

# 气象场中尺度带通滤波方法研究\*

陈 忠 明

(成都高原气象研究所, 610072)

关于带通滤波方法在气象场中尺度分析中的应用, 有许多人进行过这方面的工作<sup>[1-5]</sup>, 并取得了一定的效果。尽管如此, 在这方面仍有许多问题值得探讨和研究。例如, 目前人们对带通滤波器的构造比较随意, 究竟以什么为标准才能设计出比较合适和理想的滤波器呢? 对这些问题的深入研究, 将有助于带通滤波方法在中尺度分析研究中取得更为满意的效果。

## 1. 带通滤波器的客观评判

带通滤波作为一种处理资料的方法, 我们在使用之前应对它的效果有比较清楚的认识。因此, 研究带通滤波器的滤波效果, 给出评判带通滤波器效果的客观标准, 对于进一步发展和应用带通滤波方法都是十分重要和必要的。

在设计带通滤波器时, 我们的目的是要求滤波器能最大地保留波长在所需波带( $\lambda_1 \leq \lambda \leq \lambda_2$ )内的波动, 尽可能地滤掉其它波长的波动。图 1 是带通滤波器  $BF$  的滤波响应曲线。由图可见, 滤波器  $BF$  在波带( $\lambda_1 \leq \lambda \leq \lambda_2$ )内的响应函数大等于 0.5, 而在此波带以外, 随着波长的增长和缩小, 响应函数迅速减小, 并趋近于 0。根据前述对滤波器滤波性能的要求, 我们设计了两个能够客观、定量地反映带通滤波器  $BF$  滤波效果的评判指数:

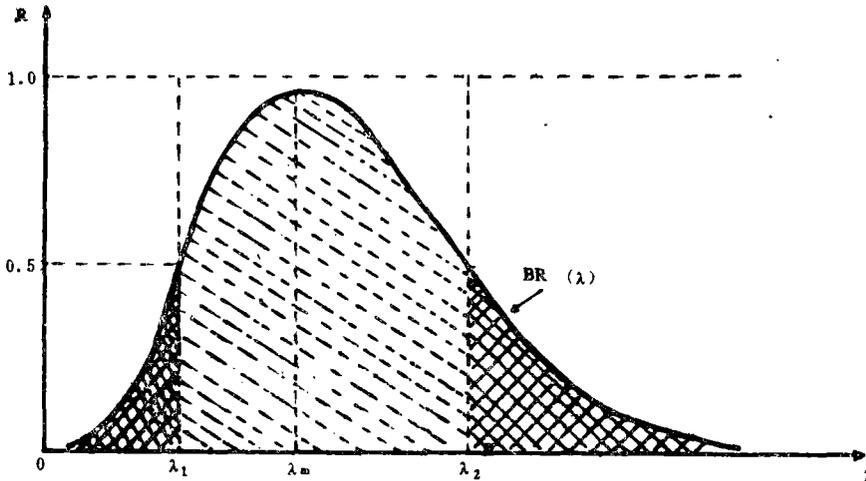


图 1 带通滤波器响应线  
(虚线阴影区为滤波器保留波带, 实线阴影区表示干扰波动区)

\* 本文于 1990 年 7 月 5 日收到, 1991 年 3 月 11 日收到修改稿。

$$1) \text{ 强度指数 } M = \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} BR(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

$$2) \text{ 干扰指数 } D_r = \frac{\int_0^{\lambda_1} BR(\lambda) d\lambda + \int_{\lambda_2}^{\infty} BR(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} BR(\lambda) d\lambda} \quad (2)$$

式中  $BR(\lambda)$  为带通滤波器  $BF$  的响应函数,  $\lambda_1, \lambda_2$  分别为  $BR(\lambda) = 0.5$  时所对应的波长。由式(1)式(2)结合图 1, 我们不难发现, 强度指数  $M$  和干扰指数  $D_r$  均具有非常清楚和明确的物理意义。强度指数  $M$  反映了带通滤波器  $BF$  对波带  $(\lambda_1 \leq \lambda \leq \lambda_2)$  内中尺度波动的保留程度。干扰指数  $D_r$  反映了带通滤波器  $BF$  提取的信息中, 其它波长波动对所需波带  $(\lambda_1 \leq \lambda \leq \lambda_2)$  内波动信息的干扰程度。可见, 上述两个指数  $M, D_r$  充分反映了我们对带通滤波器滤波特性的要求。只有当强度指数  $M$  越大, 而干扰指数  $D_r$  越小时, 带通滤波器的效果才越好。反之, 则滤波器效果越差。作为理想的带通滤波器, 它能将所需波带内的波动完全保留, 同时全部滤掉其它波长的波动。也就是说, 这种带通滤波器的强度指数  $M = 1$ , 而干扰指数  $D_r = 0$ 。这就是我们设计和构造带通滤波器的发展方向。

根据上述分析, 我们可得设计和构造中尺度带通滤波器的准则: 在设计和构造带通滤波器时, 要使滤波器的强度指数  $M$  尽可能大 ( $M \rightarrow 1$ ), 而干扰指数  $D_r$  尽可能小 ( $D_r \rightarrow 0$ )。

## 2. 常用带通滤波器的效果检验

在应用带通滤波方法研究中尺度天气系统的工作中, 目前较常用的滤波器有以下 3 个: 1) 由滤波常数为  $c_1 = 5000 \text{ km}^2$ ,  $G_1 = 0.3$  和  $c_2 = 40000 \text{ km}^2$ ,  $G_2 = 0.4$  的两个低通滤波器构造的带通滤波器, 其最大响应波长在  $500 \text{ km}$  处。2) 由滤波常数为  $c_1 = 10000 \text{ km}^2$ ,  $G_1 = 0.3$  和  $c_2 = 150000 \text{ km}^2$ ,  $G_2 = 0.3$  的两个低通滤波器构造的带通滤波器, 其最大响应波长在  $800 \text{ km}$  处。3) 由滤波常数为  $c_1 = 40000 \text{ km}^2$ ,  $G_1 = 0.35$  和  $c_2 = 300000 \text{ km}^2$ ,  $G_2 = 0.45$  的两个低通滤波器构成的带通滤波器, 其最大响应波长在  $1500 \text{ km}$  处。对于这 3 个滤波器, 尽管有不少人将它们用于分析和研究各种不同尺度的中尺度系统<sup>[4-6]</sup>, 但它们的滤波效果如何呢? 则尚未对此作过研究。为此, 我们将前面设计的评判带通滤波器滤波效果的两个指数, 用来检测这 3 个滤波器的滤波效果, 其结果如表 1 (计算  $M, D_r$  时, 用梯形法计算积分值)。

由表 1 所列结果可见, 上述 3 个常用滤波器的强度指数  $M$  均在 0.7 左右, 干扰指数都在 0.35 附近。与理想滤波器 ( $M \rightarrow 1, D_r \rightarrow 0$ ) 相比, 还有较大差距。因此, 使用这些带通滤波器所获取的中尺度信息, 其精度是不够高的。

表 1 3 个滤波器的滤波效果检测结果

滤波器	滤波常数	$BR = 0.5$ 对应波长	最大响应 波长 $\lambda_m$	最大响应 函数值	主要保留波带	强度指数 $M$	干扰指数 $D_r$
滤波器 $BF^{(1)}$	$c_1 = 5000$ $G_1 = 0.3$ $c_2 = 40000$ $G_2 = 0.4$	$\lambda_1 \approx 300$ $\lambda_2 \approx 800$	500	0.80	$300 < \lambda < 800$	0.719	0.348
滤波器 $BF^{(2)}$	$c_1 = 10000$ $G_1 = 0.3$ $c_2 = 150000$ $G_2 = 0.3$	$\lambda_1 \approx 400$ $\lambda_2 \approx 1600$	800	0.86	$400 < \lambda < 1600$	0.723	0.365
滤波器 $BF^{(3)}$	$c_1 = 40000$ $G_1 = 0.35$ $c_2 = 300000$ $G_2 = 0.45$	$\lambda_1 \approx 800$ $\lambda_2 \approx 2400$	1500	0.80	$800 < \lambda < 2400$	0.683	0.371

## 3. 一类新的低通滤波器

为了克服改进的 Barnes 低通滤波器的前述缺陷。经分析此类滤波器的特征发现, 只要对改进的

Barnes 低通滤波结果作适当订正,即可使滤波效果得到较大改进。为此,我们设计了一类新的低通滤波器  $F_L$ :

1) 首先用 Barnes 低通滤波器获取要素场  $F(x, y)$  的滤波初值场:

$$F_0(i, j) = \frac{\sum_{n=1}^N F_n(x, y) W_n}{\sum_{n=1}^N W_n} \quad (3)$$

$$W_n = \exp\left(-\frac{r_n^2}{4c}\right) \quad (4)$$

式中  $N$  为参加  $(i, j)$  格点滤波的资料样本总数,  $F_n(x, y)$  为第  $n$  个样本点处的要素值,  $r_n$  为第  $n$  个样本点到格点  $(i, j)$  的距离,  $c$  为滤波常数。

2) 对获取的初值场  $F_0$  作进一步订正:

$$F_1(i, j) = F_0(i, j) + \frac{\sum_{n=1}^N D_n(x, y) W'_n}{\sum_{n=1}^N W'_n} \quad (5)$$

$$D_n(x, y) = F_n(x, y) - F_0(x, y) \quad (6)$$

$$W'_n = \exp\left(-\frac{r_n^2}{4Gc}\right) \quad (7)$$

上式中  $G(0 < G < 1)$  为另一滤波常数,  $D_n(x, y)$  为第  $n$  个样本点处的要素值与滤波初值之差。式(5)即为改进的 Barnes 低通滤波器。

3) 为使滤波器能更有效地将保留波动与舍去波动明显截断,我们对上述滤波结果再作一次订正:

$$F_L(i, j) = F_1(i, j) + \frac{3}{4}[F_1(i, j) - F_0(i, j)] - \frac{\sum_{n=1}^N E_n(x, y) W_n}{\sum_{n=1}^N W_n} \quad (8)$$

$$E_n(x, y) = F_1(x, y) - F_0(x, y) \quad (9)$$

$$W_n = \exp\left(-\frac{r_n^2}{4c}\right) \quad (10)$$

式(8)即为我们设计的一类新的低通滤波器。

对应于滤波器(3)、(5)、(8)的响应函数是:

$$R_0 = \exp(-4\pi^2 c / \lambda^2) \quad (11)$$

$$R_1 = R_0(1 + R_0^{G-1} - R_0^G) \quad (12)$$

$$R_L = R_1 + (R_1 - R_0)\left(\frac{3}{4} - R_0\right) \quad (13)$$

式中  $\lambda$  为波长。由上述 3 式可见,滤波器的性能取决于对滤波常数  $c$  和  $G$  的选择,通常情况下,  $G$  的取值介于 0.3 到 0.5 之间。为了便于比较上述 3 类滤波器的滤波效果,在此给出滤波常数  $c=10000 \text{ km}^2$ ,  $G=0.35$  时各滤波器对应的响应曲线,见图 2。在这 3 条响应曲线中,它们在  $\lambda < 200 \text{ km}$  的短波区内,都呈现出响应函数值趋于 0 的特征;而在  $\lambda > 1000 \text{ km}$  之外的长波区,又呈现出响应函数值趋于 1 的特征,这些是它们的共有特征。但在  $200 \text{ km} < \lambda < 1000 \text{ km}$  的波段区,这 3 条响应曲线的演变趋势则很不同步。 $R_0$  曲线坡度最平缓,  $R_L$  曲线坡度最陡,  $R_1$  曲线坡度介于两者之间。即在这一波段区内 ( $200 \text{ km} < \lambda < 1000 \text{ km}$ ), 滤波器(8)较其它两个滤波器能更有效地区分不同尺度的波动,使短波和长波被明显截断。因此,前面设计的一类新的低通滤波器(8)较之改进的 Barnes 低通滤波器具有更好的滤波效果。

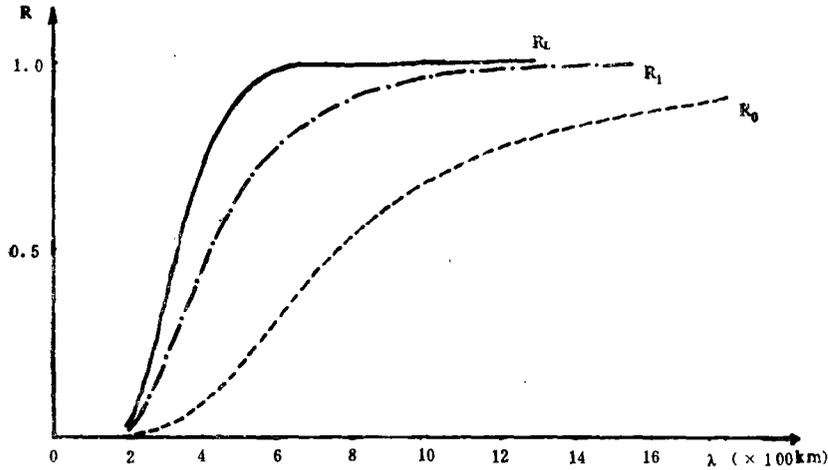


图 2 低通滤波器响应曲线  
(实线为滤波器(8)之响应曲线, 点断线为滤波器(5)之响应曲线,  
虚线为滤波器(3)之响应曲线)

#### 4. 新的中尺度带通滤波器

前面设计出具有较好滤波效果的新的低通滤波器(8), 为我们构造滤波性能更好的中尺度带通滤波器提供了条件。为了便于与目前常用的 3 个带通滤波器进行比较, 在设计新的带通滤波器时, 其滤波特点(滤波器保留波带( $\lambda_1 < \lambda < \lambda_2$ ), 最大响应波长  $\lambda_m$ )均与前述 3 个滤波器保持一致。根据前面提出的构造和设计带通滤波器的准则, 我们用低通滤波器(8)构造了 3 个新的中尺度带通滤波器。

1) 由滤波常数分别为  $c_1=5000 \text{ km}^2$ ,  $G_1=0.35$  和  $c_2=70000 \text{ km}^2$ ,  $G_2=0.35$  的两个新低通滤波器  $F_{L1}^{(1)}$  和  $F_{L2}^{(1)}$  构造的中尺度带通滤波器,  $BL^{(1)}=F_{L1}^{(1)}-F_{L2}^{(1)}$ 。其最大响应波长在 500 km 处, 滤波响应曲线如图 3 a。

2) 由滤波常数分别为  $c_1=10000 \text{ km}^2$ ,  $G_1=0.35$  和  $c_2=240000 \text{ km}^2$ ,  $G_2=0.35$  的两个新低通滤波器  $F_{L1}^{(2)}$  和  $F_{L2}^{(2)}$  构造的中尺度带通滤波器,  $BL^{(2)}=F_{L1}^{(2)}-F_{L2}^{(2)}$ 。其最大响应波长在 800 km 处, 滤波

表 2 3 个新滤波器  $BL^{(i)}$  的滤波效果检测结果

滤波器	滤波常数	$BR=0.5$ 对应波长	最大响应 波长 $\lambda_m$	最大响应 函数值	主要保留波带	强度指数 $M$	干扰指数 $D_r$
滤波器 $BL^{(1)}$	$c_1=5000$ $G_1=0.35$ $c_2=70000$ $G_2=0.35$	$\lambda_1 \approx 300$ $\lambda_2 \approx 800$	500	0.96	$300 < \lambda < 800$	0.841	0.217
滤波器 $BL^{(2)}$	$c_1=10000$ $G_1=0.35$ $c_2=240000$ $G_2=0.35$	$\lambda_1 \approx 400$ $\lambda_2 \approx 1600$	800	0.98	$400 < \lambda < 1600$	0.824	0.228
滤波器 $BL^{(3)}$	$c_1=50000$ $G_1=0.35$ $c_2=500000$ $G_2=0.4$	$\lambda_1 \approx 800$ $\lambda_2 \approx 2400$	1500	0.95	$800 < \lambda < 2400$	0.806	0.265

响应曲线如图 3 b。

3) 由滤波常数分别为  $c_1=50000 \text{ km}^2$ ,  $G_1=0.35$  和  $c_2=500000 \text{ km}^2$ ,  $G_2=0.4$  的两个新低通滤波器  $F_{L1}^{(3)}$  和  $F_{L2}^{(3)}$  构造的中尺度带通滤波器,  $BL^{(3)}=F_{L1}^{(3)}-F_{L2}^{(3)}$ 。其最大响应波长在 1500 km 处, 滤波响应曲线如图 3 c。

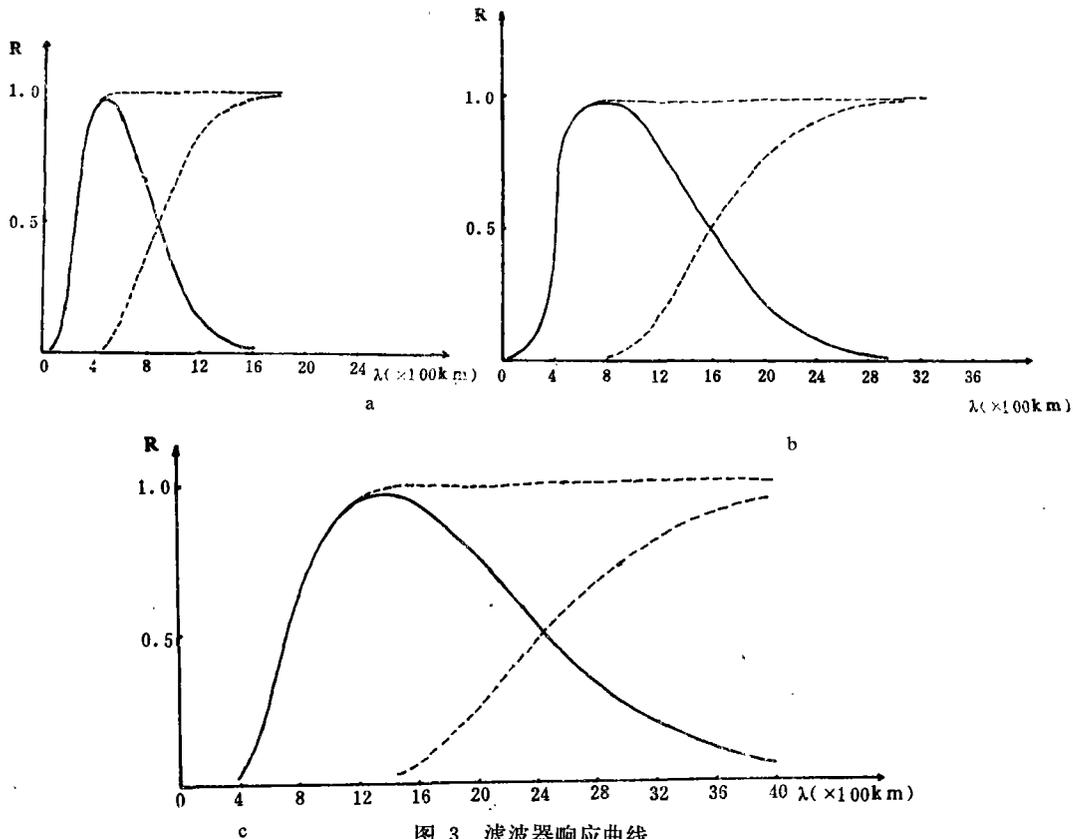


图 3 滤波器响应曲线  
(虚线为低通滤波响应曲线, 实线为带通滤波响应曲线)

上述 3 个带通滤波器的效果是否较以前常用的 3 个滤波器有较大改进呢? 为此, 我们对这 3 个滤波器的强度指数  $M$  和干扰指数  $D$ , 作了检测, 其结果如表 2。

由表 2 可见, 上述 3 个中尺度带通滤波器的强度指数  $M$  均大于 0.80, 最大达 0.841; 而干扰指数  $D$ , 均小于 0.27, 最小值仅 0.217。这与理想的带通滤波器 ( $M=1.0$ ,  $D_r=0$ ) 相比还有一定差距。但与前述 3 个目前常用滤波器相比, 其强度指数  $M$  均提高 10% 以上, 平均提高 11.5%; 而干扰指数  $D$ , 却减小 10% 以上, 平均减小 12.4%。此结果表明, 上述 3 个新构造的中尺度带通滤波器, 其滤波效果较目前常用的 3 种滤波器有明显改进。这还可从图 3 中带通滤波器的响应曲线得到进一步证实。

## 5. 实例分析

1986 年 7 月 27 日夜, 四川盆地西部的成都、德阳两市发生了一次突发性暴雨天气过程。从临近暴雨发生时的 27 日 20 时 500 hPa 天气图(图略)看, 几乎得不到有降暴雨的信息。只是在暴雨发生后(28 日 08 时), 500 hPa 川西才出现一天气尺度低涡。为了揭示出产生这次突发性暴雨的中尺度系统, 我们采用前面设计的中尺度带通滤波器, 对 500 hPa 风场资料作滤波处理, 取得了较满意的效果。

以前的分析研究表明, 与四川盆地暴雨天气直接相联系的是 300—500 km 的中尺度  $\alpha$  系统。为此, 我们选取前面构造的最大响应波长  $\lambda_m$  为 800 km 的两种带通滤波器  $BF^{(2)}$  和  $BL^{(2)}$  (滤波器的特征参数见表 1、表 2), 对 500 hPa 风场资料作滤波处理, 分离出这类与暴雨天气直接有关的中尺度  $\alpha$  系统。图 4 是由滤波器  $BF^{(2)}$  和  $BL^{(2)}$  获取的中尺度流场。由图可见, 两个中尺度流场非常相似, 都在  $104^\circ\text{E}$  附近出现了 3 个南北向排列的中尺度气旋, 其水平尺度约 300—500 km。同时都在高原东北部滤出一个中

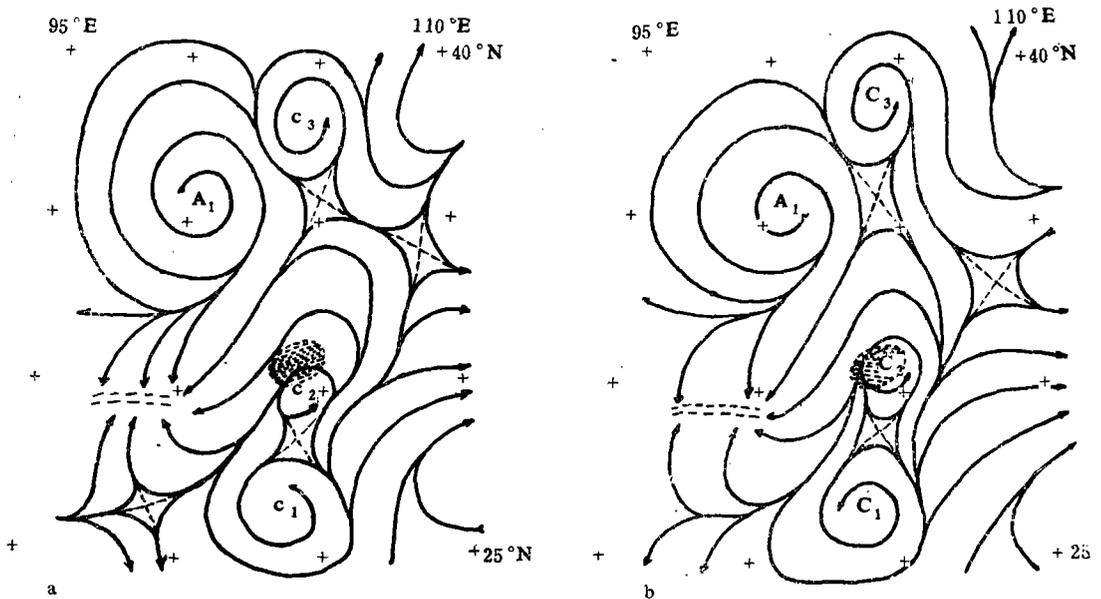


图 4 1986 年 7 月 27 日 20 时 500 hPa 滤波后的中尺度流场  
(图中实线为流线, 阴影区为暴雨区; a 为滤波器  $BF^{(2)}$  的滤波结果,  
b 为滤波器  $BL^{(2)}$  的滤波结果)

尺度反气旋  $A_1$ , 中心位于  $36^\circ\text{N}, 101^\circ\text{E}$  附近, 水平尺度约 800 km。这些系统的水平尺度均与滤波器的保留波带相吻合。

但仔细比较两个中尺度流场不难发现, 除尺度较大, 强度较强的反气旋  $A_1$  和气旋  $C_1$  的位置比较一致外, 由滤波器  $BF^{(2)}$  滤出的中尺度气旋  $C_2, C_3$  均较  $BL^{(2)}$  的结果偏南一个纬距, 而且由  $BL^{(2)}$  滤出的气旋  $C_2$  强度更强, 正好与发生在成都、德阳的暴雨天气相对应。相反, 由  $BF^{(2)}$  滤出的结果则要差些。此外, 从滤波得到的中尺度流场的全风速分布发现, 由滤波器  $BL^{(2)}$  得到的中尺度反气旋外围风速要较  $BF^{(2)}$  的结果大 1.0 m/s 左右(相对值大 10%以上), 最大达 1.7 m/s; 而中尺度气旋外围风速大 0.5 m/s 左右(相对值大 10%以上), 最大达 1 m/s。可见, 由滤波器  $BL^{(2)}$  提取的中尺度系统强度更强。

## 6. 结 语

本文讨论了气象场中尺度带通滤波器滤波效果的评判问题, 设计了一组能够客观、定量地反映带通滤波器滤波效果的物理参数(强度指数  $M$  和干扰指数  $D_r$ ), 得出了设计和构造中尺度带通滤波器的准则和发展方向。

通过检测过去常用的 3 个中尺度带通滤波器  $BF$  的滤波效果表明, 它们与理想的带通滤波器相比尚有明显差距, 有待作进一步改进。

本文设计了一种新的低通滤波器(8), 其滤波效果优于改进的 Barnes 低通滤波器(5)。用这种新的低通滤波器构造了 3 个中尺度带通滤波器  $BL$ , 检测结果表明, 这 3 个新的滤波器  $BL^{(i)}$  较过去常用的 3 个带通滤波器  $BF^{(i)}$  有更好的滤波效果, 实例分析结果与此一致。

致谢: 刘富明、徐裕华两位副研究员审阅了本文初稿, 谨致谢意。

## 参 考 文 献

- [1] Maddox, R.A., An objective technique for separating macroscale and mesoscale features in meteorological data, *Mdn. Wea. Rev.*, **108**, 1108—1121, 1980.

- [2] 党人庆,中尺度滤波法及对中间尺度云团分析的初步应用,气象科学,第2期,9—14页,1984。  
[3] 俞樟考等,浙江暴雨过程的中尺度低压,大气科学,13 2,185—192,1989。  
[4] 徐元泰、丁一汇,气象场的客观分析和中尺度滤波,大气科学,12,3期,274—282,1988。  
[5] 蔡则怡等,带通滤波在华北飑线中的应用,气象,14,1,23—27,1988。  
[6] 丁一汇编著,天气动力学中的诊断分析方法,72—86,科学出版社,1989。

## STUDY OF MESOSCALE BAND-PASS FILTERING METHOD FOR METEOROLOGICAL FIELDS

Chen Zhongming

(*Chengdu Research Institute of Plateau Meteorology, Chengdu, 610072*)

### Abstract

In the paper, some problems about filtering impact of mesoscale band-pass filter is discussed. Some results are obtained.