

一个高空槽前中尺度对流系统 发生发展过程和机制研究^{* 1}

林宗桂^{1,2} 林开平³ 李耀先⁴ 林 墨^{1,2} 陈翠敏⁵ 林健玲⁶
LIN Zonggui^{1,2} LIN Kaiping³ LI Yaoxian⁴ LIN Mo^{1,2} CHEN Cuimin⁵ LIN Jianling⁶

1. 广西壮族自治区气象减灾研究所, 南宁, 530022
2. 国家卫星气象中心遥感应用试验基地, 南宁, 530022
3. 广西壮族自治区气象台, 南宁, 530022
4. 广西壮族自治区气象学会, 南宁, 530022
5. 广西南宁市气象局, 南宁, 530022
6. 广西壮族自治区气象局, 南宁, 530022

1. *Guangxi Institute of Meteorology and Disaster-Mitigation Research, Nanning 530022, China*
2. *Remote Sensing Application and Experiment Station of National Satellite Meteorology Centre, Nanning 530022, China*
3. *Guangxi Meteorological Observatory, Nanning 530022, China*
4. *Guangxi Meteorological Society, Nanning 530022, China*
5. *Nanning Meteorological Bureau, Nanning 530022, China*
6. *Guangxi Meteorological Bureau, Nanning 530022, China*

2009-12-02 收稿, 2011-05-25 改回.

Lin Zonggui, Lin Kaiping, Li Yaoxian, Lin Mo, Chen Cuimin, Lin Jianling. 2011. A study of the development process of a mesoscale convective system ahead of an upper-level trough and its mechanism. *Acta Meteorologica Sinica*, 69(5): 770-781

Abstract A rainstorm belt of about 80 km and 350 km in the EW and NS direction respectively was generated by a cloud system in front of the upper-level trough from 20:00 BT 6 July to 14:00 BT 7 July 2008, covering from Nanning city to Huanjiang county, Guangxi Province, China. A mesoscale convective system (MCS) in the south of the cloud system triggered a torrential rain with precipitation of 265.0 mm in Shanglin county. The FY-2C cloud images, radar observations, records obtained from automatic weather stations and other irregular observations were used to analysis this process. Based on the cloud image and isentropic analysis charts, the dry air moved down across the Yunnan-Kweichow plateau to the west of Guangxi Province and the north of Vietnam after the upper-level trough passed the Tibet plateau, and it turned eastwards at the upper-level trough bottom to the middle of Guangxi, and then formed a mesoscale vortex and a mesoscale katallobaric center near Shanglin county. After that the MCS developed and generated heavy rain in the mesoscale vortex and katallobaric center. The severe rainfall occurred 2 hours after the mesoscale vortex and katallobaric center occurrence. The results show that the main favorable factors generating the MCS are as follows. Firstly, the sufficient water vapor was transported by the warm and wet southerly flow ahead of the upper-level trough to the middle of Guangxi to form the unstable potential, which provided an advantageous environmental condition for the MCS generation. Secondly, the MCS was generated while the warm and wet airflow was uplifted by the convergence and the ascend motion of the mesoscale vortex. Thirdly, convective cells moved forward along the low level shear line, which made the MCS maintain and develop. Furthermore, a 2D conceptual model of the MCS development mecha-

* 资助课题: 国家自然科学基金项目(40965003)、2009年度公益性行业(气象)科研专项(GYHY20090601)和广西自然科学基金项目(2011GXNSFE018006、2011GXNSFA018005、0991023Z、0991208、0832190)。

作者简介: 林宗桂, 主要从事卫星与自动气象站资料在天气分析和预报中的应用研究。E-mail: lzg10802@163.com

通讯作者: 林开平, 主要从事天气分析、预报工作。E-mail: linkp0305@yahoo.com.cn

nism is presented.

Key words Mesoscale convective system, Mesoscale vortex, Mesoscale katallobaric, Torrential rain

摘 要 2008年7月6日20时—7日14时,高空低槽前云系产生了一条从广西南宁市到环江县东西宽约80 km、南北长达350 km的暴雨带,槽前云系南段一个中尺度对流系统在上林县产生了降雨量达265.0 mm的特大暴雨。使用常规资料和FY-2C卫星云图、多普勒天气雷达和自动气象站等非常规观测资料进行分析。当高空槽移过青藏高原后,从卫星云图和等熵面分析图上可以检测到槽后有干空气东南下,干空气经云贵高原下沉到桂西和越南北部后,在槽底附近转折向东侵入到桂中,在上林县附近形成一个中尺度涡旋和中尺度负变压中心,中尺度对流系统在中尺度涡旋及中尺度负变压中心上空发生、发展并产生了强降雨,而中尺度涡旋和中尺度负变压中心的出现超前于强降雨约2 h。研究表明,中尺度对流系统发生、发展的有利条件是:(1)槽前偏南暖湿气流向桂中暴雨区输送充足的水汽并形成了位势不稳定,为中尺度对流系统的发生发展提供了环境条件;(2)在上林县附近形成的中尺度涡旋辐合上升运动抬升暖湿气流触发对流而形成了中尺度对流系统;(3)对流单体沿低空切变线传播发展并入中尺度对流系统,使中尺度对流系统得以发展和维持。给出了中尺度对流系统发生发展机制的二维概念模型。

关键词 中尺度对流系统,中尺度涡旋,中尺度变压场,暴雨

中图法分类号 P458

1 引 言

中尺度对流系统(MCS)是华南前汛期暴雨的主要制造者。众多学者对MCS的研究较为广泛而深入,Maddox(1980)利用卫星云图发现并定义了中尺度对流复合体(MCC),Peter等(1983)、Colleen等(1987)、Raymond等(1990)、John等(1991)、Jason等(1994)利用科学试验观测资料、理论分析、气象观测资料综合分析等方法,广泛研究了中高纬度的MCS结构、环境条件、发生规律和机制等。华南地处低纬度地区,暴雨MCS有其独特性,经多次华南暴雨科学试验,目前已经认识到在大尺度天气背景条件下,高度5 km以下低空暖湿急流和低空辐合的形成与变化是华南前汛期暴雨发生发展的决定性因子(周秀骥等,2003)。近年来,中国许多学者利用数值模拟或观测资料分析方法进一步深入研究了华南暴雨,主要利用数值模拟研究的有:孙建华等(2002a,2002b)对华南(重点是广西)“94.6”特大暴雨MCS及其环境场进行了研究,指出低层水汽的辐合可出现在对流发展前的2—3 h,决定暴雨是否发生的主要因子仍是大尺度的气象环境场。蒙伟光等(2004)对华南暴雨MCS的形成及湿位涡进行分析,指出对称不稳定可能是暴雨和MCS发生发展的一种重要机制。陈敏等(2007)研究了华南前汛期锋面垂直环流及其与MCS的相互作用。用观测资料分析方法进行研究的有:孙健等(2004)对1998年6月8—9日香港特大暴雨MCS进行分析,主要利

用卫星和多普勒雷达资料分析MCS结构和演变,以及在卫星云图和雷达回波图上的表现特征。夏茹娣等(2006)对一类华南(重点是广西)锋前暖区暴雨MCS环境特征进行分析研究,给出了一类低空风速辐合引发华南前汛期锋前暖区暴雨有关影响因子的概略图。蒙伟光等(2007)对华南沿海一次暴雨MCS形成和发展过程进行了分析和数值模拟,认为对流的启动和发展与地形辐合有关,而MCS的组织发展过程与中层扰动的增强相联系。赵玉春等(2008)对2006年6月5—8日梅雨锋上MCS引发福建北部暴雨进行了诊断分析,探讨了梅雨锋上或锋前暖区一侧MCS触发和增强的动力机制,给出了梅雨锋上MCS产生、发展以及非绝热加热反馈的概念模型。林宗桂等(2009)对2008年4月12—13日一次生命期长达25 h的MCS的维持机制进行了研究,分析了MCS发生、发展和维持的有利因素,给出了静止锋MCS发生发展和维持机制概念模型。高空槽过境产生暴雨是华南常见的天气过程,虽然许多学者对华南各类MCS进行了广泛而深入的研究,对MCS的环境条件和成因有了一定程度的认识,但对高空槽前云系中MCS发生、发展与地面中尺度低值系统的关系认识尚不深刻,仍有许多问题需要深入研究。

本文以2008年7月6日20时—7日14时(北京时间,下同)一条高空槽过境广西(简称桂)时,一个出现在高空槽前云系中降雨量达265.0 mm的MCS发生发展过程为例,使用当前业务提供的常规和非常规观

测资料,分析槽前暖湿气流在地面中尺度涡旋和中尺度负变压中心之上 MCS 发生、发展过程和机制,建立了 MCS 发生发展机制的二维概念模型。

2 资料和方法

2.1 资料

(1)常规观测资料:2008年7月6日08时—7日08时广西6个探空站的资料,包括925—250 hPa 温度、高度、风和温度露点差等,主要用于分析 MCS 的环境场条件。

(2)非常规观测资料:FY-2C 卫星 2008年7月6日08时—7日14时 MICAPS 数据格式的红外(IR1)、水汽(WV)云图资料;柳州雷达站 CINRAD/SB 型多普勒雷达探测资料,主要用于分析 MCS 的结构特征;2008年7月广西境内84个6要素自动气象站 1 min 取样的气压、气温、风、降雨资料,主要用于分析地面天气系统。

2.2 自动气象站资料分析处理方法

对中尺度变压场的分析主要使用林宗桂等自主开发的“自动气象站资料分析处理系统”^①进行分析处理,该系统计算中尺度变压的算法模型和算法步骤为

(1)算法模型

设 t 时间的实时气压观测值 $p(t)$ 为

$$p(t) = p_g(t) + p_s(t) + P_m(t) + p_d(t) \quad (1)$$

式中, $p_g(t)$ 为地理气压项,主要与测站海拔高度有关; $p_s(t)$ 为大尺度天气系统气压项,主要受大尺度天气系统活动影响; $p_m(t)$ 为中尺度天气系统气压项,主要受中尺度天气系统活动影响; $p_d(t)$ 为气压日变化项。对长时间序列的气压数据作气候统计时, $p_s(t)$ 、 $p_m(t)$ 近似服从正态分布,其数学期望值(平均值)近似为 0 或是较小的常数。

(2)算法步骤

①计算气压日变化项

$$p_d(t) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n p_k(t) \quad t = 1, 2, 3, \dots, m \quad (2)$$

式中, n 为统计数据序列长度,通常 $n \geq 30$ 。

②计算地理气压项

$$p_g = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n p_d(t) \quad (3)$$

式中, $n = 24$ 。

③用滑动平均方法分离大尺度天气系统气压项

$$p_s(t) = \frac{1}{2n} \sum_{k=-n}^n p(t+k) \quad t = 1, 2, 3, \dots, m \quad (4)$$

式中,取滑动平均步长为 $2n$; k 为样本点, $m \geq 120$ h。

④计算大尺度天气系统影响所引起的变压项

$$\Delta p_s(t) = p_s(t) - p_g(t) \quad (5)$$

⑤计算滤除大尺度天气系统影响后的气压项

$$p'(t) = p(t) - \Delta p_s(t) \quad (6)$$

⑥计算中尺度天气系统变压项

$$\Delta p_m(t) = p'(t) - p_d(t) \quad (7)$$

3 天气概况

2008年7月7日02—05时,从越南北部到桂北的槽前云系发展旺盛,在桂中的上林县等地形成一个 MCS 并产生了强降雨(图 1a、1b),6日20时—7日14时广西境内形成一条从南宁市到环江县东西宽约 80 km、南北长达 350 km 的暴雨带(图 1c),雨带北段以层状云产生的长时间低强度连续性降雨为主,南段以对流云产生的高强度阵性降雨为主,有 8 站降雨量大于 50 mm,暴雨中心位于雨带南部的上林县,降雨量达 265.0 mm。

4 MCS 发生发展过程和机制分析

4.1 MCS 发生发展环境条件

4.1.1 水汽条件

2008年7月7日02—05时发生在上林县的 MCS,其水汽源地是北部湾,从北部湾到上林县的水汽输送通道上有北海和南宁 2 个探空站。从 2008年7月6日20时南宁和北海探空站的比湿(q)数据(表 1)可知,925—700 hPa 的比湿北海均大于南宁,北海与南宁间存在着较明显的湿度梯度,6日20时北海和南宁 700 hPa 以下都是偏南风,表明北部湾向上林县 MCS 发生地有充沛水汽输送。从自动气象站地面比湿数据分析也可以看出,6日20时—7日02时有一条从沿海伸向桂中 $q \geq 20$ g/kg 的湿舌。低空和地面资料分析表明,6日20时后从北部湾有充沛水汽向桂中输送,为 MCS 的发生、发展提供了良好的水汽条件。

①“自动气象站资料分析处理系统”已获中华人民共和国国家版权局计算机软件著作权登记证书(证书号:软著登字第 0211532 号;登记号:2010SR023259)

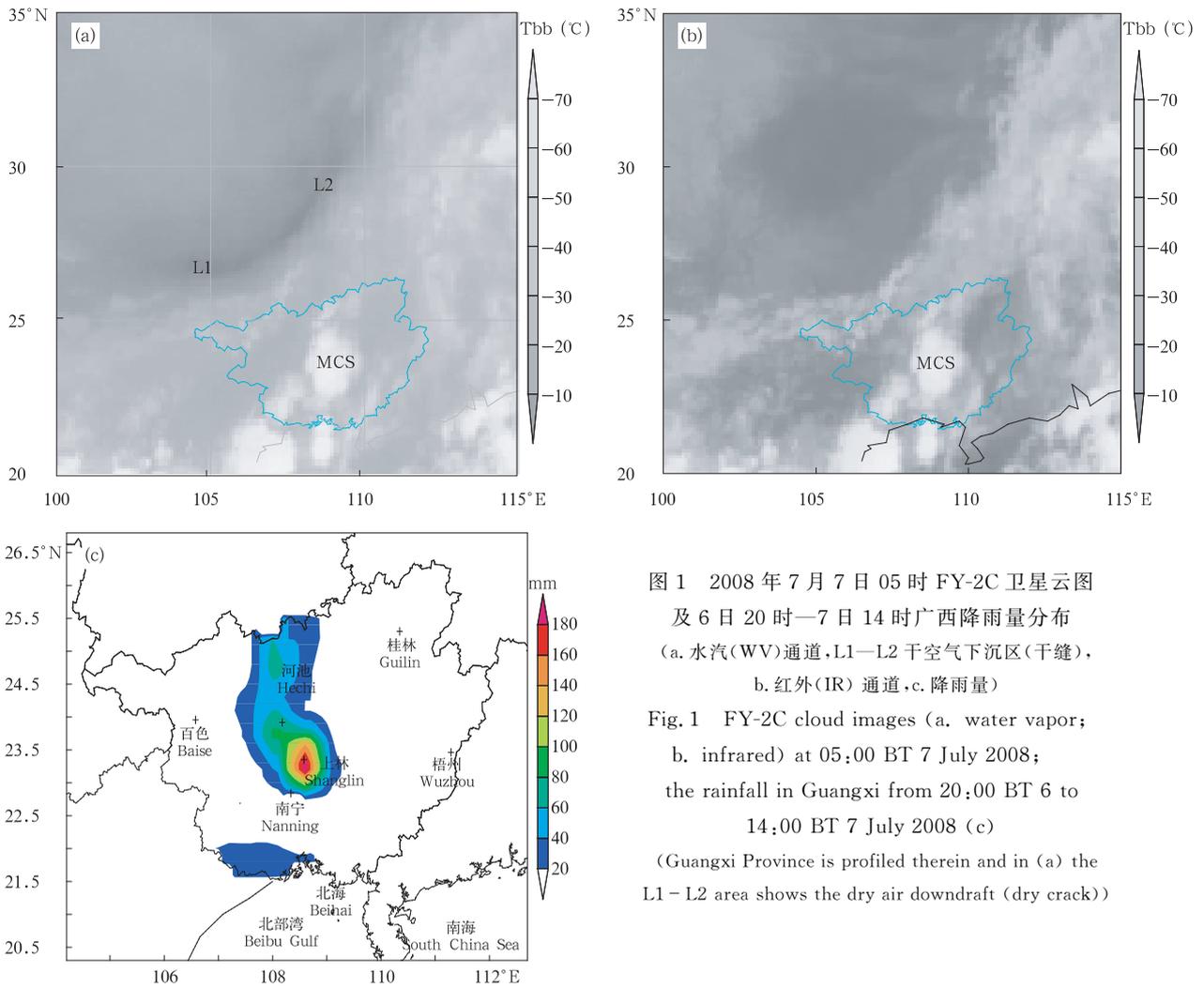


图1 2008年7月7日05时FY-2C卫星云图及6日20时—7日14时广西降雨量分布 (a.水汽(WV)通道,L1—L2干空气下沉区(干缝), b.红外(IR)通道,c.降雨量)
 Fig. 1 FY-2C cloud images (a. water vapor; b. infrared) at 05:00 BT 7 July 2008; the rainfall in Guangxi from 20:00 BT 6 to 14:00 BT 7 July 2008 (c) (Guangxi Province is profiled therein and in (a) the L1—L2 area shows the dry air downdraft (dry crack))

表1 2008年7月6日20时南宁和北海各高度层探空比湿(g/kg)

Table 1 The sounding data of the specific humidity (g/kg) in Nanning and Beihai at 20:00 BT 6 July 2008

	925 hPa	850 hPa	700 hPa
南宁	13.0	11.8	6.8
北海	14.8	13.4	8.4

4.1.2 位势不稳定层结

根据2008年7月6日20时广西6个探空站资料计算的假相当位温 θ_{se} (表2)可知,百色和南宁两站 $\theta_{se500} - \theta_{se850} > 0$,其他4站 $\theta_{se500} - \theta_{se850} < 0$ 。从稳定度判据分析,百色大气层结稳定,南宁大气层结弱稳定,其他4站大气层结不稳定。6日20时,百色处于槽后下沉干气流影响区,大气层结稳定是确定的。南宁大气层结呈弱稳定状态,这主要是低层水汽含量偏低的缘故,但南宁处在槽前偏南气流区。从上述水汽条件分析得知,来自北部湾的水汽正向

内地输送,南宁低层水汽含量将会增加,大气层结也将向不稳定方向演变。处于槽前偏南气流区的其他4站都是大气层结不稳定的。由此判断处于槽前偏南气流区的上林县等地为大气层结不稳定状态,有利于MCS的发生、发展。

4.2 天气尺度环流背景

2008年7月6日20时高空天气图(图略)上,500 hPa有一条从桂西延伸到湖北西南的高空槽,槽底位于广西与越南交界处,在槽后的贵州西部到重庆市东北部有一带状干区($T - T_d \geq 35^\circ\text{C}$),在槽前的桂中和桂北为空气湿度接近饱和($T - T_d \leq 2^\circ\text{C}$)的高湿区;700 hPa在桂西与越南北部间有一个低压,南海也有一个低压。与高空天气图槽后干区相对应,在水汽图上有一条明显的干缝(图1a中L1—L2)。动画云图显示,随着高空槽的东移,槽后干缝L1—L2向东南方向移动。

表2 2008年7月6日20时广西6个探空站各高度层 θ_{se} (K)
Table 2 The θ_{se} data (K) in different altitudes in the 6 sounding stations in Guangxi at 20:00 BT 6 July 2008

	850 hPa	700 hPa	500 hPa	400 hPa	300 hPa	$\theta_{se500} - \theta_{se850}$
南宁	342	335	343	346	350	1
河池	348	343	346	346	351	-2
桂林	347	334	343	347	350	-4
百色	335	327	341	346	350	6
梧州	348	343	341	349	351	-7
北海	347	346	338	350	350	-9

为了分析槽后干空气的南下过程,参考巴德等(1998)的输送带概念模型,使用6日20时探空资料进行325 K等熵面分析(图2),槽轴西边干空气下沉区无水汽凝结现象,分析的是位温的325 K等熵面;槽轴东边是湿空气上升区有水汽凝结现象,分析的是湿位温的325 K等熵面。槽轴西边 26°N 以北有1片 $q \leq 1.0 \text{ g/kg}$ 的干区,干区中的相对流线在 31°N 有一分支向南流向桂西,然后在槽底转向东东北汇入槽前偏南气流中,表明槽后干空气近似沿着等熵面南下到达桂西后向东侵入到桂中等地,桂西和越南北部处于槽后干区延伸出来的干舌范围。

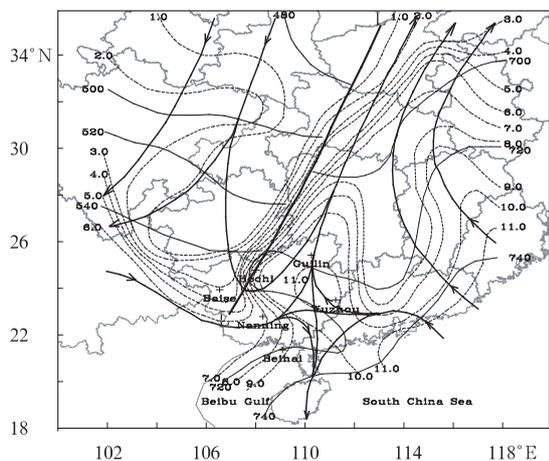


图2 2008年7月6日20时325 K等熵面分析
(实线L—L为低槽轴线,带箭头的粗实线为相对流线,粗黑实线为325 K位温 θ 高度(hPa),细实线为325 K湿位温 θ_w 高度(hPa),虚线为等比湿线(g/kg))

Fig. 2 325 K isentropic surface analyses at 20:00 BT 6 July 2008

(The solid line L—L is the axis of trough; the thick black lines with arrow are relative flow lines; the thick black lines are the height (hPa) for the 325 K potential temperature (θ); the fine black lines are the height (hPa) for the 325 K wet-bulb potential temperature (θ_w); and the dashed lines are specific humidity contours (g/kg))

4.3 MCS发生、发展过程和机制

4.3.1 地面流场和中尺度变压场

利用地面自动站资料对2008年7月6日23时—7日04时地面流线和比湿(q)进行分析(图3)表明,6日23时—7日00时(图3a、3b),在都安县(C1)和荔浦县(C2)各有一个弱的涡旋中心,都安县的涡旋中心(C1)与都安县此期间的对流云团发展在时间和地点上相对应。7日01时(图3c),原位于荔浦县的涡旋中心(C2)减弱消失,都安县的涡旋中心(C1)已向东南移到上林县。7日02时(图3d),在上林县的涡旋中心(C)风速加大,涡旋发展到最强阶段。7日03时(图3e、3f)后,涡旋中心逐渐减弱并东移。

根据地面自动站资料,使用“自动气象站资料分析处理系统”分析2008年7月6日23时—7日04时地面中尺度变压场(图4)可见,7日00时(图4a),在桂中的上林县出现了一个负变压中心L,此负变压中心比图3a中的涡旋中心(C1)位置略偏东南;01—03时(图4b—4d),负变压中心L位置少动而强度加强,03时中心极值达 -1.1 hPa ;04时后(图4e),负变压中心L强度减弱,中心值上升到 -0.7 hPa ;5时(图4f),位于上林县的负变压中心L消失。

7日00—04时,中尺度涡旋中心C(图3b—3f)与负变压中心L(图4a—4e)位置基本重合、发展时间同步,负变压中心L的强度变化反映了中尺度涡旋的辐合上升运动强度变化。

4.3.2 MCS发生、发展过程

图5a是2008年7月6日20时—7日20时上林县自动气象站实时气压、标准气压日变化、降雨量曲线。其中,实时气压和降雨量为1 min取样的观测值,上林县7月标准气压日变化是用“自动气象站

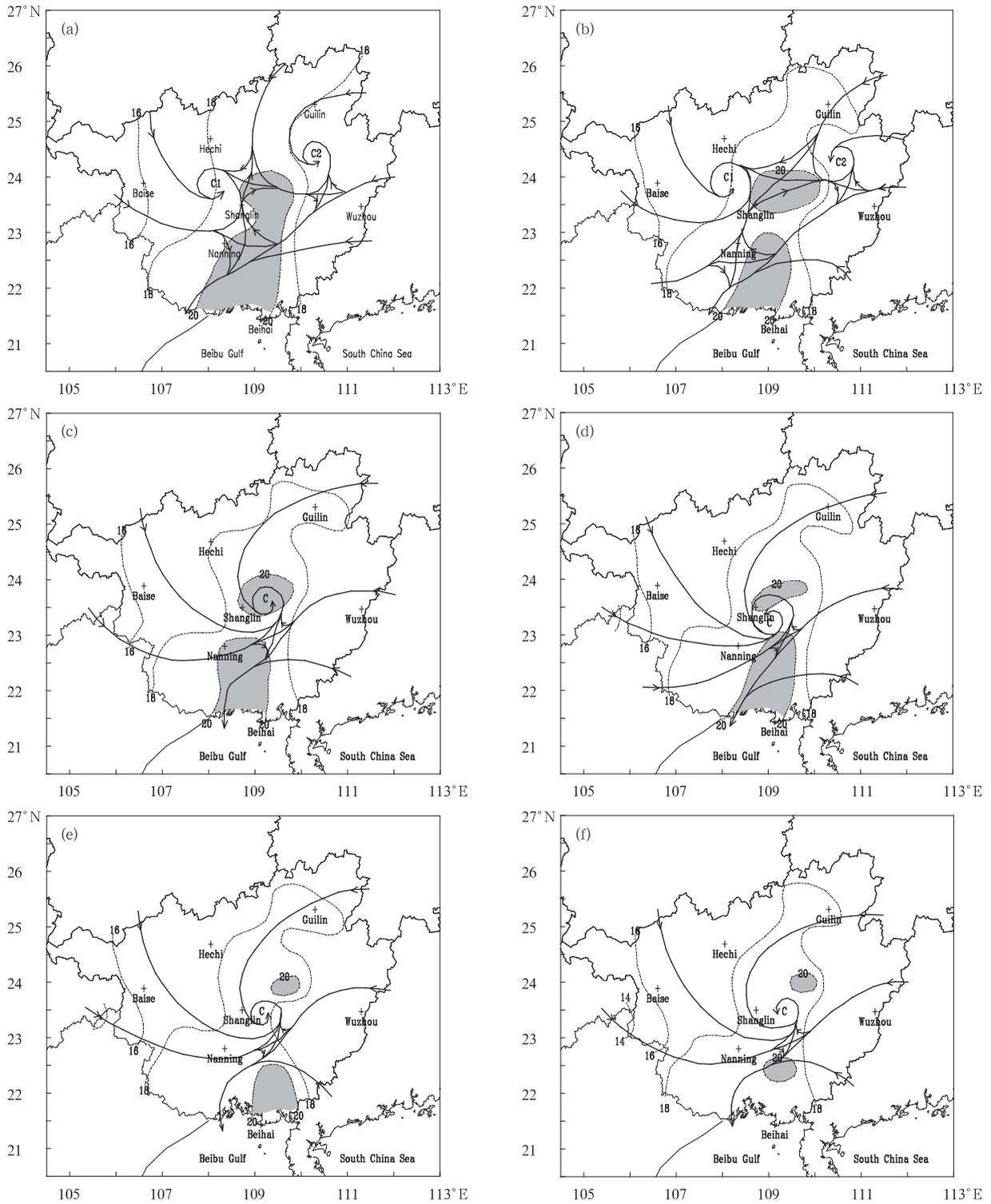


图3 2008年7月6日23时—7日04时地面流线和比湿(g/kg)分布

(a. 6日23时, b. 7日00时, c. 7日01时, d. 7日02时, e. 7日03时, f. 7日04时; 实线为流线, 虚线为等比湿线, 阴影区域 $q \geq 20$ g/kg)

Fig. 3 Streamline (solid lines) and specific humidity (g/kg) analyses for the ground

from 23:00 BT 6 July to 04:00 BT 7 July 2008

(the dashed lines show the specific humidity, the shadow areas show the ones with the specific humidity ≥ 20 g/kg;

a. 23:00 BT 6 July, b. 00:00 BT 7 July, c. 01:00 BT 7 July, d. 02:00 BT 7 July, e. 03:00 BT 7 July, f. 04:00 BT 7 July)

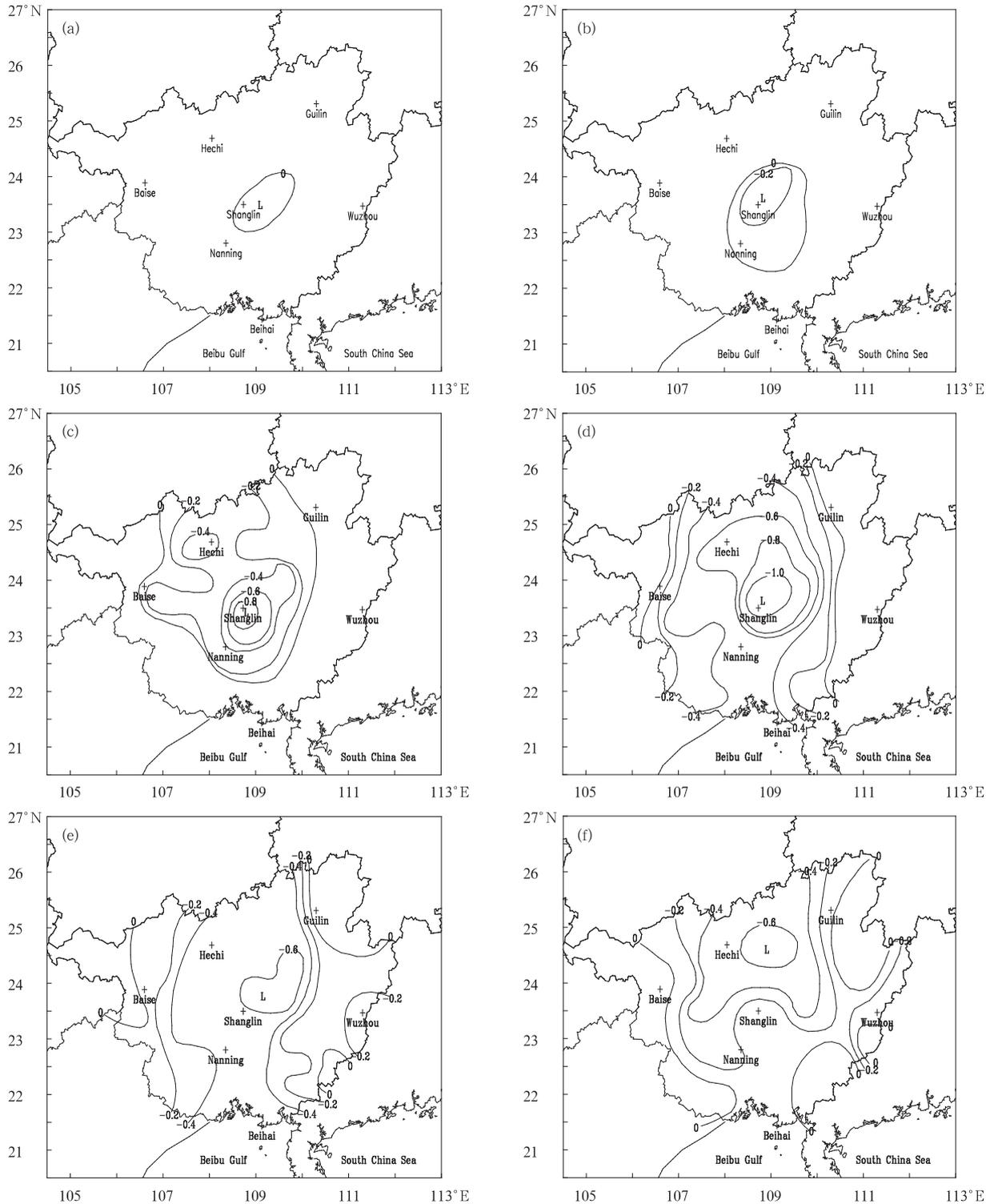


图 4 2008 年 7 月 7 日 00—05 时地面中尺度变压场(hPa)

(a. 00 时, b. 01 时, c. 02 时, d. 03 时, e. 04 时, f. 05 时; 只给出了负变压等值线)

Fig. 4 As in Fig. 3 but for the mesoscale katallobaric center (hPa) from 00:00 to 05:00 BT 7 July 2008

(a. 00:00 BT, b. 01:00 BT, c. 02:00 BT, d. 03:00 BT,

e. 04:00 BT, f. 05:00 BT; The contours are negative)

资料分析处理系统”客观分析得到。为了便于比较实时气压值与标准气压的偏差特征,已将标准气压日变化曲线向下平移 2.5 hPa(相当于作天气尺度气压系统滤波)。实时气压与标准气压日变化的负偏差绝对值(以下简称偏差值)从 7 日 00 时开始持续增大,03 时偏差值达极大,以后偏差值逐渐减小,11 时后偏差值近似为 0,偏差值变化与图 4a—4d 的中尺度负变压中心 L 变化趋势一致。7 日 02 时 10 分当偏差值接近极大值时开始出现强降雨,从 02 时 10 分—03 时 10 分为第 1 个强降雨时段,对应着第 1 个气压小峰包;03 时 30 分—04 时 40 分为第 2 个强降雨时段,对应着第 2 个气压小峰包;05 时后,上

林县自动气象站实时气压偏差逐渐减小直至恢复正常,对应于图 4 中的中尺度负变压中心 L 也逐渐减弱消失。图 5b 是 2008 年 7 月 6 日 23 时—7 日 08 时在图 1b 中所示 MCS 的 $TBB \leq -60^\circ\text{C}$ 面积变化曲线。7 日 02 时后, $TBB \leq -60^\circ\text{C}$ 面积曲线快速上升,05 时进入平顶阶段,06 时后曲线迅速下降。由此可知,7 日 02—04 时为 MCS 发展期,05—06 时为成熟期,06 时后为衰减期。将图 5a 与 5b 对应分析可以看出,7 日 02 时当偏差值增至极大值后, MCS 快速发展。MCS 的发展期和成熟期都是在偏差值为极大值阶段。

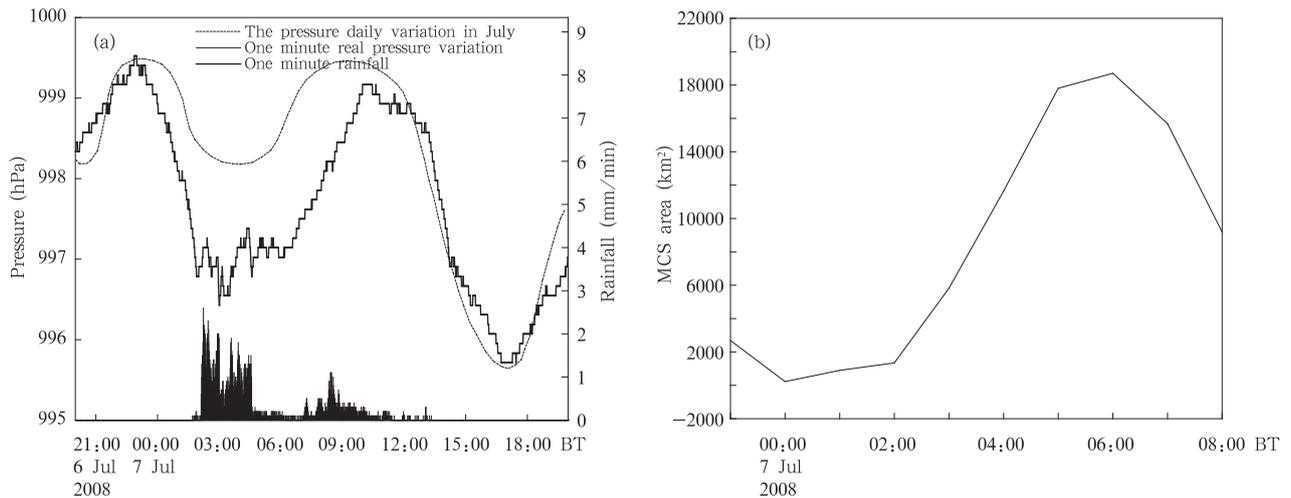


图 5 上林县 2008 年 7 月 6 日 20 时—7 日 20 时自动气象站实时气压、标准气压日变化、降雨量(a)和 2008 年 7 月 6 日 23 时—7 日 08 时 MCS 的 $TBB \leq -60^\circ\text{C}$ 面积变化(b)

Fig. 5 Variation of real-time pressure, the daily variation of standard pressure, and precipitation in Shanglin weather station (a) and the variation of $TBB \leq -60^\circ\text{C}$ area in MCS (b) (a. from 20:00 BT 6 July to 20:00 BT 7 July 2008, b. from 23:00 BT 6 July to 08:00 BT 7 July 2008)

上林县距离南宁探空站约 80 km,利用 6 日 20 时南宁探空资料,使用“MICAPS3.0 系统”分析得出南宁的自由对流高度约为 1.0 km。参考巴德等(1998)计算辐合上升气流速度的方法,设辐合区为圆柱形,底部为地面,辐合气流从侧边界流入,顶部流出,大气为不可压缩状态,则有

$$2\pi R h v = \pi R^2 \omega \quad (8)$$

式中, R 为辐合圆柱半径; h 为辐合圆柱高; v 为从辐

合圆柱侧边界流入气流平均速率; ω 为辐合圆柱中上升气流平均速率。式(8)表示从辐合圆柱侧边界流入的空气质量与从顶部流出的相等,可简化为

$$\omega = \frac{2hv}{R} \quad (9)$$

取 7 日 01 时中尺度变压 0 等值线为辐合圆柱侧边界, $R = 75$ km;取地面到自由对流高度为辐合圆柱高度 $h = 1.0$ km;6 日 20 时广西 6 个探空站 850

hPa 风速为 2—6 m/s, 取 $v=4.0$ m/s, 代入式(9) 计算得 $w \approx 0.11$ m/s, 所以

$$t = \frac{h}{w} = \frac{1000}{0.11} \approx 9090(\text{s}) \approx 2.5(\text{h}) \quad (10)$$

式中, t 即为辐合圆柱中近地面的暖湿气层抬升到自由对流高度所需时间, 与上林县从出现负变压到开始降雨间隔时间很接近, 表明是中尺度涡旋 C 的辐合上升运动将低层暖湿空气抬升至自由对流高度。

综合地面流场(图 3)、中尺度变压场(图 4)、上林县自动站气压、降雨量变化、MCS 发展阶段关系(图 5)和辐合上升速度等可知, 在 MCS 形成与强降雨出现前 2 h 即 7 日 00 时, 在上林县附近形成了一

个中尺度涡旋 C 和中尺度负变压中心 L, 经 2 h 的发展到 02 时, 当中尺度负变压中心 L 发展到较强阶段, 上林县自动站实时气压偏差值达极大值时, 中尺度涡旋 C 的辐合上升运动已经把暖湿空气抬升到自由对流高度, 触发深对流而形成 MCS, 随后 MCS 迅速发展并产生了强降雨, 即为 MCS 的发生、发展过程。

4.3.3 对流单体的发展传播与 MCS 维持

对 2008 年 7 月 6 日 20 时和 7 日 8 时南宁、梧州探空测风分析(图 6)表明, 850—700 hPa 低空, 南宁为西南风, 梧州为偏东风, 两站风向切变明显, 可知此期间两地间存在一条低空切变线。

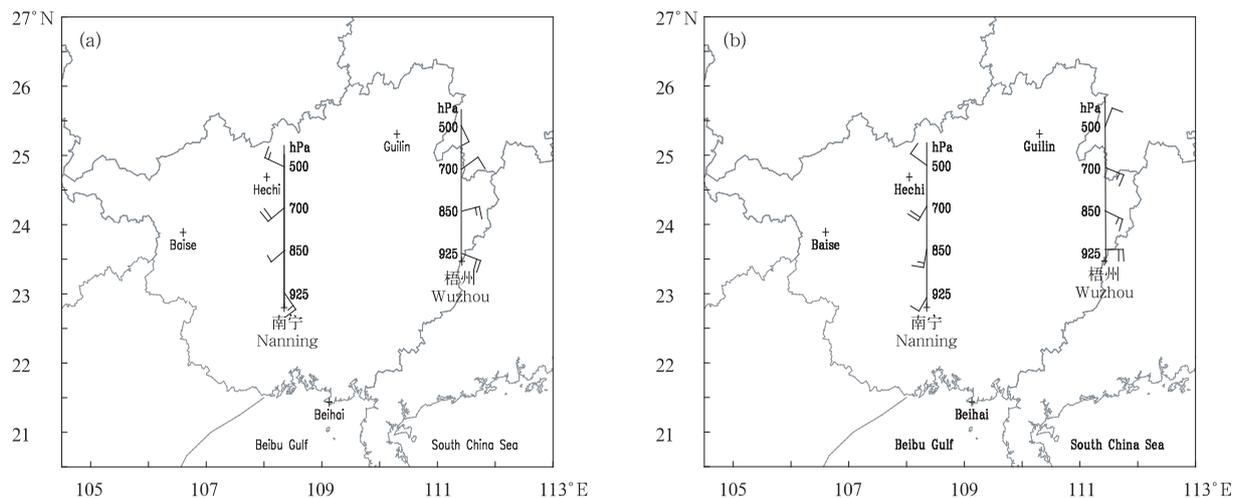


图 6 2008 年 7 月 6 日 20 时(a)和 7 日 08 时(b)南宁、梧州探空测风分析
(风速矢羽长划为 4 m/s, 短划为 2 m/s, 标杆旁数字为风矢相应的高度(hPa))

Fig. 6 Sounding wind observations in Nanning and Wuzhou at 20:00 BT 6 and 08:00 BT 7 July 2008

(Wind velocity: 4 m/s for the long barb and 2 m/s for the short barb.

The numbers refer to the altitude of wind observation (hPa).

a. 20:00 BT 6 July 2008, b. 08:00 BT 7 July 2008)

2008 年 7 月 7 日 01—04 时柳州多普勒雷达基本反射率回波(图 7)表明, 7 日 01 时前造成马山和都安县降雨的对流单体 $n-2$ 、 $n-1$ 正处于减弱消散过程中; 在上林县西边有一新发展起来的对流单体 n , 在此期间继续加强并缓慢东移, 在上林县的东南方有 $n+1$ 新对流单体发展起来, 这些对流单体组成了回波带 S—S。在对流单体 n 和 $n+1$ 缓慢东移

加强的过程中, 新对流单体 $n+2$ 在 S—S 南端形成。04 时, 对流单体 n 强度维持少变, $n+1$ 继续加强缓慢东移, $n+2$ 对流单体发展受到抑制。这些对流单体组成了 MCS。

分析图 6 可知, 在南宁与梧州间存在一条低空切变线, 柳州雷达探测显示除回波带 S—S 外, 无其他明显带状回波, 由此推断回波带 S—S 是低空切

变线所在位置。图 7a—7d 的演变过程表明, MCS 中的对流单体是沿着低空切变线向南东南方向发展传播的, 新生对流单体的加入使 MCS 生命期得以维持约 6 h。

4.3.4 MCS 发生、发展机制的二维概念模型

根据图 1a、1b 云图中 MCS 形态特征, 图 2 中 325 K 等熵面分析结果、图 3e 地面流场、图 4d 中尺度变压场、图 5 上林县自动气象站气压、降雨量变化与 MCS 发生、发展过程, 以及图 7c 中雷达观测对流单体排列规律等分析, 综合得出 MCS 的发生、发展

机制的二维概念模型(图 8)。当高空槽移到桂西时, 槽前上升运动抬升暖湿偏南气流而形成一条偏南—北向的云系, 因槽前大气层结不稳定, 偏南暖湿气流输送充沛水汽, 为 MCS 的发生、发展提供了环境条件。其后, 由于在上林县附近形成了一个中尺度涡旋和一个中尺度负变压中心 L。中尺度涡旋和中尺度负变压中心 L 经 2 个多小时的发展后, 中尺度涡旋把暖湿空气抬升到自由对流高度触发深对流而形成 MCS, MCS 发生地点与地面中尺度涡旋及中尺度负变压中心 L 基本重合。

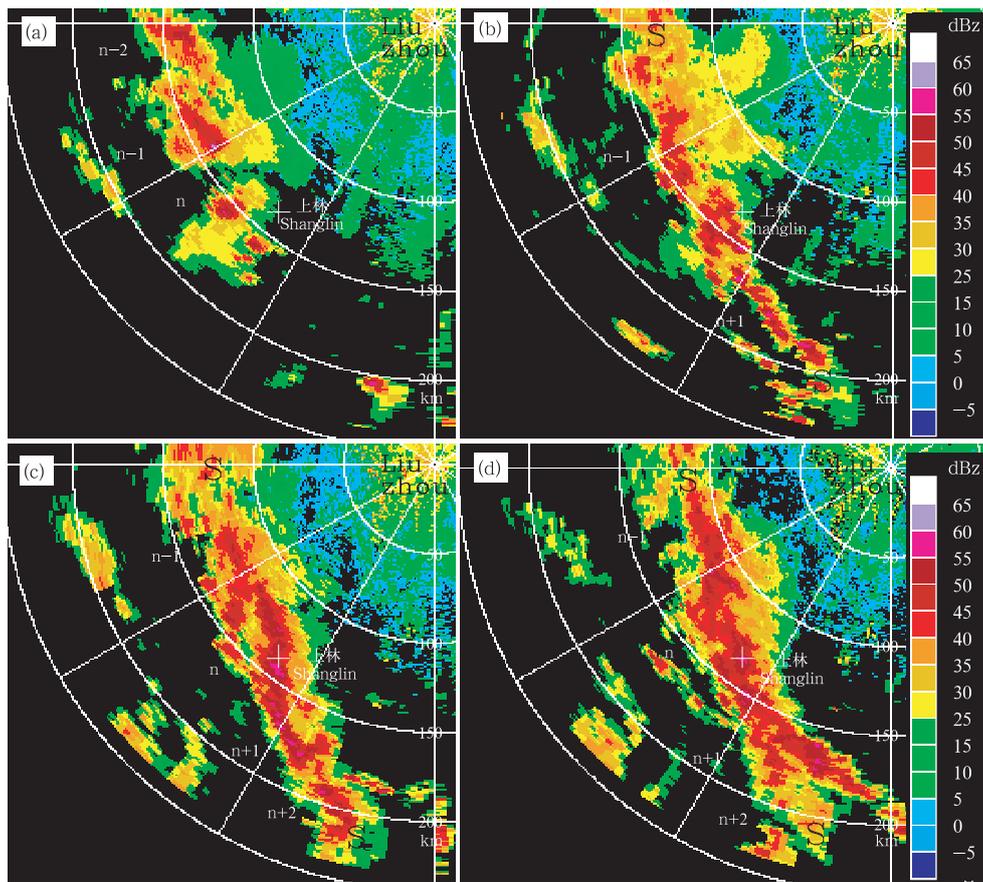


图 7 2008 年 7 月 7 日 01—04 时柳州雷达站(仰角 0.5°)基本反射率回波 (a. 00:48:24, b. 01:49:11, c. 02:49:58, d. 03:50:45; n+2 为最近新生期对流单体, n+1 为新生期对流单体, n 为成熟期对流单体, n-1 为衰减期对流单体, n-2 为较早衰减期对流单体)

Fig. 7 Charts of radar base reflectivity echo (at the elevation 0.5°) in Liuzhou radar station 01:00 - 04:00 BT 7 July 2008 (a. 00:48:24 BT, b. 01:49:11 BT, c. 02:49:58 BT, d. 03:50:45 BT; n+2 show newer convection cell, n+1 show new convection cell, n show mature convection cell, n-1 and n-2 show those in the attenuation stage)

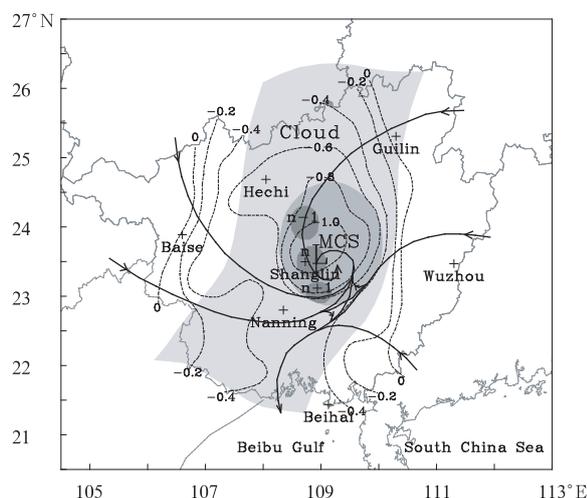


图8 MCS发生、发展机制的二维概念模型

(带箭头实线为流线,虚线为中尺度等变压线(仅绘负等变压线,单位:hPa),L为负变压中心,浅阴影区为低槽前云系,椭圆形中阴影区为MCS,椭圆形深阴影为对流单体,n+1为新生对流单体,n为成熟期对流单体,n-1为衰减期对流单体)

Fig. 8 2D conceptual model for the MCS develop mechanism

(The negative contours only are plotted in hPa; L is for the katalobaric center, shadow shade areas show the cloud before the trough; elliptic shade shows the MCS; elliptic dark shadows mean the convective cell, n+1 is for new convective cells, n is for mature ones, n-1 is for those in the attenuation stage)

5 结论和讨论

2008年7月7日造成上林县特大暴雨过程的高空低槽前MCS发生、发展过程和机制归纳如下:

(1)环境条件。当高空低槽向东南移动而槽底抵达桂西后,槽前偏南气流把来自北部湾的水汽向内陆输送,在地面形成一条从沿海伸向桂中的湿舌,为MCS的发生、发展准备了水汽条件。槽前是暖湿偏南气流的上升不稳定区域, $\theta_{se500} - \theta_{se850}$ 稳定度判据也证实槽前为大气层结不稳定区,为MCS发生、发展准备了位势不稳定条件。

(2)中尺度涡旋辐合上升运动抬升暖湿空气触发MCS。随着地面中尺度涡旋C和中尺度负变压中心L不断增强发展,经过2个多小时的发展后,中尺度负变压中心L强度已增强到-1.0 hPa以下,中尺度涡旋C辐合上升运动把暖湿空气抬升到

自由对流高度而触发深对流,MCS在地面中尺度涡旋C和中尺度负变压中心L上空发生发展。

(3)对流单体沿低空切变线发展传播加入MCS,使MCS得以维持和发展。

2008年7月6日20时—7日14时发生在广西的高空槽暴雨过程具有典型性和代表性,通过利用自动气象站资料进行中尺度流场和变压场的分析,分析出中尺度涡旋和中尺度负变压中心比MCS形成时间超前、位置重合等特征,这对MCS的短时临近预报有实际意义。但这仅是一个高空槽前MCS的个例分析,是否具有普遍性需要作更广泛的研究。

参考文献

- 巴德 M J, 福布斯 G S, 格兰特 J R 等. 卢乃锰等译. 1998. 卫星与雷达图象在天气预报中的应用. 北京: 科学出版社, 70-75, 304-305
- 陈敏, 陶祖钰, 郑永光等. 2007. 华南前汛期锋面垂直环流及其与MCS的相互作用. 气象学报, 65(5): 785-791
- 陈渭民. 2003. 卫星气象学. 北京: 气象出版社, 196-222
- 林宗桂, 李耀先, 林开平等. 2009. 一个长生命周期中尺度对流系统维持机制的研究. 气象学报, 67(4): 640-651
- 蒙伟光, 王安宇, 李江南等. 2004. 华南暴雨MCS的形成及湿位涡分析. 大气科学, 28(3): 330-341
- 蒙伟光, 张艳霞, 戴光丰等. 2007. 华南沿海一次暴雨MCS的形成和发展过程. 热带气象学报, 23(6): 521-530
- 寿亦萱, 许健民. 2007. “05.6”东北暴雨MCS研究I: 常规资料和卫星资料分析. 气象学报, 65(2): 160-170
- 寿亦萱, 许健民. 2007. “05.6”东北暴雨MCS研究II: MCS动力结构特征和雷达卫星资料分析. 气象学报, 65(2): 171-182
- 孙健, 刘淑媛, 陶祖钰等. 2004. 1998年6月8—9日香港特大暴雨MCS分析. 大气科学, 28(5): 713-721
- 孙建华, 赵思雄. 2002a. 华南“94.6”特大暴雨的MCS及其环境场研究I: 引发暴雨的 β MCS的数值模拟研究. 大气科学, 26(4): 541-557
- 孙建华, 赵思雄. 2002b. 华南“94.6”特大暴雨的MCS及其环境场研究II: 引发暴雨的 β MCS的数值模拟研究. 大气科学, 26(5): 633-646
- 孙建华, 张小玲, 齐琳琳等. 2004. 2002年6月20—24日梅雨锋MCS发生发展分析. 气象学报, 62(4): 423-438
- 王亦平, 陆维松, 潘益农等. 2008a. 淮河流域东北部一次异常特大暴雨的数值模拟研究I: 结果检验和MCS的特征分析. 气象学报, 66(2): 167-176
- 王亦平, 陆维松, 潘益农等. 2008b. 淮河流域东北部一次异常特大暴雨的数值模拟研究II: 不稳定条件及其增强和维持机制分析. 气象学报, 66(2): 177-189
- 夏茹娣, 赵思雄, 孙建华. 2006. 一类华南锋前暖区暴雨 β 中尺度系统

- 环境特征的分析研究. 大气科学, 30(5):988-1008
- 赵玉春, 李泽椿, 王叶红等. 2008. 2006年6月5—8日梅雨锋上 MCS 引发福建北部暴雨进行了诊断分析. 大气科学, 32(3):598-614
- 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文等. 2000. 天气学原理和方法(第三版). 北京: 气象出版社, 423-428
- 周秀骥, 薛纪善, 陶祖钰等. 2003. 98 华南暴雨科学试验研究. 北京: 气象出版社, 5-46
- Colleen A L, Edward N. R. 1987. The life cycle and internal structure of a mesoscale convective complex. *Mon Wea Rev*, 115: 1503-1527
- Jason E N, Ray l M, William R C. 1994. An observational analysis of a developing mesoscale convective complex. *Mon Wea Rev*, 122:1168-1188
- John A A, Howard K W. 1991. Mesoscale convective complexes over the United States during 1986 and 1987. *Mon Wea Rev*, 119:1575-1589
- Maddox R A. 1980. Mesoscale convective complexes. *Bull Amer Meteor Soc*, 61(11):1374-1387
- Peter J W, William R C, Ray L M. 1983. A long-lived mesoscale convective complex, Part II: Evolution and structure of the Mature complex. *Mon Wea Rev*, 111(10):1919-1937
- Raymond D J, Jiang H. 1990. A theory for long-lived mesoscale convective system. *J Atmos Sci*, 47(24):3067-3077
- Robert A H Jr, Rutledge S A, Biggerstaff M I, et al. 1989. Interpretation of Doppler weather radar displays of midlatitude mesoscale convective systems. *Bull Amer Meteor Soc*, 70(6):608-619