

## 一次东北冷涡背景下 MCS 过程多尺度能量相互作用研究

沈新勇<sup>①②\*</sup> 张弛<sup>①</sup> 肖云清<sup>③④</sup> 沙莎<sup>⑤</sup> 王林<sup>①</sup> 李小凡<sup>⑥</sup>

① 南京信息工程大学 气象灾害教育部重点实验室/气候与环境变化国际合作联合实验室/气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 江苏 南京 210044;

② 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519082;

③ 中国气象局 旱区特色农业气象灾害监测预警与风险管理重点实验室, 宁夏 银川 750002;

④ 银川市气象局, 宁夏 银川 750011;

⑤ 上海海洋中心气象台, 上海 201306;

⑥ 浙江大学 地球科学学院, 浙江 杭州 310027

\* 联系人, E-mail: shenxy@nuist.edu.cn

2019-11-09 收稿, 2020-04-18 接受

国家重点研发计划(2019YFC1510400); 国家自然科学基金资助项目(41530427; 41790471; 41975054; 41930967; 41775040); 中国科学院战略性先导科技专项(XDA20100304); 中国气象局预报员专项(CMAYBY2019-132)

**摘要** 采用 WRF 模式对东北冷涡背景下 MCS 过程进行模拟, 利用 Barnes 滤波将模式数据分解为 3 个尺度, 分别代入相应的能量方程中进行计算, 从能量角度研究 MCS 发展过程, 多尺度系统能量相互转化, 以及动能与降水的联系。研究表明: 在此次过程中各尺度之间都有位能向动能的大量转化, 为系统发展提供能量。在对流单体发展到 MCS 成形前, 中低层天气尺度动能减少, 天气尺度动能向  $\beta$  中小尺度动能转换, 促进对流单体发展; 高层天气尺度动能增强, 对应高空急流增强, 促进对流系统发展;  $\beta$  中小尺度系统在中层对  $\alpha$  中尺度系统有动能输送, 促进 MCS 形成。在 MCS 形成和发展阶段, 各尺度位能向  $\alpha$  中尺度和  $\beta$  中小尺度动能转化达到最大。在 MCS 减弱阶段, 天气尺度系统和  $\alpha$  中尺度系统在中高层对  $\beta$  中小尺度系统有一定的抑制作用, 使  $\beta$  中小尺度系统发展减弱。此次过程中  $\beta$  中小尺度系统是降水的直接成因, 动能变化的正值中心对应大的降水中心。

**关键词**  
东北冷涡;  
MCS;  
多尺度;  
能量;  
相互作用

东北冷涡是出现在我国东北地区上空的一种高空冷性涡旋, 是影响我国的主要天气系统之一, 其活动不仅能造成东北地区低温冷害、持续性阴雨洪涝、突发性强对流等天气, 还会使华北、华中、华东, 甚至西北和西南地区产生灾害性强的中尺度对流性系统 (Mesoscale Convective System, MCS), 从而出现雷暴、冰雹、短时强降水、大风和暴雨等灾害性天气 (孙照渤等 2016)。研究发现空间尺度 20~200 km 的“ $\beta$  中尺度对流系统”往往是产生强降水和强对流天气的直接实体 (Orlanski, 1975), 而强对流的发生往往受到天气尺度系统的影响, 东北冷涡可以为 MCS 提供有利条件。纪晓玲等 (2010) 利用黑体亮

温和多普勒雷达资料分析了宁夏受东北冷涡后部横槽影响的一次 MCS 过程, 得到了有利于 MCS 生成的环境场和不稳定层结条件。张弛等 (2019) 研究发现东北冷涡作为爬线的背景场时会对爬线的发展提供有利条件。由于东北冷涡诱发的中尺度对流系统有尺度小、生命史短的特点, 常规观测资料往往难以对其很好地进行捕捉, 因此在研究过程中多使用卫星、雷达、数值模拟产品等资料进行分析 (王雪等 2019)。

不同尺度的系统之间往往存在着相互作用, 行星尺度决定了雨带发生的位置和范围, 决定暴雨区的水汽来源; 天气尺度系统影响形成暴雨的中尺度

引用格式: 沈新勇, 张弛, 肖云清, 等. 2020. 一次东北冷涡背景下 MCS 过程多尺度能量相互作用研究[J]. 大气科学学报, 43(3): 447-457.

Shen X Y, Zhang C, Xiao Y Q et al. 2020. Multi-scale energy interaction study in the MCS process under a Northeast Cold Vortex [J].

Trans Atmos Sci, 43(3): 447-457. doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20191109001. (in Chinese).

系统的活动;中尺度系统对积云对流活动有明显增强作用,直接造成暴雨(赵宇等,2018;王雪等,2019)。这些相互作用过程常常伴随着能量的转化,因此可以从能量角度考虑不同尺度的系统之间的相互作用。在多尺度能量相互作用方面,一般是研究两种尺度间的能量相互作用(Lorenz,1955;Iwasaki,2001;Murakami,2011;施春华等,2017),而许多中小尺度天气往往涉及更多尺度系统之间的相互作用。沈新勇等(2018)推导了天气尺度、 $\alpha$ 中尺度和 $\beta$ 中尺度及更小尺度等3个尺度的能量方程,从理论角度研究了不同尺度系统之间的能量相互作用,沙莎等(2018)通过一次梅雨锋暴雨两个例定量研究了暴雨过程中3个不同尺度能量间的转化。本研究利用沈新勇等(2018)的研究成果,对一次东北冷涡下的MCS过程进行研究,分析此次过程中能量的变化、不同尺度系统之间能量的相互作用以及与降水的联系。

## 1 资料和方法

### 1.1 个例选取和资料介绍

选取2015年8月3日00—18时(世界时,下同)发生在山东地区一次东北冷涡背景下的MCS进行研究,此次过程包含有多个不同尺度的天气系统,包括天气尺度的东北冷涡、高空槽和高空急流, $\alpha$ 中尺度的MCS以及 $\beta$ 中尺度的对流单体。为更好地研究此次过程中各个尺度系统之间的能量相互作用,利用WRF模式进行数值模拟,采用模式模拟数据分析多尺度系统的能量相互作用。选用的资料包括NCEP的 $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析资料以及中国自动站与CMORPH融合的逐时降水量 $0.1^\circ$ 网格数据集资料。

### 1.2 WRF模式模拟方案

采用中尺度数值模式WRFV3.6进行数值模拟研究。模拟时间从2015年8月3日00—18时共计18h,使用NCEP $1^\circ \times 1^\circ$ 逐6h再分析资料作为初始场和边界条件。WRF模拟采用乔娜等(2019)的模拟方案,在水平方向上采用三层双向嵌套,模拟的中心经纬度定为 $117.037^\circ \text{E}$ 、 $36.316^\circ \text{N}$ ,三层嵌套网格的格点数分别是 $349 \times 349$ 、 $454 \times 496$ 、 $598 \times 595$ ,水平分辨率分别设为 $18.0 \text{ km}$ 、 $6.0 \text{ km}$ 、 $2.0 \text{ km}$ ,垂直方向总共分为35层。采用的参数化方案主要包括:Thompson aerosol-aware微物理方案,RRTM长波辐射方案,Dudhia短波辐射方案,K-F积云对流方案(第三层不使用),Monin-Obukhov近地面层方案,YSU边界层方案,Noah陆面过程方案等。

### 1.3 滤波

为分离天气尺度、 $\alpha$ 中尺度和 $\beta$ 中小尺度及更小尺度的扰动,采用Barnes滤波的方法对WRF模拟得到的各场变量进行滤波,主要为3个方向的风、气压、密度和位温,得到3个尺度的信息。Barnes滤波是一种典型的中尺度滤波方式,在气象上有广泛的应用(党人庆和万志强,1989;张霞等,2008;周毅等,2009),由其确定的低通滤波初值场,滤波涉及的变量和参数包括:某一气象要素的观测值 $F(x_k, y_k)$ ,其中 $(x_k, y_k)$ 为要素坐标, $k$ 为要素序号,参加滤波的样本数 $M$ ,权重系数 $w_k = \exp(-r_k^2/4c_1)$ ,其中 $c_1$ 为滤波常数, $r_k$ 为 $(x_k, y_k)$ 到 $(x, y)$ 的距离。为得到更好的结果,采用公式(1)对低通滤波得到的初值场做进一步订正得到订正后的要素场:

$$F^1_{(x,y)} = F^0_{(x,y)} + \frac{\sum_{k=1}^M w'_k D(x_k, y_k)}{\sum_{k=1}^M w'_k} \quad (1)$$

其中:修正后的权重函数 $w'_k = \exp(-r_k^2/4Gc_2)$ ;  $G$ 和 $c_2$ 为滤波常数,要素值与初值的差值 $D(x_k, y_k) = F(x_k, y_k) - F^0_{(x_k, y_k)}$ 。

由于滤波分别需要得到天气尺度的东北冷涡、 $\alpha$ 中尺度的MCS和 $\beta$ 中尺度及更小尺度的对流单体,因此需要模式资料的网格区域包含三个尺度的系统,而天气尺度的东北冷涡范围较大,模拟的内层区域不能很好地将冷涡活动包含进去,因此采用最外层网格资料进行滤波并进一步做能量分析。

根据3种尺度的划分:大于 $2000 \text{ km}$ 的天气尺度系统, $200 \sim 2000 \text{ km}$ 范围的 $\alpha$ 中尺度系统,小于 $200 \text{ km}$ 的 $\beta$ 中尺度以及更小尺度系统(为了后面论述问题的方便,这里暂且合并称为“ $\beta$ 中小尺度系统”),采用上述Barnes滤波方法对WRF模式输出的各场变量进行滤波,具体滤波方案如下:通过设定 $c_1 = 150000 \text{ km}^2$ 和 $c_2 = 150000 \text{ km}^2$ , $G = 0.3$ 得到 $2000 \text{ km}$ 以上的天气尺度背景场和 $2000 \text{ km}$ 以下的波动;通过设定 $c_1 = 3000 \text{ km}^2$ 和 $c_2 = 3000 \text{ km}^2$ , $G = 0.3$ 得到 $200 \text{ km}$ 以上的波动和 $200 \text{ km}$ 以下的 $\beta$ 中小尺度波动;通过 $2000 \text{ km}$ 以下的波动减去 $200 \text{ km}$ 以下的波动得到 $200 \sim 2000 \text{ km}$ 范围的 $\alpha$ 中尺度波动。

### 1.4 能量方程

采用沈新勇等(2018)推导得到的六个能量方程进行诊断分析。主要研究各个尺度系统之间的能量转换,因此主要对方程中动能和位能的变化项、动

能向位能的转化项以及动能之间的跨尺度转换项和位能之间的跨尺度转换项进行分析。后文涉及的能量方程变量在此进行说明:  $K$ 、 $\bar{K}$ 、 $\bar{K}$  分别表示  $\beta$  中小尺度、 $\alpha$  中尺度和天气尺度动能;  $A$ 、 $\bar{A}$ 、 $\bar{A}$  分别表示  $\beta$  中小尺度、 $\alpha$  中尺度和天气尺度位能;  $B$  为动能与位能间的转化项;  $T_p$  为位能方程中位能之间的跨尺度转换项; 下标  $L$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$  分别表示天气尺度、 $\alpha$  中尺度和  $\beta$  中小尺度, 例如  $T_{k(\beta, L)}$  表示天气尺度动能向  $\beta$  中小尺度动能的转换, 方程各项的表达式见沈新勇等(2018)。

## 2 分析与结果

### 2.1 天气过程分析与数值模拟结果

2015年8月3日上午至夜间,山东地区发生了一次大暴雨伴雷暴天气过程。此次过程主要由东北冷涡背景下的 MCS 系统引发,从天气形势上看(图1)2015年8月3日06时,500 hPa 上东北冷涡位于黑龙江以西,冷涡中心在  $120^\circ\text{E}$ 、 $53^\circ\text{N}$  附近,对应的200 hPa 高空急流位于东北冷涡中心位置以南,中心最大风速达  $50\text{ m/s}$  以上,对流所在的雷达回波位于  $115^\circ\text{E}$ 、 $38^\circ\text{N}$  附近,对应500 hPa 槽前,同时也位于高空急流入口区右侧。东北冷涡缓慢东移减弱,对流带也逐渐向东北方向发展移动,且始终对应500 hPa 槽前和200 hPa 高空急流入口区右侧。考察整个过程 MCS 的形成发展,从模拟结果和实况分布来看,04 时左右对流单体开始发展;06—09 时出现强的对流单体,并逐渐向 MCS 过渡;10 时左右

对流单体在山东西北部组织成一条东北-西南向的带状 MCS,最强位置雷达回波强度大于  $40\text{ dBz}$ ;11—14 时对流发展旺盛, MCS 增强, MCS 中的  $\beta$  中尺度强对流带增多,形态改变明显,由原来的东北-西南向逐渐朝南北走向变化;14 时以后 MCS 开始减弱。

利用模式第三层资料分析此次模拟情况,从3日00时—18时6 h 累计降水量分布来看(图2a—c),降水区域呈东北-西南向带状分布,与 MCS 的雷达回波位置对应,主要降水中心分别位于山东西北部和渤海两处,最强降水量大于  $50\text{ mm}$ ,降水强度大,局地性强,具有明显的中尺度特征。对比数值模拟和实况的6 h 降水分布(图2),可以发现模拟的降水结果在位置强度上与实况有较好的对应,模拟出了雨带的东北-西南走向,但降水大值中心位置略有偏差,总的来说较好的模拟出了此次 MCS 过程的降水情况分布,因此采用此次模拟结果对3个尺度系统的能量变化进行分析。

### 2.2 3 个尺度系统动能与位能变化

排除地形引起的缺测,对对流层  $2\sim 12\text{ km}$  高度3个尺度动能和位能的变率进行分析。为考察3个尺度系统总体运动区域( $100^\circ\sim 140^\circ\text{E}$ 、 $25^\circ\sim 60^\circ\text{N}$ )各高度动能在 MCS 各个发展阶段的变化,做区域平均动能随时间高度变化的分布。可以看到,对于天气尺度系统各层平均动能变化(图3a),高层和低层的变化趋势总体上是相反的。04—12 时,对应对流单体发展到 MCS 形成加强阶段,中低层  $3\sim 9\text{ km}$

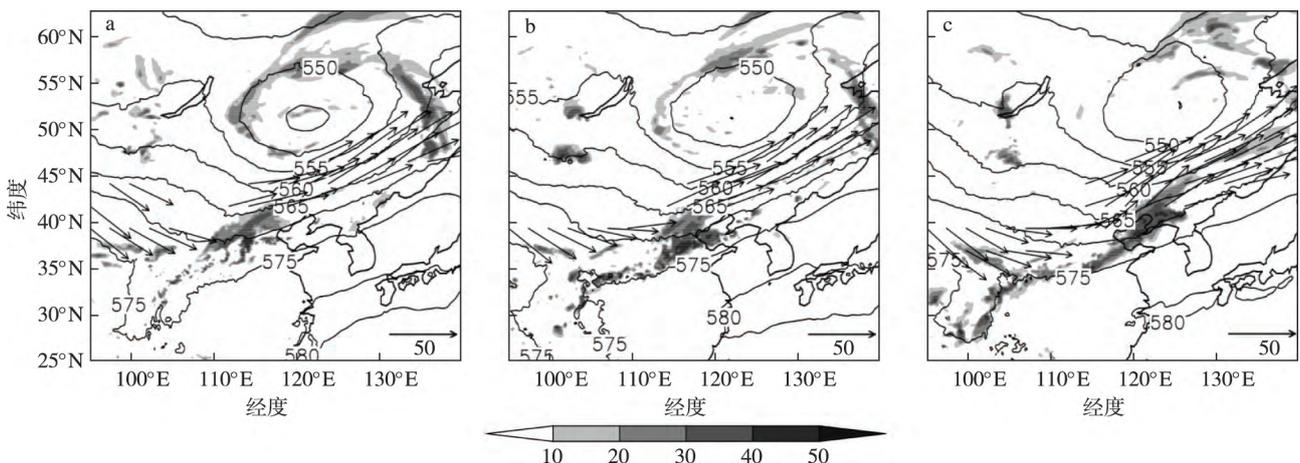


图1 2015年8月3日天气形势分析(阴影为雷达回波,单位:  $\text{dBz}$ ; 等值线为500 hPa 高度等压线,单位:  $\text{dagpm}$ ; 箭矢为200 hPa 高度风速大于  $30\text{ m/s}$  的风场,代表急流所在区域,单位:  $\text{m/s}$ ): (a) 06 时; (b) 10 时; (c) 15 时

Fig.1 The weather situation on August 3, 2015 (the shaded part in the figure is the radar echo, unit:  $\text{dBz}$ ; the contoured line is the 500 hPa altitude isobaric line, unit:  $\text{dagpm}$ ; and the arrow is the 200 hPa altitude wind field with wind speed greater than  $30\text{ m/s}$ , representing the region where the jet stream occurs, unit:  $\text{m/s}$ ): (a) 0600 UTC; (b) 1000 UTC; (c) 1500 UTC

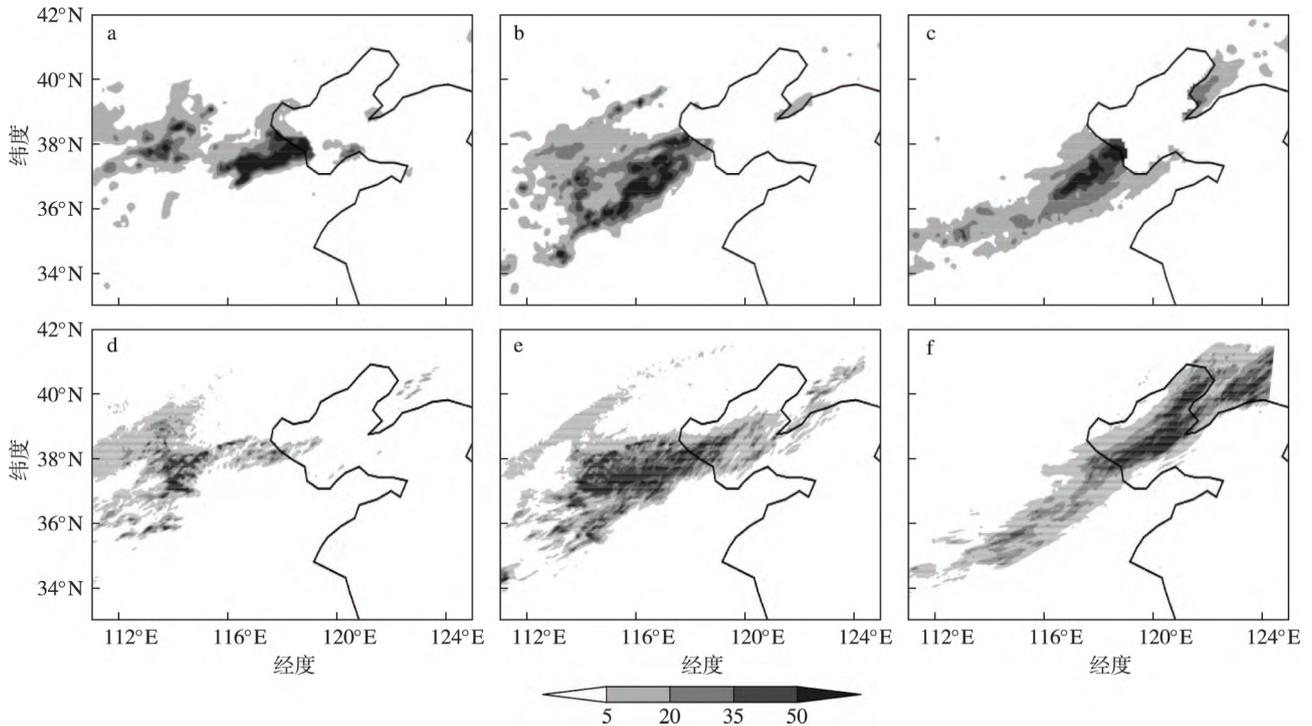


图2 实况(a、b、c)和模拟(d、e、f)的6 h累计降水(单位: mm)分布:(a、d) 00—06时;(b、e) 06—12时;(c、f) 12—18时  
 Fig.2 (a b c) observation and (d e f) simulation results of distribution of accumulated precipitation (unit: mm) in periods of 6 hours: (a d) 0000—0600 UTC; (b e) 0600—1200 UTC (c f) 1200—1800 UTC

高度上总体表现为天气尺度动能的减少,对应东北冷涡的减弱,部分天气尺度动能向其他两个尺度动能转化,使得对流单体逐渐增多并发展加强;而高层9 km以上则有天气尺度动能的增加,主要对应高空急流系统动能的增加,急流强度增强,在入口区右侧形成更强的高层辐散,对应次级环流的上升运动增强,促进了对流单体的发展和MCS的形成。14时以后,MCS开始减弱,对应中低层2~7 km高度上天气尺度系统平均动能增加;而高层8~11 km高度平均动能减少,对应高空急流减弱,高空急流次级环流减弱,对对流系统的促进作用变小。对于 $\alpha$ 中尺度系统动能(图3b),在降水的整个阶段,低层主要对应平均动能的增加,但增加相对较小,而高层在06—10时也有动能的增加,对应MCS的形成发展;在MCS减弱阶段,高层8~11 km高度 $\alpha$ 中尺度系统平均动能减小。对于 $\beta$ 中小尺度系统(图3c),在整个降水过程中主要表现为动能的增加,对应对流单体和 $\beta$ 中尺度对流带的发展。在MCS形成(06—09时)和增强(11—14时)阶段,高层7 km高度以上出现动能增加的大值中心,对流单体在垂直方向上发展旺盛,不断有新的对流单体快速发展增强。

对于天气尺度位能的变化(图3d),在对流单体

发展到MCS形成阶段,有明显的位能的减少,特别在低层和高层对应有位能减少的大值区,天气尺度位能向动能转化。而在MCS达到最强盛的时刻,天气尺度位能不再减少,此后天气尺度平均位能又逐渐增加,向动能的转化减少。 $\alpha$ 中尺度位能和 $\beta$ 中小尺度系统平均位能的变化较为相似,且相对较少(图3e、f),向动能的转化也较少,在对流单体发展初期有平均位能的减少,此后主要对应位能的增加。

### 2.3 动能变化对降水的影响

从上面的分析可以看到动能变化与MCS发展的各个阶段有一定的对应关系,因此考察3个尺度系统动能变化与降水区域之间的关系。考虑动能变化在垂直方向上的不同,因此参考图3选取能量变化中心所在的几个高度进行分析,即选取2~4 km、6~8 km以及10~12 km三个高度作为低层、中层和高层,分析各尺度系统在不同高度动能变化与雨带分布的关系。结果发现天气尺度的中层, $\alpha$ 中尺度的低层以及 $\beta$ 中小尺度的动能变化与雨带的分布有较好的对应关系,其对应分布如图4所示,其中 $\beta$ 中小尺度动能的变化在各个高度与雨带都有很好的对应,这里只给出 $\beta$ 中小尺度低层与雨带的对应关系。

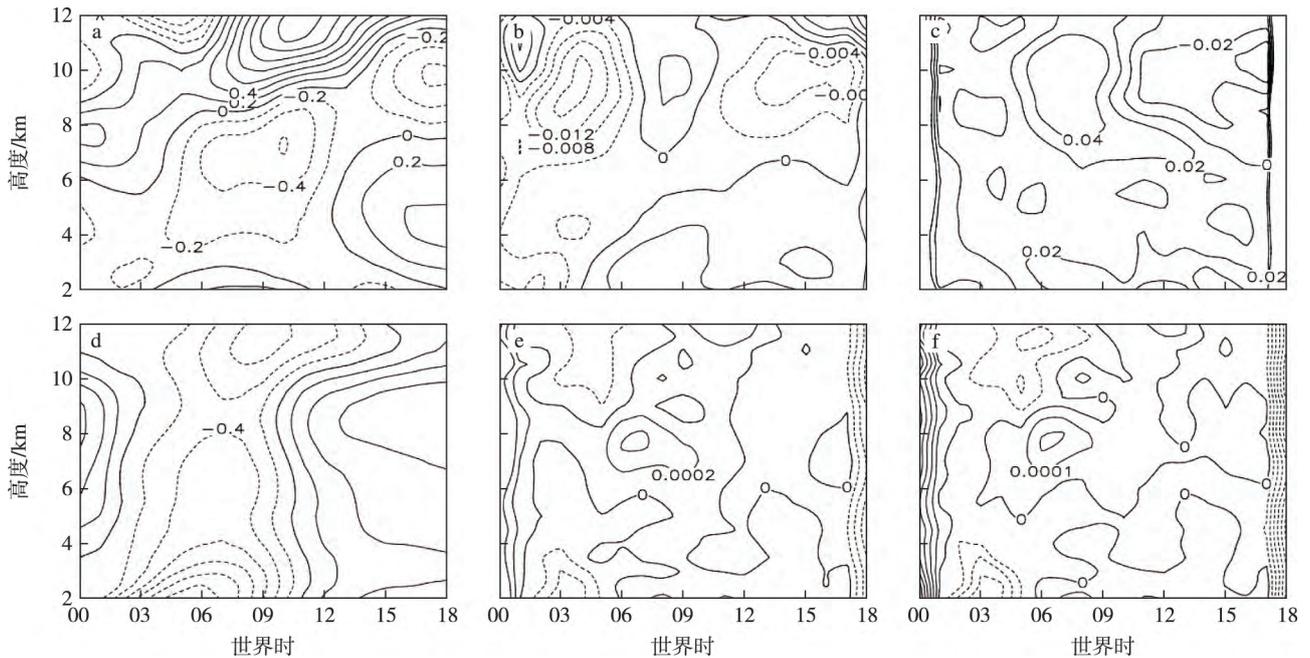


图3 2015年8月3日00—08时区域平均的动能和位能随时间高度变化(等值线表示能量的变率,单位:  $10^{-3} \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 实线为正值,虚线为负值): (a) 天气尺度动能; (b)  $\alpha$  中尺度动能; (c)  $\beta$  中小尺度动能; (d) 天气尺度位能; (e)  $\alpha$  中尺度位能; (f)  $\beta$  中小尺度位能

Fig.3 The average kinetic energy and potential energy in the region change with the height and time (the abscissa is time during 0300 UTC—1800 UTC on August 3, 2015; the ordinate is height, unit: km; the isoline represents the variation of energy, unit:  $10^{-3} \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ; the solid line is positive, and the dotted line is negative): (a) large-scale kinetic energy, (b)  $\alpha$  mesoscale kinetic energy, (c)  $\beta$  mesoscale kinetic energy, (d) large-scale potential energy, (e)  $\alpha$  mesoscale potential energy, and (f)  $\beta$  mesoscale potential energy

对于天气尺度系统动能的变化(图4a、d、g), 可以发现在MCS发展以及消亡阶段, 降水区域与天气尺度系统中层动能增加的区域有较好的对应, 从天气系统上看, 其变化对应于天气尺度系统对流层中层槽线的变化, MCS在整个过程中位于槽前, 由于槽向前移动, 在槽前会表现出动能增加的趋势, 因此降水区域恰好对应于中层动能增加的区域。对于 $\alpha$ 中尺度系统(图4b、e、h), 可以发现雨带往往处于动能增加和减少区域的分界线上, 即位于动能减少区域的前侧和动能增加区域的后侧, 从天气系统上看, 正好对应于MCS, 即在MCS运动方向的前侧对应动能的增加, 而在MCS运动方向的后侧对应动能的减少, 降水主要发生在MCS上, 即位于动能增加和减少的分界线上。最后考察 $\beta$ 中小尺度系统动能的变化(图4c、f、i), 可以发现 $\beta$ 中小尺度系统动能与雨带分布对应的最好, 且动能增加的大值中心往往对应于降水的大值区, 从天气系统上来看,  $\beta$ 中小尺度系统对应于 $\beta$ 中尺度对流带以及对流单体, 降水由对流单体直接造成, 动能变化的正值中心对应对流单体强烈发展, 形成有大的降水中心,

而对流单体发展旺盛, 可以从对流层低层发展到高层, 因此在各个高度上 $\beta$ 中小尺度系统动能的变化较为一致, 与雨带分布都有较好的对应关系。

#### 2.4 3个尺度之间动能与位能的转化

研究3个尺度系统之间动能和位能的转换关系。根据公式可以得到动能和位能之间存在转化关系, 由气团受到的浮力在垂直气流中做功来转化, 其主要受气团温度和垂直速度的影响, 例如对于一团暖空气, 当其在上升气流运动中时, 随着气团上升周围温度降低, 此时气团受到的浮力做正功, 气团运动加速, 有位能转化为气团的动能; 而在下沉气流中, 如果暖气团温度仍然高于周围空气, 气团受到的浮力做负功, 气团运动减速, 有动能向位能转化。对于3个尺度动能和位能之间的相互转化, 考察天气尺度系统气团、 $\alpha$ 中尺度系统气团以及 $\beta$ 中小尺度系统气团受到的浮力在天气尺度背景场垂直气流中的做功项, 从区域平均的时间高度分布(图5a—c)中可以看到在整个MCS过程中, 主要有天气尺度位能向天气尺度、 $\alpha$ 中尺度以及 $\beta$ 中小尺度系统的动能进行转化。

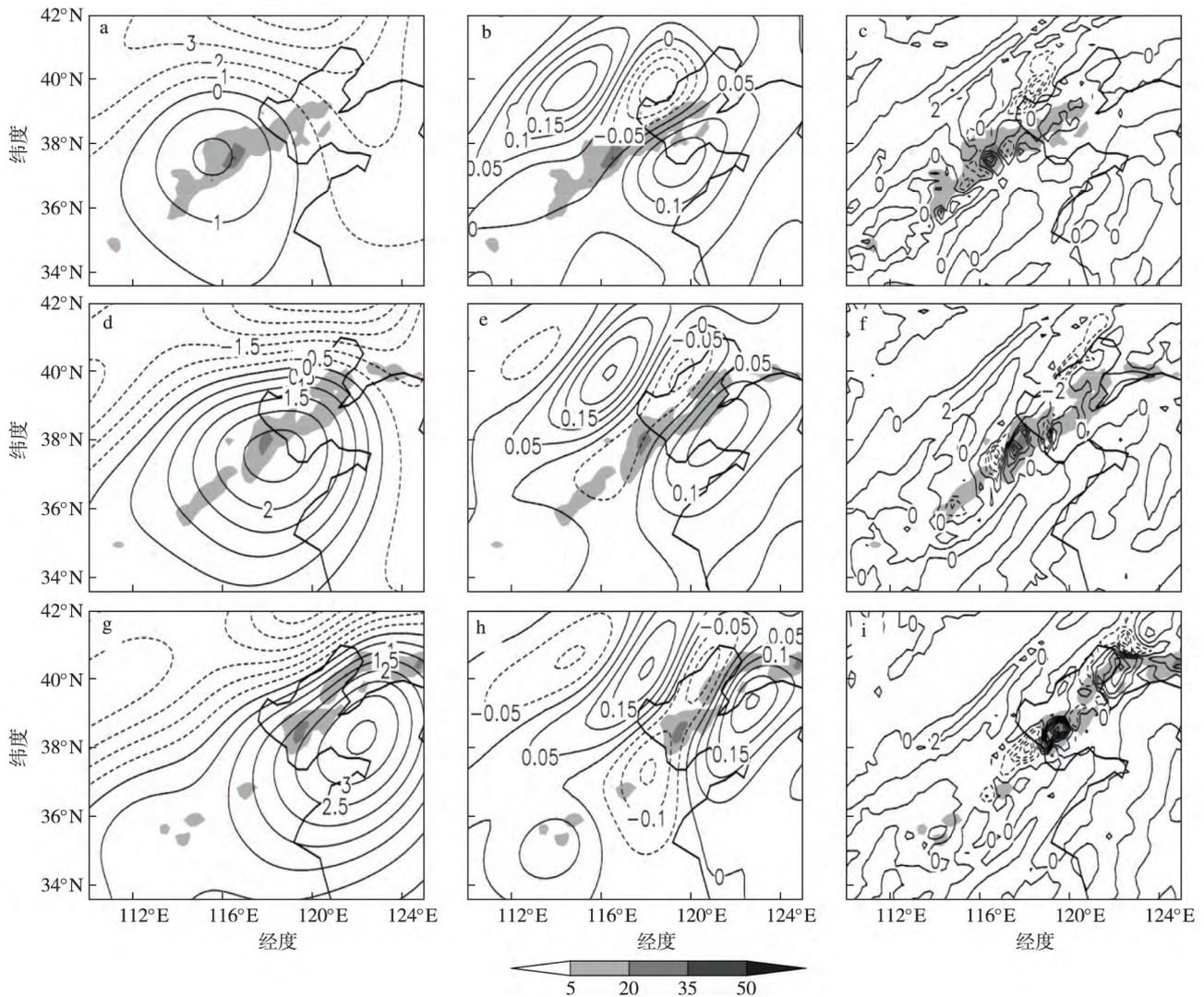


图4 3日11时(a、b、c)、13时(d、e、f)、15时(g、h、i)动能变率与降水的对应关系(等值线表示动能变率,单位:  $10^{-3} \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  实线表示正值 虚线表示负值;阴影表示小时降水量,单位: mm): (a、d、g) 6~8 km 高度天气尺度平均动能; (b、e、h) 2~4 km 高度  $\alpha$  中尺度平均动能; (c、f、i) 2~4 km 高度  $\beta$  中小尺度平均动能

Fig.4 (a b c) 1100 UTC (d e f) 1300 UTC (g h i) 1500 UTC corresponding relationship between kinetic energy variability and precipitation (the isolines in the figure are kinetic energy variation unit:  $10^{-3} \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  the solid line is positive, and the dotted line is negative; the shaded parts are the hourly precipitation unit: mm): (a d g) the large-scale average kinetic energy at the height of 6—8 km; (b e h) the  $\alpha$  mesoscale average kinetic energy at the height of 2—4 km; and (c f i) the  $\beta$  mesoscale average kinetic energy at the height of 2—4 km

对于天气尺度系统动能和位能之间的转化(图5a)在对流单体发展时期有大量的位能向动能转化,特别在高层9 km 高度存在转化大值中心。对于天气尺度位能向  $\alpha$  中尺度以及  $\beta$  中小尺度系统动能的转化而言(图5b、c),在09时出现转化的大值中心,对应对流单体组织成 MCS 之前。而在对流单体发展初期(00—06时)和 MCS 减弱阶段(14—18时),高层10 km 以上高度能量的转化方向相反,主要有动能向位能进行转化。在整个暴雨过程中,天气尺度位能向天气尺度系统的动能转化最多,天

气尺度位能向  $\beta$  中小尺度系统动能的转换最少。

考察  $\alpha$  中尺度系统垂直气流中的浮力做功项(图5d—f),可以得到在整个暴雨过程中能量主要转化方向也是由位能向动能转化,且在转化强度上,在  $\alpha$  中尺度系统中的转化略小于对应的天气尺度背景场中的转化,即  $B_{(\alpha L)} < B_{(L L)}$ ,  $B_{(\alpha \alpha)} < B_{(L \alpha)}$ ,  $B_{(\alpha \beta)} < B_{(L \beta)}$ 。就分布来看,  $\alpha$  中尺度位能向天气尺度系统的动能转化在09—10时存在有大值中心,主要位于6~10 km 高度上,对应 MCS 的形成阶段。而  $\alpha$  中尺度位能向  $\alpha$  中尺度系统的动能转化比向  $\beta$

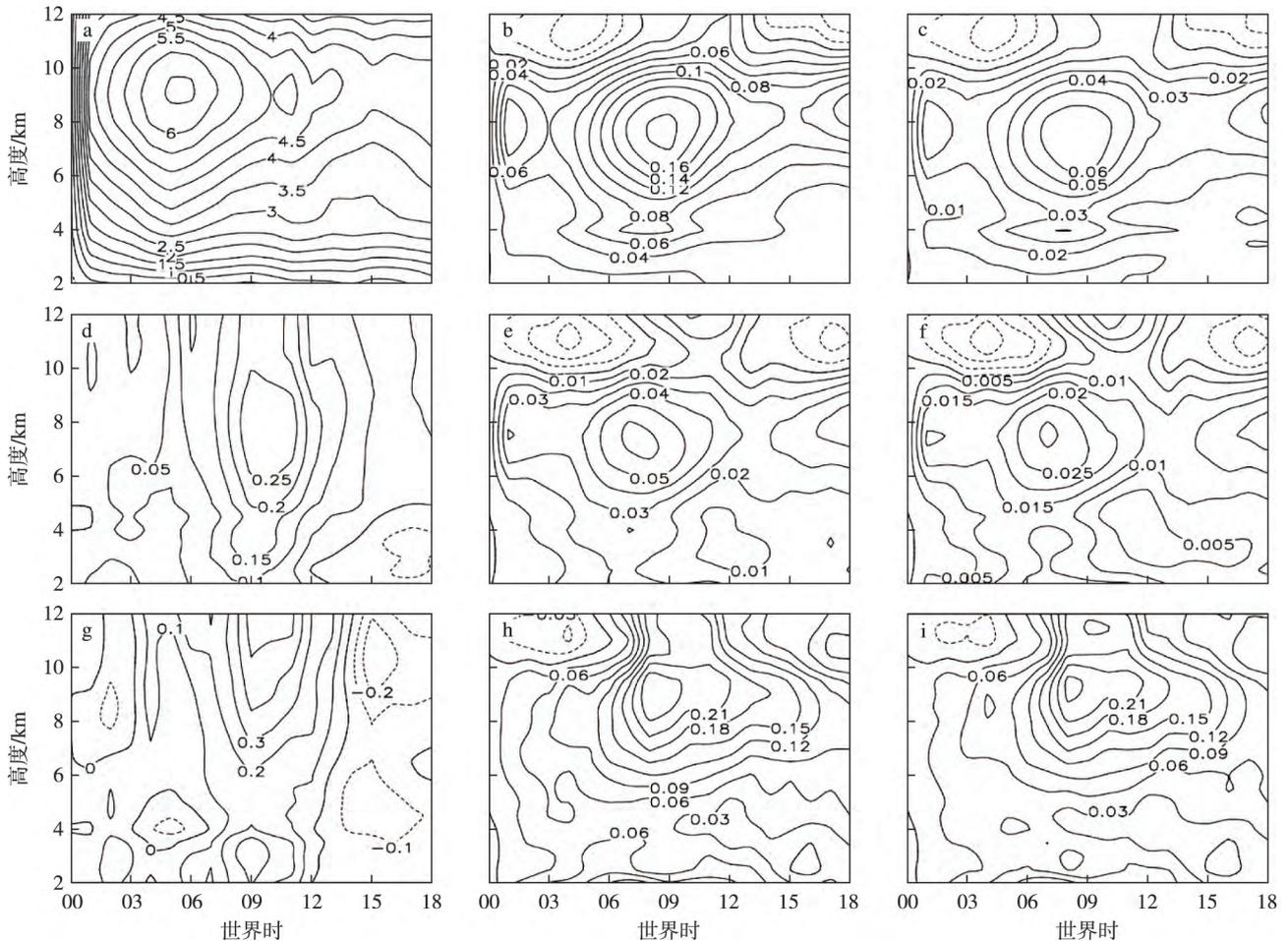


图5 2015年8月3日00—18时区域平均的3个尺度之间动能和位能转化随时间高度变化(等值线表示能量的变率,单位:  $10^{-3} \text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 实线为正值; 虚线为负值)

Fig.5 The transformation of kinetic energy and potential energy among the three scales of regional average varies with height and time(the isoline represents the variation of energy ,unit:  $10^{-3} \text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ; the solid line is positive ,and the dotted line is negative)

中小尺度系统的动能转化略大,两者分布较为相似,在09时7.5 km高度上出现位能向动能转化的大值中心,对应对流单体组织成MCS之前;而在00—06时以及12—18时,在高层10~12 km高度上存在有动能向位能转化的区域。

对于 $\beta$ 中小尺度系统垂直气流中的浮力做功项(图5g—i),在00—03时主要是天气尺度动能向 $\beta$ 中小尺度位能的转化(图5g),大值中心8 km左右的高度上,对应对流单体发展前;在03—06时,天气尺度动能向 $\beta$ 中小尺度位能的转化中心出现在4 km高度,其余位置主要为 $\beta$ 中小尺度位能向动能的转化,对应对流单体发展的初始阶段;而在06时到12时,主要表现为 $\beta$ 中小尺度位能向天气尺度动能转化,且在低层3 km高度和发高层10 km以上出现大值中心,对应MCS组织和发发展阶段;而在14—18时,转变为天气尺度动能向 $\beta$ 中小尺度位能的转

化,大值中心出现在9~12 km高度上,对应MCS减弱阶段。 $\beta$ 中小尺度位能向 $\alpha$ 中尺度系统和 $\beta$ 中小尺度系统动能转化的分布和强度较为相似(图5h,i),在06—09时7~10 km高度存在转化的大值中心,大量对应对流单体向MCS过渡阶段。而在00—05时,10~12 km高度上存在 $\alpha$ 中尺度系统和 $\beta$ 中小尺度系统动能向 $\beta$ 中小尺度位能转化的区域,这点与在 $\alpha$ 中尺度系统中的转化相似。

总的来看,在MCS过程中主要表现为各个尺度位能向动能的转化,是各个尺度系统动能的主要来源,不同系统间的转化强度不同,在MCS形成发展阶段,存在各尺度位能向 $\alpha$ 中尺度和 $\beta$ 中小尺度动能转化的大值中心,为MCS的组织发展提供充足的能量。

考察各个尺度之间位能的相互转换,其中 $\alpha$ 中尺度系统和 $\beta$ 中小尺度系统向天气尺度背景场的

位能转换(图 6a,b) 在整个 MCS 过程中,两者的分布较为相似,且强度也较大。低层总体为正值,表明在低层有  $\alpha$  中尺度系统位能和  $\beta$  中小尺度系统位能向天气尺度系统位能的转换,且随着时间的推移,正值的高度范围逐渐增加;此外在 00—07 时 11~12 km 高度上也存在有正值区域。在中高层主要为负值区域,有天气尺度系统的位能向  $\alpha$  中尺度系统位能和  $\beta$  中小尺度系统位能的转换。对于天气尺度系统向  $\alpha$  中尺度系统的位能转换(图 6c) 在整个暴雨过程中,10 km 以下主要有  $\alpha$  中尺度位能向天气尺度位能转换,而 10 km 以上的高度则相反,主要表现为天气尺度位能向  $\alpha$  中尺度位能转换。 $\beta$  中小尺度位能向  $\alpha$  中尺度系统的位能转换(图 6d) 则不同,整个暴雨过程中 10 km 以下的高度上主要有  $\beta$  中小尺度位能向  $\alpha$  中尺度位能转换,而 10 km 以上的高度则主要是  $\alpha$  中尺度位能向  $\beta$  中小尺度位能转换。对于天气尺度系统向  $\beta$  中小尺度系统的位能转换(图 6e),同样大约以 10 km 高度为分界线,10 km 以下主要是以  $\beta$  中小尺度系统的位能向天气尺度系统的位能转换,而在 10 km 以上主要是天气尺度系统的位能向  $\beta$  中小尺度系统的位能转换。对于  $\alpha$  中尺度系统位能向  $\beta$  中小尺度系统的位能转换(图 6f),总体上在整个暴雨过程中表现为  $\beta$  中

小尺度系统的位能向  $\alpha$  中尺度系统位能转换,但在中层 7~8.5 km 高度以及低层 4 km 以下,存在一些时刻表现为  $\alpha$  中尺度系统位能向  $\beta$  中小尺度系统位能转换。

考察各个尺度系统之间动能的转换,计算  $\alpha$  中尺度系统动能向天气尺度系统的动能转换项(图 7a),总的来看,在整个暴雨过程中,主要体现为  $\alpha$  中尺度系统动能向天气尺度系统动能的转换。在 00—05 时 4~9 km 高度上有天气尺度系统动能向  $\alpha$  中尺度系统动能转换;而在 08—18 时,7~11 km 的高层有一系列的  $\alpha$  中尺度系统动能向天气尺度系统动能的转换大值区,对应 MCS 系统的组织、发展和减弱阶段;在低层,天气尺度系统和  $\alpha$  中尺度系统之间的动能转换相对较弱。对于  $\beta$  中小尺度系统和天气尺度系统间动能转换(图 7b),主要有  $\beta$  中小尺度系统动能向天气尺度系统动能的转换,考察几个转换大值中心,在 00—09 时,中层 6~9 km 高度上存在有正的转换大值中心,对应对流单体发展阶段;在 09—18 时,高层 9~12 km 高度上也存在有正的转换大值中心,对应对流单体组织成的 MCS 发展和减弱阶段。

对于天气尺度系统动能向  $\alpha$  中尺度系统动能的转换(图 7c),在整个过程中,主要存在  $\alpha$  中尺度

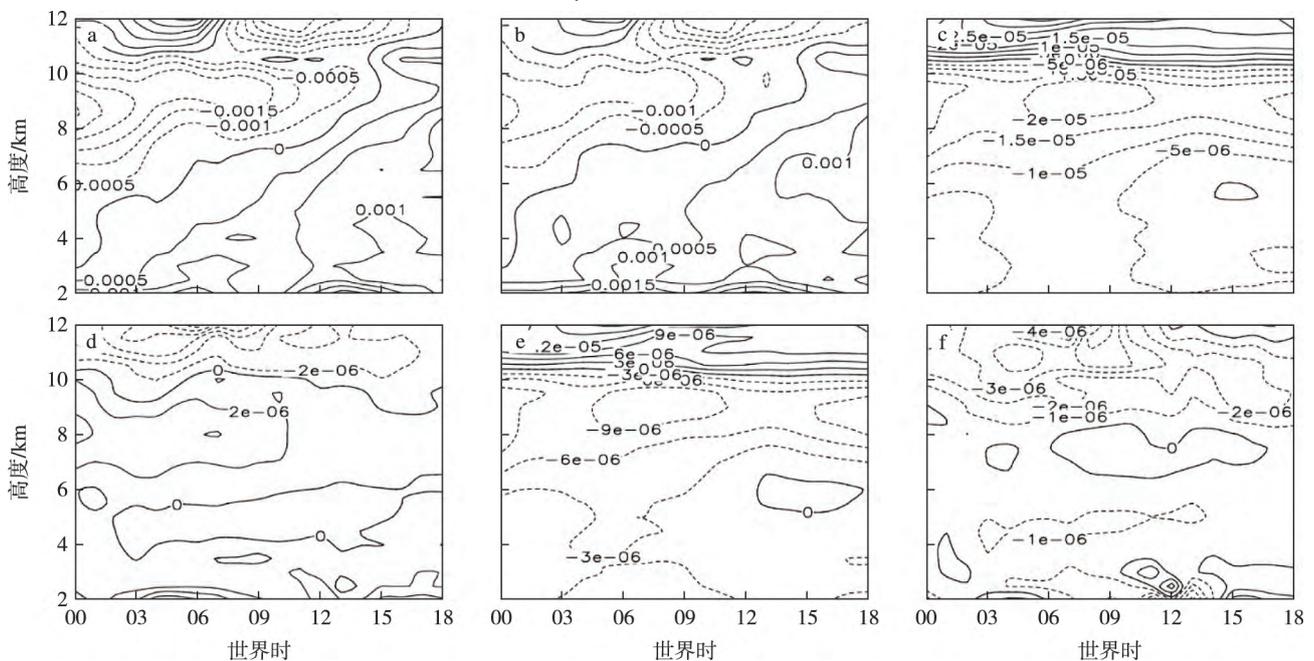


图 6 2015 年 8 月 3 日 00—18 时区域平均的 3 个尺度之间位能转换随时间高度变化(等值线表示能量的变率,单位:  $10^{-3} \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 实线为正值; 虚线为负值)

Fig.6 The transformation of potential energy among the three scales of regional average varies with the height and time(the iso-line represents the variation of energy unit:  $10^{-3} \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ; the solid line is positive and the dotted line is negative)

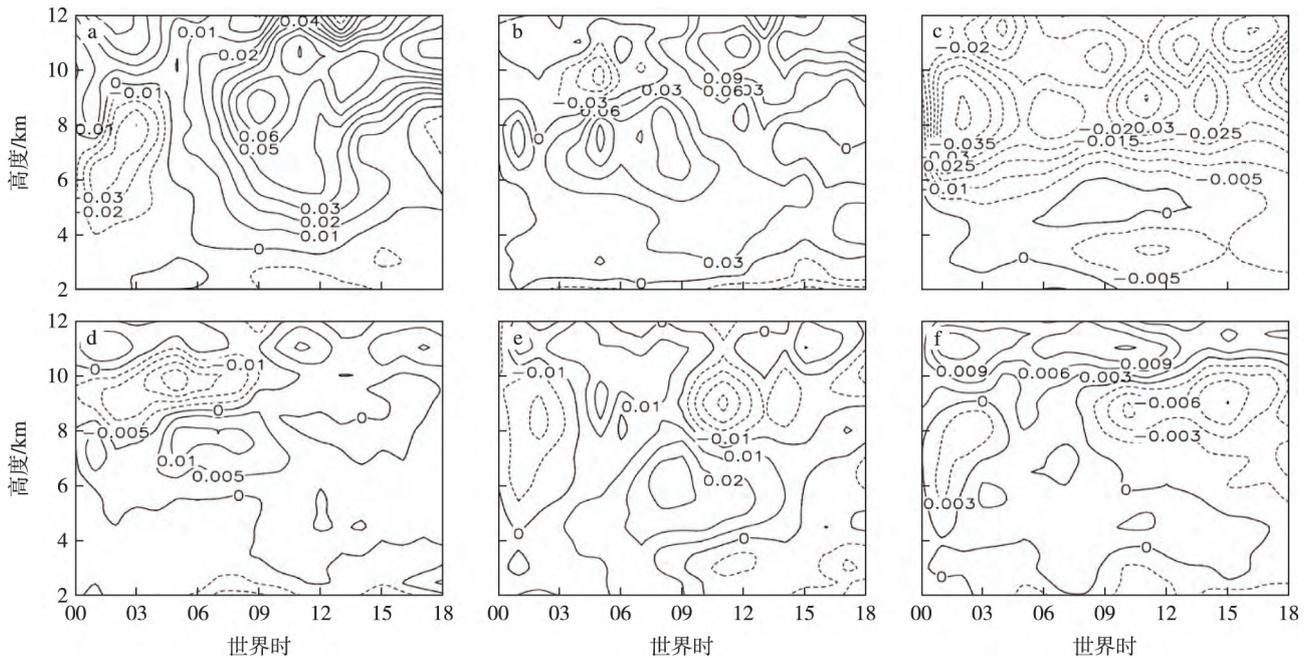


图7 2015年8月3日00—18时区域平均的3个尺度之间动能的转换随时间高度变化(等值线表示能量的变率,单位:  $10^{-3} \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 实线为正值; 虚线为负值)

Fig.7 The transformation of kinetic energy among three scales of regional average varies with height and time( the isoline represents the variation of energy unit:  $10^{-3} \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ; the solid line is positive and the dotted line is negative)

系统动能向天气尺度系统动能的转换,并且转换中心主要在6 km以上的高度上。在低层4.5 km左右的高度上06—14时存在天气尺度系统动能向 $\alpha$ 中尺度系统动能转换的区域,表明天气尺度系统对 $\alpha$ 中尺度系统的加强作用。对于 $\beta$ 中小尺度系统动能向 $\alpha$ 中尺度系统动能的转换(图7d),在MCS形成前的00—09时高层8~11 km存在负值中心,表现为 $\alpha$ 中尺度系统动能向 $\beta$ 中小尺度系统动能进行转换,而在中层6~8 km高度主要是 $\beta$ 中小尺度系统动能向 $\alpha$ 中尺度系统动能转换,特别在MCS形成前的04—09时存在转换的大值中心,表明 $\beta$ 中小尺度系统的发展对 $\alpha$ 中尺度系统发展的促进作用。

考察天气尺度系统动能向 $\beta$ 中小尺度系统动能的转换(图7e),初始时刻00—03时主要是 $\beta$ 中小尺度系统动能向天气尺度系统动能转换;当对流单体开始发展时(03—06时)转变为天气尺度系统动能向 $\beta$ 中小尺度系统动能转换,大值中心出现在9 km左右高度上;到了对流单体逐渐组织成MCS的过程(06—10时)天气尺度动能向 $\beta$ 中小尺度动能的转换中心转移到6 km高度附近;在MCS形成发展阶段和减弱阶段(09—18时),高层8~11 km和低层2~4 km主要表现为 $\beta$ 中小尺度动能向天气尺度动能转换,而中层4~8 km则以天气尺度动能

向 $\beta$ 中小尺度动能转换为主。对于 $\alpha$ 中尺度系统向 $\beta$ 中小尺度系统的动能转换(图7f),高层主要以 $\alpha$ 中尺度系统向 $\beta$ 中小尺度系统的动能转换为主,且在MCS过程中,中低层也主要存在 $\alpha$ 中尺度系统动能向 $\beta$ 中小尺度动能的转换。在MCS发展到消亡阶段(10—18时),高层8~10 km高度有 $\beta$ 中小尺度系统的动能向 $\alpha$ 中尺度系统动能转换。

总的来看,在对流单体组织成MCS的过程中,天气尺度系统对 $\beta$ 中小尺度系统有动能的输送,促进了 $\beta$ 中小尺度系统的发展(图6e),而 $\beta$ 中小尺度系统在中层对 $\alpha$ 中尺度系统有动能的输送,促进 $\alpha$ 中尺度系统的发展(图6d),在MCS发展增强阶段直至减弱阶段,天气尺度系统和 $\alpha$ 中尺度系统在7~11 km高度上对 $\beta$ 中小尺度系统有抑制作用(图6e、f),使得 $\beta$ 中小尺度系统发展减弱, $\beta$ 中小尺度系统对 $\alpha$ 中尺度系统则有一定的促进作用,但强度较弱(图6d)。此外,整个过程中, $\alpha$ 中尺度系统和 $\beta$ 中小尺度系统对天气尺度系统都有动能的输送(图6a、b),对天气尺度系统的发展有一定的促进作用。

### 3 结论

从能量角度对2015年8月3日一次东北冷涡背景下的MCS进行了分析。利用Barnse滤波将天

气尺度、 $\alpha$  中尺度和  $\beta$  中小尺度 3 个尺度系统分离出来, 并利用 3 个尺度的动能和位能方程研究了 MCS 过程中区域平均的动能和位能的变化, 3 个尺度系统能量的相互转化, 动能与降水的联系。

1) 在 MCS 过程中, 各个尺度系统之间都存在有位能向动能的大量转化, 为各个系统的发展提供能量, 也是各尺度系统动能的主要来源, 且不同系统间的转化强度不同。

2) 在对流单体发展到 MCS 成形之前的阶段, 中低层天气尺度动能减少, 东北冷涡减弱, 有较强的天气尺度动能向  $\beta$  中小尺度动能转换, 促进对流单体的发展; 高层天气尺度动能增强, 对应高空急流增强, 急流入口区右侧的上升气流促进对流系统的发展; 此外  $\beta$  中小尺度系统在中层对  $\alpha$  中尺度系统有动能的输送, 促进  $\alpha$  中尺度系统的发展和 MCS 的形成。

3) 在 MCS 成形并发展加强阶段, 天气尺度位能向  $\alpha$  中尺度和  $\beta$  中小尺度动能的转化达到最大, 而其余尺度位能向动能的转化减少,  $\alpha$  中尺度和  $\beta$

中小尺度位能的变化减少, 天气尺度位能开始增长。此时  $\alpha$  中尺度和  $\beta$  中小尺度动能在高层也出现正的大值中心, 对流发展旺盛。

4) 在 MCS 减弱阶段, 中低层有天气尺度动能增加, 高层动能减少, 对应高空急流减弱, 高空急流次级环流减弱, 其对对流系统的促进作用变小。高层  $\alpha$  中尺度系统动能减少, 对应 MCS 减弱; 天气尺度系统和  $\alpha$  中尺度系统在中高层对  $\beta$  中小尺度系统有一定的抑制作用, 使得  $\beta$  中小尺度系统发展减弱。

5) 考察 3 个尺度动能变化与降水分布的关系, 在 MCS 发展和消亡阶段, 天气尺度的中层、 $\alpha$  中尺度的低层以及  $\beta$  中小尺度的动能变化与降水分布有较好的对应关系, 分别对应天气尺度 500 hPa 的槽线、 $\alpha$  中尺度的 MCS 以及  $\beta$  中小尺度的  $\beta$  中尺度对流带和对流单体。其中  $\beta$  中小尺度系统对应的系统是降水的直接成因, 动能变化的正值中心对应大的降水中心。

## 参考文献(References)

- 党人庆, 万志强, 1989. 一种带通滤波方法及其初步应用[J]. 应用气象学报, 4(1): 29-34. Dang R Q, Wan Z Q, 1989. A bandpass filtering method and its preliminary application[J]. Quart J Appl Meteor, 4(1): 29-34. (in Chinese).
- Iwasaki T, 2001. Atmospheric energy cycle viewed from wave-mean-flow interaction and Lagrangian mean circulation[J]. J Atmos Sci, 58(20): 3036-3052.
- 纪晓玲, 冯建民, 穆建华, 等, 2010. 宁夏北部一次短时暴雨中尺度对流系统的特征分析[J]. 大气科学学报, 33(6): 711-718. Ji X L, Feng J M, Mu J H et al. 2010. Analysis on characteristics of mesoscale convective system during a short-term rainstorm process in North of Ningxia[J]. Trans Atmos Sci, 33(6): 711-718. (in Chinese).
- Lorenz E N, 1955. Available potential energy and the maintenance of the general circulation[J]. Tellus, 7(2): 157-167.
- Murakami S, 2011. Atmospheric local energetics and energy interactions between mean and eddy fields. Part I: theory[J]. J Atmos Sci, 68(4): 760-768.
- Orlanski I, 1975. A rational subdivision of scales for atmospheric processes[J]. Bull Amer Meteor Soc, 56(5): 527-530.
- 乔娜, 丁治英, 刘靓珂, 等, 2019. 两种尺度低涡背景下  $\beta$  中尺度强对流带的演变及成因分析[J]. 自然灾害学报, 28(1): 84-95. Qiao N, Ding Z Y, Liu L K et al. 2019. The evolution and reason analysis of the  $\beta$ -mesoscale severe convection in two scales of vortexes[J]. J Nat Disasters, 28(1): 84-95. (in Chinese).
- 沙莎, 沈新勇, 李小凡, 2018. 一次梅雨锋暴雨过程中多尺度能量相互作用的研究 II. 实际应用[J]. 大气科学, 42(5): 1119-1132. Sha S, Shen X Y, Li X F, 2018. The study of multi-scale energy interactions during a Meiyu front rainstorm. Part II: practical application[J]. Chin J Atmos Sci, 42(5): 1119-1132. (in Chinese).
- 沈新勇, 沙莎, 李小凡, 2018. 一次梅雨锋暴雨过程中多尺度能量相互作用的研究 I. 理论分析[J]. 大气科学, 42(5): 1109-1118. Shen X Y, Sha S, Li X F, 2018. The study of multi-scale energy interactions during a Meiyu front rainstorm. Part I: theoretical analysis[J]. Chin J Atmos Sci, 42(5): 1109-1118. (in Chinese).
- 施春华, 金鑫, 刘仁强, 2017. 大气动力学中三种 Rossby 波作用通量的特征差异和适用性比较[J]. 大气科学学报, 40(6): 850-855. Shi C H, Jin X, Liu R Q, 2017. The differences in characteristics and applicability among three types of Rossby wave activity flux in atmospheric dynamics[J]. Trans Atmos Sci, 40(6): 850-855. (in Chinese).
- 孙照渤, 曹蓉, 倪东鸿, 2016. 东北夏季降水分型及其大气环流特征[J]. 大气科学学报, 39(1): 18-27. Sun Z B, Cao R, Ni D H, 2016. A classification of summer precipitation patterns over Northeast China and their atmospheric circulation characteristics[J]. Trans Atmos Sci, 39(1): 18-27. (in Chinese).
- 王雪, 林永辉, 刘善峰, 2019. 江南一次持续性暴雨过程中线状中尺度对流系统模态转换机理研究[J]. 大气科学学报, 42(1): 138-150. Wang X, Lin Y H, Liu S F, 2019. The mechanism of transition of linear mesoscale convection system mode in a continuous rainstorm process in the Jiangnan region[J]. Trans Atmos Sci, 42(1): 138-150. (in Chinese).
- 张弛, 王咏青, 沈新勇, 等, 2019. 东北冷涡背景下爬线发展机制的理论分析和数值研究[J]. 大气科学, 43(2): 361-371. Zhang C, Wang Y Q, Shen X Y et al. 2019. Theoretical analysis and numerical study on the development mechanism of squall line in the Northeast Cold Vortex[J].

Chin J Atmos Sci 43(2): 361-371.( in Chinese) .

- 张霞,王咏青,王君,等.2008.台风海棠与中纬度系统相互作用对河南暴雨的影响[J].气象科技,36(1):55-62. Zhang X,Wang Y Q,Wang J et al. 2008.Impact analysis of interaction between typhoon "Haitang" and mid-latitude systems on rainstorm in Henan[J].Meteor Sci Technol,36(1):55-62.( in Chinese) .
- 赵宇,裴昌春,赵光平,等.2018.梅雨锋暴雨中尺度对流系统的组织特征和触发条件分析[J].大气科学学报,41(6):807-818. Zhao Y,Pei C C,Zhao G P et al. 2018.Analysis of organization modes and initiation conditions of a heavy-rain-producing mesoscale convective system along a Meiyu front[J].Trans Atmos Sci,41(6):807-818.( in Chinese) .
- 周毅,赵磊刚,李昀英.2009.台风暴雨过程中不同尺度系统的相互作用[J].气象科学,29(2):2173-2180. Zhou Y,Zhao L G, Li Y Y. 2009.The interactions of different scale systems in the heavy rain caused by typhoon[J].Sci Meteor Sin,29(2):2173-2180.( in Chinese) .

## Multi-scale energy interaction study in the MCS process under a Northeast Cold Vortex

SHEN Xinyong<sup>1,2</sup>, ZHANG Chi<sup>1</sup>, XIAO Yunqing<sup>3,4</sup>, SHA Sha<sup>5</sup>, WANG Lin<sup>1</sup>, LI Xiaofan<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education/Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change/Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;

<sup>2</sup>Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519082, China;

<sup>3</sup>Key Laboratory for Meteorological Disaster Monitoring and Early Warning and Risk Management of Characteristic Agriculture in Arid Regions, CMA, Yinchuan 750002, China;

<sup>4</sup>Yinchuan Meteorological Bureau, Yinchuan 750002, China;

<sup>5</sup>Shanghai Marine Meteorological Center, Shanghai 201306, China;

<sup>6</sup>School of Earth Sciences, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China

In this study, the MCS process under the background of Northeast Cold Vortex is simulated using the WRF model. A Barnes filter is used to decompose the model data into three scales, which are then substituted into the corresponding energy equation for calculation. Next, the development process of MCS, energy conversion of multi-scale system, and relationship between kinetic energy and precipitation are studied from the perspective of energy. The research results show that in this process a large amount of potential energy is transferred to kinetic energy, which provides energy for the development of the system. During the development of convection cell to MCS forming, the large scale kinetic energy in the middle and lower layers decreased, while the large-scale kinetic energy changed the small- and medium-scale kinetic energy, which in turn promoted the development of the convective monomer. The enhancement of large-scale kinetic energy in the upper layer corresponds to that of the upper jet stream, and promotes the development of the convection system. The  $\beta$  mesoscale system performs kinetic energy transfer to the  $\alpha$  mesoscale system in the middle layer, which promotes the formation of the MCS. During the formation and development of the MCS, the conversion of potential energy at various scales to kinetic energy at the  $\alpha$  and  $\beta$  mesoscales reached its maximum. During the MCS weakening phase, the large-scale system and the  $\alpha$  mesoscale system have a certain inhibitory effect on the  $\beta$  mesoscale system at the middle and upper levels, thus weakening the development of the  $\beta$  mesoscale system. In this process, the  $\beta$  mesoscale scale system acts as the direct cause of precipitation, while the positive center of kinetic energy change corresponds to the large precipitation center.

**Northeast Cold Vortex; MCS; multi-scale; energy; interaction**

doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20191109001

(责任编辑:袁东敏)