

带通滤波在华北飊线预报中的应用

蔡 则 怡

于 波

(中国科学院大气物理所)

(北京市气象科学研究所)

提 要

本文选择了两种有代表性高空流型的华北飊线个例,应用带通滤波器成功地将实际流场分离成变化缓慢、比较稳定的大尺度环境场和有明显移动变化的中尺度扰动场。一般,在扰动场上出现几个中- α 尺度(250—2500km)的扰动系统,其中有一两个扰动系统较深厚,并有规律地移动。它们的水平尺度比飊线系统大,生命史较长并先存在于扰动流场中,飊线就发生在某一扰动的一支较强的气流内。

一、引言

过去在数值分析和预报中,常常将各种对流系统作为次网格系统处理。近年来,随着局地天气预报要求的不断提高,进一步研究这类系统的必要性日益增加,发展了各种滤波技术^{[1]—[3]},力图将它们从大尺度环境场中分离出来。这些工作取得了相当成功,在强对流和暴雨过程中分析出中尺度的辐合带、中高压和中低压等^{[3]—[5]}。

飊线系统是由对流单体组织成的较大的中尺度对流系统,其直径约100—300km,有时可达500km。它们经常沿着露点锋或辐合带^[6]相继发生,形成飊线群,这种群体的水平范围可达1000km。作者曾对华北地区10多个飊线等强对流例子作了天气分析和诊断分析,发现强对流系统的发生发展与对流层中高空流场中的一些中尺度扰动有关,它们为强对流天气发生提供了能量贮存和触发不稳定能量释放的动力条件^{[7]—[9]}。同样,在另一地区中尺度试验中,也有人发现中上层冷平流对飊线发生发展有重要的作用。这些中尺度扰动只有通过诊断分析,在垂直速度场或温度平流场上反映出来。而在实际流场上往往被中高空强大的西风气流所掩盖,难以分析出来。这给飊线等强对流系统的分析预报带来一定的困难。为此,我们对华北飊线和北京飊线两个例子的各层流场,用带通滤波方法^[1]作了滤波分析试验,以分离出有关的中尺度扰动。着重说明这些

中尺度扰动的运动学特征,对它们的动力结构和演变过程将在另文讨论。

二、滤波方法

本文采用改进的高斯权重函数空间滤波方法,先用低通滤波器对客观分析流场进行平滑得到大尺度环境场,然后用带通滤波器提取中尺度扰动场^[10]。最后分析实际流场(可作总流场)、大尺度环境场和中尺度扰动场这三个流场的特征。

1. 低通滤波

设 $f_a(i, j)$ 为客观分析得到的网格点上要素场(用有限元插值法),低通滤波的初值场为:

$$f_0(i, j) = \sum_{n=1}^N W_n f_a(i, j) / \sum_{n=1}^N W_n \quad (1)$$

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

$$(n = 1, 2, \dots, N)$$

式中 N 是 $f_0(i, j)$ 点周围参加滤波的格点数,这里取计算区域内的总格点数。 r_n , W_n 分别是第 n 个格点距滤波点的距离和权重函数, c 是权重常数,下一步对初值场 $f_0(i, j)$ 进行修正:

$$f_L(i, j) = f_0(i, j) + \sum_{n=1}^K W_n' D_n / \sum_{n=1}^N W_n' \quad (3)$$

· 许梓秀等, 1977: 夏季冷低阻高型京津地区中尺度天气过程的分析研究(一), 雷达气象文集, 中央气象局研究所, P1—16。

$$D_n = f_a(i, j) - f_0(i, j) \quad (4)$$

$$W_n' = \exp\left(-\frac{r_n^2}{4gc}\right) \quad (5)$$

$$(n = 1, 2 \dots N)$$

D_n 是滤波点周围第 n 个格点上客观分析值与初值的余差, W_n' 是修正权重函数, g 是修正值, 一般取 0.2—0.5 之间的值。将余差 D_n 加权平均后加到 $f_0(i, j)$ 上就得到低通滤波场 $f_L(i, j)$, 其响应函数为:

$$R = R_0(1 + R_0^{g-1} - R_0^g) \quad (6)$$

$$R_0 = \exp\left(-\frac{4\pi^2 c}{\lambda}\right) \quad (7)$$

由两个参数不同的低通滤波场之差可决定一个带通滤波场。设 $f_1(i, j)$ 和 $f_2(i, j)$ 为两个由 (3) 式得到的低通滤波场, 其权重参数分别为 c_1, g_1 和 c_2, g_2 , 则带通滤波场为:

$$f_B(i, j) = S[f_1(i, j) - f_2(i, j)] \quad (8)$$

带通滤波器的响应函数为:

$$R_B = S(R_1 - R_2) \quad (9)$$

R_1 和 R_2 分别由 (6), (7) 式得到的两个低通滤波器的响应函数。 S 是一常数, 它使响应函数 R_B 的最大值恢复到 1。

由 (6), (7), (9) 式, 响应函数是波长 λ 的函数, 这样, 可以根据预先确定的中尺度系统的波长, 选取适当的 c_1, g_1, c_2, g_2 使在预定的波长范围内响应值达到最大, 这波长定义为 λ_{max} 。

2. 最大响应值的波长 (λ_{max}) 和尺度分离

各种特殊的天气现象和天气系统具有不同的水平范围, 文献 [8][9] 曾提出强对流发生有关的中高空下沉运动区和高层冷空气影响的水平范围 L 为 600—900km, 则系统的波长为 $\lambda = 2L$ 。由此可以预先确定最大响应值的波长 $\lambda_{max} = 1500\text{km}$ 。按下面选取的 c_1, g_1, c_2, g_2 值, 可使响应值超过 0.5 的波谱带正好为 800—2800km。它几乎包含了绝大部分中- α 尺度系统的连续波谱。

分别选取 $c_1 = 40000, c_2 = 300000, g_1 = 0.35, g_2 = 0.45, S = 1.25$ 。计算得低通滤

波场 $f_2(i, j)$ 代表大尺度环境场, 它包含了比带通滤去波长更长的全部波谱。 $f_B(i, j)$ 代表中尺度扰动场。而 $f_1(i, j)$ 的低通滤波场只是用来求带通滤波器的。

对应图 1 所示一组响应曲线的滤波器, 可将任一客观分析的流场 $f_A(i, j)$ 分离成一

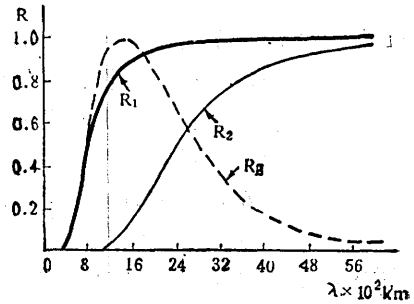


图 1 滤波器的一组响应曲线

R_1 和 R_2 是低通滤波器的响应曲线。 R_B 是由 R_1, R_2 确定的中尺度带通滤波器的响应曲线。

个中尺度扰动场 $f_B(i, j)$, 其 $\lambda_{max} = 1500\text{km}$, 和一个包含 $\lambda > 2800\text{km}$ 的所有波谱的大尺度环境场 $f_2(i, j)$ 。 $f_A(i, j), f_2(i, j)$ 和 $f_B(i, j)$ 三个场分别代表了实际的总流场, 大尺度环境场和中尺度扰动场。

三、分析结果

选择纬向型和经向型两种有代表性的高空流型的个例, 分别对华北和北京飊线天气发生当天和前一天, 每天两次 100, 200, 300, 500, 700, 850hPa 和地面等 7 层常规测风资料作客观分析和滤波分析。

1. 1983 年 6 月 27 日华北飊线群过程, 文献 [4] 对这次过程作了详细的中尺度分析。飊线群发生当天上午 08 时 (北京时) 200hPa 客观分析的实际流场、大尺度环境场和中尺度扰动场示于图 2。由图 2a 可见东亚大陆中纬环流为纬向型, 一支强的西风气流自河套西侧经黄淮下游到黄海。其北方另有一支较强的西北气流, 自贝加尔湖到我国东北地区。三个飊线系统都发生在北京市北侧 [4], 它们没有发生在强风带上, 而发生于强风带北侧 500km 以外的相对弱风区

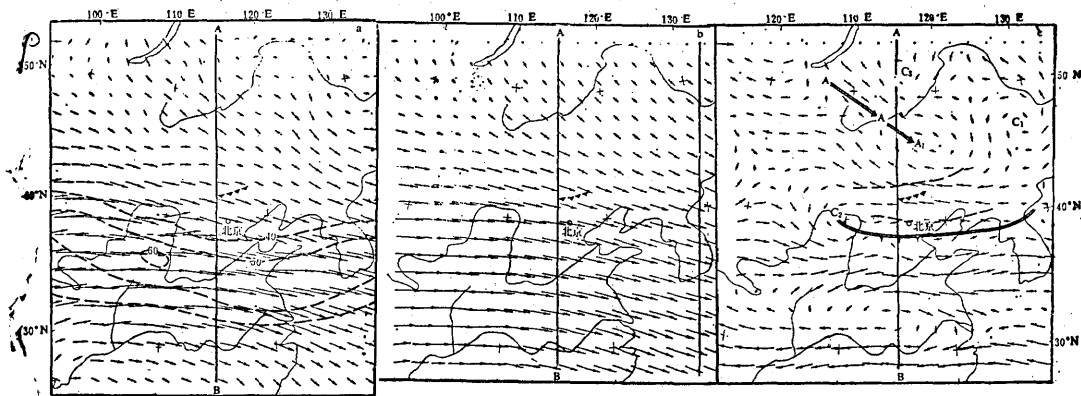


图2 1983年6月27日08时(北京时)200hPa图

(a)实际流场、锯齿线为飚线 $A_1^{(4)}$ 的初生位置,虚线为等全风速线,AB为剖面的基线;(b)低通滤波后的大尺度环境场;(c)带通滤波分离出来的中尺度扰动场,虚线为12和24小时前的切变线位置,双矢线为 A_1 的移动路径;(格距150km,水平风速单位, $m \cdot s^{-1}$,图左上角的矢量代表该图10个单位矢量的长度,下图类同)

内。图2b显示了西北风和偏西风汇合的均匀长波流场,是大尺度环境场的基本特征。图2c上有带通滤波分离出来的几个直径约1000km的扰动系统。值得注意的是叠加在环境场西北气流上的反气旋 A_1 和其南缘约沿 $40^\circ N$ 纬圈有一条切变线,飚线系统发生

在切变线的北侧。在这切变线两端有气旋 C_1 和 C_2 。

300hPa和500hPa的实际流场和大尺度环境场与200hPa基本一致(图略)。700hPa和850hPa两层实际流场和环境流场转变为一支自西北到东南的阶梯形波状风带(图3)。扰动场上的三个扰动系统的垂直厚度各异,扰动 A_1 和 C_1 比较深厚,向下伸展到700hPa,河套气旋 C_2 则在500hPa消失,到700和850hPa转为反气旋 A_2' (图3)。

经飚线发生区沿 $115^\circ E$ 的南北向实际流场的垂直剖面图上,在飚线发生区以北有一个大范围的下沉区,区内有两个下沉速度最大中心,一个在200hPa, $w = 8cm \cdot s^{-1}$,与高空反气旋 A_1 相对应。另一个在400hPa, $w = 6cm \cdot s^{-1}$,与低层反气旋 A_2' 相对应(图4)。低层反气旋 A_2' 和与它对应的较强而深厚的下沉运动是强对流能量贮存的动力条件,详细情况另文讨论。

26日08时高空反气旋 A_1 自蒙古东部向东南移动,平均移速为40km/h(图2c),其前缘的气旋 C_1 , C_2 和切变线移速较慢,平均移速为10—20km/h。由此可推测高空反

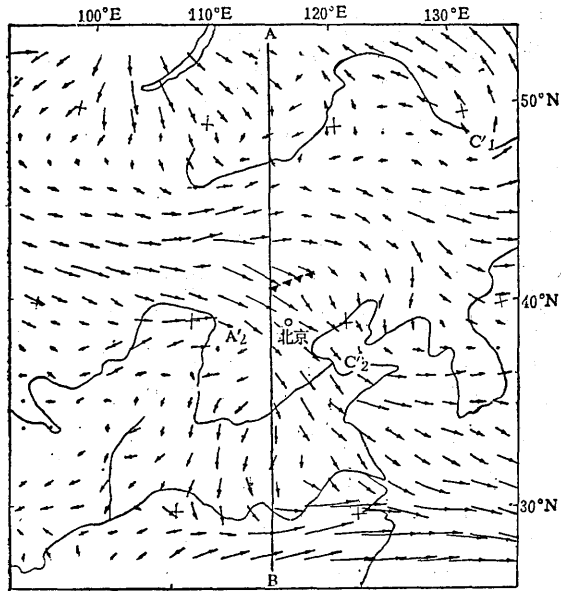


图3 1983年6月27日08时700hPa实际流场图
 A_2' , C_1' 和 C_2' 是中尺度扰动场上反气旋和气旋的中心位置

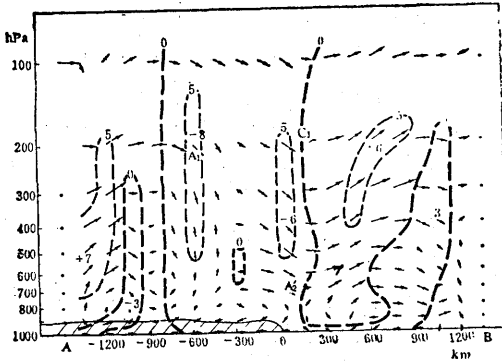


图4 经过飚线发生区的南北剖面图
虚线为等w线(单位, $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$, 正值为上升运动, 由运动学方法计算得出), 剖面基线见图2a, 横坐标距离为相对于飚线发生区的距离, 向北为负

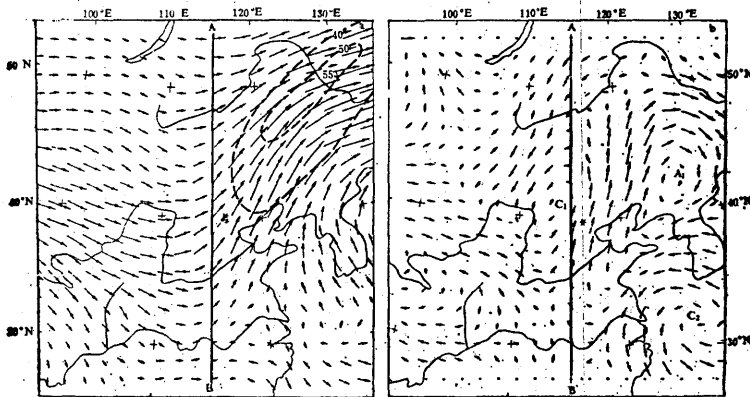


图5 1985年7月25日20时200hPa图
(a)实际流场, (b)中尺度扰动场, 星号为飚线出现位置, 其它说明同图2

10—20km/h, 与个例1的气旋移速相似。

四、讨论

以上结果说明应用带通滤波器能成功地将实际流场分离成变化缓慢、相对稳定的大尺度环境场和有明显移动和变化的中尺度扰动系统的流场。扰动场上一些较深厚的有规律移动的中尺度扰动与飚线等强对流天气发生发展有关。它们与实际流场诊断分析计算的垂直速度场等配合较好。

在中尺度扰动场上的中系统可分两类:

(1) 以切变涡度为主的系统, 在实际流场上很难直观地分析出来, 只有滤去大尺度环

气旋 A_1 的迅速东南移动是与中高层冷空气爆发有关的中尺度扰动系统。当高空反气旋 A_1 移来受其南缘气流影响, 飚线系统相继发生。

2. 1985年7月26日凌晨北京地区飚线过程。飚线过境时出现十几分钟8级以上强风, 云图上对应一个直径约为100km的逗点云团(图略)。200hPa实际流场上有一振幅较大的东亚大槽及其下游的脊控制, 呈经向环流。飚线出现在西南急流的入口区(图5a)。中尺度扰动场上有气旋 C_1 和反气旋 A_1 与大振幅的槽脊相对应, 飚线发生在反气旋 A_1 后部气旋 C_1 中心附近(图5b)。

反气旋 A_1 伸展到500hPa, 气旋 C_1 一直到850hPa, 它们都是较深厚的系统, 并有规律地自西南向东北移动, 平均移速约

境场后才能显示。它们常常出现在高空纬向环流形势下的平直气流上。如例1中, 早期的中尺度反气旋 A_1 (26日08时和20时实际流场图略) 和中尺度气旋 C_2 (图2)。(2) 以曲率涡度为主的系统, 它们常常出现在高空经向环流形势下, 与实际流场上振幅明显的槽脊相对应。也与低层波状气流上的槽脊相对应。如例2中, 对应高空东亚大槽脊的中尺度扰动 A_1 和 C_1 (图5); 例1低层对应阶梯槽的中尺度扰动系统(图3)。即使是第二类系统, 滤波分离出来的中尺度系统能确切地定出中心位置, 并估算它们的移向移

速, 为强对流天气的分析预报提供可靠的依据。

根据上述权重常数的选择, 能着重分离出水平尺度较大的中尺度系统 ($L \approx 750\text{km}$) 一般水平范围在 $400\text{--}1400\text{km}$ 之间的系统也都能分离出来。从以上两个实例滤出的中尺度系统大多为 1000km 左右, 这比强对流天气系统本身大得多。飑线等强对流系统只是在中尺度高空反气旋南部 (或西部) 的偏东 (或偏南) 气流中发生发展, 这支气流的宽度为 $400\text{--}600\text{km}$, 它们为强对流发生提供了有利的背景流场。这些中尺度系统的尺度较大, 生命史较长, 移动和演变有明显的规律, 并先存在于流场中。然而, 直接与飑线相对应的中尺度系统可能是这支气流内尺度较小, 生命史较短, 迅速演变的扰动, 这种扰动用现有的高空测站的时空分布资料很难分离出来。对飑线等强对流天气分析预报而言, 分离出与对流发生的背景流场有关的中尺度系统更有现实意义, 因此, 选择这种滤波器是比较合适的。

致谢: 徐元泰同志提供了滤波和绘图程序, 谨此致谢。

参考文献

[1] Shuman, F. G., Numerical methods in

weather prediction, II. Smoothing and filtering, Mon. Wea. Rev. Vol. 85 357—361, 1957.

[2] Shapiro, R., Smoothing, filtering and boundary effects. Review of Geophysics and Space Physics, Vol. 8, 359—387, 1970.

[3] Barnes, S. L., Mesoscale objective map analysis using weighted time-series observations. NOAA Technical Memorandum ERL NSSL-62, 1973.

[4] Maddox, R. A., An objective technique for separating macroscale and mesoscale features in meteorological data. Mon. Wea. Rev. Vol. 108, 1108—1121, 1980.

[5] 夏大庆, 郑良杰, 董双林, 宋丽, 气象场的几种中尺度分离算子及其比较, 大气科学, 第7卷, 303—311, 1983.

[6] 赵思雄等, 夏季冷涡强对流天气的中尺度分析 大气物理研究所集刊 (9), 151—160, 1980.

[7] 蔡则怡, 沙漠地区的一次强对流暴雨, 气象学报, 39(1), 110—117, 1981.

[8] 蔡则怡, 我国强对流发生前的能量贮存机制, 大气科学, 9(4) 377—386, 1985.

[9] 蔡则怡, 中层强冷空气爆发与华北强对流天气, 全国强对流天气文集, 8—14, 气象出版社, 1983.

[10] Doswell, III, C. A., Obtaining meteorologically significant surface divergence fields through the filtering property of objective analysis. Mon. Wea. Rev. Vol. 105, 885—892, 1977.

Application of the bandpass filter for forecasting squall line in North China

Cai Zeyi

(Institute of Atmospheric Physics, Academia Sinica)

Yu Bo

(Beijing Meteorological Institute)

Abstract

The bandpass filter has been utilized to analysis two cases of squall line event in North China. The realistic wind field has been successfully seperated into a slowly variable, more stable macroscale environment field and an obviously movable meso-scale disturbances field. In general, there are several meso- α scale ($250\text{--}2500\text{km}$) disturbances emerged into the disturbances field. some of them is deep and moving steadily. The squall line systems occurred in a region of strong air flow associated with one of these disturbances, which is larger and formed earlier and persisted quite longer than the life cycle of the squall lines.