

由大尺度观测提取中尺度信息的可能性研究*

邱崇践 张述文

(兰州大学大气科学系, 兰州, 730000)

摘 要

利用浅水方程模式和变分四维同化方法对由大尺度观测提取中尺度信息的可能性进行了模拟试验研究。试验的初始场是在平直气流上叠加一个半径为 5 倍格距的圆形涡旋。分别设定观测点的间距是 5, 7 和 9 倍格距, 观测的时间间隔分别是 1, 2 和 3 h, 同化时间为 6 h 或 12 h, 考察同化产生的初始场。试验结果是: 观测点的间距是 5 倍格距时, 由观测给出的分析场不能反映涡旋的基本特征, 而在同化产生的初始场中, 涡旋的基本结构清楚, 但强度有所削弱。增加观测次数或者延长同化时间, 可以改善同化的结果。对于移动较快的系统, 同化的结果较好。当观测点的间距是 9 倍格距时, 同化的结果与分析场相比已无明显改进。

关键词: 中尺度信息, 变分四维同化, 模拟试验。

1 引 言

中尺度数值天气预报面临的一个重大问题是缺乏可信的初始场。现有的常规气象观测网只能提供大尺度的气象信息, 想通过提高常规观测网的密度来获取中尺度的气象信息耗资巨大。另一方面, 顾震潮^[1, 2]早已证明, 地面温度和气压场的历史演变中已经蕴藏了斜压大气的三维结构。依据这一思想有理由推论: 部分空间的温度和气压场的历史演变中蕴藏了全空间大气的三维结构的信息, 借助于大气模式可以提取这些信息。变分四维同化方法^[3, 4]实际上也是基于这一原理。这就启发我们, 不提高观测网的空间分辨率, 而是增加观测的时间频次(这比增加观测站更容易实现) 也有可能达到同样的目的。为了检验这一设想的现实性, 本文利用浅水方程模式和模式资料, 按照变分四维同化的方法进行了模拟试验研究。

2 模式和资料同化方法

数值试验采用一个简单的二维浅水方程模式, “观测资料”也是由模式产生的理想资料, 这样容易保证相应的伴随模式完全准确和知道问题的准确解。

模式的控制方程是:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - f v + g \frac{\partial z}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + f u + g \frac{\partial z}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial(z+H)u}{\partial x} + \frac{\partial(z+H)v}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

其中, H 是平均高度(常数, 这里取 $H = 500$ m), z 是高度脉动, 其余符号均为常用。计算网格距 25 km, x 方向 45 个格点, 取周期性边界条件; y 方向 61 个格点, 取固定边界条件。空间采用中央差格式, 时间积分采用如下的迭代格式^[5]:

$$\text{对方程 } \frac{dy}{dt} = F(y)$$

$$y^* = y_n + \Delta t F_n$$

$$y_{n+1} = y_n + \Delta t [0.35 F(y_n) + 0.65 F(y^*)]$$

这里下标 n 表示时间步数。这样的格式可以保证计算的稳定性, 对短波的衰减又比较小。时间积分步长 15 s。

变分四维同化的基本思想是找到模式变量的初始场(这里是 u_0, v_0 和 z_0) 使模式的输出在时间间隔 τ 和空间区域 σ 内与相应的观测尽可能接近, 这样就有可能利用多时刻的观测资料提供的时间演变信息来弥补初始场空间分辨率的不足。为此, 定义

* 初稿时间: 2001 年 1 月 18 日; 修改稿时间: 2001 年 6 月 28 日。

资助课题: 国家重点基础研究发展规划项目和我国重大天气灾害的形成机理和预测理论研究(G 1998040902)。

目标函数为:

$$J(u_0, v_0, z_0) = \sum_{0, \tau} [w_u(u - u_{ob})^2 + w_v(v - v_{ob})^2 + w_z(z - z_{ob})] \quad (4)$$

这里下标 ob 表示观测值, 不带下标的量是模式输出值, w 是权重系数(试验中取 $w_u = w_v = 10$, $w_z = 1$)。问题变为在式(1)~(3)的约束下求式(4)的条件极小值, 具体算法在许多关于变分四维同化的文献中都有叙述, 在此就不再赘述。

3 试验方法和结果

在沿 x 方向的平直气流上叠加一个半径为 5 倍格距的圆形涡旋作为起始高度场, 具体表达式是

$$z = 600 \tan h \frac{9(y - y_0)}{2L_y} - \delta h_0 \cos^2 \left(\frac{\pi \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}}{10d} \right) \quad (5)$$

$$\text{当 } \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} \leq 5d, \delta = 1$$

$$\text{当 } \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} > 5d, \delta = 0$$

这里(单位为 m):, L_x 和 L_y 分别表示区域 x 方向和 y 方向的长度, $y_0 = L_y/2$, $x_0 = L_x/2$, d 为格距, $h_0 = 50$ m。式(5)右端第二项表示叠加的涡旋场。

风场由地转关系确定, 用欧拉-后差迭代格式将其积分 1 h 让初始的重力震荡衰减后的结果作为“真实”的初始场(高度场如图 1 所示), 再对模式作时间积分 12 h 得到未来时刻的“真实场”。依次设定观测点的空间间距是 5, 7 和 9 倍格距, 为了避免引入插值误差后对结果分析造成的困难, 我们假设这些观测点都落在计算网格点上, 亦即将指定格点的“真实场”(有的试验中加入随机误差)作为观测值, u , v 和 z 的观测同时存在。在选定观测点时, 我们采取了一种“最坏”的方案, 即让涡旋的中心落在周围 4 个观测点之间的中心位置, 这样由观测值得到的分析场基本不能反映涡旋的特征。观测的时间间隔 $\Delta\tau$ 分别是 1, 2 和 3 h, 同化时间 τ 为 6 或 12 h。初始猜测场由观测值通过抛物线插值的分析方法产生(图 2 是观测点的间距是 5 倍格距时得到的初始分析场)。利用变分四维同化技术给出最优的初始场, 采用的极小化算法是 Liu 等^[6]给出的有限记忆的拟牛顿共轭梯度方法, 每个试验都迭代 40 次。为了着重考察该方法对初始场中的小尺度涡旋的恢复能力, 文中选取一块包围涡旋中心的 15×15

格距的区域(以下称为涡旋区)统计同化产生的初始场的均方根误差(RMS)、相关系数(RC)和涡旋中心高度(HC)。为了简洁起见, 所有图表只给出高度脉动(z)的结果, 风场的情形与之类似, 不再列出。

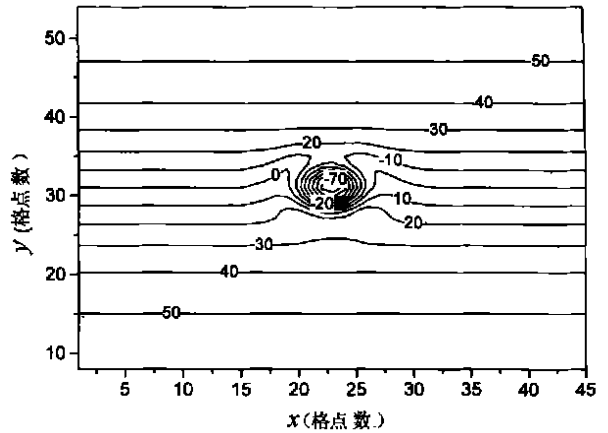


图 1 真实的初始高度扰动场(单位: m)

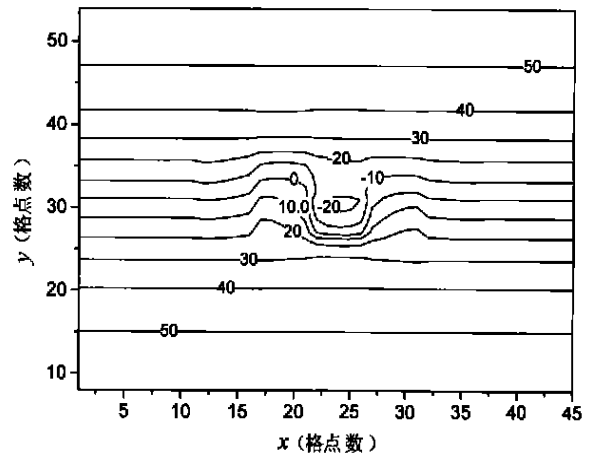


图 2 测点距离为 5 倍格距时的初始高度分析场

表 1 列出了 10 个试验的条件及结果, 现加以说明和分析。

试验 1, 基本试验, 观测点的间距是 5 倍格距(相当于涡旋的半径), 同化时间 τ 为 12 h, 观测的时间间隔是 1 h, 涡旋中心处最大西风风速 17.0 m/s。图 3 是经同化产生的初始场(作图前经过一次空间 9 点平滑, 图中 y 方向只保留中间 45 个格点, 以下各图同), 它明显好于原分析场, 涡旋的基本特征清楚, 但强度有所削弱, “真实场”中心值是 -79.4 m, 现为 -50.1 m。但文中也注意到尽管经过平滑, 图中仍有许多小的扰动。它表明, 为了让模式输出拟合观测, 在没有观测的格点上对初始场做

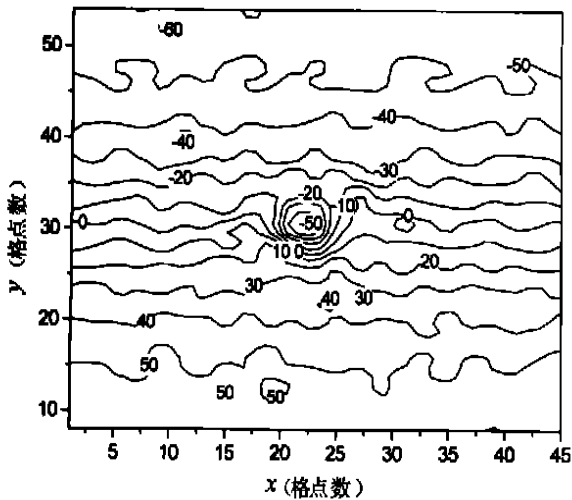


图3 测点距离为5倍格距时同化产生的初始高度场

了过多的调整。

试验2,将同化时间 τ 缩短为6h,其余条件同基本试验,这时利用的资料总数减少近一半,同化效果有所下降,但仍能清楚反映涡旋的基本特征(图略)。

试验3,将观测的时间间隔增大到2h,其余条件同基本试验,这时利用的资料总数与试验2相近,但积分时间增加,所得结果略好(图略)。

试验4,将观测的时间间隔进一步增大到3h,其余条件同基本试验,所得结果仍能反映涡旋的基

本特征(图略),但误差已经不小。

试验5,将观测点的间距增加到7倍格距,其余条件同基本试验,这时分析场上已经全然不见涡旋的踪影(图略),而同化产生的初始场涡旋特征仍然存在,不过强度和形状已经不如前面的试验,但是不规则的小扰动则更加明显,全场的误差很大(图4)。

试验6,将观测点的间距进一步增加到9倍格距,这时在同化产生的初始场上已经没有明显的涡旋特征(图5),与分析场相比涡旋区误差减少也不大,可以认为这时同化已经失去意义。

试验7,在前面的试验中我们已经看到,观测点的空间距离过大时,同化的结果不好。现在许多变分四维同化的工作使用的资料是格点上的分析资料,每个格点都有资料。这是否会有助于改善同化的结果呢?为了回答这一问题我们作了这一试验。试验中,同化使用的资料是将间距为5倍格距的观测资料通过抛物线插值到所有格点得到的分析资料,其余条件同基本试验。这时我们发现由于系统的移动,在某些时刻分析场中能表现出较明显的涡旋特征,但同化结果远不如原来。对此不难解释,因为分析场中没有涡旋特征,通过插值分析不会增加有用的信息,反而在所有格点上都对变量强加了约束,这种约束反映的是大尺度的特征,使小尺度的特征在同化过程中无法恢复,不过同化后的初始场没有前面那种不规则的小扰动。

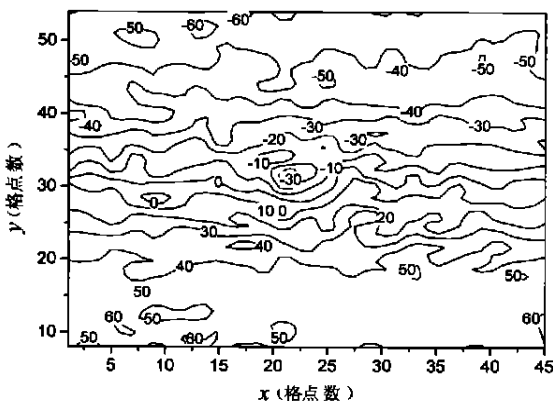


图4 测点距离为7倍格距时同化产生的初始高度场

试验8,前面的试验中模式和观测都假定是完全准确的,这与实际不符。现在模式的3个方程中都加入一个扩散项作为模式的误差,扩散系数相同为 $4000 \text{ m}^2/\text{s}$,它使同化末时刻的预报误差大约为分

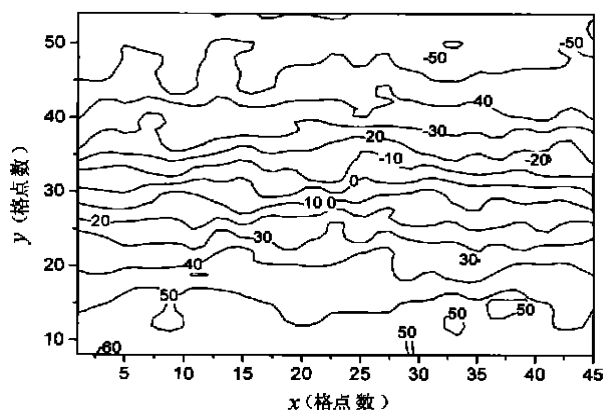


图5 测点距离为9倍格距时同化产生的初始高度场

析场误差的10%,观测仍然不变,其余条件与基本试验相同。我们看到,结果对模式误差不算敏感。

试验9,在试验8的基础上再在观测资料上加入随机误差,随机数由计算机产生,让其振幅为分析

场误差的 10%。结果表明对观测误差也不敏感。

试验 10, 将基本试验中涡旋中心处最大西风风速由 17.0 m/s 减少到 1/3, 即 5.7 m/s, 这时结果较

原来稍差, 说明系统移动慢不利于根据变量的演变提取初始场的信息。

从上述试验可以看到, 即使模式和观测都是完

表 1 同化产生的高度初始场和分析初始场的比较

| 编号 | τ (h) | $\Delta\tau$ (h) | 资料 间隔 (格距) | 分析场 | | | 同化场 | | |
|-----|---------------|---------------------|------------------|------------|-------|-----------|------------|-------|-----------|
| | | | | RMS (m) | RC | HC (m) | RMS (m) | RC | HC (m) |
| 1 | 12 | 1 | 5 | 15.6 | 0.760 | -23.4 | 7.8 | 0.945 | -50.1 |
| 2 | 6 | 1 | 5 | 15.6 | 0.760 | -23.4 | 11.9 | 0.867 | -39.9 |
| 3 | 12 | 2 | 5 | 15.6 | 0.760 | -23.4 | 9.8 | 0.914 | -39.4 |
| 4 | 12 | 3 | 5 | 15.6 | 0.760 | -23.4 | 11.8 | 0.872 | -31.7 |
| 5 | 12 | 1 | 7 | 17.6 | 0.691 | -11.6 | 14.2 | 0.784 | -34.4 |
| 6 | 12 | 1 | 9 | 20.6 | 0.614 | -11.1 | 17.4 | 0.703 | -15.9 |
| 7* | 12 | 1 | 5 | 15.6 | 0.760 | -23.4 | 11.8 | 0.877 | -28.6 |
| 8* | 12 | 1 | 5 | 15.6 | 0.760 | -23.4 | 8.5 | 0.938 | -46.7 |
| 9* | 12 | 1 | 5 | 15.9 | 0.756 | -23.4 | 8.7 | 0.934 | -45.5 |
| 10* | 12 | 1 | 5 | 15.8 | 0.757 | -23.4 | 8.1 | 0.922 | -48.7 |

* 说明: 试验 7. 用分析场作为观测; 8. 模式有误差; 9. 模式和观测都有误差; 10. 涡旋中心处西风风速较试验 1 减少 2/3

全准确的, 并且有相当多时次的观测, 但资料的空间间隔过大时, 我们仍然不能完全准确地将初始场反演出来。为了探求其原因, 我们在试验 1 和试验 2 中将迭代的次数增加到 150 次, 表 2 列出这两次试验最终相对目标函数值 (J_{150}/J_0) 和同化后初始场的误差, 误差包括在观测点统计的 (RMS_1) 和在涡旋区全部格点上统计的 (RMS_2)。

表 2 两个试验 150 次迭代后的结果

| 编号 | τ (h) | $\Delta\tau$ (h) | J_{150}/J_0 | RMS_1 (m) | RMS_2 (m) |
|----|---------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|----------------|
| 1 | 12 | 1 | 8.20×10^{-5} | 4.47×10^{-3} | 6.69 |
| 2 | 6 | 1 | 8.13×10^{-9} | 8.06×10^{-5} | 11.84 |

试验 2 中 150 次迭代后目标函数值下降到最初的 8.13×10^{-9} , 观测点上的初始场误差 (RMS_1) 也已经很小。可以认为已经找到问题的全局极小点, 但这时在非观测的格点上仍然有不小的误差 (RMS_2)。图 6 是 RMS_1 和 RMS_2 在迭代过程中的变化情况, RMS_1 从开始的零值迅速增大, 随后就逐渐震荡趋于零, 而 RMS_2 在最初 30 步有所下降后就几乎不再变化。试验 1 中目标函数值较试验 2 下降较慢, 但也下降了 4 个量级, 观测点上的初始场误差也已经很小, 仍然可以认为接近找到问题的全局极小点。这时在非观测的格点上的误差较试验 2 小, 但仍然是一个较大的值。上述情况说明问题, 由于所给的观测信息不足, 问题是欠定的, 解不唯一, 这是无法反演出正确的初始场的原因。

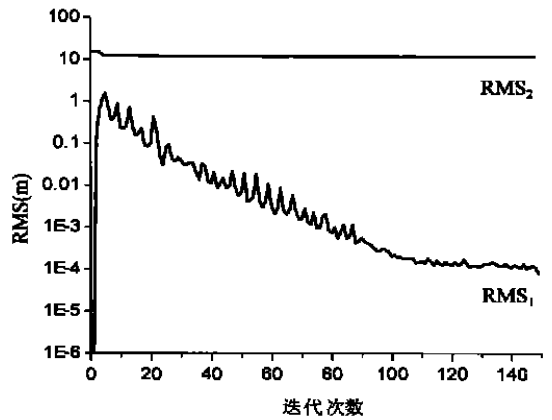


图 6 RMS_1 和 RMS_2 随迭代次数的变化情况

4 加入背景场的试验

由前面的试验已经看到, 在观测资料少于控制变量 (初始场) 时, 问题的解可能是不唯一的, 从图 3, 4 和 5 也可以看到, 为了让模式输出与观测拟合, 在没有观测的格点上控制变量作了过多的调整, 产生了许多不规则的小扰动。如果统计整个区域的误差, 在这些试验中, 同化后误差还比同化前增加了, 这表明在没有观测的格点上对控制变量不加约束是危险的。为了解决这一问题, 在目标函数中增加一项背景场的约束, 这时目标函数成为

$$J(u_0, v_0, z_0) = \sum_{q \in \tau} [w_u (u - u_{ob})^2 + w_v (v - v_{ob})^2 + w_z (z - z_{ob})^2] +$$

$$\sum_0^0 [w_{ub}(u - u_b)^2 + w_{vb}(v - v_b)^2 + w_{zb}(z - z_b)^2] \quad (6)$$

这里下标 b 表示背景场, w_{ub} , w_{vb} 和 w_{zb} 是权重系数(试验中取 $w_{ub}/w_u = w_{vb}/w_v = w_{zb}/w_z = 0.05$)。在连续同化过程中,一般的做法是将前一次同化的结果作为背景场;在像我们现在进行的这种“冷启动”试验中,一般是将分析场作为背景场。但现在的分析场中很少包括小尺度涡旋的信息,将其作为背景场势必使同化场过于光滑。为了解决这一问题,我们采用下面的迭代方法:首先用分析场作为背景场进行一次同化(称为第 1 次使用背景场),再以同化后产生的初始场作为背景场进行一次同化(称为第 2 次使用背景场)。表 3 是在上节试验 1 条件下(观测点间距 5 倍格距,同化时间 12 h,观测的

时间间隔 1 h)和试验 5 条件下(观测点间距 7 倍格距)所作的试验结果。表中给出的 S_1 是在全部计算格点上统计的初始场的高度均方根误差, S_2 是在涡旋区统计的高度均方根误差。由表 3 看到,不使用背景场约束时同化后 S_1 反而增大,这在观测点间距为 7 倍格距时更为明显。第 1 次使用背景场的结果 S_1 明显降低,但同化后的初始场过于光滑,涡旋强度远低于不使用背景场的情况(图略)。第 2 次使用背景场后,观测点间距为 5 倍格距时涡旋强度明显提高了,涡旋区的误差已经接近不使用背景场时的情况,而 S_1 仍然保持较低的值,不规则的小尺度扰动明显少于不使用背景场约束的情况(图 7)。观测点间距为 7 倍格距时涡旋仍然不强,但总的来说仍好于不使用背景场约束的情况(图 8)。

表 3 使用背景场前后的同化结果比较

| 试验条件 (同表 1) | 使用背景 场情况 | 分析场 | | | 同化场 | | |
|----------------|-------------|-------------------------|-------------------------|-----------|--------------------------|-------------------------|-----------|
| | | RMS ₁ (m) | RMS ₂ (m) | HC (m) | RM S ₁ (m) | RMS ₂ (m) | HC (m) |
| 1 | 未使用 | 4.14 | 15.6 | -23.4 | 4.59 | 7.8 | -50.1 |
| | 第 1 次使用 | | | | 3.13 | 10.2 | -33.8 |
| | 第 2 次使用 | | | | 2.98 | 8.3 | -43.0 |
| 5 | 未使用 | 4.67 | 17.6 | -11.6 | 8.24 | 14.7 | -34.4 |
| | 第 1 次使用 | | | | 4.44 | 15.3 | -16.1 |
| | 第 2 次使用 | | | | 4.54 | 14.3 | -17.7 |

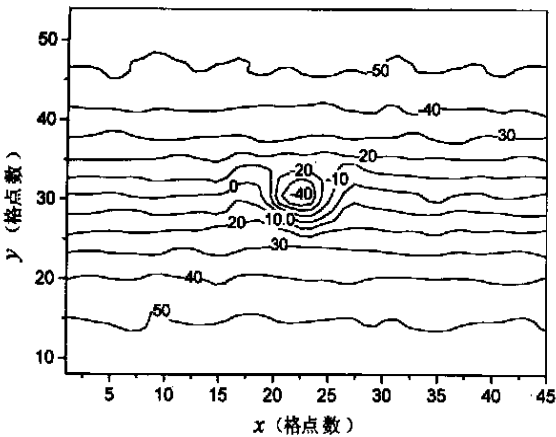


图 7 测点距离为 5 倍格距时第 2 次使用背景场同化产生的初始高度场

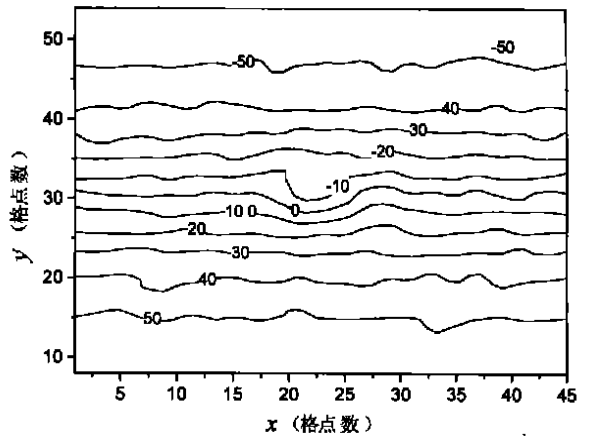


图 8 测点距离为 7 倍格距时第 2 次使用背景场同化产生的初始高度场

5 结 论

数值试验的结果表明,利用变分四维同化方法有可能从粗分辨率的观测资料中获取较小尺度的气

象信息,但其作用是有限度的,其有效性主要依赖于观测资料的时间频率和空间间隔。在我们的试验中,当观测点的间距小于系统水平尺度时一般会有满意的结果,反之则不然;观测的时间频率越高结果

越好。不是所有格点上(或附近)都有观测时,不加入背景场约束会使同化场中出现许多不规则扰动,但在背景场中缺少小尺度信息时同化结果也不会好,这时用我们提出的迭代方法可得到较好的结果。

还须指出,即使模式和观测都完全精确,观测的空间密度不够,变分四维同化也可能给出不正确的初始场,原因是极小化问题存在多极值或多解。

参考文献

- 1 顾震潮. 作为初值问题的天气形势预报与由地面天气历史演变做预报的等值性. 气象学报, 1958, 29(2): 93~ 98
- 2 顾震潮. 天气数值预报中过去资料的使用问题. 气象学报, 1958, 29(3): 176~ 184
- 3 Lewis J M, Derbar J C. The use of adjoint equation to solve a variational adjustment problem with advective constraints. Tellus, 1985, 37A : 309~ 322
- 4 Le Dimet F X, Talagrand O. Variational algorithms for analysis and assimilation of meteorological observations. Tellus. 1986, 38A: 97~ 110
- 5 Matsuno T. Numerical integration of the primitive equations by a simulated backward difference method. J Meteor Soc, Japan, 1966, 44: 76~ 84
- 6 Liu D C, Nocedal J. On the limited memory BFGS method for large scale optimization math programming. 1989, 45: 503~ 528

A STUDY OF POSSIBILITY OF EXTRACTING THE MESOSCALE INFORMATION FROM LARGE- SCALE OBSERVATIONS

Qiu Chongjian Zhang Shuwen

(*Department of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000*)

Abstract

The possibility of extracting the mesoscale information from large-scale observations is evaluated with numerical simulation experiments by using the shallow water model and the method of four-dimensional variational data assimilation. The initial field for the simulation is set to a circular vortex with radius of 5 times mesh scale added to a straight flow. The distances between the observation stations are 5, 7 or 9 times mesh scale separately. The observation is available every 1, 2 or 3 hours. The data assimilation period is defined to be 6 or 12 hours. The initial fields resulting from the assimilation are evaluated. The conclusions are: When the distance between the observation stations is 5 times mesh scale, the basic properties of the vortex can not be represented by the analysis fields from the observations; The basic structure of the vortex is well defined in the initial fields from the assimilation, but the intensity is slightly weakened; The assimilation results can be improved by increasing the observation frequency or lengthening assimilation time; The assimilation results are better for the fast moving system; When the distance between the observation stations is 9 times mesh scale, there is no obvious improvement from the assimilation results compared with analysis fields.

Key words: Mesoscale information, Four-dimensional variational assimilation, Simulation experiments.