

一个有限区变网格模式的设计

钱滔滔 郭肖容

(国家气象中心, 北京 100081)

廖洞贤

(南京气象学院, 南京 210044)

摘 要 在国家气象中心业务运行的有限区球面均匀网格模式的基础上设计了一个有限区变网格模式。使预报的窗口区设计为均匀细网格 0.5° , 而窗口区以外则以 0.1° 经纬度均匀向外递增。采用廖洞贤 1995 年提出的坐标变换方法, 变网格中的模式方程可以在相应的均匀网格上进行计算。利用实际资料对绝热模式进行了变网格与全场均匀细网格 0.5° 的对比试验。3 个个例的试验结果表明: 对窗口区变网格模式预报几乎与全场均匀细网格模式预报水平相当。但由于窗口区外网格点数减少而所用计算机时 (CPU) 节省了一半以上。

关键词 有限区模式 变网格 均匀网格 CPU时间

1 前言

数值预报由于其巨大的计算量、数据量及严格的时效要求而对计算机能力存在着极大的依赖性。为满足公众对天气预报更准确更细致的要求, 模式的分辨率应该不断地提高。这与有限的计算机能力之间永远存在着不可回避的矛盾。尽管理论上使用全球高分辨率模式是最理想的方法, 但一方面计算费用过分昂贵, 另一方面预报时效也因资料截断时间晚和计算时间太长而很难满足要求。因此, 在有限的计算机条件下实现高分辨率有限区预报是比较现实和有效的。

有限区模式与全球模式最主要的差别就是它所遇到的侧边界问题。近 20 年来在这方面投入过大量的研究。到目前为止, 解决有限区侧边界问题可分为两种途径, 即嵌套技术和变网格技术。嵌套技术虽还不能完全克服侧边界出现的各种问题, 但它方法灵活、简便, 实践中也证实是十分有效的一种方法。因此近 10 多年来已广泛地为业务数值预报模式所采用。而变网格技术在业务中的使用则仅仅是近 10 年的事情。至今也仅在加拿大及法国气象局的区域数值预报业务中使用。

我国国家气象中心目前业务运行的有限区分析预报系统 (LAFS) 是使用了自行设计研制的有限区球面网格原始方程模式 (LAM) 并采用单向嵌套技术与全球谱模式 T63L16 进行嵌套预报。尽管 LAFS 已成功地解决了具有不同模式地形的格点模式与谱模式的非同步嵌套预报, 而且实践也证实其预报具有较好的参考价值。然而目前所使用的 LAM 水平分辨率还相当低, 大约 100 km (45°N) 左右。当模式分辨率再进一步提高时, 存在以下问题: 一是中国地域广大, 西部地区有庞大的青藏大地形, 它的存在使模式的设计变得格外复杂, 这也是东亚区域模式的一个难点。尤其当分辨率提高时, 物理过程参数化, 时间积分等许多环节都对地形的高度十分敏感。另一方面西部地区, 尤其青藏高原附近观测资料稀少, 模式对高原地区的可预报性还很低, 模式预报精度随分辨率的提高在这些地区

尚不理想。为此, 作为中国的区域模式或许对不同的地区采用不同的水平分辨率更为有效。为此我们以 LAFS 所采用的均匀球面网格原始方程模式为基础, 尝试设计了变网格模式, 并用实际资料对绝热方案进行了数值试验, 本文将对变网格模式的设计及试验结果进行介绍和分析。

2 变网格的设计

变网格模式是在均匀网格 LAM 模式基础上设计的。变网格预报区域基本与均匀网格 ($1^\circ \times 1^\circ$) LAM 模式区域相同, 而将其中部, 亦即窗口区设计为均匀细网格 ($0.5^\circ \times 0.5^\circ$), 其网格点数为 57×55 , 覆盖的面积为 $94 \sim 122^\circ\text{E}$, $26 \sim 53^\circ\text{N}$ 。由窗口区向外网格距均匀地以 0.1° 向外递增, 在变网格区域的最外圈, 其网格距西边界处为 2.2° , 东边界处为 2.1° , 南北边界处均为 1.5° 。变网格区域共包含网格点数为 90×75 , 即覆盖了 $70.2 \sim 143.6^\circ\text{E}$, $15.5 \sim 63.5^\circ\text{N}$ 的范围。均匀细网格模式的网格点数为 151×99 , 两者网格点数之比约为 0.45:1, 上述网格结构可参见图 1。

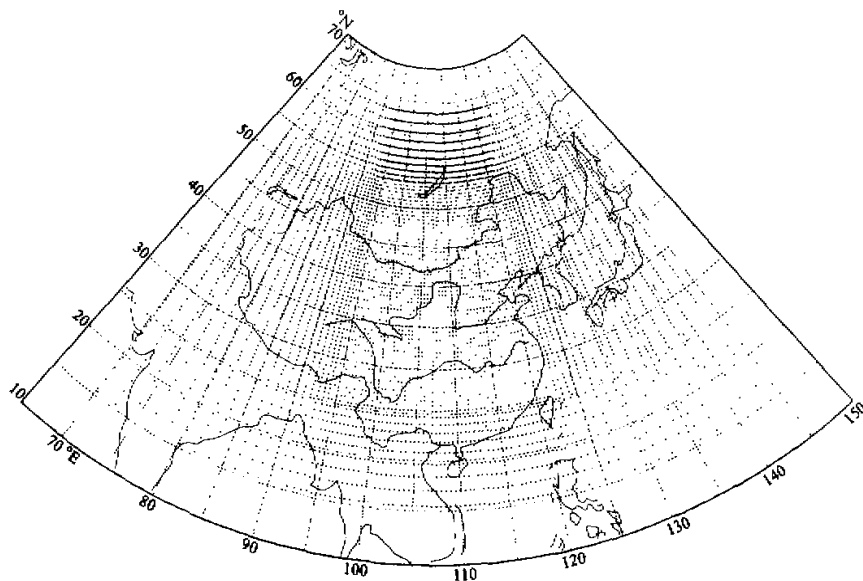


图 1 变网格区域及结构

3 变网格模式基本方程组

3.1 坐标变换

参照廖洞贤^[1]提出的坐标变换方案, 变网格与均匀网格的经纬度坐标分别由 λ 、 φ 和 $\hat{\lambda}$ 、 $\hat{\varphi}$ 表示, 那么 λ 、 φ 可写为

$$\lambda = \hat{\lambda}(\lambda), \quad (1)$$

$$\varphi = \hat{\varphi}(\varphi), \quad (2)$$

于是有

$$\frac{\partial}{\partial \lambda} = \frac{\partial \hat{\lambda}}{\partial \lambda} \frac{\partial}{\partial \hat{\lambda}}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial \varphi} = \frac{\partial \hat{\varphi}}{\partial \varphi} \frac{\partial}{\partial \hat{\varphi}}. \quad (4)$$

令 $\mu = \sin \varphi$, $\hat{\mu} = \sin \hat{\varphi}$, 根据

$$\frac{\partial}{\partial \mu} = \frac{\partial \hat{\mu}}{\partial \mu} \frac{\partial}{\partial \hat{\mu}}, \quad (5)$$

则有

$$\frac{\partial \hat{\mu}}{\partial \mu} = \frac{\cos \hat{\varphi}}{\cos \varphi} \frac{\partial \hat{\varphi}}{\partial \varphi} = \frac{1}{\partial \mu / \partial \hat{\mu}}.$$

同时,

$$d\lambda = \frac{\partial \lambda}{\partial \hat{\lambda}} d\hat{\lambda}, \quad (6)$$

$$d\varphi = \frac{\partial \varphi}{\partial \hat{\varphi}} d\hat{\varphi}, \quad (7)$$

$$d\mu = \frac{\partial \mu}{\partial \hat{\mu}} d\hat{\mu} = \cos \varphi \frac{\partial \varphi}{\partial \hat{\varphi}} d\hat{\varphi}. \quad (8)$$

在 λ, φ 坐标中, 水平面积元 dA 及个别微商 d/dt 可以表示为

$$dA = a^2 J d\hat{\lambda} d\hat{\mu} = a^2 \cos \varphi \frac{\partial \lambda}{\partial \hat{\lambda}} \frac{\partial \varphi}{\partial \hat{\varphi}} d\hat{\lambda} d\hat{\varphi} \quad (9)$$

及

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \frac{u}{a \cos \varphi} \frac{\partial \lambda}{\partial \hat{\lambda}} \frac{\partial}{\partial \hat{\lambda}} + \frac{v}{a} \frac{\partial \varphi}{\partial \hat{\varphi}} \frac{\partial}{\partial \hat{\varphi}} + \sigma \frac{\partial}{\partial \sigma}, \quad (10)$$

其中 $J = \frac{\partial(\lambda, \mu)}{\partial(\hat{\lambda}, \hat{\mu})}$.

3.2 变网格方程组

为了方便, 以下约定:

(1) 在 $\hat{\lambda}\hat{\varphi}$ -球面上构造均匀网格 ($\Delta\hat{\lambda} = \Delta\hat{\varphi} = \text{常数}$), 而与之相对应的 $\lambda\varphi$ -网格为变网格。两种网格总点数相同, 且各沿 λ 和 $\hat{\lambda}$ 方向, 以及 φ 和 $\hat{\varphi}$ 方向的总点数也相同。还用相同的网格点标号 (i, j) 来表示这两种网格中的对应点。

(2) 所有计算均在 $\hat{\lambda}\hat{\varphi}\sigma t$ -坐标中进行。

变网格的球面网格原始方程组, 通过上述坐标变换则可写为如下形式:

$$\frac{\partial u}{\partial t} - \eta v + \frac{1}{a \cos \varphi} \frac{\partial}{\partial \hat{\lambda}} (\varphi + E) \times \frac{\partial \hat{\lambda}}{\partial \lambda} + \sigma \frac{\partial \mu}{\partial \sigma} = - \frac{RT}{a \cos \varphi} \frac{\partial \ln P_s}{\partial \hat{\lambda}} \frac{\partial \hat{\lambda}}{\partial \lambda} + F_u + D_u, \quad (11)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \eta u + \frac{1}{a} \frac{\partial}{\partial \hat{\phi}} (\varphi + E) \times \frac{\partial \hat{\phi}}{\partial \varphi} + \dot{\sigma} \frac{\partial v}{\partial \sigma} = - \frac{RT}{a} \frac{\partial \ln P_s}{\partial \hat{\phi}} \frac{\partial \hat{\phi}}{\partial \varphi} + F_v + D_v, \quad (12)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{u}{a \cos \varphi} \frac{\partial T}{\partial \hat{\lambda}} \frac{\partial \hat{\lambda}}{\partial \lambda} + \frac{v}{a} \frac{\partial T}{\partial \hat{\phi}} \frac{\partial \hat{\phi}}{\partial \varphi} + \dot{\sigma} \frac{\partial T}{\partial \sigma} = \kappa \frac{T_c}{P} + \frac{Q}{c_p} + \frac{D_T}{c_p}, \quad (13)$$

$$\frac{\partial P_s}{\partial t} + \frac{1}{a \cos \varphi} \left[\frac{\partial}{\partial \hat{\lambda}} (P_s u) \times \frac{\partial \hat{\lambda}}{\partial \lambda} + \frac{\partial}{\partial \hat{\phi}} (P_s v \cos \varphi) \times \frac{\partial \hat{\phi}}{\partial \varphi} \right] + \frac{\partial}{\partial \sigma} P_s \dot{\sigma} = 0, \quad (14)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \sigma} = - \frac{RT}{\sigma}, \quad (15)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{u}{a \cos \varphi} \frac{\partial q}{\partial \hat{\lambda}} \frac{\partial \hat{\lambda}}{\partial \lambda} + \frac{v}{a} \frac{\partial q}{\partial \hat{\phi}} \frac{\partial \hat{\phi}}{\partial \varphi} + \dot{\sigma} \frac{\partial q}{\partial \sigma} = S + D_q, \quad (16)$$

其中, $\eta = f + \xi$, $E = \frac{1}{2}(u^2 + v^2)$; 其他符号都是气象上常用的符号, 并可参考文献[2]。

在绝热无粘性情况下, 上述方程对整个大气积分, 同时应注意到

$$\frac{\partial \hat{\lambda}}{\partial \hat{\lambda}} \frac{\partial \hat{\lambda}}{\partial \lambda} = \frac{\partial \varphi}{\partial \hat{\phi}} \frac{\partial \hat{\phi}}{\partial \varphi} = 1. \quad (17)$$

那么, 我们很容易证明由方程(11)~(15)所描述的模式大气的质量与能量的守恒性。而且可实现动能与位能间的严格的能量转换。如果将方程(16)中的 S 和 D_q 项略去, 那么我们也可以证明全球平均比湿是不随时间改变的。

空间差分与时间积分基本上是与均匀球面网格模式^[3]相同的。只是方程中多出的 $\partial \hat{\lambda} / \partial \lambda$ 和 $\partial \hat{\phi} / \partial \varphi$ 项的差分形式可写为

$$\left(\frac{\partial \hat{\lambda}}{\partial \lambda} \right)_{ij} \approx a \hat{\lambda}_{i+1,j} + b \hat{\lambda}_{i-1,j} - (a+b) \hat{\lambda}_{i,j}, \quad (18)$$

其中,

$$a = \frac{\Delta \hat{\lambda}_i}{\Delta \hat{\lambda}_{i+1} (\Delta \hat{\lambda}_i + \Delta \hat{\lambda}_{i+1})}, \quad b = - \frac{\Delta \hat{\lambda}_{i+1}}{\Delta \hat{\lambda}_i (\Delta \hat{\lambda}_i + \Delta \hat{\lambda}_{i+1})},$$

$$\Delta \hat{\lambda}_i = \hat{\lambda}_i - \hat{\lambda}_{i-1}, \quad \Delta \hat{\lambda}_{i+1} = \hat{\lambda}_{i+1} - \hat{\lambda}_i,$$

而 $(\partial \hat{\phi} / \partial \varphi)_{ij}$ 完全类同。

可以发现, 实际上变网格模式方程的计算仍然是在均匀网格 $\hat{\lambda}$, $\hat{\phi}$ 上计算的。只是多出了坐标变换项 $\Delta \hat{\lambda} / \Delta \lambda$ 和 $\Delta \hat{\phi} / \Delta \varphi$, 而这两项在网格设计确定后便可计算出。

4 数值试验

为了验证上述变网格模式的合理性及预报性能, 我们进行了相应的数值试验。下面, 我们以 M_v 表示变网格模式, M_f 表示均匀细网格 ($0.5^\circ \times 0.5^\circ$) 模式。

我们选取 3 个实际个例, 即 1993 年 5 月 5 日 00 时、1995 年 7 月 25 日 00 时、1995 年 11 月 1 日 00 时资料为初始场, 对 M_v 和 M_f 分别进行 48 h 积分, M_v 和 M_f 积分时间步长均为 30 s。试验中为方便起见侧边界均采用了固定边界。

4.1 模式稳定性能分析

由于变网格模式水平分辨率在积分区域内的不一致, 可能会使模式的稳定性能受到影响, 为了从总体上分析变网格模式的稳定性特征, 考察下面 5 种量: (1) 平均位势涡度拟能 E_s (单位: $10^{-3} \text{ hPa}^{-2} \text{ s}^{-2}$); (2) 平均动能 E_k [单位: $10^{-2} (\text{hPa m s}^{-1})^2$], 在计算中, E_k 定义为 $E_k \approx \frac{1}{2} \left(\overline{U^2} + \frac{1}{\cos\varphi} \overline{V^2 \cos\varphi} \right)_k$, 而 $U = \overline{P_s}^{-1} u$, $V = \overline{P_s}^{-1} v$; (3) 散度均方根 R_D (单位: 10^{-6} s^{-1}); (4) 地面气压倾向均方根 R_{PT} (单位: $10^{-3} \text{ hPa s}^{-1}$); (5) 地面气压倾向绝对值平均 M_{PT} (单位: $10^{-3} \text{ hPa s}^{-1}$)。

从模式的 E_k , E_s , R_{PT} , M_{PT} 和 R_D 在 48 h 内随时间的变化曲线中可以看到 (图 2), E_s 的变化最平稳, E_k 变化也较平稳, R_D 无突变现象。对于 M_{PT} 和对各种扰动较敏感的 R_{PT} , 48 h 内变幅基本平稳。所以, 变网格模式是稳定守恒的。

4.2 模拟结果分析

3 个个例的预报结果表明, 变网格 M_v 所作 24 h 和 48 h 预报不比均匀细网格模式 M_f 差, 尽管它的平均分辨率比后者为低。而且, 在中心地区这两个模式的预报结果十分相似。下面, 我们对 1993 年 5 月 5 日 00 时的预报着重进行讨论。

5 月 5 日 00 时的实况图上 (见图 3a), 500 hPa 形势场有一东北-西南向的低压槽位于 95°E 以西, 正处在我们所设计的均匀细网格窗口区的西边界附近, 对应的 850 hPa 图上, 有一低涡位于窗口

区的西北部, 低涡中心值为 136 GPM, 至 5 月 6 日 00 时 (图 3b), 500 hPa 图上的低压槽移至窗口区的中部地区, 并形成一南北向的切断低压, 中心值为 532 GPM。850 hPa 图上的低涡也加深东移至窗口区的东北部, 中心值降至 126 GPM。同时, 低涡后部, 一西北-东南向的高压移入窗口区的西部。

图 4 给出了变网格 M_v 、均匀细网格 M_f 所作 24 h 500 hPa 的高度预报。可见, 两个模式都反映出了低压槽的加深东移, M_v 中间细网格窗口区的预报与均匀细网格模式十分接近。变网格模式预报在窗口区外, 水平分辨率线性变化的区域未出现任何不稳定现象, 虽然东西边界处的网格距已增至窗口区域的 4 倍以上。这样的结果与 Staniforth 等^[2]使用变网格有限元模式所得结果十分相似。

图 5 给出了 M_v 和 M_f 的 24 h 850 hPa 高度预报。同样, 两个模式都反映出了低涡的加深东移, 只是程度和范围都比实况偏弱。 M_v 中间细网格窗口区的预报与均匀细网格模式很相似。对于西北部低涡向窗口区的延伸, 变网格的预报与均匀细网格模式也十分接近。

在窗口区外, 两个模式的预报有时还存在着一定的差别。但是, 多数情况下, 在积分的 48 h 内, 窗外预报差别还不足以影响窗区内的预报时, M_v 和 M_f 的预报仍可认为

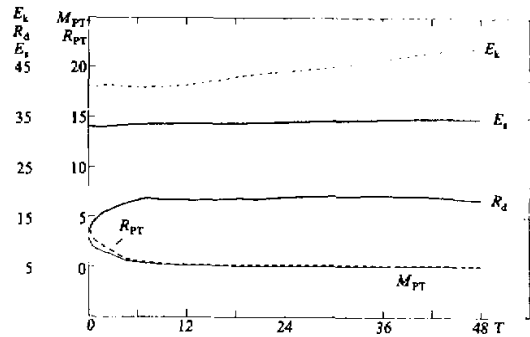


图 2 模式统计特性分析

是相当的。

4.3 形势场统计检验分析

我们计算了 3 个个例采用 M_v 、 M_f 两种方案预报的 24 h 和 48 h 的平均统计检验结

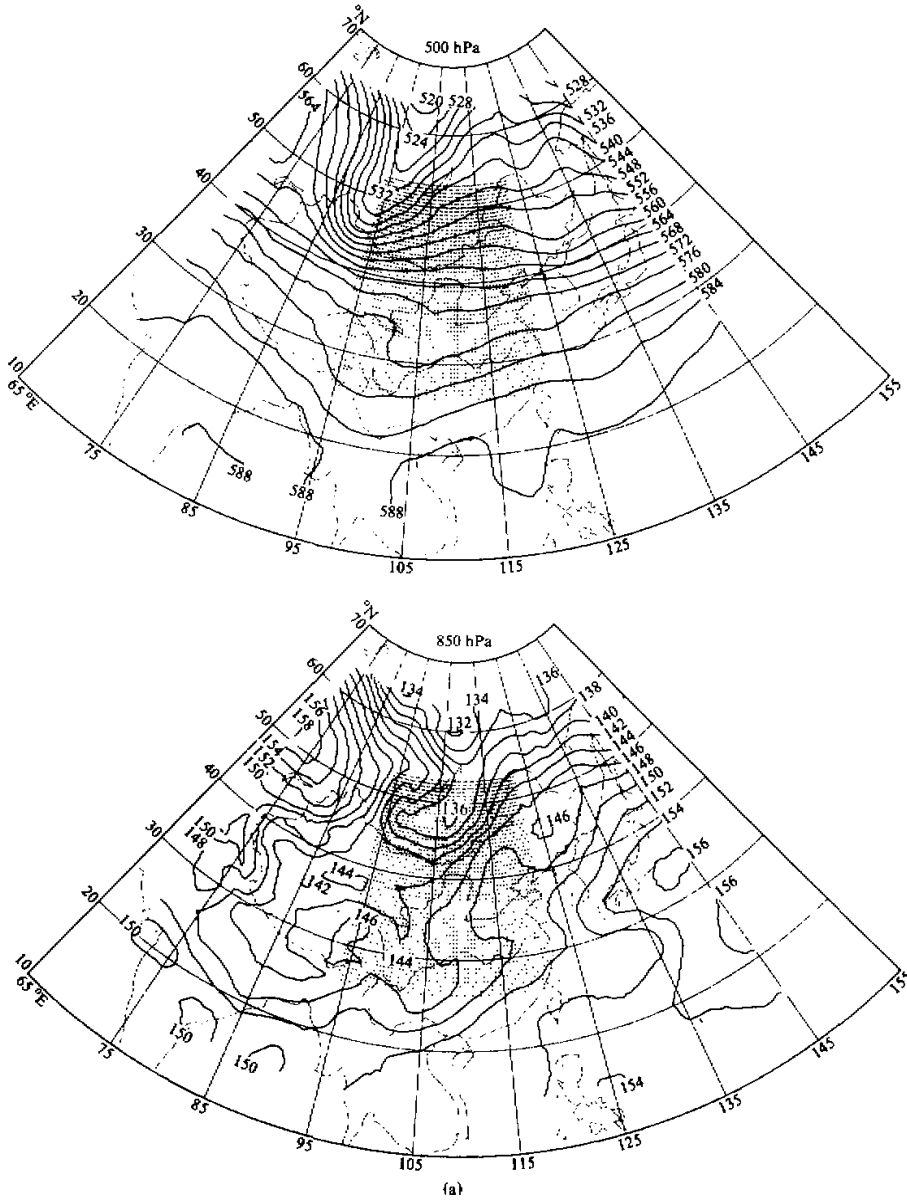


图 3 (a) 5 月 5 日 00 时 500 hPa 和 850 hPa 实况场

果。表 1、表 2 分别为全场 24 h 和 48 h 预报统计检验结果，表 3、表 4 分别为窗口区 24 h 和 48 h 预报统计检验结果。可以看出，全场检验就标准差相关系数、技术评分、均方根误差及绝对值偏差等指标看，变网格略差于均匀细网格。窗口区检验，除个别指

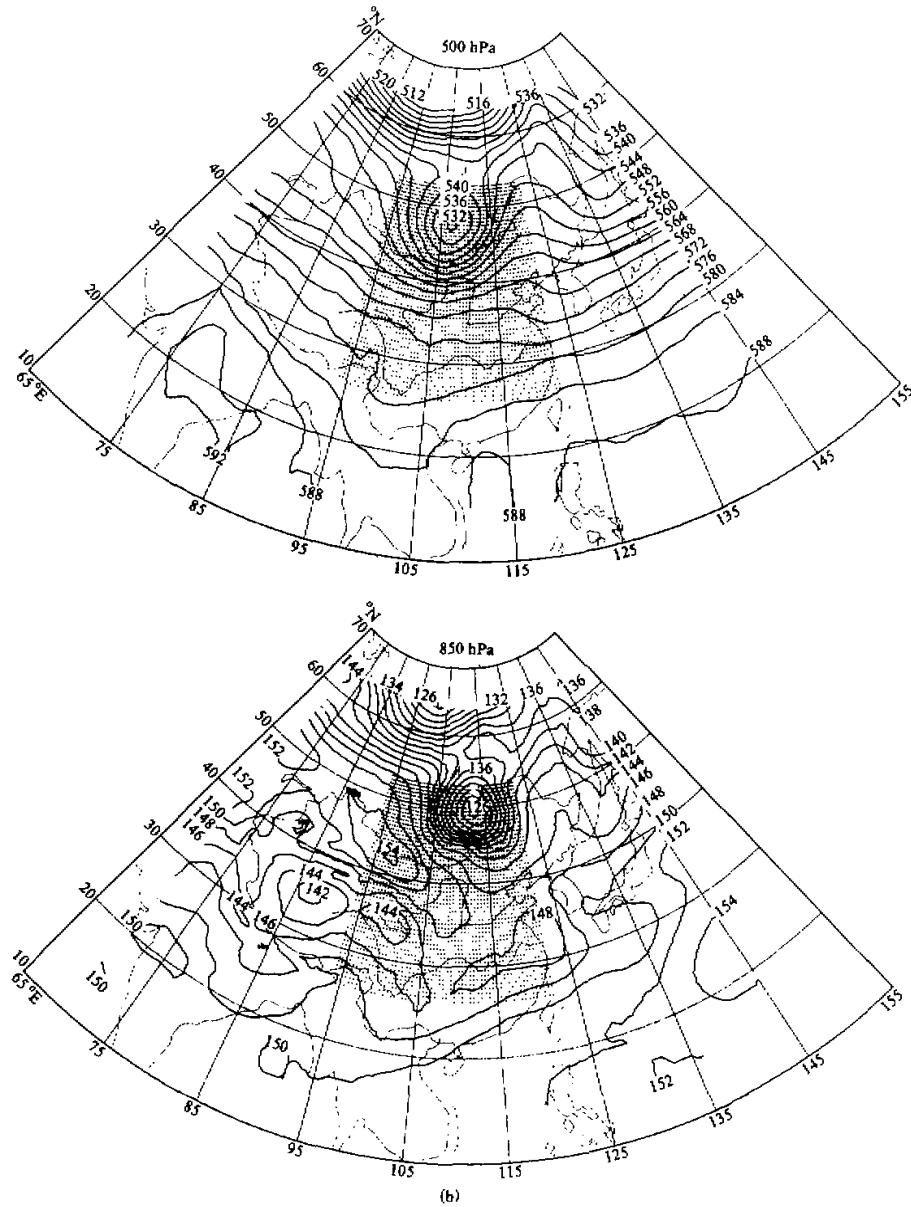


图 3 (b) 5 月 6 日 00 时 500 hPa 和 850 hPa 实况场

标外, 好于全场检验结果。但有些层次(主要在低层)均匀细网格反不如变网格, 这可能是由于分辨率提高时, 西边界处青藏大地形在低层产生的不真实的地形扰动所致, 以后资料许可, 预报范围扩大, 使青藏高原远离边界区, 或许可消除虚假的地形波动。

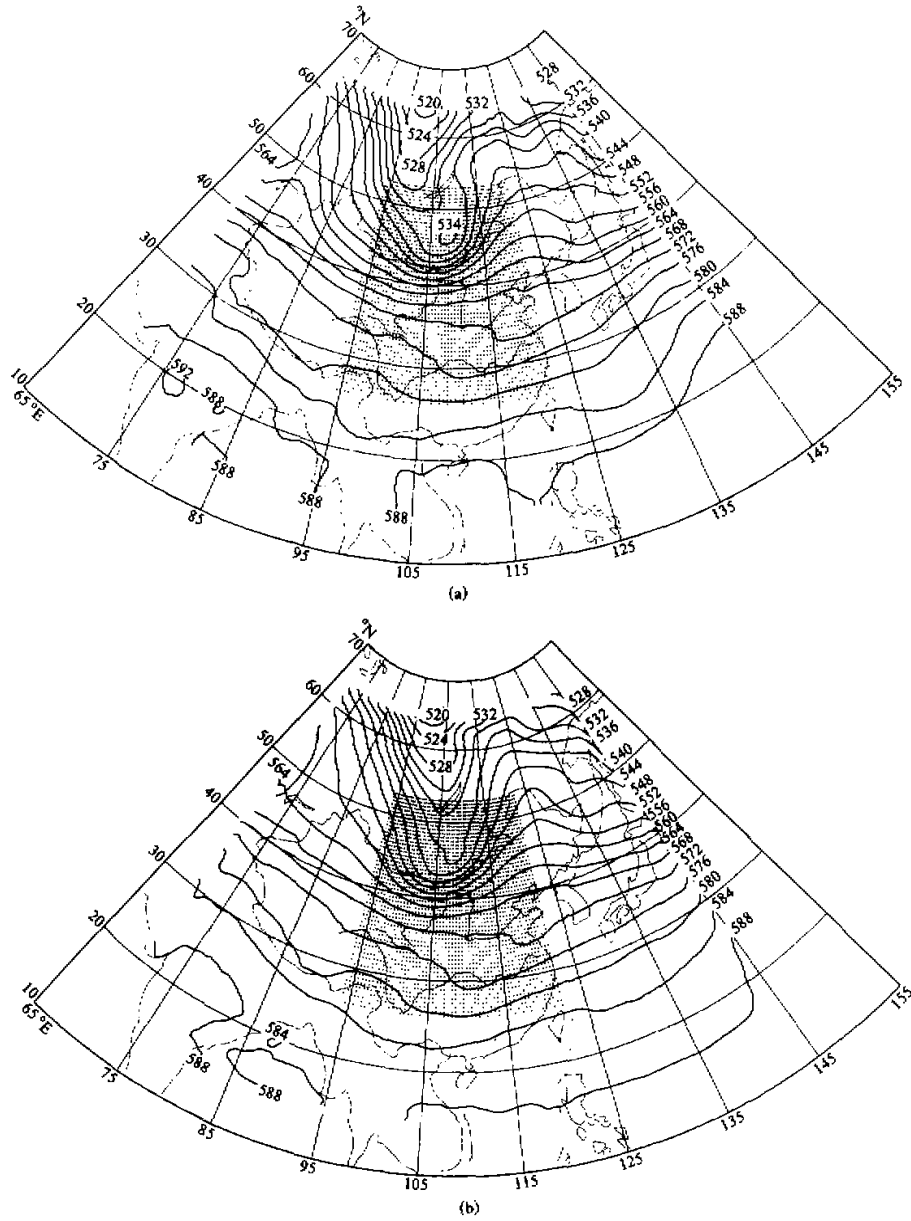


图 4 变网格 M_v 、均匀细网格 M_f 24 h 500 hPa 预报
(a) M_v ; (b) M_f

总之, 尽管对不同的预报对象, 不同的检验指标尚得不到十分明确的结论, 但总体上看变网格模式预报精度并不比均匀细网格模式差多少, 即可认为对窗口区而言, 变网格模式预报水平几乎与全场均匀细网格模式预报水平相当。

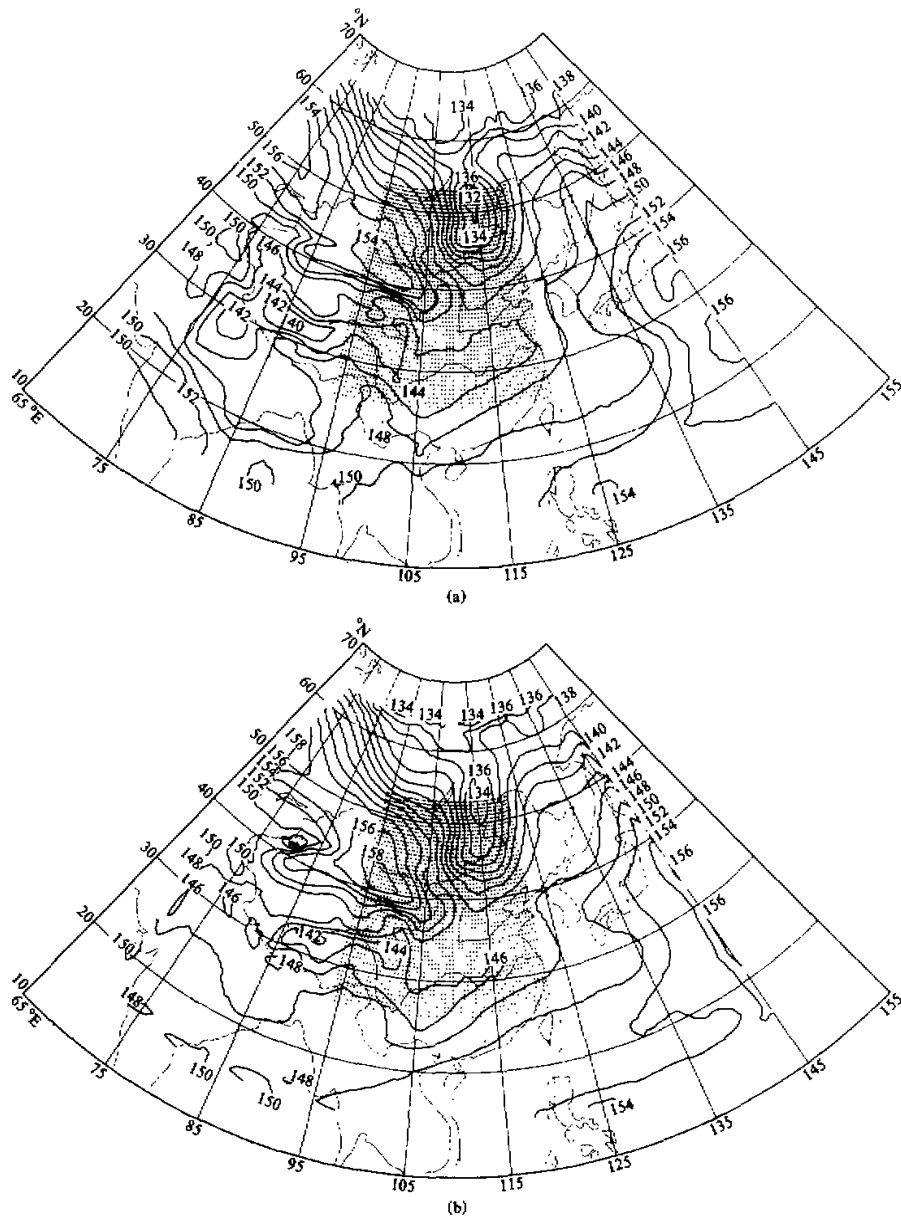


图 5 变网格 M_v 、均匀细网格 M_l 24 h 850 hPa 预报
(a) M_v ; (b) M_l

表 1 全场 24 h 预报统计检验结果

	标准差相关系数 C_{OR}		技术评分 SI		均方根误差 σ		绝对值偏差 $ E $	
	M_f	M_v	M_f	M_v	M_f	M_v	M_f	M_v
500 hPa	0.9800	0.9767	44.79	48.04	4.280 什米	4.398 什米	3.911 什米	4.197 什米
850 hPa	0.9100	0.9133	64.38	64.27	3.272 什米	3.207 什米	2.961 什米	3.016 什米
P_s	0.7900	0.8000	72.93	74.18	5.003 hPa	4.783 hPa	4.500 hPa	4.513 hPa

表 2 全场 48 h 预报统计检验结果

	标准差相关系数 C_{OR}		技术评分 SI		均方根误差 σ		绝对值偏差 $ E $	
	M_f	M_v	M_f	M_v	M_f	M_v	M_f	M_v
500 hPa	0.9633	0.9567	54.31	55.33	6.557 什米	6.340 什米	5.635 什米	5.983 什米
850 hPa	0.8500	0.8367	74.33	73.41	4.483 什米	4.602 什米	3.923 什米	4.131 什米
P_s	0.6800	0.6633	80.28	80.16	6.143 hPa	6.163 hPa	5.237 hPa	5.460 hPa

表 3 窗口区 24 h 预报统计检验结果

	标准差相关系数 C_{OR}		技术评分 SI		均方根误差 σ		绝对值偏差 $ E $	
	M_f	M_v	M_f	M_v	M_f	M_v	M_f	M_v
500 hPa	0.9900	0.9867	33.19	33.55	2.354 什米	2.573 什米	1.818 什米	1.961 什米
850 hPa	0.8833	0.9333	62.76	59.02	2.535 什米	1.993 什米	2.189 什米	1.634 什米
P_s	0.6800	0.7767	79.84	77.88	4.967 hPa	3.800 hPa	4.333 hPa	3.517 hPa

表 4 窗口区 48 h 预报统计检验结果

	标准差相关系数 C_{OR}		技术评分 SI		均方根误差 σ		绝对值偏差 $ E $	
	M_f	M_v	M_f	M_v	M_f	M_v	M_f	M_v
500 hPa	0.9833	0.9700	39.87	39.12	4.815 什米	4.656 什米	2.717 什米	3.368 什米
850 hPa	0.8833	0.8667	66.03	65.35	2.683 什米	2.582 什米	2.097 什米	2.002 什米
P_s	0.5800	0.5933	85.14	85.16	5.650 hPa	4.867 hPa	3.840 hPa	3.843 hPa

4.4 CPU 时间比较

数值预报由于其巨大的计算量、数据量及严格的时效要求，在有限的计算机条件下节省预报的 CPU 时间是非常现实和有意义的。

我们对变网格 M_v 、均匀细网格 M_f 、均匀粗网格 ($1^\circ \times 1^\circ$) M_c 48 h 预报所需的 CPU 时间进行比较 (表 5)，表明现
行设计的变网格方案，使用的 CPU 时间不到均匀细网格方案的一半，仅相当于均匀粗网格方案的 3 倍左右。这一结果是令人鼓舞的，在不降低预报精度的前提下大大节省了预报时间。

表 5 3 种模式的 CPU 时间 (单位: s) 比较

日期	均匀粗网格 M_c	均匀细网格 M_f	变网格 M_v
1993-05-05	165.2	1002.1	492.4
1995-07-25	163.4	995.5	491.0
1995-11-01	163.5	991.5	488.3
平均	164.0	996.4	490.6

5 结论及存在问题

(1) 在国家气象中心业务运行的有限区球面均匀网格模式的基础上设计了一个有限区变网格模式。使用实际资料对绝热模式进行的数值试验表明变网格模式设计是成功的。模式积分 48 h 在窗口区以外非均匀网格区未出现任何不稳定现象, 均匀细网格区与非均匀网格间也未出现任何不连续现象。

(2) 变网格模式与全场细网格模式的对比试验表明, 对窗口区而言变网格模式预报水平几乎与全场均匀细网格模式预报水平相当。但由于变网格模式网格点数减少了近 55%, 而大大节省了计算机资源。

(3) 目前仅仅是对绝热方案进行了数值试验。在非绝热情况下, 变网格模式中物理过程的引入, 尤其是次网格物理过程参数化方案对水平分辨率的敏感性问题尚有待进一步研究。

参 考 文 献

- 1 廖洞贤, 1997, 一个全球变网格多层原始方程差分模式的设计, 应用气象学报, 8(1), 1~10.
- 2 Staniforth, A. N. and H. L. Mitchell, 1978, A variable-resolution finite-element technique for regional forecasting with the primitive equations, *Mon. Wea. Rev.*, **106**, 439~447.
- 3 张玉玲、郭肖容、闫之辉等, 1990, 十层有限区细网格模式的研究, 中期数值天气预报研究成果汇编(一), 北京: 气象出版社, 152~168.

Design of a Limited-Area Forecast Model with Variable Resolution

Qian Taotao and Guo Xiaorong

(National Meteorological Center, Beijing 100081)

Liao Dongxian

(Nanjing Institute of Meteorology, Nanjing 210044)

Abstract Based on the operational limited-area model with uniform grid interval on sphere in National Meteorological Center (NMC), a limited-area model with variable resolution is designed. In the model the window part is a fine grid with uniform grid interval of 0.5° , but in the part outward the grid interval gradually increases by 0.1° . According to the coordinate-transforming method suggested by Liao Dongxian in 1995, the computations of model equations with variable resolution are all performed in the corresponding computational grid in which all grid intervals are uniform. A comparison is about two adiabatic numerical tests based on real data by the model with variable resolution and the limited-area model with uniform grid interval of 0.5° . The results show that in the window part, the accuracy of forecast with variable resolution model is no less than the fine grid model (0.5°), and its CPU time is saved more than half as the number of grid points is decreased outward the window part.

Key words limited-area model variable resolution uniform resolution CPU time