

于杰, 张继权, 张铭. 2014. EOF 分析用于 β 中尺度暴雨系统的探索 [J]. 大气科学, 38 (4): 795–803, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.13257. Yu Jie, Zhang Jiquan, Zhang Ming. 2014. Study on meso- β scale torrential rain with EOF [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38 (4): 795–803.

EOF 分析用于 β 中尺度暴雨系统的探索

于杰^{1,2} 张继权² 张铭¹

¹ 解放军理工大学气象海洋学院全军危险性天气监测预警研究中心, 南京 211101

² 东北师范大学环境科学学院, 长春 130024

摘 要 本文将 2008 年上海“8.25”暴雨过程的 WRF 中尺度数值模式模拟结果作为实况资料集, 应用 EOF (Empirical Orthogonal Function) 方法对该资料集进行诊断, 以探讨将该方法应用于暴雨 β 中尺度系统的可行性。主要结论有: 当数值模式输出足够稠密、精细的样本, 能够较好反映实况时, 利用 EOF 方法对天气尺度和 α 、 β 中尺度系统的天气过程进行诊断是可行的。对本文的暴雨过程, EOF 分解位势偏差场的前三个模态分别反映了 α 中尺度中端、低端和 β 中尺度天气系统的演变特征, 分别对应于波长和振荡频率不同的驻波波列。其可分别称之为暴雨背景模态、暴雨系统模态和暴雨雨团模态。各波列物理性质不同, 分别属于准地转的 Rossby 波、准平衡的涡旋波和非平衡的重力惯性波。天气系统 EOF 分解的物理本质为: 可将一个变形和移动的天气系统分解为若干个具有不同物理性质且时空尺度不同相互独立的模态 (驻波波列)。这有助于明确和深化对天气系统的认识。EOF 分解能够进行天气系统的尺度分离, 且分离后得到的各种尺度的天气系统是独立和有特定物理意义的, 这更体现了该尺度分离方法的优点。本文中当 EOF 分解后各波列 (模态) 在某地时空指数发生三波锁相, 且该地的位势表现为低空为负、高空为正, 同时低层位势急剧降低时, 则有可能在此处发生暴雨。

关键词 EOF 分析 β 中尺度 暴雨 位势高度

文章编号 1006-9895(2014)04-0795-09

中图分类号 P443

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.13257

Study on Meso- β Scale Torrential Rain with EOF

YU Jie^{1,2}, ZHANG Jiquan², and ZHANG Ming¹

¹ PLA Research Centre for Severe Weather Monitoring and Warning, Institute of Meteorology and Oceanography, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101

² School of Environmental Science, Northeast Normal University, Changchun 130024

Abstract Using empirical orthogonal function (EOF) expansion, this paper analyzes the Weather Research and Forecasting (WRF) simulative data of the torrential rain occurring on August 25 of 2008 to explore the possibility of EOF expansion for diagnosing a meso- β scale torrential rain system. The conclusions show that when sufficiently fine data are consistent with real data, it is possible to diagnose mesoscale systems with EOF expansion. The preceding three modes of EOF expansion reflect the evolvement characteristics of various-scale weather systems and correspond to various wave trains with various wavelengths and oscillation frequencies: ambient mode, torrential rain system mode, and rain clusters mode. The various waves are attributed to quasi-geostrophic Rossby, quasi-equilibrium eddy, and non-equilibrium gravity inertia waves, respectively. The physical essence of EOF expansion for a weather system is that a transformative weather system with locomotion can be separated to several mutually unattached modes, or wave trains, that differ in physical characteristics, which contributes to a better understanding of the weather system. Scale separation for weather systems is an advantage of EOF expansion because separate weather systems are unattached and have particular physical

收稿日期 2013-09-04, 2013-10-28 收修定稿

资助项目 “十二五”农村领域国家科技支撑计划课题 2011BAD32B00-04, 国家自然科学基金项目 41371495, 国家自然科学基金青年基金项目 41005030

作者简介 于杰, 女, 1974 年出生, 博士, 主要从事中尺度气象学的研究。E-mail: yujieair@126.com

characteristics. When the space–time indices of different wave trains are in phase lock, a strongly convective precipitation will occur in the appropriate weather condition.

Keywords EOF expansion, Meso- β scale, Torrential rain, Geopotential height

1 引言

EOF (Empirical Orthogonal Function) 分解技术在气候诊断中已得到充分发展, 成为气候科学研究分析变量场特征的重要工具, 并取得丰硕的研究成果 (Mendonça and Bonatti, 2009; Athanasiadis et al., 2010; Tao and Chen, 2012; Chang et al., 2013; Xu et al., 2013; 李崇银等, 2013; 支星和徐海明, 2013; 张世轩等, 2013)。然而 EOF 分析方法应用在天气尺度特别是中尺度天气系统的研究则很少, 只有张铭等曾对两个暴雨个例用 EOF 方法做过尝试性的探索 (安洁和张铭, 2006; 张铭等, 2007)。分析其原因, 主要是由于天气尺度系统的常规观测资料在时间间隔上较大, 一般高空一天 2 次, 地面一天 8 次; 观测站之间的距离也较大, 一般在百公里以上。随着地面自动气象站的设立, 在我国东部地区, 地面观测站间距可达 10 km 左右, 时间间隔也缩短到一小时以内, 但高空的情况却几乎没有太大改变。这对于捕捉中尺度特别是 β 中尺度天气信息而言, 是非常不够的。此外, 天气尺度系统的时间尺度也短, 一般只有 2~3 天, 而中尺度系统时间尺度更短, 一般在一天以下甚至数小时。这样就造成样本资料严重短缺而无法使用 EOF 方法。随着天气和中尺度数值模式的发展完善, 计算机性能的提高, 数值模拟的效果有了很大的提升。这就使得数值模拟的结果与实际天气之间的差异越来越小。因此将好的数值模拟结果看作实际天气过程在时间和空间上的稠密资料集是完全可行的。又因数值模拟的输出结果时间间隔可以很短, 这样就可获得足够多的样本, 从而使得应用 EOF 分析诊断天气和中尺度系统成为可能。

安洁等 (2006)、张铭等 (2007) 正是采用上述思路, 将 EOF 用于暴雨系统的诊断分析中。上述文献表明, EOF 分析第一模态反映了暴雨天气尺度背景场的时空演变特征, 第二模态则反映了产生暴雨的 α 中尺度系统的时空演变特征; 并指出当这两个主分量的时间系数正相关时, 激发暴雨, 负相关时暴雨趋于减弱。然而该文献所用的数值模式水平格距仅为 18 km, 垂直方向分 21 层, 这样的数值模式只能体现 α 中尺度系统特征, 而不能细致地反映

出 β 中尺度系统的特征。此外, 这些文献主要给出了 EOF 的前两个主分量的空间结构并做了讨论, 而对时间系数则未做深入研究。这些都是上述文献的不足和局限所在。

本文利用三重嵌套的 WRF 中尺度数值模式, 对 2008 年 8 月 25 日上海大暴雨过程的模拟结果, 应用 EOF 方法对该暴雨过程做了诊断分析。因该数值模式最细的空间格距为 3 km, 故可将该暴雨过程用 EOF 方法分解为若干个相互正交 (独立) 的模式, 分析 α 中尺度和 β 中尺度系统在该暴雨过程中的作用和影响。本文还对 EOF 各模态的空间结构和时间系数做了细致讨论, 并指出其物理本质所在。故本文不但是上述文献的延伸和发展, 也弥补了其中的不足和局限。本文也是对 EOF 方法应用到 β 中尺度特别是该尺度中、低端系统的尝试和探索, 而这正是本文的创新所在。

2008 年 8 月 25 日早晨, 上海市出现了强雷电和局部大暴雨天气。该暴雨过程突发性强, 降水历时短, 雨量大。06:00 (北京时, 下同) 江苏南部等周边出现小到中雨, 上海市仅西部郊区出现了降水云团, 并产生中等降水, 06:30 分后上海市区降雨云团迅速发展, 上海市区开始出现强降水, 09:00 降水明显减小。该次降水强度很大, 全市有 7 个自动雨量站测得降水超过了 100 mm, 降水时段主要集中在 07:00~08:00。然而雨量分布却不均, 暴雨区主要出现在上海的中心城区以及其北部地区。其中, 徐家汇站出现了 1 小时 117.5 mm 的超强降水, 为该站自 1872 年有气象记录以来从未遇 (曹晓岗等, 2009)。在该暴雨过程中还出现了具有 2 条螺旋臂结构的雨团 (Yu and Zhang, 2011)。为此, 本文选用该暴雨过程作为研究个例, 利用 WRF 模式输出的稠密时空资料构成的充足样本, 对该次暴雨过程中的位势偏差场做了整层的 EOF 诊断分析, 以此来探索 EOF 方法应用到 β 中尺度系统的可行性并揭示该暴雨过程发生、发展与 EOF 各模态的关系。

2 资料选取及 EOF 分析方法

本文利用 WRF 中尺度数值模式, 以 2008 年 8 月 24 日 14:00 的 $1^\circ \times 1^\circ$ 的 NCEP 再分析资料作为初

始场进行数值模拟,模式积分 24 小时,至 25 日 14:00; 并采用三重网格嵌套方式,分辨率分别为 30 km、10 km、3 km。模拟时每 5 分钟输出一次结果。将模拟结果与实际观测数据和雷达资料做比较后发现,对大尺度、 α 和 β 中尺度天气系统的时空分布,两者互相一致;雨量的时空分布也趋于一致(于杰, 2012)。故可认为模拟结果能够反映实况过程,可以作为 EOF 分析的资料集进行研究。为此从中选取 25 日 02:00~14:00 的细网格模式的输出结果,即取 145 个样本,作为 EOF 分析的资料集。分析的空间区域为 (29.5°~33.2°N, 118°~122.5°E)。利用以上样本,对模拟的位势偏差扰动场进行 EOF 分解。具体做法是:首先提取位势偏差扰动场,即由模拟各时刻输出的位势场减去时间平均位势场后得到,其中,时间平均取各时刻的算术平均;然后取 850 hPa、700 hPa、500 hPa、200 hPa 的偏差场作 4 层整体 EOF 分析,因为 EOF 分析是将一个物理量场的演变过程分解成若干个正交模态的独立演变过程(曾庆存, 1974; 魏凤英, 2007),故该过程就反映了各模态对该物理量场演变的影响和贡献。分解后得到的各模态(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,则应该通过显著性检验。本文采用 North et al. (1982) 提出的计算特征值误差范围的方法来进行该显著性检验。若第 i 个特征值 λ_i 的误差范围为:

$$e_i = \lambda_i \sqrt{2/n}, \quad (1)$$

其中, n 为样本总量。当两个相邻的特征值 λ 满足 $\lambda_i - \lambda_{i+1} \geq e_i$ 时,就认为这两个特征值所对应的模态(经验正交函数)是有价值的信号。经计算该 EOF 分解前三个模态都通过了显著性检验,其第一、二、三模态的方差贡献分别为 88.1%、3.5%、1.7%。由此可见,该个例位势偏差场 EOF 分解的收敛速度还是比较快的,前三个模态累计方差贡献已达到了 93.3%。下面将对位势偏差场 EOF 分解的前三个模态进行详细分析。对该暴雨过程详细的天气动力学分析,请参见文献(曹晓岗等, 2009; 于杰, 2012), 本文不再赘述。以下为叙述方便,将 850 hPa 和 700 hPa 简称为低空, 500 hPa 简称为中空, 200 hPa 简称为高空, 不再赘述。

3 位势偏差场的 EOF 分解结果分析

3.1 第一模态

图 1 分别给出了 850、700、500 和 200 hPa 上

不同层次位势偏差场 EOF 第一模态空间场的分布图。这里要说明的是,为使该图简洁好看,图中等值线的数值标注为实际值的 10^3 倍,如该图中标注的等值线 2,其实际值则是 2×10^{-3} ,而图右边的色标标注的则是实际值。这样两者看来不同,但实际上却是一致的。图 3、图 5 的情况均与图 1 的情况相同,以下不再赘述。由图 1 可见,850 hPa 在整个研究区域内,仅在江苏西、南部出现负值区,其中在 31.2°N、119°E 附近有一负值中心,而在 31.2°N、121.9°E 附近有正值中心(正负中心代表的是位势高度偏差,具体偏差大小取决于时间系数),两者位置大体与 850 hPa 平均场上西、东部的低压中心重合,两者被位势高度偏差的 0 线所分割,并构成一个偶极子。该正、负中心间的距离约为 300 km,上海则处于正大值中心处。700 hPa 的空间场分布与 850 hPa 十分相似(图 1b),也有偶极子存在。500 hPa,在该区域皆为偏差正值区,其值大体由西南西向东北东方向逐渐增大;并在 122°E、31.5°N 附近有一个正极值中心,上海处于该正极值中心的西南部。200 hPa,则表现为整个区域都为偏差负值区,其值大体由西南向东北逐渐减小(绝对值增强),负值中心在上海的东北部海上。

由第一模态的时间系数曲线(图 2)可见,在 25 日 02:00~14:00 的 12 小时中,时间系数大体呈现由正到负的半波变化形式,并且在 08:20 左右由正转负,故可认为其半周期约为 12 小时(若有周期的话,其为 24 小时)。

综合第一模态空间场的分布和时间系数的变化可知,在该暴雨过程中,考虑到位势高度偏差 0 线的分布,可知低层有半波长约为 300 km(波长约为 600 km)的波列存在(偶极子可看作半个波列),其振荡的半周期约为 12 小时。在该暴雨的演变过程中,位势偏差 0 线以东的华东和沿海地区,低空气压场是持续降低的。尤其在长三角地区,降低程度最显著,因该地区处于该偶极子正中心处。在位势偏差 0 线以西地区,低空位势场是持续升高的,其最大升高中心位于偶极子负中心处。在高空,位势场均为升高的,其最大升高中心位于上海东北部的海上。在该暴雨的雨强最盛期,即约 08:20,时间系数为 0,故此时该模态位势偏差为 0,而此刻的位势场分布即为研究时段内位势平均场的分布。

3.2 第二模态

图 3 分别给出了 850、700、500 和 200 hPa 上

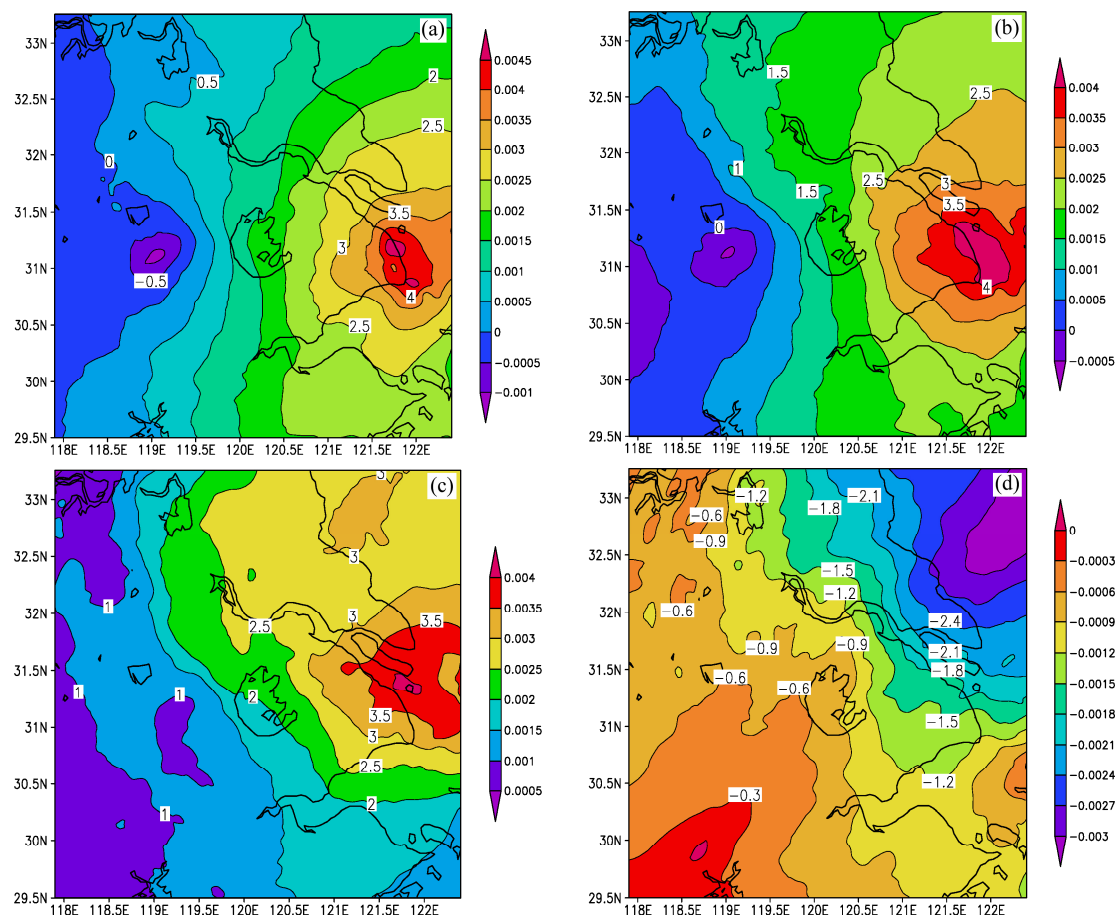


图1 位势偏差场的 EOF 第一模态 (EOF1) 分布: (a) 850 hPa; (b) 700 hPa; (c) 500 hPa; (d) 200 hPa。图中等值线为实际值乘以 10^3 , 色标上标注的是实际值, 图 3、图 5 与图 1 相同

Fig. 1 The first EOF mode (EOF1) of geopotential height deviation field: (a) 850 hPa; (b) 700 hPa; (c) 500 hPa; (d) 200 hPa. Color bar represents real values, values of contours are multiplied by 10^3 , the same in Fig. 3 and Fig. 5

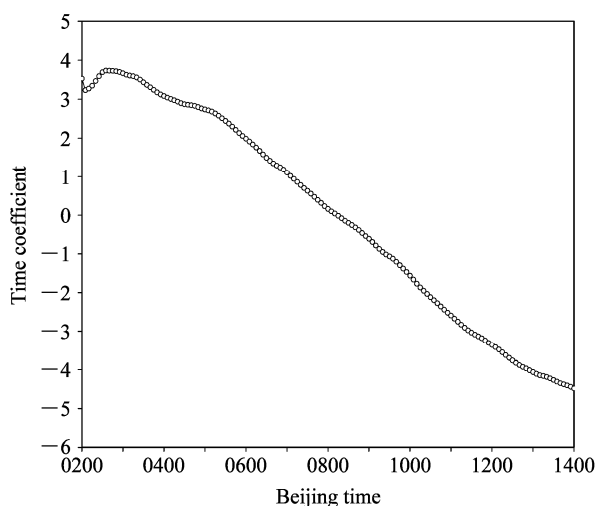


图2 2008 年 8 月 25 日位势偏差场 EOF1 时间系数

Fig. 2 Temporal coefficient of EOF1 on Aug 25, 2008

不同层次位势偏差场 EOF 第二模态的空间场。由该图可见, 850 hPa, (31.2°N, 119°E) 附近和 (30.8°N,

122.1°E) 附近各有一个正值中心, 在二者之间为负值区, 其中在 (31.2°N, 119.8°E) 附近有负值中心, 另在 (31.3°N, 121°E) 附近有两个靠得很近的强负值中心。这些正、负值中心大体构成一个波列, 相邻正、负中心距离约 150 km。700 hPa 空间场的分布与 850 hPa 十分相似 (图 3b)。500 hPa, 在研究区域中部为正值区, 其中在 (31.5°N, 119.8°E) 有明显的正中心, 在该正值区的西部和东部为负值区, 其中在 (32.2°N, 118.8°E) 和 (31.7°N, 121.5°E) 附近各有一个负值中心。这些正、负中心也构成一个波列, 相邻正、负中心距离约也为 150 km。200 hPa 的空间场与 500 hPa 大体类似 (图 3d), 不同之处是 200 hPa 的负值中心较 500 hPa 偏向东南, 而正值中心则向东北方向偏移。在研究区域第二模态空间场的主要系统总体上表现为波列的形式, 其相邻正、负中心距离约 150 km, 且高低层配置相反。

由第二模态的时间系数曲线 (图 4) 可见, 在

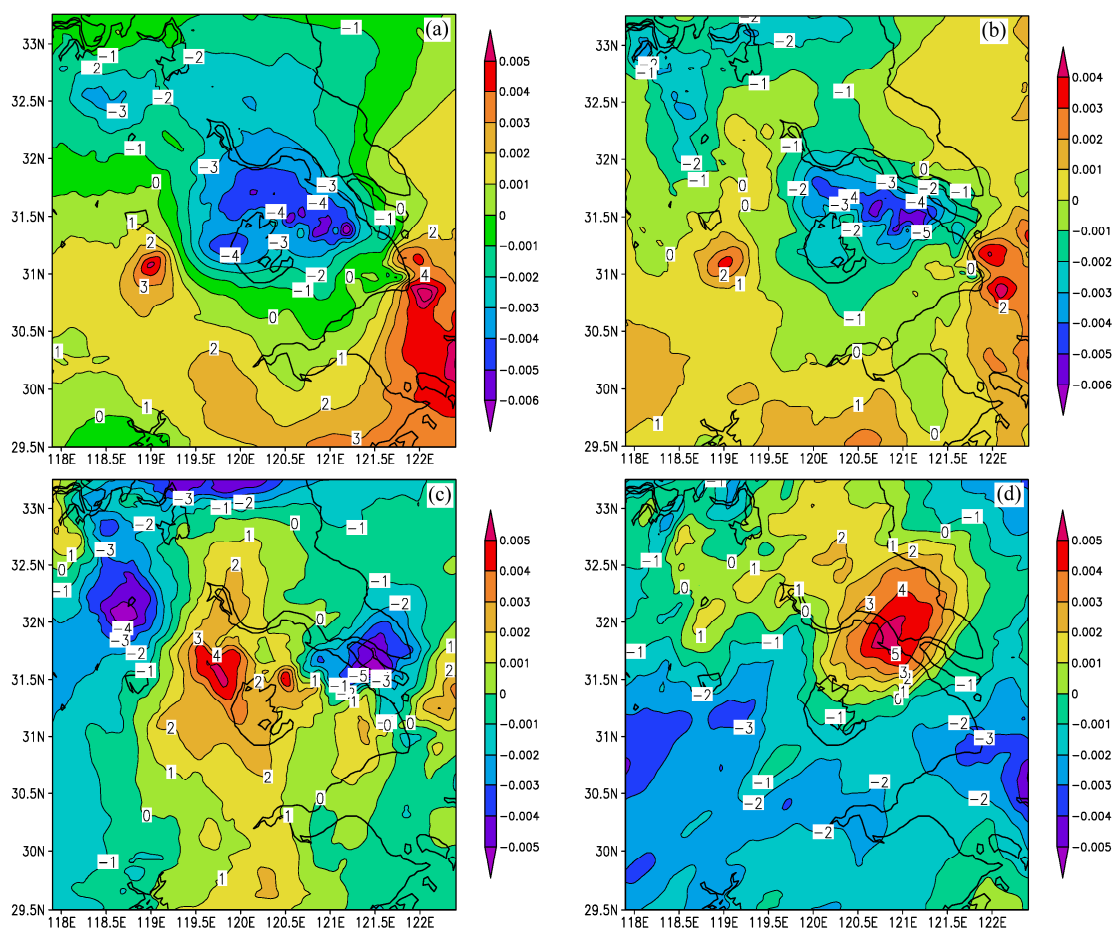


图3 位势偏差场的 EOF 第二模态 (EOF2) 分布: (a) 850 hPa; (b) 700 hPa; (c) 500 hPa; (d) 200 hPa
Fig. 3 The second EOF mode (EOF2) of geopotential height deviation field: (a) 850 hPa; (b) 700 hPa; (c) 500 hPa; (d) 200 hPa

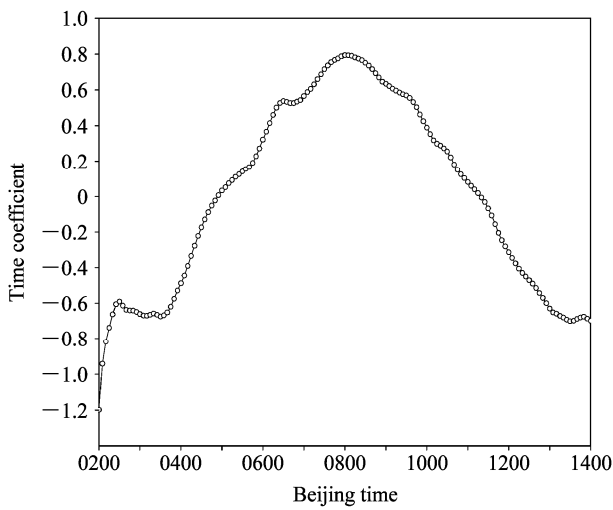


图4 2008 年 8 月 25 日位势偏差场 EOF2 时间系数
Fig. 4 Temporal coefficient of EOF2 on Aug 25, 2008

该 12 小时中, 时间系数呈现由负到正, 再由正到负的变化, 分别在 25 日 04:50 左右由负转正, 11:20 左右由正转负, 即在 04:50 至 11:20 之间为正。时

间系数分别在 03:00 左右和 14:00 左右达到负的最小值, 08:00 左右达到正的最大值。由此可见, 第二模态的时间系数大体呈 1 波的态势。

综合第二模态空间场的分布和时间系数的变化可知, 在该暴雨过程中, 低空有波长约为 300 km 的波列存在 (半波长即波列相邻正、负中心的距离约 150 km), 其周期约为 12 小时。在暴雨达到极盛前, 即 08:00 前, 长三角地区的低空位势场是持续降低的。在暴雨达到极盛后, 即 08:00 后, 低空位势场则持续升高。位势场最低值出现在暴雨极盛期 08:00 左右。高空位势变化则与之相反。

3.3 第三模态

图 5 分别给出了 850、700、500 和 200 hPa 上不同层次位势偏差场 EOF 第三模态的空间场。由该图可见, 850 hPa, 长三角一带有六个正负值中心自西向东相间排列, 相邻两个正值 (负值) 中心的距离约为 100 km, 并组成一个波列, 该波列相邻正、负值中心间距离约为 50 km。在 (31°N, 121.7°E)

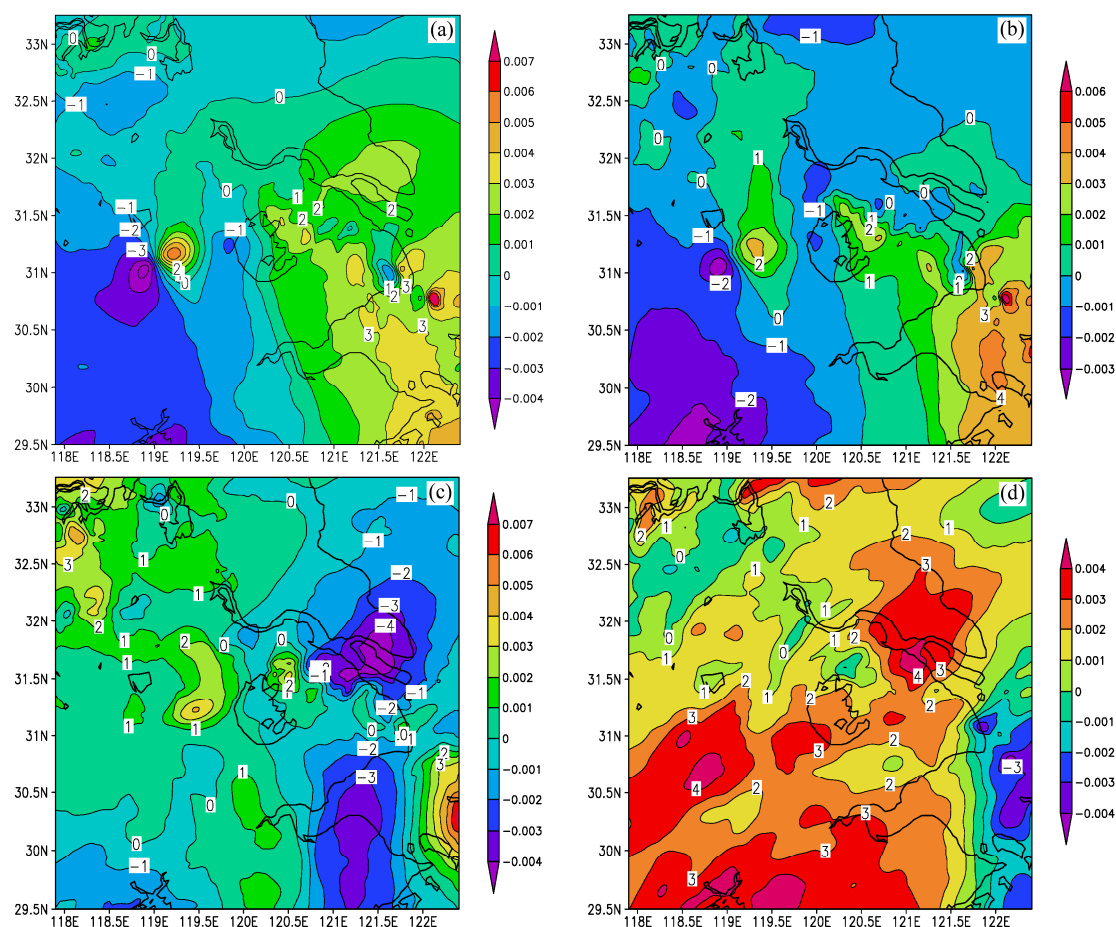


图5 位势偏差场的 EOF 第三模态 (EOF3) 分布: (a) 850 hPa; (b) 700 hPa; (c) 500 hPa; (d) 200 hPa

Fig. 5 The third EOF mode (EOF3) of geopotential height deviation field: (a) 850 hPa; (b) 700 hPa; (c) 500 hPa; (d) 200 hPa

附近即上海主城区有 1 个负值中心, 尺度约 30 km, 这对应于该暴雨雨团。700 hPa 第三模态空间场与 850 hPa 大致类似, 也有波列存在, 在上海主城区仍然有一个同尺度的负值中心 (图 5b)。500 hPa 上, 大体仍有正负值中心相间排列的波列, 但其位置与低层有些不同。200 hPa, 空间场分布与 500 hPa 大致类似, 但配置大体相反, 并也有正负中心相间排列的波列存在。总体上看, 第三模态空间场的主要系统也表现为波列的形式, 其波长约为 100 km, 且高空与中低空的配置也大体相反; 中低空在上海市区的低值中心则对应于实际的上海暴雨雨团。

由位势偏差场第三模态的时间系数曲线 (图 6) 可见, 在该 12 小时中, 时间系数分别在 25 日 04:30 左右和 12:40 左右达到负的最小值, 07:40 左右达到正的最大值。在 06:20 至 10:40 之间时间系数为正值。该时间系数呈现波动变化, 且其振幅随时间逐渐减小, 其周期约为 8 小时。第三模态的时间系数与以上第一、二模态有所不同的是, 除其周期不同

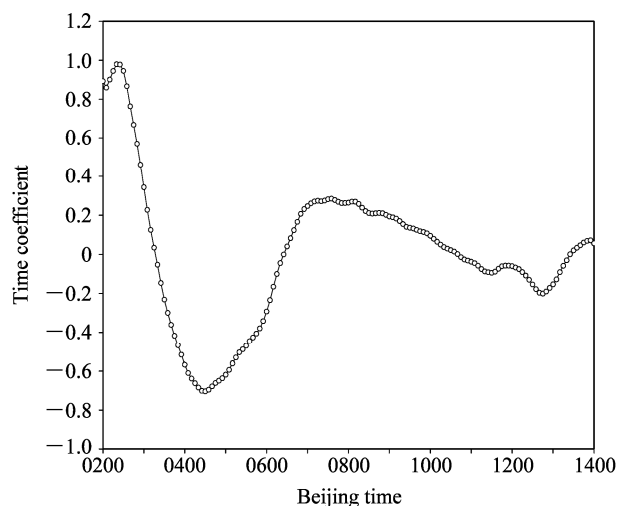


图6 2008 年 8 月 25 日位势偏差场 EOF3 时间系数

Fig. 6 Temporal coefficient of EOF3 on Aug 25, 2008

外, 其振幅是随时间衰减的, 而前两个模态其振幅则随时间变化不大; 而这反映了相应于第三模态的系统 (波列) 其随时间减弱的事实。

综合第三模态空间场的分布和时间系数的变化可知,在该暴雨过程中,低空有波长约为 100 km 的波列存在,其周期约为 8 小时。第三模态的时间系数大体呈 3/2 波的态势,其振幅随时间衰减。导致该次暴雨的系统是一个低涡形成的雨团,位势偏差场第三模态中上海主城区的负值中心变化与该低涡的演变密切相关。该低涡初步形成于 25 日 05:50 左右,之后上海市区低空的位势场表现为先逐渐降低,再逐渐升高的态势;上海主城区低空位势的最低值出现在 07:40 左右,以后该处的暴雨进入极盛期。由此可知,该暴雨过程与第三模态中波列的振荡联系紧密。

4 EOF 各模态的物理性质

从以上三个模态相应的三类波列空间尺度看,因其波列波长分别为 600、300、100 km (最后者含雨团尺度 30 km),故其分别属次天气尺度(α 中尺度中端)、 α 中尺度低端、 β 中尺度中端(雨团为低端)系统。设风速尺度为 10 m s^{-1} ,中纬度地转参数尺度为 10^{-4} s^{-1} ,则相应于这三类波列的 Rossby 数 R_0 分别为: 0.167、0.333 和 1.000(雨团为 3.333),并分别有 $R_0 \ll 1$ 、 $R_0^2 \ll 1$ 和 $R_0 \geq 1$ 。由此可知,这三类波列大体是准地转的,准平衡(准无辐散)的、非平衡的,且分别属 Rossby 波、涡旋波、重力惯性波(含涡旋—重力惯性混合波);它们的物理性质是完全不同的(张铭等, 2008)。EOF 分析中的各模态是正交的,即相互独立的,故其物理性质的不同是很正常的。

第一模态反映了上海暴雨过程的次天气尺度背景场特征,故可称其为暴雨背景模态;第二模态反映了该过程中的暴雨系统演变特征,故可称其为暴雨系统模态;第三模态则反映了该过程中的雨团演变特征,故可称其为暴雨雨团模态。三个模态各对应于波长和振荡频率不同的波列。因空间场分布是固定的,这些波列在空间分布上的波形不变。而这些波列在时间上却有驻波振荡,这是因其时间系数随时间有振荡变化。故对某一模态而言,其随时间的变化仅为驻波振荡却并不传播(其空间场的 0 线即为该驻波振荡的驻线)。然而,因各模态空间场的 0 线是相互不重合的,故该三个模态叠加后的场则随时间会有变形和移动(图 7)。由以上可知,天气系统 EOF 分解的物理本质为:可将一个变形和移动的天气系统分解为若干个具有不同物理性质

且时空尺度不同相互独立的模态(驻波波列)。这样就使原来较复杂的问题得以简化。不同的模态各有自身的特点,其驻波波列波长及振荡周期(频率)皆不同,波列的波长越大,周期越长(频率越低)。这也说明,EOF 分解能够进行天气系统的尺度分离,且分离后得到的各种尺度的系统(各模态)是独立(正交)和有特定物理意义的,这正体现了该分离方法的优点。

5 EOF 模态的锁相与暴雨

本文 EOF 分解得到各模态的叠加对该暴雨过程有直接的影响。因为前三个模态的方差贡献已达 93.3%,所以前三模态所代表的三类波列对该暴雨的形成发展起着决定性的影响作用。

为讨论方便,本文将时间系数乘以在某处的空间模态定义为时空指数。由上海主城区位势偏差场前三个模态的空间场可知:低空,第一模态在上海主城区处为正值,而第二、三模态为负值,高空则大致相反。在上海主城区处,低空在 25 日 08:20,第一模态时间系数由正转负,04:50 时第二模态时间系数由负转正,06:20 第三模态的时间系数由负转正。表 1 给出了上海主城区处位势偏差场时空指数在各时间段的符号。由该表可见,约在 08:20,该处三个模态的时空指数在低空和在高空符号均一致,而高、低空的符号配置却相反;即此时分别在低空和高空,以上三类波列振荡的位相相同;这表明此时在高、低空分别发生了时空指数的三波锁相。而 08:20 正是暴雨雨团低涡形成后的降水强度极盛期。06:20 在上海主城区,同上理,第二模态与第三模态的波列有两波时空指数锁相,而这时正是该处开始降水的时刻。这表明,虽第一模态的方差贡献远大于后两个模态,但降水却取决于后两个模态。另外,上海主城区在 04:50 之前三类波列也有三波时空指数锁相现象。但此时时空指数低空(850 和 700 hPa)为正,高空(200 hPa)为负,即此时低空的位势是升高的,而这种情况天气不会太差。由此可知,当该三波时空指数在某地发生锁相,且锁相表现为低空(850 和 700 hPa)位势偏差为负且高空(200 hPa)位势偏差为正,同时低层位势急剧降低时,则可能导致该处出现暴雨和强对流天气(当然这还需要其他条件配合,如水汽条件和位势不稳定等)。上海暴雨在 08:20 左右在徐家汇雨强达到极盛,此时正是以上三波时空指数在该处发生锁

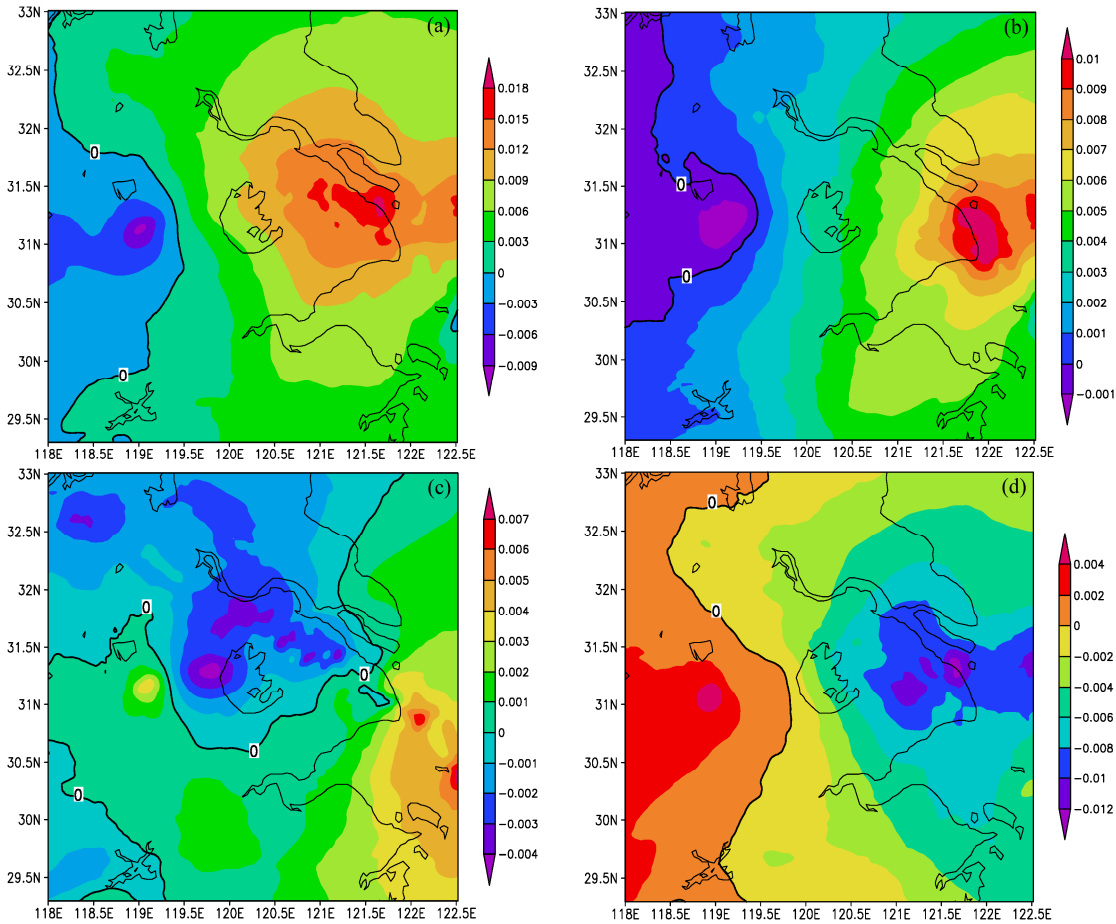


图7 2008年8月25日850 hPa位势偏差场EOF分解前三模态叠加分布: (a) 02:00; (b) 05:00; (c) 08:00; (d) 11:00
Fig. 7 Superposed fields of the first three EOF modes at 850 hPa on Aug 25, 2008: (a) 0200 BT; (b) 0500 BT; (c) 0800 BT; (d) 1100 BT

相的结果。这也表明, EOF 分析不仅能用于气候系统, 在天气尺度和中尺度系统的统计动力诊断上, 亦可发挥重要作用。

表1 上海主城区位势偏差场时空指数随时间变化
Table 1 Variation with time for space-time indexes in Shanghai main urban area

时间	低空			高空		
	EOF1	EOF2	EOF3	EOF1	EOF2	EOF3
04:50 之前	+	+	+	-	-	-
04:50~06:15	+	-	+	-	+	-
06:20~08:15	+	-	-	-	+	+
08:20	-	-	-	+	+	+

6 结语

本文将 2008 年上海“8.25”暴雨过程的 WRF 中尺度数值模式模拟结果看作实况资料集, 应用 EOF 分析方法对该资料集做了统计动力诊断。所得主要结论有:

- (1) 当数值模式输出足够稠密、精细的样本, 且其能较好反映实况时, 对天气尺度和 α 、 β 中尺度系统的天气过程, 利用 EOF 方法进行诊断是可行的。
- (2) 对本文的暴雨过程, EOF 分解的位势偏差场的前三个模态分别反映了 α 中尺度中端、低端和 β 中尺度天气系统的演变特征, 且分别对应于波长和振荡频率不同的驻波波列。
- (3) 该三个模态可分别称之为暴雨背景模态、暴雨系统模态和暴雨雨团模态, 其物理性质不同, 分别属于准地转的 Rossby 波、准平衡的涡旋波和非平衡的重力惯性波。
- (4) 天气系统 EOF 分解的物理本质为: 可将一个变形和移动的天气系统分解为若干个具有不同物理性质且时空尺度不同相互独立的模态(驻波波列), 这有助于明确和深化对该系统的认识。
- (5) EOF 分解能够进行天气系统的尺度分离, 且分离后得到的各种尺度的系统(各模态)是独立

(正交)和有特定物理意义的,这更体现了该尺度分离方法的优点。

(6)当本文 EOF 分解的各波列(模态)在某地时空指数发生三波锁相,且该地的位势表现为低空为负高空为正,同时低层位势急剧降低时,此时则有可能在该处发生暴雨。

本文仅对一个暴雨个例做了 EOF 分析,这是不够的。不过以上结论表明,将 EOF 方法应用于 β 中尺度系统的探索是成功的。今后将进一步在这方面用更多个例来进行深入研究。

参考文献 (References)

- 安洁, 张铭. 2006. 中尺度暴雨过程的 EOF 分析 [C]. 中国气象学会 2006 年年会论文集. An Jie, Zhang Ming. 2006. EOF expansion in one mesoscale rainstorm [C]. Proceeding of Chinese Meteorological Society Annual Meeting in 2006.
- Athanasiadis P J, Wallace J M, Wettstein J J. 2010. Patterns of wintertime jet stream variability and their relation to the storm tracks [J]. *J. Atmos. Sci.*, 67 (5): 1361–1381.
- 曹晓岗, 张吉, 王慧, 等. 2009. “080825”上海大暴雨综合分析 [J]. *气象*, 35 (4): 51–58. Cao Xiaogang, Zhang Ji, Wang Hui, et al. 2009. Analysis on a severe convective rainstorm hitting Shanghai on 25 August 2008 [J]. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 35 (4): 51–58.
- Chang E K M, Zheng M H, Raeder K. 2013. Medium-range ensemble sensitivity analysis of two extreme pacific extratropical cyclones [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 141 (1): 211–231.
- 李崇银, 李琳, 潘静. 2013. 夏季北半球平流层环流的模态特征及变化 [J]. *科学通报*, 58 (4): 365–371. Li Chongyin, Li Lin, Pan Jing. 2013. The estival modal features and transformations of stratospheric circulation in Northern Hemisphere [J]. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 58 (4): 365–371.
- Mendonça A M, Bonatti J P. 2009. Experiments with EOF-based perturbation methods and their impact on the CPTEC/INPE ensemble prediction system [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 137 (4): 1438–1459.
- North G R, Bell T L, Cahalan R F, et al. 1982. Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal function [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 110 (7): 699–706.
- Tao L, Chen D. 2012. An evaluation of rotated EOF analysis and its application to tropical Pacific SST variability [J]. *J. Climate*, 25 (15): 5361–5373.
- 魏凤英. 2007. 现代气候统计诊断与预测技术 [M]. 北京: 气象出版社, 105–147. Wei Fengying. 2007. Modern Climatic Statistical Diagnosis and Prediction Technology [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 105–147.
- Xu Z F, Wang Y, Fan G Z. 2013. A two-stage quality control method for 2-m temperature observations using biweight means and a progressive EOF analysis [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 141 (2): 798–808.
- 于杰. 2012. 雨团与位势稳定度的解析和数值研究 [D]. 解放军理工大学博士论文. Yu Jie. 2012. Analytical and numerical research on rain clusters and potential stability [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), PLA University of Science and Technology.
- Yu Jie, Zhang Ming. 2011. Analytic study on potential instability and spiral structure in rain clusters [J]. *J. Trop Meteor.*, 17 (1): 79–86.
- 张铭, 安洁, 朱敏. 2007. 一次暴雨过程的 EOF 分析 [J]. *大气科学*, 31 (2): 321–328. Zhang Ming, An Jie, Zhu Min. 2007. EOF expansion in one rainstorm [J]. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 31 (2): 321–328.
- 张铭, 张立凤, 安洁. 2008. 大气波谱分析及其不稳定性 (第一卷), 二维旋转层结大气中的扰动 [M]. 北京: 气象出版社. Zhang Ming, Zhang Lifeng, An Jie. 2008. On the Wave Spectrum Analyses and Instability (I) [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 166.
- 张世轩, 封国林, 赵俊虎. 2013. 长江中下游地区暴雨“积成效应” [J]. *物理学报*, 62 (6): 1–10. Zhang Shixuan, Feng Guolin, Zhao Junhu. 2013. “Cumulative effect” of torrential rain in the middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. *Acta Physica Sinica* (in Chinese), 62 (6): 1–10.
- 支星, 徐海明. 2013. 3 种再分析资料的高空温度与中国探空温度资料的对比: 年平均特征 [J]. *大气科学学报*, 36 (1): 77–87. Zhi Xing, Xu Haiming. 2013. Comparative analysis of free atmospheric temperature between three reanalysis datasets and radiosonde dataset in China: Annual mean characteristic [J]. *Trans. Atmos. Sci.* (in Chinese), 36 (1): 77–87.
- 曾庆存. 1974. 大气红外遥感原理 [M]. 北京: 科学出版社, 160–166. Zeng Qingcun. 1974. Principle of Atmospheric Infrared Remote Sensing (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 160–166.