

大范围暴雨过程涡旋场特征的滤波试验*

徐祥德 朱远琼**

(南京气象学院)

提 要

本文着眼于大范围暴雨过程天气尺度系统的诊断研究。采用平滑滤波的方法分解行星尺度及天气尺度谱, 计算了暴雨过程不同尺度谱的涡旋场、散度场分布及演变趋势, 对天气尺度系统的分布特征、低空急流发展的动力因素进行了分析, 且运用描述不同尺度谱的变形涡度方程, 对天气尺度系统的移动、发展进行了诊断研究。本文的数值分析表明滤波方法有助于进一步揭示大气运动的多尺度特征, 深入认识暴雨过程的动力机制。

一、引 言

大气运动是一多尺度复杂的物理过程, 日常使用的天气图资料描述了这一过程。目前国内外学者已采用了一些滤波方法, 研究了天气、次天气尺度系统在暴雨等天气过程中相互作用的物理过程^[1,2]。本文滤波试验的目的是研究暴雨过程中行星尺度与天气尺度系统的分布特征及其相互影响的物理过程。

为实现行星尺度与天气尺度运动的分解, 本文采用平滑滤波方法^[3]。

$$Z_{i,j} = \bar{Z}_{i,j} + Z'_{i,j} \quad (1)$$

$Z_{i,j}$ 为某要素场, $\bar{Z}_{i,j}$ 场表示经平滑滤波后的要素场, 这里 $\bar{Z}_{i,j}$ 场代表了行星尺度运动。 $Z'_{i,j}$ 场表示天气、次天气尺度运动。

本文采用如下平滑算子。

$$\bar{Z}_{i,j} = Z_{i,j} + \frac{S}{2} (1-S) \nabla^2 Z_{i,j} + \frac{S^2}{4} (Z_{i+1,j+1} + Z_{i-1,j+1} + Z_{i+1,j-1} + Z_{i-1,j-1} - 4 Z_{i,j}) \quad (2)$$

对于上述二维平滑算子的滤波特性可根据下面一维三点平滑算子的响应系数(图 1)来考虑。

取平滑系数 $S = \frac{1}{2}$, 响应函数^[3]为

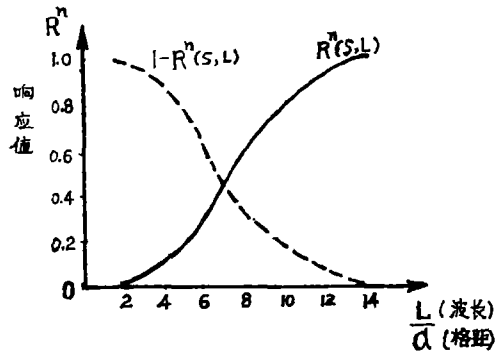
$$R^n\left(\frac{1}{2}, L\right) = \cos^{2n} \frac{\pi d}{L} \quad (3)$$

式中 n 为平滑次数, d 为网格距, L 为波长。

根据上述关系式, 本文若采用 $d = 300$ 公里的水平格距, 平滑次数 $n = 3$, 可基本滤去

* 本文于 1983 年 10 月 4 日收到, 1984 年 1 月 24 日收到修改稿。

** 朱远琼同志现在四川省气象局研究所工作。

图 1 响应函数 $R^n, 1-R^n$ 曲线 ($S=0.5, n=3$)

天气、次天气尺度的波,得到主要代表行星尺度波的 $\bar{Z}_{i,j}$ 场。若要求主要代表天气、次天气尺度的 $Z'_{i,j}$ 场,可采用如下式子。

$$Z'_{i,j} = Z_{i,j} - \bar{Z}_{i,j} \quad (4)$$

显然 $Z'_{i,j}$ 场滤波的响应函数关系为(图 1)

$$Z'_{i,j} = (1 - R^n(S, L)) Z_{i,j} \quad (5)$$

运用上述平滑滤波方法,将实际风场可分解为如下相应形式。

$$\bar{\mathbf{V}} = \bar{\mathbf{V}} + \mathbf{V}' \quad (6)$$

因此,涡旋场、散度场可写成如下形式。

$$\begin{pmatrix} \xi \\ \nabla \cdot \bar{\mathbf{V}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{\xi} \\ \nabla \cdot \bar{\mathbf{V}} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \xi' \\ \nabla \cdot \mathbf{V}' \end{pmatrix} \quad (7)$$

在 (x, y, p, t) 坐标系中,描写天气尺度系统运动的简化涡度方程为:

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} = -\bar{\mathbf{V}} \cdot \nabla (\xi + f) - f \nabla \cdot \bar{\mathbf{V}} \quad (8)$$

将关系式(7)代入方程(8),经整理可导出描述两类尺度谱涡旋场演变的方程。

$$\frac{\partial \bar{\xi}}{\partial t} = -\bar{\mathbf{V}} \cdot \nabla (\bar{\xi} + f) - f \nabla \cdot \bar{\mathbf{V}} - \overline{\mathbf{V}' \cdot \nabla \xi'} \quad (9)$$

$$\frac{\partial \xi'}{\partial t} = -\mathbf{V}' \cdot \nabla (\xi' + f) - f \nabla \cdot \mathbf{V}' + \overline{\mathbf{V}' \cdot \nabla \xi'} - \bar{\mathbf{V}} \cdot \nabla \bar{\xi} - \bar{\mathbf{V}} \cdot \nabla \xi' \quad (10)$$

上述方程(9),(10)右边前二项为不同尺度运动涡旋场变化的平流及散度项,方程(9)右边最后一项为天气尺度运动对行星尺度运动的贡献,而方程(10)右边最后三项亦为行星尺度运动对天气尺度系统的影响与控制,反映了不同尺度运动的非线性相互作用。

二、尺度分解流场特征

本文选择 1979 年 7 月 9 日与 7 月 16 日两个暴雨个例,这两次过程均属涉及若干省的大范围暴雨。7 月 9 日暴雨个例中心位于信阳、许昌一带,雨区涉及河南、安徽、四川等省,7 月 16 日暴雨个例中心位于阜阳、蚌埠、亳县及宜昌、金佛山一带,雨区涉及河南、安徽、四川、贵州等省。

分析这两次过程产生暴雨的系统可以发现,暴雨均属低涡、切变线系统,且中心区域位于低涡的东南侧。由此可见,低涡、切变线的移动与变化是预报暴雨落区的关键环节之一。本文试图通过滤波处理,基本过滤行星尺度波动,使与大范围暴雨过程紧密相关的低涡、切变线这类天气、次天气尺度系统表现得更为清晰,进而研究其移动、变化及其与行星尺度系统的相互影响关系。

本文对上述暴雨过程 500 毫巴、700 毫巴两层等压面资料进行平滑滤波试验,分离了行星尺度与天气尺度系统,计算结果表明,两个暴雨过程前期行星尺度系统基本相似,尤其滤去天气、次天气尺度系统后,暴雨落区附近,行星尺度波动构成二股大尺度气流的汇合状较为清晰(图 2 a)。

滤波后天气尺度系统的涡旋结构比原风场更为明显,这说明滤波分离不同尺度波动的效应。如 7 月 16 日暴雨过程实际流场资料,暴雨落区附近只能分析一个低涡和切变线,滤波后可分辨出两个低涡(图 2 b),且与次日带状东北、西南向暴雨区的两个强降水区相应。

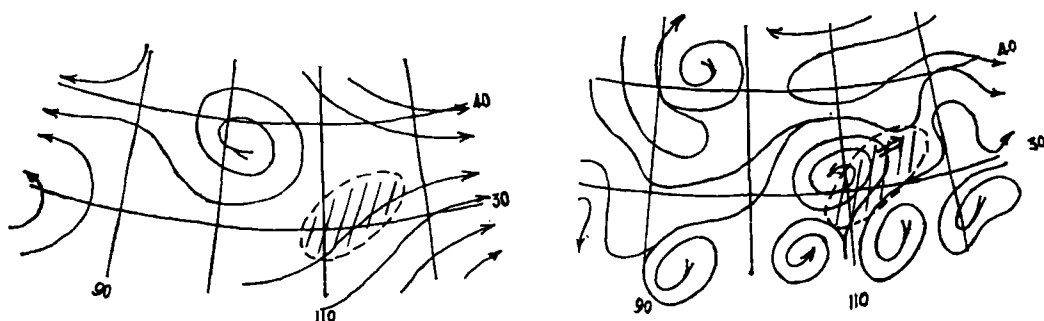


图 2 a 1979 年 7 月 15 日 08 时 700 mb 尺度分离后的行星尺度流场分布(阴影区为次日暴雨落区)

图 2 b 1979 年 7 月 15 日 08 时 700 mb 尺度分离后天气尺度流场分布(箭头为低涡移向)

三、滤波涡旋场、散度场的分析

分析 500 毫巴、700 毫巴等压面经滤波处理主要表示天气尺度波动的涡度场 ξ' 分布可知,两层等压面相应于上述低涡位置均有正涡度中心,副热带高压范围均有明显的负涡度中心(图 3)。

使人感兴趣的是,从原风场计算的散度分布来看,暴雨落区在负值内,但较滤波后的弱(图 4—5)。滤波后的散度场 $\nabla \cdot \vec{v}'$,可见,暴雨过程相应于行星尺度气流入口区均可见正负两散度中心区域,负散度中心恰好位于次日暴雨落区的东北侧(落区附近),且与次日低涡的位置接近(图 5)。

分析两个个例也可发现,滤波后散度场 $\nabla \cdot \vec{v}'$ 的辐合区域中心位置均与暴雨过程的低涡系统的移向有关。

上述入口区滤波后散度场特征可以说明行星尺度气流的汇合、锋生引起天气尺度扰动加强,即急流入口区右侧有辐合、上升运动发展,该区域有利于低压扰动生成、加强。滤波处理的效果能使上述天气尺度的扰动表现得更为显著,其散度场特征也表现得较为清楚,这些对于研究入口区动力结构及暴雨过程低涡、切变线等天气尺度系统移动、发展有

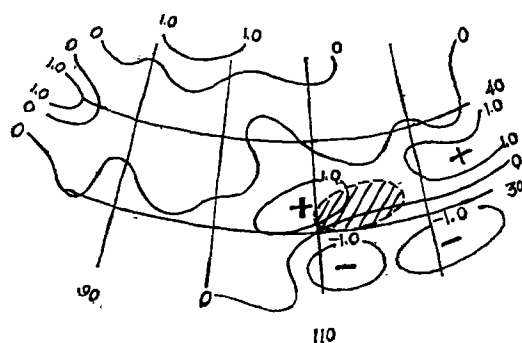


图 3 1979 年 7 月 8 日 08 时 700 mb 尺度分离后天气尺度涡旋场分布 (10^{-5} 秒 $^{-1}$)

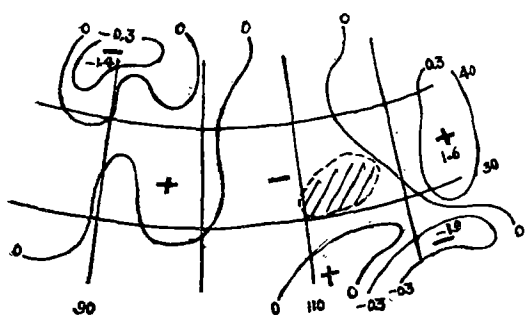


图 4 a 1979 年 7 月 8 日 08 时 700 mb 未经滤波原风场的散度分布 (10^{-5} 秒 $^{-1}$)

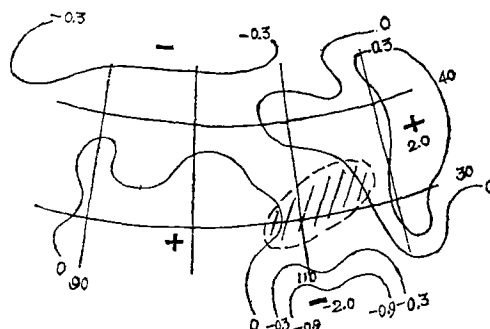


图 4 b 1979 年 7 月 15 日 08 时 700 mb 未经滤波原风场的散度分布 (10^{-5} 秒 $^{-1}$)

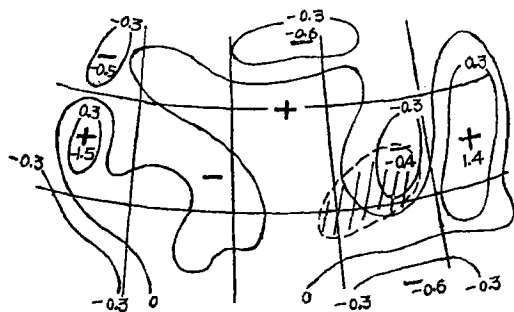


图 5 a 1979 年 7 月 15 日 08 时 700 mb 尺度分离后天气尺度散度场分布 (10^{-5} 秒 $^{-1}$)

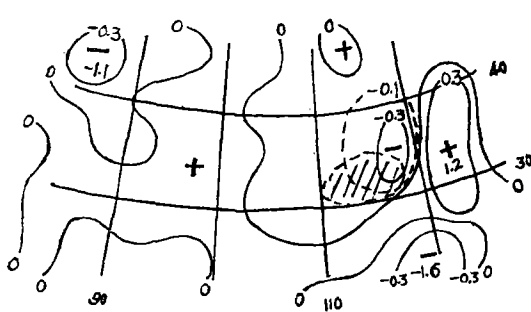


图 5 b 1979 年 7 月 8 日 08 时 700 mb 尺度分离后天气尺度散度场分布 (10^{-5} 秒 $^{-1}$)

一定帮助。

四、分离尺度谱形式涡度方程的初步应用

应用上述已导出的尺度谱形式涡度方程, 计算涡旋的局地时间变率 $\frac{\partial \xi'}{\partial t}$ 场发现: 上述暴雨过程大尺度气流入口区暴雨前连续二日有两个 $\frac{\partial \xi'}{\partial t}$ 值的正负中心区域(图 6)。这意味着滤波处理使天气尺度扰动的变化特征也更为突出, 对照天气图资料可知, 滤波后入口区 $\frac{\partial \xi'}{\partial t}$ 正值中心对暴雨过程低涡系统的移动、发展及暴雨的发生均有一定指示意义(图 8 所示)。 $\frac{\partial \xi'}{\partial t}$ 负值中心区域恰处于副高一侧, $\frac{\partial \xi'}{\partial t}$ 正负中心的分布特征说明了该处气压梯度加大, 偏南急流增强, 有利于暴雨的发生(图 6)。

若直接采用未滤波的风场资料, 运用原来的涡度方程(7) 计算涡度局地变率 $\frac{\partial \xi}{\partial t}$ 分布场, 发现: 入口区天气尺度扰动的变化特征显得较为模糊(图 7)。

由原涡度方程(8) 与分离尺度谱形式的涡度方程(10) 计算 $\frac{\partial \xi}{\partial t}$ 的效果比较可见, 尺度谱形式的涡度方程效果较好。方程(8) 属普通形式的涡度方程, 而方程(10) 右边前二项代表滤去行星尺度波动后的天气、次天气尺度扰动涡旋场的平流输送项 $\vec{V}' \cdot \nabla(\xi' + f)$ 及散度项 $f \nabla \cdot \vec{V}'$, 右边后三项则反映了行星尺度与天气、次天气尺度系统的非线性相互作用, 即 $\vec{V}' \cdot \nabla \bar{\xi}, \vec{V} \cdot \nabla \xi', \vec{V}' \cdot \nabla \xi'$ 。从上述试验结果可见, 在计算涡度局地时间变率时, 由于引入了上面反映尺度谱扰动特征和其相互作用关系的各项, 使入口处涡度场变化特征更为显著。这些进一步说明: 对于大范围暴雨过程, 存在着天气、次天气尺度扰动与行星尺度系统之间的非线性相互作用, 它正是暴雨过程多尺度特征的表现。

本文计算 500 毫巴、700 毫巴涡度局地时间变率垂直切变 $\frac{\partial}{\partial P} \left(\frac{\partial \xi'}{\partial t} \right)$ 场分布可知, 低层涡度时间变率大于高层的强切变区域, 即高层涡度低值, 低层涡度高值的上下叠置结构

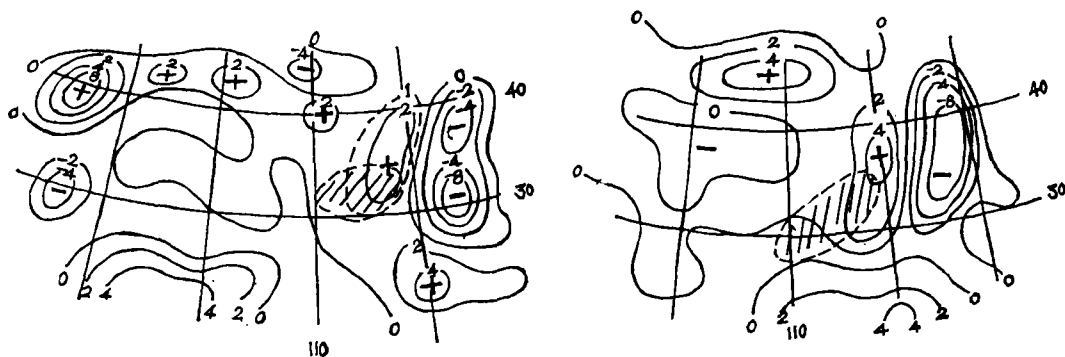


图 6a 1979 年 7 月 8 日 08 时 700 mb 应用尺度谱 图 6b 1979 年 7 月 15 日 08 时 700 mb 应用尺度谱形式涡度方程计算的 $\frac{\partial \xi}{\partial t}$ 场分布(10^{-10} 秒 $^{-2}$) 度谱形式涡度方程计算的 $\frac{\partial \xi'}{\partial t}$ 场分布(10^{-10} 秒 $^{-2}$)

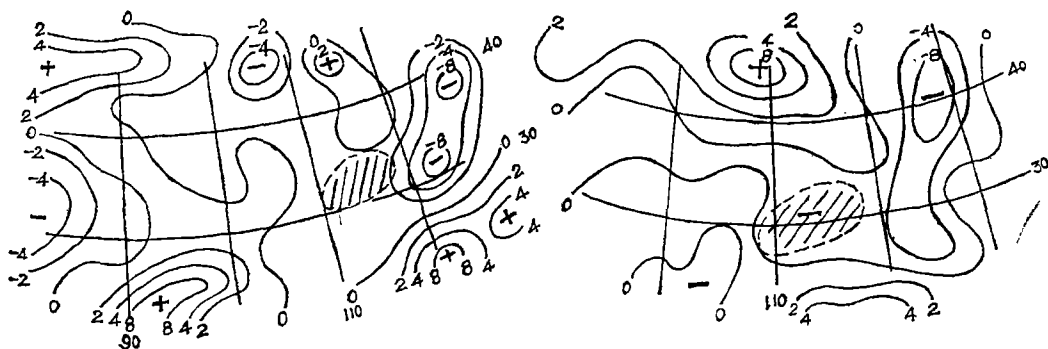


图 7 a 1979 年 7 月 8 日 08 时 700 mb 应用原

涡度方程计算的 $\frac{\partial \xi}{\partial t}$ 场分布 (10^{-10} 秒^{-2})

图 7 b 1979 年 7 月 15 日 08 时 700 mb 应

用原涡度方程计算的 $\frac{\partial \xi}{\partial t}$ 场分
布 (10^{-10} 秒^{-2})

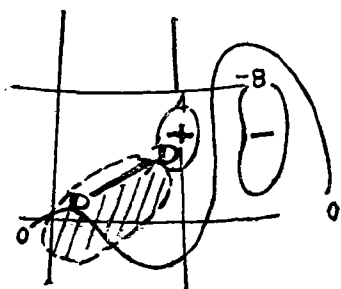


图 8 应用尺度谱形式涡度方程计算的 $\frac{\partial \xi}{\partial t}$ 场正值中心与低涡移动的相关
示意图

将有利于上升运动及天气尺度扰动加强,这对未来暴雨区的出现及低涡的移动也有一定的先兆意义。

上述试验说明,选取适当的滤波方法,有助于揭示暴雨这类多尺度复杂过程,研究大尺度气流入口区天气扰动的发展。可以设想,在今后的研究和业务工作中,可采用滤波处理资料的方法,使用能够反映各类不同尺度扰动的“滤波天气图”来补充目前实况天气图,例如可分为行星尺度、天气尺度、次天气尺度等类不同尺度运动经滤波处理的流场及其它要素场。以这些尺度分离的要素场来分析、研究各类天气过程,丰富不同尺度天气系统的天气学、动力学的内容。这样做,在理论上和实践上将可能收到比目前使用的“多尺度迭加”的实况天气图更好的效果,这对不同尺度系统演变特征及暴雨等多尺度复杂物理过程的研究会带来更大的方便。关于天气、次天气尺度系统的分离及相互作用的研究有关文献^[1,2]已阐明,本文分离行星、天气尺度系统的尝试不过再次证实了研究不同尺度系统特征及其相互作用物理过程的必要性,也可进一步说明上述设想实现的可能性。同时,由于天气图引入了尺度谱的问题,因此,有必要变换描述大气运动的有关方程,使之包含不同尺度谱形式,这样做将有助于进一步认识大气运动的多尺度复杂物理过程。

参 考 文 献

- [1] 陈受钧,次天气尺度与天气尺度系统间动能交换的诊断分析,气象学报,39, No. 4, 408—415, 1981.
- [2] 章立名、李维亮,夏季长江流域梅雨期暴雨的动力学个例分析,中科院大气所集刊,第7号, 1979.
- [3] G. J 哈廷纳,数值天气预报,科学出版社,1974.

A FILTERING STUDY OF VORTICITY FIELD CHARACTERS IN THE LARGE AREA HEAVY RAIN PROCESSES IN EASTERN CHINA

Xu Xiangde Zhu Yuanqiong

(Nanjing Institute of Meteorology)

Abstract

In this paper, investigation has been made into the large area heavy rain processes in eastern China. The large scale and synoptic scale vorticity field and divergence field have been calculated by the smooth filtering operator. Using deformed vorticity equation governing motions of a diverse spectrum of scale, diagnostic analysis on the characters of movement and evolution of synoptic system has been made. The results show that the filter experiment may reveal the multiple scale characters and the dynamic factors of large area heavy rain processes.