

于杰, 张继权, 张铭. 2014. 动能 EOF 分析和  $\beta$  中尺度雨团中的能量转换 [J]. 大气科学, 38 (6): 1211–1220, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1403.13327.  
Yu Jie, Zhang Jiquan, Zhang Ming. 2014. EOF analysis of kinetic energy and energy conversion in meso- $\beta$  scale rain clusters [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38 (6): 1211–1220.

## 动能 EOF 分析和 $\beta$ 中尺度雨团中的能量转换

于杰<sup>1,2</sup> 张继权<sup>1</sup> 张铭<sup>2</sup>

1 东北师范大学环境学院, 长春 130024

2 全军危险性天气监测预警研究中心, 南京 211101

**摘要** 本文针对 2008 年上海 8 月 25 日暴雨过程, 利用 WRF 中尺度数值模式对其较好模拟的结果, 应用 EOF 分析方法对其做了动能偏差场的统计动力诊断。探讨了该暴雨过程中各种尺度天气系统, 特别是  $\beta$  中尺度雨团, 其有效位能向动能的转化机制。所得主要结论有: 对该暴雨过程, 动能偏差场 EOF 分析的第一、二、三模态可分别称为暴雨背景模态、暴雨系统模态和暴雨雨团模态。在该暴雨落区附近, 低层各模态动能偏差场水平梯度的绝对值均较大, 系统演变也较剧烈, 且尤以暴雨雨团模态为甚; 这表明低层暴雨雨团模态该处风场具有强烈的非地转性, 有着强辐合, 运动是非平衡的, 其性质为重力惯性波 (含涡旋—重力惯性混合波)。在某等压面上, 有效位能的时间变化与位势偏差的时间变化相同, 而前者的水平梯度则与后者的空间梯度大致相同, 这样讨论某层前者的变化就归结于讨论该层后者的变化。暴雨来临前在该暴雨落区附近, 前三个模态都有有效位能向动能的转化, 其表现为动能的增长和有效位能的下降, 且以暴雨雨团模态表现更突出。暴雨雨团模态的尺度为  $\beta$  中尺度, 这表明该尺度的系统在有效位能向动能转换中起着关键作用, 且扮演着有效位能与涡旋场动能之间转换的中介角色。

**关键词** 动能 EOF 分析  $\beta$  中尺度 雨团 能量转换

文章编号 1006-9895(2014)06-1211-10

中图分类号 P443

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1403.13327

## EOF Analysis of Kinetic Energy and Energy Conversion in Meso- $\beta$ Scale Rain Clusters

YU Jie<sup>1,2</sup>, ZHANG Jiquan<sup>1</sup>, and ZHANG Ming<sup>2</sup>

1 College of Environmental, Northeast Normal University, Changchun 130024

2 PLA Research Centre for Severe Weather Monitoring and Warning, Nanjing 211101

**Abstract** Using empirical orthogonal function (EOF) expansion, this paper analyzes Weather Research and Forecasting (WRF) simulative data of the torrential rain occurring in Shanghai on August 25 of 2008 to diagnose the deviation field of kinetic energy. The conversion mechanism from the available potential energy to kinetic energy is discussed for various weather system scales, and meso- $\beta$  scale rain clusters in particular. The results show that the preceding three EOF expansion modes can be individually called the ambient mode, the torrential rain system mode, and the rain clusters mode. Around the precipitation area, the absolute value of the horizontal gradient in the low-level kinetic energy deviation field is bigger, especially in the meso- $\beta$  scale rain clusters mode. This indicates that the wind field of this mode is ageostrophic with strong convergence, and its motion is a non-equilibrium inertial-gravity wave (containing a mixed eddy-inertial gravity wave). On a certain isobaric surface, the available potential energy is homological with geopotential deviation in

收稿日期 2013-12-06, 2014-03-31 收修定稿

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

作者简介 于杰, 女, 1974 年出生, 博士, 工程师, 主要从事中尺度气象学研究, Email: yujieair@126.com

the time-variation. The horizontal gradient of the available potential energy is homological with the spatial gradient of the geopotential deviation. So the variation of geopotential deviation can represent a change in the available potential energy. Before a rain occurrence, the available potential energy converts to kinetic energy for all three modes around the precipitation area. For the rain clusters mode, especially, the change is more obvious. This mode is a meso- $\beta$  scale system, so this scale system is key in the conversion course from available potential energy to kinetic energy, playing an intermediary role in the eddy field's conversion mechanism of available potential energy to kinetic energy.

**Keywords** Kinetic energy, EOF expansion, Meso- $\beta$  scale, Rain clusters, Energy conversion

## 1 引言

大气能量的积累和转换过程是影响中纬度地区天气的重要因素(高辉等, 2005)。能量既不会凭空产生, 也不会凭空消失, 只能从一种形式转化为另一种形式, 在转化的过程中能量守恒。Chang (2000) 在对流层波动能量的研究中发现, 绝大多数向下游发展的高空槽会导致地面气旋生成, 从而对局部地区的天气产生影响。葛非等(2013)对四川盆地持续性暴雨过程中对流层中层大气风场动能和势能的相互转换和分布特征的研究发现, 在暴雨迅速发展阶段, 受环流形势和地形等条件的影响, 动能能量转换成驻波形式的波动势能, 在强降水维持并减弱阶段, 动能和势能之间的转换趋于平缓。梅士龙和管兆勇(2008)对2003年淮河流域梅雨期间的研究表明, 斜压波包所带来的扰动能量为江淮流域暴雨的发生发展提供了必要的能量积聚。这样讨论暴雨过程中的能量转换, 特别是其中 $\beta$ 中尺度雨团中的能量转换是非常必要和有意义的。由于受资料所限, 对后者的研究工作尚不多见。

最近十几年来, EOF分析已成为气候科学研究中的重要工具, 并取得丰硕的研究成果(Antônio Marcos 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)。而EOF分析应用在天气尺度特别是中尺度天气系统的研究却很少(安洁和张铭, 2006; 张铭等, 2007; 于杰等, 2014)。究其原因, 主要是因天气尺度系统的常规观测资料在时间和空间密度上不够密集, 而无法进行EOF分析。然而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, 数值模拟的结果与实际天气之间的差异明显减小。故将效果好的数值模拟结果作为实际天气过程的稠密资料集用于研究, 已成为切实可行的途径。于杰(2012)曾利用WRF中尺度数值

模式, 采用三重网格嵌套方式对2008年8月25日(简称“8.25”)上海暴雨过程成功地进行了数值模拟, 模拟效果较好, 其输出结果可以代替实际观测来用于该暴雨过程的研究。因此利用数值模拟的数据集, 采用EOF方法对天气尺度及中尺度天气系统进行分析诊断已成为可能(安洁和张铭, 2006; 张铭等, 2007; 于杰等, 2014)。因EOF分析的各分量(模态)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是相互独立的, 这样就有利于揭示暴雨发生发展过程中的主要矛盾。同时, EOF方法也可以对天气过程进行尺度分离, 且分离后的各模态也是相互独立具有特定物理意义的。这样通过EOF分析, 可将一个天气系统分解成若干个不同尺度的子系统来独立分析, 进而更全面的揭示不同尺度系统对暴雨的影响机制。采用以上思路, 利用WRF数值模式输出的资料, 对2008年“8.25”上海暴雨过程的位势偏差场做了EOF分析(于杰等, 2014)。本文则利用该模式输出的有关动能的资料对该暴雨过程的动能偏差场进一步做了EOF分析, 并结合已有的位势偏差场的结果(于杰等, 2014), 用以研究该暴雨过程中的动能分布和演变, 及其与有效位能的转换机制。本文是EOF方法应用于 $\beta$ 中尺度天气系统的进一步尝试和探索, 也为研究暴雨提供一种新思路。

## 2 资料及方法

发生在2008年8月25日早晨的暴雨受高空西风槽及中低层低涡的共同影响, 给上海市带来了强雷电和局部大暴雨天气。该暴雨过程突发性强, 降水量大, 降水历时短。该次降水全市有7个自动雨量测站测得降水超过了100 mm, 降水时段主要集中在07:00~08:00(北京时, 下同)。暴雨区主要出现在中心城区及中北部地区, 雨量分布不均。其中徐家汇站出现了1小时117.5 mm的极强降水, 为该站1872年有气象记录以来所未有(之前1950年8月9日13:14~14:14, 徐家汇1小时雨量曾达

100.7 mm)。该降水主要为一尺度为 30 km 左右的降水雨团所致(曹晓岗等, 2009)。本文利用 WRF 模式三重嵌套方式(粗网格 30 km, 次网格 10 km, 细网格 3 km), 以 2008 年 8 月 24 日 14:00 至 25 日 14:00 的  $1^\circ \times 1^\circ$  的 NCEP 再分析资料作为初始场和侧边界, 对该次暴雨过程做了成功地数值模拟, 该模拟结果与实测结果很接近(于杰, 2012), 能够用来替代实测资料进行 EOF 分析(于杰等, 2014)。

我们选取 25 日 02:00 至 14:00 细网格每 5 分钟输出一次的结果共 145 个样本作为 EOF 分析的资料集, 分析区域为 ( $29.5^\circ \sim 33.2^\circ \text{N}$ ,  $118^\circ \sim 122.5^\circ \text{E}$ )。所取的等压面层次为 850、700、500、200 hPa。为方便, 以下前两者称低空, 第三者称中空, 后者称高空, 并不再赘述。扰动场由模拟各时刻输出的场值减去时间平均场值后得到(其中时间平均取各时刻的算术平均)。在提取以上 4 层等压面的扰动场后, 分别针对模拟的动能扰动场和位势扰动场做了整体 EOF 分析(即将 4 层等压面的扰动作为一个整体)。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显著性检验。经计算, 动能偏差场和位势偏差场的 EOF 分析前三个模态都通过显著性检验。其方差贡献参见表 1。由该表可见, 动能偏差场和位势偏差场的 EOF 分析的收敛速度都较快, 前三个模态累计方差贡献分别达到了 87.83% 和 93.34%。两者相比, 位势偏差场的收敛速度略快一些。从该暴雨过程位势偏差场 EOF 分析的结果发现, EOF 分析的前三个模态分别反映了  $\alpha$  中尺度中端、低端和  $\beta$  中尺度天气系统位势高度场的演变特征; 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 [详见于杰等 (2014)]。本文则主要给出该暴雨过程动能偏差场的 EOF 分析结果并就能量转换问题进行讨论。

表 1 位势和动能偏差场 EOF 前三个模态方差贡献  
Table 1 Variance contributions of the preceding three EOF modes of the geopotential height deviation field and kinetic energy deviation field

	EOF 前三个模态方差贡献	
	动能偏差场	位势偏差场
第一模态	74.13%	88.11%
第二模态	10.00%	3.49%
第三模态	3.70%	1.74%
累计方差贡献	87.83%	93.34%

### 3 动能偏差场的 EOF 分析结果

图 1 分别给出了动能偏差场 EOF 分析第一模态 850、700、500、200 hPa 上的空间场和时间系数(为使图更加简洁清晰, 图中等值线的数值标注为实际值的  $10^3$  倍)。由图 1a、b、c、d 上可见: 850、700、500 hPa 上海主城区都处于该动能偏差场的正值中心附近, 而 200 hPa 上则为负值区。在空间场上, 上海主城区及其周边动能偏差场的水平梯度较明显, 尤以 850 hPa 为甚。

由图 1e 可见, 第一模态时间系数的变化从 02:00 至 14:00 是由负转正的过程, 并且在 07:30 左右由负值转为正值, 其时间系数曲线大致呈半波的态势。结合时间系数及空间场分布可见, 在该暴雨演变过程中, 第一模态上海主城区的中低空其动能是随时间增加的, 而高空则相反, 随时间减少。

图 2 分别给出了动能偏差场 EOF 分析第二模态 850、700、500、200 hPa 上的空间场和时间系数。由图 2a、b、c、d 可见: 第二模态在上海主城区及其周边, 低空 850、700 hPa 皆处于正负值交界区; 到了 500、200 hPa 上则就全为负值区; 但无论低空还是高空, 上海主城区及其周边动能偏差场的水平梯度绝对值也都较大。

由图 2e 可见, 第二模态的时间系数, 由 02:00 至 14:00 其由负转正, 再由正转负。具体表现为 04:50 到 10:40 之间为正值, 07:40 左右达到正最大值, 以后又减小, 在 10:40 后转为负值, 并在 13:40 达到极小(绝对值极大)。其时间系数曲线大致呈 1 波态势。结合第二模态时间系数及空间场分布可见, 07:40 之前, 上海主城区及其周边第二模态动能偏差场的水平梯度绝对值一直在增加, 在 07:40 左右达到最大, 而在该暴雨发生之后, 此处该绝对值则逐渐减弱。

图 3 分别给出了动能偏差场 EOF 分析第三模态 850、700、500、200 hPa 上的空间场和时间系数。由图 3a、b、c、d 可见, 在 850、700 hPa 上, 在上海主城区有一尺度与雨团尺度相当(约 30 km)的正值中心区, 且该正值中心四周动能偏差场的水平梯度很大。而 500 到 200 hPa 相应区域虽然也是正值区, 但此正值中心附近的该梯度不大。

由图 3e 可见, 第三模态时间系数在暴雨发生前后, 04:10 至 08:00 为负值, 08:00 至 12:00 为正值; 在 06:00 达到负的最小值, 09:30 达到正的极大

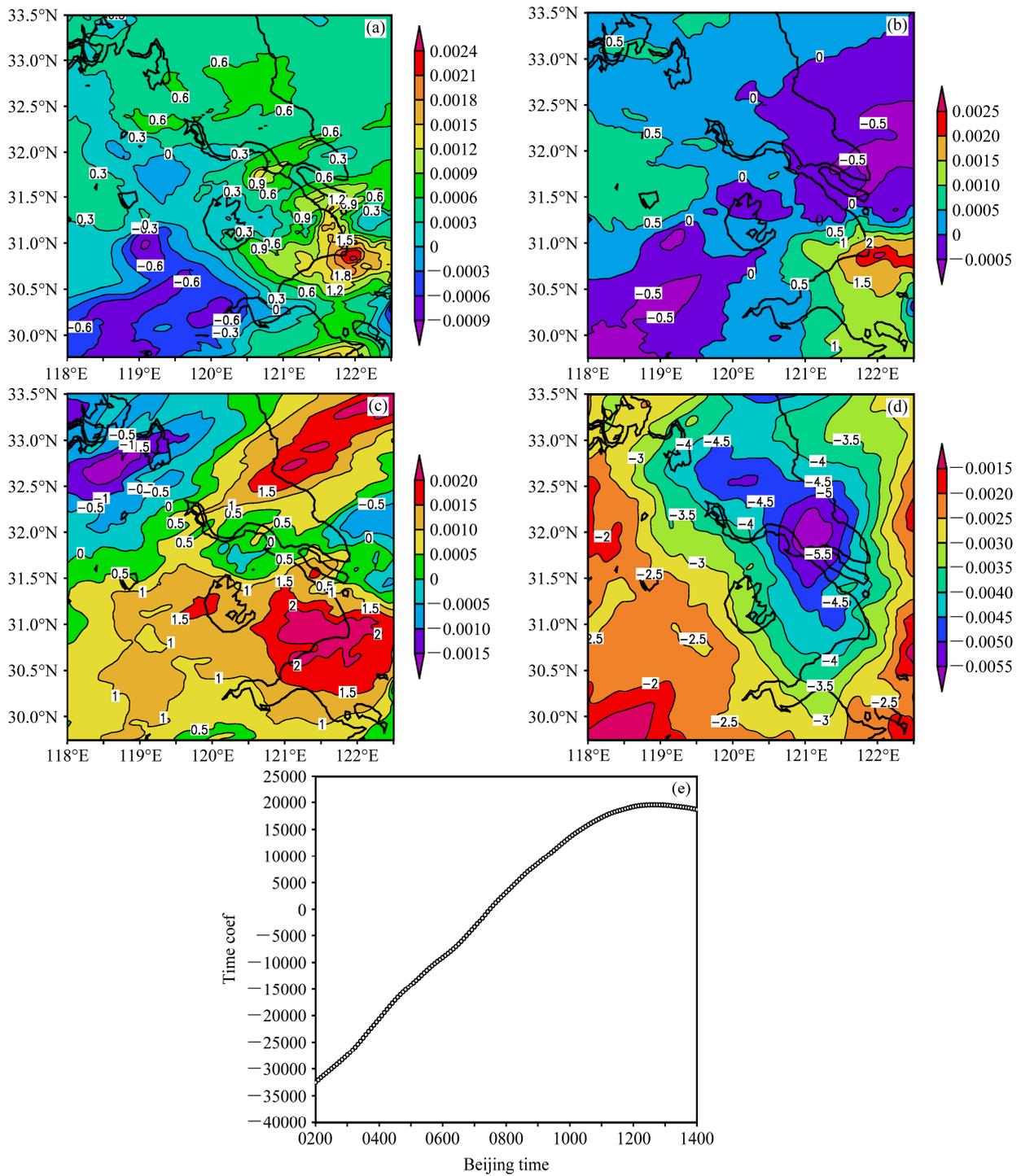


图1 动能偏差场 EOF 分析第一模态时空分布: (a) 850 hPa; (b) 700 hPa; (c) 500 hPa; (d) 200 hPa; (e) 时间系数。图中等值线为实际值  $10^3$  倍, 色标标注的是实际值

Fig. 1 The first EOF mode (EOF1) of kinetic energy deviation field: (a) 850 hPa; (b) 700 hPa; (c) 500 hPa; (d) 200 hPa; (e) time coefficient. Color code represents real values, values of contour are multiplied by  $10^3$

值。总体看来在 02:00 至 14:00, 其时间系数曲线呈 3/2 波的态势。结合以上时间系数及空间场分布可见, 当暴雨发生初期, 06:00 左右, 第三模态上海主城区的动能最小, 这体现了暴风雨前的宁静, 而

其与周边间则动能偏差场水平梯度的绝对值很大。之后, 上海主城区动能迅速增加, 此时也是暴雨发展最强盛的时期。到 09:30 分左右动能达到最大值。由文献 (于杰和张铭, 2012) 可知, 动能水平

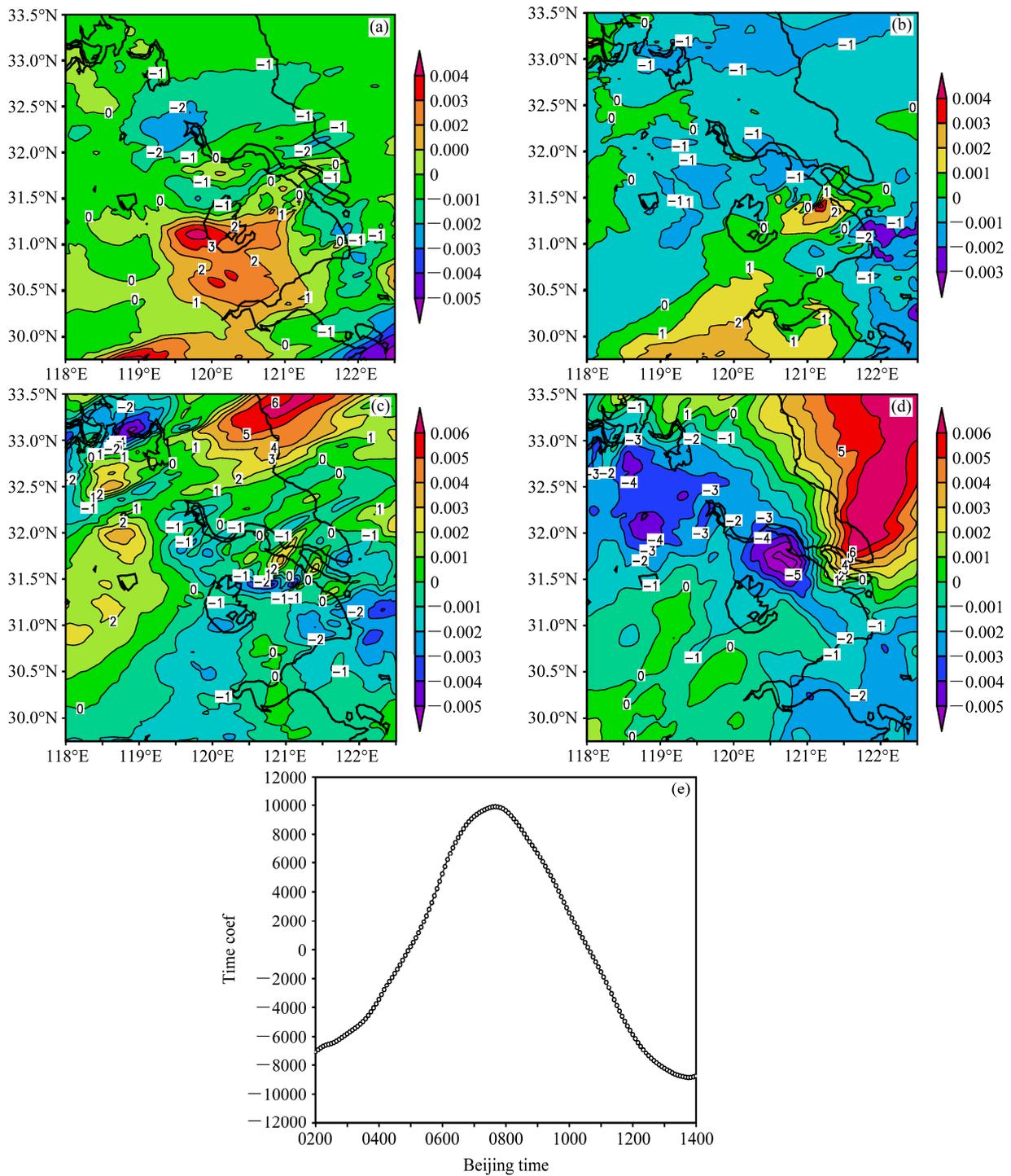


图2 同图1，但为第二模态

Fig. 2 Same as Fig. 1, but for EOF 2

梯度的绝对值与地转偏差的大小大致成正比，在该绝对值较大处，风场的非地转性也较强，风场变化也较剧烈。这样由以上动能偏差场 EOF 分析前三个模态的时空分布特征知：在暴雨发生区域，动能水平梯度都较大，这表明该处地转偏差均较大，运动

演变也均较剧烈。第三模态低层在上海主城区附近即在该暴雨雨团处，动能水平梯度很大，表明该处地转偏差很大，风场具有强烈的非地转性，且有强烈辐合（曹晓岗等，2009），运动是非平衡的，有重力惯性波或涡旋—重力惯性混合波存在（张铭

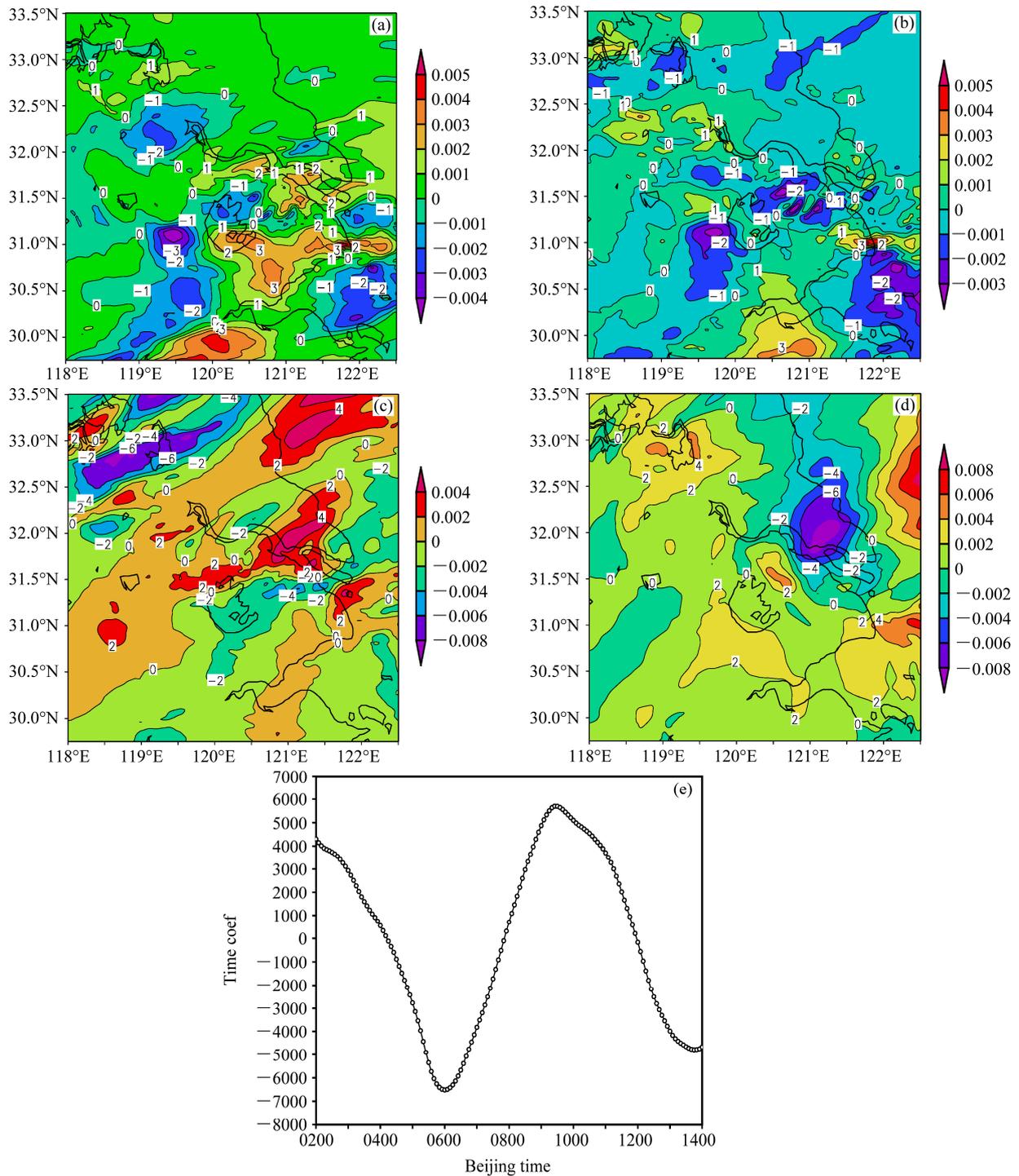


图3 同图1, 但为第三模态  
Fig. 3 Same as Fig. 1, but for EOF 3

等, 2008)。同时, 由各模态时间系数曲线可见, 动能偏差场的时间系数大致也有 1/2 波, 1 波与 3/2 波的振荡态势, 可以反映不同尺度系统的动能波动特征。

相应此暴雨过程位势偏差场 EOF 的分解结果

(于杰等, 2014), 结合该暴雨过程动能偏差场 EOF 分析的特点, 也可称该分解的前三个模态为暴雨背景模态、暴雨系统模态和暴雨雨团模态。以下本文将利用该动能偏差场 EOF 分析前三个模态的结果, 结合以前文献(于杰等, 2014)中对该暴雨过程位

势偏差场 EOF 分析前三个模态的结论, 来进行有效位能与动能转换的讨论, 以揭示该暴雨过程中有效位能与动能的转化机制, 特别是  $\beta$  中尺度雨团所起的作用。

## 4 有效位能与动能转化机制的讨论

### 4.1 有效位能表述

定义某标准等压面层 (如 500 hPa) 上某处  $(x, y)$  在时间  $t$  时刻的相对有效位能为

$$E_{e\phi}(x, y, t) = \phi'(x, y, t) - \phi'_{\min}, \quad (1)$$

这里  $\phi'(x, y, t)$  为该层上该处此时位势  $\phi(x, y, t)$  与该层在所有研究时段内对时间平均的位势  $\bar{\phi}(x, y)$  的偏差, 即

$$\phi'(x, y, t) = \phi(x, y, t) - \bar{\phi}(x, y), \quad (2)$$

而  $\phi'_{\min}$  则为在该层上在所研究区域和研究时段内  $\phi'$  的最小值, 即

$$\phi'_{\min} = \min \phi'(x, y, t), \quad (x, y) \in \Omega, \quad t \in \Omega_T \quad (3)$$

在此  $\Omega$  为研究区域 (细网格模式的范围),  $\Omega_T$  为研究时段 (25 日 02:00 至 14:00)。显然这样定义后有  $E_{e\phi} \geq 0$ , 且在该层上  $\phi'_{\min}$  为常数。注意到在该层  $\bar{\phi}$  仅为  $(x, y)$  的函数后, 再在该层上定义时间平均有效位能如下:

$$\bar{E}(x, y) = \bar{\phi}(x, y) - \bar{\phi}_{\min}, \quad (4)$$

在此  $\phi'_{\min}$  为  $\bar{\phi}(x, y)$  的最小值, 即

$$\bar{\phi}_{\min} = \min \bar{\phi}(x, y), \quad (x, y) \in \Omega \quad (5)$$

显然也有  $\bar{E} \geq 0$ , 且  $\bar{E}$  不是时间的函数, 而  $\bar{\phi}_{\min}$  在该层上也为常数。这样该层上的位能  $E$  可写为

$$\begin{aligned} E(x, y, t) &= \phi(x, y, t) - \bar{\phi}(x, y) + \phi'(x, y, t) = \\ \bar{E}(x, y) + E_{e\phi}(x, y, t) &= \bar{\phi}_{\min} + \phi'_{\min} = \\ \bar{E}(x, y) + E_{e\phi}(x, y, t) &= E_n, \end{aligned} \quad (6)$$

这里

$$E_n(z_0) = \bar{\phi}_{\min} + \phi'_{\min}, \quad (7)$$

为该层上在研究时段中在所研究区域内不能转换为动能的位能, 相当于水动力学中“死水”的位能。而  $E_{e\phi}$  和  $\bar{E}$  则为该层上在该时段和该区域内可以转化为动能的最大位能。两者可合称为有效位能  $E_a$ :

$$E_a = E_{e\phi} + \bar{E}, \quad (8)$$

对 (8) 做时间和空间微商后有

$$\frac{\partial E_a}{\partial t} = \frac{\partial E_{e\phi}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{E}}{\partial t}, \quad (9)$$

$$\nabla E_a = \nabla \bar{E} + \nabla E_{e\phi} = \nabla \bar{\phi} + \nabla \phi' \approx \nabla \phi', \quad (10)$$

在此  $\nabla$  为二维水平梯度算子。上式中  $\nabla \bar{\phi}$  明显要较  $\nabla \phi'$  小, 这是因前者作了时间平均的缘故, 故粗略看来可将前者略去。由此可见在该层上, 有效位能的时间变化与位势偏差的时间变化相等, 而有效位能的空间梯度则与位势偏差的空间梯度大致相同。故而讨论各层位势偏差的时空变化就可研究该层有效位能变化情况。为讨论方便, 本文依旧定义 EOF 分析的各模态的时间系数乘以某处空间场的值为时空指数 (于杰等, 2014)。由以上分析可知, 位势偏差场的时空指数变化特征可反映出某处有效位能的变化情况。显然动能偏差场的时空指数则反映出某处动能的变化情况。这样某处这两个指数的变化情形就反映了该处有效位能与动能的转换情况。

### 4.2 能量转化机制的分析

图 4 给出了上海徐家汇站位势偏差场 EOF 分析得到的 850 hPa 各模态的时空指数曲线 [资料来自于杰 (2012)]。由图可见, 在该暴雨发生前, 即 25 日 07:00 前, 前三个模态的时空指数均是下降的。其中第三模态即暴雨雨团模态下降尤为剧烈。这表明三个模态均有有效位能的减少, 而第三模态 (暴雨雨团模态) 减少得相对更多。有效位能的减少意味着其有向动能的转换。

图 5 给出了上海徐家汇站动能偏差场 EOF 分析得到的 850 hPa 各模态的时空指数曲线。由图可见, 在暴雨发生前, 前三模态的动能都是增加的, 而第三模态增加的更为显著。由此可见, 在暴雨的发展过程中, 的确有效位能向动能的转换。曾庆存 (1979) 指出, 该转换有以下规律: 有效位能与动能的转换必须有水平风场散度不为 0; 如果该散度不恒为 0, 则有效位能与散度场动能之间可直接转换; 由于地转偏向力作用及非线性相互作用, 涡旋场与散度场之间可有动能转换, 但必须散度场不为 0; 有效位能与涡旋场动能之间不能直接互相转换, 必须通过散度场作中介。

由上可知, 散度场在有效位能与动能之间相互转换中扮演了十分重要的角色, 因第三模态 (暴雨雨团模态) 如前所述是非平衡的, 其性质为重力惯性波 (含涡旋—重力惯性混合波), 故其散度场是十分明显的。这就解释了 EOF 分析的第三模态在暴雨发生前其有效位能急剧下降, 而动能急剧增加的原因。

由于第三模态为暴雨雨团模态, 直接反映了雨

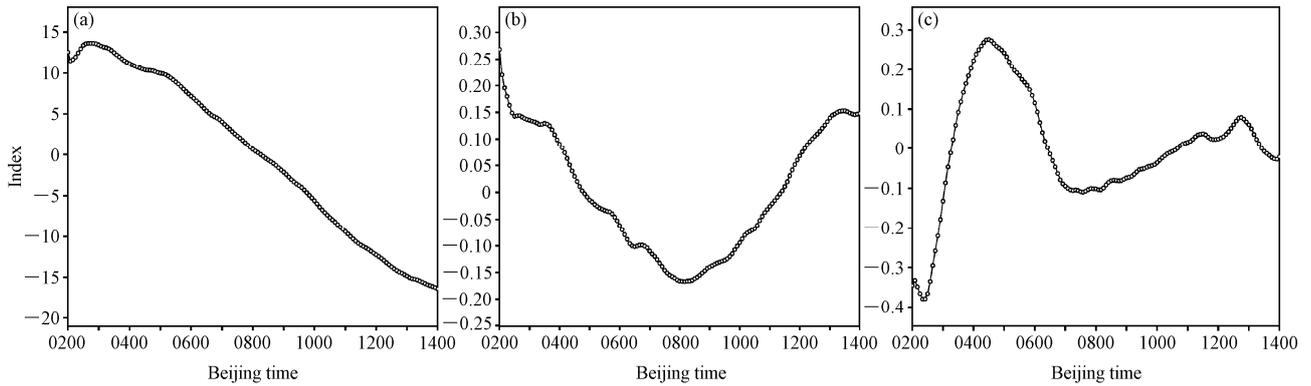


图4 各模态 850 hPa 位势偏差场的时空指数: (a) 第一模态; (b) 第二模; (c) 第三模态  
 Fig. 4 Space-time indexes of 850-hPa geopotential height deviation field: (a) EOF1, (b) EOF2, (c) EOF3

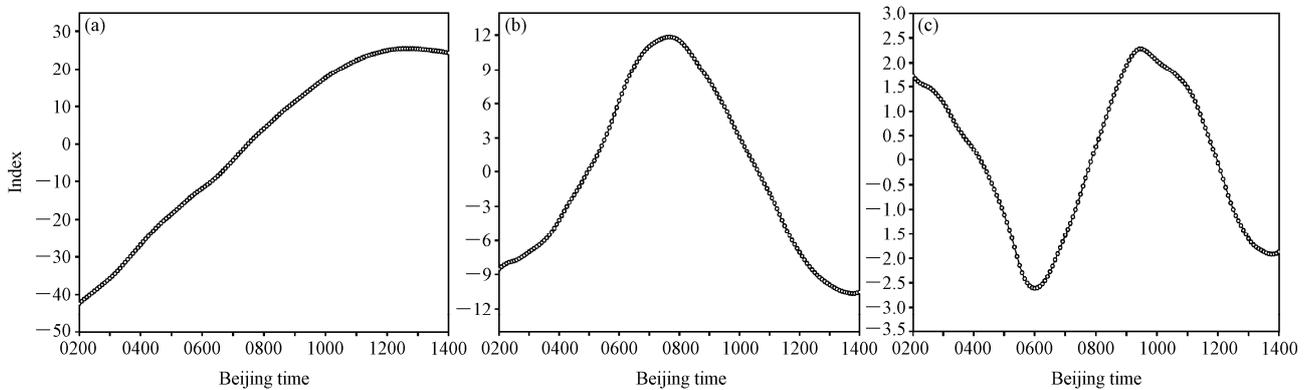


图5 同图4, 但为动能偏差场  
 Fig. 5 Same as Fig.4, but for kinetic energy deviation field

团尺度的天气系统变化,为此以下对低层(850 hPa)的该模态进行重点讨论。图4 c、图5 c给出了上海主城区位势偏差场和动能偏差场第三模态低层时空指数随时间的变化曲线,由两图可见:在暴雨发生前,该层上动能偏差场曲线变化趋势与位势偏差场的大致相反,即存在位势偏差场时空指数下降而动能偏差场时空指数上升。动能偏差场急剧上升段要落后于位势偏差场的急剧下降段,相差约1.5小时,而上海暴雨雨强最盛的时刻(约08:20)正处于动能偏差场的急升段上。这种位势偏差场与动能偏差场之间的配置表明:在该暴雨发生前和发生时有着有效位能向动能的转换;而在暴雨雨强最盛之前,则有动能的急剧增加。唐诗“山雨欲来风满楼”正是这种情形的真实写照。

注意到第三模态为雨团模态,其尺度(30 km)属 $\beta$ 中尺度。如上所述,在上海主城区其低层辐合最强,是非平衡的,变化也最剧烈。这表明 $\beta$ 中尺

度系统在有效位能向动能转换中起着关键作用,且扮演着有效位能与涡旋场动能之间转换的中介角色。

### 5 结语

本文针对2008年上海“8.25”暴雨过程,利用WRF中尺度数值模式对其较好模拟的结果,应用EOF分析方法对其做了动能偏差场的统计动力诊断。探讨了该暴雨过程中各种尺度天气系统,特别是 $\beta$ 中尺度雨团,有效位能向动能的转化机制。所得主要结论有:

(1) 对该暴雨过程,相应于其位势偏差场EOF分析的结果,动能偏差场EOF分析前三个模态也可称为暴雨背景模态、暴雨系统模态和暴雨雨团模态。

(2) 在暴雨落区附近,低层各模态动能偏差场水平梯度的绝对值均较大,系统演变较剧烈,尤以

暴雨雨团模态为甚; 这表明低层暴雨雨团模态该处风场具有强烈的非地转性, 有强辐合, 运动是非平衡的, 其性质为重力惯性波 (含涡旋—重力惯性混合波)。

(3) 在某等压面上, 有效位能的时间变化和位势偏差的时间变化相同, 而有效位能的空间梯度和位势偏差的空间梯度则大致相同, 这样讨论某层有效位能的变化就归结于讨论该层位势偏差的变化。

(4) 暴雨来临前在暴雨落区附近, EOF 分析的前三模态都有有效位能向动能的转化, 其表现为动能的增长和有效位能的下降, 且以暴雨雨团模态表现更突出。

(5) 暴雨雨团模态的尺度为  $\beta$  中尺度, 这表明  $\beta$  中尺度系统在有效位能向动能转换中起着关键作用, 且扮演着有效位能与涡旋场动能之间转换的中介角色。

本文虽只用一个暴雨个例, 却再次表明, 采用 EOF 方法进行  $\beta$  中尺度系统的统计动力诊断是可行和成功的。众所周知, 大多数暴雨过程均与中尺度系统有关。而 EOF 方法又能将与暴雨过程有关的系统分解成相对独立且具有不同物理性质的子系统, 得到其空间结构和时间演变规律。本文及以前的工作均表明, 应用 EOF 方法对暴雨进行统计动力诊断是可行的, 并具有一定的普适性。故本文得到的具体结果, 对某些暴雨也是适用的。今后拟将用更多个例在这方面继续做深入研究。此外本文的 EOF 分析是对动能偏差场和位势偏差场分别进行的, 若能将两者结合进行联合 EOF 分析, 用以讨论有效位能与动能的转换问题则效果会更好, 因这时两者有共同的时间系数。再者, 动能来源于风场, 若能对风场做 EOF 分析则能更直接地计算出散度、涡度和垂直运动, 这样更有利于讨论能量的转换和确定各模态运动的性质。不过因风场是向量, 此时要作复 EOF 分析, 这具有一定难度。以上所述的联合 EOF 分析和复 EOF 分析工作也都是我们未来的工作目标。

### 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 (in Chinese).  
Antônio Marcos M, Bonatti J. 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.  
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. Atmo. Sci.*, 67 (5): 1361–1381.  
Chang E K M. 2000. Wave packets and life cycles of troughs in the upper troposphere: Examples from the Southern Hemisphere summer season of 1984/85 [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 128 (1): 25–50.  
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.  
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.  
高辉, 陈隆勋, 何金海, 等. 2005. 亚洲赤道地区大气动能的纬向传播 [J]. *气象学报*, 63 (1): 21–29. Gao Hui, Chen Longxun, He Jinhai, et al. 2005. Characteristics of zonal propagation of atmospheric kinetic energy at equatorial region in Asia [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 63 (1): 21–29.  
葛非, 郭胜利, 谌芸, 等. 2013. 对流层中层大气能量转换特征与暴雨激发和维持的关系 [J]. *高原气象*, 32 (3): 762–769. Ge Fei, Guo Shengli, Chen Yun, et al. 2008. Relationship between energy conversion characteristic of mid-troposphere with excitation and maintenance in heavy rainstorm [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 32 (3): 762–769.  
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.  
Tao L, Chen D K. 2012. An evaluation of rotated EOF analysis and its application to tropical Pacific SST variability [J]. *J. Climate*, 25 (15): 5361–5373.  
梅士龙, 管兆勇. 2008. 对流层上层斜压波包活动与 2003 年江淮流域梅雨的关系 [J]. *大气科学*, 32 (6): 1333–1340. Mei Shilong, Guan Zhaoyong. 2008. Activities of baroclinic wave packets in the upper troposphere related to Meiyu of 2003 in the Yangtze River–Huaihe River valley [J]. *Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 32 (6): 1333–1340.  
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 (2): 699–706.  
Xu Zhifang, Yi Wang, Fan Guangzhou. 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]. 中国人民解放军理工大学博士学位论文. 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.  
于杰, 张铭. 2012. 动能水平梯度的本质及其诊断 [C]. 中国气象学会 2012 年年会论文集. Yu Jie, Zhang Ming. 2012. Essence and diagnosis of horizontal kinetic energy gradient [C]. Proceeding of Chinese Meteorological Society Annual Meeting in 2012 (in Chinese).  
于杰, 张继权, 张铭. 2014. EOF 分析用于  $\beta$  中尺度暴雨系统的探索 [J].

- 大气科学, 38 (4): 795–803. Yu Jie, Zhang Jiquan, Zhang Ming. 2014. Study on meso- $\beta$  scale torrential rain with EOF [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38 (4): 795–803.
- 曾庆存. 1979. 数值天气预报的数学物理基础 (第一卷) [M]. 北京: 科学出版社, 425pp. Zeng Qingcun. 1979. The Mathematical Physics Foundation of Numerical Weather Prediction I (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 425pp.
- 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 Journal of Atmospheric Sciences (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, 166pp. Zhang Ming, Zhang Lifeng, An Jie. 2008. On the Wave Spectrum Analysis and Instability I (in Chinese)[M]. Beijing: Meteorological Press, 166pp.
- 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): 069201. 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): 069201, doi:10.7498/aps.62.069201.
- 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.