

吴涛, 张家国, 牛奔, 2017. 一次强降水过程涡旋状 MCS 结构特征及成因初步分析[J]. 气象, 43(5):540-551.

一次强降水过程涡旋状 MCS 结构特征 及成因初步分析^{*1}

吴 涛 张家国 牛 奔

武汉中心气象台, 武汉 430074

提 要: 利用新一代天气雷达资料分析了造成 2011 年 6 月 18 日湖北省江汉平原强降水涡旋状中尺度对流系统(MCS) 发生发展过程的结构特征, 联合常规观测、地面加密观测及雷达四维变分风场反演资料初步研究了 MCS 可能成因。结果表明: (1) 成熟阶段的强降水涡旋状 MCS 回波表现为气旋性弯曲的多条螺旋对流回波带、周围被大片层状云回波所包裹的结构特征, 后期因冷空气侵入演变出冷暖锋式结构。回波合并和旋转式列车效应是产生强降水的主要运动特征。(2) 涡旋状 MCS 是在有利环境场下, 主要由鄂西山地—江汉平原过渡带边界层中尺度涡旋系统强烈发展组织的结果。(3) 中尺度涡旋系统形成发展与地面暖倒槽发展、西南低涡前侧降水和特殊地形作用有密切关系, 来自不同方向气流形成的强烈辐合是其前期形成的主要机制, 后期发展可能与潜热释放有关, 涡旋环流向上发展到 700 hPa。

关键词: 强降水, 涡旋状 MCS, 结构特征, 成因分析, 中尺度涡旋系统

中图分类号: P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2017.05.003

Preliminary Analysis of Structure Characteristics and Causes for Heavy-Rain-Producing Vortex-Shaped MCS

WU Tao ZHANG Jianguo NIU Ben

Wuhan Central Meteorological Observatory, Wuhan 430074

Abstract: Radar echo characteristics of the vortex-shaped mesoscale convective system (MCS) that produced heavy rain in Jianghan Plain of Hubei Province on 18 June 2011 and the possible causes of MCS structure are analyzed by using Doppler radar data, conventional observations and dense surface observations and the radar 4D-Var wind retrieval data. The results show that: (1) Heavy-rain-producing vortex-shaped MCS echoes in mature stage showed multiple spiral convective echo belts with cyclonic curvature, surrounded by stratiform cloud echoes and evolving into the cold and warm frontal structure as a result of invasion of cold air. Echo merger and vorticity train effect are the main characteristics of motion in producing severe precipitation. (2) The vortex-shaped MCS which was in favorable environment was the result of severe development of boundary layer mesoscale vortex system in the transition zone of western Hubei mountain and Jianghan Plain. (3) The formation of the mesoscale vortex system was closely related to the development of the surface reverted warm trough, rainfall in the front of the southwest vortex and special terrain. Strong convergence of airflows from different directions was the main mechanism of the development in its earlier stage. The late development might be related to latent heat release, for the vortex circulation developed upward to 700 hPa.

* 中国气象局气象关键技术集成与应用项目(CMAGJ2015M38)、公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306008)、湖北省科技发展基金项目(2015Y02)和中国气象局卫星专项(FiDAF-2-01)共同资助

2016 年 5 月 22 日收稿; 2017 年 3 月 7 日收修定稿

第一作者: 吴涛, 主要从事强对流天气分析预报、雷达资料开发应用. Email: sywutao@163.com

通信作者: 张家国, 主要从事强对流天气分析预报. Email: wuhanzhangjianguo@sohu.com

Key words: severe precipitation, vortex-shaped MCS, structure characteristics, causes analysis, mesoscale vortex system

引言

2011年6月18日湖北省江汉平原经历了该省当年梅雨期间范围最大、强度最强的区域性暴雨过程,最大雨量超过150 mm。强降水起始于湖北、湖南西部的武陵山区,东移进入江汉平原。吴翠红和王珊珊(2012)、徐双柱等(2013)通过对主要影响天气系统的分析指出,此次江汉平原大暴雨与高原槽带动西南低涡东移、涡前中低层西南急流和偏东急流形成的辐合有关;雷达观测到中尺度对流系统(MCS)回波具有涡旋状特征,即涡旋状的MCS对此次强降水有重要贡献。

与气象卫星相比,天气雷达具有对降水三维空间结构的探测能力且时间和空间分辨率较高,是研究MCS结构特征(以下MCS结构特征指回波特征)的主要探测手段之一。过去30年间国外利用雷达反射率因子资料总结出5类常见的极端降水线状MCS,即尾随层状云(TS)MCS、平行层状云(PS)MCS、前导层状云(LS)MCS、伴随层状云(TL/AS)MCS和准静止(BB/QS)MCS(Bluestein and Jain, 1985; Bluestein et al, 1987; Schiesser et al, 1995; Parker and Johnson, 2000; Schumacher and Johnson, 2005),其中伴随层状云MCS和准静止MCS最易产生极端降水。极端降水线状MCS结构上包括对流性和层状云降水回波两部分,不同类型MCS的结构和运动特征有所不同,Parker and Johnson(2000)、Schumacher and Johnson(2005)重点从相对风垂直切变解释其形成原因。这些成果被收集到当今的美国暴雨预报手册中。

国内王晓芳和崔春光(2012)使用2010年6—7月雷达资料,按照国外技术方法分析了长江中下游地区梅雨期线状MCS特点,在原有极端降水线状MCS类型基础上增加了2类即镶嵌线状(EL)MCS、长带层状降水(LL)MCS。值得注意的是,强降水MCS回波形态具有多样性,除线状外还包括涡旋状(张培昌等,2002;孙莹等,2003;江玉华等,2005;张小玲等,2014)、锢囚状即人字形(易笑园等,2011)、卵状(张小玲等,2014)等其他非线性形态,研究发现涡旋状是湖北省区域性暴雨回波的主要形态

之一(张家国等,2011)。目前,人们认识到强降水涡旋状MCS回波的基本形态,然而对其发生发展过程的其他结构特征及成因分析还不够详细,虽然提到强降水涡旋状MCS与低涡系统有关(张培昌等,2002;孙莹等,2003;张家国等,2011),然而未充分使用观测资料分析两者之间的关系,对涡旋状MCS成因认识不够。

2011年6月18日江汉平原强降水涡旋状MCS除具有螺旋对流回波带结构外,还表现出其他特殊的结构特征,开展相关问题的深入研究非常必要。本文使用新一代天气雷达、常规观测、地面加密观测及雷达四维变分风场反演资料,重点分析造成江汉平原强降水涡旋状MCS发生发展过程的雷达回波特征,旨在从直接观测资料分析角度弄清强降水涡旋状MCS结构,并初步揭示其形成发展的原因。

1 资料和方法

本文使用的新一代天气雷达资料为SWAN(Severe Weather Analysis and Nowcasting System, SWAN,是中国气象局开发推广的短临预警业务系统)系统生成的三维反射率因子、组合反射率因子拼图产品,主要用于分析涡旋状MCS发生发展的结构特征。常规观测资料包括高空、地面天气图和 $T-\ln p$ 图,主要用来分析天气形势和环境场特征。地面加密观测资料为湖北省区域自动气象站逐小时观测数据,主要用于分析边界层中尺度天气系统演变特征及与MCS关系。由于基于多普勒天气雷达资料采用四维变分方法反演水平风场能较好反映中小尺度天气的动力结构(刘婷婷等,2014),使用荆州雷达基数据反演出不同高度的风场,主要用于分析中尺度天气系统的垂直结构演变及与MCS关系。

本文分析的涡旋状MCS及其他MCS回波均满足一定条件。参照Schumacher and Johnson(2005)使用雷达资料对MCS的分析标准,结合湖北省SWAN拼图产品回波强度特征,要求MCS对流性降水的组合反射率因子 >45 dBz、空间范围 >100 km且持续时间在3~24 h。除对流性降水回波外,MCS回波结构上还包括层状云降水回波。涡旋状MCS回波的一般基本特征为螺旋对流回波带结

构和涡旋运动。

2 涡旋状 MCS 降水特征

图 1 是涡旋状 MCS 影响下的湖北省强降水分布与地形叠加图。由图 1 可知,湖北省地势呈三面高起、中间低平、向南敞开、北有缺口分布,西、北、东三面被秦岭余脉、大巴山、武陵山、桐柏山、大别山、幕阜山等山地环绕且中北部有大洪山,中南部为江汉平原,汉江、长江分别从西北、偏西方向进入江汉平原。

涡旋状 MCS 产生的最大降水(总雨量超过 150 mm)主要位于鄂西山地与江汉平原过渡带,强降水分别起始于湖北西南部及湖南西北部的武陵山区,合并后东移进入江汉平原产生大范围强降水。吴翠红等(2013)使用近 10 年国家气象站雨量资料统计得出江汉平原南部是湖北省强降水源地之一,本次强降水源地及位置就出现在该区域,显然与复杂地形有密切联系。涡旋状 MCS 具有高降水率特征,有 10 个自动气象站点 3 h 雨量超过 100 mm,其中小时雨量最大值为 61~96 mm,出现在 2011 年 6 月 17 日 23 时至 18 日 06 时。高降水率除与旋转式列车效应有关外,还与不稳定层结、水汽和降水效率等环境场因素有关。

3 涡旋状 MCS 结构特征及演变

3.1 形成阶段

该阶段自 17 日 17 时至 18 日 01 时。不同来向的 MCS 回波合并加强形成人字形回波,并演变成 S 形涡旋状 MCS。合并后的 MCS 强度增强且东移缓慢,合并移动和旋转式列车效应导致持续性强降水。

17 日 17 时后,鄂西山地大片积层混合云降水回波东移,其中五峰一带有近南北走向短带状 MCS 发展(图 2a 中 A 所示,简称 MCS-A),下山过程中组合反射率因子增至 55 dBz,强回波(组合反射率因子 ≥ 45 dBz)范围扩大(图 2b)且顶高增加(图 3a, 3b),结构类似于尾随层状云 MCS。这期间湖南西北部有对流单体发展,组织成西北—东南走向的线状 MCS(图 2a 中 B 所示,简称 MCS-B),结构也类似于尾随层状云 MCS(图 3c)。随湖南 MCS-B 快速北抬和五峰 MCS-A 东移,两个 MCS 回波在鄂西山

地—江汉平原过渡地带合并成人字形回波(图 2c),合并区域回波强度最强,强回波顶高增至 10 km(图 3d)。此外,江汉平原至鄂东北一带有对流回波发展(图 2b 中 C 所示,简称 MCS-C),虽然 MCS-C 未直接参入涡旋状 MCS 形成过程,但对中尺度系统形成有重要作用(4.2 节中详细分析)。

18 日 00 时后,人字形回波西南端不断有对流单体新生,表现为块状、平行短带等不规则形态。随涡旋运动出现,01 时人字形回波演变成 S 形弯曲的螺旋回波带即涡旋状 MCS-D 形成(图 2d)。

该阶段 MCS 东移缓慢,且对流单体沿螺旋回波带运动产生旋转式列车效应。短时强降水位于人字形回波连接处和螺旋回波带中南部,最大小时雨量达 63 mm。

3.2 成熟阶段

该阶段自 18 日 01—05 时。涡旋状 MCS 表现为多条气旋性弯曲的螺旋对流回波带、周围被大片层状云降水回波所包裹的结构特征,后期随后部弱回波区发展,螺旋对流回波带演变出冷暖锋式结构。

成熟阶段涡旋状 MCS 回波包括多条螺旋对流回波带。实际上 S 形由两条螺旋对流回波带组成,其中向北涡旋运动的螺旋回波带强度减弱,而东移的螺旋回波带分裂为两条螺旋回波带即 MCS-D1 和 MCS-D2(图 2f, 2g),这期间还出现其他对流较弱的螺旋回波带。成熟阶段另一个重要结构特征为对流回波带被大片层状云降水回波所包裹(图 2e)。该特征在形成阶段的人字形回波中就已出现,维持至成熟阶段前期,是强降水涡旋状 MCS 的典型特征,反映了不同方向尾随层状云 MCS 合并形成涡旋状 MCS 的机制(4.2.4 节)。垂直结构上最强对流位于螺旋回波带南部(图 3f),该区域不断有新生对流单体并入。

螺旋回波带后部存在类似于缺口的弱回波区(图 7 中更清楚),中心区域甚至没有降水回波。02 时后,弱回波区范围逐渐扩大并卷入到涡旋 MCS 内部,使得包裹对流回波带的层状云降水回波强度减弱,强度梯度加大,螺旋回波带演变出较明显的冷暖锋结构。即在涡旋状 MCS 东南、东北象限分别有两个不同走向的 MCS-D1 和 MCS-D2(图 2f),并在涡旋运动带动下向东偏南、东偏北方向移动。以下分析(4.2.4 节)这种冷暖锋结构反映了涡旋 MCS 后部冷空气的卷入。

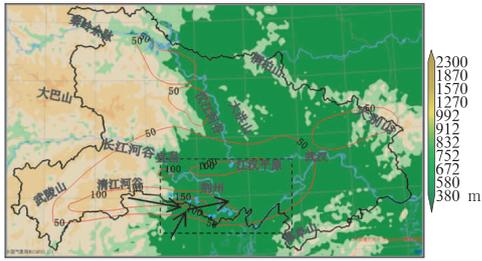


图 1 2011 年 6 月 17 日 20 时至 18 日 08 时强降水分布与地形叠加图

(色斑图为海拔高度场,粗黑线为湖北省边界,蓝色线为河流,红色线为雨量超过 50 mm 的等值线,带箭头直线为涡旋状 MCS 移动路径,虚线框为涡旋状 MCS 产生的强降水区域,圆点为 3 h 大暴雨的自动气象站)

Fig. 1 Overlap map of intensive precipitation distribution from 20:00 BT 17 to 08:00 BT 18 June 2011 and terrain

(color map: altitude field; thick black line: the border of Hubei Province; blue line: river; red solid line: rainfall; line with arrow: MCS movement path; dashed box: intensive precipitation region generated by vortex MCS; dot: stations with 3 h heavy rain > 100 mm)

成熟阶段 MCS 移动略有加快,可能与涡旋的东移发展有关系。涡旋运动和列车效应明显,移动略有加快。短时强降水集中在 MCS-D1 和 MCS-D2,其中 MCS-D2 最大小时雨量为 64 mm, MCS-D1 连续 4 h 内小时雨量均超过 50 mm,最大为 96 mm。

3.3 消亡阶段

该阶段自 18 日 05—08 时,随弱回波区范围进一步扩大, MCS-D1 与 MCS-D2 继续分离且强度减弱(图 2g),至 08 时 MCS-D1 完全减弱为层状云降水回波。虽然 MCS-D2 后部有对流单体并入而重新发展,但涡旋运动和整个回波带螺旋结构消失,弱回波区逐渐被填充,涡旋运动减弱,移动加快(图 2h)。

4 涡旋状 MCS 形成可能的原因

4.1 发展的西南低涡和地面暖倒槽提供有利环境场

东移出川的西南低涡常造成长江中下游暴雨(朱乾根等,2008)。在高原槽东移和西太平洋副热

带高压(简称副高)加强西伸形势下,发展的西南低涡、地面暖倒槽为边界层中尺度系统形成和涡旋状 MCS 高降水率提供了有利环境场。

4.1.1 西南低涡和地面暖倒槽发展有利于边界层中尺度系统形成

分析 16—17 日 20 时高空图可知(图 4a, 4b), 500 hPa 副高 120°E 脊线位于 21°~22°N,呈加强西伸趋势,有利于副高外围西南气流向湖北输送水汽和不稳定能量,同时高原槽自四川中部东移至湖北省西部。在高原槽带动下,西南低涡由四川西南部东移至四川东部至重庆一带,闭合环流更清晰,中心位势高度比 16 日 20 时降低 20 dagpm,表明西南低涡已发展(图 4c, 4d)。伴随西南低涡发展,在西南涡与副高之间建立起从广东南部至湖北中部的低空急流带,中低层暖平流增强(图 4e, 4f),联合高原槽前正涡度平流(图略)作用,西南低涡前侧有地面暖低压倒槽形成(图 4g, 4h)。17 日夜间随西南低涡东移,暖低压倒槽发展。同时,北方小高压南压与低压倒槽相互作用,使得暖式切变线北侧偏东气流加强(伴有弱冷空气)(图 4f),也有利于倒槽发展。由以下分析可知,发展的地面倒槽、西南低涡与边界层中尺度涡旋系统形成发展有密切联系,地面暖倒槽提供了有利于中尺度涡旋系统形成的正涡度环境场和环境场气流,而西南低涡前侧降水也是中尺度气流的形成原因,结合地形作用最终导致江汉平原中尺度涡旋系统的形成。

4.1.2 西南低涡发展有利于 MCS 高降水率产生

根据降水产生的物理机制,降水率取决于雷暴上升运动、进入雷暴的水汽和降水效率(俞小鼎等,2006),分析探空资料可知西南低涡东侧西南气流为涡旋状 MCS 高降水率提供了有利环境场。

分析涡旋状 MCS 东侧的武汉探空资料(恩施、宜昌站已受大片降水影响,不能反映江汉平原环境场)(表 1)时间演变可知,从不稳定条件看,除 17 日 08 时 CAPE 受夜间地面辐射降温影响而下降外, K 指数和 CAPE 均明显增加,至 17 日 20 时 CAPE 达 1120 J · kg⁻¹,且 CIN 较小,表明环境场积累了中等强度的不稳定能量,可转换为雷暴内部较强上升运动。从水汽条件看,850 hPa 露点温度呈增加趋势,由上干下湿演变成整层接近饱和(图 5),17 日 20 时大气可降水量增至 64 mm,表明水汽较充沛。从降水效率看,湿层深厚不利于降水剧烈蒸发,0°C 层高度位于 5 km 左右而抬升凝结高度位于

925 hPa (0.72 km 高度) 以下, 表明暖云层较厚, 中等强度的 CAPE 以及随高度分布较窄能避免更多水汽快速通过暖云层在高层形成冰晶和大冰雹(俞小鼎等, 2006)。因此水汽垂直分布、暖云层厚度、CAPE 垂直分布特征均有利于高效率降水产生。

4.2 中尺度涡旋系统形成、演变及与涡旋状 MCS 的关系

上述涡旋状 MCS 形成与鄂西山地—江汉平原过渡带一个中尺度涡旋系统的形成发展有密切关

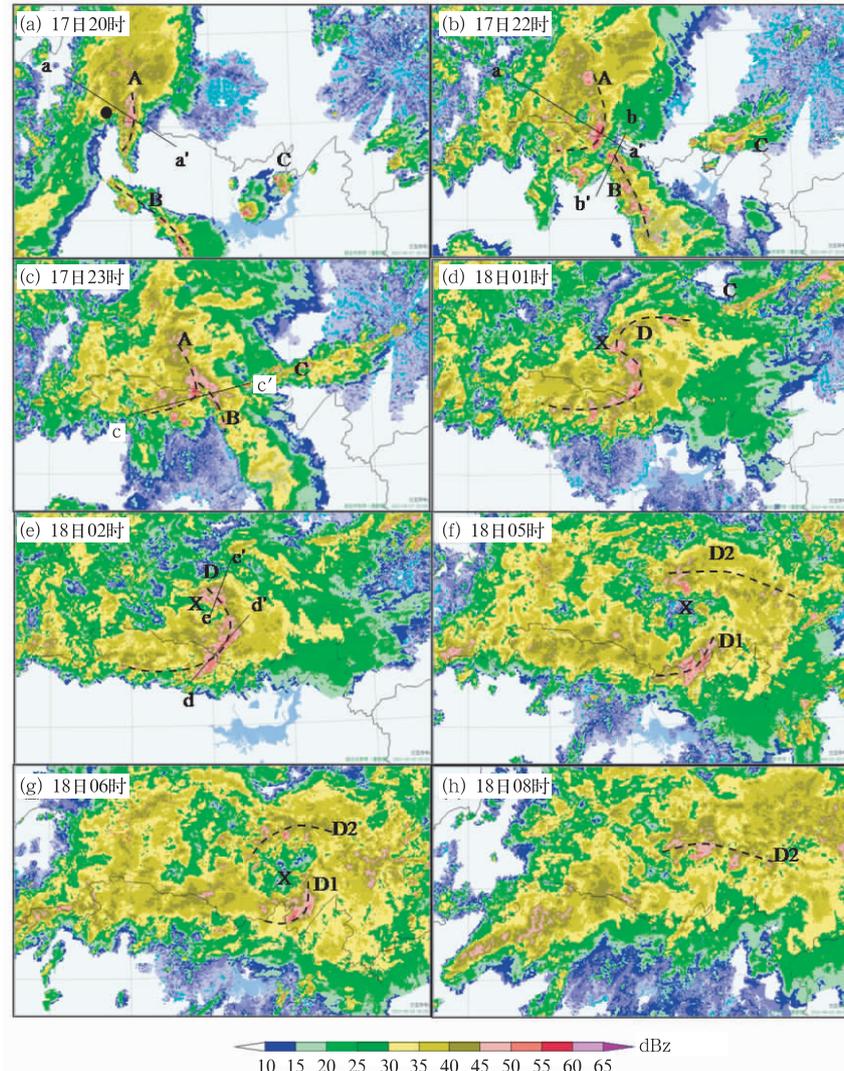


图 2 2011 年 6 月 17 日 20 时(a), 22 时(b), 23 时(c), 18 日 01 时(d), 02 时(e), 05 时(f), 06 时(g) 和 08 时(h) 涡旋状 MCS 组合反射率因子演变图

(A, B, C 表示初生于五峰、湖南北部、江汉平原的 MCS, D 表示涡旋状 MCS, D1, D2 分别表示涡旋状 MCS 中的两个 MCS, X 表示涡旋状 MCS 后部弱回波区, 虚线表示 MCS 中组合反射率因子 ≥ 45 dBz 的对流性降水回波带位置, 图 2a 中黑点表示五峰)

Fig. 2 Evolution charts of vortex MCS composite reflectivity at 20:00 (a), 22:00 (b), 23:00 (c) BT 17 June; 01:00 (d), 02:00 (e), 05:00 (f), 06:00 (g), 08:00 (h) BT 18 June 2011

(A, B, C represent MCS initialized in Wufeng, north of Hunan, Jianghan Plane; D means vortex MCS; and D1, D2 stand for the MCS from vortex MCS; X is the weak echo zone at the back of vortex MCS; dashed line means the convective echo band with reflectivity ≥ 45 dBz; black dot in Fig. 2a is for Wufeng)

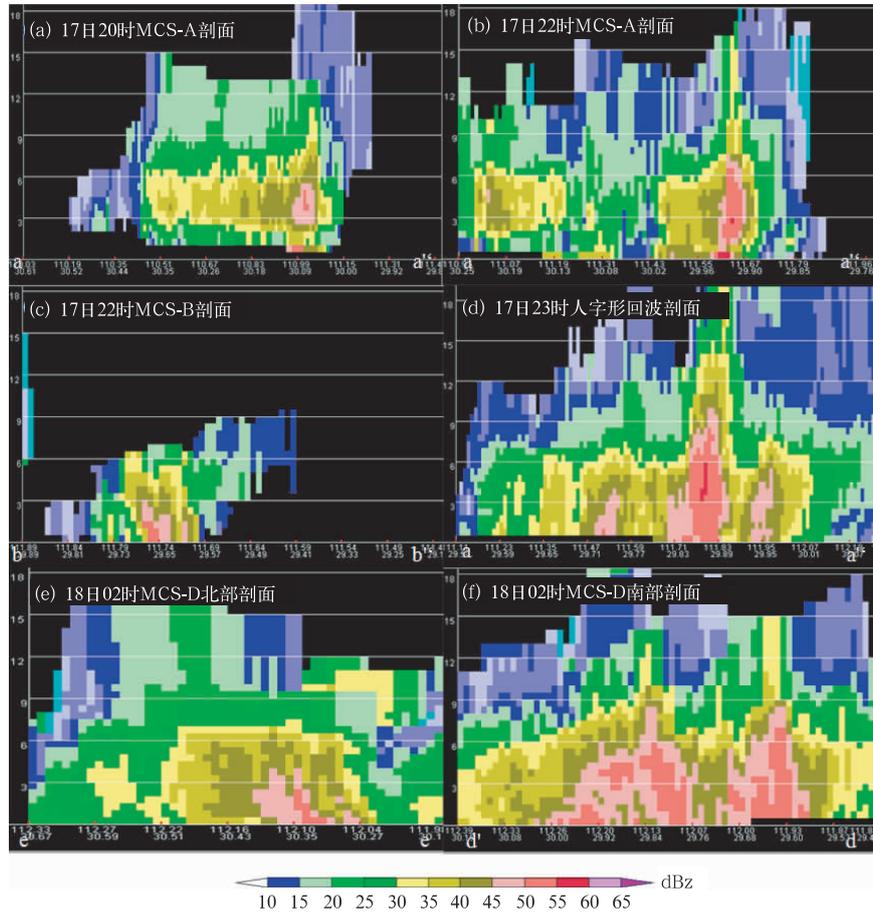


图 3 2011 年 6 月 17 日 20 时至 18 日 02 时涡旋状 MCS 垂直结构演变图
 (a)17 日 20 时 MCS-A,(b)17 日 22 时 MCS-A,(c)17 日 22 时 MCS-B,(d)17 日 23 时人字形回波,
 (e)18 日 02 时 MCS-D 北部,(f)18 日 02 时 MCS-D 南部
 (图 3a~3f 分别表示图 2a 中 aa'、图 2b 中 aa'、图 2b 中 bb'、图 2c 中 cc'、
 图 2e 中 ee'、图 2e 中 dd' 黑色线段上的垂直剖面)

Fig. 3 Evolution of the vortex MCS vertical structure from 20:00 BT 17 to 02:00 BT 18 June 2011

(a) MCS-A at 20:00 BT 17, (b) MCS-A at 22:00 BT 17, (c) MCS-B at 22:00 BT 17, (d) lambdaoid echo at 23:00 BT 17, (e) northern of MCS-D at 02:00 BT 18, (f) southern of MCS-D at 02:00 BT 18

(Figs. 3a-3f represent the vertical structure crossed by black line segment in aa' in Fig. 2a, aa' in Fig. 2b, bb' in Fig. 2b, cc' in Fig. 2c, ee' in Fig. 2e, dd' in Fig. 2e)

系,而中尺度涡旋系统的形成十分复杂,可能与地面暖倒槽内大尺度环境流场、西南低涡前侧降水性质的中尺度气流以及复杂地形共同作用有关,多支边界层气流的强烈辐合可能是中尺度涡旋系统发展的原因。

4.2.1 与边界层中尺度涡旋系统形成有关的环境场、中尺度气流

(1) 地面暖倒槽提供的两支环境场气流

17 日夜间湖北省受发展的地面暖低压倒槽控制(图 4f),槽线呈东北—西南走向经过江汉平原南

部,风场上呈气旋性弯曲,槽线南北两侧分别有偏南 A1 和偏东 A2 两支环境场气流(图 6a)。

A1 是来自倒槽南侧的偏南气流,夜间随暖倒槽发展 A1 经历了两次明显加强北抬过程,从湖南进入江汉平原(图 6b,6c)。A2 是来自倒槽北侧受降水影响的偏东气流。17 日白天槽线北侧的东南气流沿大别山和幕阜山之间的长江谷地进入江汉平原,受鄂东北至江汉平原一带降水影响转为偏东气流。与其他气流相比,A1、A2 均为暖性,其中 A2 受降水影响温度略低于 A1。

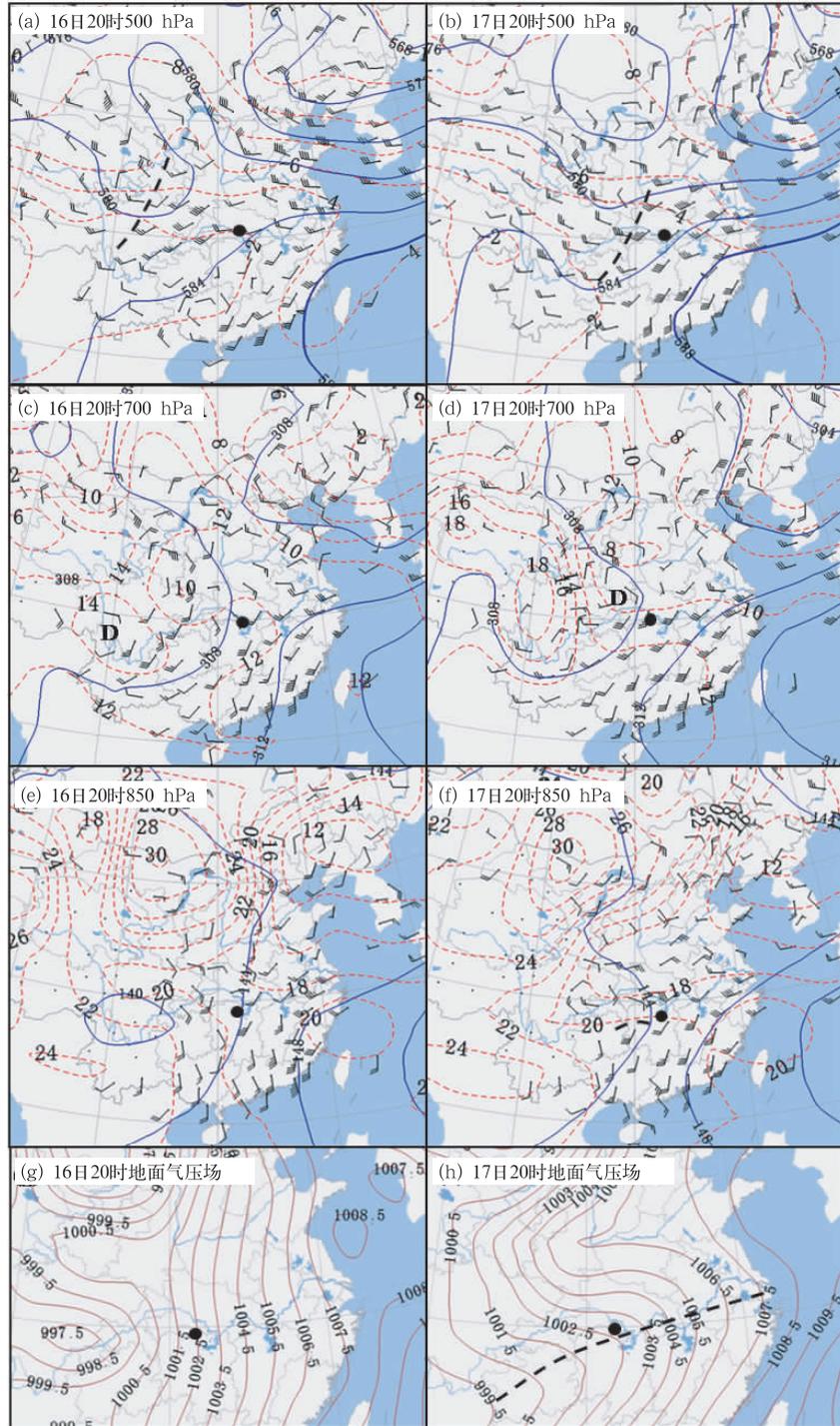


图 4 2011 年 6 月 16 日 20 时(a,c,e,g),17 日 20 时(b,d,f,h)高空 500 hPa(a,b),
700 hPa(c,d),850 hPa(e,f)和地面(g,h)天气图

(图 4a~4f 中细实线表示等高线、细虚线表示等温度线,图 4g~4h 中实线表示等海平面气压线,
图 4a~4b 中粗虚线表示槽线,图 4c~4d 中“D”表示西南涡,图 4f 中粗虚线表示暖切变线,
图 4h 中粗虚线表示低压槽线,黑点表示涡旋状 MCS)

Fig. 4 Synoptic charts of upper-air at 500 hPa (a, b), 700 hPa (c, d), 850 hPa (e, f) and surface (g, h)
at 20:00 BT 16 (a, c, e, g) and 20:00 BT 17 (b, d, f, h) June 2011

(Thin solid line is contour and thin dashed line is isotherm Figs. 4a-4f; solid line in Figs. 4g-4h is sea level pressure;
thick dashed line is trough in Figs. 4a-4b; D represents southwest vortex in Figs. 4c-4d; thick dashed line in Fig. 4f
means warm shear line; thick dashed line in Fig. 4h is low trough line; black dot represents vortex MCS)

表 1 武汉探空站物理量时间演变

Table 1 Time variation of physical parameters at Wuhan Sounding Station

时间	K /°C	CAPE /J·kg ⁻¹	CIN /J·kg ⁻¹	自由对流 高度/hPa	850 hPa T _d /°C	大气可降 水量/mm	0°C高度 /km	抬升凝结 高度/hPa
6月16日20时	23	817	10	927.2	16	42	5.5	957.2
6月17日08时	36	417	4	952.4	15	51	5.2	986.4
6月17日20时	38	1121	19	905.5	18	64	5.1	985.5

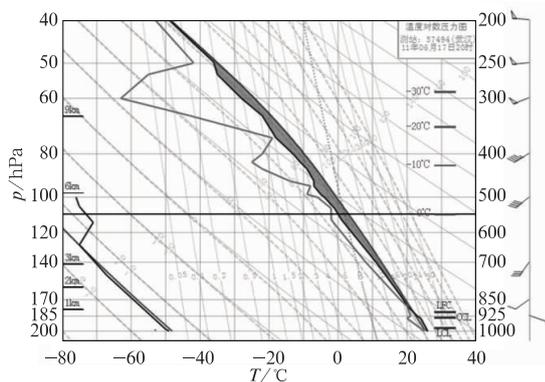


图 5 2011年6月17日20时
武汉站探空图

Fig. 5 T-lnp diagram of Wuhan Sounding
Station at 20:00 BT 17 June 2011

(2) 西南低涡前侧降水产生的四支中尺度气流不同于环境场气流,中尺度气流由降水产生并受地形影响。西南低涡前侧大范围积层混合云降水(对应图 2a 鄂西近南北走向的大片降水回波带)以及雷暴 MCS-A、MCS-B 降水,在鄂西山地形成温度低于 26°C 的冷池,分别产生 B1、B2、B3 三支中尺度冷性气流,而地面倒槽附近及北侧降水也产生一支冷性气流 B4(图 6a)。受地形影响,这几支气流从不同方向向江汉平原汇合。

B1 由鄂西北层状云降水产生,经汉江河谷进入江汉平原,受 B4 气流阻挡作用转为偏东风,后期随鄂西山地冷池东移恢复为偏北气流(图 6b)。B2 由鄂西南层状云降水和 MCS-A 对流性强降水产生的冷池流出,经长江河谷及山地进入江汉平原,形成西北气流。B3 是 MCS-B(图 2a)产生的偏南雷暴冷池流出,从湖南西北部进入江汉平原。虽然该区域没有自动气象站资料,但 MCS-B 结构类似于尾随层状云 MCS 回波模型,且 MCS-B 初生于武陵山区,冷池在下山过程中很可能产生向北的流出(图 6b),且 MCS-B 快速北抬表明冷池强度较强。

17 日白天受到暖低压倒槽影响,鄂东北至江汉平原一带有分散性对流发展(图略),夜间 MCS-C

也形成于该区域(图 2a)。雷暴降水在大别山南侧形成温度低于 24°C 的冷池,并在地形阻挡下产生流向江汉平原的冷性气流 B4(图 6a)。此外,夜间倒槽北侧降水冷性气流由河南进入湖北境内时,受大别

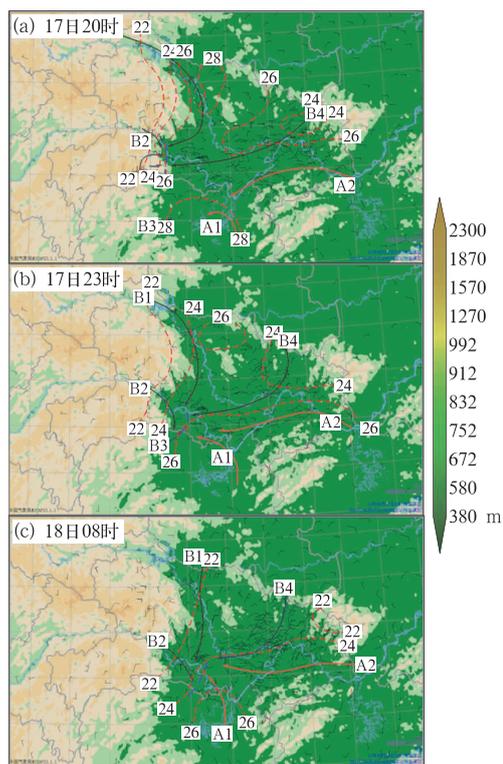


图 6 2011年6月17日20时(a),23时(b)和
18日08时(c)边界层中尺度天气系统演变图
(风矢量杆表示地面自动气象 22 站观测风,
色斑图表示地形高度,红色虚线表示等温线,
带箭头线条和 A1、A2、B1、B2、B3、B4 表示
地面风场流线,蓝色粗虚线表示辐合线,
D 表示中尺度涡旋系统)

Fig. 6 Evolution of surface mesoscale system
at 20:00 BT (a), 23:00 BT (b) 17 June and
08:00 BT (c) 18 June 2011

(Wind bar represents weather station wind;
color map means terrain, red dashed line is isothermal
line; line with arrow and A1, A2, B1, B2, B3,
B4 refer to surface wind stream; blue thick
dashed line is convergent line;
D represents mesoscale vortex)

山谷地影响从偏北方向汇入 B4(图 6c)。

4.2.2 边界层中尺度涡旋系统形成及演变

分析可知,在复杂地形影响下不同来向的环境场、中尺度气流辐合增强导致边界层中尺度涡旋系统的形成发展。

17 日 20 时,气流 A1、B3 均位于湖南,仅有 B2 与 B1、B4 三支气流组成的中尺度辐合线位于鄂西山脚(图 6a)。随低涡前侧降水发展,鄂西冷池推动 B2 东移,同时 MCS-B 冷池推动 B3 快速北抬以及倒槽发展导致 A1、A2 北抬,造成六支气流在山地—平原过渡地带辐合,且 MCS-A 与 MCS-B 快速合并表明辐合作用很强,17 日 23 时辐合线发展为中尺度涡旋系统(图 6b)。

中尺度涡旋系统形成后向东偏北方向缓慢移动,9 h 内移动近 60 km,至 18 日 08 时仍位于江汉平原南部(图 6c)。因 MCS-B 与 MCS-A 合并后 B3 气流不明显,中尺度涡旋系统其他五支气流均较清楚。温度场上,受降水影响大别山南侧冷池、鄂西山地冷池均向江汉平原推进,中尺度涡旋系统的温度有所降低,然其西北、东南象限的冷暖区仍较清楚,其中西北象限有 B2 形成的冷平流,表明降水产生的冷空气逐渐侵入中尺度涡旋系统后部。胡伯威和潘鄂芬(1996)通过对梅雨期进入长江中游的西南低涡分析表明,即使在不具备西风带冷空气条件下,低涡自身物理过程也能产生冷空气使系统斜压性增强,导致低涡发展为具有冷暖锋式切变的气旋。与之相类似,本次过程没有天气尺度冷锋南下,然而降水作用形成的冷池提供了冷空气来源,结合涡旋 MCS 成熟阶段后期的冷暖锋结构可知,中尺度涡旋系统可能发展为弱斜压性的中尺度气旋波系统。

数值模拟结果及再分析场资料统计分析表明,除四川盆地外,大别山及其周边地区是长江流域中尺度涡旋系统的另一个主要源地(高坤和徐来梅,2001;张敬萍等,2015),为区别于西南低涡称为大别山低涡(张敬萍等,2015)。实际上张敬萍等(2015)统计结果表明多数大别山低涡的源地为江汉平原,本次边界层中尺度涡旋系统就形成于鄂西山地与江汉平原过渡带,显然地形对其形成及强降水出现位置有重要作用。以上分析表明中尺度涡旋系统形成不仅与大别山有关,还与鄂西山地、江汉平原地形密切相关。地形的主要作用表现为使不同来向多支气流向江汉平原汇合,而下山地形有利于雷暴冷流出增强。由于气流 B2、B3 携带了较强下山动量,进入

山地—平原过渡地带时与其他气流的辐合迅速加强,导致中尺度涡旋系统在该区域形成及强降水产生。高坤和徐亚梅(2001)等通过数值模拟出的中尺度涡旋位于江汉平原东部,然无法追溯到上游地区,通过本次过程的观测资料分析可知这种中尺度涡旋的源地可能位于江汉平原西部。

沈杭锋等(2015)使用自动站、天气雷达和数值模拟资料分析一次梅雨锋暴雨,指出中尺度扰动涡旋率先在边界层内形成并向上发展,近地面风辐合及切变是其发生发展的动力因子。结合后面风场反演分析可知,本次过程边界层辐合很强,涡旋伸展到 700 hPa,日常业务还观测到许多同样的案例,说明低层辐合发展可能是中尺度涡旋系统形成的重要机制。后期强降水发生后,潜热释放对涡旋发展的促进作用是显而易见的。这种中尺度涡旋系统与陈永林等(2016)观测到的中尺度对流涡旋(MCV)在天气形势和形成机制上有明显区别,该 MCV 位于东北冷涡前倾槽的末端,降水潜热释放效应在 700~500 hPa 形成 MCV,而涡旋状 MCS 对应的中尺度涡旋系统位于西南低涡前侧,涡旋环流自边界层向上发展至 700 hPa,低层辐合对涡旋的贡献可能更大。

4.2.3 中尺度涡旋系统空间结构演变

分析荆州雷达四维变分反演风场可知,中尺度涡旋系统向上发展,涡旋环流伸展到 700 hPa 高度,后部偏北入流与弱回波区关系密切。

由 1.5 km 高度风场反演(图 7a)可知,17 日 23 时中尺度涡旋环流先出现在低层(1.0 km 高度也有涡旋环流,图略),水平尺度大约 50 km,伴有中层(3 km 高度)西南急流(图 7b)。18 日 01 时随涡旋加强低层环流结构更紧密(图 7c),中层西南气流气旋性曲率加大并出现涡旋环流(图 7d),而高层(5 km 高度)始终受一致西南气流控制(图略),可见涡旋是向上发展的,且环流比地面更清晰。

低层涡旋发展期间,后部有明显偏北入流(图 7c),对应边界层中尺度涡旋系统后部的冷区。弱回波区出现在偏北气流中(图 7c),其形成可能与涡旋后部偏北气流中下沉运动、干冷空气卷入、降水蒸发等作用有关。随后部偏北入流加强,弱回波区范围扩大(700 hPa 更明显,因该区域无降水回波而未反演出偏北入流,图 7d、7f)并气旋性卷入到螺旋回波带。这期间由于冷空气也在加强,螺旋回波带冷暖锋结构更清楚,且冷空气会切断西南暖湿气流供应,涡旋环流有所减弱(图 7e、7f)。

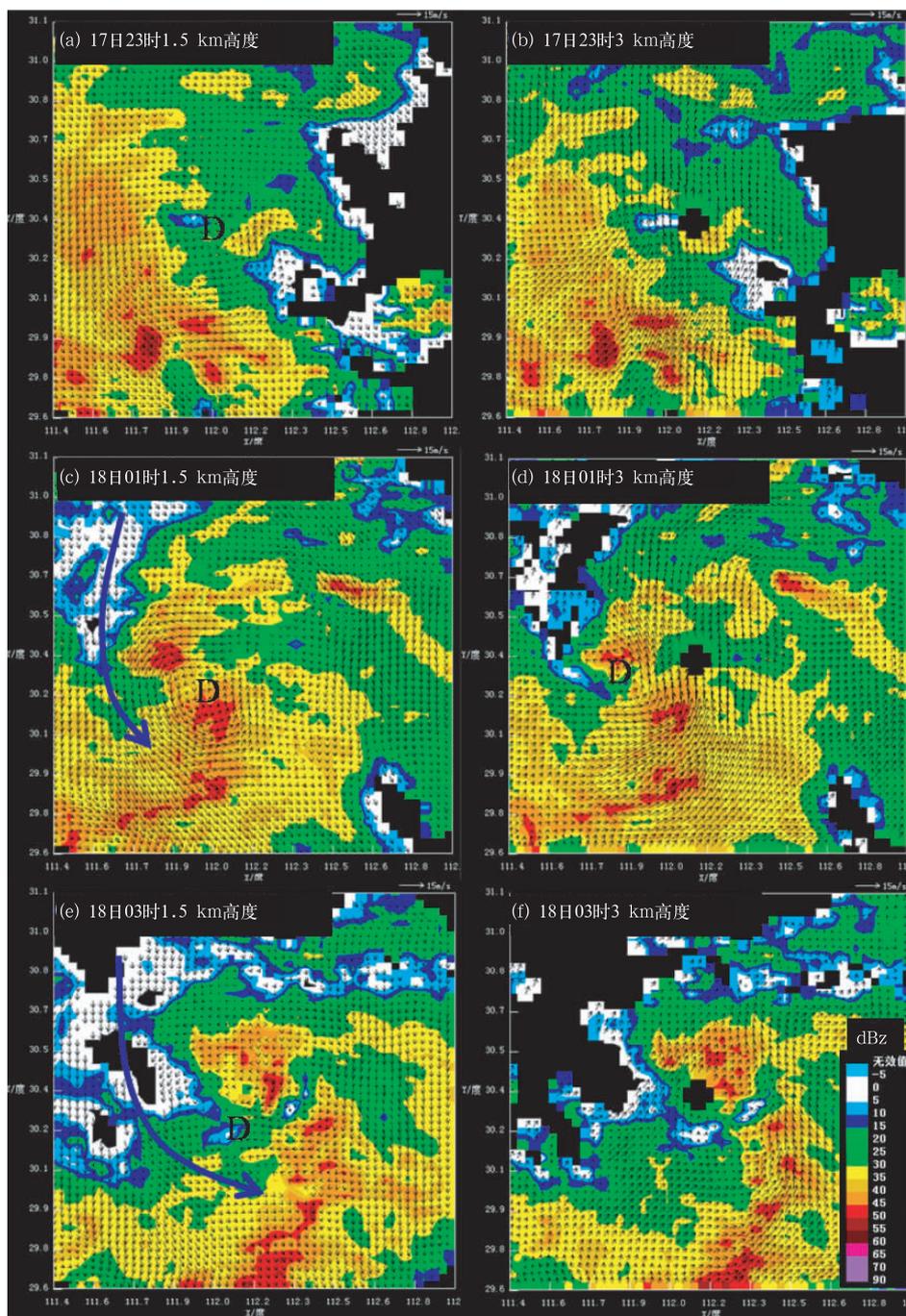


图 7 2011 年 6 月 17 日 23 时(a,b),18 日 01 时(c,d)和 18 日 03 时(e,f)1.5 km 高度(a,c,e) 以及 3 km 高度(b,d,f)中尺度涡旋系统垂直结构演变 (风矢量杆表示基于荆州雷达径向资料的四维风场反演,色斑图表示反射率因子, D 表示中尺度涡旋,带箭头线条表示涡旋状 MCS 后部入流)

Fig. 7 Vertical evolution of mesoscale vortex at 1.5 km heigh (a, c, e) and 3 km height (b, d, f) at 23:00 BT 17 (a, b), 01:00 BT 18 (c, d), 03:00 BT 18 (e, f) June 2011 (Wind bars mean 4D-Var wind retrieval of Jinzhou radar; color map represents reflectivity; D refers to mesoscale vortex; line with arrow stands for weak inflow at the back of the vortex MCS)

4.2.4 中尺度涡旋系统与涡旋状 MCS 的关系
对比分析中尺度系统涡旋与涡旋状 MCS 可

知,涡旋状 MCS 是中尺度涡旋系统发展组织的结果,中尺度涡旋系统在对流触发、加强、组织及运动

过程中有重要作用。

中尺度涡旋系统先于涡旋状 MCS 形成。17 日 23 时,地面(图 8a)和低层风场反演(图 7a)中均观测到中尺度涡旋系统,随涡旋系统发展 18 日 01 时涡旋状 MCS 形成(图 2d),可见涡旋状 MCS 形成比中尺度涡旋系统晚 2 h。

中尺度涡旋系统对对流有触发及加强作用,主要表现为:一是雷暴 MCS-A 下山增强,这种现象在北京地区也呈出现,平原地区较好层结不稳定、山区冷池出流与平原暖湿气流形成较强地面辐合线是主要原因之一(陈双等,2011;肖现等,2015);二是雷暴 MCS-A 与 MCS-B 合并加强是在冷池推动下多支地面气流的强烈辐合,最终形成人字形回波(图 8a);三是中尺度涡旋系统内部地面辐合线使螺旋回波带对流维持(图 8b),后期螺旋回波带远离辐合线后强度减弱(图略);四是由于地面偏南气流位于螺旋回波带南端,与涡旋状 MCS 其他区域相比辐合更强,因此该区域对流更活跃且强度更强。

中尺度涡旋系统对 MCS 结构有组织作用,主要表现为:一是辐合作用形成了对流回波带被层状云降水回波包裹的结构特征。在涡旋 MCS 形成阶段,MCS-A 和 MCS-B 结构类似于尾随层状云 MCS(图 3b,3c),对流性降水回波位于冷池前沿的辐合区,而 MCS-A 和 MCS-B 回波合并时,其合并区域为冷池引起的多支气流的强烈辐合区,造成该区域对流回波发展,而辐合中心外围为层状云降水回波。

在涡旋 MCS 成熟阶段,螺旋对流回波带主要沿中尺度涡旋系统内部的地面辐合线分布,而地面辐合线两侧为大片层状云降水回波(图 8b);二是涡旋环流对螺旋回波带后部弱回波区及冷暖锋结构的形成有重要作用。随涡旋环流发展后部入流加强,弱回波区范围扩大明显。同时,冷空气侵入涡旋 MCS,中尺度气旋波发展,涡旋 MCS 演变出冷暖锋结构。

中尺度涡旋系统造成 MCS 涡旋运动和旋转式列车效应。涡旋环流是 MCS 涡旋运动的驱动因子,因 700 hPa 引导气流与螺旋回波带走向一致导致旋转式列车效应产生(图 7d),这一现象在螺旋回波带南端尤为明显。此外,涡旋状 MCS 移速似乎与中尺度涡旋系统演变状态有关,在中尺度涡旋系统形成初期涡旋状 MCS 移动缓慢,后期移动略有加快。

5 结 论

使用新一代天气雷达、常规观测、地面加密观测资料及雷达四维风场反演资料分析造成江汉平原强降水涡旋状 MCS 发生发展过程的雷达回波特征,初步研究了 MCS 结构形成发展的可能原因,结论如下:

(1) 雷达回波上成熟阶段的强降水涡旋状 MCS 回波表现为气旋性弯曲的多条螺旋对流回波带、周围被大片层状云回波所包裹的结构特征,后期

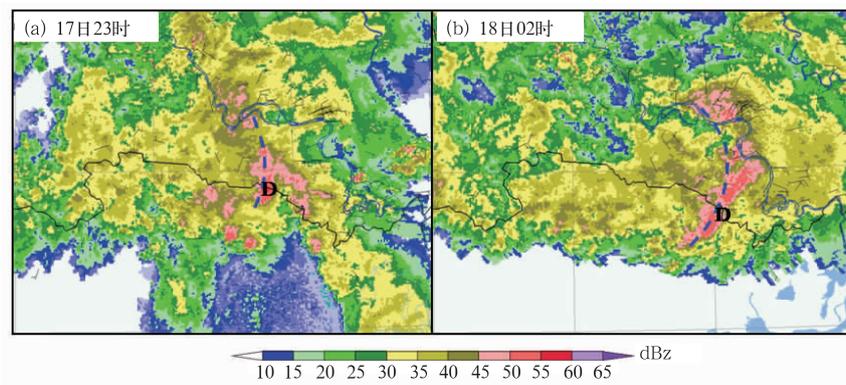


图 8 2011 年 6 月 17 日 23 时(a)和 18 日 02 时(b)地面中尺度涡旋系统与涡旋状 MCS 叠加图

(风矢量杆表示地面自动气象站观测风,色斑图表示组合反射率因子,蓝色粗虚线表示辐合线,D 表示中尺度涡旋系统)

Fig. 8 Overlap map of surface mesoscale system and vortex MCS at 23:00 BT 17 (a) and 23:00 BT 18 (b) June 2011

(Wind bar means wind from surface weather station; color map represents reflectivity; blue thick dashed line is convergent line; D stands for mesoscale vortex)

因冷空气侵入演变出冷暖锋式结构。回波合并和旋转式列车效应是产生强降水的主要运动特征。

(2) 涡旋状 MCS 是在有利环境场下,主要由鄂西山地—江汉平原过渡地带边界层中尺度涡旋系统强烈发展组织的结果。发展的西南涡和地面暖倒槽为地面中尺度系统形成和涡旋状 MCS 高降水率产生提供了有利环境场。中尺度涡旋系统在对流触发、加强、组织及运动过程中有重要作用。涡旋 MCS 周围被大片层状云回波所包裹的结构特征与边界层强烈辐合有关,随涡旋环流发展冷空气加强,后部弱回波区范围扩大,涡旋 MCS 演变出冷暖锋结构。

(3) 江汉平原中尺度涡旋系统形成发展与地面暖倒槽、西南涡前侧大范围的降水和特殊地形作用有密切关系,受地形影响不同来向环境场、中尺度气流的强烈辐合是中尺度涡旋系统的可能成因。随气流辐合增强,涡旋环流向上发展到 700 hPa。后期由于冷空气加强,中尺度涡旋系统可能发展为气旋波。

参考文献

- 陈双,王迎春,张文龙,等,2011.复杂地形下雷暴增强过程的个例研究[J].气象,37(7):802-813.
- 陈永林,俞小鼎,杨引明,等,2016.江苏一次锢囚状 MCS 和相关中尺度 MCV 的观测分析[J].气象,42(2):166-173.
- 高坤,徐亚梅,2001.1999年6月下旬长江中下游梅雨锋低涡扰动的结构研究[J].大气科学,25(6):740-756.
- 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.
- 江玉华,丁明星,陈群,等,2005.重庆地区强对流天气雷达回波统计特征[J].气象,31(3):36-40.
- 刘婷婷,苗春生,张亚萍,等,2014.多普勒雷达风场反演技术在西南涡暴雨过程中的应用[J].气象,40(12):1530-1538.
- 沈杭锋,章元直,查贲,等,2015.梅雨锋上边界层中尺度扰动涡旋的个例研究[J].大气科学,39(5):1025-1037.
- 孙莹,王艳兰,唐熠,等,2003.短时暴雨天气雷达回波概念模型的建设[J].高原气象,29(5):40-45.
- 王晓芳,崔春光,2012.长江中下游地区梅雨期线状中尺度对流系统分析 I:组织类型特征[J].气象学报,70(5):909-923.
- 吴翠红,王珊珊,2012.“6·18”江汉平原特大暴雨中尺度特征[J].大气科学学报,35(6):746-753.
- 吴翠红,王晓玲,龙利民,等,2013.近 10 a 湖北省强降水时空分布特征与主要天气概念模型[J].暴雨灾害,32(2):113-119.
- 肖现,陈明轩,高峰,等,2015.弱天气系统强迫下北京地区对流下山演变的热动力机制[J].大气科学,39(1):100-124.
- 徐双柱,吴翠红,吴涛,2013.“2011.6.18”湖北大暴雨成因分析[J].高原气象,32(4):1106-1114.
- 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[J].气象学报,69(2):249-262.
- 俞小鼎,姚秀萍,熊廷南,等,2006.多普勒天气雷达原理与业务应用[M].北京:气象出版社,53-173.
- 张家国,王珏,黄治勇,等,2011.几类区域性暴雨雷达回波模型[J].气象,37(3):285-290.
- 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.
- 张培昌,杜秉玉,戴铁丕,2002.雷达气象学[M].北京:气象出版社,437-440.
- 张小玲,余蓉,杜牧云,2014.梅雨锋上短时强降水系统的发展模式[J].大气科学,38(4):770-781.
- 朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等,2008.天气学原理和方法[M].北京:气象出版社,222-374.
- Bluestein H B, Jain M H, 1985. Formation of mesoscale lines of precipitation: Severe squall lines in Oklahoma during the spring [J]. J Atmos Sci, 42(16):1711-1732.
- Bluestein H B, Marx G T, Jain M H, 1987. Formation of mesoscale lines of precipitation: Nonsevere squall lines in Oklahoma during the spring [J]. Mon Wea Rev, 115(11):2719-2717.
- Parker M D, Johnson R H, 2000. Organizational modes of midlatitude mesoscale convective systems [J]. Mon Wea Rev, 128(10):3413-3436.
- Schiesser H H, Houze R A Jr, Huntrieser H, 1995. The mesoscale structure of severe precipitation systems in Switzerland [J]. Mon Wea Rev, 123(7):2070-2097.
- Schumacher R S, Johnson R H, 2005. Organization and environmental properties of extreme-rain-producing mesoscale convective systems [J]. Mon Wea Rev, 133(4):961-976.