

一次暴雨过程的 EOF 分析

张 铭 安 洁 朱 敏

解放军理工大学气象学院大气环流与短期气候预测实验室, 南京 211101

摘 要 在用 21 层 η 坐标细网格模式对 1998 年 7 月 21~22 日发生在武汉地区的一次持续性特大暴雨过程数值模拟的基础上, 利用较高时空分辨的模式输出结果对暴雨过程做经验正交函数分解 (EOF 分析) 尝试。结果表明: EOF 第 1 主分量的空间分布代表典型的暴雨环境背景场的低值系统; EOF 第 2 主分量的空间分布与人字形切变线 (西部为冷式切变, 东部为暖式切变) 相联系, 是影响这次暴雨的重要形势场; 利用相轨线分析方法发现, 暴雨过程中 EOF 第 1 主分量和 EOF 第 2 主分量的时间系数在暴雨临近阶段, 两者正相关, 激发暴雨, 在暴雨后期两者负相关, 促使这次暴雨趋于减弱结束。

关键词 暴雨 EOF 分析 相轨线

文章编号 1006-9895 (2007) 02-0321-08

中图分类号 P446

文献标识码 A

EOF Expansion in One Rainstorm

ZHANG Ming, AN Jie, and ZHU Min

Meteorological College, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101

Abstract Empirical Orthogonal Function (EOF) expansion had been most used in the research of climatic scale, but not in that of synoptic scale. This is because the observational data of synoptic scale in temporal distribution are not dense enough, and the data set is not abundant enough, and it is very difficult to use the EOF expansion. With the using of automated surface meteorological station and the development of numerical model, it is practicable to use the results of model outputs to diagnose EOF expansion. The new attempt is made in this field in this paper.

A 21-layer fine grid model and η coordinate is used to simulate a continuing heavy rain in the Wuhan region during 21-22 July 1998 in this paper. The results of model outputs are used to diagnose EOF expansion for showing its mesoscale characteristics of spatial and temporal distribution, and to reveal the physical mechanism of the genesis and development of rainstorm. And the conclusions are as follows:

(1) The spatial distribution of the first principal component of EOF (EOF-1) stands for the low-pressure system. And it is a typical background field of the rainstorm, which increases persistently throughout the whole rainstorm.

(2) The second principal component of EOF (EOF-2) is relevant to the lambdoidal shear line, the west of which is cold shear and the east of which is warm shear. It is an important posture field of the rainstorm. Before the outbreaks of rainstorm, the cold air comes south, the low pressure of shear line reinforces, and the southwest warm and wet air transports water vapor northward, which are propitious to the development of rainstorm. Then the system weakens evidently, and the rainstorm turns to disappear quickly.

(3) By analyzing the path line in phase space, the characteristics of evolvement of principal modes can be compactly expressed on a two-dimensional phase space chart. It can be seen that during the course of rainstorm, the

transformation points of EOF-1 and EOF-2 spread clockwise following the path line of parabola. In the immediate phase of the rainstorm, the two principal components are positively correlated, and motivate the rain. At the later phase of rainstorm, they are negatively correlated, and make heavy rain tend to be extinct.

Key words rainstorm, Empirical Orthogonal Function (EOF), path line in phase space

1 引言

EOF (经验正交函数分解法) 最早由统计学家 Pearson 在 1902 年提出^[1], 20 世纪中期, Lorenz^[2] 将其引入大气科学研究中。20 世纪 70 年代中后期, 随着计算机技术的迅速发展, EOF 分解技术在气候诊断中得以充分发展。特别是近十年来, EOF 已成为气候科学研究中分析变量场特征的重要工具之一, 并取得了丰硕的研究成果^[3~7]。

从前人工作可见, EOF 分析方法大多用在对气候尺度的研究中, 而在天气尺度研究中的应用则几乎没有。分析其原因, 主要是天气尺度的观测资料在时间上不够稠密 (一般高空一日两次, 地面四次), 这样资料集不丰富, 使用 EOF 分析方法就存在困难。不过随着地面自动气象站的使用, 这方面的问题可有所改善; 此外, 随着数值模式的发展及其性能的提高, 对模式输出资料进行 EOF 分析也是可行的 (其在时间上可做到很稠密, 故其资料集很丰富), 这样 EOF 也能作为一个诊断工具用于天气尺度过程的研究。本文在该方面作了尝试, 利用模式输出资料对一次暴雨过程的时空变量场作了 EOF 诊断分析, 以此来研究暴雨发生发展的物理

机制。

2 资料和 EOF 分析方法

本文选取 1998 年 7 月 21~22 日发生在武汉地区的一次持续性特大暴雨过程, 也即长江流域“二度梅”的过程作为个例。7 月 19 日至 23 日期间, 长江流域中下游至日本南部, 一直维持着一条地面准静止锋, 与 700 hPa 上的切变线相对应 [如图 1a (图 1 资料是由实际观测资料客观插值到网格面上得到的, 时间为 21 日 00 时 (国际协调时, 下同))。从 7 月 19 日 18 时开始, 在 107°E 附近有低压出现, 以后长江流域及以西均为呈西南-东北向的低气压区控制 (图 1b), 直到 23 日, 这是非常有利于西南低涡形成和维持的地面形势。500 hPa 为副热带高压北侧 588 线所控制, 脊线稳定在 18°N 附近, 中高纬为“两槽一脊”形式。同时四川至云贵高原有西南低槽, 该槽相对稳定, 与对流层低层的低涡系统恰呈“北槽南涡”的配置。低涡与低槽均稳定少动, 这非常有利于西南低涡的发展。这种低层有较强辐合, 高层有较强辐散的形势十分有利于强对流天气系统的发生发展。

在这次持续性暴雨过程中, 降水主要集中在长

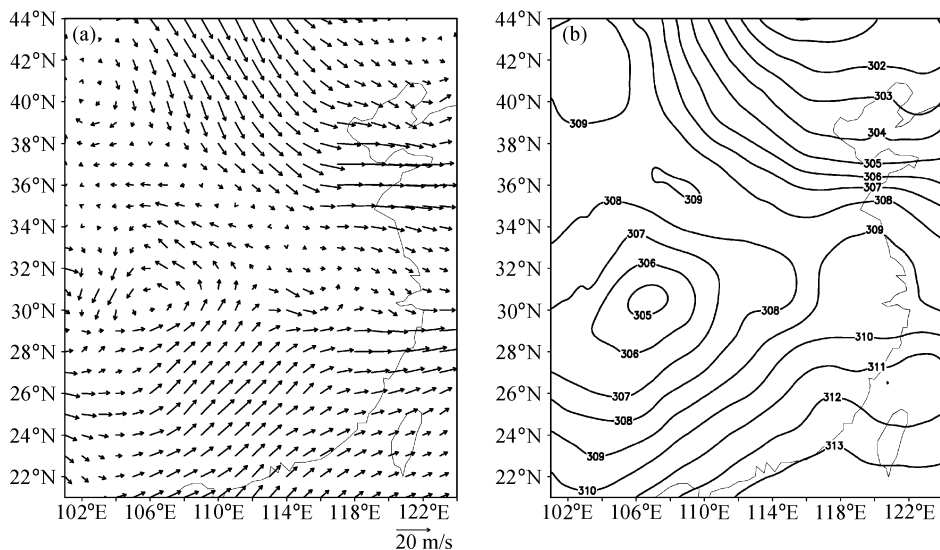


图 1 1998 年 7 月 21 日 00 时 700 hPa 风场 (a) 和高度场 (b, 单位: dagpm)

Fig. 1 Wind field (a) and height field (dagpm) (b) at 700 hPa at 0000 UTC 21 Jul 1998

江流域中下游地区，即集中在低涡和切变线附近。与低涡的移动方向和发展情况一致，雨带逐渐向南向东移动。沿长江流域的切变线上有两个强降水区，极大值中心位于（29°N，107°E）和（30°N，114°E）附近，分别对应川贵至两湖以西地区和鄂东南地区。分析各测站逐时降水量，21 日 18 时为暴雨临近，22 日 00 时，为暴雨盛期，暴雨中心在黄石市，以后暴雨减弱停止。

本文利用一个有限区域 η 坐标暴雨预报模式，模式以 21 日 00 时和 22 日 00 时的观测资料作为初始场（其来源于“973 专题暴雨个例数据集”中常规站点的观测资料），各作 24 小时积分，且每小时输出一次积分结果。从中选取 21 日 07 时~22 日 12 时的 30 个样本资料作为 EOF 分析的数据集，分析的区域为（20°N~45°N，100°E~125°E）。

所用的 η 模式水平分辨率约为 18 km，垂直方向采用下密上疏的不等距分层，共分 21 层。该模式具有很好的计算稳定性和暴雨模拟能力，对该过程的具体模拟情况这里不再赘述，请参见文献[8，9]。

EOF（经验正交函数）分析的具体做法参阅文献[10]。首先从上述模式各输出场资料中用通常方法提取其对应的扰动场，并对得到的扰动量的距平场作 EOF 分析。结果发现高度场 H 、假相当位温场 θ_{se} 和温度场 T 的前几个模态累计方差贡献较大（见表 1），故本文主要对这些场进行讨论。

因 EOF 分析的本质是将一个物理量场的演变分解成各正交模态的独立演变过程，故该过程就反映了各独立因子对该物理量演变的影响和贡献。显然，独立因子越多，EOF 分解的收敛速度就比较慢。并且，分解出的经验正交函数究竟是有物理意义的信号还是毫无意义的噪音，也应该进行显著性检验。这里采用 North 等^[11]提出的计算特征值误

差范围的方法来进行显著性检验。特征值 λ_j 误差范围为

$$e_j = \lambda_j \left(\frac{2}{n} \right)^{\frac{1}{2}}, \tag{1}$$

其中， n 为样本量，当两相邻的特征值 λ_{j+1} 满足 $\lambda_j - \lambda_{j+1} \geq e_j$ 时，就认为这两特征值所对应的经验正交函数是有价值的。经计算，位势高度场的前二个模态，假相当位温场的前八个模态，温度场的前三个模态均通过显著性检验，其方差贡献参见表 1。下面，将对通过检验的位势高度和假相当位温的前两个模态进行详细分析。

3 位势高度扰动场的时空分布特征

3.1 第一模态

图 2 给出了 EOF 分析得到的位势高度扰动场第一模态的 850 hPa、700 hPa 和 500 hPa 空间场和对应的时间系数，由图可见，850 hPa 位势高度扰动场的 EOF 第一主分量（EOF-1）的空间分布主要特征集中表现在一条沿西南-东北走向的负值区（图 2a 的阴影区），其上有几个负值中心，分别位于（24°N，107°E）、（29°N，114°E）和（33°N，118°E），在负值区两侧是与其相平行的正值区。700 hPa 位势高度场的 EOF-1 的空间分布（图 2b）与 850 hPa 的相似，只是其西南-东北的走向比 850 hPa 的走向更接近于纬向，且负值较强，中心范围较大。而 500 hPa 的 EOF-1 的空间分布则表现为在整个长江流域呈现大范围的负值区（图 2c 阴影区），负值中心呈纬向分布。注意这些正值区代表高压（低压）异常，负值区代表低压（高压）异常，具体异常取决于时间系数值符号的正负。

图 2d 给出的是与 EOF-1 相应的时间系数曲线（这里从样本中截取 21 日 07 时~22 日 06 时的一段，为本次暴雨过程），由图可见，在整个暴雨过程中，时间系数呈现由负到正的变化。暴雨爆发前（18 时以前）时间系数为负值，且基本呈线性变化。而后，时间系数的数值为正且继续增加，但增幅有所放缓。综合考虑图 2 并结合暴雨区及暴雨临近、盛期和减弱期不难发现，EOF-1 的特征反映了与暴雨发生有关的高度场上的低值系统，整个大环境背景场是鞍形场分布，暴雨区对应在低层为低涡，在中、高层则为低槽。且在整个暴雨过程中，该低值系统一直在增强，只是增长的幅度有所不同，即在

表 1 前四个模态的方差贡献
Table 1 Variance contribution of the first four modes

物理量场 Physical variable	方差贡献 Variance contribution				累计方差贡献 Cumulative variance contribution
	模态 1 Mode 1	模态 2 Mode 2	模态 3 Mode 3	模态 4 Mode 4	
H	43.31%	15.42%			58.73%
θ_{se}	64.98%	19.14%	7.62%	3.03%	94.76%
T	46.43%	17.12%	11.28%		74.83%

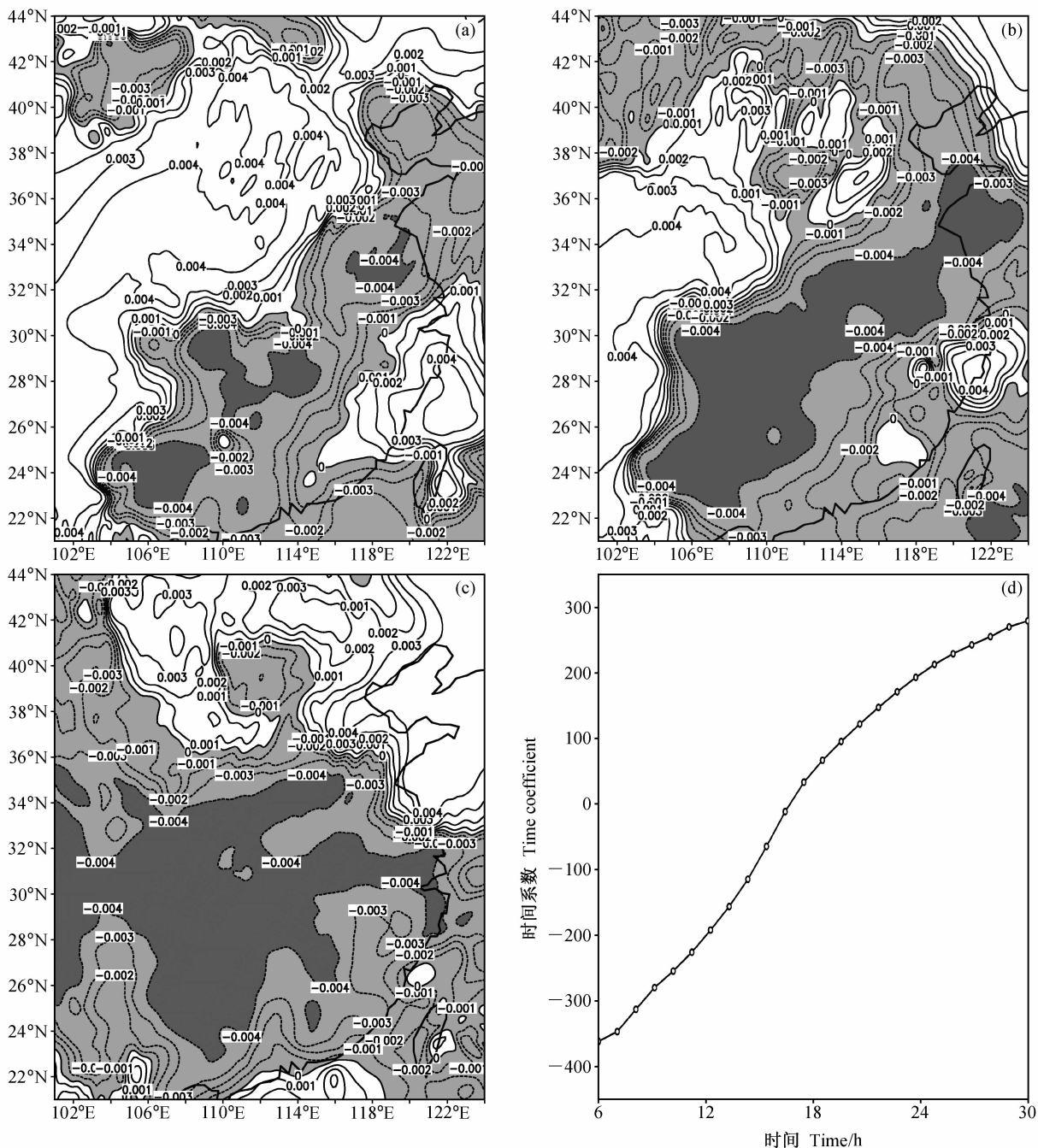


图2 1998年7月21日07时~22日12时位势高度扰动场的第一模态:(a) 850 hPa空间场;(b) 700 hPa空间场;(c) 500 hPa空间场;(d) 时间系数图。阴影为负值区,深色阴影为负值中心

Fig. 2 The first mode of geopotential height disturbance field from 0700 UTC 21 Jul to 1200 UTC 22 Jul 1998: (a) 850 hPa spatial field; (b) 700 hPa spatial field; (c) 500 hPa spatial field; (d) temporal coefficient. The shadows show negative values, and the deep shadows show centers of negative values

暴雨临近增强迅速,暴雨开始后,增强减慢。

3.2 第二模态

850 hPa位势高度扰动场的EOF第二主分量(EOF-2)的空间分布如图3a,主要特征集中表现为850 hPa高度上在26°N~36°N区域的人字形负

值区(此时暴雨雨区中心位于人字相交处稍偏南的位置)。到700 hPa高度上则成为近似东西向分布的负值区(图3b),而到500 hPa负值区已经退到西南象限(图3c),中心位于(24°N, 106°E)附近,位于暴雨雨区的西南侧。由此,不难发现 EOF-2

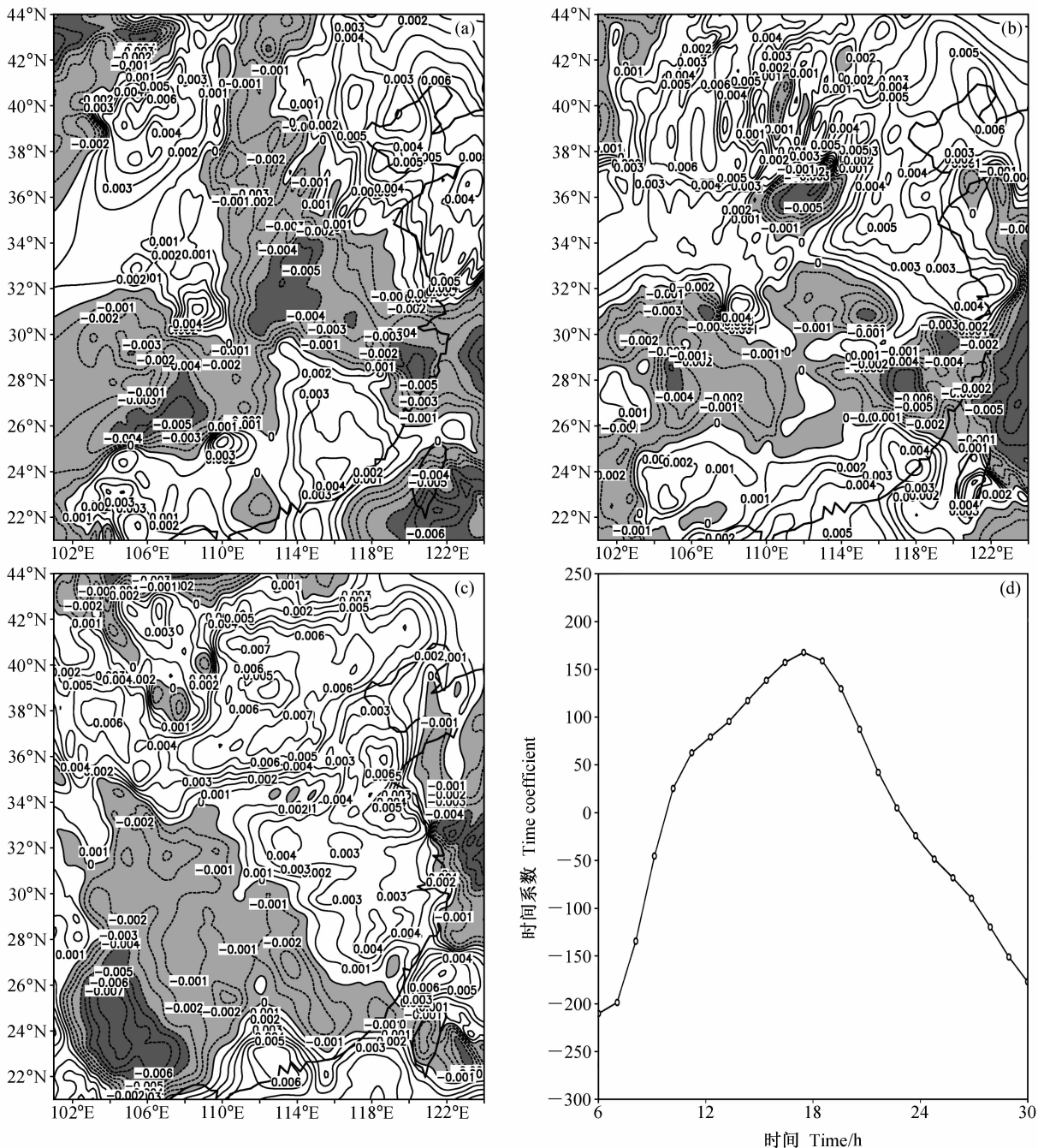


图3 同图2，但为第二模态
Fig. 3 Same as in Fig. 2, but for the second mode

是与人字形切变线（西部为冷式切变，东部为暖式切变）相联系的。

此时，与 EOF-2 相应的时间系数曲线（图 3d）呈现半波的变化形式，即暴雨前（18 时以前）呈现由负到正的变化，而 18 时以后则又呈由正到负的变化。这就说明，在暴雨前，冷空气南下，切变线增强，有利于暴雨的发生发展，暴雨发生后，切变

线明显减弱，暴雨由强盛转入消亡。分析还发现，EOF-2 相轨线的上述转折相对于暴雨的由强转弱具有一定的超前性（见后文分析）。EOF 第 2 主分量的空间分布相应于在低层表现明显的切变线系统。

3.3 相空间分析

图 4 给出用位势高度扰动场前两个主分量 EOF-1 和 EOF-2 的时间系数构成的平滑后的相轨

线,其反映了状态相点在相空间中的复杂运动。由图4可见,整个暴雨过程中相点沿近似抛物线轨迹运动。在暴雨临近阶段至暴雨加强期(18~23时),相点位于第1象限,即EOF两主分量正相关。

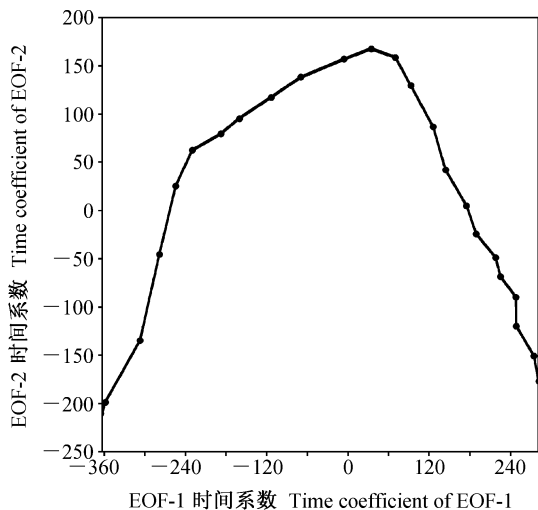


图4 1998年7月21日07时~22日12时位势高度扰动场的EOF-1和EOF-2的时间系数的相轨线分布

Fig. 4 The trochoid of transformation points of temporal coefficients for EOF-1 and EOF-2 of geopotential height disturbance field from 0700 UTC 21 Jul to 1200 UTC 22 Jul 1998

配合时间演变图可知,此时 EOF 两主分量所代表的天气系统都在不断加强。而到暴雨强盛期以后,相点则移动到第4象限,此时 EOF 两主分量负相关。EOF-1 表示的低压系统继续在增强,而 EOF-2 所代表的切变线系统却迅速减弱。另外,由图2和图3对比发现,EOF-2 的负中心比 EOF-1 的负中心位置偏向西南,由它们组成的相空间如图4中箭头所表示的顺时针旋转,相当于低空负值区向东传,即低涡东传。

由此可认为,EOF-1 代表暴雨大的环境背景场,而 EOF-2 则为本次暴雨的主要形势场。在整个暴雨过程中,环境背景场所表现的低值系统一直在增强,在暴雨前,增强迅速,暴雨开始后,增强减慢。EOF 第2主分量的空间分布在低层表现为明显的切变线系统。在暴雨临近阶段,EOF-1 与 EOF-2 两者正相关,激发暴雨,后期则两者负相关,致使本次暴雨趋于减弱结束。在本例中由于环境背景场所表现的低值系统一直在缓慢增强,这可能为下一场暴雨的爆发积聚能量。

4 假相当位温扰动场的时空分布特征

850 hPa 假相当位温扰动场的 EOF 第一主分

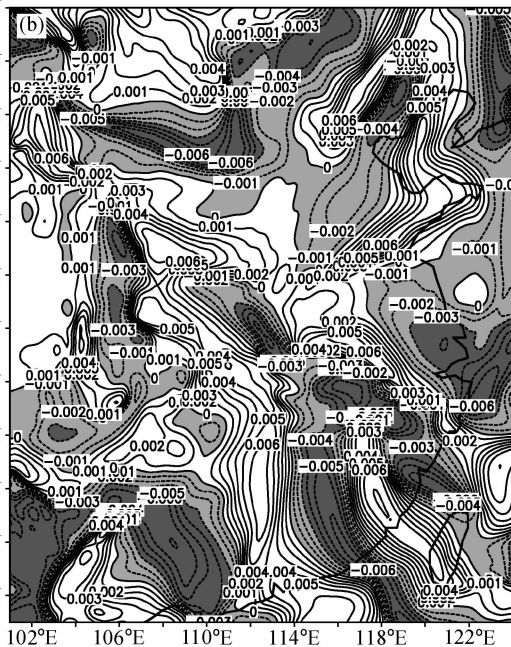
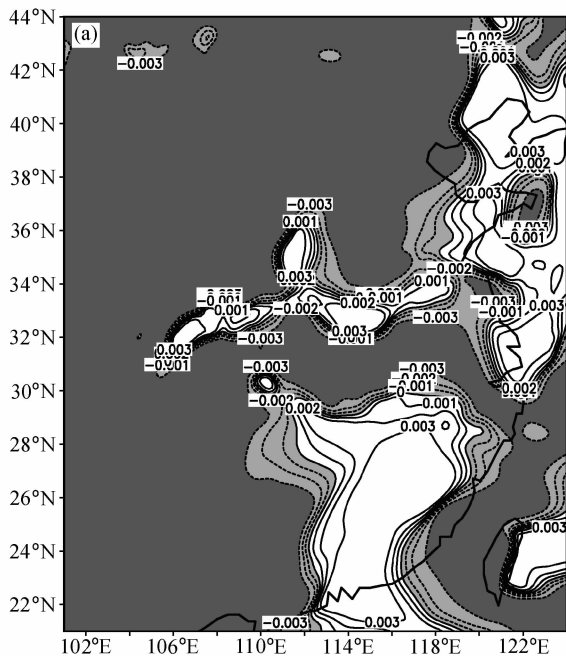


图5 1998年7月21日07时~22日12时850 hPa假相当位温扰动场的空间分布特征:(a) EOF-1空间场;(b) EOF-2空间场。阴影为负值区,深色阴影为负值中心

Fig. 5 Characteristics on spatial distribution of 850 hPa potential pseudo-equivalent temperature disturbance field from 0700 UTC 21 Jul to 1200 UTC 22 Jul 1998: (a) Spatial field of EOF-1; (b) spatial field of EOF-2. The shadows show negative values, and the deep shadows show centers of negative values

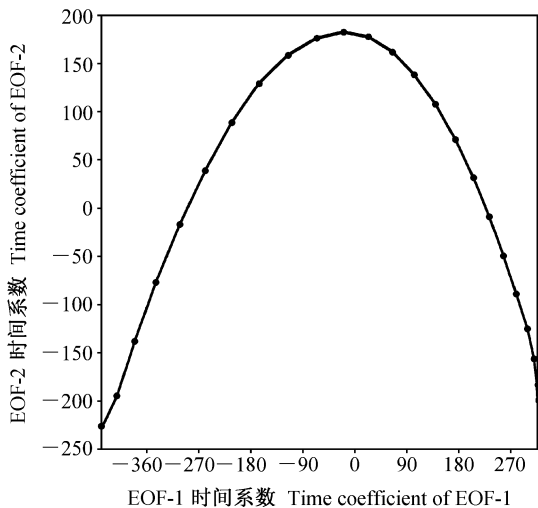


图 6 EOF-1 和 EOF-2 的时间系数的相轨线分布
Fig. 6 The trochoid of transformation points for temporal coefficients of EOF-1 and EOF-2

量 (EOF-1) 的空间分布 (如图 5a), 主要特征是集中表现在沿 32°N 区域的東西向分布的狭长正值区, 以及西南象限的负值中心。结合假相当位温平均场的分布特点, 在 500 hPa 以下, 除了切变线北侧有一条狭长的稳定带以外, 其余均为位势不稳定区。在切变线附近为弱位势不稳定区。强位势不稳定中心随高度向西倾斜。因此, 当切变线狭长稳定区内由于湿热成风不适应而激发的各种尺度重力波向外传播进入切变线附近的弱位势不稳定区时, 中间尺度扰动将可能发生不稳定增长。由此可见, 假相当位温扰动场的 EOF-1 的这一特征是与位势不稳定相联系的。配合考虑相对应的时间系数演变可见, 在本次暴雨过程中存在位势不稳定, 并持续增强。

而 850 hPa 假相当位温扰动场的 EOF 第二主分量 (EOF-2) 的空间分布特征则表现为明显的南北走向的正负中心相间分布 (图 5b)。显然这是由于西南暖湿气流向北输送水汽造成的。而且与此相对应的时间系数演变呈抛物线的变化形式, 即暴雨前 (18 时以前) 增强, 而 18 时以后随着暴雨的强盛而减弱。

用上述两个主分量的时间系数作二维坐标所构成的相轨线见图 6, 其与位势高度扰动场的一致, 整个暴雨过程中相点沿抛物线轨迹运动。即在暴雨临近阶段至暴雨加强期, EOF 两主分量正相关, 而到暴雨强盛期, EOF 两主分量负相关, 促使本次暴雨趋于减弱结束。

5 结语

综上所述, 本文利用 EOF 分析方法剖析了这次暴雨过程的时空演变特征, 得到以下主要结论:

(1) EOF 第 1 主分量的空间分布代表典型的暴雨环境背景场形势。850 hPa 上低涡扰动明显, 700 hPa、500 hPa 上有高空槽与之配合。对流层低层 (850 hPa) 存在位势不稳定, 是触发暴雨的重要机制。在整个暴雨过程中, 该系统稳定增强。

(2) EOF 第 2 主分量的空间分布与人字形切变线 (西部为冷式切变, 东部为暖式切变) 相联系, 是影响本次暴雨的重要形势场。在暴雨爆发前, 冷空气南下, 切变线低压增强, 同时西南暖湿气流向北输送水汽, 有利于暴雨的发生发展。暴雨发生后, 系统明显减弱, 暴雨也很快由强盛转入消亡。

(3) 利用相轨线的分析方法, 将主要模式的演变特征简洁地表示在一张二维相空间图上。分析发现, 暴雨过程中 EOF-1 和 EOF-2 的相点沿抛物线轨迹顺时针运动, 在暴雨临近阶段, 两者正相关, 激发暴雨, 后期两者负相关, 切变线系统减弱, 促使本次暴雨趋于减弱结束。但环境背景场所表现的低值系统一直在缓慢增强, 可能为下一场暴雨的爆发积聚能量。

本文借鉴气候研究中的方法, 提出了对暴雨中尺度天气进行动力学诊断的新方法。因 EOF 分析方法自身的特点, 其各分量之间是正交的, 即彼此相互独立, 故用 EOF 方法提取的各天气形势场也相互独立, 这样就有利于我们把握暴雨发生发展过程中的主要矛盾。在该例中, 由分析可知, 低涡扰动 (EOF-1) 是暴雨发生发展的背景场, 但暴雨是否发展甚或消亡, 却取决于人字形切变线 (EOF-2) 的变化。

综上所述, 对实际暴雨个例的诊断结果表明, 将 EOF 引入对暴雨中尺度天气的动力学诊断是切实可行的, 与实际暴雨的观测结果也一致, 无疑该动力学诊断方法对暴雨理论研究和暴雨预报均有重要意义。最后要指出的是, 本文仅对一个暴雨个例作了该诊断, 且该诊断方法因刚开始采用, 尚不够成熟的地方, 下一步需结合实际来完善提高。

参考文献 (References)

[1] Pearson K. On lines and plans of closest fit to system of points in

- space. *Philosophical Magazine*, 1902, **6** (2): 559~572
- [2] Lorenz E N. The predictability of hydrodynamic flow. *Transactions of the New York Academy of Sciences*, 1963, **25**: 409~432
- [3] 邓爱军, 陶诗言, 陈烈庭. 我国汛期降水的 EOF 分析. 大气科学, 1989, **13** (3): 289~295
Deng Aijun, Tao Shiyun, Chen Lieting. EOF expansion for China flood season precipitation. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1989, **13** (3): 289~295
- [4] 朱抱真, 张瑞雪, 林学椿. 利用 EOF 相空间分析东亚梅雨旱涝长期过程的初步研究. 大气科学, 2001, **25** (6): 817~826
Zhu Baozhen, Zhang Ruixue, Lin Xuechun. A preliminary study of the Meiyu long-range processes in EOF phase space. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2001, **25** (6): 817~826
- [5] 李崇银, 吴静波. 索马里跨赤道气流对南海夏季风爆发的重要作用. 大气科学, 2002, **26** (2): 185~192
Li Chongyin, Wu Jingbo. Important role of the Somalian cross-equator flow in the onset of the South China Sea summer monsoon. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2002, **26** (2): 185~192
- [6] 丁裕国, 梁建茵, 刘吉峰. EOF/PCA 诊断气象变量场问题的新探讨. 大气科学, 2005, **29** (2): 307~313
Ding Yuguo, Liang Jianyin, Liu Jifeng. New research on diagnoses of meteorological variable fields using EOF/PCA. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2005, **29** (2): 307~313
- [7] 宗海锋, 张庆云, 陈烈庭. 梅雨期中国东部降水的时空变化及其与大气环流、海温的关系. 大气科学, 2006, **30** (6): 1189~1197
Zong Haifeng, Zhang Qingyun, Chen Lieting. Temporal and spatial variations of precipitation in eastern China during the Meiyu period and their relationships with circulation and sea surface temperature. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2006, **30** (6): 1189~1197
- [8] 宇如聪. 一个 η 坐标有限区域数值预报模式对 1993 年中国汛期降水的实时预报试验. 大气科学, 1994, **18** (3): 284~292
Yu Rucong. A test for numerical weather prediction of real-time for China flood season precipitation in 1993 by a regional η -coordinate model. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 1994, **18** (3): 284~292
- [9] 宇如聪, 徐幼平. AREM 及其对 2003 年汛期降水的模拟. 气象学报, 2004, **62** (6): 718~724
Yu Rucong, Xu Youping. AREM and its simulations on the daily rainfall in summer in 2003. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2004, **62** (6): 718~724
- [10] 施能. 气象科研与预报中的多元分析方法. 北京: 气象出版社, 1995. 344pp
Shi Neng. *Multivariate Analysis Method in Weather Scientific Research and Forecast* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1995. 344pp
- [11] North G R, Bell T, Cahalan R, et al. Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal function. *Mon. Wea. Rev.*, 1982, **110**: 699~706