

文章编号:1004-4574(2012)04-0091-08

一次中尺度对流系统的发生发展特征分析

郁珍艳¹,张依慈²,何立富³,李泽椿³

(1. 浙江省气候中心,浙江 杭州 310017; 2. 南京信息工程大学,江苏 南京 210044;
3. 中国气象局国家气象中心,北京 100081)

摘要:通过分析2008年6月23日形成于冷涡成熟阶段的中尺度对流系统(MCS)的发生发展特征,得到:(1)MCS发生发展过程中,高空强垂直风切变维持,低层垂直风切变迅速增大。(2)湿Q矢量的低层辐合、高层辐散,加强了上升运动和次级环流,前者的增大对MCS的发展起了更大的作用。(3)雷达图上弱回波区、回波悬垂结构、三体散射现象、大的垂直累积液态水及低层速度图上的气旋式辐合的出现是冰雹发生前的有利信号。(4)湿斜压性及风垂直切变增大可能会促发MCS发生。地面风场辐合和水汽辐合加强了MCS的发展。对流层中高层干冷空气的侵入,使不稳定能量释放,导致了强对流天气的发生。

关键词:华北冷涡;强对流天气;中尺度对流系统

中图分类号:P458.121.2

文献标志码:A

Characteristic analysis of formation and development of a mesoscale convective system

YU Zhenyan¹, ZHANG Yici², HE Lifu³, LI Zechun³

(1. Zhejiang Climate Center, Hangzhou 310017, China; 2. Nanjing University of Information Science and Technology Nanjing 210044, China; 3. National Meteorological Center of CMA, Beijing 100081, China)

Abstract: This paper analyzed the evolution features of the mesoscale convective system (MCS) in the mature stage of cold vortex occurred on June 23, 2008. The results include: (1) In the process of the formation and development of MCS, the high-level strong vertical wind shear maintains and the low-level vertical wind shear increases rapidly. (2) The convergence in the high-level and divergence in the low-level of wet Q-vector can enhance the upward motion and the secondary circulation, and the increase of the former plays a greater role in the development of MCS. (3) The appearance of weak echo area, echo overhanging structure, three-body scattering phenomena, the large vertically integrated liquid and the cyclonic convergence in lower velocity diagram, are the favorable signals to the occurrence of hail. (4) Wet baroclinicity and the increases of vertical wind shear may trigger the MCS. The convergence of wind and moisture on ground surface strengthen the development of MCS. The intrusion of dry and cold air in the middle and upper troposphere releases the unstable energy and lead to the occurrence of strong convective weather.

Key words: cold vortex over north China; severe convection; mesoscale convective system

华北冷涡强对流天气预报一直成为天气业务中的难点,导致这种情况的原因在于对冷涡背景下中尺度对流系统(MCS)的发生发展规律和动力热力特征缺乏足够的认识。MCS伴随的天气通常很剧烈,常常带来短时强降水、冰雹、大风、雷电,甚至龙卷等强对流天气。Maddox^[1]指出MCC在对流层中部为暖心结构,对流

收稿日期:2011-10-29; 修回日期:2012-02-01

基金项目:科技部公益性行业专项资助(GYHY200706042);浙江省气象局重点科技专项(2008ZD14)

作者简介:郁珍艳(1984-),女,助理工程师,主要从事为华北冷涡与强对流天气、气候变化研究。E-mail:yuzhenyan@126.com

层顶附近为冷中心。Laing 等^[2]指出 MCC 大多初生在明显的斜压区内,该区以对流层低层强的风速垂直切变和高值的对流有效位能(CAPE)为特征。随着各种 MCS 概念模型的提出,使我们对 MCS 的三维动力热力结构有了充分的认识。Smull 等^[3]通过对 PRE-STORM 试验期间观测资料的多尺度分析,提出了 MCC 成熟期的概念模型。Mcanelly 等^[4]通过对双多普勒雷达资料分析,并借助于早期的中-β 尺度对流循环和对它的响应,提出了 MCS 发展的概念模型。

目前我国对 MCS 的研究多集中于华南暴雨方面^[5-7],虽然冷涡强对流天气的发生发展机制也是与 MCS 密切相关的,但由于受探测资料时空分辨率的限制,对冷涡 MCS 的研究较少,多采用数值模拟结果^[8-9],对其发生发展及机制的认识还是非常有限。随着大气遥感探测技术的提高及雷达产品在强对流天气探测和预警方面的广泛应用,为更好揭示冷涡强对流中尺度系统的热力动力特征创造了有利的条件。本文选取 2008 年 6 月 23 日华北冷涡成熟阶段的一次 MCS 过程,分析其发生发展过程中的动力热力条件,研究其成因与可能触发机制,以期更好的认识华北冷涡背景下 MCS 发生发展规律,为冷涡强对流天气的预报提供科技支撑。此次 MCS 从 23 日 13 时至 24 日 03 时,发生发展直至东移消亡维持了近 15 h,给京津冀地区带来了冰雹、大风、短时强降水和雷电天气,造成了严重的经济损失和人员伤亡,因此研究其发生发展及机制非常重要。

1 中尺度对流系统活动及天气概况

由图 1 可见,中-β 尺度的对流系统 A 于 23 日 13 时在蒙冀交界处生成,河北北部降水增大。14 时,TBB 出现低于 230 K 的低温中心,京津冀出现大范围雷雨。15 时,北京附近中-β 尺度的对流系统 B 新生,并发展东移,16 时与 A 合并,17 时发展成中-α 尺度对流系统。在 A 和 B 强烈发展合并的 14-18 时,京津冀地区由北向南先后有 12 个站出现了大冰雹天气,正闪频次明显增多,大风、短时强降水、雷电等强对流天气也在这一阶段剧烈发生。可见,MCS 是造成此次强对流发生的主要原因,对流单体发生初期出现局地降水,强烈发展合并阶段则伴随着冰雹、雷雨大风天气的出现。强对流区主要位于 TBB 低值区的后部及南部地区。

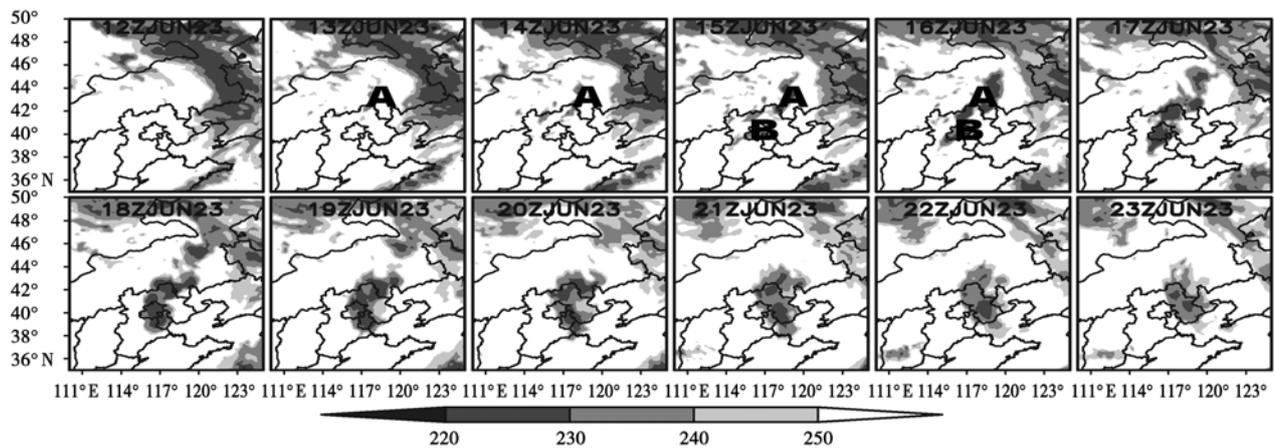


图 1 2008 年 6 月 23 日 12 时 - 23 时 TBB(K) 逐小时演变图

Fig. 1 Hourly evolution of TBB(K) from 12:00:00 to 23:00:00 on June 23, 2008

2 中尺度对流系统的发生发展分析

2.1 MCS 的发生背景

23 日 14 时,从 850 到 200 hPa,均有闭合低压中心。500 hPa 上华北冷涡发展至成熟阶段,京津冀地区位于冷涡东南部,冷涡后部高纬冷空气从对流层中高层南下,增加了层结不稳定性。200 hPa 高空急流维持在冷涡南侧,既有利于高空强冷空气的向南输送,又有利于对流云的维持和强烈发展。京津冀上空 500 hPa 的冷槽配合上 850 hPa 的暖脊,并位于 700 和 850 hPa 风场上的冷式气旋性切变线前的西南气流里,为产生对流的典型天气形势^[10](图略)。可见,23 日高空各层的天气形势都有利于京津冀地区对流运动发生发展。

2.2 MCS 发生发展的动力热力条件

MCS 强烈发展期间,京津冀地区对流有效位能(CAPE) ≥ 100 J · kg⁻¹ 与强天气指数(SWEAT) ≥ 160 及

总指数(TTI) ≥ 47 的不稳定区分布一致,基本覆盖 MCS 发生区域,CAPE 最大值中心位于京津地区(图 2(a))。

1000 ~ 100 hPa 可降水量达到 30 mm 左右,水汽条件较有利;抬升凝结高度明显减小,在 750 hPa 以下,说明强对流天气变的更容易触发;0℃ 和 -20℃ 高度明显降低,分别在 4000 m 和 7000 m 左右,达到适宜冰雹生成的高度(图 2(b))。

23 日,在 MCS 发生发展区域,0 ~ 12 km 的垂直风切变基本维持在 $3(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})/\text{km}$ 以上(图略)。08 时低层 0 ~ 3 km 垂直风切变迅速增大至 $3(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})/\text{km}$ 以上(图略),低层强垂直风切变维持在 MCS 剧烈发展区域前部。可见高空强垂直风切变的维持及低层垂直风切变的迅速增大是 MCS 发生发展的有利条件。

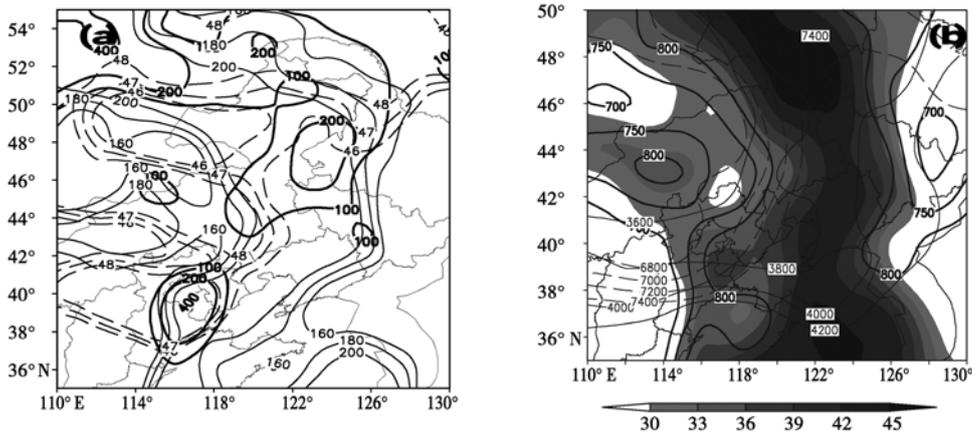


图 2 2008 年 6 月 23 日 14 时对流有效位能(粗实线)、强天气指数(细实实线)与总指数(虚线) 大值区分布(a);1000 - 100hPa 可降水量(阴影)、抬升凝结高度(粗实线)、0℃(细实线)与 -20℃ 高度(虚线)(b)

Fig. 2 Big value distribution of convective available potential energy (thick solid line), strong weather index(thin solid line) and the total index (dotted line) (a);and 1000 - 100hPa precipitable quantity (shadow),lifting condensation level (thick solid line), 0 °C (thin solid line) and -20 °C height (dotted line) (b)at 2008 - 06 - 23T14:00:00

2.3 非地转湿 Q 矢量及其散度分布特征

Q 矢量作为一种先进的天气诊断分析工具,被广泛用于暴雨的诊断分析研究^[11-14]。此外,Q 矢量也被用于降雪、强对流、沙尘等灾害性天气的分析研究。

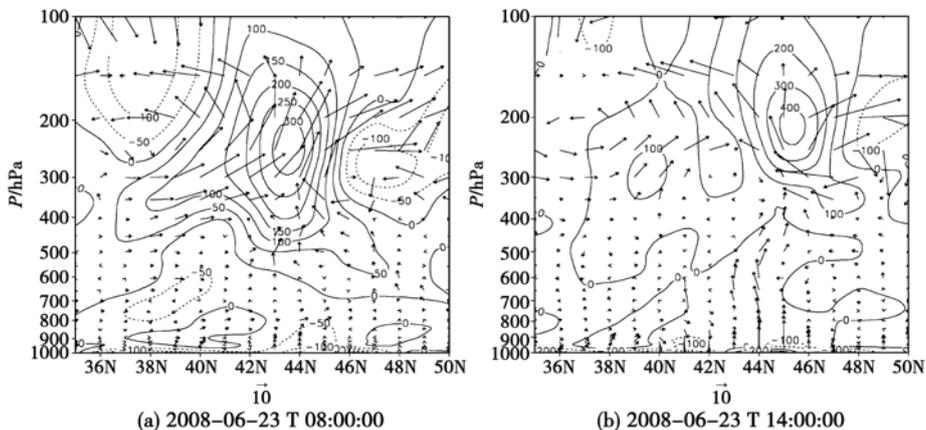


图 3 沿 116°E 非地转湿 Q 矢量散度(等值线, $10^{-13} \text{hPa} \cdot \text{s}^{-3}$) 和非地转湿 Q 矢量(箭头, $10^{-7} \text{hPa}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$) 垂直剖面

Fig. 3 Vertical profiles of ageostrophic wet Q vector divergence (contour lines, $10^{-13} \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$) and ageostrophic wet Q vector(arrow, $10^{-7} \text{hPa}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$) along the 116°E

本节运用非地转湿 Q 矢量对 MCS 的发生发展进行了诊断分析。由过 MCS 发生发展中心的非地转湿 Q 矢量散度垂直剖面图(图 3) 可见,23 日 08 时,MCS 发生前,900 hPa 出现强的非地转湿 Q 矢量辐合区,MCS 发展区域最低值达到 $-50 \times 10^{-13} \text{ hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$,500 hPa 以上为强辐散区,辐散最大值中心位于 250 hPa 附近。14 时,MCS 强烈发展阶段,低层辐合明显增强,MCS 发展区域 900 hPa 湿 Q 矢量散度最低值达到 $-80 \times 10^{-13} \text{ hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$,高层辐散也略有增强。可见,湿 Q 矢量的低层辐合配合高层辐散,可加强上升运动和次级环流,导致强对流天气的发生发展^[11-12]。本次过程中低层湿 Q 矢量辐合的增大对 MCS 的发展起了更大的作用。

2.4 雷达回波特征

为了对此次 MCS 发生发展特征有更清晰直观的了解,根据北京雷达站的回波特征对 MCS 发生发展过程做了进一步分析。

6 月 23 日 13 时,MCS 开始发生。北京雷达站西南方向有多个孤立的对流单体开始发展并东南移,此时北京以西区域开始有闪电发生,正闪比例很高,且伴随大风天气。14 时 30 分,前部的多个对流单体也开始发展。15 时 30 分有明显的三体散射现象出现。16 时 3 个对流单体基本连成一片(图 4(a)),三体散射现象清晰可见,强回波中心大于 60 dBZ,并出现钩状回波,有明显的 V 型缺口及弱回波区,这是超级单体风暴的典型特征^[15]。反射率因子垂直剖面(图 4(b))上,强回波伸展到 6 km 以上,有弱回波区及回波悬垂结构,也可见三体散射现象。低层速度图上,与强回波中心及钩状回波的入流缺口处对应的是气旋式辐合(图 4(c)),而高层为辐散区(图 4(d))。较大的垂直累积液态水和冰雹指数都很好地对应对了强回波区,对流单体中心 VIL 最大值达到 $50 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 以上(图略)。15 时 50 分左右,北京附近多个站开始降雹,其中 16 时 27 分在涿州发生的大冰雹直径达到了 13 mm。20 时左右,对流系统基本移出北京雷达站探测范围。

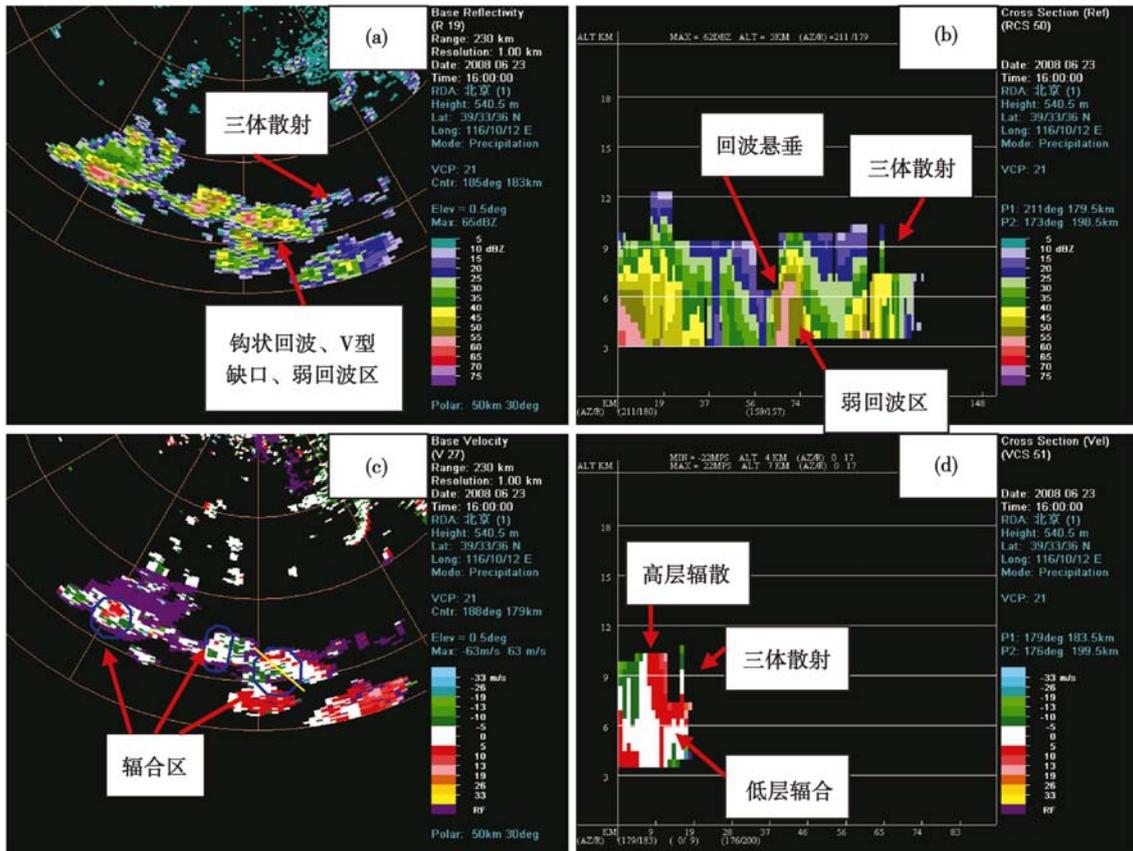


图 4 2008 年 6 月 23 日北京雷达站 16 时 0.5° 仰角反射率因子 (a) ;
16 时反射率因子垂直剖面(沿(a)中直线)(b);16 时 0.5° 仰角径向速度 (c) ;
16 时径向速度垂直剖面(沿(c)中直线)(d)

Fig. 4 0.5° elevation reflectivity at 16:00:00 (a); vertical profiles of the reflected rate factor at 16:00:00 (along the line in (a)) (b); 0.5° elevation radial velocity at 16:00:00 (c); vertical profiles of the radial velocity at 16:00:00 (along the line in (c)) (d); in Beijing radar station on June 23, 2008

3 中尺度对流系统发生发展的机制分析

3.1 地面中尺度辐合线的维持

地面场上(图略),河北中部维持着一条偏西风和东南风的中尺度风场辐合线,触发对流云团在其附近强烈发展。水汽辐合区与风场辐合区有很好的配合,辐合区呈经向分布,主要位于对流系统的后部及南部地区。14 时 MCS 强烈发展,其后部及南部地区的辐合明显增强,此后水汽辐合大值中心随着 MCS 东南移。风场和水汽辐合使辐合区附近上升运动的增强,而且水汽的向上输送为对流云团带来了充足的水汽,有利于对流系统的发展。水汽在上升过程中还会产生凝结使得潜热释放,地面辐合区上空增暖,地面气压下降,低层辐合加强。如此往复循环,MCS 得以强烈发展并维持。短时强降水、冰雹、雷雨大风等强对流天气主要在辐合中心附近发生。

3.2 中高层干冷空气的侵入

MCS 的发生也需要一定的触发机制,中高层干冷空气的侵入可能是触发 MCS 发生的原因之一。由图 5 可见,23 日 08 时,对流层中层为强冷平流,在 MCS 即将发生区域冷平流最强,低层有暖平流的配合。400 hPa 左右还出现明显的相对湿度低值区,且与明显的下沉运动相配合。14 时(图略),干冷空气侵入至 700 hPa 附近,并由北向南延伸至 35° N 以南地区,伴随着对流层中层的西北风和近地面的西南风,下沉干冷气流与上升暖湿气流对峙,116° E 沿线强烈的对流不稳定发生和发展,强天气由北向南陆续发生。说明在 MCS 发生前有一干冷空气侵入至对流层低层,中高层下沉的干冷空气与低层上升的暖湿气流相互作用,促使不稳定能量释放,触发强对流天气发生。

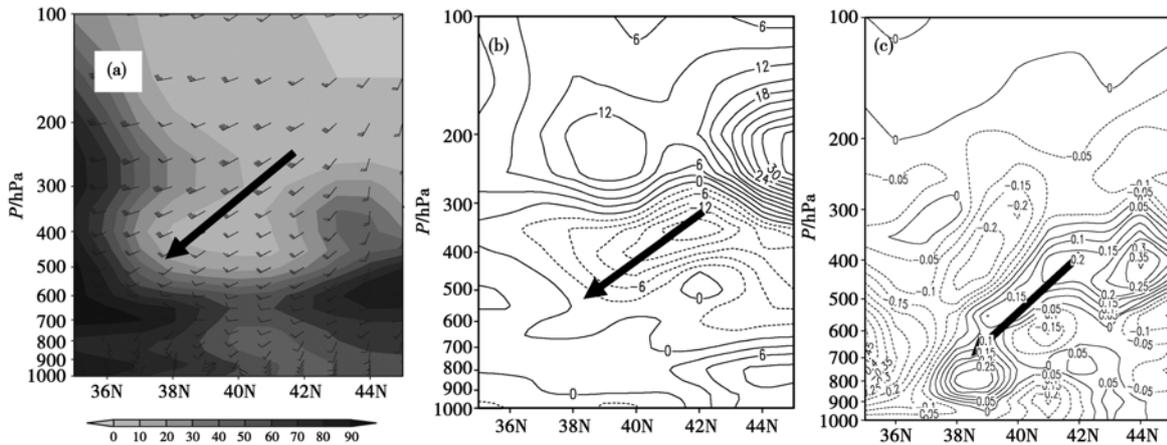


图 5 2008 年 6 月 23 日 08 时沿 116°E 相对湿度(阴影,单位:%)和
风场(单位:m/s) (a);温度平流(单位:10⁻⁵K·s⁻¹)(b);
和垂直速度(单位:10⁻²Pa/s)剖面图(c)

Fig. 5 The profiles of relative humidity (shaded, unit :%) and wind field (unit : m/s) (a);
temperature advection (units : 10⁻⁵ K · s⁻¹) (b); and vertical velocity
(units : 10⁻² Pa /s) (c) along 116°E at 2008 - 06 - 23 T 08:00:00

3.3 湿斜压作用

湿位涡是能够反映大气动力、热力和水汽作用的综合物理量。近些年来,在将湿位涡应用到暴雨、强对流等灾害性天气时,得出了比较有意义的结果^[16-18]。

在 P 坐标系中,湿位涡守恒的表达式为^[19]:

$$MPV = -g(\zeta_p + f) \frac{\partial \theta_{se}}{\partial p} + g \frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta_{se}}{\partial x} - g \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta_{se}}{\partial y}$$

其中 MPV 是湿位涡,其垂直和水平分量分别为 MPV1, MPV2:

$$MPV1 = -g(\zeta_p + f) \frac{\partial \theta_{se}}{\partial p};$$

$$MPV2 = g \frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta_{se}}{\partial x} - g \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta_{se}}{\partial y}$$

MPV1 为湿正压项,表示惯性稳定性与对流稳定性的作用,当大气对流不稳定时,MPV1 < 0;MPV2 为湿斜压项,包含了湿斜压性和水平风垂直切变的作用,标志了大气斜压性的发展,大气的斜压性有利于气旋性涡度的发展,是触发强对流的重要机制。

在此次 MCS 发生发展过程中,低层 850hPa 湿位涡维持负值,MPV1 比 MPV2 大一个量级(图 6)。MCS 发生前(图 6(a) - (c)), θ_{se} 随高度减小并有增大趋势,正涡度增大(图略),对应了 MPV1 < 0,绝对值变大,层结不稳定增强。由于 MCS 发生前京津冀地区从低层到高层为一致的西南风,风速随高度增加(图略),因此 $\frac{\partial v}{\partial p} < 0, \frac{\partial u}{\partial p} < 0$ 。结合图 6, MCS 发生区 $\frac{\partial \theta_{se}}{\partial x} > 0, \frac{\partial \theta_{se}}{\partial y} < 0$,所以 MPV2 < 0。还可见 $\frac{\partial \theta_{se}}{\partial x}$ 随时间变化较小, $\frac{\partial \theta_{se}}{\partial y}$ 随时间明显变大。说明 θ_{se} 面倾斜增大,气旋性涡度增长更剧烈,斜压不稳定增强,可导致垂直涡度发展,有利于对流运动加剧,促使 MCS 发展^[19]。而之前的分析也表明,MCS 发生发展过程中风垂直切变明显增强,所以 MPV2 的绝对值明显变大。MCS 强烈发展时(图 6(d) - (f)),仍为 MPV1 < 0,MPV2 < 0,但两者的绝对值开始减小,说明不稳定能量释放,强对流天气开始发生。整个过程中,MPV2 的变化比 MVP1 更明显,特别在 MCS 发生前,MPV2 的绝对值迅速增大,而 MCS 减弱消亡时,MPV2 的绝对值迅速减小,23 日 20 时 MPV2 转为正值。说明湿斜压作用及风垂直切变对 MCS 的发生发展起了更重要的作用,是 MCS 发生发展的可能促发机制。

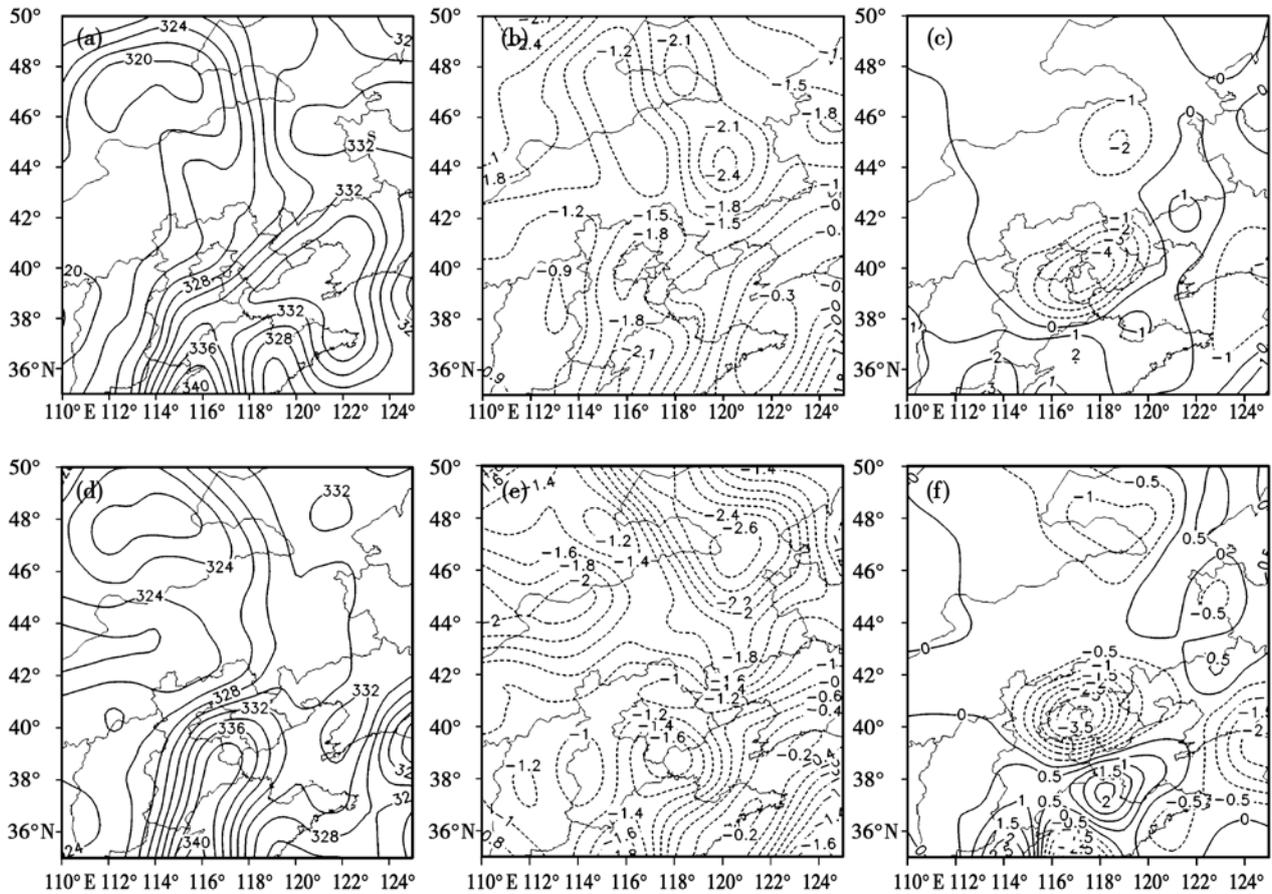


图 6 850 hPa θ_{se} (单位:K)、MPV1(单位: $10^{-6} m^2 \cdot s^{-1} \cdot K \cdot kg^{-1}$) 和 MPV2(单位: $10^{-7} m^2 \cdot s^{-1} \cdot K \cdot kg^{-1}$) 分布:23 日 08 时((a) - (c));23 日 14 时((d) - (f))

Fig. 6 Distribution of 850 hPa θ_{se} (unit: K), MPV1 (units : $10^{-6} m^2 \cdot s^{-1} \cdot K \cdot kg^{-1}$), and MPV2 (units : $10^{-7} m^2 \cdot s^{-1} \cdot K \cdot kg^{-1}$) at 2008 - 06 - 23T08:00:00 ((a) - (c)), and 2008 - 06 - 23T14:00:00((d) - (f))

4 结论

通过对发生于此次华北冷涡成熟阶段 MCS 发生发展过程、动力热力条件及可能触发机制的分析,得到以下一些结论:

(1) 200 hPa 高空急流、500 hPa 华北冷涡、700 hPa 和 850 hPa 冷式切变线的高低层有利配置,是此次 MCS 发生发展的大尺度环境。

(2) MCS 发生发展过程中 0 ~ 12 km 的垂直风切变基本维持在 $3 (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})/\text{km}$ 以上,低层 0 ~ 3 km 垂直风切变迅速增大至 $3 (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})/\text{km}$ 以上,强垂直风切变的维持及低层垂直风切变的迅速增大是 MCS 发生发展的有利条件。

(3) 湿 Q 矢量的低层辐合配合高层辐散,可加强上升运动和次级环流,从而导致强天气发生。其中低层湿 Q 矢量辐合的增大对 MCS 的发展起了更明显的作用。

(4) MCS 发生发展过程中的雷达回波特征表现为:MCS 开始发生时,雷达回波上为多个孤立的对流单体;强烈发展时期,对流单体合并,回波增强。弱回波区、回波悬垂结构、三体散射现象、大的垂直累积液态水及低层速度图上的气旋式辐合的出现是冰雹发生前的有利信号。

(5) 湿斜压性及风垂直切变的增大是 MCS 发生发展的可能促发机制之一。地面风场辐合配合水汽辐合,有利于 MCS 的维持并强烈发展。对流层中高层干冷空气侵入至低层辐合区,使低层不稳定能量释放,导致强对流天气的出现。

参考文献:

- [1] Maddox R A. Large - scale meteorological conditions associated with midlatitude mesoscale convective complexes[J]. Mon. Wea. Rev. 1983, 111:1475 - 1493.
- [2] LAING A G, FRITSEH J M. The large - scale environments of the global populations of mesoscale convective complexes[J]. Mon. Wea. Rev. 2000, 128:2756 - 2776.
- [3] Smull B F, Augustine J A. Multiscale analysis of a mature mesoscale complex[J]. Mon. Wea. Rev. 1993, 121:103 - 131.
- [4] Mcanelly R L, Nachamkin J E, Cotton W R, et al. Upscale evolution of MCSs: Doppler radar analysis and analytical investigation[J]. Mon. Wea. Rev. 1997, 125:1083 - 1110.
- [5] 康风琴,肖稳安. 我国南方 MCC 的涡度、水汽和热量收支平衡[J]. 高原气象, 2001, 20(3):332 - 339.
KANG Fengqin, XIAO Wen'an. The vorticity, heat, moisture budget evolution of MCC over south China[J]. Plateau Meteorology, 2001, 20(3), 332 - 339. (in Chinese)
- [6] 孙建华,赵思雄. 华南“94.6”特大暴雨的中尺度对流系统及其环境场研究(1). 引发暴雨的 β 中尺度对流系统的数值模拟研究[J]. 大气科学, 2002, 26(4):541 - 557.
SUN Jianhua, ZHAO Sixiong. A study of mesoscale convective systems and its environmental fields during the June 1994 record heavy rainfall of south China. Part I: a numerical simulation study of meso - β convective system inducing heavy rainfall[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2002, 26(4):541 - 557. (in Chinese)
- [7] 蒙伟光,王安宇,李江南,等. 华南前汛期一次暴雨过程中的中尺度对流系统[J]. 中山大学学报, 2003, 42(3):73 - 77.
MENG Weiguang, WANG Anyu, LI Jiangnan, et al. Multi - MCSs (mesoscale convective systems) over the heavy rainfall region during 23 - 24 May 1998 in south China[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2003, 42(3):73 - 77. (in Chinese)
- [8] 姜学恭,孙永刚,沈建国. 一次东北冷涡暴雨过程的数值模拟试验[J]. 气象, 2001, 27(1):26 - 28.
JIANG Xuegong, SUN Yonggang, SHEN Jianguo. A numerical simulation and contrast test on a northeastern vortex rainstorm[J]. Meteorological Monthly, 2001, 27(1):26 - 28. (in Chinese)
- [9] 陈力强,陈受钧,周小珊,等. 东北冷涡诱发的一次 MCS 结构特征数值模拟[J]. 气象学报, 2005, 63(2):173 - 183.
CHEN Liqiang, CHEN Shoujun, ZHOU Xiaoshan, et al. A numerical study of the MCS in a cold vortex over northeastern China[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2005, 63(2):173 - 183. (in Chinese)
- [10] 寿绍文. 天气学分析[M]. 北京:气象出版社, 2002:149 - 153.
SHOU Shaowen. Weather Analysis[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2002:149 - 153. (in Chinese)
- [11] 郭荣芬,李英,杨向东,等. 非地转湿 Q 矢量在云南冬季强降水中的分析应用[J]. 气象, 2005, 31(2):12 - 16.
GOU Songfen, LI Ying, YANG Xiangdong, et al. Non - geostrophic wet Q - vector analysis and application of heavy precipitation in winter in Yunnan[J]. Meteorological Monthly, 2005, 31(2):12 - 16. (in Chinese)
- [12] 鲁亚斌,张腾飞,徐八林,等. 一次孟加拉湾风暴和冷空气影响下滇西大暴雨中尺度分析[J]. 应用气象学报, 2006, 17(2):201 - 206.
LU Yabin, ZHANG Tengfei, XU Balin, et al. Mesoscale analysis on a heavy rain associated with a Bengal Bay storm and cold air in west Yunnan

- [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 2006, 17(2):201-206. (in Chinese)
- [13] 李江南, 闫敬华, 魏晓琳, 等. 非地转强迫对 Fitow(0114)暴雨的影响[J]. 气象学报, 2005, 63(1):69-76.
LI Jiangnan, YAN Jinghua, WEI Xiaolin, et al. The effect of ageostrophic forcing on typhoon Fitow(0114) heavy rain[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2005, 63(1):69-76. (in Chinese)
- [14] 郭荣芬, 鲁亚斌, 李燕, 等. “伊布都”台风影响云南的暴雨过程分析[J]. 高原气象, 2005, 24(5):784-791.
GOU Rongfen, LU Yabin, LI Yan, et al. Analyses of a Yunnan rainstorm process influenced by the “Imbudo” typhoon[J]. Plateau Meteorology, 2005, 24(5):784-791. (in Chinese)
- [15] 俞小鼎, 姚秀萍, 熊廷南, 等. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京: 气象出版社, 2006.
YU Xiaoding, YAO Xiuping, XIONG Tingnan, et al. Doppler Weather Radar Principles and Business Applications[M]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese), 2006. (in Chinese)
- [16] 李国平, 刘行军. 西南低涡暴雨的湿位涡诊断分析[J]. 应用气象学报, 1994, 5(3):355-359.
LI Guoping, LIU Xingjun. The diagnostic analysis of wet potential vorticity of storm rainfall from the southwest vortex in China [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 1994, 5(3):355-359. (in Chinese)
- [17] 刘还珠, 张绍晴. 湿位涡与锋面强降水天气的三维结构[J]. 应用气象学报, 1996, 7(3):275-280.
LIU Huangzhu, ZHANG Shaoqing. Moist potential vorticity and the three dimensional structure of a cold front with heavy rainfall[J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 1996, 7(3):275-280. (in Chinese)
- [18] 杨莲梅, 杨涛. 阿克苏北部暴雨和冰雹湿位涡对比诊断分析[J]. 气象, 2005, 31(9):13-18.
YANG Lianmei, YANG Tao. Diagnostic analysis of moist potential vorticity for heavy rainfall and hail in oasis of northern Akesu[J]. Meteorological Monthly, 2005, 31(9):13-18. (in Chinese)
- [19] 吴国雄, 蔡雅萍, 唐晓菁. 湿位涡和倾斜涡度发展[J]. 气象学报, 1995, 53(4):387-404.
WU Guoxiong, CAI Yaping, TANG Xiaojing. Moist potential vorticity and slantwise vorticity development[J]. Acta Meteorologica Sinica, 1995, 53(4):387-404. (in Chinese)