一种分离暴雨过程天气尺度和 次天气尺度特征的方法^{*}

魏凤英 朱福康

(中国气象科学研究院,北京 100081)

摘 要 作者提出利用奇异谱主分量重建技术进行气象变量场尺度分离的新构想,并设 计出尺度分离的具体实施方法。使用此方法对1998 年7月下旬长江流域强暴雨过程的卫星 观测亮温(*T*_{BB})场进行了试验性尺度分离。结果表明,该分离技术可以将这次暴雨过程 天气尺度和次天气尺度系统的基本结构清晰地分离出来。在天气尺度场上,长江流域呈现 出明显的切变线上连续性对流云系的特征。在次天气尺度场上,可以清楚地显现出偶极子 系统的演变特征,其活动与暴雨过程有很好的对应。

关键词: 奇异谱; 尺度分离; 暴雨过程

1 引言

夏季暴雨的研究涉及多尺度系统及其相互作用。据以前的研究^[1],在不同尺度的 影响系统中,次天气尺度对流系统是暴雨发生发展的直接影响系统,而暴雨中心的形 成主要受β中尺度系统支配。在气象变量场上,天气尺度与次天气尺度系统叠加在一 起,需要使用某种方法对其进行尺度分离,才能揭示次天气尺度系统的演变特征。

现常用的尺度分离办法是使用低通滤波或带通滤波,将与次天气尺度系统对应的 波长信号分离出来。这种分离方法计算简单,天气学意义也比较明确。由 Shapiro^[2]提 出的基于二维平滑公式的低通滤波是迄今仍被广泛使用的方法。Barnes^[3]基于高斯权重 函数,将低通滤波与带通滤波结合使用,设计出一种空间尺度分离方法。Maddox^[4]在 此基础上发展了对相同资料使用两个分离低通滤波的方案。上述方法的滤波算子是通 过计算点与一定空间范围内各点的平均值之间的差值来分离次天气尺度的,其中平滑 系数需要人为确定,并要进行数次计算来实施分离。波谱分析也是一种常用的尺度分 离方法,使用傅立叶展开不同的波,计算不同长度波之间的动能转换函数。这种方法 实质上是视系统由不同频率正弦波叠加而成的振动波,沿整个纬圈作全球范围的尺度 分离。

我们注意到,利用上述方法作气象变量场的尺度分离是在这样的假设下进行的^[5],即任一变量场 *F*由天气尺度运动及次天气尺度运动叠加而成,即

$$F = F_{L} + (F - F_{L}).$$
(1)

²⁰⁰¹⁻⁰³⁻²⁹ 收到, 2001-06-04 收到再改稿

^{*}国家重点基础研究发展规划项目 G1998040907 资助

可见,次天气尺度部分是从原变量场中减去天气尺度部分得到的,其中也包括了气象 噪音。

本文从不同于(1)式的思路出发,提出用奇异谱技术进行气象变量场空间尺度分离的构想。首先简单描述了奇异谱的基本概念,探讨了基于奇异谱主分量重建技术进行尺度分离的理论依据,设计出具体实施空间尺度分离的方案。使用这一方法对1998年7月下旬长江流域强暴雨过程试验性地进行了尺度分离。

2 奇异谱分析概述

奇异谱分析(Singular Spectrum Analysis, SSA)在数字信号处理技术中早已被广泛应用^[6],并被称为Karhunen-Loeve 正交变换^[7]。Vautard 等^[8]提出将这一技术用于非线性动力学重建,并相继在气候信号识别中应用^[9]。由于在变换中矩阵的特征值求解与 奇异值分解(Singular Value Decomposition, SVD)有关,因此,目前国内外气象界普遍 将其称为奇异谱分析。我们这里使用的是从时间序列的动力学重建出发,并与经验正 交函数(Empirical Orthogonal Function, EOF)相联系的计算方式。SSA 在统计学中相应 于 EOF 在延滞坐标上的表达,分解的空间结构与时间尺度有关,对于未知物理本质的 系统,可以有效地从一个有限的含有噪声的序列中提取信息。

2.1 基本方法

对于给定的样本量为 N、均值为 0 的一个时间序列 $x_i = x(t)$,再给定嵌套空间维数 $M, M \leq N/2$,采用动力系统分析中的做法,将序列时滞排列建立相空间

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \cdots & x_{N-M+1} \\ x_2 & x_3 & \cdots & x_{N-M+2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_M & x_{M+1} & \cdots & x_N \end{bmatrix},$$
(2)

称 X 为轨迹矩阵。(2) 式阵的滞后自协方差为一个 $M \times M$ 的矩阵,

$$\boldsymbol{S} = \begin{bmatrix} S(0) & S(1) & \cdots & S(M-1) \\ S(1) & S(0) & \cdots & S(M-2) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ S(M-1) & S(M-2) & \cdots & S(0) \end{bmatrix},$$
(3)

显然, S 为对称阵且主对角线为同一常数,称为 Toeplitz 矩阵。

计算出 *S* 的特征值 λ_k 和相应的特征向量,那么滞后步长为 *j* (*j* = 1, 2, …, *M*) 的时间函数 x_{i+i} 的展开式为

$$x_{i+j} = \sum_{k=1}^{M} a_{ik} \varphi_{kj}, \qquad (4)$$

式中 $i = 1, 2, \dots, N - M + 1; j = 1, 2, \dots, M$ 。由于资料阵是嵌入时间滞后构成, φ_{ij} 为时间 EOF,记为 T – EOF, α_{ik} 为(2)式的状态向量在第k个 T – EOF 上的投影。

$$a_{ik} = \sum_{j=1}^{M} x_{i+j} \varphi_{kj},$$
 (5)

称 a_{ik} 为时间主分量,记为 T – PC。和 EOF 一样,T – PC 仍是时间的函数,T – EOF

192

则是滞后时间步长的函数。

可以证明,对矩阵 *X* 的展开等价于对 *X* 作奇异值分解^[8],而 Toeplitz 矩阵 *S* 为非负定阵,其特征值 $\lambda_1 \ge \lambda_2 \ge \cdots \ge \lambda_M > 0$,它们的平方根是关于矩阵 *X* 的奇异值,称 *X* 的奇异值 $\sigma_1 \ge \sigma_2 \ge \cdots \ge \sigma_M > 0$ 为奇异谱,称对 *X* 的奇异值运算为奇异谱分析。奇异谱分析的功能是可以将序列中隐含的波形信号从噪音系统中提取出来,这是由于用奇异值分解分离的是典型信号,对于按时滞排列的 *X* 有明确的物理意义,即对于给定的最大时间后延 *M*,T – EOF 行向量中蕴含的波形信号被集中在各个特征向量中,而与其最大相关的波形信号的变化特征则被投影到其对应的T – PC 上。

2.2 重建成分

应用奇异谱分析重建成分,可以有效地提取我们感兴趣的信息。假设用前 P ($P \le M$) 个 φ_{ij} 和 a_{ik} 重建长度为 N 的序列 $\hat{X} = \hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_N$,重建的序列在最小二乘意义 下最接近原序列的状态向量 X 在前 P 个 T – EOF 上的投影,亦使

$$Q = \sum_{j=1}^{M} \sum_{i=0}^{N-M} (\hat{x}_{i+j} - \sum_{k=1}^{P} a_{ik} \varphi_{kj})^2$$
(6)

达最小。(6) 式的解为

$$\hat{x}_{i} = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^{M} \sum_{k=1}^{P} a_{i-j,k} \varphi_{kj}, \qquad \qquad \stackrel{\text{tr}}{=} M \leqslant i \leqslant N - M + 1, \tag{7a}$$

$$\hat{x}_{i} = \frac{1}{i} \sum_{j=1}^{i} \sum_{k=1}^{p} a_{i-j,k} \varphi_{kj}, \qquad \qquad \stackrel{\text{ld}}{=} 1 \leqslant i \leqslant M - 1,$$
(7b)

$$\hat{x}_{i} = \frac{1}{N - i + 1} \sum_{j=i-N+M}^{M} \sum_{k=1}^{i} a_{i-j,k} \varphi_{kj}, \qquad \stackrel{\text{tr}}{=} N - M + 2 \leqslant i \leqslant N.$$
(7c)

3 基于奇异谱重建成分的尺度分离方案

3.1 利用奇异谱重建成分进行尺度分离的依据

我们提出利用奇异谱重建成分进行尺度分离主要有以下依据:

(1)(7)式及(5)式可以将原序列 X 变换到 \hat{X} 。这一变换过程实际是对 X 序列 加权滑动平均,等价于数字滤波器,其中特征向量 φ_{kj} 相当于滤波系数,且这一变换过 程是非线性的, φ_{kj} 与原序列 X之间是非线性关系,滤波器的频率响应函数是滤波系数 φ_{ki} 的傅里叶变换。既然是一种滤波器,就可以将不同波形的信号进行分离。

(2)如前所述,奇异谱分析在统计学中相当于对矩阵 X 作 EOF,由 EOF 的基本性 质可知,经过对矩阵 X 的变换,组合的新变量即主分量及其特征向量一定满足极大方 差要求,且按特征向量所占方差由大至小排列。如果在具有较大方差的前几个特征向 量中,存在明显成对的特征值对应的主分量及特征向量几乎是周期性或正交的,那么, 它们就代表系统较大振幅的趋势波动,且很少含噪音。具有稍小方差但仍可以通过某 种显著性检验的特征向量代表较小振幅的波动,只有很小方差且前后间特征值变化不 明显的特征向量被视为白噪音占优势。为此,许多科学家提出了各种确定信号、检测 噪音特征向量个数的方法^[8~10]。假设经显著性检验,存在 P 个显著趋势的特征向量, 那么截取前 P 个特征向量及其主分量进行重建,就可以提取到序列的趋势波动。类似, 通过重建成分可以提取到小振幅波动的序列。这样就可以将混杂在一起的不同尺度的 波动分离开来。

3.2 空间尺度分离方案

将基于奇异谱重建成分的滤波过程推广到气象变量场的尺度分离。假设 F 是由 L₁ 个纬圈、L₂ 个经圈的网格点构成的气象变量场,将它看作由天气尺度系统 F_L、次天气 尺度系统 F_s 及气象噪音 e 的合成

$$F = F_L + F_S + e. \tag{8}$$

利用奇异谱重建成分进行空间尺度分离的基本思想是,将每个纬圈上的 L₂ 个格点数值 作为一个序列,逐一进行奇异谱展开,利用客观的显著性检验确定出代表趋势波动及 小振幅波动的主分量个数,然后利用重建成分进行尺度分离。重建的趋势波动作为天 气尺度系统,小振幅波动为次天气尺度系统。由于是在空间格点上取样,因此,*a*_i和 *q*_{bi}均是仅与空间尺度有关的函数。*a*_i是空间的函数,*q*_{bi}是滞后空间尺度的函数。与低 通滤波及波谱展开类似,奇异谱重建成分的滤波用于一维时间序列是进行不同周期的 波动分离,用于空间变量场则是进行不同空间尺度的波动分离。

为此,我们设计出基于奇异谱重建成分进行空间尺度分离的具体实施步骤如下:

(1) 资料处理。为了消除纬度效应,首先对气象变量场进行标准化处理。

(2)奇异谱展开。将由每个纬圈上的格点数值构成的序列按动力重构方法建立相 空间 *X* 矩阵,其中嵌套空间维数 *M* 的确定是根据最佳性试验确定的。然后,对构建的 *X* 矩阵进行奇异谱展开,特征值由大至小排列,并计算方差贡献及累积方差贡献。

(3)确定代表信号的特征向量个数。确定代表信号的特征向量个数有多种方法, 如利用特征值变化曲线或利用 Monte Carlo 技术计算特征值方差贡献等方法确定。这里 采用文献 [10] 提出的方法,根据特征值变化曲线斜率来确定代表信号的特征向量个 数。特征值变化斜率的大小反映了特征值变化程度的大小。假设在第 Q 个特征值之后, 特征值曲线负斜率绝对值变得很小,也就是特征值变化显现为一条直线,那么就以 Q 为界,Q 以后呈直线变化的特征值对应的特征向量视为噪音,曲线部分的特征值对应 的特征向量为有价值的信息。

(4)确定代表趋势波动的特征向量个数,重建天气尺度系统。估计特征值的误差,

$$\delta \lambda_k = \left(\frac{2}{n_d}\right)^{1/2} \lambda_k, \qquad (9)$$

其中

$$n_d = \left(\frac{N}{Q}\right) - 1,$$

 n_d 是自由度个数,这里假定 Q 为非噪音部分特征值的个数。当一对特征向量所对应的 λ_k, λ_{k+1} 满足

 $|\lambda_{k+1} - \lambda_k| \leq \min\{\delta\lambda_k, \delta\lambda_{k+1}\}, \qquad (10)$

且这对特征向量及其主分量互相正交时,这一对特征向量就代表系统的基本波动。继续寻找其他特征值 λ_k , λ_{k+1} ,检验是否满足(10)式及特征向量及主分量互相正交条件。假设有P个特征向量满足上述条件,则用(7)式进行重建成分,得到系统基本波动即天气尺度系统。

(5) 重建次天气尺度系统。对余下的 P+1, …, Q 个特征向量再用(7) 式进行

一次重建成分,即可以得到次天气尺度系统。

4 "98・7"暴雨过程的系统尺度分离

使用上述设计的基于奇异谱重建成分的分离方法对 1998 年 7 月下旬长江中下游强 暴雨过程的系统进行尺度分离试验。使用的资料包括:范围在(80~150°E,0.5~ 50°N) 1998 年 7 月 20~23 日 1 小时间隔,分辨率为 0.5°×0.5°经纬度的卫星观测亮温 (*T*_{BB})和相同时段长江流域的 87 个观测站的逐时降水量。由于 *T*_{BB}资料时间分辨率和 空间分辨率均很小,蕴含大量的次天气尺度信息,所以这份资料更适合作尺度分离试 验。

4.1 暴雨过程特征

1998 年7月中旬副热带高压突然南撤减弱,7月20~22 日长江中下游出现了一次 罕见的特大暴雨过程。东、西部各有一片雨区。东部雨区位于湖北东南部,沿长江呈 西北一东南向,雨区范围大约长250 km,宽80 km,属于β中尺度,中心位置在武汉 和黄石附近。西部雨区位于湖北西南部。这次过程不仅降水强度大且具突发性。强暴 雨过程主要集中在20日夜间至21日午后和22日凌晨至午后两个时段。21日武汉06~ 07时(北京时)1小时雨量为88.4 mm,21日24小时降水量为285.7 mm。黄石22日 24小时降水量为360.4 mm。

4.2 暴雨过程 T_{BB}天气尺度和次天气尺度系统的基本结构

应用奇异谱重建成分方法对 1998 年 7 月 20~23 日逐时 *T*_{BB}场进行尺度分离试验。 另外,还使用目前广泛应用的 Shapiro 二维平滑公式,对相同资料进行了尺度分离计 算,以便对分离效果进行比较。

首先,选择7月20日1200 UTC 时 T_{BB} 场进行试算。由于序列由140个格点数值构成,因此,这里N = 140,经最佳性试验,确定嵌套空间维数M取40最适宜。图1为7月20日1200 UTC 的 T_{BB} 场奇异谱展开的特征值变化曲线。由图可见,在第12个特征值以后曲线斜率骤减,趋于平行于X方向的一条直线。根据特征值曲线斜率确定噪音的原则,第12个以后的特征值对应的特征向量及其主分量是随机部分,即气象噪音。前12个特征值对应的特征向量及其主分量是非随机部分。用(10)式检验后表明,前3个特征向量及其主分量代表系统基本趋势波动。因此,这一时次天气尺度系统 F_L 由前3个特征向量重建而成,次天气尺度系统 F_s 由第4~12个特征向量重建而成。在计算中我们发现,20~23日逐时 T_{BB} 场奇异谱展开的特征值变化差别不是很大,而我们给出的7月20日1200 UTC 这一时次的前12个特征值及其方差贡献与其他日期及时次相比还是较小的。因此,为计算方便起见,对试验的4天各时次均取前3个特征向量作为天气尺度部分,取第4~12个特征向量作为次天气尺度部分。从显著性检验来讲,这样取比7月20日1200 UTC 例子还稍严格,计算结果更可靠。

表1列出7月20~23日每天两时次的L₁个纬圈平均的前12个特征向量累积方差 贡献百分率。由表1可见,代表非噪音部分的前12个特征向量的累积方差贡献均超过 90%以上,其中表示天气尺度的趋势波动的前3项大约占总方差的60%,表示次天气 尺度系统波动的后9项大约占总方差的30%,气象噪音项约占不足10%的方差。



图 1 1998 年 7 月 20 日 1200 UTC 特征值变化曲线

表 1 L₁ 个纬圈平均的前 12 个特征向量累积方差贡献百分率

日期	时间	累积方差贡献百分率/%											
	(UTC)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
7月20日	0400	32.6	32.9	62.8	70. 2	75.3	79.5	82.7	85.4	87.4	89.1	90.6	91.9
7月20日	1200	28.7	48.7	59.9	68.4	74.2	78.9	82.3	85.1	87.3	89.0	90.5	91.8
7月21日	0000	27.2	46.9	58.1	66.4	72.2	77.0	80.5	83.4	85.7	87.6	89.3	90. 7
7月21日	1200	31.0	51.9	63.5	71.8	77.1	81.3	84.5	87.1	89.1	90.7	91.9	93.0
7月22日	0000	33.2	53.0	64.2	72.0	77.3	81.3	84.3	86.6	88.5	90.0	91.3	92.4
7月22日	1200	34.2	54.2	65.6	73.6	78.9	82.9	85.9	88.2	90.1	91.5	92.6	93.6
7月23日	0000	35.7	59.2	68.8	74. 9	79.6	83.1	85.7	87.8	89.5	90. 9	92.0	93.0
7月23日	1200	36.4	58.5	68.1	75.3	80.2	83.7	86.4	88.6	90.3	91.7	92.9	93.9

7月20日1200 UTC 时正值第一时段强暴雨过程即将开始,从原 *T*_{BB}场(图2a)中的虚线部分看出,长江流域的东、西部雨区为较强的对流云系所对应,在(113°E, 28~32°N)范围内有一对模糊可辨的偶极子系统。从奇异谱尺度分离后的天气尺度场(图2b)上看出,原场中零乱的扰动基本被滤掉,主要保留了波长为40个网格距(约2000 km)的波。长江流域为明显的切变线上连续性云系的特征,它占总方差的59.9%。在次天气尺度场(图2c)上主要是波长为4~10个网格距的波,从图中可以看到,偶极子系统比分离前清晰得多。次天气尺度场占总方差的31.0%。由此可见,利用奇异谱重建,我们可以分离出2000 km以上天气尺度系统和200~500 km的次天气系统,有利于对暴雨过程的次天气尺度系统进行分析。

图 3 是应用 Shapiro 二维平滑公式经 4 次平滑计算的结果。分离后的天气尺度系统 (图 3a)线条比较光滑,切变线上的两个强对流云系与奇异谱尺度分离出来的相对应, 而分离后的次天气尺度系统(图 3b)虽保留了一些中小尺度系统,也可以分辨出偶极 子系统,但是由于它是由原场减去天气尺度场得到的,次天气尺度系统与噪音混杂在 一起,图像显得比较杂乱,中小系统不如奇异谱分离技术得到的图像那样清晰。另外,



(a) 原 T_{BB}场; (b) 天气尺度场; (c) 次天气尺度场

进行几次平滑计算效果最好也不容易掌握。

用奇异谱分离技术对这次暴雨过程各个时次的 *T*_{BB}场的分离结果表明,分离出的天 气尺度场可以清晰地表征暴雨过程的环流大背景演变过程,次天气尺度场则可以将直 接造成强暴雨的中小系统结构变化显现出来。图 2 是第一时段强暴雨过程即将发生时 的情景。12 小时以后(7月21日0000 UTC),从奇异谱分离出的天气尺度场(图4a) 上看到,切变线上连续性云系明显向东移动,对流云系中心由 110°E 向东移至 115°E,此时正值以武汉、黄石为中心的暴雨盛期。从这时的次天气尺度场(图4b)上



图 3 用 Shapiro 平滑公式 4 次平滑分离结果(7 月 20 日 1200 UTC,等值线单位:℃) (a)天气尺度场;(b)次天气尺度场

可以看到,负值中心即对流云系中心已东移了一百多公里,对流云系中心恰对应武汉、 黄石暴雨区域。再过12小时以后(7月21日1200UTC),第一时段的强暴雨基本结 束。天气尺度场(图5a)的对流云系继续向东移动的同时,从西南方向又有较强的云 系补充过来。次天气尺度场(图5b)上在(115°E,28~32°N)位置上又形成了一对 新的偶极子系统。7月22日0000UTC第二时段暴雨盛期,以黄石为中心的暴雨区呈现 出很强的次天气尺度对流云系(图略)。7月22日1200UTC的天气尺度场上(图略), 切变线上连续性云系继续东移,次天气尺度场上(图略)东部雨区已为较大范围的无 云区覆盖,西部雨区的次天气尺度对流云系在东移中增强。到了23日,对流云系继续 东移减弱,次天气尺度系统也在明显减弱。

由上述分析结果表明,用奇异谱分离技术能将1998年7月下旬长江流域强暴雨过 程中的天气尺度和次天气尺度系统清晰地分离出来,分离出来的次天气尺度的偶极子 系统的活动与两次强暴雨过程对应得较好。

4.3 偶极子演变特征与强暴雨过程

已有研究^[1]表明,强暴雨中心的形成主要受β中尺度系统支配。由上一节分析可 知,1998年7月下旬长江流域的强暴雨过程与β中尺度偶极子活动有关。下面用分离 出的*T*_{BB}次天气尺度场并结合逐时降水量来分析这次暴雨过程中偶极子系统的演变特



图 4 1998 年 7 月 21 日 0000 UTC T_{BB}分布(等值线单位:℃)
 (a) 天气尺度场;(b) 次天气尺度场

征,重点分析湖北东南部雨区20日夜间至21日午后时段的暴雨过程。

图 6 (见图版)是由分离出的次天气尺度场中选取(26~32°N,112~118°E)范 围第一时段强暴雨过程(7月20日1200 UTC~21日0200 UTC 时)共16个小时的次天 气尺度系统演变过程。为减少篇幅,每间隔2小时给出一幅图。同时,图7给出相同 时段嘉鱼(29.59°N,113.55°E)、武汉(30.37°N,114.08°E)和黄石(30.15°N, 115.03°E)三站逐时降水量变化图。由图6可见,分离出的次天气尺度场可以清楚地 揭示暴雨过程中偶极子系统活动特征。在7月20日1200 UTC 图(图6a)中存在一个 大约150~200 km范围的偶极子系统,在西侧对流云系中心已经生成一个范围约为30 km的深对流云团,在东南侧也有一对流云团在发展。这时位于偶极子正、负交汇处的 嘉鱼站(见图6a中小方框)已经开始降雨(图7a)。西侧对流云团迅速向东南移动, 移速每小时50 km左右,并在移动过程中发展,东南侧对流云团移动缓慢,但在加强, 西南侧又有新的云团补充上来。2小时后(图6b)原西侧的深对流云团在东移中发展 为水平尺度接近100 km的β中系统,原南北向的偶极子变得倾斜。东南侧对流云团迅速加强北上,深对流云团水平尺度已超过100 km,位于偶极子正、负交汇处的嘉鱼一 小时雨量达65.2 mm。到了1600 UTC(图6c),西侧对流云团继续向东移动并加强, 原偶极子呈东西向,同时东南侧对流云团向西北方向移动,两云团开始向同一地区靠



图 5 1998 年 7 月 21 日 1200 UTC T_{BB}分布(等值线单位:℃) (a) 天气尺度场;(b) 次天气尺度场



拢。这时随着云团东移, 嘉鱼 站降水减少。2小时后的1800 UTC 时 (图 6d), 即武汉强暴 雨临近时,两云团发展合并为 一强的对流云团, 南侧补充上 来的云团又在加强。从 2000 UTC 的图 (图 6e) 上看到, 这 时的对流系统不稳定,武汉、 黄石还只有零星小雨。直至 2200 UTC 时即北京时 21 日 06 时左右, 合并的云团停滞在 (115°E, 30°N) 附近(图6f), 偶极子更加显著, 南侧的云团 继续北上,位于偶极子正、负 值交汇处的武汉、黄石(见图 中小方框)出现了特大暴雨。 从图 7b 和图 7c 中可见, 2100

UTC~2200 UTC的一小时黄 石降水量为52.5 mm,2200 UTC~2300 UTC一小时武汉 降水量为88.4 mm。21 日 0000 UTC时(图6g)强对流 云团开始向东偏北方向移动, 新补充上来的云团在北上过 程中加强,致使武汉、黄石 一带维持着强降水。在2小 时后的图(图6h)中,我们 看到西侧降雨区的强对流云



系也在向东移来,这时武汉、黄石虽仍有降水但却明显减弱。

由上述分析可见,偶极子的形成、东移和加强的演变过程与暴雨自西向东推移并 加强对应得很好,特别是武汉、黄石的强暴雨中心的形成,受东、西两侧移动并逐渐 合并增强的深对流云团形成的偶极子所支配,且这次暴雨过程的最强降水均出现在深 对流云团刚刚移过的区域。

5 结 论

(1) 基于奇异谱主分量重建的尺度分离方法是一种正交函数谱形式的滤波,从原 变量场中提取天气尺度和次天气尺度系统的过程是一种非线性变换过程,它比常用的 线性尺度分离方法更适合大气系统本身的特性。与常用尺度分离方法相比,该方法的 另一优点是,通过奇异谱重建分离过程,可以减小气象噪音,使中小尺度系统的特征 显现出来。利用奇异谱分离方法对 "98 · 7"长江流域暴雨过程的 *T*_{BB}场进行试验性尺 度分离,结果表明,该方法可以将这次暴雨过程中的天气尺度和次天气尺度系统的基 本结构清晰地分离出来。但是,利用奇异谱主分量重建进行空间尺度分离毕竟是一种 尝试,还有待作更深入的探索和研究。

(2) 在分离出的 T_{BB}天气尺度场上清晰地显现出暴雨过程的环流大背景过程。就这次暴雨过程而言,在天气尺度场上,长江流域显现出明显的切变线上连续性对流云系特征。对流云系在东移过程中加深直至减弱的环流背景,对应降水系统的生成、增强 直至减弱的过程。

(3)分离出的次天气尺度场将直接造成强暴雨的β中尺度系统的演变过程十分清晰地显现出来。7月21日凌晨至午后的强暴雨过程中存在偶极子系统,而偶极子的形成、东移和加强的演变过程与暴雨自西向东推移并加强对应得很好,特别是武汉、黄石的强暴雨中心的形成,受东、西两侧移动并逐渐合并增强的深对流云团形成的偶极子所支配。

参考文献

201

- 2 Shapiro, R., Smoothing, filtering and boundary effects, Rev. Geophys. Space Phys., 1970, 8, 359 ~ 387.
- 3 Barnes, S. L., Mesoscale objective map analysis using weighted time series observation. NOAA Tech. Meso. ERL NS-SL62, 1973.
- 4 Moddox, R. A., An objective technique for separating macroscale and mesoscale features in meteorological data, Mon. Wea. Rev., 1980, 108, 1108 ~ 1121.
- 5 陈受钧、谢安,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,1981, 39,408~415.
- 6 N. 阿罕麦德、K. R. 罗著, 胡正名、陆传赉译, 数字信号处理中的正交变换, 北京: 人民邮电出版社, 1979, 232~236.
- 7 Jain, A. K., A fast Karhunen Loeve transforms for a class of random processes, *IEEE. Trans. Common.*, 1975, 24, 1023 ~ 1029.
- 8 Vautard, R., SSA: A tookit for noisy chaotic signal, Physica D, 1992, 58, 95 ~ 126.
- 9 Ghil, M., and R. Vautard, Interdecadal oscillations and the warming trend in global temperature time series, *Nature*, 1991, 350, 324 ~ 327.
- 10 North, G. R. et al., Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal function, Mon. Wea. Rev., 1982, 110, 699 ~ 706.

A Method Based on Singular Spectrum for Separating Synoptic Scale and Subsynoptic Scale Features of Meteorological Field

Wei Fengying, and Zhu Fukang

(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

Abstract A method based on principal component reconstruction of singular spectrum for separating synoptic scale and subsynoptic scale features of meteorological field and its calculating procedure are presented and are applied to experiments for separating scales on $T_{\rm BB}$ fields during storm rainfall process over the middle and lower reaches of the Yangtze River in the last tenday period of July in 1998. The results show that the features of synoptic scale and subsynoptic scale systems of the process are separated clearly. The continuity convective cloud systems along shear line over the Yangtze River are visible in the synoptic scale field. The evolution of dipole system whose motion are corresponding to the storm rain process are shown in the subsynoptic scale field.

Key words: singular spectrum; separating scales feature; storm rainfall process