

气象场的客观分析和中尺度滤波

徐元泰 丁一汇

(中国科学院大气物理研究所)

提 要

为了解决诊断分析中资料处理的问题,本文对逐次订正法作了一些改进,所得到的分析结果比目前常用的有限元插值法有所提高,尤其是在分析要素场的高低值区和水平梯度方面。

在上述客观分析基础上进行的中尺度滤波表明: 过滤后的要素场与暴雨天气系统有更好的对应关系。通过两种中尺度滤波方法的比较得到: 高斯权重滤波方法在不少方面比选择滤波方法有更好的性能。

一、前 言

气象场的客观分析是诊断研究和数值天气预报的基础。目前使用了许多客观分析方法^[1-3]。随着资料的增多,在诊断分析中愈来愈多的人采用客观分析方法。这不但可以节省大量时间和人力,而且也较客观。适用于诊断分析的客观分析方法一般比较简单易行,并且也能保证一定的精度。例如目前使用的有限元插值法就是其中一种^[1]。但是,有限元插值法有一些值得改进的方面:(1)这种方法在很大程度上取决于三角形的选择和形状。由于目前测站的分布很不规则,因而会明显地影响客观分析的精度;(2)这种方法对于某些大值区域或极值区(如高低空急流、暖脊和湿舌等)常常估计过低,这必然会大大影响以后许多物理量场(包括水平和垂直导数)的计算;(3)在资料稀少地区(如海洋),由于不能选取适当的三角形会带来显著的误差。为此张宝严^[2]曾用样条函数在这些地区进行二次插值。

针对上面的问题,我们对原来的客观分析方法进行了改进。首先以有限元插值法得到的格点值作为初值,然后再用逐次订正法^[4]进行分析,这可以显著地提高极值区的插值精度。在由网格点资料回插到台站资料上时,可采用拉格朗日插值法或曲面拟合法^[6]。另外,对分析区之外的资料稀少地区进行回插时,为了不造成较大的误差,我们用曲面拟合法沿边界人造了一些台站。这样改进的客观分析方法既保留了有限元插值法简单灵活的特点,又大大提高了分析的精度。在本文的第一部分将讨论这个方法的原理及其分析结果,同时也与有限元法的分析结果作了比较。

1985年11月22日收到,1986年8月29日收到修改稿。

1) 丁士晟、仲雅琴、杨自植:用有限元法进行定量分析。吉林省科研报告,1979年第4期。

2) 张宝严:二次插值的客观分析方法,1981年。

本文的第二部份是在上述客观分析基础上进行中尺度滤波方法的比较。夏大庆等曾设计了几种高通滤波器用来作中尺度分离^[2]。近年来,由 Barnes^[6]提出的中尺度滤波方法在国外得到了广泛应用。Maddox^[7]曾用此方法研究了中尺度对流复合体(MCC)的演变和结构。这种以高斯权重函数为基础的滤波方法简单易行,并且有更好的滤波性能。我们将在第二部分详细讨论这个问题。由于这里分析试验的个例不多,主要是针对1983年7月12—17日一次华北-东北气旋发展的个例,因而所得的结果是十分初步的。

二、客观分析和滤波方法的原理

这里所提出的客观分析方法实际上是对 Cressman 逐步订正法的一种改进。该方法的中心思想是不断地用实际资料与猜值场之差去订正第一次猜值场(或初值)或前次猜值场,以得到一个新的场,直到最后得到的订正场十分逼近观测记录为止。在订正过程中,如果待分析的格点周围没有或只有很少的资料点,则初始猜值场将不会有什么改变,因而在选取初始猜值场时应尽可能地近似于最后分析的场。这里采用由有限元插值法得到的格点值作为第一次猜值场。Tripoli 和 Krishnamurti^[8]曾用逐步订正法分析过热带低空流场,得到了很好的效果。

设在 (i, j) 点任一标量的第 ν 次迭代猜值场为 $F_{ij}^{(\nu)}$, 则由网格点猜值场可计算每一台站(其位置是“s”)的猜值。台站的位置可分为两类:一类是在网格区域之外;一类是在网格区域内。对网格内的台站,内插值可由4点拉格朗日插值公式求得:

$$F_s^{(\nu)} = \sum_{i=j-1}^{i=j+1} W_{i,j} F_{i,j}^{(\nu)} \quad (1)$$

上式中权重系数是:

$$W_{i,j} = \prod_{k=i-1}^{k=i+1} \frac{(x - x_k)}{(x_i - x_k)} \prod_{l=j-1}^{l=j+1} \frac{(y - y_l)}{(y_j - y_l)} \quad (2)$$

对于 LXM 网格区之外的台站,用下列内插公式:

$$F_s^{(\nu)} = \sum_{i=1}^{i=M} W'_{i,j} F_{i,j}^{(\nu)} / \sum_{i=1}^{i=M} W'_{i,j} \quad (3)$$

上式中 $W'_{i,j}$ 是 Cressman 权重系数,即:

$$\begin{cases} W'_{i,j} = (R^2 - d^2)/(R^2 + d^2) & \text{当 } d \leq R \\ W'_{i,j} = 0 & \text{当 } d > R \end{cases} \quad (4)$$

上式中 R 是影响半径, d 是台站到格点的三维或二维距离。

我们也可以用一次或二次曲面拟合的方法内插出网格区内的台站猜值。如用一次曲面拟合则有:

$$F_{ij}^{(\nu)} = a_0^{(\nu)} + a_1^{(\nu)} I + a_2^{(\nu)} J \quad (5)$$

I, J 代表网格点的坐标。可取待求台站周围9点或4点的 (I, J) 位置及其相应的猜值用最小二乘法确定系数 $a_0^{(\nu)}, a_1^{(\nu)}$ 和 $a_2^{(\nu)}$ 。它们分别是

$$a_0^{(v)} = \sum_{i=1}^M \frac{1}{M} F_{gi}^{(v)} \quad a_1^{(v)} = \sum_{i=1}^M \beta_{i,1} F_{gi}^{(v)} \quad a_2^{(v)} = \sum_{i=1}^M \beta_{i,2} F_{gi}^{(v)} \quad (6)$$

上式中 $M=4$ 或 9 为待求台站周围的格点数, $F_{gi}^{(v)}$ 为这些格点上的猜值, $\beta_{i,1}$ 和 $\beta_{i,2}$ 的表达式为:

$$\beta_{i,1} = \frac{\left\{ I_i \sum_{m=1}^M J_m^2 - J_i \sum_{m=1}^M I_m J_m \right\}}{\left\{ \sum_{m=1}^M I_m^2 \sum_{m=1}^M J_m^2 - \sum_{m=1}^M (I_m J_m)^2 \right\}} \quad (7)$$

$$\beta_{i,2} = \frac{\left\{ J_i \sum_{m=1}^M I_m^2 - I_i \sum_{m=1}^M I_m J_m \right\}}{\left\{ \sum_{m=1}^M I_m^2 \sum_{m=1}^M J_m^2 - \sum_{m=1}^M (I_m J_m)^2 \right\}} \quad (8)$$

上式 (I, J) 位置现应理解为相对于拟合区重心的格点相对位置。由 (5) 式代入台站位置即可求出台站的猜值 $F_{gi}^{(v)}$ 。

用 (3) 和 (4) 式回插网格区之外的台站值时, 如果台站数很少, 下一步回插到网格点上的值将会很差。为此我们沿边界附近台站少的地区用网格内资料由 (5) 式插补了一些台站, 这对回插的结果会有一些改进。

求得了网格区内外台站的猜值之后, 下一步是求猜值与实际值之差:

$$E_i^{(v)} = F_i - F_{gi}^{(v)} \quad (9)$$

F_i 是实际观测值, $E_i^{(v)}$ 的值就决定了 $(v+1)$ 次迭代对附近格点的订正值。订正值可写作:

$$C_{gi,i}^{(v+1)} = \sum_i W_i^{(v)} E_i^{(v)} / \sum_i W_i^{(v)} \quad (10)$$

$W_i^{(v)}$ 是一新的权重函数, 它为:

$$W_i^{(v)} = W_i^{(v-1)} \cdot \gamma \quad (11)$$

上式中 $W_i^{(v)}$ 是前述 Cressman 权重函数在 v 次迭代的值, 等于 $(R^2 - d^2)/(R^2 - d^2)$; γ 代表每种类型测风的可靠性, 例如探空取 0.66, 测风取 0.33。以后把订正值加到第 v 次猜值上可得下一次或订正的迭代值:

$$F_{gi,i}^{(v+1)} = F_{gi,i}^{(v)} + sc_{gi,i}^{(v+1)} \quad (12)$$

S 是平滑系数, 可取

$$S = \begin{cases} 1 & C_{gi,i}^{(v)} \leq 0.6R, N > 0 \\ [(0.4R)^2 - (R - C_{gi,i}^{(v)})^2] / [C(0.4R)^2 - (0.6R - C_{gi,i}^{(v)})^2] & C_{gi,i}^{(v)} > 0.6R, N \leq 0 \\ 0 & \end{cases} \quad (13)$$

上式 N 是在影响半径 R 内的台站数, $C_{gi,i}^{(v)}$ 是对格点 (i, j) 而言所有影响资料的重心位置:

$$C_{gi,i}^{(v)} = \left[\left(\sum_{j,d < R} \Delta x_j / N \right)^2 + \left(\sum_{j,d < R} \Delta y_j / N \right)^2 \right]^{1/2} \quad (14)$$

$(\Delta x_s, \Delta y_s)$ 是影响半径内任一台站离被插格点 (i, j) 的相对距离 (d) 在 x 方向和 y 方向的坐标。

在整个分析中,对猜值场共进行四次订正,影响半径 R 是迭代次数的函数,即每次 R 都要变小。由于台站资料分布不均匀,第一次扫描时, R 取得很大,为 $3.2D$ (D 是平均台站距离,约为500公里),以后逐渐减小(第二次为 $2.7D$,第三次为 $1.9D$,第四次为 $1.7D$),目的是尽可能影响到无资料区,同时根据实际资料得到最好的分辨率。

由客观分析法得到了网格点上的资料后,可以用改进的 Barnes 方法进行中尺度滤波。设 $F_n(i, j)$ 是未过滤的格点值,则低通滤波场的初值为

$$F_0(i, j) = \sum_{n=1}^N W_n F_n(i, j) / \sum_{n=1}^N W_n \quad (15)$$

上式中 N 是 $F_0(i, j)$ 点周围参加滤波的格点数,这里取半径为500公里内的格点总数。 W_n 是各点的权重函数,其表达式为:

$$W_n = \exp(-r_n^2/4c) \quad (16)$$

上式中 r_n 代表第 n 个格点离待过滤点 $F_0(i, j)$ 的距离。权重常数 c 需要适当选取以满足特定要求。下一步是对得到的初值场 $F_0(i, j)$ 进行订正。计算 $F_0(i, j)$ 周围 N 个格点上未过滤值($F_n(i, j)$)与初值的余差 D_n ,然后把余差加到中心格点 $F_0(i, j)$ 上就可得到最后的滤波值:

$$F_L(i, j) = F_0(i, j) + \sum_{n=1}^N W'_n D_n / \sum_{n=1}^N W'_n \quad (17)$$

式中

$$D_n = F_n(i, j) - F_0(i, j) \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (18)$$

W'_n 是修正的权重函数,表达式为:

$$W'_n = \exp(-r_n^2/4GC) \quad 0 < G < 1 \quad (19)$$

式中 G 是另一个权重常数。

相应的响应函数为:

$$\begin{cases} R = R_0(1 + R_0^{G-1} - R_0^G) \\ R_0 = \exp(-\pi^2 4C/\lambda^2) \end{cases} \quad (20)$$

λ 是波长。因而由(15)–(20)式可见,一旦选定了滤波常数 C 和 G ,则就确定了所采用的低通滤波器的特征。 G 一般取0.2到0.4之间的值。 G 值选定以后,下一步是选取 C 值。图1是不同 C 值下, R 与 λ 的相关曲线图。可以看到 C 减小时滤波器的最大响应波长向短波方向移动,并且有效截断波长变得愈来愈窄。在波长很短的波处, $R \approx 0$,在波长很长的波处 R 接近于1。

带通滤波器可以由两个低通滤波器的差决定。这样得到的带通滤波分析既抑制了短波又抑制了长波,结果滤波响应值在某一特定波长达到最大值。

设 $F_1(i, j)$ 和 $F_2(i, j)$ 是两个由(16)式得到的低通滤波器,其权重常数分别为

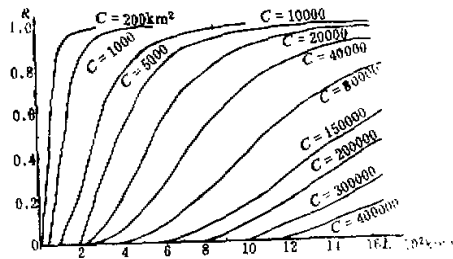


图1 不同 C 值情况下响应函数与波长的关系
 C 的单位: km^2 。

C_1 、 G_1 和 C_2 、 G_2 ，则带通场为：

$$B(i, j) = r[F_1(i, j) - F_2(i, j)] \quad (21)$$

$$BR = r(R_1 - R_2) \quad (22)$$

式中 R_1 和 R_2 分别为两个低通滤波器的响应函数， r 是响应函数差最大值的倒数。乘上这个数后，人为地在响应差为最大值的波长处 ($\lambda_{\max}$) 使带通响应函数又恢复到 1。

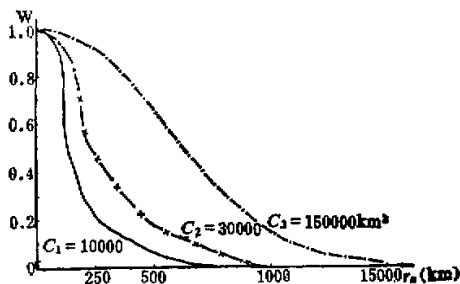


图 2 三个低通滤波器的权重函数 W_r 曲线

可以达到很好的效果。对 C_3 ， r_s 应取 1000 公里。取 $G_1 = G_2 = G_3 = 0.3$ ，则分别可由 F_1 与 F_3 和 F_2 与 F_3 之差构成两个带通滤波器 B_1 和 B_2 。图 3 是它们的响应曲线。可以看到两个带通滤波器都在 800 公里波长附近有最大响应值。 B_1 的 $BR_1(0.88)$ 比 B_2 的 $BR_2(0.85)$ 略大一些，所以以下采用 B_1 带通滤波器进行中尺度分离。

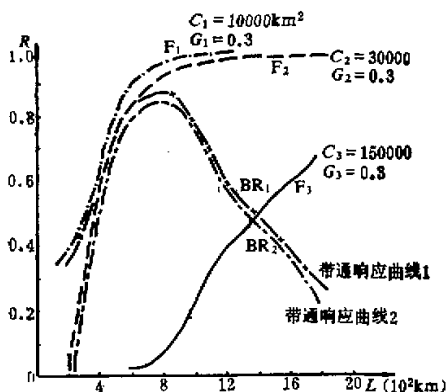


图 3 滤波器响应曲线

F_1 、 F_2 和 F_3 是低通滤波器。由 F_1 和 F_3 之差决定带通滤波器 BR_1 ，由 F_2 和 F_3 之差决定带通滤波器 BR_2 。

三、客观分析结果的比较

图 4 给出三种不同分析方法的结果。其中图 4a 是手工分析的流程图。系统的配置和强度都仔细经过时间和空间的连续性检验。这里作为正确的分析与有限元分析和逐次

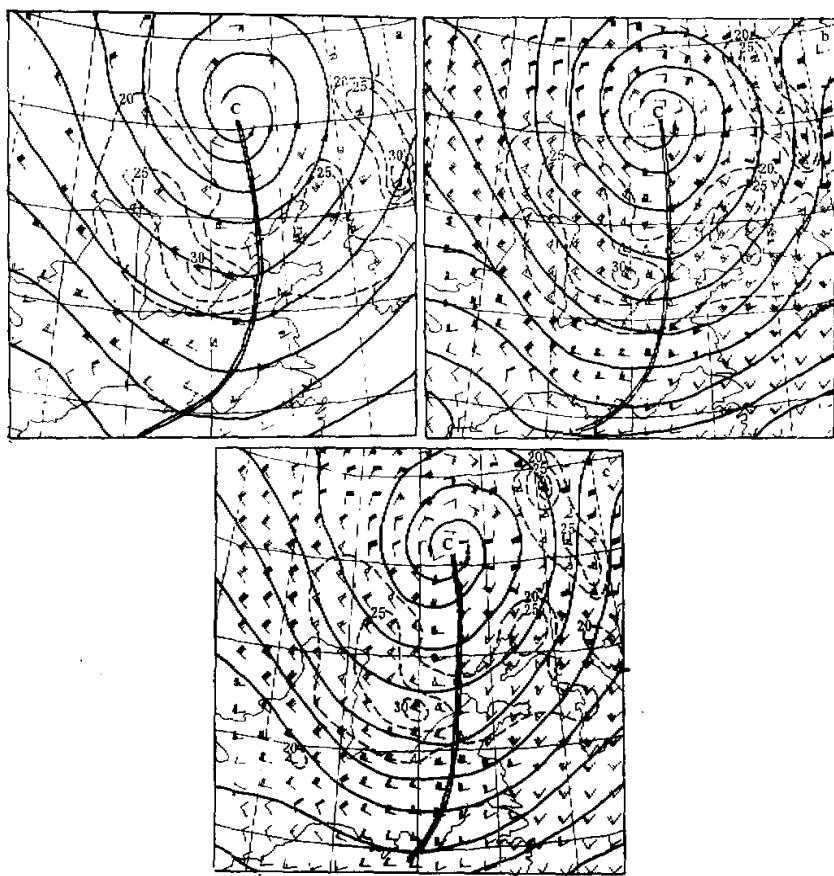


图4 1983年7月14日08时(北京时)500 hPa分析

(a) 手分析, (b) 有限元方法, (c) 逐次订正法。实线: 流线, 虚线: 等风速线。
C 和 A 分别是气旋和反气旋中心。单位: 米/秒。

订正分析作比较。

一般来说由两种方法得到的结果十分相似, 并且很接近实际的分析。低涡中心和主槽以及其它环流系统的位置都没有大的差别。主要的差别在于风速场的量值。由逐次订正法分析出的主槽后部大风速中心较强, 有两个 28 米/秒以上的大值中心。其中南面的一个达到 31 米/秒; 这与实况(图 4a)比较接近。而由有限元法得到的强风速区范围一般较小, 风速较弱。低压东侧的大风速中心有类似的情况。强风速中心分析正确与否对一些重要物理量场的计算及判断天气系统的发展和移动有重要影响, 尤其是在急流高度。

图 5 是 200 hPa 纬向风(u 分量)分析。可以看到, 对于急流带的分析逐次订正法更接近实况。在手工分析图上(图 5a), 由 53543、53614 和 53845 站的资料可分析出一条风速为 58 米/秒的等风速线。而在有限元分析图上(图略)只有一个格点的值是 58 米/

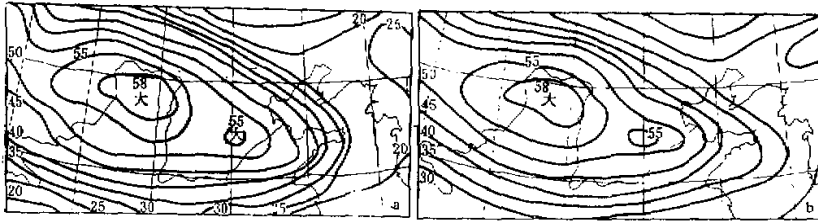


图 5 1983 年 7 月 14 日 08 时(北京时间) 200 hPa 纬向风速 (u) 分析

(a) 手分析; (b) 逐次订正分析. 单位: 米/秒.

秒, 几乎画不出 58 米/秒的等风速线. 而在图 5b 中分析出了略大于 58 米/秒的风速值, 58 米/秒等值线的范围与实况(图 5a)基本一致. 对于低压中心以北的东风区及大值风速区(图中略), 逐次订正法比有限元法的分析更合理. 例如前者大于 8 米/秒的东风中心范围较大, 更接近实况. 由于逐次订正法有更强的极值和大值区范围(其它要素场略), 这必然会改进所分析的要素值的梯度, 从而可改进各种物理量场(水汽、热量和涡度等)的收支计算.

有限元方法算出来的值不会大于所选三角形三个资料中最大的值, 也不会小于三个资料中最小的值, 这显然会使得要素场的中心值减弱. 另外由逐次订正法得到的要素场一般比有限元法平滑. 这是因为在有限元客观分析方法中, 格点的分析值依赖于三角形三个测站的选择. 对两个相邻格点所取的三角形站点重复越多, 连续性就越好, 结果也越平滑. 但是我国现有的台站位置使得我们不可能完全取得最佳的三角形分布, 这样计算的结果中就会出现许多不连续点, 使得客观分析场不太平滑, 从图 4b 中也可以看到这一点.

最后我们统计了逐次订正法和有限元法的均方根误差(见表 1). 可以看到逐次订正法一般都比有限元法有改进, 尤其是在 200 hPa 层.

表 1 两种客观分析方法的均方根误差统计

		u (米/秒)	v (米/秒)	$T(^{\circ}\text{C})$	H (10 位势米)
850 hPa	逐 次	0.90	1.69	0.61	0.48
	有限元	0.93	1.77	0.63	0.50
500 hPa	逐 次	1.01	0.99	0.72	2.15
	有限元	1.05	1.00	1.43	2.17
200 hPa	逐 次	1.36	2.57	1.05	2.75
	有限元	1.72	2.77	1.08	2.91

四、中尺度滤波结果的比较

进行滤波所用的原始场都是由逐次订正法得到的结果. 并且两种带通滤波器的中心

波长(λ_{max})都在 800 公里。这可以滤出中尺度和次天气尺度的系统,同时也适合目前高空观测网的密度。作为例子,图 6 和图 7 分别给出 850 和 200 hPa 用权重法和选择滤波器^[5]得到的滤波结果。

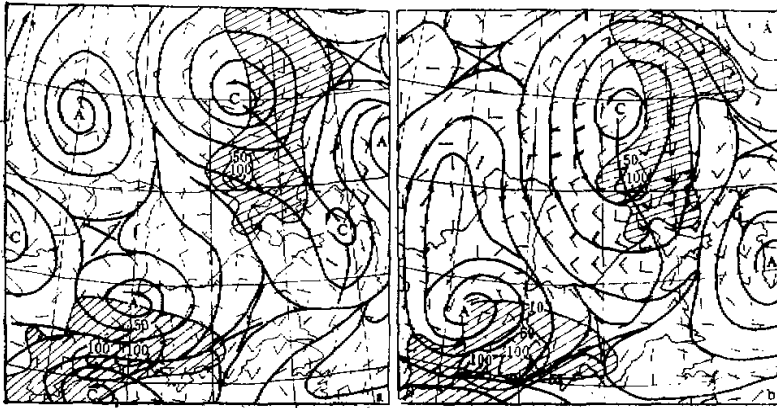


图 6 1983 年 7 月 14 日 08 时(北京时)中尺度滤波后的 850 hPa 流场

(a) 由高斯权重法得到的结果, (b) 由文献[5]方法得到的结果。

C: 气旋中心, A: 反气旋中心, 阴影区为雨区。

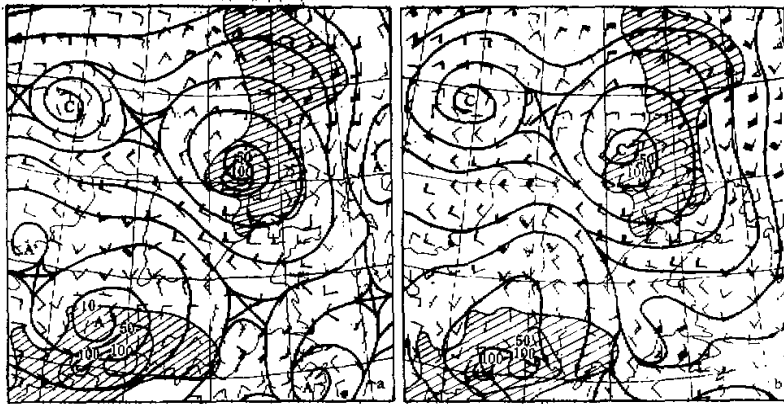


图 7 1983 年 7 月 14 日 08 时(北京时)中尺度滤波后的 200 hPa 流场

(a) 和 (b) 图分别由高斯权重法和文献[5]方法得到的结果, 图例同图 6。

1983 年 7 月 14 日前后有两个暴雨中心: 一个在华北-东北这个深厚气旋中心的右下方, 一个在重庆附近。由图 6 可见, 两种滤波器在北方都滤出了一个中尺度中心(中 α 尺度), 其位置比大气旋中心更靠近暴雨中心。这表明它与暴雨的出现有密切的联系。在 200 hPa, 此中尺度气旋中心与暴雨中心已基本吻合(图 7)。而对重庆附近的暴雨中心, 在 850 hPa 未过滤场上(总场)只能看出有气旋性切变和气流辐合, 在 500 hPa 未过滤场上也只能看出有反气旋性切变和气流辐散(图略)。但用权重法滤波后, 850 hPa 流场图上

(图 6a) 出现一个较明显的气旋中心, 与暴雨区配合较好。而由选择滤波法得到的结果(图 6b) 不如权重法清楚。500 hPa 过滤的流场图上都出现了反气旋中心(图略)。在 200 hPa 上, 由权重法在此暴雨区北侧得到了非常清楚的闭合反气旋环流(图 7a), 十分类似于中尺度对流复合系统(MCC) 的高空结构。而由选择滤波法则得不到这种明显的高层反气旋系统。

仔细比较由两种方法滤出的其它结果可以发现, 虽然系统的位置基本一致, 但由高斯权重法得到的整个流场比较光滑连续, 初始场中风向的几个明显气旋性切变和反气旋性切变以及气流的辐合和辐散区, 经过滤波以后都相应变成了气旋和反气旋中心(见图 6a、7a)。但对这些系统, 由选择滤波法得到的结果却不如权重法滤波的明显, 强度也比较弱, 甚至有些表现不出来(图 6b、7b)。这主要是由于选择滤波响应曲线^[5]比较平滑, 对带通中心两边的波长抑制比较小的缘故。此外在滤波系数的选取方面, 权重函数滤波器要方便和直观得多, 因而这种方法在目前的中尺度分析中得到了较普遍的应用。

我们对有限元方法得到的客观分析也均用两种滤波方法进行了过滤, 计算结果较差一些。这说明用好的客观分析场可以得到较理想的滤波结果。

对于温度场和高度场, 也得到了类似的结果, 限于篇幅这里不再例举。

五、结 论

本文对逐次订正客观分析方法作了一些改进, 所得到的结果比目前常用的有限元插值法要好, 尤其是在分析要素场的极值区和水平梯度方面。这对诊断分析中各种物理量及其收支的计算会有一定的改进。

中尺度滤波的分析表明, 进行中尺度滤波后的要素场与暴雨天气系统有更好的对应关系。这里使用的高斯权重滤波法在不少方面比选择滤波器有更好的性能。

致谢: 作者对田生春同志的热情帮助表示深切的感谢。她为我们提供了客观分析的原始数据。

参 考 文 献

- [1] Cressman, G. P., 1959, An operational objective analysis system, *Mon. Wea. Rev.* Vol. 87, p. 367—374.
- [2] Peddler, M. A., 1981, Practical analysis of dynamical and kinetic structure: More advanced analysis schemes, *Dynamical Meteorology*, p. 87—99.
- [3] Гандин, Л. С., 1963, Объективный Анализ метеорологический полей, Гидромеониздат.
- [4] Chu, J. H., M. Yanai and C. H. Sui, 1981, Effects of cumulus convection on the vorticity field in the tropics, part I: the large-scale budget, *Jour. of Meteor. Soc. Japan*, Vol. 59, p. 535—546.
- [5] 夏大庆、郑良杰、董双林、宋丽, 1983, 气象场的几种中尺度分离算子及其比较, *大气科学*, 第 7 卷, p. 303—311.
- [6] Barnes, S. L., 1972, Mesoscale objective analysis using weighted time-series observations. NOAA Technical memorandum, ERL NSSL-62.
- [7] Maddox, R. A., 1980, An objective technique for separating macroscale and mesoscale features in meteorological data, *Mon. Wea. Rev.* Vol. 108, p. 1108—1121.
- [8] Tripoli, G. J., and T. N. Krishnamurti 1975, Low-level flows over the GATE area during summer 1972. *Mon. Wea. Rev.*, vol. 103, p. 197—216.