

# 高分辨有限区模式(HIRLAM)及其在中国的一次应用<sup>\*</sup>

朱禾

(北京气象学院,100081)

**摘要** 文章介绍 80 年代中期由欧洲 7 国(后又有几个国家参加)科技工作者共同完成的一个高分辨有限区模式(HIRLAM),简要说明了它的特点、主要结构和预报模式。最后作者还介绍了 HIRLAM 在中国地区的一次实验。

**关键词** 有限区模式,业务模式,高分辨率模式

## 1 引言

HIRLAM(High Resolution Limited Area Model)是 80 年代中期由欧洲 7 国(丹麦、芬兰、挪威、瑞典、冰岛、荷兰及爱尔兰)学者发起的一项合作研究计划,其后又有西班牙和法国等几个国家的科技工作者参加而共同完成的一个可用于业务预报的高分辨有限区数值模式及相应的有限区客观分析系统,旨在改进各参加国 48 小时以内的短期预报水平。整个计划分为 LEVEL 1 和 LEVEL 2 两个阶段进行<sup>[1]</sup>。项目开始时,首先对世界各国现行的各种有限区域数值模式进行了考察,对各种计算方案进行了大量的对比实验。在此基础上建立起 HIRLAM 系统框架,完成了称之为 HIRLAM LEVEL1 的系统。第 2 阶段的计划从 1989 年开始,1992 年完成了 HIRLAM LEVEL 2 系统,并在丹麦和芬兰投入业务使用,随后又有 3 个欧洲国家逐步开始应用,是目前世界上投入业务应用较广泛且较成功的一个中尺度数值预报模式。HIRLAM 计划的初步建成表明中小国家联合,也可以很好地实现大的目标。本文对该模式及其在我国的初步应用做一简要介绍。

## 2 HIRLAM 的主要特点

2.1 它具有较高的水平和垂直分辨率,并可根据需要进行调整。水平为嵌套可变网格,最小可计算到 4km 的格距;垂直为  $p-\sigma$  混合坐标,将大气分为 31 层。并可以和任何模式作非同步嵌套式计算。

2.2 比较全面地考虑了影响大气变化的多种物理过程,如太阳辐射、湍流交换、地面摩擦、降水过程等。在一般的有限区域模式中,大都不考虑大气对太阳辐射的直接吸收作用;而 HIRLAM 对此有比较详细的考虑,包括短波和长波辐射、散射和云反射。在地表面物理过程中,考虑了地面以下三层土壤温湿变化对大气过程、辐射和降水的影响;并考虑地面反射、温湿分布、海陆差异等对大气及地面热量、动量和水汽交换的影响。在降水预报方面,为强化这一难点工作,HIRLAM 除采用参数化方法外,还采用一种显式方案,即把云中的水份作为一个独立的预报变量来处理。

2.3 HIRLAM 建立之初,通过对国际上现行多种模式的考察,汲取了其他模式的一些长处。其基本框架是采用 Arakawa-C 格

式的二阶原始方程有限差分模式。它所采用的数字化滤波初始化方案以及包括 Shapiro 和隐式的滤波方案,都是近年来数值预报中的最新发展。它的显式降水方案,不同于美国的 MM4,采用的是 Sundqvist(1989)方案。

2.4 该模式可以处理多种形式的资料,可从多方面获取模式的初值和侧边界条件,输入具有不同水平和垂直分布的资料,经该模式判别后自动进行必要的转换。在欧洲地区,ECMWF 发布的全球分析和预报产品都可以为 HIRLAM 所用;并能很方便地利用一个 HIRLAM 的结果作为另一个更高分辨率 HIRLAM 的边界条件,作嵌套式的预报,这不失为一种有限区模式和大尺度模式互利的好方法。

2.5 HIRLAM 的水平坐标是旋转坐标变换的经、纬度网格。这样总能保证模式的计算区域处于新坐标的赤道附近,这样的计算网格变形最小,特别是对高纬度地区,其计算精度最高。

此外,HIRLAM LEVEL 2 对 LEVEL 1 的大部分程序进行了改写,以适应现代并行计算的需要。下面,本文着重对目前在丹麦业务中使用的 HIRLAM LEVEL 2.3 进行简要介绍。

### 3 HIRLAM LEVEL 2.3 系统的主要结构

目前在丹麦气象局使用的 HIRLAM LEVEL 2.3 系统<sup>[2]</sup>,如图 1 所示,主要由以下几部分组成:

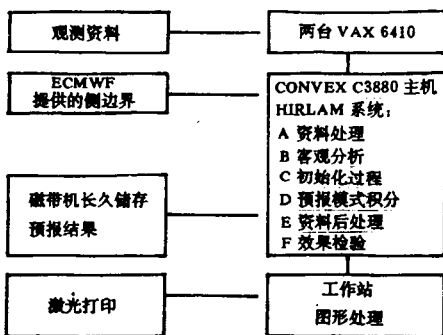


图 1 HIRLAM LEVEL 2.3 系统结构框图

A. 资料预处理:首先是把“BUFER”形式的观测资料转换成客观分析程序所要求的记录格式;处理 ECMWF 的全球预报值,把它们按 HIRLAM 的要求存入一组边界条件文件中,以备使用。

B. 客观分析方案是按照 ECMWF 的全球三维多变量最优插值方法作的有限区域改进。首先分析从 1000hPa 到 10hPa 间各标准等压面上的风、等压面高度、相对湿度和地面气压,然后再内插到模式层。第一估计值采用前 6 小时的预报值,时间窗口取±3 小时。客观分析方案是数值同化的一个步骤。数值同化过程每 6 小时循环一次。

C. 初始化方案有三种选择:第一种是目前业务使用的非线性正规模式(Normal Mode)方法,这是目前普遍采用的一种方法。第二、三种方法包括绝热和非绝热数字滤波,是目前采用的一项新技术。实践表明数字滤波方法可以比正规模式方法从初值中滤除更多噪声<sup>[3]</sup>。但数字滤波方法要利用更多的计算机资源。

D. 预报模式是系统的核心:它采用二阶原始方程有限差分格式并包括了多种物理参数化方案。另外,其他计算技术,如非线性正规模式和数字滤波方法都与模式的动力框架和物理参数化方案有关,下面第 4 节中将作进一步介绍。

E. 资料后处理过程:按预先的给定输出预报结果,必要时要进行模式面到标准等压面的转换。

F. 效果检验:按 EWGLAM (Hall, 1987)<sup>[4]</sup>方法给出预报评分。

## 4 HIRLAM LEVEL 2.3 预报模式

### 4.1 绝热形式的模式方程组

在  $p$ - $\sigma$  坐标上,定义垂直坐标  $\eta(p, p_i)$ :

$$\eta(p, p_i) = A(\eta)/p, (x, y) + B(\eta)$$

$$p = A(\eta) + B(\eta) \times p, (x, y)$$

且  $\eta$  满足:

$$\eta(0, p_i) = 0$$

$$\eta(p_s, p_s) = 1$$

$p_s$  是地面气压,  $A, B$  是一组预先给定的垂直坐标参数(本文中如无特别声明,按气象学常见定义解释)。对于  $A, B$  的不同组合,使垂直坐标在大气底层取  $\sigma$  坐标形式( $A=0, B \neq 0$ ),中间取混合坐标( $A \neq 0, B \neq 0$ ),上层取  $p$  坐标( $A \neq 0, B=0$ )。

水平方向旋转变换的经纬度坐标,首先要重新定义“南、北极”,再按构造地理经纬度的方法,以新的“极点”为准,构造出一组旋转变换的经、纬度坐标。这重新构造的经、纬度坐标总可以使模式积分区域处于新坐标的赤道附近。为一般化起见,可由以下方程组定义在任意的正交曲线( $x, y$ )坐标中,令( $\delta X, \delta Y$ )代表地球上的一段距离,则:

$$\delta X = ah_x \delta x \quad ; \quad \delta Y = ah_y \delta y$$

$a$  为地球半径, ( $h_x, h_y$ ) 为变换因子。实际坐标可以选择直角坐标或经、纬度坐标。如令  $\delta x = d\lambda, \delta y = d\theta$ , 则有  $\delta X = a \cos\theta d\lambda, \delta Y = a d\theta$ 。因此在任意正交曲线坐标中,模式方程组如下:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} &= (f + \xi)v - \eta \frac{\partial u}{\partial \eta} - \frac{R_d T_v}{ah_x} \frac{\partial \ln p}{\partial x} \\ &\quad - \frac{1}{ah_x} \frac{\partial}{\partial x} (\Phi + E) + P_u + K_u \\ \frac{\partial v}{\partial t} &= -(f + \xi)u - \eta \frac{\partial v}{\partial \eta} - \frac{R_d T_v}{ah_y} \frac{\partial \ln p}{\partial y} \\ &\quad - \frac{1}{ah_y} \frac{\partial}{\partial y} (\Phi + E) + P_v + K_v \\ \frac{\partial T}{\partial t} &= -\frac{u}{ah_x} \frac{\partial T}{\partial x} - \frac{v}{ah_y} \frac{\partial T}{\partial y} - \eta \frac{\partial T}{\partial \eta} \\ &\quad + \frac{\kappa T_v \omega}{[1 + (\delta - 1)q]p} + P_T + K_T \\ \frac{\partial q}{\partial t} &= -\frac{u}{ah_x} \frac{\partial q}{\partial x} - \frac{v}{ah_y} \frac{\partial q}{\partial y} - \eta \frac{\partial q}{\partial \eta} \\ &\quad + P_q + K_q \\ \frac{\partial p_s}{\partial t} &= - \int_0^1 \nabla \cdot (\vec{V}_s \frac{\partial p_s}{\partial \eta}) d\eta \end{aligned}$$

预报变量的水平和垂直分布如图 2。水平为跳点分布 Arakawa-C 格式。二阶精度的差分格式满足能量和角动量守恒。系统中大部分程序是按这种任意正交曲线坐标编写

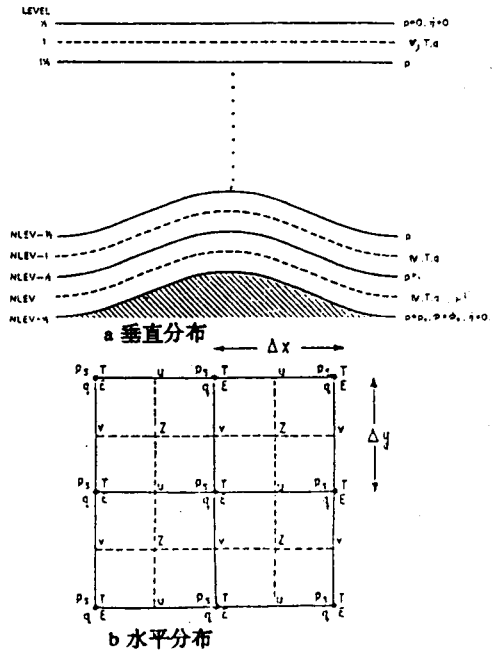


图 2 预报变量的 a 垂直和 b 水平分布图

的。目前在业务系统中采用规则的经、纬度网格,这样可以很方便地与其他各种尺度的模式嵌套,增加资料的利用面。

时间积分,采用目前流行的半隐式格式。最后的结果还要经过时间滤波

$$x_f^n = x^n + \epsilon_f (x_f^{n-1} + x^{n+1} + 2x^n)$$

$\epsilon_f = 0.05$ ,  $x$  代表某一预报量,下标  $f$  代表时间滤波的值。

侧边界条件由 ECMWF 每 6 小时预报提供,并采用松弛法调整边界内点的值

$$x_i^{n+1} = (1 - a)x_i^{n-1} + ax_i^{n+1}$$

$x_b$  为边界上的值,  $x_i$  为边界内点的值,  $a$  为松弛系数

$$a = 1 - \tanh\left(\frac{2}{N - 4j}\right)$$

$N$  为边界区域宽度,一般取 8—10 个点。

### 4.2 水平扩散和滤波

在现代数值模式中,考虑水平扩散的滤波作用要比扩散的物理作用还重要。在高分辨模式中,如何更有效地除去噪声干扰,保证模式的平稳运行和预报结果的有序,更是一个突出的问题。HIRLAM 有四种滤波方法可

供选择:

- 1) 非线性二阶水平扩散(目前业务模式使用)
- 2) 线性四阶水平扩散
- 3) Shapiro 滤波
- 4) 隐式(Roymond)滤波

在选择滤波方法时,模式中不包括扩散项的作用。

4.2.1 非线性二阶水平扩散为以下形式:

$$K_x = K(\eta) |\nabla^2 X^{n-1}| |\nabla^2 X^{n-1}$$

$X$  代表预报变量( $u, v, T, q$ ),  $n$  代表时间,  $K(\eta)$  为扩散系数。

4.2.2 线性四阶水平扩散格式:在滤波方面被认为更具有尺度选择性。

$$K_x = -K \nabla^4 X^{n-1}$$

$K$  为扩散系数,取为常数。

以上两种方法,在陡峭地形处,对温度和湿度将会造成一种不真实的扩散作用。改进方法是把温度和湿度订正到等压面上,然后再进行扩散。线性四阶水平扩散的响应函数为:

$$R(L) = 1 - \frac{32K\Delta t}{\Delta x^4} \sin^4\left(\frac{\pi\Delta x}{L}\right)$$

$L$  为波长。  $K$  值的选取,应考虑在 30 分钟内  $2\Delta x$  的波能被衰减到  $1/e$ 。

4.2.3 Shapiro 滤波:其原理与线性四阶水平扩散基本相似,它也是采用一个四阶拉普拉斯算子,但是作用于  $n+1$  时刻。因此它的滤波效果与四阶水平扩散一样,都不能完全滤除  $2\Delta x$  的波。因此当模式中噪声的增长大于滤波作用时,必然会产生计算不稳定,特别是对于大地形处,就会变得特别突出。

4.2.4 隐式(Roymond)滤波:不同于上述方法,它预先设定  $R(0)=1$  和  $R(2\Delta x)=0$ 。比较图 3 中四阶水平扩散和隐式滤波的响应函数曲线,可以看出,隐式滤波每一步都可以完全滤除  $2\Delta x$  的波,并且对长波的衰减也比四阶水平扩散要小。另外,它还可以通过调整参数  $\epsilon$ ,来改变带通滤波的宽度。

### 4.3 物理过程参数化

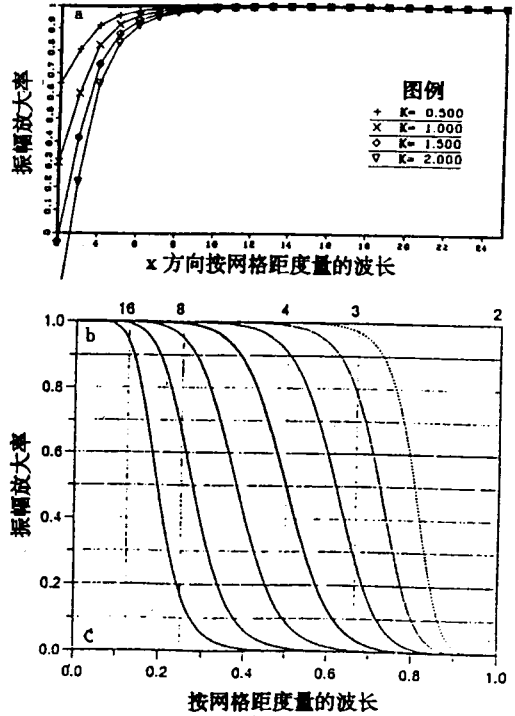


图 3 4 阶线性水平扩散(上图)和 6 阶隐式滤波(下图)响应函数

模式方程组中的  $p_x$  项,代表了次网格尺度物理过程的影响。这主要是通过参数化方法引入的。HIRLAM 的参数化方案是在 ECMWF 的基础上发展起来的,而 ECMWF 在这方面具有公认的成功经验,主要包括:

4.3.1 辐射过程:辐射过程包括两部分:短波和长波辐射。从顶层开始,计算每一层的短波和长波辐射加热率,代入温度方程,对温度的动力倾向作调整。

短波辐射分为吸收和散射两个过程,吸收和散射是光路径上水汽和大气质量的函数,并考虑日变化。太阳辐射的反射,主要受云和地面的影响,它与云的类型、太阳俯角和地面反照率有关。

长波辐射分为有云和晴空两种情况。加热/冷却率是温度廓线的函数。云和地面的长波辐射采用较简单的公式,辐射量与物体的温度及云厚成正比。

与其他中尺度模式相比,可以看出:其它

模式往往只考虑地面的辐射吸收,而不考虑大气的直接辐射吸收。

4.3.2 垂直扩散:垂直扩散主要是考虑湍流造成的动量、热量和水汽的垂直输送作用。湍流效应的计算分作两种情况:1)从地面到模式的最低层,称为近地面层。在这一层中湍流效应的计算是由湍流拖曳系数决定的。而湍流拖曳系数是静力稳定性和地面粗糙度的函数。地面粗糙度,在海上按 Charnock 公式计算;在冰面上取为常数;在陆地上由植被覆盖、城市化率等因子决定;2)在模式的最低层以上,湍流效应的计算是按照混合长度理论计算的。湍流交换系数是 Richardson 数和混合长度的函数。模式中通过引入修订的 Richardson 数,引入浅对流效应,这样可以避免在某些情况下,对行星边界层的湍流量估计不足。比如,在缺少浅对流时,海面上计算的大尺度下沉区中行星边界层过浅,且含有过多的水份。

4.3.3 降水过程:在目前的 HIRLAM 中,主要有两种算法,一种是参数化方法,采用的是当前国际上通用的郭晓岚方案,并做为业务模式使用;另一种是显式算法,采用 Sundquist(1989)提出的方案。整个降水过程从检查网格柱上的稳定度开始,把云中的水份作为一个独立的预报变量处理。如果满足条件不稳定,由对流作用将形成对流云;否则只有当柱内湿度超过某一指标时,才有可能形成层状云。

对于对流云,需要用以下方程计算云中水汽的变化:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = A_T + \xi(T_c - T) - \frac{L}{C_p} \xi H_m$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} = \xi H(q_c - q) + \xi H_m$$

$$\frac{\partial m}{\partial t} = A_m + \frac{C_t}{L} \xi(T_c - T) - \xi H_m - P$$

对于层状云

$$\frac{\partial T}{\partial t} = A_T + \frac{L}{C_p} Q - E_0$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} = A_q - Q + E_0$$

$$\frac{\partial m}{\partial t} = A_m + Q - (P - E_r) - E_0$$

$m$  为云中水份含量,  $A$  项代表除凝结之外其它过程所造成的影响,  $q_c, T_c$  代表云内湿绝热变化量, 而  $T, q$  为环境中相应的量,  $H$  是网格平均相对湿度的函数,  $\xi$  是与郭晓岚方案有关的参数,  $F$  为降水率,  $E_0$  为总蒸发率,  $E_r$  为降水蒸发率,  $Q$  为水汽凝结率。

加上一些其他微物理过程,就可以计算云中水汽变化情况。目前这种方案虽未在业务中使用,但许多研究表明,这种方案比郭晓岚方案预报的雨量更接近实况,准确率较高。

作者用中国例子作的计算也表明<sup>[5]</sup>,采用显式方案计算的结果,雨区的预报比较准确,雨量亦更接近实况。

4.3.4 地表面物理过程:地表面物理过程参数化主要用于决定地表面温度、土壤水份含量的变化率。采用三层模式,其中、上两层的温度、含水量受辐射、潜热、降水等过程的影响将发生变化,最下层的量采用气候平均值。

$$\frac{\partial T_i}{\partial t} = \frac{1}{\rho_i C_i D_i} \sum_j \Phi_j + \frac{\kappa_0(1 - K_m F_m)(T_d - T_i)}{0.5 D_1(D_1 + D_2)}$$

$$\sum_i \Phi_i = \Phi_r + \Phi_s + \Phi_q$$

$$F_m = \min\{H_m/H_{mc}, 1\}$$

$T_s, T_d$  为地表和第二层的温度,  $T_{scli}$  为第三层的温度,  $D$  是代表层的深度,  $F_m$  是雪覆盖率,  $\Phi_r, \Phi_s, \Phi_q$  分别代表净辐射、感热和潜热通量,其它为常量。土壤水份由下式计算:

$$\frac{\partial W_s}{\partial t} = (1 - F_m)\Phi_q + P_m + M_m$$

$$+ \frac{(W_d - W_s)\lambda}{0.5 D_1(D_1 + D_2)}$$

$$\frac{\partial W_d}{\partial t} = - \frac{(W_d - W_s)\lambda}{0.5 D_2(D_1 + D_2)} + \frac{(W_{scli} - W_d)\lambda}{D_2 D_3}$$

$W_s, W_d$  和  $W_{scli}$  分别代表地表、第二层和第三层的含水量;  $P_m$  为降水量;  $M_m$  是雪深变化;

其它为常量。

模式中引入两个参数  $F_{land}$  和  $F_{ice}$ , 分别表示网格点所占陆地的比率和冰面覆盖率。当  $F_{land} + F_{ice} > 0$  时, 才考虑地表面物理过程。T, 在整个过程中保持不变。

为计算整个物理过程参数化, 需要输入许多气候场资料, 这可以通过预先运行一个气候系统产生。而当模式的积分区确定下来后, 这些资料只需计算一次。

## 5 HIRLAM 在中国地区的应用

经常出现于我国长江和淮河流域的梅雨, 常会造成较大范围和较长时间的暴雨/洪水灾害, 但能提供很有益的水资源, 是我国重要的一种天气过程。许多研究表明, 这种雨带的形成和维持与北半球行星风带的季节调整、副热带高压的变动、东亚季风等一些大尺度系统和大气环流的变化密切相关。同时, 梅雨锋降水又与极锋降水和强对流性降水很不相同, 它既具有明显的中尺度特征又具有对流性和混和性云的降水特点。这既为准确预报这种降水增加了难度, 但也非常具有典型性意义。因此, 作者以江淮梅雨来进行 HIRLAM 在中国地区应用的首选实验。

### 5.1 模式积分区的选择

如上所述, 对于梅雨的数值模拟和预报, 既需要高分辨率的中、小尺度模式, 又需要考虑大尺度环流的影响。为此, 如图 4 所示, 在约  $20^{\circ}$ — $40^{\circ}$ N,  $72^{\circ}$ — $120^{\circ}$ E 区间, 作者选择了三个不同的积分区域: 最外面的一个水平分辨率是  $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$  经纬距; 中间的实线和虚线框分别是两个  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$  经、纬度距的水平分辨率区; 这三个区在垂直方向上均分为 31 层。简称大模式、中模式和小模式。大模式的侧边界条件由 ECMWF 每 6 小时的分析资料提供; 而中模式和小模式的侧边界条件则由大模式的每 6 小时预报供给。模式中的地形高度通过作者下一节的工作, 最高可到 6100 米。

### 5.2 青藏高原地形影响的改进研究

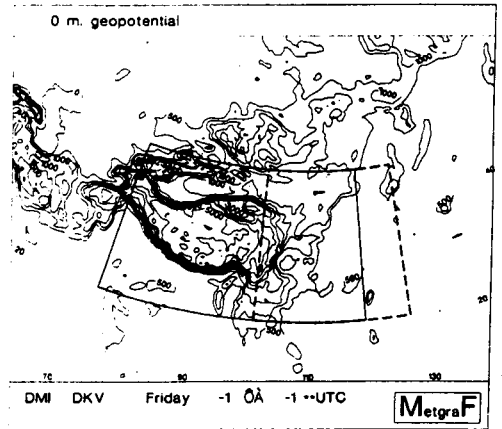


图 4 大、中、小模式的不同积分区. 整个图代表大模式积分区域, 内部实线框代表中模式积分区域, 虚线框为小模式积分区域

HIRLAM 移植到中国地区应用时, 青藏高原所造成的影响是我们需要解决的一个首要问题。尤其是在我们所选择的计算区内, 包括了整个青藏高原, 它在其中所占的面积相对较大, 影响重大。而在欧洲, 由于没有这么高大的“世界屋脊”, 这些问题并不存在。这主要包括以下两方面的问题:

1) 由于水平分辨率的提高, HIRLAM 模式中各格点所反映出的青藏高原地形高度明显高于一般的大、中尺度模式。而且, 分辨率越高, 这种差异越明显, 计算的难度也就越大。这主要是由于模式中, 短波能量增长过快致使计算不稳定所造成的。这除了消除不稳定性计算的难度大为增加外, 还使散度场表现得非常杂乱。但在欧洲地区, 问题要简单得多; 特别是在平坦的下垫面区, 甚至可以在不作任何扩散或滤波处理的情况下运算。为此, 作者进行了多项试验与探讨。发现采用 Raymond 隐式滤波的效果最佳, 它对控制模式中的噪声发展、保证计算稳定等起到了很好效果。而这种滤波方法所存在的主要问题是计算工作量大, 约为其他方法的两倍。

2) 由于原模式主要考虑欧洲地区的情况, 故当模式包含有如青藏高原这样的大地形时, 便会产生如图 5a 所示的初值计算误

差。这种误差会在客观分析和处理由 ECMWF 预报提供的模式边界时产生。经多次计算分析, 作者认为问题的产生是由于模式处理不同的垂直坐标转换时, 由地面气压的垂直订正所造成的。

订正时采用静力关系, 且假设地面附近虚温按:

$$T_v = B \ln p + C$$

$B$  和  $C$  是常数, 由最小二乘法获得。再积分静力方程:

$$\Phi_s^{ec} - \Phi_s^{hir} = - \int_{\hat{p}_s^{hir}}^{p_s^{ec}} R_d T_v d \ln p$$

上标  $ec$  和  $hir$  分别代表 ECMWF 和 HIRLAM 的量, 下标  $s$  代表地面的量,  $\hat{p}_s^{hir}$  是  $p_s^{hir}$  的估计值, 下标  $*$  代表的量是与  $\Phi_s^{hir}$  最近

一层的量, 且:

$$\Phi_s^{ec} > \Phi_s^{hir}$$

当  $B=0$  时:

$$\ln \hat{p}_s^{hir} = \ln p_s^{ec} + (\Phi_s^{ec} - \Phi_s^{hir}) / R_d C$$

当  $B \neq 0$  时:

$$\ln \hat{p}_s^{hir} = \frac{-C}{B} + \frac{\sqrt{C^2 + B[B(\ln p_s^{ec})^2 + 2C \ln p_s^{ec} + 2(\Phi_s^{ec} - \Phi_s^{hir})]}}{B}$$

由  $\hat{p}_s^{hir}$  确定各模式面的坐标, 然后把 ECMWF 的预报场内插到各模式面上。ECMWF 的预报场代表任意一种与 HIRLAM 的坐标不同的资料。最后要订正  $\hat{p}_s^{hir}$  的值, 原理是使某一等压面 ( $P_l$ ) 到地面间, 由 ECMWF 和 HIRLAM 计算的大气质量平衡。

$$\hat{p}_s^{hir} = \hat{p}_s^{ec} \exp\left(\frac{\Phi^{ec}(P_l) - \Phi^{hir}(P_l)}{R_d T_{VN}^{hir}}\right)$$

$T_{VN}^{hir}$  是模式最下面的虚温。

原模式将 ( $P_l$ ) 定为 500hPa, 这在处理超过 5500 米以上的地形时就会产生误差。经作者的计算, 把 ( $P_l$ ) 改定在 300hPa。这样计算的效果如图 5b 所示。初始场得到了很大的改进, 这就可以采用高分辨率 (水平分辨率为  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  经纬距, 垂直 31 层) 的模式来模拟包括整个青藏高原区域的天气变化情况。

由此作者运用经过上述修订的 HIRLAM, 对我国江淮流域 1991 年严重洪涝期的特大暴雨过程进行了实例计算, 得到了比较理想的结果。揭露了过去在其他分析中未揭示出的若干新的中尺度特征以及特大暴雨形成的机理。详见另文<sup>[5]</sup>。

此外, 通过一些对比研究, 我们看到 HIRLAM 从形势预报到一些具体的要素预报都有较高的准确率, 许多可用于中尺度分析的指标和参数如切变线、涡度、水汽、 $\theta_e$  分布等, 在该模式中均有较好的预见性。如图 6a、b、c、d。

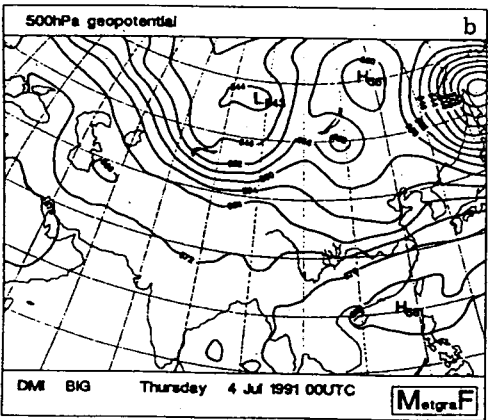
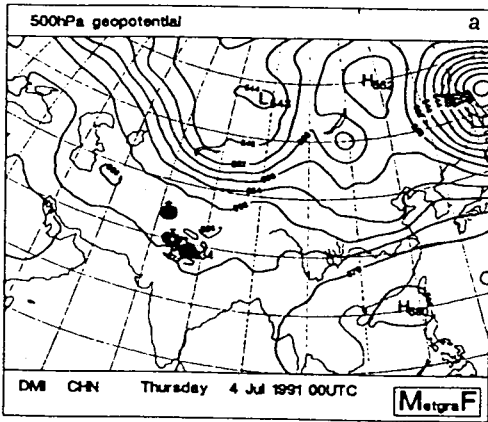


图 5 a. 改进前的 500hPa 位势图, 青藏高原为黑色区 1991. 7. 4. 000UTC; b. 改进后的 500hPa 位势图 1991. 7. 4. 000UTC

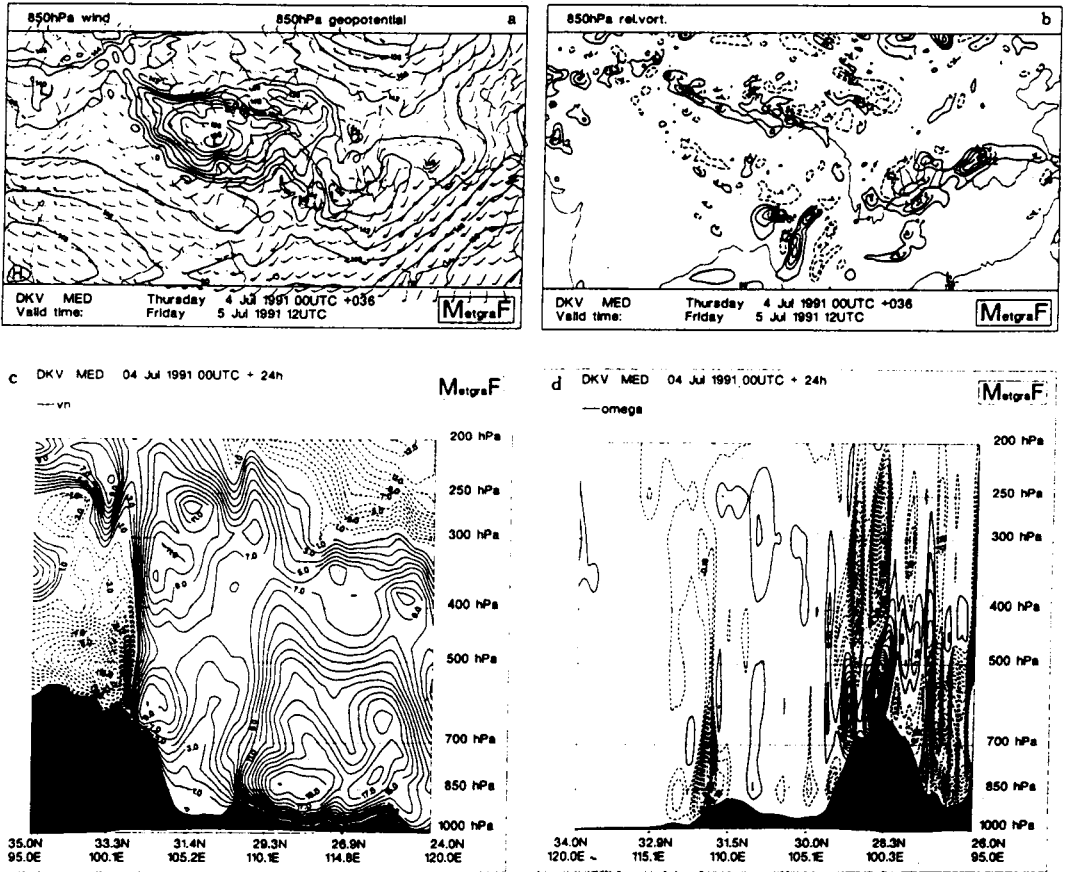


图6 HIRLAM 预报图。(a)1991年7月5日12UTC,850hPa位势高度和风场(36小时预报);(b)1991年7月5日12UTC,850hPa相对涡度(36小时预报);(c)1991年7月5日00UTC,垂直于剖面的风场(24小时预报);(d)1991年7月5日00UTC,垂直速度场剖面(24小时预报)

## 6 结束语

综上所述,可以看出 HIRLAM 所考虑的物理过程比较全面,其计算方法也很有特点,且业务应用较多。目前,在欧洲有许多国家参加 HIRLAM 计划的进一步研究,是国际上比较先进的一个高分辨率数值模式。对于中国,目前的大尺度模式是采用的 ECMWF 方法,因此也有条件实施 HIRLAM 模式。此外,通过我们的移植与初步应用研究表明这一模式可以在我国更复杂的地形区应用,并可在“暴雨”这一预报的难点问题上进行较细致的中尺度机理研究或业务应用。

## 参考文献

- 1 Nils Gustafsson. HIRLAM 2 FINAL REPORT, HIRLAM Technical Report No. 9. Norrköping, March 1993, 126pp
- 2 Bent Hansen Sass. The DMI Operational HIRLAM Forecasting System Version 2.3—A Short Summary. Copenhagen, Denmark; Danish Meteorological Institute, 1994; 10
- 3 Xiang-Yu Huang, Annette Cederskov, Erland Kallen. A Comparison between Digital Filtering Initialization and Nonlinear Normal-Mode Initialization in a Data Assimilation System. Monthly Weather Review, 1994, 122: 1001—1015
- 4 Hall C D. A Common Verification Scheme for Limited Area Models. LAM Newsletter, December, 1987. EWGLAM, United Kingdom Meteorological Office (UKMO)
- 5 朱禾. 雨洪系统的中尺度研究及其应用前景. 资源环境与持续发展战略, 中国环境科学出版社, 1995: 525—529