

陈永林, 俞小鼎, 杨引明, 等. 2016. 江苏一次锢囚状 MCS 和相关中涡旋 MCV 的观测分析. 气象, 42(2):166-173.

江苏一次锢囚状 MCS 和相关中涡旋 MCV 的观测分析^{* 1}

陈永林¹ 俞小鼎² 杨引明^{1,3} 王 慧¹ 刘红亚¹

1 上海中心气象台, 上海 200030

2 中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081

3 上海市气象局, 上海 200030

提 要: 利用常规地面和高空气象观测资料, 结合气象卫星云图和雷达回波, 分析了 2009 年 6 月 14 日 15—23 时(北京时, 下同), 造成江苏强对流天气的一个中尺度对流系统(MCS)的锢囚状特征的形成过程及其垂直结构。地面中尺度分析表明, 雷暴高压东侧在飑前倒槽北端发展的闭合低压环流的东南气流将暖湿空气输送到冷性雷暴高压的北侧形成东南—西北向的暖舌, 从而形成锢囚状的结构。长三角探空网资料的垂直结构分析表明, 在对流层下部地面到 850 hPa 为冷性的雷暴高压, 在对流层中部 700 hPa 为冷性的 α 中尺度涡旋(MCV), 而 500 hPa 已转变为暖性的 MCV。静力学关系可以说明 MCV 仅仅存在于 700~500 hPa 的原因和 MCS 下冷上暖的热力结构密切相关。

关键词: 强对流, 锢囚状, 中尺度对流系统, 中尺度涡旋

中图分类号: P458

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2016.02.004

Analysis of an Occluded-Shape Mesoscale Convective System (MCS) and Concomitant Mesoscale Convective Vortex (MCV) in Jiangsu

CHEN Yonglin¹ YU Xiaoding² YANG Yinming^{1,3} WANG Hui¹ LIU Hongya¹

1 Shanghai Central Meteorological Observatory, Shanghai 200030

2 China Meteorological Administration Training Centre, Beijing 100081

3 Shanghai Meteorological Service, Shanghai 200030

Abstract: Using conventional surface and upper air observation data, meteorological satellite cloud images and radar data, we analyzed the occluded characteristics and vertical structure of a mesoscale convective system (MCS) that happened in Jiangsu Province on 14 June 2009. By analyzing the mesoscale circulation on the ground surface we found that the southeast flow of closed cyclonic circulation, which developed in the eastern side of thunderstorm high pressure and the northern end of inverted trough, transported the warm and moist air to the northern side of cold thunderstorm high, forming a SE—NW oriented warm tongue and then the occluded structure. Meanwhile, based on the vertical structure of sounding data in Yangtze River Delta, the paper showed that there was cold thunderstorm high between the surface and 850 hPa, and warm meso- α scale convective vortex from 700 hPa to 500 hPa. From the statics relationship, we learned that the reason why the mesoscale convective vortex (MCV) only existed in the height of 700 hPa to 500 hPa is closely related to the thermal structure of mesoscale convective system (MCS) which was warm in the upper level but cold in the low level.

* 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306010)和国家自然科学基金项目(41475040)共同资助

2015 年 8 月 3 日收稿; 2015 年 11 月 11 日收修定稿

第一作者: 陈永林, 主要从事天气分析和预报研究. Email: yl-901@163.com

Key words: severe convection, occluded-shape, mesoscale convective system (MCS), mesoscale convective vortex (MCV)

引 言

中尺度对流系统 (MCS) 指水平尺度为 10~2000 km 具有旺盛对流运动的天气系统, 对中纬度 MCS 组织形式的分类方法有多种 (寿绍文, 2003)。Blanchard 等 (1990) 将 MCS 分为线状对流系统、锢囚状对流系统、混乱对流系统三类。该研究的 25 个 MCS 中有 17 个线状对流系统, 而锢囚状对流系统只有两个, 二者在热力和动力结构上均有明显差异。锢囚状对流系统的强回波带具有“人”字形的组织形式, 它经历了两条强回波带交叉 (发生发展阶段)、弓形弯曲 (成熟阶段) 和涡旋回波 (消散阶段) 3 个阶段。

孙健等 (2004) 在对香港特大暴雨、卓鸿等 (2004) 对黄河下游强对流过程和慕建利等 (2008) 对华南特大暴雨的分析中也提到类似的回波特征, 说明锢囚状中尺度对流系统在中国也具有一定的代表性, 是造成暴雨等灾害性天气的重要中尺度对流系统。易笑园等 (2011) 用数值模拟方法对 2007 年 7 月 18 日华北东部一个 α 中尺度对流系统 $M_{\alpha}CS$ 的多尺度空间、动力结构及其演变进行了研究, 指出 $M_{\alpha}CS$ 尚未锢囚时, γ 中尺度对流系统 $M_{\gamma}CS$ 非常活跃, 造成多处强降水; 锢囚时, $M_{\alpha}CS$ 内部有强烈的上升气流。锢囚状中尺度对流系统与锢囚锋天气系统在尺度上虽有不同, 但在形态上和形成机理上, 却有相似之处。中尺度涡旋 (mesoscale convective vortex, MCV) 是 MCS 中大量的凝结潜热释放伴生出中尺度涡旋。Bartels 等 (1991) 在研究 1981—1988 年美国中部出现的 MCV 中指出, MCV 大部分发生在较大的 $M_{\alpha}CS$ 中, 只有少数尺度较小、生命期较短的 β 中尺度对流系统 $M_{\beta}CS$ 中能够观测到 MCV, 其总数约只占 $M_{\beta}CS$ 的 5%, 而 50% 的 $M_{\alpha}CS$ 中可以发现 MCV。杨引明等 (2010) 在长江下游梅雨期低涡统计分析中指出, 长江下游地区中尺度低涡一般存在于 700 hPa 以下的对流层低层, 水平尺度普遍在 400 km 之内。张元春等 (2013) 对 2003、2007 年江淮梅雨期利用高空资料对 MCV 进行了统计分析, 表明活跃在梅雨锋上的 MCV 与强降水有关, 2 年中共有 9 个 MCV 发生。MCV 一般发生在强对流系统的北侧, 其涡旋环流一般在 600

hPa 以下。李云川等 (2003) 对 2002 年 7 月发生在河北的强对流天气进行了分析, 表明中尺度涡旋发生于斜压弱锋区中的 850 hPa 附近。近几年, 有不少学者 (公颖等, 2005; 吴芳芳等, 2012; 赵坤等, 2008; 陈永林等, 2013; 2007; 陶岚等, 2014; 潘玉洁等, 2008; 罗爱文等, 2015; 马中元等, 2014) 对中尺度对流系统伴有中气旋的天气系统做了研究。

根据雷达回波系统定义的锢囚状 MCS 和根据卫星云图定义的 MCV 的共同特点都是具有涡旋特征, 两者之间理应存在必然的联系。因此对 MCV 的研究应将雷达、卫星和地面高空观测结合起来才能揭示锢囚状 MCS 和 MCV 的联系和全貌。2009 年 6 月 14 日江苏中南部处在东北冷涡前倾槽末端, 东北冷涡冷气团与高原东部暖气团密集等温线锋区区域, 850 与 500 hPa 垂直温度差值达 30~33℃ (正常值为 25℃), 地面极端最高气温 37℃。在这个气团极度不稳定的区域, 16:18—19:51 南通爆发了缓慢朝东北移动的 β 中尺度对流系统 $M_{\beta}CS$, 17:56—18:53 扬中爆发了准静止 γ 中尺度对流系统 $M_{\gamma}CS$, 15:00—23:00 洪泽湖—太湖爆发了快速朝东南移动的 α 中尺度对流系统 $M_{\alpha}CS$ 。然而, 其中的 $M_{\alpha}CS$ 在 20 时南京、上海、杭州 700 hPa 高度上突然出现一个完整的气旋式辐合环流, 但在前 12 h 的 14 日 08 时和后 12 h 的 15 日 08 时图上, 南京、上海、杭州均为一致的西北气流。根据中尺度涡旋 MCV 是中尺度对流系统 MCS 在爆发过程中, 大量的凝结潜热释放, 导致气层增热降压而伴生形成的研究成果。对此认为, 14 日 20 时 700 hPa 上南京、上海、杭州所形成的气旋式辐合环流, 就是 20 时位于南京、上海、杭州之间的 $M_{\alpha}CS$ 在近地面降水拖曳形成冷丘的同时, 在对流层中部伴生 MCV, 这是一个十分难得的研究个例。因此, 本文将利用高空、地面、气象卫星云图、多普勒雷达探测资料, 研究其形成过程及其所伴生的 MCV 结构。

1 天气实况、环流背景和中尺度涡旋

1.1 天气实况

图 1 为 2009 年 6 月 14 日 15—23 时爆发于南

通、扬中和洪泽湖—太湖的三个 MCS 的雷达特征回波和相应的三片天气区。图中看到, A 片为 16:18—19:51 爆发于南通, 缓慢朝东北移动的 $M\beta$ CS, 它给南通带来了雷雨, 直径 60 mm 的冰雹, 最大雷雨大风 $25.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 最大降水量 31.9 mm (图 1a~1d)。其回波最大强度达 70 dBz, 并有长钉状三体散射特征(图 1b), 在西北和东南侧出现了明

显的阵风锋弱回波(图 1c), 以及出现了显著的悬垂回波及有界弱回波区(图 1f); B 片为 17:56—18:53 爆发于扬中、呈准静止的 $M\gamma$ CS, 它给扬中带来了雷雨, 最大降水量 57 mm; C 片为爆发于 15:00—23:00 洪泽湖—太湖、快速朝东南移动的 $M\alpha$ CS, 它给这些地区带来了雷雨, 最大雷雨大风 $20.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 最大降水量 36 mm。

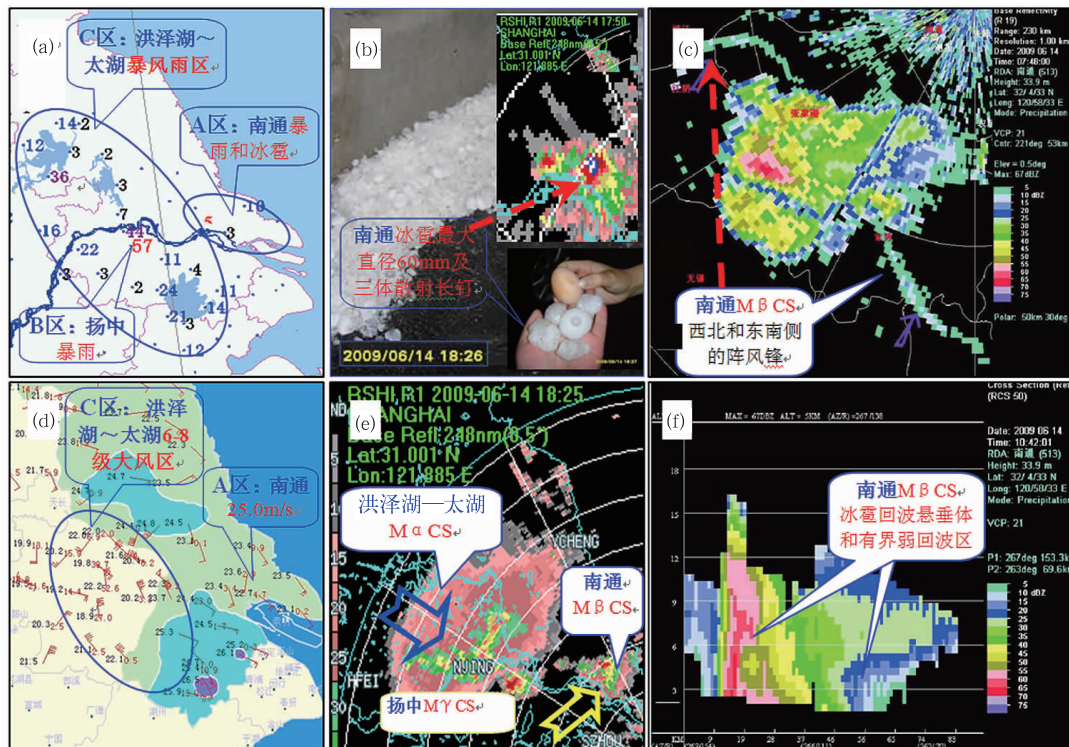


图 1 2009 年 6 月 14 日 15—23 时江苏强对流天气实况和雷达反射率因子

- (a) 江苏降水区, (b) 18:26 南通最大冰雹直径 60 mm 和 $M\beta$ CS 反射率三体散射长钉, (c) 15:48 南通 $M\beta$ CS 反射率因子, (d) 20:30 江苏风场(南通最大阵风 $25.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), (e) 18:25 南通 $M\beta$ CS、扬中 $M\gamma$ CS、洪泽湖 $M\alpha$ CS(图中箭头表示对流系统移动方向), (f) 18:42 反射率因子垂直剖面图(图中基线: $267^\circ/154 \text{ km} \sim 263^\circ/70 \text{ km}$)

Fig. 1 Severe convective weather and radar reflectivity factor in Jiangsu province at 14 June 2009

- (a) precipitation, (b) hail diameter and $M\beta$ CS three body scattering spikes at Nantong, (c) $M\beta$ CS reflectivity factor at Nantong, (d) wind, (e) radar reflectivity of $M\beta$ CS at Nantong, $M\gamma$ CS at Yangzhong, $M\alpha$ CS at Hongze Lake, (f) vertical cross section of reflectivity factor (reference line: $267^\circ/154 \text{ km} - 263^\circ/70 \text{ km}$)

1.2 环流背景

从图 2 给出的 2009 年 6 月 14 日 20 时 200~850 hPa 天气系统的综合分析和云图叠加配置图可以看到, MCS 发生于东北冷涡前倾槽的末端和东北冷涡冷气团与高原东部暖气团之间的等温线密集区域。对流发生区域对应于 850 hPa 及以下有来自江

苏沿海海面的东南暖湿气流; 500 hPa 及以上有明显的冷平流。在这之前的 14 日 08 时资料表明, 南京 700~925 hPa 温度垂直递减率接近干绝热垂直递减率 γ_d , 上海 SI 指数为 -3.21°C , 612 hPa 高度上的假相当位温仅 41.9°C , 而 978 hPa 高度上达 73.6°C , 即对流发生前大气层结处于潜在不稳定状态。而且, 14 时在安徽北部—上海新生地面辐合线(图 4a)。

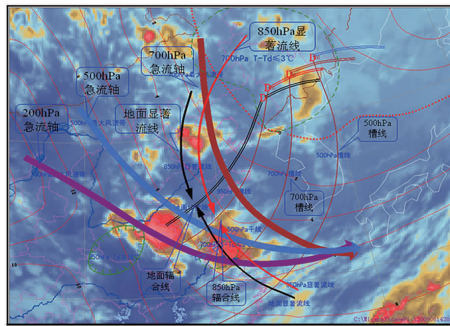


图2 2009年6月14日20时(北京时间)
天气系统综合分析及其卫星云图

(紫色箭头 200 hPa 急流轴, 蓝色箭头 500 hPa 急流轴, 棕色箭头 700 hPa 急流轴, 红色箭头 850 hPa 显著流线, 黑色箭头地面显著流线, 洪泽湖附近的绿色点线 700 hPa $T - T_d \leq 3^\circ\text{C}$ 饱和区, 绿齿轮线 850 hPa $T_d \geq 16^\circ\text{C}$ 高湿区, 虚线 700 hPa 的 2°C 间隔等温线)

Fig. 2 Comprehensive analysis of weather system and satellite cloud image

(purple arrow: axis of jet stream at 200 hPa, blue arrow: axis of jet stream at 500 hPa, brown arrow: axis of jet stream at 700 hPa, red arrow: significant streamline at 850 hPa, black arrow: significant streamline on the ground, green dot line: $T - T_d \leq 3^\circ\text{C}$ saturation region around the Hongze Lake at 700 hPa, green toothed line: $T_d \geq 16^\circ\text{C}$ high moist region at 850 hPa, dashed line: isotherm with the interval of 2°C at 700 hPa)

1.3 中尺度涡旋 MCV

对流发生前的 08 时, 南京 700~925 hPa 温度垂直递减率 接近干绝热垂直递减率 γ_d , 当太阳辐射导致近地面气层温度进一步升高、增温至与上空气层温度有足够大温差时, 近地面辐合发挥作用而触发对流爆发, 15—23 时在南通爆发了缓慢朝东北移动的 $M\beta\text{CS}$, 扬中爆发了呈准静止的 $M\gamma\text{CS}$, 洪泽湖—太湖爆发了快速朝东南移动的 $M\alpha\text{CS}$, 其中的 $M\alpha\text{CS}$ 在快速朝东南移动中与 $M\gamma\text{CS}$ 相遇而发展为锢囚状 MCS(图 4c) 和伴生中尺度涡旋 MCV。

2 锢囚状 MCS 及伴生 MCV 的形成演变过程

2.1 卫星、雷达图像分析

图 3o、3p 分别为 2009 年 6 月 14 日 20:42 MCS

的雷达图像和锢囚系统模型图。图中看到, 14 日 20:42 雷达图像上的冷锋云系、暖锋云系、锢囚云系, 与模型中的冷锋云系、暖锋云系、锢囚云系等形态十分相似。因此, 有理由认为 2009 年 6 月 14 日的 MCS 过程为锢囚状 MCS。其过程可分为 15—18 时的发展阶段, 19—21 时的锢囚阶段, 22 时的消散阶段。

(1) 发展阶段(15—18 时): 卫星图像上, MCS 由东北—西南向的线状演变为椭圆形, 云顶最低亮温降至 -77°C , 面积达到 MCC 的标准(图 3a~3d)。雷达图像上, MCS 的 50 dBz 以上强回波由一个点发展为线状特征(图 3i~3j)。

(2) 锢囚阶段(19—21 时): 卫星图像上, MCS 的椭圆形长轴由东北—西南向演变为西北—东南向的涡旋形态, 西南象限伸展出尖角状冷锋特征云系, 东部象限伸展出尖角状暖锋特征云系, 后部因下沉冷流形成圆弧状扇形边界, 整体形态具有锢囚特征(图 3e~3g)。雷达反射率图像与卫星图像类似, MCS 的椭圆形弱回波长轴由东北—西南向演变为西北—东南向的涡旋形态。50 dBz 以上的强回波从弱回波的中部快速东移到达弱回波的前部, 并演变为弓状回波。重要的是, 弓状回波在快速东移中与扬中准静止 $M\gamma\text{CS}$ 回波碰并形成“人”字形或锢囚状结构(图 3k~3m)。

(3) 消散阶段(22 时): 卫星图像上, MCS 的云顶亮温升高, 锢囚状涡旋特征也变得模糊不清(图 3h)。雷达反射率图上, MCS 的涡旋特征回波也变得残缺不全(图 3n)。

由此可见, 洪泽湖 $M\alpha\text{CS}$ 在快速东移中与扬中准静止 $M\gamma\text{CS}$ 合并, 形成了“人”字型冷暖锋气旋特征, 而且进一步演变为锢囚状涡旋。其形成过程与易笑园等(2011)的研究一致, 其组织形式属于 Blanchard 的 MCS 分类(线状、锢囚、混乱)中的锢囚对流系统。

2.2 温压场分析

图 4 为 2009 年 6 月 14 日 14—23 时地面中尺度分析及雷达回波叠置图。图中看到, 14 时安徽北部—上海为低槽辐合线(图 4a), 其北侧等温线较为密集, 表明辐合线北侧具备斜压抬升条件。17 时源于山东的 MCS 南下进入安徽低槽辐合区(图 4b), 受辐合和斜压动力作用, 降水回波迅速加强至 50 dBz。强降水拖曳的湿绝热下沉冷流使地

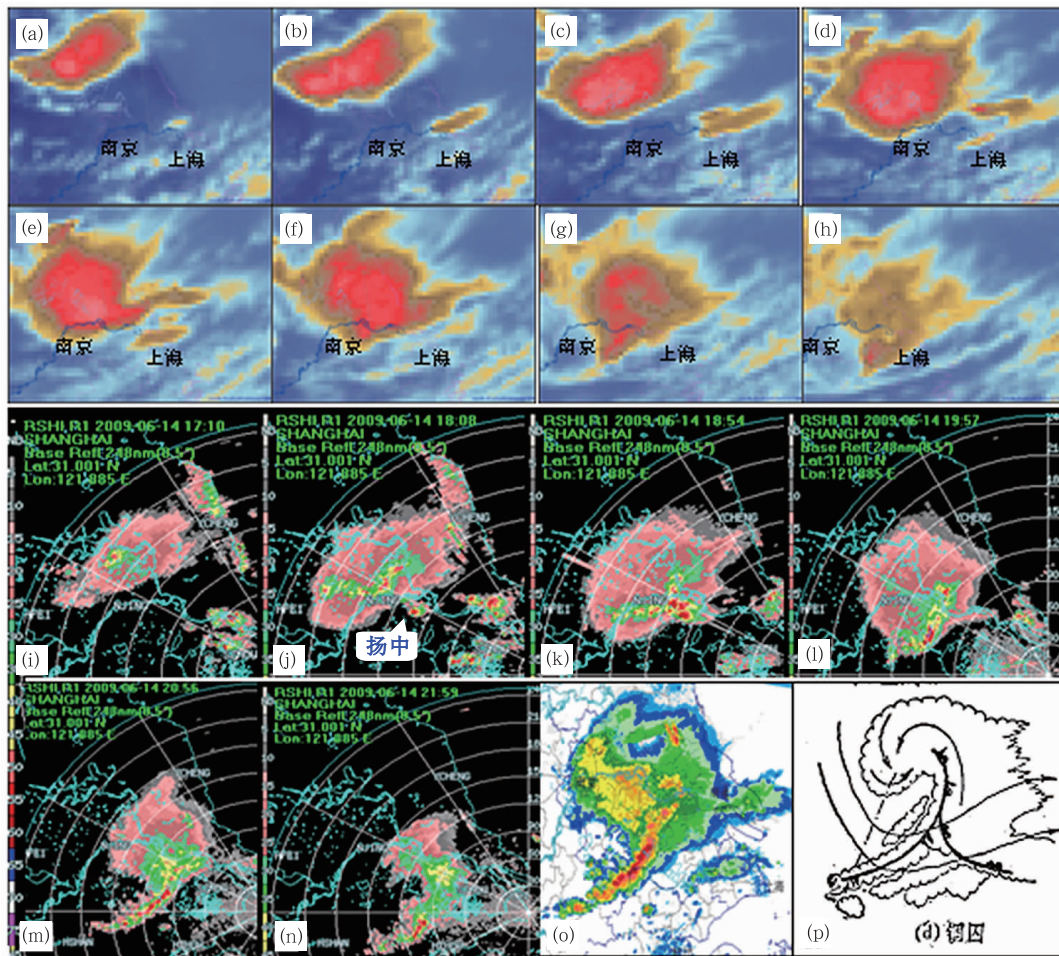


图 3 2009 年 6 月 14 日 15—22 时 FY-2 红外云图和 17:10—21:59 雷达反射率因子以及锢囚状温带气旋示意图

(a) 15:00, (b) 16:00, (c) 17:00, (d) 18:00, (e) 19:00, (f) 20:00, (g) 21:00, (h) 22:00, (i) 17:10, (j) 18:08, (k) 18:54, (l) 19:57, (m) 20:56, (n) 21:59, (o) 20:42, (p) 示意图

Fig. 3 FY-2 infrared cloud images, radar reflectivity factor and occluded extratropical cyclone mode from 15:00 BT to 22:00 BT 14 June 2009

(a) 15:00, (b) 16:00, (c) 17:00, (d) 18:00, (e) 19:00, (f) 20:00, (g) 21:00, (h) 22:00, (i) 17:10, (j) 18:08, (k) 18:54, (l) 19:57, (m) 20:56, (n) 21:59, (o) 20:42, (p) mode

面气温从 32°C 下降至 20°C , 冷中心位于洪泽湖地区并形成 1006 hPa 的中尺度雷暴高压, 同时在雷暴冷高压前部强烈的温度对比形成与冷锋相类似的特征, 使原来西北—东南向的低槽辐合线, 因雷暴冷高压旋转 90° 而演变为西南—东北走向的飑前倒槽; 20 时随着回波的进一步加强和快速东移, 逐渐演变为弓状回波(图 4c), 地面气温下降至 19°C , 气压上升至 1011 hPa , 冷丘变得高大, 冷锋长度达到约 280 km 。而冷锋前部的偏南气流将暖空气一直送往江苏中部的洪泽湖一带, 形成大振幅暖脊, 即暖脊与西侧新生冷高压和东侧海上冷高压构成锢囚锋结构。新生雷暴高压的斜压作用使得对流更加旺盛, 弓状

回波的最大强度达到 65 dBz 。重要的是, 处在槽后强盛西北引导气流中的洪泽湖 $M_{\alpha}\text{CS}$ 在加速东南移中与其前部处在低压槽内的扬中准静止 $M_{\gamma}\text{CS}$ 相遇, 使气流形成正交继而发生旋转。同时, 弓状回波与准静止回波的相遇导致两个强对流降水系统的潜热释放反馈给同一个气柱加热, 被加热的气柱降压而形成低压, 低压梯度力与科氏力通过自适应过程而形成涡旋, 即 MCS 完成弓状回波到锢囚状结构的调整。该涡旋处于弓状回波与准静止回波的结合点, 即处于飑前倒槽的北端。由于对流降水潜热释放加热主要发生在对流层中下部, 因此该涡旋的主要环流在 $850\sim 700\text{ hPa}$, 即中尺度涡旋 MCV

伴随锢囚状 MCS 的形成而出现;23 时虽然雷达回波已经明显减弱,但冷丘范围还在进一步扩展、冷锋长度进一步延伸,地面温压场的锢囚状特征仍继续维持(图 4d)。

上述分析表明,强降水拖曳形成的地面雷暴高

压和冷丘,以及飚前倒槽北端低压环流的形成是 MCS 演变为锢囚状锋面特征的重要原因,而两个对流系统相遇其潜热释放对气团的集中加热和两支气流交叉是伴生 MCV 形成的重要原因。

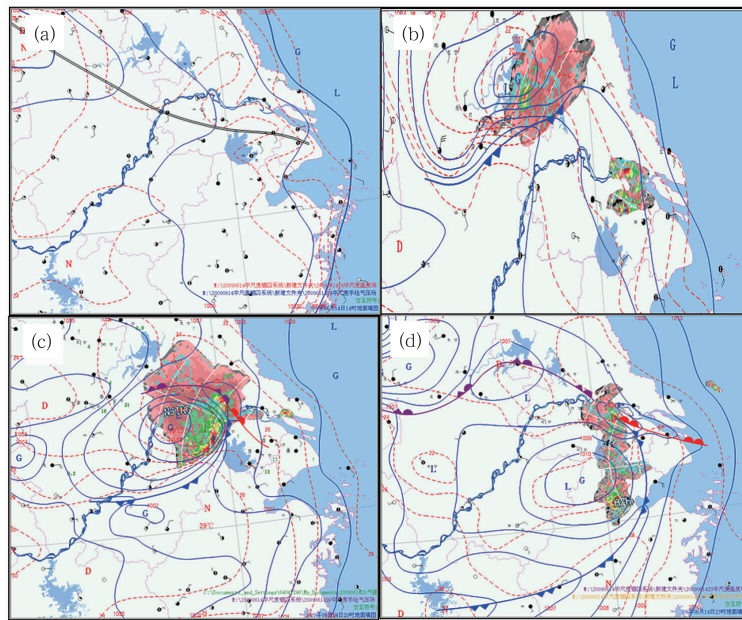


图 4 2009 年 6 月 14 日 14—23 时地面中尺度分析及雷达回波叠置图
(a) 14 时, (b) 17 时, (c) 20 时, (d) 23 时

(图中实线为中尺度气压分析场,1.0 hPa 间隔;虚线为地面气温分析场,
2.0℃间隔;粗黑线为地面辐合线,锯齿线为锢囚锋、冷锋、暖锋,
D 为低压中心,G 为高压中心,L 为冷中心,N 为暖中心)

Fig. 4 Surface mesoscale circulation analysis and radar reflectivity
at (a) 14:00, (b) 17:00, (c) 20:00, (d) 23:00 14 June 2009
(solid line: mesoscale pressure field, dashed line: temperature field,
heavy line: surface convergence line, jaggy line: occluded front,
clod front, warm front, D: low-pressure center, G: high-pressure center,
L: cold air center, N: warm air center)

2.3 锢囚状 MCS 和伴生 MCV 的空间结构

用 1℃ 间隔的等温线,1 hPa 间隔的等压线,1 dagpm 间隔的等高线,分析得到的 2009 年 6 月 14 日 20 时地面、925、850、700、500、400 hPa 形势图,可以清楚地展示出这个典型的锢囚状 MCS 垂直结构,是如何从地面冷性的雷暴高压随高度逐渐转变为一个 MCV(图 5)。如前所述,地面分析显示,与锢囚状 MCS 雷达回波相配合的是一个中尺度雷暴高压,其温度比周边环境低 4~9℃,中心气压比周边环境高 3~6 hPa。在 925 hPa 等压面上,这个冷性的中尺度高压仍然非常清晰,其中心的温

度和高度与周边的大尺度环境相差 3~5℃ 和 2~4 dagpm,南京上空的西北风显示出与中高压相配合的反气旋式环流。在 850 hPa 高度,中尺度高压仍然存在,但强度已明显弱于 925 hPa,与周边环境分别差 4~9℃ 和 1~2 dagpm,850 hPa 南京的西北偏北风和安庆的东南偏南风还能构成比较清楚的反气旋式环流,但是它和上海的东南风、杭州的南风之间又显示出气旋式环流的特征,而且南京风速达 22 m·s⁻¹,表明涡旋中心就在南京附近。在 700 hPa 等压面上,温度场仍比周边低 2℃,但高度场已演变为比周边环境低 2~3 dagpm 的中低压,南京、上海、杭州三站的风构成一个完整的气旋式环流,可以认

为是一个对流导致的中尺度冷性涡旋 MCV。在 500 hPa 等压面上,仍能分析出闭合的低压中心,但是风场上南京为西南风,周边没有东北风与它构成完整的气旋式环流。同时,闭合的冷中心也已不再存在,温度场演变为南暖北冷大尺度温度场中一个中尺度暖脊,但中低压还存在。到 400 hPa 等压面,

高度场、风场和温度场上的闭合中心全部消失,演变为在西北—东南向大尺度风场中的一个小槽。

图 6 给出的以南京为中心的垂直剖面图上温度和露点的分布可以大致反映出锢囚状 MCS 的垂直结构。图中南京上空 850 hPa 以下为下凹的等露点线,反映强降水拖曳湿绝热冷却造成的冷丘顶部大

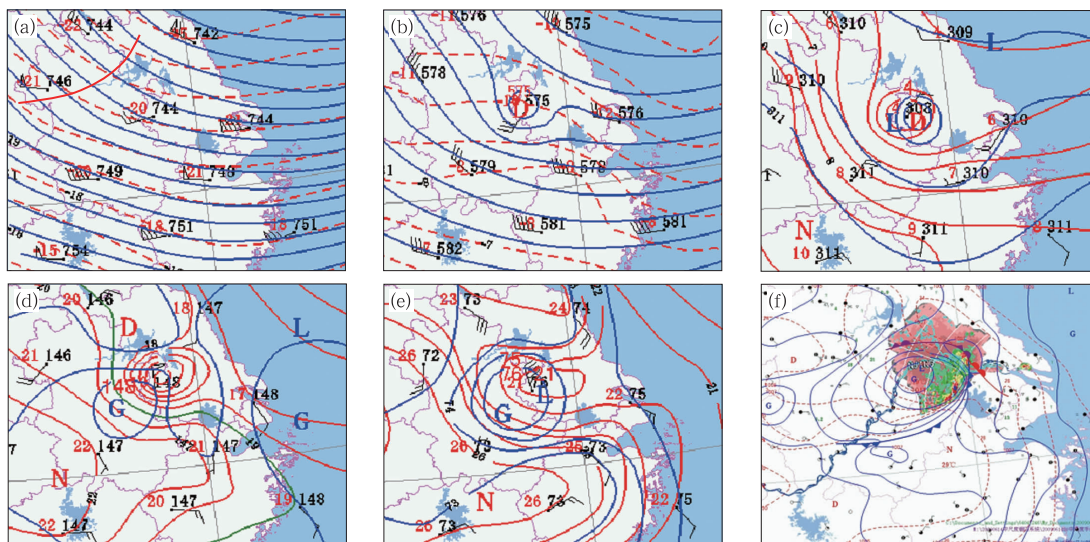


图 5 2009 年 6 月 14 日 20 时 400 hPa 至地面分析图

(a) 400 hPa, (b) 500 hPa, (c) 700 hPa, (d) 850 hPa, (e) 925 hPa, (f) 地面图
Fig. 5 Analysis chart of circulation from 400 hPa to the ground
(a) 400 hPa, (b) 500 hPa, (c) 700 hPa, (d) 850 hPa, (e) 925 hPa, (f) surface

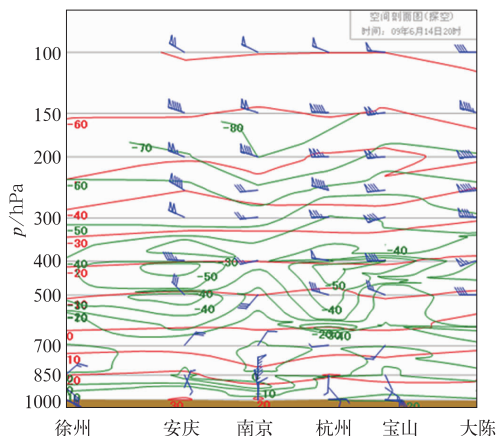


图 6 以南京站为中点的西北—东南垂直剖面图 (图中的红线为等温线,单位:℃; 绿线为等露点温度线,单位:℃)

Fig. 6 NW-SE oriented vertical cross section through Nanjing Station (red line: isotherm, unit: ℃; green line: dew-point isotherm, unit: ℃)

约在 850 hPa 附近。700 hPa 以上,特别是 500 hPa 高度等露点线的上突,反映 MCS 在对流层中部的潜热加热。按照静力学关系,正是这种下冷上暖的结构造成了 MCS 伴生的 MCV 位于 700~500 hPa 附近的对流层中部,即:地面冷性雷暴高压属于浅薄的高压系统,随高度减弱;到 850 hPa 以上转变为冷性低压为深厚的低压系统随高度较增强;500 hPa 以上变为暖性,低压消失。

上述分析表明,在对流层下部地面到 850 hPa 为冷性的雷暴高压,在对流层中部 700 hPa 为冷性的 α -中尺度涡旋(MCV),而 500 hPa 已转变为暖性的 MCV。其空间位置在 700~500 hPa,水平尺度 250 km,这与杨引明等(2010)在长江下游梅雨期 MCV 的尺度统计数据一致。

2.4 锢囚状 MCS 伴生 MCV 形成的物理机制及与其他 MCS 过程的区别

(1) 本文锢囚状 MCS 形成的物理机制

首先,锢囚状 MCS 形成在东北冷涡前倾槽末端的密集锋区中,大气处于上冷下暖潜在不稳定环境条件下,700~925 hPa 温度垂直递减率接近干绝热垂直递减率 γ_d ,612 hPa 与 978 hPa 假相当位温差达 31.7°C。在午后安徽北部—上海新生地面辐合线的触发下,爆发多尺度中尺度对流系统,洪泽湖—太湖的 MCS 为快速向东南移动的弓状 $M_{\alpha}CS$,扬中的 MCS 为呈准静止的 $M_{\gamma}CS$ 。重要的是,雷暴下沉气流和降水拖曳形成冷丘后,新生冷锋前部的偏南气流将暖空气进一步往北输送形成暖脊,与东部沿海较低气温形成暖锋,在冷暖锋交点以北一线暖脊的东西两侧分别为新生冷高压锋区和海上弱冷空气锋区形成锢囚锋,即锢囚状 MCS 发展形成。新生冷锋后部的弓状回波在往东南快速移动中和准静止回波相遇,形成两支气流交叉而发生旋转,同时两个强降水系统潜热释放加热同一个气柱导致迅速增温降压,在受科氏力作用下,低压加速旋转。由于加热主要发生在对流层中下部,因此 MCV 主体位于 850~700 hPa 之间。

(2)与其他 MCS 过程的区别

在夏季,类似的 MCS 个例很多,但要达到本文个例的背景条件,尤其是雷达回波在发展东移中加强为弓状特征的 MCS 不多,与前部准静止 MCS 碰并形成两支气流交叉、两个强降水系统集中加热同一个气柱的个例则更少。另外,本文个例正好发生在 20 时探空时刻,MCV 被捕获也属于偶然事件。

3 结 论

导致 2009 年 6 月 14 日 14—23 时江苏南通、扬中和洪泽湖—太湖地区强对流天气的 MCS 是一次比较典型的锢囚状 MCS。雷暴高压东侧飊前倒槽北端发展的闭合低压环流的东南气流将暖湿空气输送到冷性雷暴高压的北侧形成东南—西北向的暖舌,从而形成锢囚状的结构。比较稠密的地面观测资料和探空资料揭示该系统在对流层下部的地面到 850 hPa 为冷性的雷暴高压,在对流层中部 500 hPa 为暖性的 α 中尺度涡旋(MCV)。静力学关系可以

说明 MCV 仅仅存在于对流层的原因和 MCS 下冷上暖的热力结构密切相关。

致谢:感谢陶祖钰老师的热情指导!

参考文献

- 陈永林,曹晓岗,刘敏,等.2013.一次源于高原东侧低涡的江淮气旋形成及结构分析.热带气象学报,29(5):793-802.
- 陈永林,杨引明,曹晓岗,等.2007.上海 0185 特大暴雨的中尺度强对流系统活动特征及其环流背景的分析研究.应用气象学报,18(1):30-35.
- 公颖,周军,李红莉.2005.梅雨锋上中尺度涡旋与高低层流型演变的关系.气象,31(11):34-38.
- 李云川,王福侠,裴宇杰,等.2003.一次中尺度涡旋的成因分析.气象,29(11):33-35.
- 罗爱文,朱科锋,方茸,等.2015.江淮地区弓状回波的分布和环境特征分析.气象,41(5):588-597.
- 马中元,苏俐敏,湛芸,等.2014.一次强飊线及飊前中小尺度系统特征分析.气象,40(8):916-929.
- 慕建利,王建捷,李泽椿.2008.2005 年 6 月华南特大连续性暴雨的环境条件和中尺度扰动分析.气象学报,66(3):437-451.
- 潘玉洁,赵坤,潘益农.2008.一次强飊线内强降水超级单体风暴的单多普勒雷达分析.气象学报,66(04):621-636.
- 寿绍文.2003.中尺度气象学.北京:气象出版社,72.
- 孙健,刘淑媛,陶祖钰,等.2004.1998 年 6 月 8—9 日香港特大暴雨中尺度对流系统分析.大气科学,28(5):713-721.
- 陶岚,袁招洪,戴建华,等.2014.一次夜间弓形回波特征分析.气象学报,72(02):220-236.
- 吴芳芳,俞小鼎,张志刚,等.2012.对流风暴内中气旋特征与强烈天气.气象,38(11):133 于 138.
- 杨引明,谷文龙,赵锐磊,等.2010.长江下游梅雨期低涡统计分析.应用气象学报,21(1):11-18.
- 易笑园,李泽椿,姚学祥.2011.一个锢囚状中尺度对流系统的多尺度结构分析.气象学报,69(2):249-262.
- 张元春,孙建华,徐广阔.2013.江淮流域两次中尺度对流涡旋的结构特征研究.气候与环境研究,18(3):271-287.
- 赵坤,周仲岛,潘玉洁,等.2008.台湾海峡中气旋结构特征的单多普勒雷达分析.气象学报,66(4):637-651.
- 卓鸿,姚秀萍,郑永光.2004.黄河下游春季一次 $M_{\alpha}CS$ 暴雨过程的综合分析.气象学报,62(4):504-511.
- Bartels D L, Maddox R A. 1991. Midlevel cyclonic vortices generated by mesoscale convective systems. Mon Wea Rev, 119: 104-118.
- Blanchard D O. 1990. Mesoscale convective patterns of the Southern High Plain. Bull Amer Meteor Soc,71(7):994-1005.