

# 国家气象中心准业务有限区客观分析方案\*

朱宗申 汪厚君 张跃堂

(国家气象中心,北京,100081)

## 提 要

介绍了国家气象中心准业务有限区客观分析、预报系统的分析方案\*\*。采用三维最优插值方法,水平方向是 $1.875^{\circ} \times 1.875^{\circ}$ 经纬度网格,在1000hPa至50hPa12层标准等压面进行高度和风分量的多变量分析,在最低6层标准等压面进行相对湿度的单变量分析。检验表明,该方案为有限区预报模式提供了较好的初值分析场。

## 一、引 言

国家气象中心准业务有限区分析、预报系统于1990年9月10日联机运行<sup>[1]</sup>。该系统的分析方案(以下简称新方案)比1980年7月正式向全国发送产品的区域分析方案<sup>[2]</sup>(简称A方案,已于1983年5月停止使用)以及1982年6月投入业务的有限区分析方案<sup>[3]</sup>(简称B方案)有很大改进。首先,新方案采用Gandin<sup>[4]</sup>提出的最优插值方法,而前两种方案都是Cressman的逐步订正方法<sup>[5]</sup>。最优插值方法,可使更多种类的观测资料用于分析中。另外,分析的网格分辨率明显增大,风场和高度场使用多变量分析,在准地转约束条件下,高度和风的分析更为协调。

## 二、分析网格

新的有限区分析、预报系统中,预报模式在水平方向采用 $1.875^{\circ} \times 1.875^{\circ}$ 的经纬度网格,共1107个格点(沿纬圈41个,沿经圈27个)。分析和预报模式一样,在水平方向取 $1.875^{\circ} \times 1.875^{\circ}$ 经纬度网格。由于预报变量分布是Arakawa的C格式<sup>[6]</sup>,而分析中所有变量在相同网格点上进行,所以高度和相对湿度的水平分析格点和预报模式相同,纬向风速和经向风速的水平分析格点和预报模式相差半个格距。为了形成风场预报初值,分析的水平网格比预报模式向北和向东分别扩大一个纬圈和经圈,共有1176个格点( $42 \times 28$ )。分析区为 $15.0^{\circ} - 65.625^{\circ}N, 69.375^{\circ} - 146.25^{\circ}E$ ,图1给出分析区域和水平网格。预报模式

1991年4月27日收到,7月5日收到修改稿。

\* 本项工作由75-09-01课题资助。

\*\* 该方案已于1992年3月21日在国家气象中心正式投入业务使用。

的垂直坐标采用 15 层  $\sigma$  面结构,分析仍在标准等压面进行,高度和风在 1000hPa 至 50hPa 的 12 层标准等压面,相对湿度在 300hPa 及以下 6 层标准等压面。

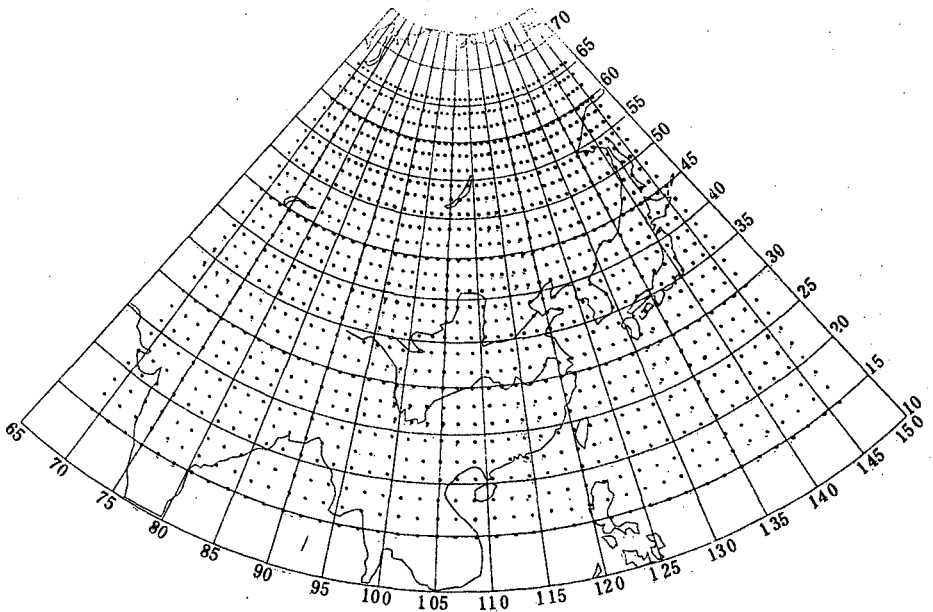


图 1 分析区域和水平网格

表 1 国家气象中心三种分析方案的分析变量和网格结构比较

方案	分析变量	分析网格	
		水 平	垂 直
A 方案	高 度	300×300(km)	1000、850、700、500、300hPa
B 方案	海平面气压、高度、纬向和经向 风速、温度露点差	381×381(km)	海平面和 1000、850、700、500、 300、200、100hPa
新方案	高度、纬向和经向风速、相对湿度	1.875°×1.875°	1000、850、700、500、400、300、 250、200、150、100、70、50hPa

表 1 给出国家气象中心先后使用的三种区域和有限区分析方案的分析变量和网格结构。可以看到,新方案的水平和垂直分辨率比以前的方案明显增大。

### 三、资料来源

表 2 给出国家气象中心上述三种分析方案的资料使用情况。新方案采用最优插值方法,可以比较合理地使用具有不同观测误差的资料,所以有多种观测资料应用于新分析方案。它们包括 1000hPa 至 50hPa 的高空压、温、湿和风的报告(TEMP),高空风报告(PILOT),地面天气观测报告(SYNOP 和 SHIP),浮标观测报告(DRIBU),卫星遥感高空压、温、湿探测报告(SATEM),卫星观测风、地面温度、云、湿度和辐射报告(SATOB),飞机高空报告(AIREP)等。目前 TEMP 和 PILOT 的特性层资料尚未使用。来自 GTS 的分析时刻(每天 0000GMT)前后 3 小时内观测的资料用于分析,它们从国家气象中心的资料要素库中读取,资料截止时间为 0430GMT。

表 2 国家气象中心三种分析方案中资料使用情况

观测种类	A 方案	B 方案	新方案
TEMP	高度、风	高度、风、湿度	高度、风、湿度
PILOT	风	风	风
SYNOP 和 SHIP		海平面气压	海平面气压或测站气压、温度、风、湿度
DRIBU			海平面气压、温度、风
SATOB		风	风
SATEM			厚度
AIREP		风	风

## 四、最优插值分析

### 1. 最优插值分析方程

采用通常使用的最优插值分析方程:

$$\frac{A_k^a - A_k^o}{E_k^a} = \sum_{n=1}^N W_{kn} \frac{A_n^o - A_n^g}{E_n^g} \quad (1)$$

式中,  $A$  表示任一标量高度( $z$ )、纬向风速( $u$ )、经向风速( $v$ )或相对湿度( $q$ ),  $W$  是每个观测的分析权重,  $E$  是变量的估值均方根误差。上标  $a, g, o$  分别表示分析值、初估值和观测值, 下标  $k$  和  $n$  表示分析格点和观测点。  $N$  是分析格点周围三维气柱内选取用于分析的观测资料数目。

使最优插值分析误差最小, 得到求解(1)式中观测资料权重的  $N$  个线性方程:

$$\sum_{m=1}^N (\mu_{mn} + \varepsilon_n^o \eta_{mn} \varepsilon_n^o) W_{km} = \mu_{kn} \quad (n = 1, N) \quad (2)$$

式中, 下标  $m, n$  表示观测点,  $k$  是分析格点;  $\mu$  表示初估值误差相关,  $\eta$  表示观测误差相关,  $\varepsilon^o$  是用初估值均方根误差归一化后的观测均方根误差:

$$\varepsilon^o = \frac{E^o}{E^g} \quad (3)$$

当  $\mu, \eta$  和  $E^o, E^g$  的统计特征已知后, 根据式(2)、(3)求得权重  $W$ , 再由观测值和初估值及式(1), 即可得到分析格点  $k$  上的最优插值分析值  $A_k^a$ 。

### 2. 初估场

公式(1)表示格点分析值由初估值和归一化的观测余差(观测和初估值的差)的线性组合之和求得。方案中的初估值由国家气象中心半球谱模式 T42L9(三角截断球谐函数波数为 42、垂直分层为 9 层)的 12 小时预报结果提供。根据谱模式高斯格点上模式层的 12 小时预报温度, 计算中间层高度, 用  $\ln p$  的二次拉格朗日插值方法垂直插值得到 1000hPa 至 50hPa 的 12 层标准等压面的高度。模式预报的纬向、经向风速和相对湿度, 用  $\ln p$  的一次拉格朗日多项式公式插值到标准等压面。然后, 在水平方向把这些变量双线性插值到  $1.875^\circ \times 1.875^\circ$  经纬度有限区分析格点, 观测点的初估值由分析格点上的初估值用双线

性插值计算得到。

### 3. 初估值(预报)误差相关和估值均方根误差

初估值误差相关  $\mu_{mn}$  定义为水平相关  $\rho_{mn}^h$  和垂直相关  $\rho_{mn}^v$  乘积:

$$\mu_{mn} = \rho_{mn}^h \times \rho_{mn}^v \quad (4)$$

#### (1) 水平相关

高度预报误差水平自相关采用通常使用的高斯函数形式:

$$\rho_{mn}^h(z, z) = \exp(-0.5 \times \frac{S_{mn}^2}{L^2}) \quad (5)$$

式中,  $L^2$  是高度自相关的水平尺度参数, 决定高度预报误差相关随水平距离的衰减程度,  $S_{mn}$  是点  $m$  和  $n$  间的水平距离, 用下式计算

$$S_{mn} = R[(\lambda_m - \lambda_n)^2 \cos^2(\frac{\varphi_m + \varphi_n}{2}) + (\varphi_m - \varphi_n)^2]^{1/2} \quad (6)$$

其中  $R$  是地球半径,  $\lambda$  是经度,  $\varphi$  是纬度。

高度和风、风和风之间的预报误差水平相关, 通过准地转假设用高度预报误差自相关函数表示, 反映高度和风的预报误差场受地转约束。但是, 高度和风的分析结果并不要求是地转的。这些变量间的预报误差水平相关函数分别为:

$$\begin{aligned} \rho_{mn}^h(z, u) &= -\frac{R}{2L^2} [(\lambda_m - \lambda_n)^2 \cos(\frac{\varphi_m + \varphi_n}{2}) \sin(\frac{\varphi_m + \varphi_n}{2}) + 2(\varphi_m - \varphi_n)] \rho_{mn}^h(z, z) \\ \rho_{mn}^h(z, v) &= \frac{R}{\cos\varphi_n L^2} (\lambda_m - \lambda_n) \cos^2(\frac{\varphi_m + \varphi_n}{2}) \rho_{mn}^h(z, z) \\ \rho_{mn}^h(u, z) &= \frac{R}{2L^2} [-(\lambda_m - \lambda_n)^2 \cos(\frac{\varphi_m + \varphi_n}{2}) \sin(\frac{\varphi_m + \varphi_n}{2}) + 2(\varphi_m - \varphi_n)] \rho_{mn}^h(z, z) \\ \rho_{mn}^h(v, z) &= -\frac{R}{\cos\varphi_m L^2} (\lambda_m - \lambda_n) \cos^2(\frac{\varphi_m + \varphi_n}{2}) \rho_{mn}^h(z, z) \\ \rho_{mn}^h(u, u) &= \left\{ \frac{1}{4} (\lambda_m - \lambda_n)^2 [\cos^2(\frac{\varphi_m + \varphi_n}{2}) - \sin^2(\frac{\varphi_m + \varphi_n}{2})] + 1 + \frac{R^2}{4L^2} [(\lambda_m - \lambda_n)^4 \times \right. \\ &\quad \left. \cos^2(\frac{\varphi_m + \varphi_n}{2}) \sin^2(\frac{\varphi_m + \varphi_n}{2}) - 4(\varphi_m - \varphi_n)^2] \right\} \rho_{mn}^h(z, z) \quad (7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rho_{mn}^h(u, v) &= -\frac{1}{\cos\varphi_n} \left\{ -(\lambda_m - \lambda_n) \cos(\frac{\varphi_m + \varphi_n}{2}) \sin(\frac{\varphi_m + \varphi_n}{2}) + \frac{R^2}{2L^2} (\lambda_m - \lambda_n) \right. \\ &\quad \left. \cos^2(\frac{\varphi_m + \varphi_n}{2}) \times [(\lambda_m - \lambda_n)^2 \cos(\frac{\varphi_m + \varphi_n}{2}) \sin(\frac{\varphi_m + \varphi_n}{2}) - 2(\varphi_m - \varphi_n)] \right\} \rho_{mn}^h(z, z) \end{aligned}$$

$$\rho_{mn}^h(v, v) = \frac{1}{\cos\varphi_m \cos\varphi_n} \left[ \cos^2(\frac{\varphi_m + \varphi_n}{2}) - \frac{R^2}{L^2} (\lambda_m - \lambda_n)^2 \cos^4(\frac{\varphi_m + \varphi_n}{2}) \right] \rho_{mn}^h(z, z)$$

$$\begin{aligned} \rho_{mn}^h(v, u) &= -\frac{1}{\cos\varphi_m} \left\{ (\lambda_m - \lambda_n) \cos(\frac{\varphi_m + \varphi_n}{2}) \sin(\frac{\varphi_m + \varphi_n}{2}) - \frac{R^2}{2L^2} (\lambda_m - \lambda_n) \right. \\ &\quad \left. \cos^2(\frac{\varphi_m + \varphi_n}{2}) \times [(\lambda_m - \lambda_n)^2 \cos(\frac{\varphi_m + \varphi_n}{2}) \sin(\frac{\varphi_m + \varphi_n}{2}) + 2(\varphi_m - \varphi_n)] \right\} \rho_{mn}^h(z, z) \end{aligned}$$

湿度的预报水平相关取非各向同性。考虑风的影响, 沿风矢方向的资料比与风矢垂直

方向的资料具有更大的相关值,其表示为:

$$\rho_{mn}^A(q, q) = \exp(-0.5 \times \frac{S_{mn}^2}{L^2}) \quad (8)$$

其中  $L^2$  是水平尺度参数,  $S_{mn}$  是距离参数, 表示为:

$$S_{mn}^2 = A \times dx^2 + dy^2 \quad (9)$$

式中,  $A = \frac{1}{[1 + K \times (U^2 + V^2)]}$ ,  $K$  是比例因子, 取经验值,  $U$  和  $V$  是分析格点的纬向和经向分析风速,  $dx$  是连接点  $m$  和  $n$  的线段沿风矢方向的水平投影,  $dy$  是沿风矢垂直方向的水平投影。

## (2) 垂直相关

预报误差垂直相关采用如下形式<sup>[7]</sup>:

$$\rho_{mn}^z = \frac{1}{1 + K_p \ln^2(\frac{p_m}{p_n})} \quad (10)$$

式中,  $p_m$  和  $p_n$  分别是点  $m$  和  $n$  所在层的气压;  $K_p$  是垂直尺度参数, 对于高度和风目前取相同值, 对于湿度在大气层结不稳定时随不稳定度增加线性减小。

高度预报估值均方根误差由经验给出。如果高度预报误差和风预报误差的准地转假设一旦成立, 当高度预报误差相关函数和估值均方根误差确定后, 风的估值均方根误差也就得到。高度、风和湿度预报的估值均方根误差制表贮存, 计算时随时提取。

## 4. 观测误差相关和估值均方根误差

对于同一个 TEMP 和 PILOT 观测的高度、风或湿度垂直廓线资料, 认为分别是垂直相关的。对于 SATEM 观测的垂直廓线资料, 进行卫星区别, 不同卫星的观测认为互不相关, 相同卫星的观测在水平和垂直方向都取相关。其它类型的观测, 它们自相关  $\eta_{mn}$  取  $\delta_{mn}$  形式 ( $\delta_{mn}$  为 Kronecker 数,  $m=n, \delta_{mn}=1; m \neq n, \delta_{mn}=0$ )。至于不同类型的观测资料之间, 均互不相关。

SATEM 的一种观测变量是参考层 (1000hPa) 到各标准等压面间的厚度。把 1000hPa 初估场高度作为参考层高度和 SATEM 厚度资料相加, 构成新的“合成”高度资料用于分析<sup>[8]</sup>。根据 SATEM 观测厚度和 1000hPa 高度初估值 (预报) 的误差相关和估值均方根误差, 在观测和初估值互不相关假设条件下, 计算“合成”高度的观测误差相关和估值均方根误差。

TEMP 观测的高度、风、湿度和 SATEM 观测的厚度的观测误差相关值, 以及所有观测的估值均方根误差制表贮存。

## 5. 观测质量控制和分析资料选取

在最优插值分析前, 对观测资料进行质量检查, 它包括两个步骤, 和国家气象中心全球资料的质量控制方案<sup>[9]</sup>相同。首先对观测余差进行极值检查, 当余差的绝对值大于检验判据 I 时, 删除这些资料; 小于检验判据 II 时, 保留这些资料; 在判据 I—II 之间时, 作为可疑资料在下一步水平一致性检查时作进一步检验。一致性检查在一定区域范围内对每

个观测资料进行,但湿度资料不做这种检查。采用二维单变量方式,其判据 DFMAX 是每对资料间初估值误差相关 FECOR 的函数( $DFMAX = |3.5 - 2.5 \times FECOR|$ )。把每一对观测余差的差值,用初估值均方根误差归一化,再和检验判据比较,并根据观测类型和质量码对观测赋予保留或删除的标志。全部观测检验后,按每个观测保留或删除标志的总数,最后确定该观测的留删。

根据观测和分析格点间的高度预报误差相关和观测误差的函数值,最多选取 20 个相关值大,观测误差小的资料用于高度和风的分析。同样根据观测和分析格点间的湿度预报误差相关和观测误差的函数值,一般最多选取 8 个湿度资料。但在湿度资料相对分析格点分布不均匀时,为提高最优插值分析精度,允许在没有选择到资料的方位增补资料,使湿度分析资料最多可达 11 个<sup>[10]</sup>。

## 6. 分析

高度和经向、纬向风速的最优插值分析采用三维多变量方法,即分析其中任一变量时,可以使用高度、经向风速、纬向风速和厚度四种类型观测资料。为了尽可能使高度场和风场间平衡,在每个格点分析高度和风场时,选取相同的观测资料组合。相对湿度采用三维单变量分析。

首先计算公式(2)左端每对观测点间的  $\mu$ 、 $\eta$  和  $\varepsilon$ ,以及右端观测点和分析格点间的  $\mu$ 。然后用共轭梯度法叠代求解线性方程组,得到权重系数  $W$ 。最后,由式(1)求得格点分析值。

沿水平分析网格,从南向北从西向东逐一自下而上进行高度和风的分析。在一个格点完成其 12 层标准等压面的分析之后,进行同一格点最低 6 层标准等压面的湿度分析。然后,再进行下一格点的分析,直到全部格点分析完毕。

## 7. 预报模式格点初值的形成

计算预报模式  $\sigma$  坐标系网格点上变量值时,需要地形高度。在准业务有限区分析、预报系统中使用相同的  $1.875^\circ \times 1.875^\circ$  经纬度地形场,它们由国家气象中心全球谱模式所使用的  $1^\circ \times 1^\circ$  经纬度地形场用双线性插值获得。

根据静力学关系和气压对数的一次拉格朗日多项式公式,由标准等压面的高度求得标准等压面的温度。假设高度是气压对数的二次函数,由标准等压面高度、温度和地形高度得到地面气压,并推算预报模式  $\sigma$  坐标。最后,把标准等压面分析的经向、纬向风速和相对湿度线性插值到模式  $\sigma$  层。同样假设高度是气压对数的二次函数,把高度插值到预报模式  $\sigma$  面中间层,并由静力学关系推得模式  $\sigma$  面层温度。上述计算均在预报模式质量场的水平网格点进行。风场的模式网格点值和湿度比湿变量的转换,则在初值化时完成。

图 2 给出本方案计算的主要流程(见下页)。

## 五、检验结果

自 1990 年 9 月 10 日国家气象中心准业务有限区分析、预报系统运行至今(除 10 月 9

日—20 日系统使用的 M—360 计算机维修停机和半球谱模式未能及时提供分析初估场外), 每天给出稳定、合理和协调的分析结果。在试验前期(10 月 27 日前), 由未经初值化的分析场直接作为预报模式的初值, 48 小时预报计算仍稳定, 且比较合理。检验表明, 整个分析、预报系统得到较令人满意的结果<sup>[1]</sup>。

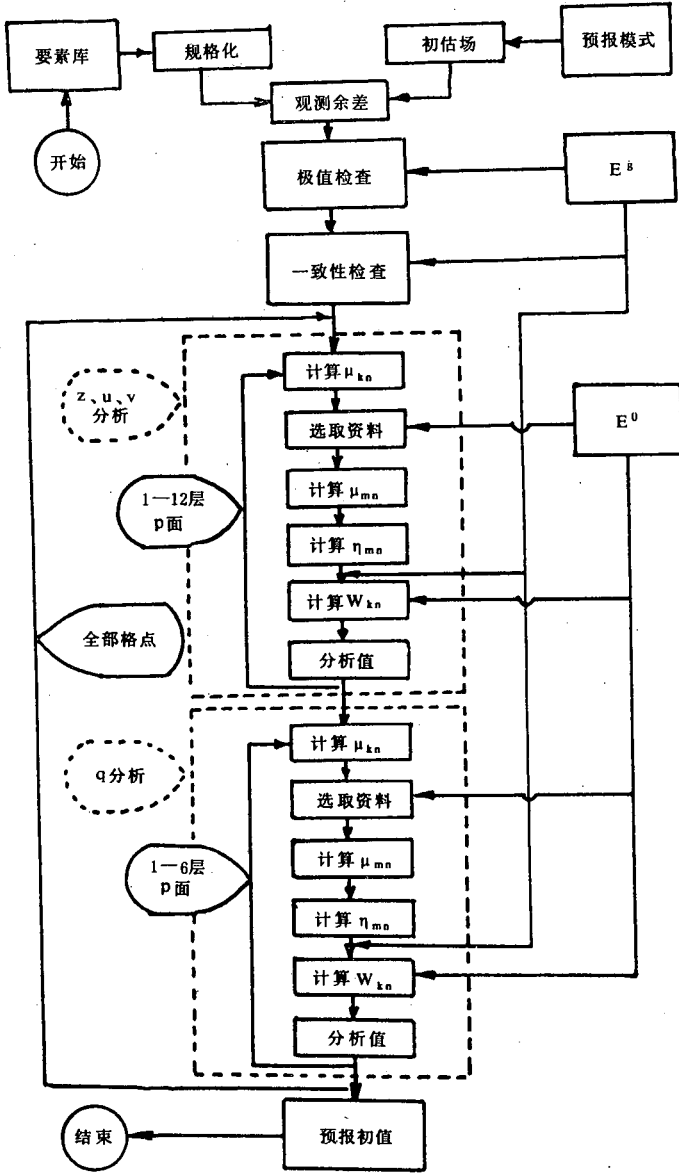


图 2 分析主要流程

表 3 给出 1990 年 11 月 20 日—30 日 1000hPa—50hPa 的 12 层标准等压面上整个分析区域的分析初估场、分析场与分析所使用的全部探空观测的高度、经向风速、纬向风速和相对湿度的平均拟合均方根偏差, 以及它们的平均日观测资料数。分析场中高度的偏差, 700hPa 以下为 10—12gpm, 500hPa—300hPa 大约为 14—22gpm, 300hPa—150hPa 为 30gpm 左右, 100hPa 及以上为 40—50gpm; 风场的偏差大致在 2.5—3.0m/s 左右。分析场

的偏差值约是初估场的一半,总的拟合效果比较合理。相对湿度的分析场偏差为 10%—14%,约是初估场偏差的 1/2—2/3。湿度分析偏差值稍大,这和湿度场尺度较小,在检验时经过水平插值加大误差有关;另外,分析方案中相对湿度初估值的估值均方根误差选择可能偏小或许也是个原因,最近进行的改进试验反映了这一点;加之,对湿度观测尚缺少较严格的质量控制,从而某些错误观测可能参与分析和检验。

表 3. 1990 年 11 月 20 日—30 日初估场和分析场与探空观测的平均拟合均方根偏差和日平均观测数

气压 (hPa)	高度(gpm)			纬向风速(m/s)			经向风速(m/s)			相对湿度(%)		
	均方根偏差		观测数	均方根偏差		观测数	均方根偏差		观测数	均方根偏差		观测数
	初估场	分析场		初估场	分析场		初估场	分析场		初估场	分析场	
1000	25.74	12.05	123.7	4.72	2.79	80.3	4.00	2.69	80.3	20.27	10.18	75.6
850	21.30	10.32	168.1	4.00	2.64	183.2	3.87	2.56	183.2	18.11	12.60	155.1
700	23.60	9.48	182.1	3.97	2.67	195.4	3.66	2.40	195.4	16.83	12.62	169.5
500	31.19	13.94	190.6	4.25	2.75	192.8	4.12	2.52	192.8	17.19	14.49	168.8
400	37.94	17.91	188.4	5.04	3.05	186.9	4.64	2.85	186.9	17.71	11.93	153.3
300	45.59	22.30	184.9	5.53	3.25	181.5	5.08	3.07	181.5	18.97	11.72	126.4
250	51.99	25.83	181.8	5.92	3.01	177.4	5.07	2.86	177.4			
200	53.87	28.59	176.9	7.05	2.92	173.5	4.85	2.78	173.5			
150	58.48	33.63	173.6	6.98	2.61	167.3	5.21	2.71	167.3			
100	68.45	39.77	166.0	4.65	2.65	158.3	3.96	2.33	158.3			
70	112.90	45.90	158.5	5.83	2.53	151.0	4.00	2.09	151.0			
50	127.16	52.10	152.2	6.80	2.53	143.0	4.27	2.23	143.0			
平均	54.85	25.99	170.6	5.40	2.78	165.9	4.39	2.59	166.9	18.18	12.26	141.5

## 六、结束语

国家气象中心准业务有限区分析方案,采用三维最优插值方法,有着和有限区预报模式水平分辨率一致的网格。目前,每天一次利用国家气象中心从 GTS 中收集到的分析时刻(0000GMT)前后三小时内观测的几乎所有资料,从而有可能描述较之以往分析方案更细致的大气结构,避免或减小要素值由分析向模式网格转换时的水平插值误差,为预报模式提供稳定、合理和比较满意的分析初值场。

## 参 考 文 献

- [1] 郭肖容等,一个新的有限区分析预报系统,《中期数值天气预报研究》成果汇编(三),气象出版社,88—107,1991年。
- [2] 上海市气象局研究所数值预报组,高空图的业务客观分析,大气科学,3,184—189,1979。
- [3] 王跃生等,北京气象中心的客观分析业务系统,北京气象中心论文集,211—219,1985年。
- [4] Gandin, L. S., Objective analysis of meteorological fields, Translated (1965) from Russian by Israeli Program for Scientific Translations, 212pp, 1963.
- [5] Cressman, G. P., An operational objective analysis system, *Mon. Wea. Rev.*, 87, 367—374, 1959.
- [6] Arakawa, A. and V. R. Lamb., Computational design of the basic dynamical processes of the UCLA general circulation model, *Methods in Computational Physics*, 17, 174—264, 1976.



- [7] Bergman, K. H., Multivariate analysis of temperatures and winds using optimum interpolation, *Mon. Wea. Rev.*, 107, 1423—1444, 1979.
- [8] 朱宗申, 使用 SATEM 测厚资料的统计插值方案评述, 《中期数值天气预报研究》成果汇编(三), 气象出版社, 201—211, 1991 年。
- [9] 屠伟铭等, 全球气象资料预处理和质量控制方案的实施, 《中期数值天气预报研究》成果汇编(一), 气象出版社, 38—45, 1991 年。
- [10] 朱宗申等, 一种湿度场统计插值分析方案的试验, 《中期数值天气预报研究》成果汇编(三), 气象出版社, 70—87, 1991 年。

## QUASI—OPERATIONAL LIMITED AREA OBJECTIVE ANALYSIS SCHEME IN THE NATIONAL METEOROLOGICAL CENTRE

Zhu Zongshen    Wang Houjun    Zhang Yuetang  
(National Meteorological Centre, SMA, Beijing, 100081)

### Abstract

The scheme of quasi-operational limited area analysis-forecast system in the National Meteorological Centre is described. Three dimensional optimum interpolation method is used in this scheme. The full horizontal analysis grid has dimensions of 42 by 28, with a resolution of  $1.875^\circ \times 1.875^\circ$  longitude-latitude grid. The multivariate analysis of geopotential and wind fields for 12 standard pressure levels from 1000 hPa to 50 hPa, and the univariate analysis of relative humidity for the lowest 6 standard pressure levels are made. The verification results show that satisfactory analysis values are provided for predication model using this scheme.