

李超,崔春光,王晓芳,等,2017.一次中尺度对流低涡增强阶段的能量诊断分析[J].气象,43(11):1326-1338.

一次中尺度对流低涡增强阶段的能量诊断分析^{*}

李 超^{1,2} 崔春光^{1,2} 王晓芳^{1,2} 赖安伟^{1,2}

1 中国气象局武汉暴雨研究所,武汉 430205

2 暴雨监测预警湖北省重点实验室,武汉 430205

提 要: 本文基于 CFSR 每日 4 个时次、水平分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 全球预报场资料,美国 NCEP 中心每日 4 个时次、水平分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ FNL 全球再分析格点资料,以及华中地区国家基准站逐小时的加密降水资料,围绕 2015 年 6 月 1 日华中地区的一次中尺度对流低涡(mesoscale convective vortex, MCV)天气过程,通过 WRF 模拟和能量诊断的方法,重点研究了低涡增强期内的能量分布特征及其对低涡发展的影响机制。研究表明:此次 MCV 初生于湖北中部地区,低涡生成后向湖北东北部大别山地区移动且不断发展加强,MCV 增强阶段的降水带分布由早期的三中心分布(分别位于宜昌、荆州、随州)演变为后期的纬向型雨带分布。降水产生的凝结潜热释放、对流有效位能的增强、低层暖湿气流的输送以及中层干冷空气的侵入等有利的环境场条件对低涡的增强起到了重要的推动作用。低涡的增强对能量演变有重要影响,具体表现为一方面 MCV 外围辐合气流随低涡发展而增强,引起对流层低层扰动动能的增加,另一方面 MCV 外围降水产生的凝结潜热,导致对流层中层扰动有效位能的增加,之后通过垂直气流作用使扰动有效位能向上输送,从而使对流层高层的扰动有效位能增加。另外,此次 MCV 增强阶段的能量制造项依次为:扰动有效位能向扰动动能的转换,不同高度层的基本气流黏性力作用效果,纬向平均有效位能向扰动有效位能的转换,以及来自系统外部扰动动能的输入。其中,扰动有效位能向扰动动能转换是对 MCV 发展增强的直接贡献项,对其空间分布特征进一步分析可知,在对流层低层和顶层,扰动有效位能向扰动动能转换,使辐合辐散气流增强;而在对流层中高层,扰动动能向扰动有效位能转换,为低涡发展成熟后的继续维持储备了必要的能量。

关键词: 中尺度对流低涡(MCV),增强,WRF 模拟,能量诊断

中图分类号: P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2017.11.002

Diagnostic Analysis on the Energy of a Mesoscale Convective Vortex in Enhancing Stage

LI Chao^{1,2} CUI Chunguang^{1,2} WANG Xiaofang^{1,2} LAI Anwei^{1,2}

1 Wuhan Institute of Heavy Rain, CMA, Wuhan 430205

2 Hubei Key Laboratory for Heavy Rain Monitoring and Warning Research, Wuhan 430205

Abstract: Based on the four-times daily CFSR global reanalysis data and the hourly observed national base station precipitation in the Central China region, we focused on one mesoscale convective vortex (MCV) weather process that occurred in Central China on 1 June 2015, and studied the characteristics of energy distribution and the mechanism that impacted the MCV during the enhancement phase by using the WRF simulation and energy diagnosis method. The results showed that the MCV was born in the central part of Hubei Province, then it moved towards Dabie Mountain in northeast of Hubei Province with enhancing intensity of MCV. By analyzing the precipitation distribution characteristics during the vortex enhancing stage, we found that the precipitation mainly focused on three regions at the early stage, then evolved into

^{*} 国家自然科学基金项目(41375057、41541037、91637211、41620104009 和 41328007)共同资助

2016 年 4 月 6 日收稿; 2016 年 12 月 26 日收修定稿

第一作者:李超,主要从事中尺度天气诊断和模拟研究. Email:276385240@qq.com

通信作者:崔春光,主要从事雷达资料同化技术研究和中尺度暴雨形成机理研究. Email:cgcui@whhr.com.cn

the distribution of zonal pattern. By analyzing meteorological conditions corresponding to the vortex enhancing stage, we found that latent heat caused by precipitation, the warm and wet southwest flow transport in the lower troposphere, the cold and dry air intrusion in the mid-level and a sharp increase of CAPE value were favorable for the enhancement of MCV intensity. On one hand, the convergence flow was strengthening in MCV peripheral section while the vortex was developing, resulting in the increase of perturbation kinetic energy. On the other hand, latent heat of condensation generated by precipitation resulted in the increase of perturbation available potential energy in middle level of troposphere. Then, the available potential energy was transferred upward by vertical air flow, hence it caused the enhancement of available potential energy in upper level of troposphere. With the method of calculating budget of the above two kinds of energy, we found that the energy producing items in the MCV enhancing stage were the conversion between perturbation available potential energy and perturbation kinetic energy which was triggered by pressure change between inside and outside of the MCV system, the effect of viscous force produced by basic air flow in different levels of troposphere, the conversion between zonal mean available potential energy and the perturbation kinetic energy caused by latent heat release as well as the input of perturbation kinetic energy from the outside of MCV system. However, the conversion between perturbation available potential energy and perturbation kinetic energy was the most contributable item for the development of MCV. By further analyzing its spatial distribution characteristics, we concluded that in the lower level and upper levels of troposphere, the forward conversion was propitious to strengthen the convergence and divergence flow, but in middle-level and upper-level troposphere, the reverse conversion was propitious to store the energy to satisfy the need of maintenance of vortex after it developed into maturity.

Key words: mesoscale convective vortex (MCV), enhancing stage, WRF simulation, energy diagnosis

引 言

大气能量学研究和应用是大气科学领域的一个重要分支,20 世纪 70 年代 Mieghem(1973)曾指出大气能量学的研究对推动大气科学的进步和发展具有重要的意义。地球大气作为一个完整的系统,其内部时刻存在着能量的演变和转换,其能量源汇问题和转换机制问题一直是大气能量研究的难题。而且在大气环流系统研究中,能量平衡研究是揭示大气环流规律的有效手段(谢义炳,1978)。此外,数值预报模式的动力学方程组必须遵守能量守恒性的约束,以及局地天气系统的发生发展也伴随出现明显的大气能量收支、分布和转化特征。因此,从大气能量角度出发研究一些特定尺度的天气系统的发生发展机理具有确切的可行性和必要性。

关于中尺度涡旋(mesoscale vortex, MV)能量诊断分析方面的研究已取得了许多富有意义的研究成果,例如雷雨顺(1986)在其编著的《能量天气学》

一书中曾指出,中纬度气旋是一个复合系统,可以将位能转换为动能,将能量从一个尺度输送到另一个尺度,不仅消耗动能,还可以输入和输出动能。在气旋生命周期不同阶段能量平衡有所差异。总的来说,风暴的有效位能制造可以补偿风暴内的大部分摩擦耗散。汪钟兴(1996)针对 1991 年 7 月长江中下游一次梅雨涡旋暴雨过程,基于尺度分离的方法,研究得出两种尺度流场和质量场之间的相互作用所制造的动能向两种尺度系统转换对促进系统的发展具有重要作用。毛贤敏和曲晓波(1997)通过对一次较典型的东北冷涡过程的能量诊断分析后指出,冷涡的涡动动能主要来源于涡动位能的转换。在低涡发展期,由外边界气流入侵所产生的动能输入也十分重要。涡动动能最终主要转换为纬向气流的动能,其次是消耗项和成熟期以后的边界动能输出。傅慎明(2009)选取了几次西南涡过程,通过能量诊断方法得出西南低涡的能量转换过程属于正压-斜压“混合型”,大尺度环境场是西南低涡生成的有利条件,其源源不断地将涡动动能输送到西南低涡关

键区,从而有利于西南低涡的产生和维持。此外,动能制造是西南低涡动能的主要来源,次网格过程和摩擦耗散是动能主要的汇。

综合上述已有的研究成果,本文选取了 2015 年 6 月 1 日初生于湖北中部地区的一次中尺度对流低涡(mesoscale convective vortex,MCV)天气过程作为主要研究对象,通过 WRF 模拟和能量诊断的方法,重点研究了该低涡增强阶段的能量分布变化及其对低涡发展的影响机制,主要是出于以下几个方面的考虑:第一,MV 是夏季诱发长江流域大暴雨的主要天气系统,而湖北省大别山附近地区是长江流域两类主要低涡之一——大别山涡的主要源地(胡伯威和潘鄂芬,1996;张敬萍等,2015),而目前关于初生于该地区的中尺度低涡的能量演变特征和影响机制方面的研究较少,也缺乏统一的认识;第二,2015 年 6 月 1 日导致“东方之星”号游轮翻船的直接天气系统是飑线系统,而围绕该飑线系统的分析已有相关研究成果(郑永光等,2016)。此外,飑线出现的时间正好处于该低涡发展增强阶段,对这个阶段内背景场中尺度低涡的能量诊断分析有助于加深对该次飑线过程生消机制的理解;第三,由于模式初始场误差引起的模拟误差以及模式模拟的空间分辨率的限制,无法满足小尺度的飑线系统研究的要求。因此,本文选取产生此次重大影响天气的背景场中的 MCV 系统作为主要研究对象,希望本文的研究成果能为今后业务上关于此类天气系统的预报提供有价值的参考意见。

1 资料和方法

本文选取的资料主要来源于湖北省气象局信息保障中心的华中地区国家基准站逐小时加密降水资料,美国 NCEP 中心的每日 4 个时次、水平分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ FNL 全球再分析格点资料,以及每日 4 个时次、水平分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ CFSR 全球预报场格点资料。

本文 WRF 模拟时选取的主要参数如下:模式采用的嵌套方案为单层嵌套,模式起始时间为 2015 年 6 月 1 日 08 时(北京时,下同),终止时间 2 日 08 时,水平格距为 3 km,时间分辨率为 1 h,微物理过程方案选取新 Thompson 冰雹方案,长波辐射方案

选取 RRTM 方案,短波辐射方案选取 Goddard 方案,陆面过程方案选取 Noah 方案,边界层方案选取 YSU 方案,不采用积云参数化方案,侧边界为弹性侧边界。

2 实况天气分析以及模式评估

2.1 实况天气分析

图 1 是根据 FNL 再分析资料绘制而成的实况环流场的水平剖面 and 速度场的垂直剖面。由图分析可知,一方面,从 850 hPa 高度层背景场环流和散度分布特征可以看出低涡在 6 月 1 日 20:00 左右初生于湖北省中北部随州地区附近,此时低涡影响范围较小,与之对应的辐合区范围较小。此后,低涡持续发展增强,6 月 2 日 02:00 左右低涡移至湖北东北部的大别山地区,低涡影响范围进一步扩大,辐合区范围较 1 日 20:00 也明显扩大。2 日 08:00 低涡主体离开湖北省,进入河南省,低涡中心区域出现风场的强辐散。另一方面,从速度场的垂直剖面图可以看出,1 日 20:00 低涡中心附近东侧出现强烈的上升气流,2 日 02:00 低涡移至大别山地区,中心附近东侧的上升气流有所减弱,仅在对流层中上层维持上升气流,2 日 08:00 低涡中心附近的上升气流减弱消失。综合上述已有特征,为了方便研究,本文分别将 6 月 1 日 20:00 至 2 日 02:00 低涡所处的阶段定义为低涡增强阶段,将 2 日 02:00—08:00 低涡所处的阶段定义为低涡成熟阶段,将 2 日 08:00 之后低涡所处的阶段定义为低涡消亡阶段。此外,由于诱发灾害性天气的小尺度系统较多发生于低涡增强阶段(例如本次个例低涡增强阶段出现的飑线系统),本文将重点围绕 MCV 增强阶段的能量演变特征及其对低涡发展的影响机制展开深入研究。

2.2 降水实况分析及模拟效果评估

图 2 为此次 MCV 增强阶段逐小时降水的实况场与模拟场的对比图。从图 2 中可以看出,降水的模拟场与实况场基本保持一致,模拟场较好地反映出降水实况由低涡增强阶段早期的三中心(宜昌、荆州、随州)分布,演变为增强阶段后期的纬向型雨带分布。这一演变特征符合 MCV 诱发降水的时空演

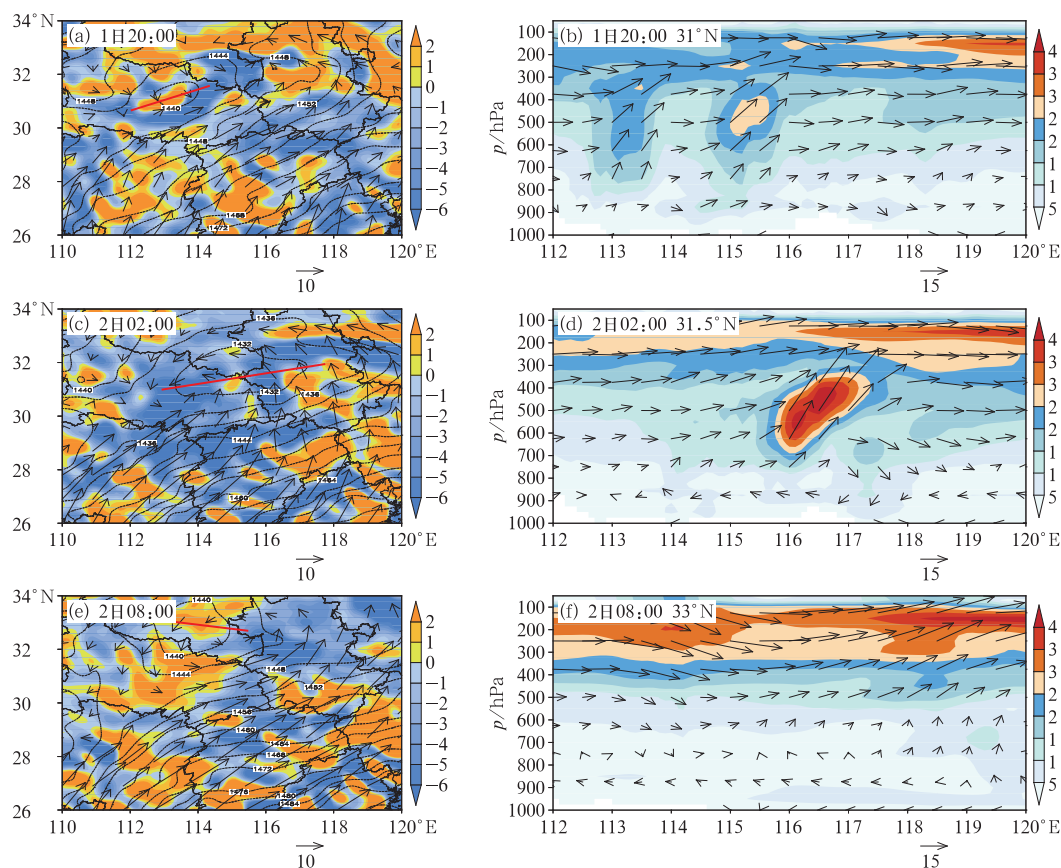


图 1 2015 年 6 月 1 日 20:00 至 2 日 08:00 期间 850 hPa 高度层不同时刻大气环流场, 散度场水平分布(a, c, e)以及与沿低涡轴线的速度场垂直剖面(b, d, f)

[图 1a、1c 和 1e 中箭头表示水平风场(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), 虚线表示高度(单位: m),

填色表示涡度(单位: 10^{-5} s^{-1}), 红色粗线表示低涡轴线; 图 1b、1d 和 1f 中填色表示全速度,

箭头表示纬向和垂直的合成风场(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)]

Fig. 1 Atmospheric circulation, horizontal distribution of divergence (a, c, e) and vertical section of velocity across vortex axis (b, d, f) at 850 hPa isobaric surface at different times between 20:00 BT 1 and 08:00 BT 2 June 2015

(Arrows in Figs. 1a, 1c, 1e represent horizontal wind, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, dotted line represents height, unit: m, filled color represent vorticity, unit: 10^{-5} s^{-1} , red coarse line represents vortex axis; filled color in Figs. 1b, 1d, 1f represents full velocity, arrows represent synthetic velocity, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

变规律(谷文龙, 2008)。此外, 受低涡移动的影响, 低涡诱发的主要降水区也随之向湖北东北部大别山地区扩展。

综上所述, 根据此次低涡天气过程的垂直速度场特征以及低涡增强期内的逐小时降水量级和分布特征可以看出此次低涡发展过程具有显著的中尺度对流系统(mesoscale convective system, MCS)特征。因此, 可以认为诱发此次天气过程的 MV 系统为 MCV, 其作为 MV 中的一类特殊系统, 除了具有 MV 的典型特征之外, 还具有 MCS 的部分特点, 该

类低涡主要特征表现为在任意方向产生直径至少 100 km 的连续降水, 并且风场上具有直径长达数百千米的闭合气旋性环流。

3 MCV 增强阶段的大气环境场特征

研究选取了潜热能、水汽输送、温度和对流有效位能 4 类环境场参数(李耀东等, 2004; 董元昌和李国平, 2015), 重点分析了环境背景场条件对低涡产生和发展的影响, 分布特征如图 3。需要特别说

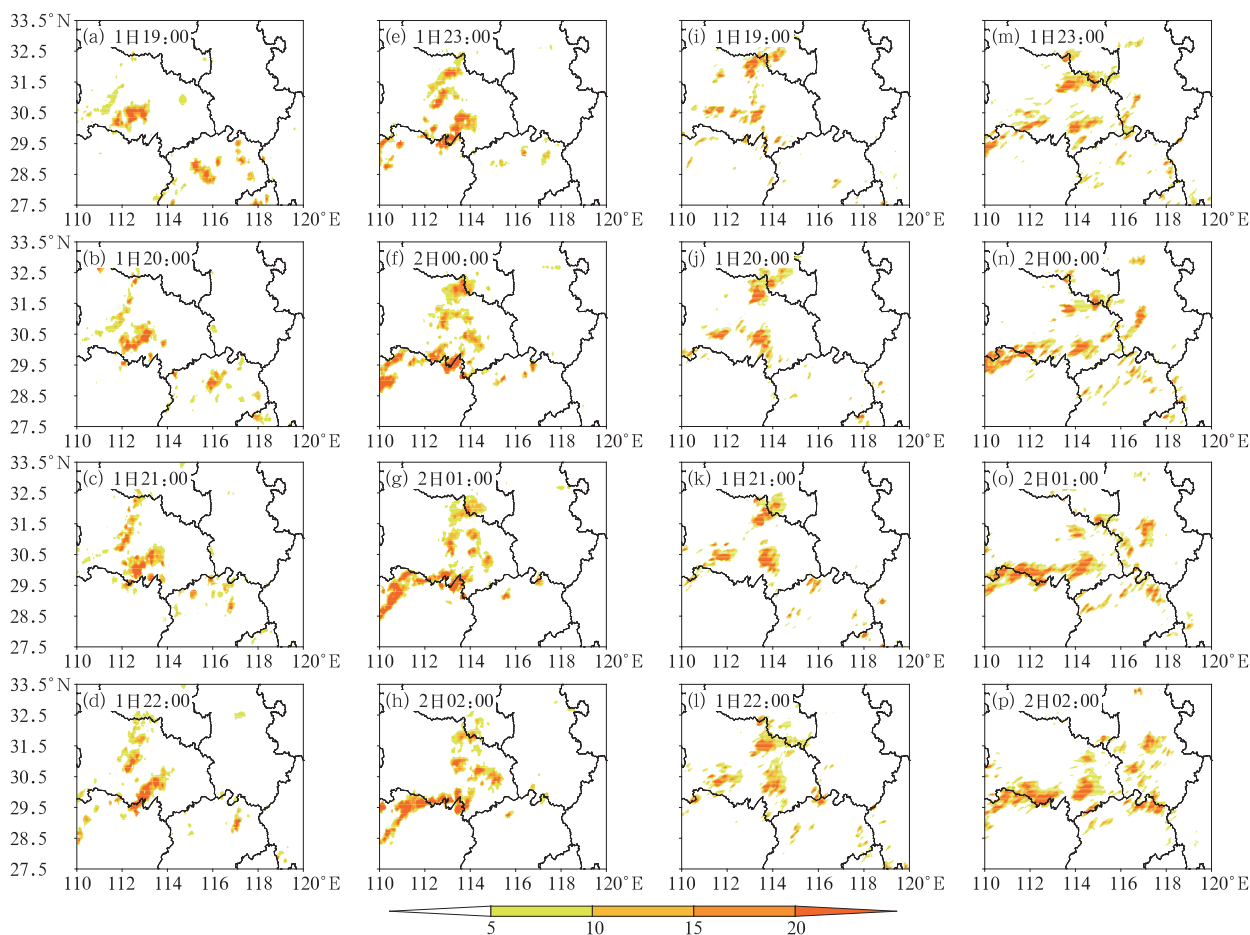


图 2 2015 年 6 月 1 日 19:00 至 2 日 02:00 逐小时降水实况场(a~h)和模拟场(i~p)对比(单位: mm)

Fig. 2 Comparison of observation (a~h) and simulation (i~p) of hourly precipitation (unit: mm) between 19:00 BT 1 and 02:00 BT 2 June 2015

明的是,本文涉及的潜热能参数具体是指大气在发生相变过程中吸收或放出的热量,这部分被吸收或放出的热量即被称作“潜热能”,其计算公式为 $E=Lq$,式中 L 代表凝结潜热系数(单位: $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$), q 代表比湿(单位: $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$), E 代表潜热能(单位: $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$) (盛裴轩等,2003)。

从图 3 潜热能的分布可以看出,低涡发展初期(6 月 1 日 20:00)500 hPa 等压面低涡前侧有冷空气侵入(图 3i),暖湿空气遇冷后,导致凝结潜热释放,对应在低涡前侧出现潜热能高值区(孙建华等,2015),之后,随着低涡移动增强,以及降水带的进一步变化,潜热能高值区进一步扩大和移动。从水汽输送分布和温度分布可以看出低涡增强阶段,850 hPa 等压面水汽输送通量一直维持较大值,500 hPa 等压面低涡前侧东北方向有冷空气入侵。因此,在

低层暖湿下垫面的前提下,中层干冷空气的入侵有利于此次 MCV 的发展增强(苗春生等,2014)。此外,从对流有效位能值的分布亦可以看出,对流有效位能与降水带分布有较好的对应关系,主要分布于低涡外围的降水区附近,同样随着低涡的移动向鄂东北方向移动。

4 MCV 增强阶段的能量分布特征

有研究(Lorenz,1955;Kucharski and Thorpe,2000a;2000b)曾将局地有效位能概念应用于诊断理想且干绝热状态下气旋的发展,其研究结论认为有效位能和动能均可被分为背景场纬向平均部分和扰动部分,由此产生的局地能量演化方程扩展了著名的洛伦兹型有效位能方程。Fu et al(2015)将上述

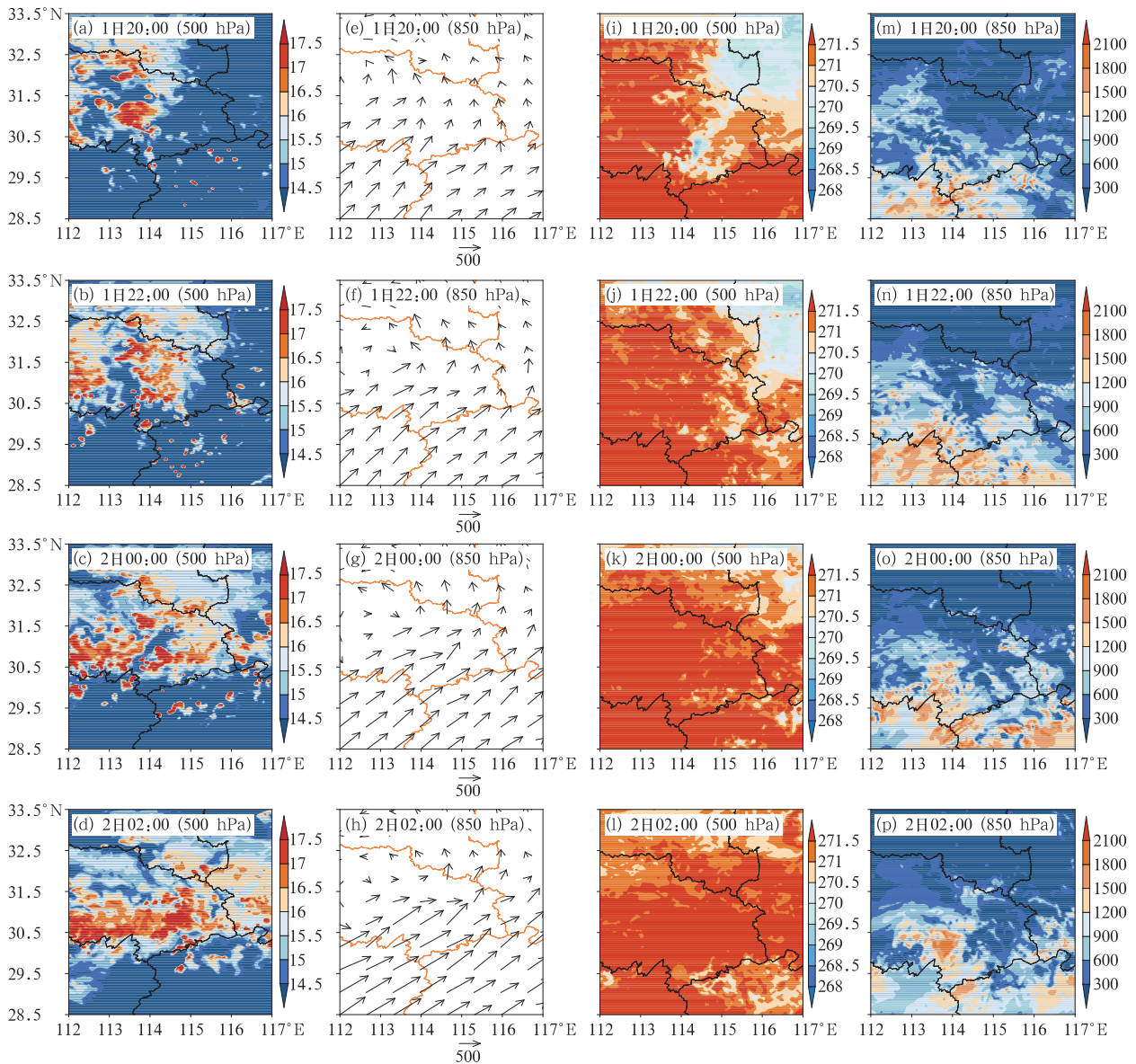


图 3 2015 年 6 月 1 日 20:00 至 2 日 02:00 低涡增强阶段不同时刻大气环流场 500 hPa

潜热能(a~d,单位: $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$)、850 hPa 水汽通量(e~h,单位: $\text{kg} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)、

500 hPa 温度(i~l,单位:K)、850 hPa 对流有效位能(m~p,单位: $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$)分布

Fig. 3 Latent heat energy at 500 hPa isobaric surface (a~d, unit: $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$),

vapor flux at 850 hPa isobaric surface (e~h, unit: $\text{kg} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$),

temperature at 500 hPa isobaric surface (i~l, unit: K), CAPE at 850 hPa

isobaric surface (m~p, unit: $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$) at different times in enhancing stage

between 20:00 BT 1 and 02:00 BT 2 June 2015

理念应用于诊断一次长江流域长生命史低涡发展过程的能量演变特征,并且取得了很好的研究效果。

因此,为了研究需要,本文引用了 Fu et al(2015)中关于有效位能和动能的诊断方程,其主要方程如下:

$$\frac{\partial(\bar{\rho}k_m)}{\partial t} = -\nabla \cdot [\underbrace{\bar{\rho}\langle V \rangle k_m}_{\text{MTKM}} + \underbrace{\langle V \rangle \cdot \bar{\rho}V''V''}_{\text{RSW}} + \underbrace{\bar{F} \cdot \langle V \rangle}_{\text{MSM}}] - \underbrace{C(\bar{\rho}k_m, \bar{\rho}k_t)}_{\text{CKMT}} - \underbrace{C(\bar{\rho}k_m, \bar{\rho}e_m)}_{\text{BCM}} - \underbrace{D(\bar{\rho}k_m)}_{\text{MDM}} \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\bar{\rho}e_m)}{\partial t} = -\nabla \cdot [\underbrace{\bar{\rho}\langle V \rangle e_m}_{\text{MTEM}} + \underbrace{\langle T \rangle \eta_m \frac{c_p}{\langle \theta \rangle}}_{\text{ETH}} \cdot \underbrace{\bar{\rho}V''\theta''}_{\text{WMP}} + (\bar{p} - p_R)\langle V \rangle] - \underbrace{C(\bar{\rho}e_m, \bar{\rho}e_t)}_{\text{CEMT}} + \underbrace{C(\bar{\rho}k_m, \bar{\rho}e_m)}_{\text{BCM}} + \underbrace{G(\bar{\rho}e_m)}_{\text{GEM}} \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\bar{\rho}k_t)}{\partial t} = -\nabla \cdot [\underbrace{\bar{\rho}V k_t}_{\text{TKT}} + \underbrace{\bar{F} \cdot V''}_{\text{MSE}}] + \underbrace{C(\bar{\rho}k_m, \bar{\rho}k_t)}_{\text{CKMT}} + \underbrace{C(\bar{\rho}e_t, \bar{\rho}k_t)}_{\text{BCE}} - \underbrace{D(\bar{\rho}k_t)}_{\text{MDE}} \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\bar{\rho}e_t)}{\partial t} = -\nabla \cdot [\underbrace{\bar{\rho}V e_t}_{\text{TET}} + \underbrace{\bar{p}'V''}_{\text{WPP}}] + \underbrace{C(\bar{\rho}e_m, \bar{\rho}e_t)}_{\text{CEMT}} - \underbrace{C(\bar{\rho}e_t, \bar{\rho}k_t)}_{\text{BCE}} + \underbrace{G(\bar{\rho}e_t)}_{\text{GET}} \quad (4)$$

$$e_m \approx \frac{1}{2} \left\{ \frac{g^2}{N_R^2} \left(\frac{\Delta \langle \theta \rangle}{\theta_R} \right)^2 + RT_R \frac{c_v}{c_p} \left(\frac{\Delta \langle p \rangle}{p_R} \right)^2 \right\} \quad (5)$$

$$\langle e_t \rangle \approx \frac{1}{2} \left[\frac{g^2}{N_R^2} \left(\frac{\theta'}{\theta_R} \right)^2 + RT_R \frac{c_v}{c_p} \left(\frac{p'}{p_R} \right)^2 \right] \quad (6)$$

$$k_m = \frac{1}{2} \langle V \rangle \cdot \langle V \rangle \quad (7)$$

$$k_t = \frac{1}{2} V'' V'' \quad (8)$$

上述方程中 k_m, k_t, e_m, e_t 分别表征背景场纬向平均动能、扰动动能、背景场纬向平均有效位能、扰动有效位能,其中诊断方程(1)中 MTKM 表示 k_m 的平均输送项,RSW 表示雷诺应力作用项,MSM 表示平均流中黏滞力作用项,CKMT 表示正压情况下 k_m 与 k_t 的能量转换值,BCM 表示正压情况下 k_m 与 e_m 的能量转换值,MDM 表示作用于 k_m 分子耗散项。诊断方程(2)中 MTEM 表示 e_m 的平均输送项,ETH 表示热量湍流输送项,WMP 表示平均气压作用项,CEMT 表示正压情况下 e_m 与 e_t 的能量转换值,GEM 表示作用于 e_m 非绝热作用项。诊断方程(3)中 TKT 表示 k_t 的平均输送项,MSE 表示扰动流中黏滞力作用项,BCE 表示斜压情况下 k_t 与 e_t 的能量转换值,MDE 表示作用于 k_t 分子耗散项。诊断方程(4)中 TET 表示 e_t 的平均输送项,WPP 表示扰动气压作用项,GET 表示作用于 e_t 非绝热作用项。

结合上述诊断方程,本文将低涡增强阶段的能量演变,视为背景平均场下由低涡发展诱发扰动场的变化过程,其中背景平均场是指某一特定较大范围格点区域内能量的纬向平均场,而扰动场是指低涡所在较小范围格点区域内的能量场与背景平均场之间差值,这一差值的变化可以较好地反映出环流背景场与低涡之间相互作用过程。因此,本文分别计算了背景场纬向平均动能、背景场纬向平均有效位能、扰动动能和扰动有效位能,以及它们各自的收支项,根据相应计算结果,重点研究了低涡增强阶段

MCV 能量演变特征和影响机制。

根据诊断方程(6)和(8)分别计算得到了低涡增强阶段(6月1日19:00至2日02:00)扰动有效位能和扰动动能的水平分布,计算结果如图4、图5所示。

从图4可以看出,在对流层低层(850 hPa)尽管6月1日19:00风场上无明显气旋式涡旋,但在湖北中部地区存在显著的风切变,湖北中南部地区风场零星分布着较弱的扰动动能高值区,20:00湖北中部地区风场气旋性辐合加强,根据前文实况场可知此时低涡刚刚形成,湖北中南部地区风场扰动动能较低涡出现前呈现显著增强的趋势。此后低涡继续发展加强,中南部地区的扰动动能高值区范围继续扩大,主要向湖北北部地区,以及鄂东北方向扩展。直至低涡发展成熟时(2日02:00),扰动动能达到最强。因此,低涡外围扰动动能的增强随MCV发展增强而增强,这与文献(Fu et al, 2015)得出长江流域长生命史低涡外围扰动动能的分布特征一致。

从图5可以看出,在对流层高层(200 hPa)扰动有效位能与降水分布有极好的对应关系,也是由早期的三中心分布演变为后期的纬向分布。此外,低涡外围的扰动有效位能伴随低涡移动过程中呈现先增加后减小的趋势。这主要是由于降水产生潜热释放,而潜热与扰动位温有密切关系,同时根据方程(6)可知,扰动位温是扰动有效位能的主要影响因子,降水强度随低涡发展呈现先增强后减弱再增强的变化趋势。因此,对流层高层扰动有效位能对应呈现上述变化。

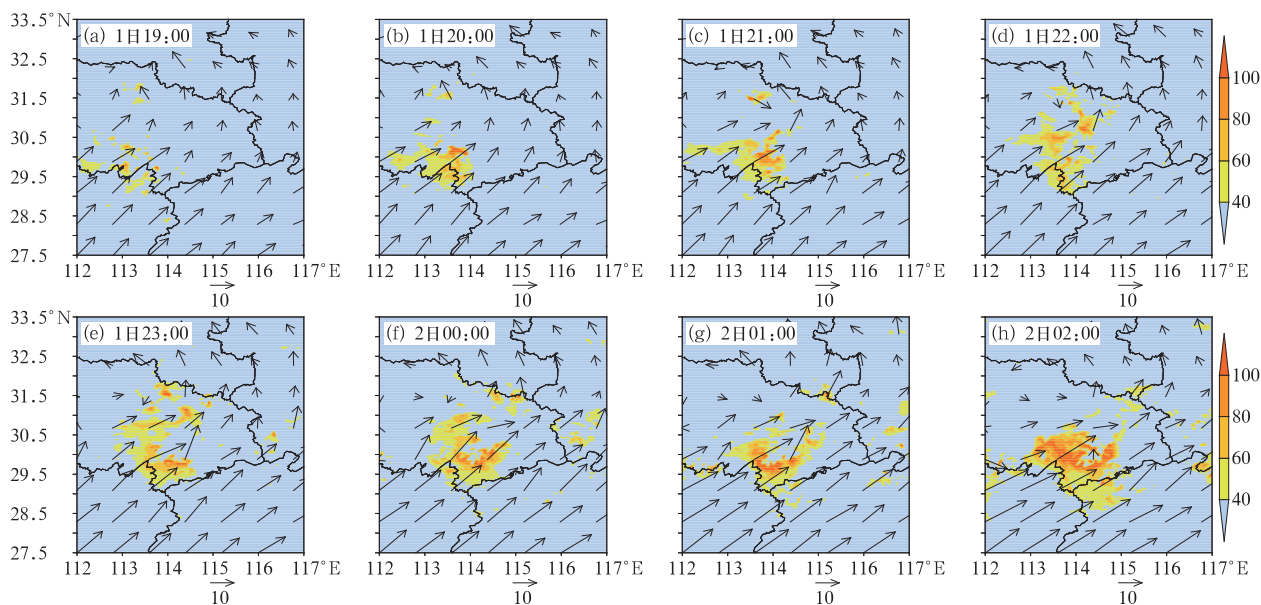


图 4 2015 年 6 月 1 日 19:00 至 2 日 02:00 期间 850 hPa 扰动动能的分布

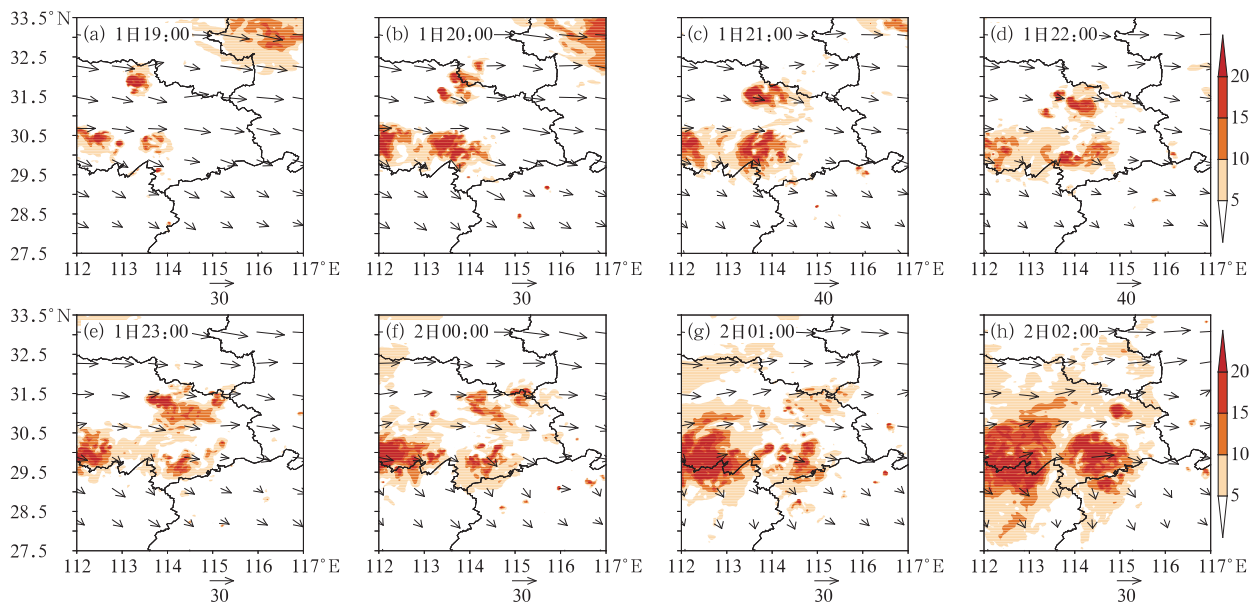
(填色表示扰动动能,单位: $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$;箭头表示风场,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)Fig. 4 Distribution of perturbation kinetic energy at 850 hPa isobaric surface
between 19:00 BT 1 and 02:00 BT 2 June 2015(Filled color represent perturbation kinetic energy, unit: $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$; arrow represents velocity field, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

图 5 同图 4, 但为 200 hPa 扰动有效位能

(填色表示扰动有效位能,单位: $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$;箭头表示风场,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 5 Same as Fig. 4, but for perturbation potential energy at 200 hPa

(Filled color represent perturbation potential energy, unit: $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$; arrow represents velocity field, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

基于上述扰动动能和扰动有效位能在 1 日 19:00 至 2 日 02:00 呈现的变化特征,沿着 30°N 做纬向垂直剖面(图 6),对两者的垂直分布特征做进一步的研究分析。

从图 6 可以看出,低涡出现前 6 月 1 日 19:00, 对流层高层仅有一较弱的扰动有效位能高值中心,且对流层中低层也维持较弱的扰动动能。20:00 低涡刚形成,一方面由于对流层中层冷空气侵入,致使

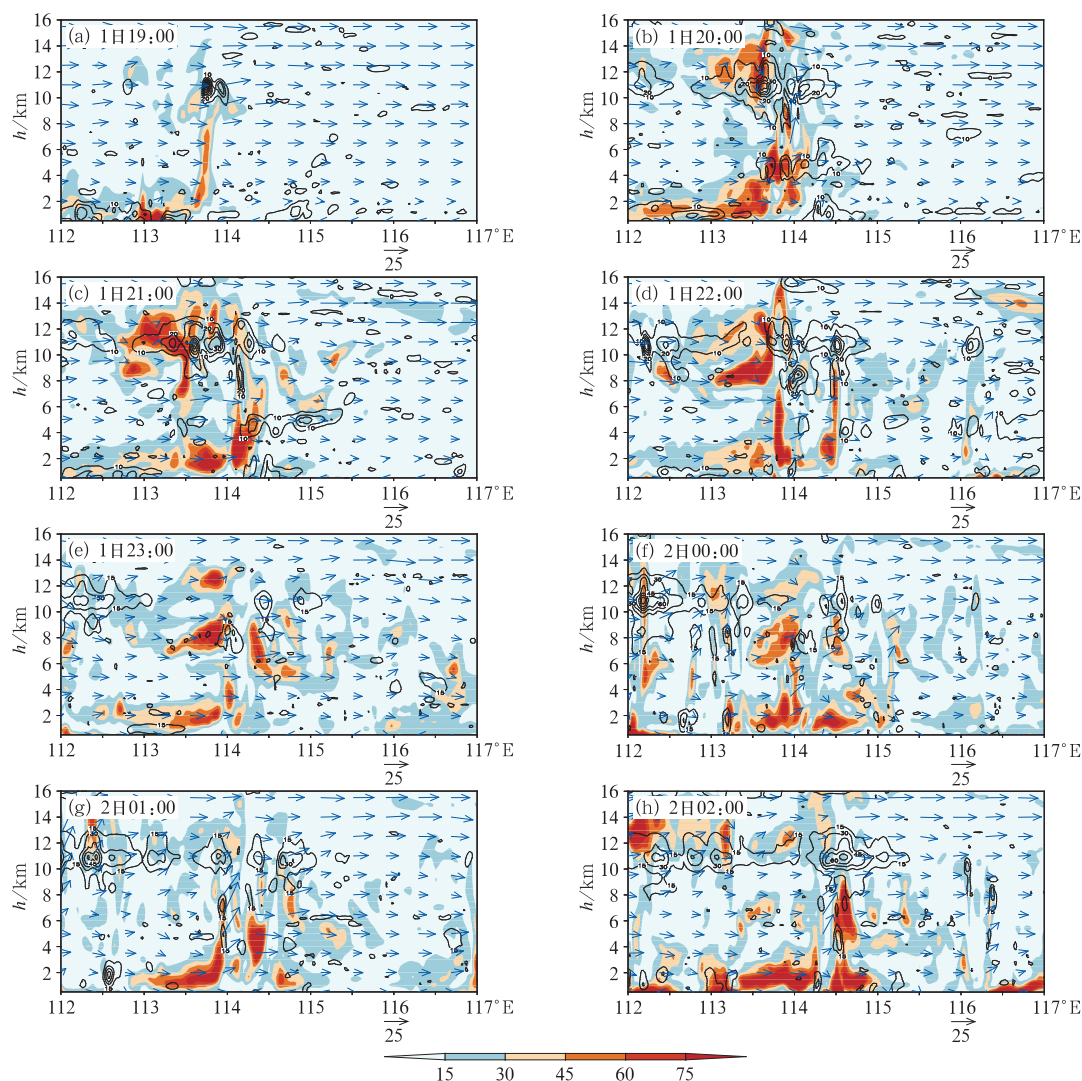


图 6 同图 4, 但为扰动有效位能和扰动动能的垂直分布
(填色表示扰动动能, 等值线表示扰动有效位能, 单位: $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Fig. 6 Same as Fig. 4, but for vertical distribution of perturbation potential energy and perturbation kinetic energy

(Filled color represents perturbation kinetic energy, contour line represents perturbation potential energy, unit: $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$)

114°E 附近对流层中层(4 km)出现扰动有效位能的高值区。另一方面由于低涡内部垂直上升气流的持续增强, 通过垂直气流作用使扰动有效位能向上输送, 致使 113.5°E 附近对流层高层(11 km)出现扰动有效位能的高值区, 且此时中低层扰动动能较 19:00 出现显著增强。21:00 对流层高层继续维持较强的扰动有效位能, 而对流层中层的扰动有效位能高值区逐渐东移。22:00 对流层中层扰动有效位能高值区减弱消失。23:00 低涡发展东移, 扰动动能稍微减弱, 与此同时, 高层积聚的扰动有效位能也

开始调整。2 日 01:00 受垂直上升气流的影响 114.5°E 附近对流层高层重新积聚新的扰动有效位能, 直至 02:00 对流层高层的扰动有效位能达到最强, 且对流层低层的扰动动能也达到最强。因此, 低涡内部垂直气流的作用对于高层扰动有效位能的变化有重要影响。

5 MCV 增强阶段能量收支的变化

为了进一步弄清低涡增强阶段扰动动能和扰动

有效位能呈现上述变化特征的原因,根据诊断方程(3)和(4),分别计算了低涡增强阶段扰动动能和扰动有效位能的各个收支项变化,将 6 月 1 日 23:00 作为低涡增强阶段的代表性时刻,其垂直分布特征如图 7。

对于扰动动能而言,从 TKT 项的分布结果可以看出低涡外围南侧 28°N 附近地区对流层低层存在明显的扰动动能输入,表明低涡南侧对流层低层扰动动能的输入对此次低涡发展有重要贡献。而 MSE 项的分布结果看出在低涡外围南北侧对流层中高层零星分布着高值和低值中心,且该值具有明显的垂直分层分布特征,这是由于低涡不同高度层基本气流的风向和风速不同,对应其黏性力作用效

果具有显著的分层差异。CKMT 项的分布结果亦表明纬向平均动能与扰动动能之间的转换对低涡发展的贡献作用可以忽略不计。对于扰动有效位能而言,从 TET 项的分布结果可以看出低涡的南侧和北侧对流层中高层零星分布着扰动有效位能的高值和低值中心,表明扰动有效位能在对流层上下层之间存在着能量的传递。WPP 项分布结果表明低涡中心附近扰动气压减弱对低涡的发展增强有利。CEMT 项在低涡增强阶段分层分布特征明显,这是由于低涡不同高度层温度平流具有分层差异,因而低涡产生的扰动有效位能不同,导致不同高度层的扰动有效位能与平均有效位能之间的转换效果出现分层差异。而对于衡量扰动动能与扰动有效位能转

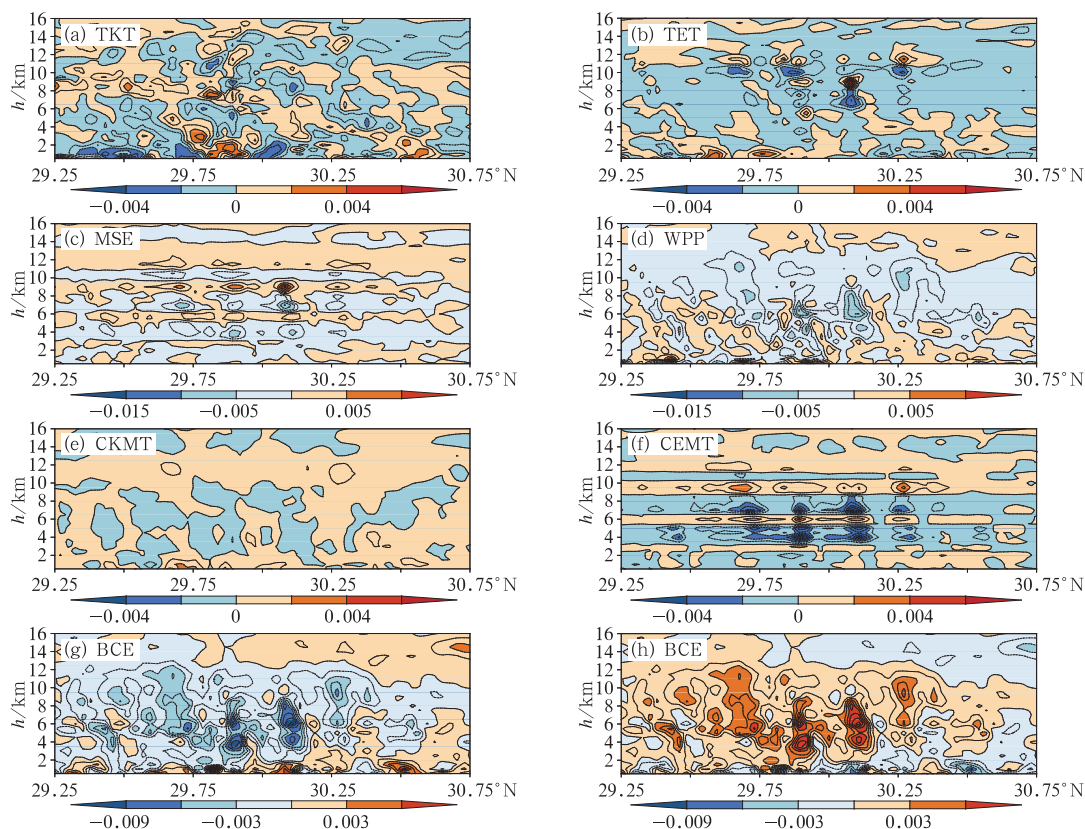


图 7 2015 年 6 月 1 日 23:00 低涡增强阶段沿 113.5°E 大气扰动动能和大气扰动有效位能中各收支项(单位: $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$)的垂直分布

(a, c, e, g) 分别表示扰动动能收支项 TKT、MSE、CKMT、BCE,

(b, d, f, h) 分别表示扰动有效位能收支项 TET、WPP、CEMT、BCE

Fig. 7 Vertical distribution of different budgets concerned with perturbation kinetic energy and perturbation potential energy across longitude of 113.5°E in enhancing stage at 23:00 BT 1 June 2015

(a, c, e, g) respectively represent the budget item TKT, MSE, CKMT, BCE concerned with perturbation kinetic energy, (b, d, f, h) respectively represent the budget item TET, WPP, CEMT, BCE concerned with perturbation potential energy (unit: $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$)

换效果的 BCE 项而言,从其分布结果可以看出高值区连续分布在低涡的周围,其强度和范围较其他收支项有显著差异(强度大,范围广),表明扰动动能与扰动有效位能之间的转换是影响低涡发展的主要因子,这与孙力(1998)围绕一次典型东北冷涡发展过程诊断得出的能量演变特征相关结论是一致的。综上所述,此次 MCV 增强期内的能量制造项依次分别为:扰动有效位能向扰动动能的转换,不同高度层的基本气流黏性力作用效果,潜热释放导致的纬向平均有效位能向扰动有效位能的转换,来自系统外部扰动动能的输入。这一能量收支特征与杨莲梅和张庆云(2014)对一次中亚低涡进行能量诊断时得出的结论相比,做了进一步的补充,认为中亚低涡活动具有明显的阶段性能量学特征。这次低涡发展和减弱过程处于斜压不稳定状态,扰动动能来源于扰动位能的转换和区域开放边界扰动动能的输入,且两者作用相当,它们使得低涡快速发展。此外,低涡内部的能量转换及其外界的能量输送主要发生在中、高层,且能量垂直输送对低涡系统的发展也有一定促进作用。

6 能量水平转换效果和垂直转换效果对 MCV 发展的影响

上一节已证实扰动动能与扰动有效位能的转换对低涡发展的贡献最大,关于两者水平方向和垂直方向的转换效果,有必要进一步深入分析。下文分别计算了不同时刻区域平均的二维 BCE 和三维 BCE 值,选取的区域范围为 $29^{\circ} \sim 33^{\circ} \text{N}$ 、 $112^{\circ} \sim 117^{\circ} \text{E}$ 的矩形区域,计算结果如图 8。

从图 8 可以看出,BCE 二维值和三维值的区别在于是否考虑扰动有效位能与扰动动能垂直方向的转换效果,而两者之间的差值即表征垂直方向上扰动动能与扰动有效位能的转换效果,综合上述四个时刻 BCE 二维和三维的转换特征可以发现,对流层低层(2 km 以下),二维 BCE 值和三维 BCE 值变化曲线接近重合,且 BCE 二维值和三维值均为正值,表明随着低涡发展,对流层低层,扰动有效位能向扰动动能转换有利于低涡底部水平辐合气流的进一步增强,且两者垂直方向的转换效果可以忽略不计。

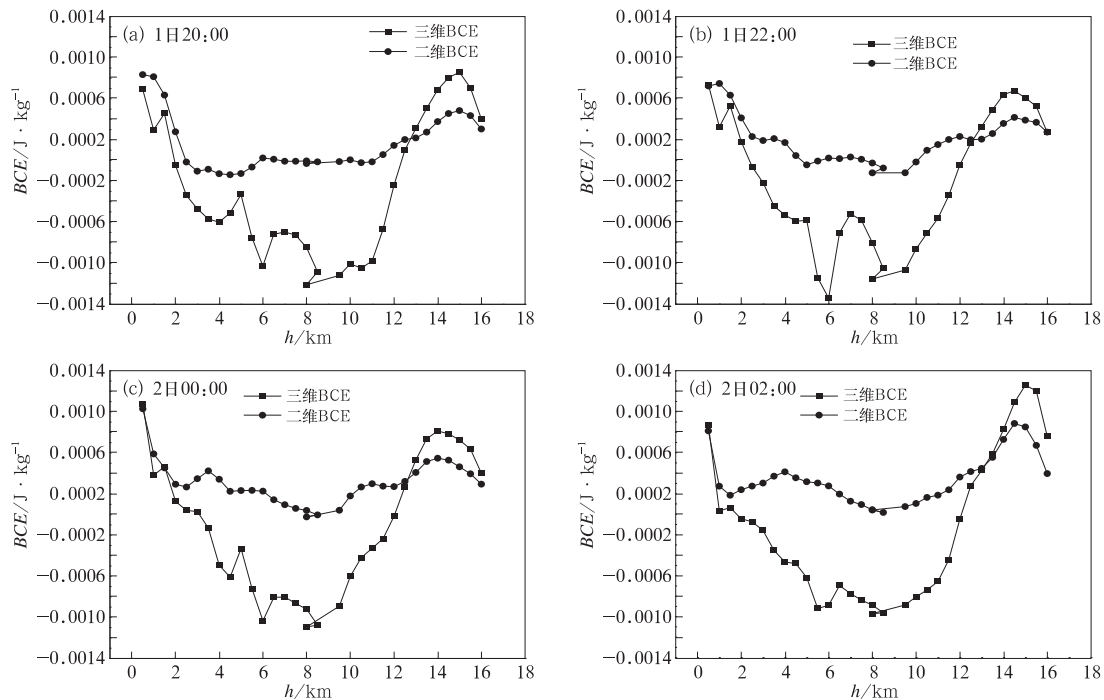


图 8 2015 年 6 月 1 日 20:00 至 2 日 02:00 低涡增强阶段不同时刻区域平均的二维 BCE 值和三维 BCE 值的垂直分布

Fig. 8 Vertical distribution of two dimensional regional average BCE values and three dimensional regional average BCE values at different times in enhancing stage between 20:00 BT 1 and 02:00 BT 2 June 2015

对流层顶层(12 km 以上),三维 BCE 值略高于二维 BCE 值,且 BCE 二维值和三维值也均为正值,表明随着低涡发展,扰动有效位能向扰动动能转换有利于低涡顶部水平辐散气流的增强。对流层中高层(4~12 km)三维 BCE 值远小于二维 BCE 值,且二维 BCE 值为正,三维 BCE 值为负,表明随着低涡发展,由于低涡内部垂直上升气流的作用,有利于扰动动能向扰动有效位能转换。而如果不考虑垂直上升气流的作用,扰动有效位能向扰动动能转换,有利于低涡继续维持。综上所述,此次 MCV 增强阶段,对流层低层(2 km 以下)和对流层顶层(12 km 以上),扰动有效位能向扰动动能转换有利于辐合辐散气流的进一步增强,而对流层中高层(4~12 km)由于低涡内部上升气流的作用,有利于扰动动能向扰动有效位能转换。其储备的有效位能待低涡发展成熟,上升气流减弱后,重新转化为动能,以满足低涡继续维持所需的能量。这一转换机制与汪钟兴(1996)研究梅雨涡旋与环境场动能的相互作用得出的结论一致,他指出梅雨涡旋增强阶段动能收支表现为在对流层高、低层制造动能,且为主要能源,中层则有动能破坏,并有水平动能输入来补偿。他将这种垂直分布特征归结为:对流凝结所释放的潜热一般位于中层,由此将引起高层等压面抬升,低层等压面下降,从而促使高、低层制造动能。

7 结论与讨论

本文围绕 2015 年 6 月 1 日华中地区的一次 MCV 天气过程,通过 WRF 模拟和能量诊断的方法,重点分析了低涡增强阶段的能量分布特征及其对低涡发展的影响机制,主要研究结论如下:

(1) 此次 MCV 初生于湖北中部地区,低涡生成后向湖北东北部大别山地区移动且不断发展增强,低涡发展过程中出现强烈的上升气流以及强降水中心表明该次低涡天气过程具有显著的 MCS 特征。

(2) MCV 增强阶段的降水带分布由早期的三中心分布(位于宜昌、荆州、随州)演变为后期的纬向型雨带分布。

(3) 降水产生的凝结潜热释放,对流有效位能的增强,对流层低层暖湿气流的输送,以及对流层中层干冷空气的入侵等环境场条件有利于低涡的发展增强。

(4) 低涡的发展对能量演变有重要影响,具体表现为一方面 MCV 外围辐合气流随低涡发展而增强,引起对流层低层扰动动能的增加,另一方面 MCV 外围降水产生的凝结潜热,导致对流层中层扰动有效位能的增加,之后通过垂直气流作用使扰动有效位能向上输送,从而使对流层高层的扰动有效位能增强。

(5) 通过能量收支诊断的方法得知此次 MCV 增强阶段的能量制造项依次分别为:扰动有效位能向扰动动能的转换,不同高度层的基本气流黏性力作用效果,潜热释放导致的纬向平均有效位能向扰动有效位能的转换,来自系统外部扰动动能的输入。

(6) 低涡发展移动过程中,扰动动能与扰动有效位能的转换是其主要的能量制造项,对两者转换进一步分析可知,对流层低层和高层,扰动有效位能向扰动动能转换,有利于低涡的发展增强,而对流层中高层,扰动动能向扰动有效位能转换,为低涡发展成熟后的继续维持储备了必要的能量。

作为中尺度低涡系统已有研究工作的进一步延伸,本文围绕初生于大别山地区附近的低涡,对其能量演变特征和影响机制开展一系列的研究,不仅证实了在低涡发展初期,除开冷空气入侵导致斜压性的增强以及对流性潜热释放是某一地区有效位能增加的主要作用因子外(杨信杰,1988),垂直气流的输送也应是需要考虑的主要作用因子,而且也较好地解释了在低涡发展初期,暴雨区内低层的能量转换特征为有效位能向辐散风动能转换,高层则相反(孙淑清等,1993)这一转换特征的可能成因。但是不可否认,研究仍然有许多不足之处,例如本文的能量诊断主要围绕动能和有效位能展开,对于低涡增强阶段热能的变化及其与其他能量的转化却没有涉及。此外,低涡增强阶段具有显著的对流特征,因此会诱发一些小尺度天气系统,这些小尺度系统与中尺度低涡之间也存在能量的传递,本文对两者之间的传递特征也没有深入分析。因此,等将来观测资料进一步丰富,WRF 模式进一步优化,以及对于不同尺度系统间相互影响和反馈机制的认识进一步深入后,再来对本文的相关研究内容进行完善和订正。

参考文献

- 董元昌,李国平,2015. 大气能量学揭示的高原低涡个例结构及降水特征[J]. 大气科学,29(6):1136-1148.
- 傅慎明,2009. 引发强降水的西南低涡结构特征及其发生发展机理研

- 究[D]. 北京:中国科学院大气物理研究所.
- 谷文龙, 2008. 长江下游梅雨锋中尺度涡旋统计分析与模拟研究[D]. 南京:南京信息工程大学.
- 胡伯威, 潘鄂芬, 1996. 梅雨期长江流域两类气旋性扰动和暴雨[J]. 应用气象学报, 7(2):138-144.
- 雷雨顺, 1986. 能量天气学[M]. 北京:气象出版社, 34.
- 李耀东, 刘建文, 高守亭, 2004. 动力和能量参数在强对流天气预报中的应用[J]. 气象学报, 62(4):401-409.
- 毛贤敏, 曲晓波, 1997. 东北冷涡过程的能量学分析[J]. 气象学报, 55(2):231-238.
- 苗春生, 吴旻, 王坚红, 等, 2014. 一次浅薄低涡暴雨过程数值模拟及发展机制分析[J]. 气象, 40(1):28-37.
- 盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 等, 2003. 大气物理学[M]. 北京:北京大学出版社, 132.
- 孙建华, 李娟, 沈新勇, 等, 2015. 2013 年 7 月四川盆地一次特大暴雨的中尺度系统演变特征[J]. 气象, 41(5):533-543.
- 孙力, 1998. 一次东北冷涡发展过程中的能量学研究[J]. 气象学报, 56(3):349-361.
- 孙淑清, 田生春, 杜长萱, 1993. 中尺度低涡发展时高层流场特征及能量学研究[J]. 大气科学, 17(2):137-147.
- 汪钟兴, 1996. 梅雨涡旋与环境场动能的相互作用[J]. 热带气象学报, 12(1):91-96.
- 谢义炳, 1978. 能量天气分析、预报方法的现状和将来的可能发展[J]. 气象科技, 6(2):5-9.
- 杨莲梅, 张庆云, 2014. 一次中亚低涡中期过程的能量学特征[J]. 气象学报, 72(1):182-190.
- 杨信杰, 1988. 江淮气旋的能量变化[J]. 气象学报, 46(4):486-491.
- 张敬萍, 傅慎明, 孙建华, 等, 2015. 夏季长江流域两类中尺度涡旋的统计与合成研究[J]. 气候与环境研究, 20(3):319-336.
- 郑永光, 田付友, 孟智勇, 等, 2016. “东方之星”客轮翻沉事件周边区域风灾现场调查与多尺度特征分析[J]. 气象, 42(1):1-13.
- Fu S, Li W, Ling J, 2015. On the evolution of a long-lived mesoscale vortex over the Yangtze River Basin[J]. J Geophys Res, 120(23):11889-11917.
- Fu S M, Sun J H, Zhao S X, et al, 2011. The energy budget of a southwest vortices with heavy rainfall over South China[J]. Adv Atmos Sci, 28(3):709-724.
- Kucharski Fred, Thorpe A J, 2000a. Local energetics of an idealized baroclinic wave using extended Exergy[J]. J Atmos Sci, 57:3272-3284.
- Kucharski Fred, Thorpe A J, 2000b. Upper-level barotropic growth as a precursor to cyclogenesis during FASTEX[J]. Quar J R Meteorol Soc, 126(570):3219-3232.
- Lorenz E N, 1955. Available potential energy and the maintenance of the general circulation[J]. Tellus, 7(2):157-167.
- Mieghem van J, 1973. Atmospheric Energetic[M]. New York:Oxford University Press.