

# 卫星云图资料反演的质量控制及变分同化数值试验\*

闵锦忠 沈桐立 陈海山 孙麟平

(南京气象学院, 南京 210044)

(南京大学, 南京 210093)

## 提 要

该文针对数值化的 GMS 红外卫星云图资料的特点, 利用改进的统计反演方法分别求出温度和湿度估计场, 设计了几种订正方案对反演出的温度和湿度进行质量控制; 控制后的反演场再与常规观测资料进行变分同化, 最后用 MM4 模式进行了模拟对比试验. 结果显示, 在合理的泛函设计的基础上, 质量控制的好坏直接影响预报结果. 用分析场格点值进行订正效果优于用测站值直接订正, 加上对云图反演的值进行系统误差订正后, 有效提高了降水预报准确率. 值得指出的是, 加进云图资料后, 明显改善了模式降水预报的强度和区域, 与仅用常规探空资料相比更接近于实况.

关键词: 卫星云图 反演 质量控制 变分同化 MM4 模式

## 引 言

随着卫星探测技术的发展, 已能获得越来越多分辨率较高的气象信息. 在以前的二十几年中, 用卫星遥感资料反演大气温度、湿度已取得一定进展, 然而其精度还较差. 发展高分辨率的探测仪器, 充分利用目前的探测资料发展一套高效率的反演算法是提高精度的途径. 这方面已有学者做了一些工作, 并取得了一定成果. 例如: Smith<sup>[1]</sup>、Suskind 等<sup>[2]</sup>提出了物理反演法, Chedin 等<sup>[3]</sup>提出了改进的初始化反演法, Eyre<sup>[4]</sup>提出了最优估计法. 然而, 这些方法都是针对卫星遥感资料的反演问题而提出的. 而对目前普遍使用的卫星云图并没有一套行之有效的反演方法, 云图还不能在天气预报或数值天气预报中定量使用.

目前广大基层台站不能及时得到反演的各种卫星资料, 即使得到也因精度较差而不能使用. 沈桐立、闵锦忠等<sup>[5]</sup>用云图资料来改进数值模式的初始分析场, 发现加进云图信息后能明显改善模式降水预报. 本文就目前台站普遍能收到的卫星云图, 探讨对云图资料作客观定量处理的新方法, 包括云图的反演、质量控制、变分同化直到模式预报; 特别对云图反演的温、湿场的质量控制问题作了进一步的研究, 发现质量控制是重要的. 同时发现对变分方法中的泛函做适当的改进使之包含更有效的云图信息, 能显著改善降水预报准

\* 本文由国家重点基础研究发展规划项目 G199804910, 国家自然科学基金资助项目 49675260 共同资助.  
1998-12-24 收到, 1999-12-25 收到再改稿.

准确率(另文处理<sup>6)</sup>). 该方法为在数值天气预报中定量使用云图提供了一条有效途径, 具有较高的应用价值.

## 1 卫星云图资料的处理

GMS 红外卫星云图数值资料是以灰度值表示的, 灰度等级分为 256 级(0~255), 其分辨率是以像素的尺度来衡量的, 它与数值模式的平均格距存在差异, 一般是先将灰度值做成网格平均值. 显然, 把它直接用于模式, 必须建立灰度场与温度场或湿度场之间的关系式, 再利用该关系式由灰度值算出温度值和湿度值. 其物理依据将在下文进行阐述.

### 1.1 云图资料的预处理

本文采用的云图资料是 1992 年 6 月 13 日 23:00(UTC) 的 GMS 红外卫星云图数值资料, 通道为  $10.5 \sim 12.5 \mu\text{m}$ . 预处理过程是把卫星云图灰度值根据经纬度按  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  面积平均, 然后再插值到模式格点上, 其分布见图 1.

### 1.2 统计反演方法

由于本文是以 1992 年 6 月 14~15 日发生在长江流域的一次暴雨过程为个例. 由 14 日 00:00(UTC, 下同) 的探空资料分析得到各标准等压面的温度场和湿度场(以下简称常规资料场), 考虑到低层大气的温度及湿度场对降水的作用较大, 故用 500、700 和 850 hPa 温度场或湿度场分别与云图灰度场通过线性回归法建立它们的对应关系式如下:

$$y = b_0 + b_1 x \quad (1)$$

其中,  $b_0$  和  $b_1$  为回归系数, 由统计得到, 且不同层不同要素  $b_0$  和  $b_1$  也不同,  $x$  表示云图灰度,  $y$  表示反演的各层温度或湿度. 再由该关系式即可得到反演的各层温度及湿度场(非常规资料场). 这样做的依据或基本原理如下:

以湿度场为例, 因为 GMS 卫星红外云图给出的平均灰度值反映的是云顶的亮温值及云的浓度程度, 一般来说平均灰度值越大表示云顶处云层浓度大、温度低(对于其中存在的虚假因子, 将用质量控制方法加以订正). 而当云图上云顶温度达到  $-70^\circ\text{C}$  甚至更低时, 表明云顶处有足够浓度的水汽, 按大气中温度分布的特征来看云顶已处在对流层顶或平流层底部并且云有足够的厚度. 而大气中一般情况下 300 hPa(约 9 km) 以上的湿度非常小. 造成上述现象的原因是由旺盛的对流把低层丰富的水汽输送到这一高度, 这亦表明云顶温度越低大气低层相对湿度一般越大. 这是由云图的灰度值反算大气低层多个等压面湿度场的物理基础. 另外, 本文中用同一时刻常规观测资料与 GMS 红外云图资料进行统计, 是因为这两种资料是采用不同手段在同一时间对大气这一共同的客体进行观测得

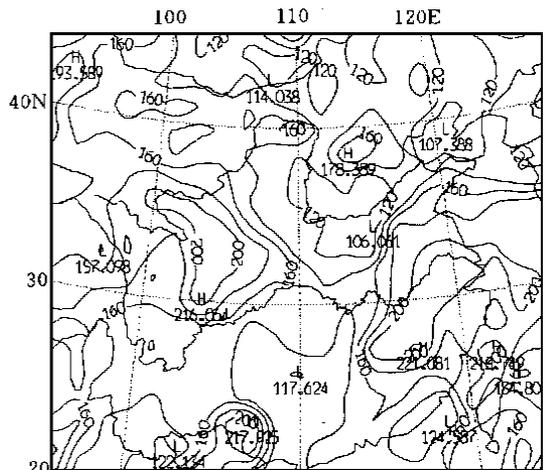


图1 1992年6月13日23:00(UTC)GMS卫星云图灰度值分布(0~255级)

到的, 它们之间必然存在内在联系.

### 1.3 质量控制

由于云图反映的是整个大气从低层到高层的总效果, 它受到高山积雪等因子的干扰, 用上述统计反演方法算出的各等压面的温度及湿度场, 会包含一些虚假的成分, 同时考虑到云图资料由于受到大气、云及仪器本身的影响, 另外再加上灰度值同温度(或湿度)存在较大的非线性, 因此依据上述线性回归模型用灰度值反演出的温度场和湿度场存在一定误差, 而这些对模式预报会带来误差. 因此须设法把有用信息分离出来, 对非常规资料场进行合理的订正, 这就是质量控制. 质量控制工作好坏将直接影响到云图资料反演的效果.

#### 1.3.1 反演值误差订正

①用测站值订正 根据沈桐立等的分析, 低层湿度相关系数呈现扁长的椭圆形结构(与水汽输送通道有关). 因此订正时对温度以圆形扫描(半径为  $r_0$ ); 而对湿度, 如风速小的时候扫描区域为圆形( $r_0$ ), 风速大时则加大流线方向的权重函数, 扫描区域变为椭圆形. 通过把反演值与扫描区域内测站值的平均值加以对比和判别, 剔除差异过大者, 从而实现反演场的订正, 具体方法可参阅文献[5].

②用分析场格点值订正 以客观分析后的常规资料场的格点值作为标准, 逐格点检查非常规资料场的可靠性, 具体做法是, 用非常规资料场格点值与常规资料对应格点值加以对比和判别, 剔除差值大于一定标准者, 而以常规资料场该格点的 5 点平均值代替. 判别标准对各要素是不同的, 温度可以在  $5^{\circ}\text{C}$  以内, 相对湿度可以在  $20\% \sim 30\%$  以内, 取此标准时主要应考虑该值既能保留非常规资料场中的中小尺度信息, 又能剔除一些不合理的奇异点.

#### 1.3.2 系统误差订正

由于受到大气、云及仪器本身的影响, 同时红外云图在接收过程中把地(云)面看作是黑体, 由此推算的表面温度比实际要低<sup>[7]</sup>, 另外灰度值同温度(或湿度)存在较大的非线性, 因此用灰度值反演出的温度和湿度存在系统误差. 为此把某一标准等压面上一个格点的反演值称为一个样本(或样本值  $Q_S$ ), 把检验样本的对应格点的常规分析值称为匹配值( $Q_R$ ). 经过前述方法订正的格点不再参加样本的统计, 把样本值与匹配值之差称为样本偏差, 表示为:

$$E_{RS}(n) = Q_R(n) - Q_S(n) \quad (2)$$

其中,  $n$  表示匹配值相近的格点数, 把上式对  $n$  求平均, 则格点的系统误差为:

$$\overline{E_{RS}(n)} = \overline{Q_R(n)} - \overline{Q_S(n)} \quad (3)$$

统计表明, 在湿度较大的地方, 由于受仪器视场内的大气衰减、碎云和薄卷云的影响较大, 使到达仪器上的辐射减少, 导致反演值比常规值要小; 而在湿度较小的地方, 由于把地面看成黑体, 加上大气没有云(或云较少), 仪器接收到的辐射是由地面直接发出的, 而地面温度比高层的高, 从而导致反演值比常规值要大. 由图 2(a, b)可见, 系统误差随湿度(或温度)近似呈线性变化, 且各层斜率不一样. 因此可以近似用下式对反演值进行系统误差订正:

$$Q_{SN}^L = K_N^L Q_{SN}'^L + E_N^L \quad (4)$$

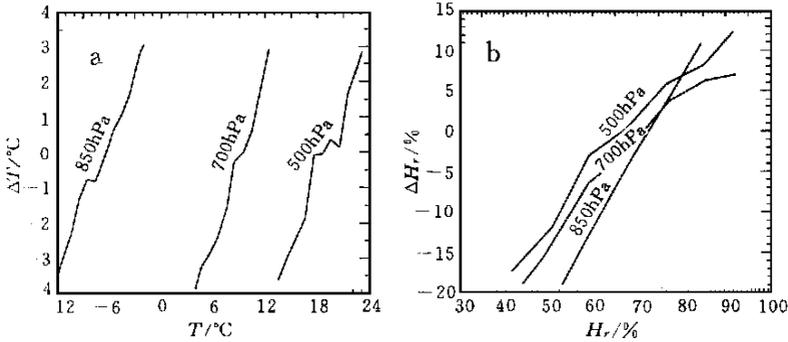


图 2 系统误差随要素值的变化(a) 温度(°C), (b) 相对湿度  $H_r$  (%)

其中,  $Q$  代表订正后的值,  $Q'$  代表订正前的值, 下标  $S$  表示是云图反演值,  $N$  代表要素(分别为温度和湿度),  $L$  代表订正的等压面(分别为 500, 700 和 850 hPa).  $K$ 、 $E$  是由样本统计得出的订正系数, 具体见表 1(a, b):

表 1(a) 由样本统计的系统误差订正系数  $K_N^L$

$K_N^L$	$L$			
	850 hPa	700 hPa	500 hPa	
N	温度	1.6492	1.7977	1.6283
	湿度	1.9455	1.5563	1.5822

表 1(b) 由样本统计的系统误差订正系数  $E_N^L$

$K_N^L$	$L$			
	850 hPa	700 hPa	500 hPa	
N	温度	-12.3123	-7.4053	4.1615
	湿度	-68.5211	-41.3387	-39.9583

### 1.3.3 可靠性检验

经上述两方面订正后, 计算出在模式格点(21×19)上非常规场与常规场相应要素之间的全场相关系数(见表 2), 它们均在 90% 以上. 为了解两场之间的差异, 根据对应格点的差值计算出各层要素的均方差(见表 2). 该方差主要表征云图反演值可能对常规场值修正的大小.

表 2 非常规场与常规场相应要素之间的相关系数( $r$ )和均方差( $\sigma$ )

		850 hPa	700 hPa	500 hPa
$r$	温度	0.92	0.92	0.94
	湿度	0.95	0.95	0.92
$\sigma$	温度	1.03	1.11	1.09
	相对湿度	0.28	0.33	0.44

图 3 是质量控制后得到的 850 hPa 非常规湿度场, 将它与 850 hPa 常规分析湿度场(图 4)比较可见, 反演场值的分布形势与常规分析场是基本一致的, 但 90% 的相对湿度线的范围前者明显大于后者, 且两个中心值都增大, 而这些与降水实况相当吻合.

分析反演温度场(图略)得到, 其分布与常规分析的温度场也基本吻合, 订正后的反演温度值在某些区域高于常规分析值.

综上所述, 用统计方法反演云图的温度和湿度是可行的, 但由于一张云图包含了所有层次的信息, 反演时必然会带来一些误差, 因此须经合理的订正(即质量控制, 这实际上把晴空检验要达到的目的及其它误差的消除包含在内了). 订正时可以用测站值或分析值作为参考标准, 同时对系统误差进行修正, 就象把卫星资料与常规资料放在一起不断地磨合. 结果表明, 质量控制后反演场与分析场的相关系数明显提高, 同时仍保留了反演场对分析场的修正量. 可见, 上述质量控制方法是合理的, 这使得变分同化成为可能.

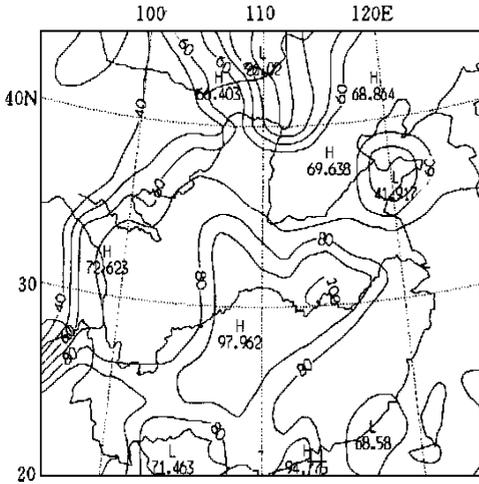


图3 1992年6月13日23:00(UTC)卫星云图反演的850 hPa非常规湿度场(单位:%)

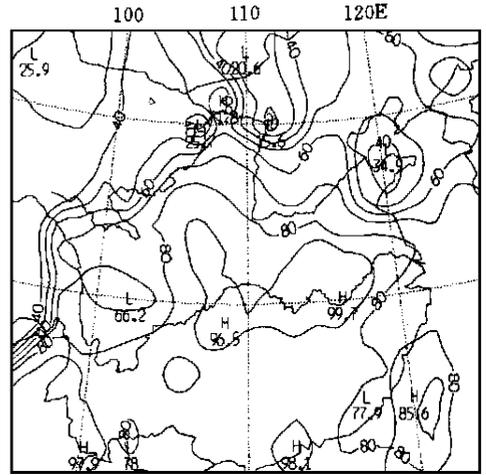


图4 1992年6月14日00:00(UTC)常规资料分析的850 hPa湿度场(单位:%)

## 2 初始资料的同化

众所周知,初始分析场质量的高低,直接影响短时预报的效果,而常规的地面资料和探空资料,受到测站空间分布的限制,中小尺度天气系统容易被遗漏,特别在测站稀少地区(如海洋,高原,沙漠)更为严重,这就直接影响到初始分析场的质量。因此,利用时空分辨率较高的卫星资料是弥补常规观测网的不足、提高预报准确率的重要途径。

要把由卫星云图反演得到的非常规资料场与由常规观测仪器得到的常规资料场统一起来,本文所采用的同化方法是变分法。所谓变分法,就是求解泛函极值问题,其基本原理就是使满足一组约束条件的分析场的泛函在最小二乘方的意义上达到最小。

### 2.1 泛函设计

常规探空观测资料尽管分辨率不高,但观测值较精确;而非常规资料尽管空间分辨率较高,且空间点之间的相对强弱关系也较精确,但它的值存在着系统误差,须对其进行修正。因此,利用这些特性来寻找这样的分析场 $Q$ ,以使它的值接近常规场 $Q_R$ 的值,梯度接近非常规场 $Q_S$ 的值,则构造出如下 $Q$ 的泛函:

$$I[Q(x, y)] = \iint_y [\alpha(Q - Q_R)^2 + \gamma_x(\nabla_x Q - \nabla_x Q_S)^2 + \gamma_y(\nabla_y Q - \nabla_y Q_S)^2] dx dy \quad (5)$$

若同时考虑非常规资料场因其空间分辨率较高而能反映更精细的中小尺度信息,修正后的非常规资料场的值应具有一定准确性,此时,在模式格点上当非常规场与常规场值的差超过某一标准时,使分析场接近非常规场,则式(5)变为:

$$I[Q(x, y)] = \iint_y [\alpha(Q - Q_R)^2 + \gamma_x(\nabla_x Q - \nabla_x Q_S)^2 +$$

$$Y_y(\nabla_y Q - \nabla_y Q_S)^2 + \xi(Q - Q_S)^2] dx dy \tag{6}$$

上述泛函求极小的边界条件为:

$$\delta Q|_{\Gamma} = 0, \quad Q|_{\Gamma} = Q_R \tag{7}$$

根据不动边界泛函极值化为欧拉方程的方法, 则式(6)的欧拉方程为:

$$\alpha(Q - Q_R) - Y_x(\nabla_x^2 Q - \nabla_x^2 Q_S) - Y_y(\nabla_y^2 Q - \nabla_y^2 Q_S) + \xi(Q - Q_S) = 0 \tag{8}$$

假定所考虑的场各向同性, 即假设  $Y_x = Y_y = Y$ , 则式(8)可简化为

$$\alpha(Q - Q_R) - Y(\nabla^2 Q - \nabla^2 Q_S) + \xi(Q - Q_S) = 0 \tag{9}$$

记  $\frac{\alpha + \xi}{Y} = b > 0$ ,  $\nabla^2 Q_S - \frac{\alpha}{Y} Q_R - \frac{\xi}{Y} Q_S = \sigma(x, y)$ , 则式(9)可变为

$$\nabla^2 Q - bQ = \sigma \tag{10}$$

上式即为赫姆霍兹方程.

### 2.2 方程求解

求解上述赫姆霍兹方程(10), 通常用超松弛法, 其迭代公式为:

$$Q_{i,j}^{n+1} = (1 - \omega)Q_{i,j}^{(n)} + \frac{\omega}{\alpha + \xi + 2Y \left[ \frac{m_{i,j}^2}{\Delta x^2} + \frac{m_{i,j}^2}{\Delta y^2} \right]} \times \left| \alpha Q_{Ri,j} + Y \left( \frac{m_{i,j}^2}{\Delta x^2} \right) (Q_{i+1,j}^{(n)} + Q_{i,j+1}^{(n)} + Q_{i-1,j}^{(n+1)} + Q_{i,j-1}^{(n+1)}) \right| \tag{11}$$

其中  $n$  为迭代步数,  $m_{i,j}$  为地图放大系数(兰勃托投影),  $\omega$  为松弛因子, 根据超松弛法的特点,  $1 < \omega < 2$  时, 迭代收敛, 本文取  $\omega = 1.3$ , 收敛最快, 为缩短到达平衡点的时间, 迭代初值取为常规资料场即  $Q|_{n=0} = Q_R$ .

### 3 试验方案设计

用式(10)把经过质量控制非常规资料场与常规资料场进行变分同化, 变分时取变分系数  $\alpha = 0.1$ ,  $Y = 10^{10}$ ,  $\xi = 1.0^{[6]}$ , 变分同化结果经初始化后送入 MM4 模式进行预报. 为了比较上述 3 种订正方法(测站: 用测站值订正; 分析场: 用分析场格点值订正; 系统误差: 系统误差订正)的效果, 设计了如下 5 种质量控制方案(见表 3):

表 3 质量控制方案  
(无——未进行订正; 有——进行订正)

方 案	测站	分析场	系统误差
A	无	无	无
B	有	无	无
C	无	有	无
D	有	无	有
E	无	有	有

### 4 结果分析

1992 年 6 月 14 日 00:00~15 日 00:00(UTC) 24 h 的实际降水量如图 5 所示. 在预报区域内, 部分地区出现暴雨或大暴雨, 降水主要集中在地面静止锋后, 其中日降水量  $\geq 100$  mm 的中心有两个: 一个在安庆附近, 范围较大, 其中心值达 116 mm; 另一个位于芷江附近, 范围较小; 另外有几个  $\geq 50$  mm 的降水中心分别在苏州、南京、芜湖等地.

图6是常规探空资料经MM4模式预报的24h降水量。由图可见,虽然降水区与实况(图5)接近,但范围稍小;安庆附近的中心位置与实况相近,强度为52mm比实况(116mm)偏弱,30mm雨量线的范围比实况小,且呈东西向分布,但实况近似为南北向;而实况图上位于芷江、邵阳附近和汕头、梅县附近的雨量中心,在图6上则没有明显反映。

图7是方案A的24h预报降水量,与图5、6比较可见,降水区范围明显小于实况,甚至小于常规资料预报,中心强度只有46mm,且位置偏南2~3个纬度。说明在反演场未进行订正的情况下,直接进行变分同化对降水预报无正贡献。方案B

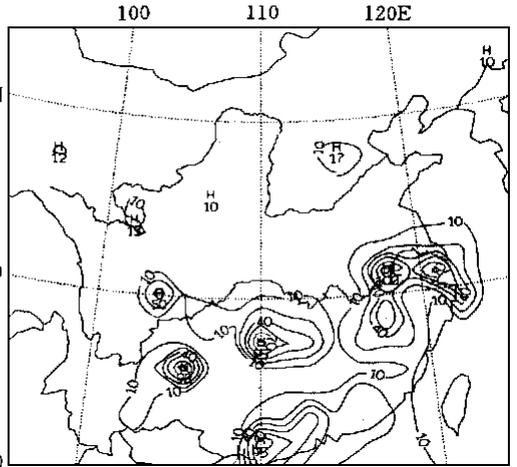


图5 1992年6月14日00:00~15日00:00(UTC)24h降水实况(单位:mm)

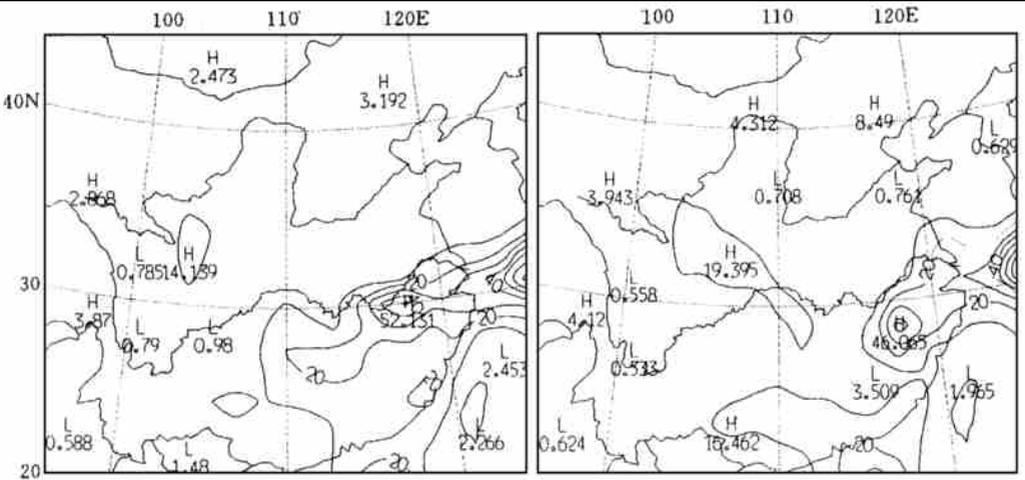


图6 1992年6月14日00:00(UTC)常规探空资料经MM4模式预报的24h降水分布(单位:mm) 图7 1992年6月14日00:00(UTC)方案A预报的24h降水分布(单位:mm)

和C(图略)降水区范围比方案A大与图6相近,安庆附近的中心降水量方案C要大于方案B,分别为64mm和32mm,位置与实况接近,其它几个雨区不明显。

从方案D、E(图8、9)可见,降水区范围、位置以及中心降水量都有较好的改善和提高,与实况更接近,特别是几个雨区的中心降水量和位置明显优于常规资料的预报。安庆附近的中心降水量方案E达75mm,方案D也达57mm,分别比图6高23mm和5mm;同时还报出了图6中不明显的位于芷江、邵阳附近及汕头、梅县附近的降雨中心,强度偏弱,也是方案E好于方案D。

以上结果表明,虽然云图分辨率较高,但须经质量控制后反演的资料方可进行变分同

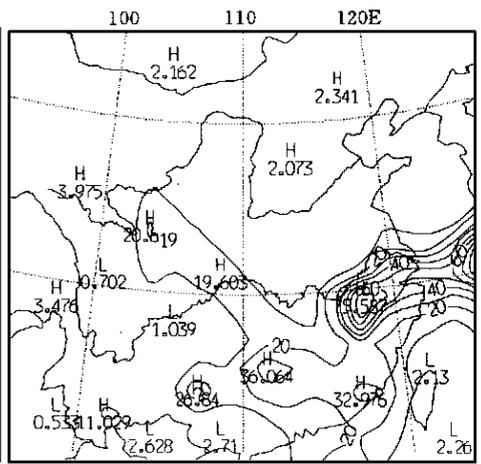
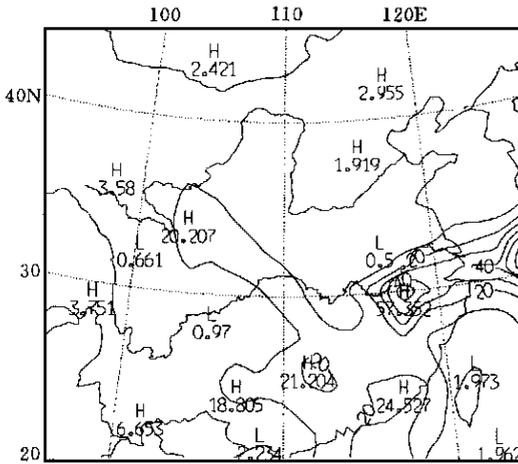


图 8 1992 年 6 月 14 日 00:00(UTC) 方案 D 预报的 24h 降水量分布(单位: mm)

图 9 1992 年 6 月 14 日 00:00(UTC) 方案 E 预报的 24h 降水量分布(单位: mm)

化; 以分析场为标准进行的订正效果优于用测站值为标准的订正; 同时须对云图的系统误差进行订正, 订正后的降水预报结果改善明显, 更接近实况。

### 5 结论和讨论

(1) 采用改进的统计反演法是可行的, 可从云图中有效分离出各层的信息, 相关统计表明分离是合理而有效的。

(2) 质量控制必不可少; 质量控制的优劣对预报有直接影响。

(3) 用常规分析场格点值进行订正优于用测站值订正, 这可能是由于分析场是综合考虑各测站的结果, 比单纯的测站有更好的代表性; 分析场值订正时采用的是逐步回归反演法, 而测站值订正时采用的是单纯回归法, 前者的回归方程可能更合理。

(4) 用统计法对云图反演后的值进行系统误差订正是可行的。系统误差近似呈线性变化, 订正后明显提高了模式降水预报准确率。

(5) 本文设计泛函能有效协调常规资料和非常规资料, 特别是能将云图资料中的中小尺度信息合理地融进常规资料中, 从而弥补了常规观测网空间分辨率的不足。

综上所述, 只要选取合理的质量控制方案和恰当的变分系数, 试验结果是令人鼓舞的。尽管本文试验的个例有限, 但在内蒙古自治区成立五十周年大庆前夕, 为大会作了预报取得了令人满意的结果, 为内蒙古气象台成功预报此次盛会的天气提供了参考。因此本方案具有实际应用价值, 特别是纪录稀少地区。当然, 在 GMS 卫星的遥感标定公式中灰度值同辐射亮度值为线性关系, 而与温度(或湿度)存在较大的非线性, 因此建立灰度值同辐射亮度值之间的线性回归模型先求出辐射亮度值, 再由辐射亮度值换算成温度(或湿度), 可能会进一步减少反演误差, 提高精度。这正是我们以后的工作中将继续研究和完善的问题。

## 参考文献

- 1 Smith W L, Woolf H M, Hayden C M, Schreiner A J. The simultaneous export retrieval package. 2nd International TOVS Study Conf., Igls, Austria, 18~ 22 Feb. 1985. 224~ 253.
- 2 Susskind J, Rosenfield J, Reuter D, Chahine M T. Remote sensing of weather and climate parameters from HIRS / MSU on TIROS-N. *J. Geophys. Res.*, 1984, **89**: 4677~ 4697.
- 3 Chedin A, Scott N A, Wahiche C, Moulinier P. The improved initialization inversion method: a high resolution physical method for temperature retrievals from the TIROS-N series. *J. Climate Appl. Meteor.*, 1985, **24**: 128~ 143.
- 4 Eyre J R. Inversion of cloudy satellite sounding radiances by nonlinear optimal estimation, I: Theory and simulation for TOVS. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1989, **115**: 1001~ 1026.
- 5 沈桐立, 闵锦忠, 吴诚鸥, 温市耕. 有限区域卫星云图资料变分分析的试验研究. *高原气象*, 1996, **15**(1): 58~ 68.
- 6 闵锦忠, 沈桐立, 等. 泛函设计在云图同化中的应用及其对降水预报的影响. *南京气象学院学报*. 2001, **24**(1): (待发表).
- 7 陈渭民, 等. *卫星气象学*. 北京: 气象出版社, 1989. 118~ 125.

## NUMERICAL EXPERIMENT ON QUALITY CONTROL AND VARIATIONAL ASSIMILATION OF SATELLITE IMAGE RETRIEVAL

Min Jinzhong Sheng Tongli Zhen Haishan Shu Linping  
(*Nanjing Institute of Meteorology, Nanjing 210044*)

### Abstract

According to the characteristics of numerical GMS infrared imagery the improved statistic retrieval method is applied to estimate the temperature and humidity. Several schemes are developed to control the quality of retrieved temperature and humidity in order to correct the errors from the image and the retrieval scheme. The variational assimilation is performed of the corrected retrieval field with the conventional observations followed by a control experiment by the MM4 model. Results show that the quality control is critical to the forecasting based on the rational designed function. The correction with the grid values is better than that of the conventional observation, and with the systematic error correction to the retrieval field included the accuracy of rainfall forecasting is improved. It is worth notice that the scheme with satellite image included can obviously improve the intensity and region forecasting of model rainfall and the prediction is more close to measured precipitation as compared with that only using the conventional observations.

**Key words:** Satellite image Retrieval quality control Variational assimilation MM4