200 UTC 8 Aug 2000: (a, d) 500 hPa temperature (K); (b, e) 500 hPa wind field; (c, f) 700 hPa specific humidity (g/g)

始场大致相同,在700 hPa 湿度场(图6c、f)上观测场与最优初始场略有区别,西北及河套地区的干中心观测场略有差别。

4 讨论

本文在穆穆等^[10]和徐辉等^[11]的工作基础之上,

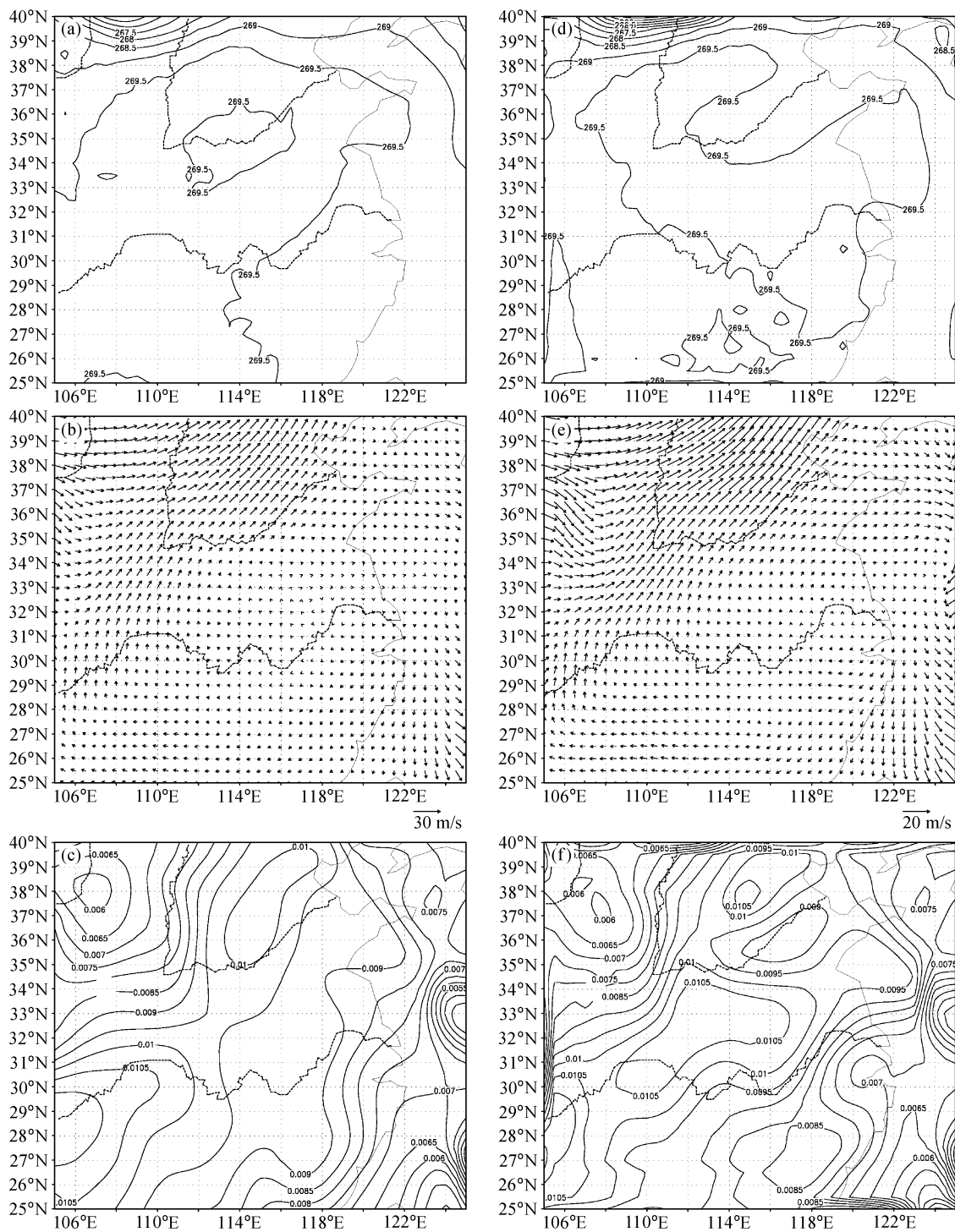


图 4 2000 年 8 月 8 日 00 时的观测场 (a~c) 及优化后的初始场 (d~f): (a, d) 500 hPa 温度场 (单位: K); (b, e) 500 hPa 风场; (c, f) 700 hPa 湿度场 (单位: g/g)

Fig. 4 The observations (a~c) and the optimal initial fields (d~f) at 0000 UTC 8 Aug 2000: (a, d) 500 hPa temperature (K); (b, e) 500 hPa wind field; (c, f) 700 hPa specific humidity (g/g)

介绍了如何利用非线性优化方法和伴随模式方法, 对数值模式误差及模式初始场误差进行定性和定量的判断。然后, 利用 REM 模式的伴随系统, 通过

三个实际天气个例的观测资料, 使用非线性优化方法进行了试验分析。

从上面三个个例的试验可以得到以下结论:

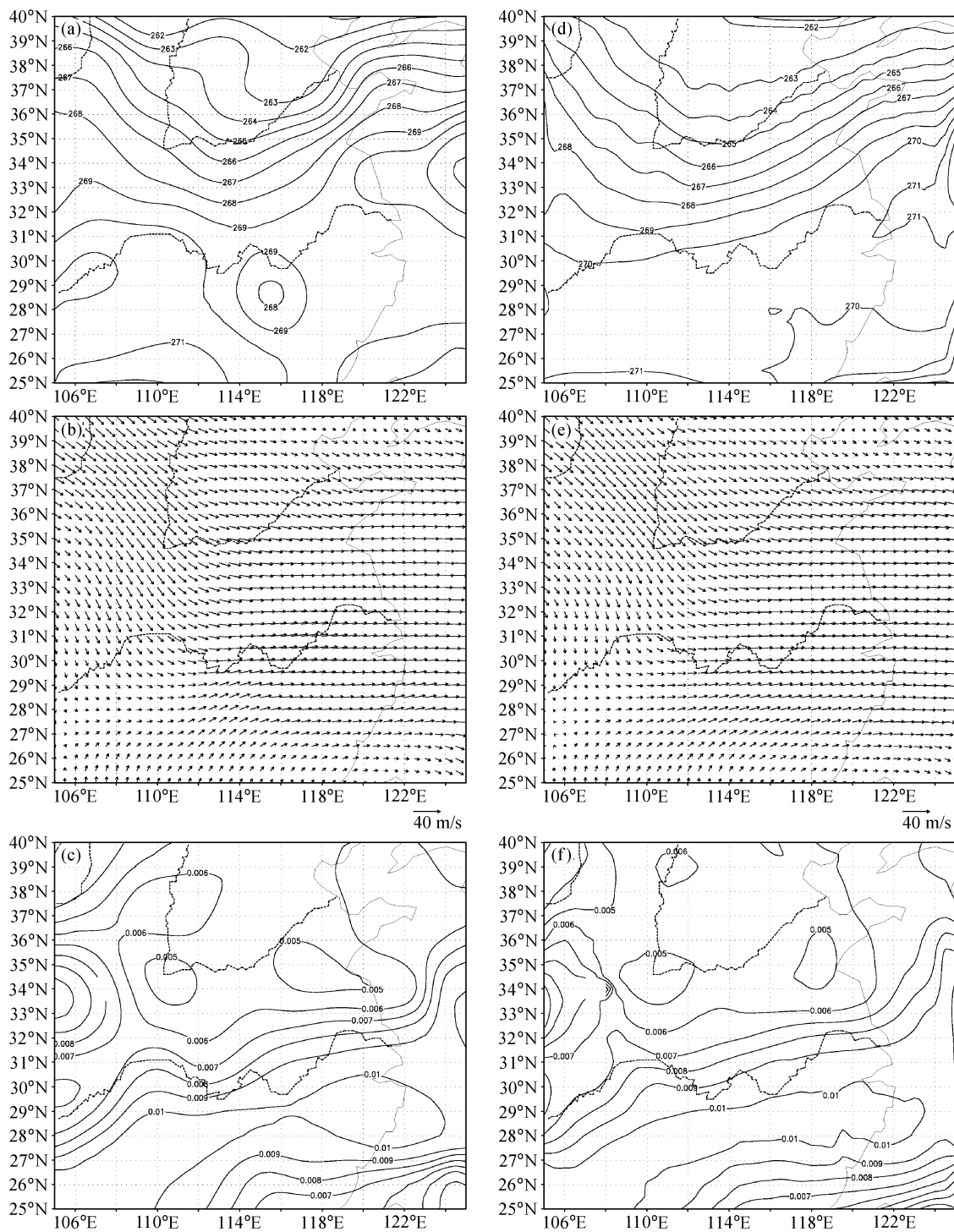


图5 2002年6月24日12时的观测场(a~c)及由优化后的初始场作出的预报场(d~f): (a, d) 500 hPa温度场(单位: K); (b, e) 500 hPa风场; (c, f) 700 hPa湿度场(单位: g/g)

Fig. 5 The observations (a~c) and the forecast results of REM with the optimal initial fields (d~f) at 1200 UTC 24 Jun 2002: (a, d) 500 hPa temperature (K); (b, e) 500 hPa wind field; (c, f) 700 hPa specific humidity (g/g)

(1) 利用非线性优化及伴随方法来检验数值模式的可预报性问题是一种有效的方法; (2) REM模式对这三个天气个例在给定的可接受的预报误差范围

内,都具有预报能力。对于个例一,利用REM数值模式和现有的常规报元初始观测场,进行简单的插值处理(最优插值等)就可以得到比较满意的预

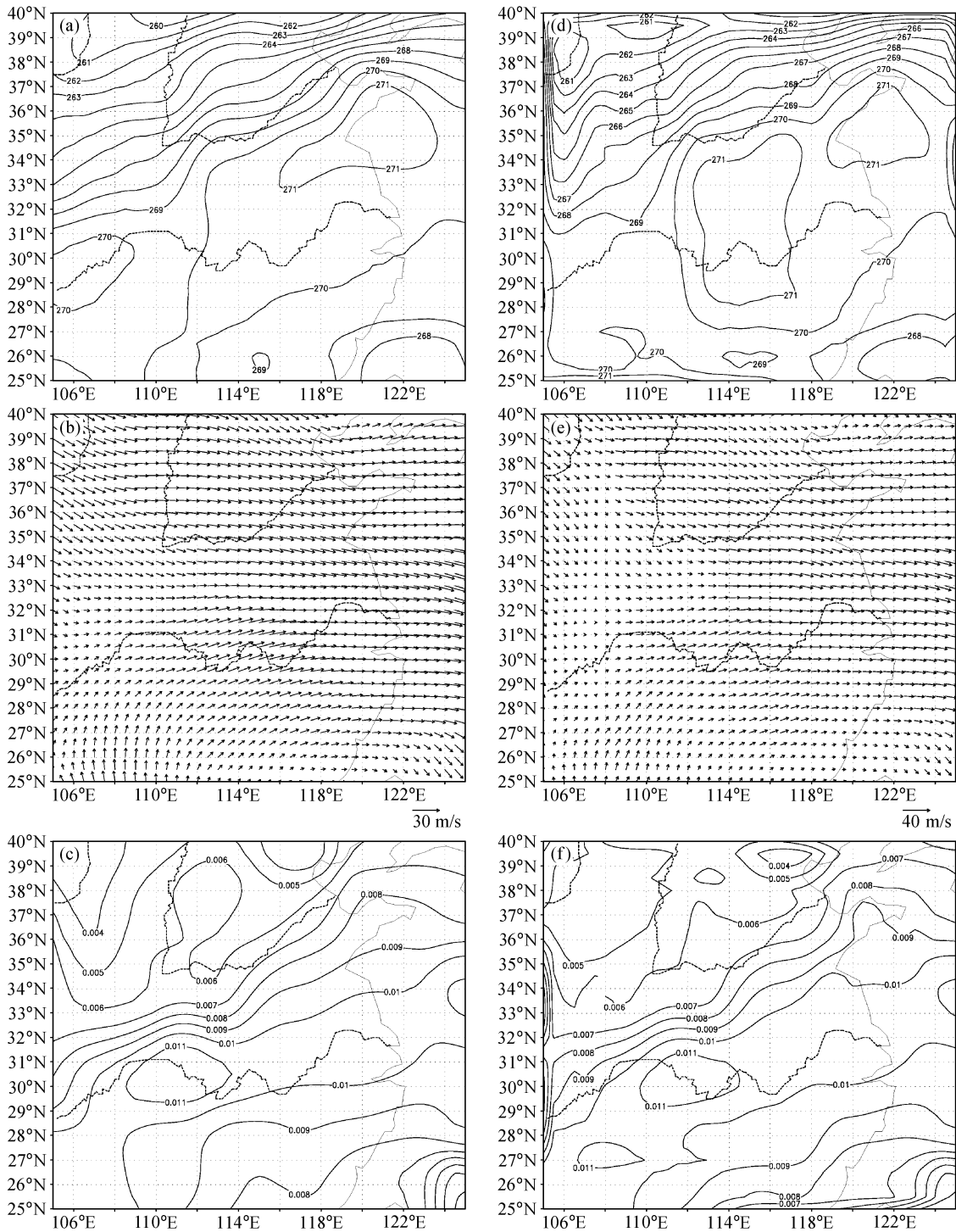


图 6 2002 年 6 月 24 日 00 时的观测场 (a~c) 及优化后的初始场 (d~f): (a, d) 500 hPa 温度场 (单位: K); (b, e) 500 hPa 风场; (c, f) 700 hPa 湿度场 (单位: g/g)

Fig. 6 The observations (a~c) and the optimal initial fields (d~f) at 0000 UTC 24 Jun 2002: (a, d) 500 hPa temperature (K); (b, e) 500 hPa wind field; (c, f) 700 hPa specific humidity (g/g)

报结果; 对于个例二和个例三, 需要对现有的报文初始观测场进行处理 (如四维变分资料同化) 后, 利用 REM 模式在给定的误差允许范围内对这两个

天气个例也可以得到满意的预报。

由于文中只给出了三个天气个例的试验, 对 REM 模式的可预报性研究还需要进一步通过大量

天气个例实验进行分析。

今后,可在以下几个方面作进一步的研究:

(1) 由于中尺度天气过程的局地性,对预报误差允许范围及初始场误差允许范围的选取作进一步研究,使得所选范围更具合理。(2) 降水是中尺度天气预报中的一个重要问题,目前研究中没有加入降水场,在下一步研究中应考虑;(3) 可结合数值模拟的方法对天气过程进行动力机制分析,从而对数值模式误差及初始观测场误差进行更具实际指导意义的定量分析;(4) 目前 REM 模式已发展为 AR-EM 模式 3.0,由于没有其相应的伴随模式,下一步可开展 AREM 模式伴随模式的编写工作。

参考文献 (References)

- [1] Thompson P D. Uncertainty of initial state as a factor in the predictability of large-scale atmospheric flow patterns. *Tellus*, 1957, **9**: 275~295
- [2] Lorenz E N. The predictability of hydrodynamic flow. *Trans., New York Acad. Sci., Ser.* 1963, **2** (25): 409~432
- [3] Lorenz E N. A study of the predictability of a 28-variable atmospheric model. *Tellus*, 1965, **17**: 375~390
- [4] 丑纪范. 天气数值预报中使用过去资料的问题. *中国科学*, 1974, **6**: 635~644
Chou Jifan. A problem of using past data in numerical weather prediction. *Scientia Sinica* (in Chinese), 1974, **6**: 635~644
- [5] 邵吉东, 丑纪范. 数值模式初值的敏感性程度对四维同化的影响——基于 Lorenz 系统的研究. *气象学报*, 1995, **53** (4): 471~479
Gao Jidong, Chou Jifan. The effect of the model sensitivity to initial condition upon the variational four-dimension assimilation. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1995, **53** (4): 471~479
- [6] 范新岗, 丑纪范. 提为反问题的数值预报方法与试验 I. 三类反问题及数值解法. *大气科学*, 1999, **23** (5): 543~550
Fan Xingang, Chou Jifan. Methods and experiments of numerical prediction raised as inverse problem. Part I: Three kinds of inverse problems and numerical solutions. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 1999, **23** (5): 543~550
- [7] Mu Mu, Guo Huan, Wang Jiafeng, et al. The impact of non-linear stability and instability on the validity of the tangent linear model. *Adv. Atmos. Sci.*, 2000, **17**: 375~390
- [8] Mu Mu, Wang Jiacheng. Nonlinear fastest growing perturbation and the first kind of predictability. *Science in China*, 2001, **44** (D): 1128~1139
- [9] Mu M, Duan W S, Wang J F. Nonlinear optimization problems in atmospheric and oceanic sciences. *East-West Journal of Mathematics Thailand*, 2002, Special Volume, 155~164
- [10] Mu Mu, Duan Wansuo, Wang Jiacheng. The predictability problem in numerical weather and climate prediction. *Adv. Atmos. Sci.*, 2002, **19** (2): 191~204
- [11] Xu Hui, Mu Mu, Luo Dehai. Application of nonlinear optimization method to sensitivity analysis of numerical model. *Progress in Natural Science*, 2004, **14** (6): 546~549
- [12] 宇如聪. 一个 η 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*, 1994, **18** (3): 284~292
Yu Rucong. A test for numerical weather prediction of real-time for China flood season precipitation in 1993 by a regional η -coordination model. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1994, **18** (3): 284~292
- [13] Cox R, Bauer B L, Smith T. A mesoscale model intercomparison. *Bulletin of American Meteorological Society*, 1998, **79**: 265~283
- [14] 中国气象局. 地面气象观测规范. 北京: 气象出版社, 2003
China Meteorological Administration. *The Rules for Ground Meteorological Observations* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2003
- [15] Navon I M, Zou X, Derber J, et al. Variational data assimilation with an adiabatic version of the NMC spectral model. *Mon. Wea. Rev.*, 1992, **120**: 1433~1446