

一个长生命期中尺度对流系统维持机制的研究^{* 1}

林宗桂¹ 李耀先² 林开平³ 陈翠敏⁴ 卢伟萍¹ 林 墨⁵
LIN Zhonggui¹ LI Yaoxian² LIN Kaiping³ CHEN Cuimin⁴ LU Weiping¹ LIN Mo⁵

1. 广西壮族自治区气象减灾研究所, 南宁, 530022

2. 广西气象学会, 南宁, 530022

3. 广西壮族自治区气象台, 南宁, 530022

4. 广西南宁市气象局, 南宁, 530022

5. 广西壮族自治区防雷中心, 南宁, 530022

1. *Guangxi Institute of Meteorology and Disaster-Mitigation Research, Nanning 530022, China*

2. *Guangxi Meteorological Society, Nanning 530022, China*

3. *Guangxi Meteorological Observatory, Nanning 530022, China*

4. *Nanning Meteorological Bureau, Nanning 530022, China*

5. *Institute of Lightning Protection of Guangxi, Nanning 530022, China*

2008-11-05 收稿, 2009-01-14 改回.

Lin Zhonggui, Li Yaoxian, Lin Kaiping, Chen Cuimin, Lu Weiping, Lin Mo. 2009. A study on maintain mechanism of a long life-cycle mesoscale convective systems. *Acta Meteorologica Sinica*, 67(4):640—651

Abstract This paper describes the analysis of a MCS long life cycle in the south of China during April 2008. Using FY-2C geostationary satellite multi-channel cloud images, radar observations, records obtained from automatic weather stations and others irregular observations, a long life cycle mesoscale convective systems (MCS) was studied to analyze the maintainable mechanism of MCS, which occurred in the middle part of Guangxi on 12 April 2008, and then moved to the southeast of Guangxi, the western Guangdong and The South China Sea. The MCS lasted 25 hours, and hence may be classified as a long life cycle. Section lines of TBB were given in the hourly cloud images of water vapor (WV) on April 12, from 05:00 to 20:00 BST, to analyze the TBB character change over time. Images show that there is an apparent course from wet to dry state in upper troposphere before 14:00. Simultaneously in the lower troposphere, a mesoscale water conveyor belt which was sustained and stable and extended from Beibu Gulf to southeast of Guangxi could be detected from the composite cloud images of infrared (IR1) and near infrared (IR4) and visible light (VIS). In the dry area of upper air and wet area of low altitude, an instability area was formed in the southeast of Guangxi, which favored the formation and maintenance of MCS. It could be concluded from records of automatic weather stations that while the quasi-stationary front moving slowly from the north to the south, continuously lifting the wet warm air and triggering the deep convection, a MCS was formed. Characterized by the relationship between MCS forming course and the changes of atmospheric pressure, air temperature, wind velocity, precipitation, it could be regarded as a typical lifting and trigger course of the front. Results show that the main favorable factors maintaining a MCS long life cycle can be concluded in 2 points as below. Firstly, while the upper air changed from wet to dry, the water vapor and heat were carried from Beibu Gulf by a continuing mesoscale vapor conveyor belt in the lower troposphere to form the unstable atmospheric structure, providing an advantageous condition for MCS maintenance. Secondly, old convection cells of MCS gradually weak-

* 资助课题: 中国气象局气象新技术推广项目(CMATG2009MS08), 广西科学基金项目(桂科自 0991208), 广西科技攻关项目(0592005-2B)。

作者简介: 林宗桂, 主要从事卫星云图在天气分析和预报中的应用研究。E-mail: lzg10802@163.com

ened in the way to the east, and were constantly replaced by new ones occurring in the southwest of the quasi-stationary front moving slowly southwards provided MCS with energy to survive. A concept model of MCS is presented in the essay.

Key words Long life cycle, Mesoscale convective systems, Maintain mechanism, Mesoscale vapor conveyor belt

摘要 利用 FY-2C 多通道卫星云图、雷达资料和自动气象站记录等非常规观测资料,研究 2008 年 4 月 12—13 日形成于广西中部、移过广西东南部和广东西部到达南海的一个单独且生命期持续长达 25 h 的中尺度对流系统(MCS)的维持机制。水汽图(WV)分析显示 4 月 12 日 14 时前,对流层中上层存在一个明显的由湿变干过程,与此同时从红外(IR1)、中红外(IR4)和可见光(VIS)云图的合成分析中检测到低空有一条从北部湾延伸到广西东南部持续稳定的中尺度水汽输送带,在高空干区与低空湿区重合的广西东南部上空形成了强位势不稳定区,为 MCS 的形成和维持提供了有利环境条件。根据自动气象站记录分析结果,准静止锋在缓慢南移过程中连续抬升触发深对流而形成 MCS,是一个典型的锋面抬升触发过程。分析表明,MCS 能维持长生命期主要有利因素是:(1)在高空气流由湿变干的条件下,来自北部湾海面持续的低空中尺度水汽输送带给广西东南部提供充足的水汽、热量并形成大气位势不稳定层结,较长时间保持的位势不稳定层结为 MCS 的维持提供了有利环境条件;(2)稳定而持续缓慢南移的准静止锋在 MCS 西南边不断触发新的对流单体,这种后向传播方式触发的新对流单体并入 MCS 后,补充已减弱东移的旧单体,使 MCS 具有持续生命力。最后,给出了 MCS 的概念模型。

关键词 长生命期,中尺度对流系统,维持机制,中尺度水汽输送带

中图法分类号 P458

1 引言

中尺度对流系统(Mesoscale Convective Systems, 简称 MCS)的发生发展和维持机制是中尺度气象学研究的重点对象。自 Maddox(1980)对 MCC 进行了定义后,许多学者(Wetzel, et al, 1983, Leary, et al, 1987, Raymond, et al, 1990, Augustine, et al, 1991, Nachamkin, et al, 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,广泛而深入地研究了 MCS 结构、环境条件和演变特征等。中国的气象学家重点对产生暴雨灾害的 MCS 进行了广泛的研究,其中主要用数值模拟方法进行研究的有:孙建华等(2002)对华南“94.6”特大暴雨的中尺度对流系统及其环境场进行了研究;蒙伟光等(2004)对华南暴雨中尺度对流系统的形成及湿位涡进行分析;陈敏等(2007)研究了华南前汛期锋面垂直环流及其与中尺度对流系统的相互作用;王亦平等(2008)研究了淮河流域东北部一次异常特大暴雨过程的 $M\beta CS$ 特征和不稳定条件及其增加与维持的机制。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。孙建华等(2004)对 2002 年 6 月 20—24 日梅雨锋 MCS 发生发展进行了分析。夏茹娣等(2006)对一类华南锋前暖区暴雨 MCS 环境特征进行分析研究。寿亦萱等(2007)利用常规资料、雷达卫星资料等分析了“05.6”东北暴雨过程中 MCS 的环境特征、动力结

构特征等。蒙伟光等(2007)对华南沿海一次暴雨 MCS 的形成和发展过程进行了分析。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。以上这些研究多是从不同方面对 MCS 的发生发展机理进行分析研究,而对 MCS 的维持机制研究相对较少,这是一个有待深入研究的方面。

2008 年 4 月 12—13 日在高空为弱斜压大气环境条件下,一个单独且持续维持的具有多单体风暴结构特征的 MCS 形成于广西中部,随后移过广西东南部和广东西部,其生命期长达 25 h。本文主要使用 FY-2C 卫星多通道云图、雷达探测和自动气象站记录等非常规观测资料,从 MCS 生命期中的环境条件特征、持续的对流触发机制以及 MCS 结构特征等方面,分析这些条件在 MCS 生命期过程中的相互关系和所起的作用,探索 MCS 得以长时间维持的机制。

2 资料和使用说明

MCS 主要活动区域桂平市和玉林市目前没有探空站和雷达站,桂平市位于柳州雷达站东南方向 147° 距离 126 km 处;玉林市位于柳州雷达站东南方向 157° 距离 206 km 处。文中主要使用 FY-2C 卫星多通道云图、柳州雷达站探测资料和自动气象站观测资料。因为南宁位于 MCS 主降雨区西面,为 MCS 主活动区上风方;北海位于 MCS 主降雨区西

南面,是水汽通道上游站;梧州位于 MCS 主降雨区东面,为 MCS 下风方;选用这 3 个探空站的实际探测数据便于与卫星云图分析结果进行比较和估算,所以选用南宁、北海和梧州探空站的探空资料配合卫星、雷达和自动气象站观测资料进行分析研究。

2.1 常规资料

文中使用 2008 年 4 月 12 日 08 时—12 日 20 时(北京时,下同)南宁、北海和梧州的探空资料(包括 925—250 hPa 温度、高度、风和温度露点差等)分析 MCS 的环境场特征。

2.2 非常规资料

(1) FY-2C 卫星资料:2008 年 4 月 11 日 08 时—13 日 08 时的 Micaps 数据格式的红外(IR1:10.3—11.3 μm)、水汽(WV:6.3—7.6 μm)、中红外(IR4:3.5—4.5 μm)、可见光(VIS)等通道云图资料。

根据卫星图像识别原理(陈渭民,2003),红外通道(IR1)图像表示的是辐射面温度,主要用于分析确定对流系统位置、对流云团的范围和强度,以及分析对流层低层的水汽信息等;水汽通道(WV)表示 300—700 hPa 辐射特征,主要用于提取对流层中、高层水汽信息;可见光通道(VIS)表示的是反照率,具有比红外通道云图更高的分辨率,在白天对低空的层状云有较好的表现能力,主要用于分析锋面云层和对流云的细节;中红外通道(IR4)既具有表示辐射面温度,又具有可见光反照率特征,主要利用其表示的辐射特征,与红外通道配合提取低层水汽信息。

(2) 雷达探测资料:柳州雷达站 CINRAD/SB 型多普勒雷达探测的每小时 1 次的基本反射率,主要用于分析 MCS 的结构特征。

(3) 地面自动站观测资料:2008 年 4 月 11 日 20 时—13 日 08 时,广西地面 7 要素自动气象站 1 min 取样的气压、温度、风、降雨自动观测资料。

3 MCS 概况和环流背景

卫星云图动画显示,2008 年 4 月 12 日影响广西东南部的是一个单独且连续维持的 MCS,红外云图(图 1a₁—1a₆)显示了 MCS 生命过程的主要特征,12 日 05—10 时为发生发展阶段,此阶段 MCS 面积不断增大,云顶温度迅速降低;12 日 10—22 时为成熟阶段,此阶段 MCS 面积达最大,云顶白亮,云顶温度达最低;12 日 23 时后进入衰减消散阶段,MCS 面积开始减小,最冷的云顶变暖。

从 MCS 的移动路径和降雨区分布(图 1b)可

见,12 日 05 时 MCS 在广西柳州市北部形成后向东南方向移动,08 时移近桂平市后转向偏南方向移动,17 时移过玉林市,23 时后移出广西进入广东西部,13 日 02 时移到广东沿海,此后继续南移进入南海,06 时后在海面上消失。MCS 的生存时间约为 25 h,移动路径总长约 450 km,平均时速约 18 km/h,其中在广西东南部移动相对较慢,从桂平市到玉林市距离 85 km,用时为 7 h,平均时速约为 12 km/h。MCS 在移动过程中连续产生了降雨,其中强降雨区主要出现在桂东南,雨量 ≥ 50.0 mm 的有 9 个市县, ≥ 100.0 mm 的有 5 个市县;暴雨中心位于玉林市,过程降雨量为 201.0 mm,最大降雨强度达 104.5 mm/h;暴雨区呈南北向带状分布,东西宽约 100 km,南北长度超过 200 km。

2008 年 4 月 12 日 08 时高空天气形势是华南上空环流平直(图略),700 hPa 高度以上高空盛行偏西气流,500 hPa 的高压中心位于越南南部,584 dagpm 线由西向东穿过广西中部,为南高北低形势,在 MCS 形成及维持期间高空无明显西风带斜压系统。低空 850 hPa 的切变线在南岭以北,边界层 925 hPa 广西中部有一条切变线。

地面天气形势是在 4 月 11 日 23 时准静止锋自北边移入广西后继续缓慢南移,于 13 日凌晨移过广西到达沿海,13 日 05 时后到达南海北部而锋消。从广西西北部有 1 条弧形准静止锋延伸到广西东部(图 1c),准静止锋北边为偏北风,准静止锋南边为偏南风,地面气压场较弱。

4 MCS 维持机制分析

4.1 水汽条件和位势不稳定层结

4.1.1 大气层结稳定度基本判别原理

根据大气层结稳定度判别原理(朱乾根等,2000),局地稳定度的变化是由上、下层等压面的温度和湿度的局地变化所决定,即

$$\frac{\partial I}{\partial t} = M \left\{ \left[\left(\frac{\partial T}{\partial t} \right)_H - \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right)_L \right] + 2.5 \left[\left(\frac{\partial q}{\partial t} \right)_H - \left(\frac{\partial q}{\partial t} \right)_L \right] \right\} \quad (1)$$

式(1)中, $\frac{\partial I}{\partial t}$ 表示稳定度的局地变化,如果 $\frac{\partial I}{\partial t} > 0$ 表示稳定度增加, $\frac{\partial I}{\partial t} < 0$ 表示稳定度减小; M 为系数;下标 H 表示高层大气, L 表示低层大气,通常在中高纬度地区计算时 H 取值 700 hPa, L 取值 850 hPa,由于低纬度地区夏季温度场较弱,低空湿

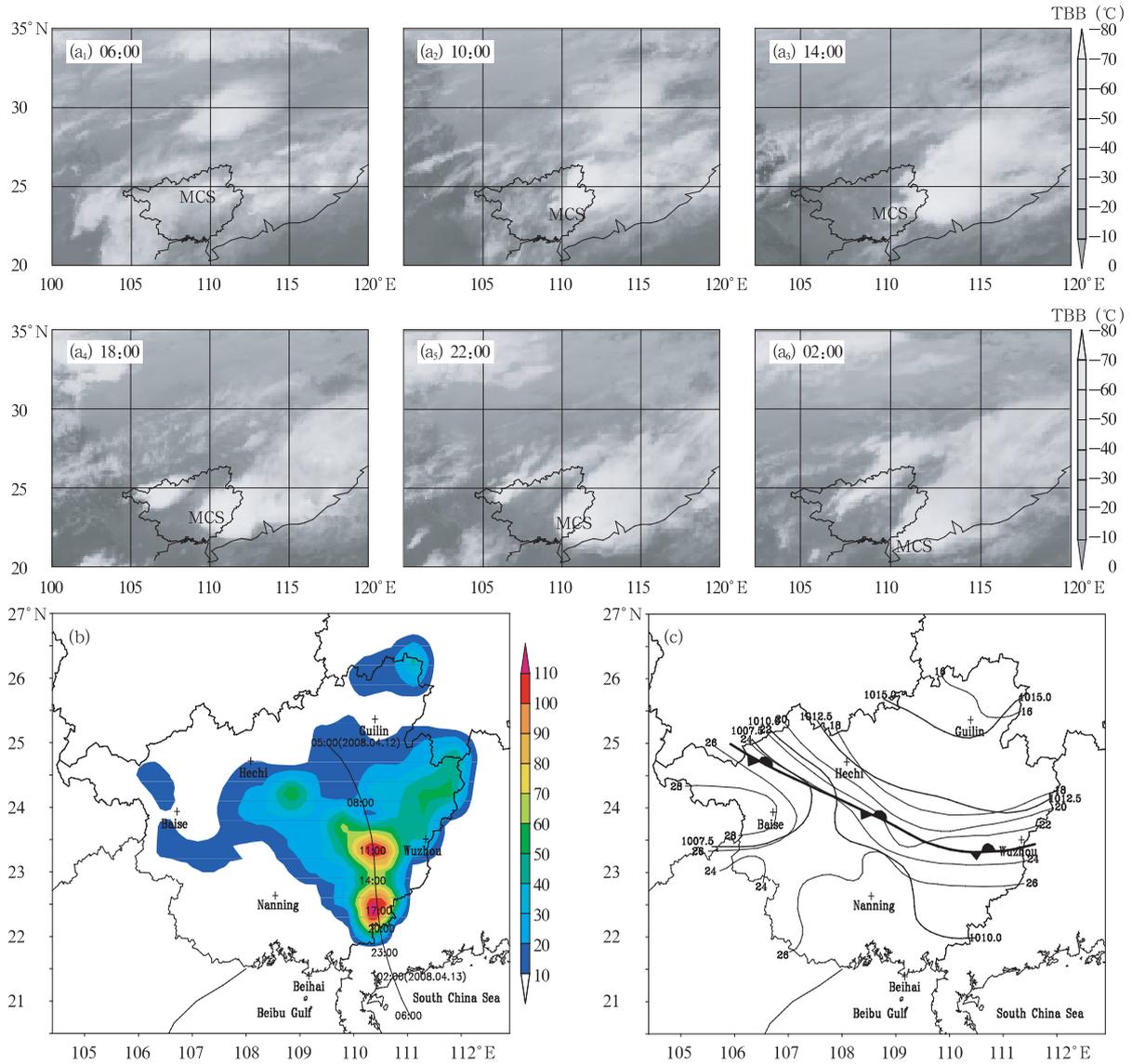


图1 MCS生命期内FY-2C红外云图(a)、MCS移动路径与降雨分布(b)及地面天气图(c)
 (a₁—a₆. 2008年4月12日06时—13日02时FY-2C红外卫星云图;b. 2008年4月12日05时—13日06时
 MCS移动路径及广西境内降雨分布(单位:mm);c. 根据2008年4月12日10时自动气象站观测记录分析
 的地面天气图,图中齿线表示准静止锋,黑色实线为等压线
 (单位:hPa,间隔:2.5 hPa),红色实线为等温线(单位:°C,间隔:2.0°C))

Fig. 1 FY-2C cloud images during the life cycle of MCS, path of MCS,
 the spatial distribution of rainfall and the surface synoptic chart

(a₁—a₆. FY-2C cloud images during the life cycle of MCS from 06:00 BST 12 Apr to 02:00 BST 13 Apr 2008;
 b. path of MCS from 05:00 BST 12 Apr to 06:00 BST 13 Apr 2008 and rainfall in Guangxi (mm); c. surface synoptic
 chart by automatic weather station at 10:00 BST 12 Apr 2008, line with sawtooth showed quasi-stationary front,
 black line showed isobar (for every 2.5 hPa), red line showed isotherm (for every 2.0°C))

层较厚,同时水汽图(WV)主要反映的是对流层中
 上层的湿度分布状况,因此本文中 H 取值 700 hPa
 以上, L 取值 700 hPa 以下;右边第 1 项表示大气
 上、下层温度局地变化;第 2 项表示大气上、下层比

湿的局地变化。式(1)表明:当高层大气温度降低,
 低层大气温度升高时气层趋于不稳定,反之则趋于
 稳定;当高层大气湿度减小,低层湿度增加时气层趋
 于不稳定,反之则趋于稳定。

4.1.2 对流层中上层空气湿度变化特征

2008年4月11日14时—13日08时的水汽图(WV)上,位于广西上风方的中南半岛在4月11日17时—12日4时有较大范围的深对流发展,对流活动把水汽从低层带到高空并随偏西气流输送到广西上空而形成高湿区。12日05时后,中南半岛的对流活动减弱消失,水汽输送停止,广西对流层中上部的高湿区向东移去,在12日05—23时各同一时次的水汽图(WV)亮度明暗变化在广西上空南北向差

别较小,主要表现在东西方向上的差别上(图略),表明水汽含量南北方向变化幅度小,东西方向变化幅度大,这是由于高空气流自西向东流动,不同水汽含量的高空气流流过,造成广西对流层中上部干湿程度发生变化。为了分析广西对流层中上部东西方向的水汽含量变化,沿500 hPa高空气流方向,取过广西中部的剖面线A—B(图2a),并沿剖面线A—B在水汽图(WV)上作TBB剖面曲线(图2b)。

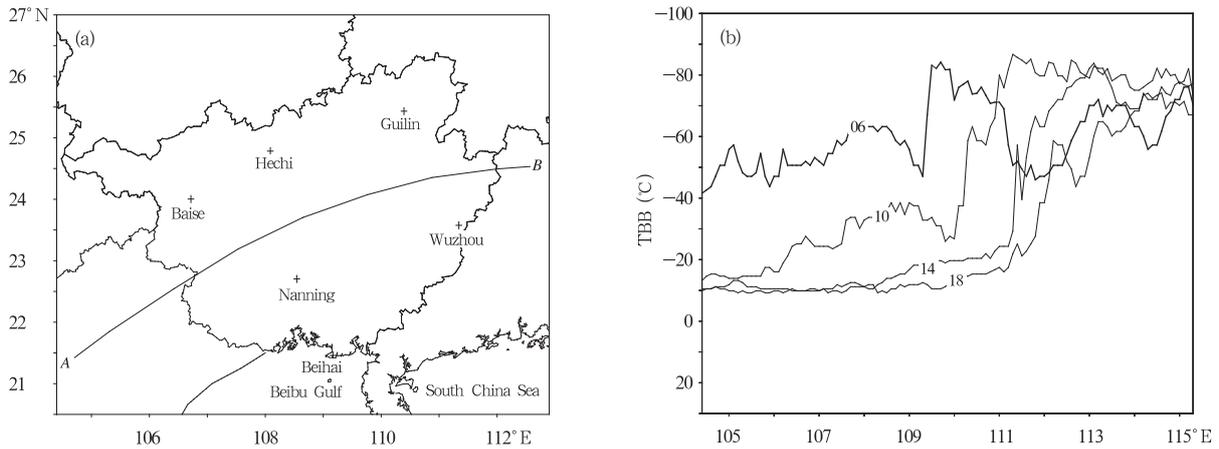


图2 2008年4月12日剖面线A-B(a)和水汽图(WV)TBB剖面曲线(b)
(a. 底图为广西地图; b. 06为06时, 10为10时, 14为14时, 18为18时)

Fig. 2 Profile line A-B(a) and Water vapor profiled along A-B(b) on 12 Apr 2008

(a, based on the map of Guangxi. b, 06 is 06:00 BST, 10 is 10:00 BST, 14 is 14:00 BST, 18 is 18:00 BST)

由图2b可以看出,12日06时后TBB曲线明显向下平移,14时剖面线向下平移距离相当于TBB绝对值约为40℃,18时与14时的剖面线基本重合。TBB剖面线向下平移,表明广西对流层中上层的水汽含量在连续减少,气层由湿变干,由此推得式(1)中 $\left(\frac{\partial q}{\partial t}\right)_H < 0$ 。

分析2008年4月12日08时和20时的南宁、梧州,北海水汽(比湿)和温度探测数据也可证实从水汽图(WV)分析得到的结果。

表1 2008年4月12日探空各层比湿(g/kg)数据

Table 1 Specific humidity (g/kg) from 925 hPa to 200 hPa on 12 Apr 2008

等压面(hPa)	925	850	700	500	400	300
南宁 08时	14.2	15.4	9.7	1.9	0.5	0.3
南宁 20时	15.2	13.2	8.3	0.9	0.2	0.1
梧州 08时	16.0	13.5	8.5	2.1	1.3	0.3
梧州 20时	16.0	12.1	5.8	4.6	2.7	1.0
北海 08时	17.0	14.0	9.5	1.7	0.4	0.3
北海 20时	15.2	14.0	11.6	1.7	0.4	0.1

表2 2008年4月12日探空各层温度(℃)数据

Table 2 Temperature (℃) from 925 hPa to 200 hPa on 12 Apr 2008

等压面(hPa)	925	850	700	500	400	300	250	200
南宁 08时	20	19	10	-6	-17	-32	-43	-55
南宁 20时	22	19	11	-5	-17	-32	-43	-54
梧州 08时	21	17	9	-5	-17	-33	-42	-55
梧州 20时	19	17	8	-7	-16	-31	-42	-54
北海 08时	23	20	11	-5	-17	-32	-42	-54
北海 20时	24	20	12	-5	-16	-32	-42	-53

比较比湿数值(表 1)可见, 南宁探空站对流层中上层 20 时的比湿较 08 时明显减小, 空气由湿变干; 梧州探空站比湿数值明显增大, 这是由于其上风方 MCS 中的对流运动把水汽从低层带到高空后流到下游的梧州站的结果。

从表 2 的温度对比可以看出, 南宁、北海、梧州探空站 08 时与 20 时的温度变化较小, 由此证明式

$$(1) \text{中温度变化项} \left[\left(\frac{\partial T}{\partial t} \right)_H - \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right)_L \right] \approx 0。$$

4.1.3 低空水汽输送过程

图 3 是 4 月 12 日 14 时广西及周边地区的红外(IR1)、中红外(IR4)和可见光云图(VIS), 从取阈值 $TBB \geq 5^\circ\text{C}$ 滤波处理后的红外云图(图 3a)中可检测出从北部湾延伸到广西东南部的云带 C—C; 图 3b

中也可检测出与图 3a 中对应的云带 C—C, 图 3b 中云带 C—C 的色调与周围海面色调基本接近, 与陆地色调反差明显; 图 3c 检测不到与图 3a 对应的云带 C—C, 北部湾海面上是无云区。这是由于低空水汽含量高的地区辐射温度低, 在红外(图 3a)和中红外云图(图 3b)上显得较亮, 水汽含量少的地区辐射温度高而显得较暗, 因水汽是无反照率的, 所以图 3c 检测不到云带 C—C。由图 3a、图 3b 和图 3c 这三个通道云图的检测结果判断得知云带 C—C 是一条中尺度水汽输送带。在每小时 1 幅的红外云图中, 图 3a 中云带 C—C 从 4 月 12 日 05—16 时持续存在, 位置只略向东移。

在 4 月 12 日 08 时北海探空站探测数据中, 700 hPa 是偏西风, 850 hPa 是西南风, 由图 3a 云

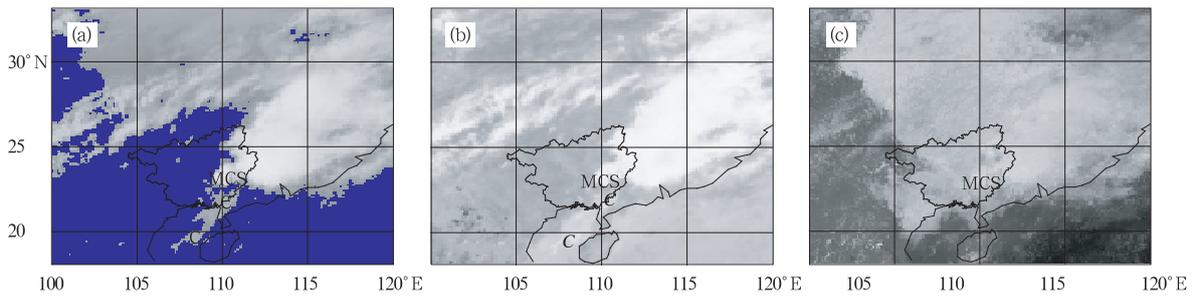


图 3 2008 年 4 月 12 日 14 时 FY-2C 卫星云图(a, 红外(IR1), 蓝色区域表示 $TBB \geq 5^\circ\text{C}$; b, 中红外(IR4); c, 可见光(VIS))

Fig. 3 FY-2C cloud images at 14:00 BST on 12 Apr 2008

(a, infrared(IR1), the blue area shows the $TBB \geq 5^\circ\text{C}$; b, near infrared(IR4); c, visible light(VIS))

带 C—C 的宽度、云带走向和北海高空风向以及红外(IR1)云图 TBB 值估计, 中尺度水汽输送带 C—C 高度在 3 km 以下, 宽度为 150—200 km, 由表 1 可估计得中尺度水汽输送带 C—C 在 1.5 km 高度以下的比湿 $\geq 14.0 \text{ g/kg}$ 。

红外云图明显地表示出水汽输送带 C—C 的源地是北部湾, 汇集地是广西东南部, 这正是 MCS 的活动区域, 并由此分析推断出在广西东南部对应的

$$\text{式(1)水汽变化项} \left(\frac{\partial q}{\partial t} \right)_L > 0。$$

由此可见, 这条来自北部湾的中尺度水汽输送带 C—C 提供了 MCS 发生发展所必需的水汽和热量条件, 其持续性和稳定性是 MCS 能够维持长生命期的关键因素之一。

4.1.4 位势不稳定层结的形成和维持

根据前述的对流层中上层空气湿度变化特征和低层水汽输送过程分析, 综合得到图 4 所示的分析

结果。其中, 图 4a 是根据 4 月 12 日 07 时—13 日 04 时水汽图(WV)的形态特征分析和图 2a 分析结果综合而得, 图中宽箭头表示自西向东的干空气, 干空气的底部约在 700 hPa, 顶部达对流层顶, 宽度达广西南北边界, 东边达广西东部。图 4b 中的 WS—EN 向窄箭头表示自北部湾向广西东南部的的水汽输送, 是根据图 3 分析结果所得。

因为, 由前述分析得

$$\left[\left(\frac{\partial T}{\partial t} \right)_H - \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right)_L \right] \approx 0, \left(\frac{\partial q}{\partial t} \right)_H < 0, \left(\frac{\partial q}{\partial t} \right)_L > 0$$

所以, 式(1)可表达为

$$\frac{\partial I}{\partial t} = M \left\{ 2.5 \left[\left(\frac{\partial q}{\partial t} \right)_H - \left(\frac{\partial q}{\partial t} \right)_L \right] \right\} < 0 \quad (2)$$

式(2)中, 对流层中上层的干空气与低层湿空气对稳定度的综合贡献是 $\frac{\partial I}{\partial t} < 0$ 。式(2)表明, 在高空干空气和低层湿空气重合的广西东南部产生了强位势不

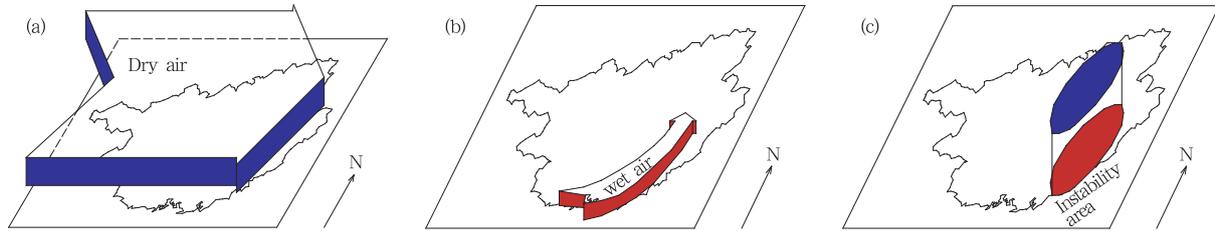


图4 高空干空气与低空湿空气叠加构成位势不稳定层结示意

(a. 蓝色箭头表示高空干空气; b. 红色箭头表示低空湿空气; c. 红、蓝叠加区为位势不稳定区域; 底图为广西地图)

Fig. 4 Sketch map of the instability area during the dry and the wet current encounter

(a. blue arrow showed dry air; b. red arrow showed wet air; c. red and blue overlap showed instability area; based on the map of Guangxi)

稳定层结(图4c)。

在FY-2C水汽图(WV)上高空干空气在4月12日07时—13日04时持续维持(图4a),从红外云图检测到的中尺度水汽输送带C—C在4月12日05—16时持续存在(图4b),这两者在广西东南部产生并长时间维持了强位势不稳定层结,为MCS的发生发展和长时间维持提供了有利的环境条件。

4.2 对流触发机制和后向传播方式

4.2.1 锋面抬升对流触发机制

(1) 对流触发机制分析

从2008年4月12日16时FY-2C红外云图(图5a)中过MCS沿 P_1-P_2 作TBB剖面曲线(图5b)。由图5b可以看出,MCS的TBB剖面线顶部相对平缓,两侧陡峭,主体结构明显。图5c中雷达扫描仰角为 0.5° ,在玉林市上空探测到的是4 km高度处的回波强度。与图5a的MCS主体相对应,在图5c中玉林市北边有一个半径约为10 km、强度达45 dBz的对流单体回波,图5c的 R_1-R_2 方向上

的雷达回波显示出MCS具有多单体的结构特征。

根据图5b中TBB剖面曲线特征、图5c中雷达回波以及图3a中尺度水汽输送带C—C等图像特征,地面准静止锋过境前后气压、温度、风向风速和降雨的变化特征,参考Houze等(1989)给出的MCC概念模型,综合后得到2008年4月12日准静止锋过玉林市前后,MCS在图5a中 P_1-P_2 切面的结构示意图(图6a),把玉林市自动气象站气压、温度曲线(图6b)、风速曲线和雨量直方图(图6c)对应合成后,得到MCS发展演变与地面各气象要素变化的对应关系(图6)。

4月12日15时45分玉林市测站气压开始上升、气温下降(图6b),风向由南风转为北风,风速由微风状态迅速增大至5 m/s(图6c),表明准静止锋已移到玉林市测站,此时玉林市上空对流云开始发展。4月12日16时10分玉林开始出现明显的阵性降雨,从锋面过境到开始明显降雨时间间隔为25 min,锋面已移过测站约5 km,这是明显的锋面降雨,表明对流运动是由于暖湿的西南气流沿着锋

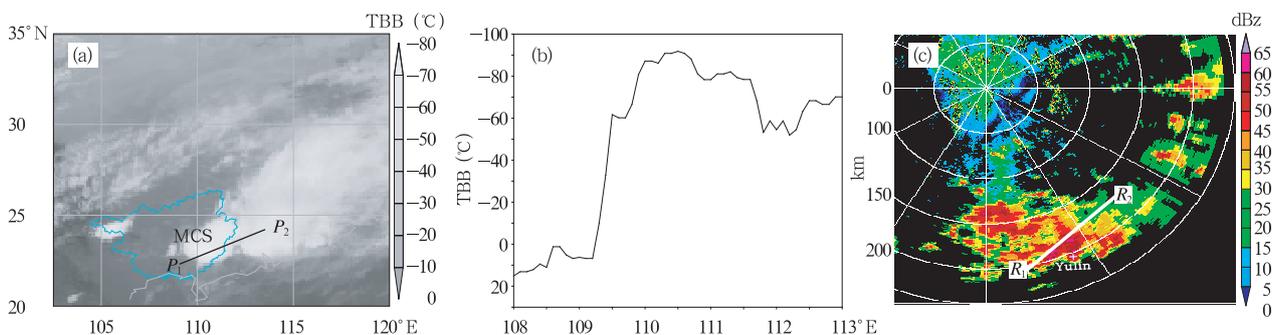


图5 2008年4月12日16时红外云图与TBB剖面曲线及雷达回波

(a. 红外云图; b. 沿剖面线 P_1-P_2 的TBB剖面曲线; c. 15时51分48秒柳州雷达站基本反射率图,白色“+”为玉林市位置)

Fig. 5 Infrared cloud images, TBB profile and radar echo chart at 16:00 BST on 12 Apr 2008

(a. infrared cloud images; b. TBB profile along P_1-P_2 ;

c. reflectivity at 15:51:48 BST by the radar station in Liuzhou, the white “+” showed the situation of Yulin)

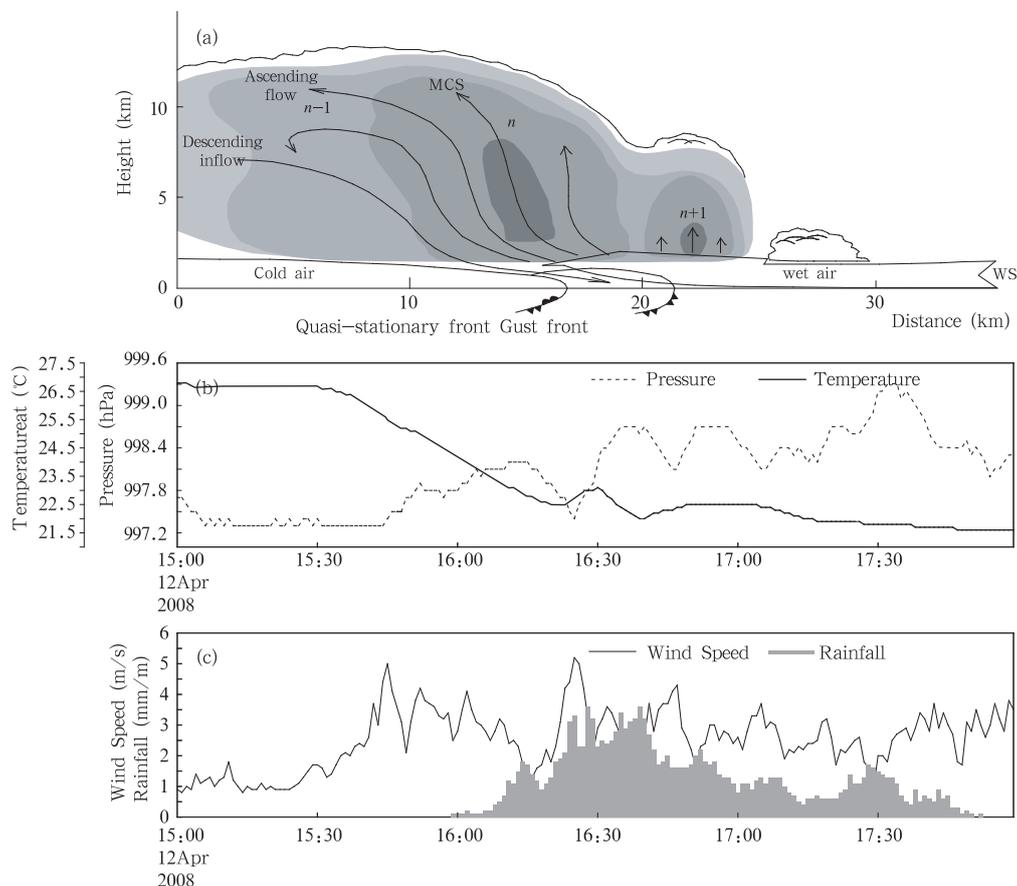


图6 2008年4月12日15—18时MCS结构示意图(a)和地面气象要素变化曲线(b,c)
(a. MCS结构示意图; $n+1$ 为新生对流单体, n 成熟对流单体, $n-1$ 为衰减期对流单体;细实线表示云中气流方向;b. 玉林自动气象站本站气压、温度;c. 风速和1 min降雨量自动记录曲线)

Fig. 6 Mechanism sketch map of MCS (a) and the corresponding change of weather factors (b) on 12 Apr 2008, 15:00–18:00 BST

(a. MCS sketch, $n+1$ showed new convection cells, n showed mature ones, $n-1$ showed those in attenuation stage, solid lines showed direction of flow, lines with sawtooth showed quasi-stationary front and gust front, red arrow showed wet air; b.c. sketch showed curves of pressure, temperature, wind speed and rainfall recorded by auto-station in Yulin)

面滑升,由锋面抬升而触发深对流的。4月12日15时45分—16时27分,为锋面抬升触发对流阶段,伴随这个阶段出现了一个降雨高峰。16时27分锋面触发的对流单体成熟后,在其后部出现下沉气流外流形成阵风锋,又出现了1个风速峰值尖峰和相应的气压波,并再次抬升触发2次对流而产生了第2阶段的强降雨。

暴雨区北边的桂平市和南边的陆川县在锋面过境前后,自动气象站记录的各要素变化规律与玉林市相似(图略),也都出现气压开始上升形成第1个气压波、气温下降,风向由南风转为北风,风速由微风状态迅速增大,阵性强降雨明显落后于锋面过境

时间,阵风锋影响时出现第2个气压波和第2阶段强降雨等特征。桂平市测站锋面过境时间是4月12日9时18分,9时40分开始出现明显阵性降雨,时间间隔为22 min,阵风锋影响时段为9时50分—10时08分。陆川县测站锋面过境时间是4月12日17时40分,17时58分开始明显阵性降雨,时间间隔为18 min,阵风锋影响时段为18时33分—10时53分。

由以上分析可知,MCS中的深对流主要是低层暖湿西南气流沿锋面滑升,由锋面抬升触发所致,是一种锋面触发机制。

(2) MCS随锋面移动发展和维持。

4月12日05时,当准静止锋移到柳州市北部时锋面抬升作用触发对流运动形成了MCS,此后从4月12日05时到4月13日06时MCS随锋面持续向南移动。

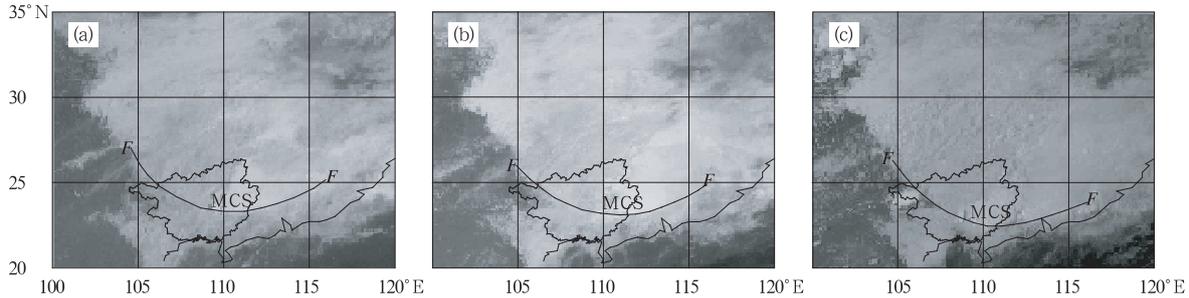


图7 准静止锋与MCS位置关系示意

(F—F表示准静止锋;a. 10时, b. 13时, c. 16时)

Fig. 7 Ubiquity sketch map of quasi-stationary front and MCS

(F—F showed quasi-stationary front; a. 10:00 BST, b. 13:00 BST, c. 16:00 BST)

在红外云图的动画显示中也清晰显示了MCS随锋面南移的情况。4月12日05—08时,MCS随锋面先向东南方向移动,这阶段由于高空湿度仍较大,低空处于湿空气输送带末端水汽输送不足,大气层结呈弱不稳定性,对流活动强度不强,柳州市北部等地只降了小到中雨。约在09时锋面移到桂平市对流强烈发展,在桂平市和平南县等地降了暴雨,此后MCS向偏南方向移动,10—13时MCS的对流活动略有减弱;16时后MCS随锋面移到玉林市,对流活动再次强烈发展,在玉林等5个市县降了暴雨和大暴雨;23时后MCS随锋面移出广西东南部。13日02时准静止锋移到广东西部沿海后,受锋面变性减弱和坡度减小等影响,MCS开始减弱,06时后MCS随锋面移到南海海面上消失。

MCS的整个生命期都与准静止锋密切相关,MCS在锋面上形成和发展,随锋面向南移动,到海面后随锋消而消失。由此可见,准静止锋的存在是MCS得以维持的一个必要条件。

4.2.2 后向传播方式和MCS移向

把图3a中的MCS和中尺度水汽输送带C—C进行轮廓线素描后,再把如图1c所示南移后的4月12日14时的准静止锋叠加,并结合图9的实例分析结果,综合得到MCS与中尺度水汽输送带与准静止锋的配置(图8),以及对流单体传播与MCS移向的关系描述。

图7中F—F是图1c中的准静止锋在可见光云图上的叠加,准静止锋地面锋线与层状云边界一致,锋后是大片低层云区,在准静止锋南移过程中MCS随锋面一同向南移动。

图8中,由于MCS随准静止锋南移,准静止锋在MCS西或西南端抬升西南暖湿空气触发对流而形成新对流单体,这些新对流单体以后向传播方式发展起来并入到MCS中。因MCS中的对流单体是随高空风的平均方向即偏东方向移动,而新单体的后向传播方式是向西南向的,这两个方向的合成方向使得MCS向南偏东方向移动。

图9是对流单体后向传播方式发展的卫星云图和雷达回波图实例。

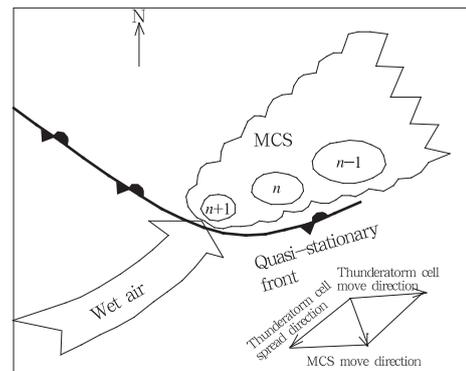


图8 MCS与中尺度水汽输送带及准静止锋配置、对流单体传播与MCS移向
($n+1$ 为新生对流单体, n 为成熟对流单体, $n-1$ 为衰减对流单体)

Fig. 8 The movement sketch map of mesoscale vapor convey belt, thunderstorm cell and MCS
($n+1$ showed new thunderstorm cells, n showed mature ones, $n-1$ showed those in attenuation stage)

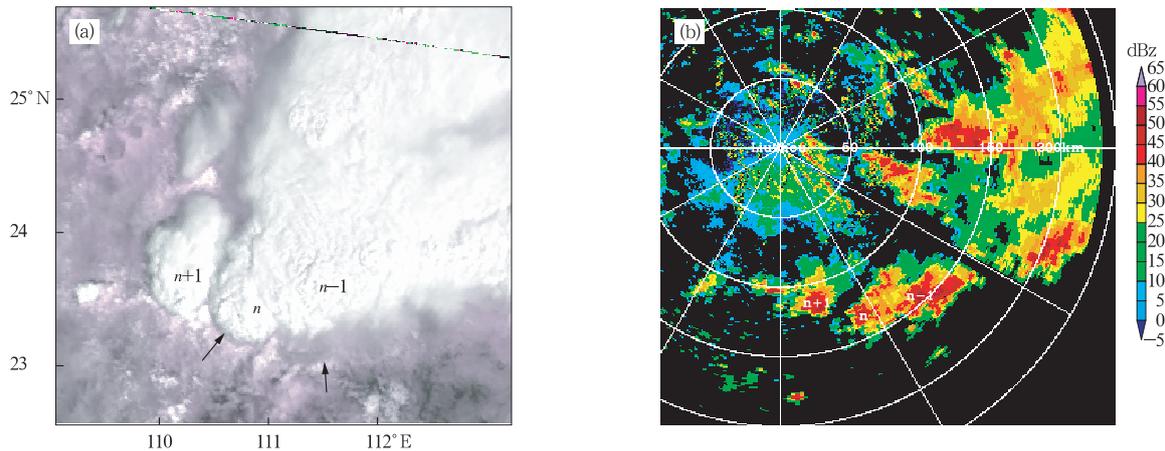


图9 2008年4月12日10时40分NOAA17可见光云图(a)和10时54分柳州雷达站回波图(b)
($n+1$ 为新生对流单体, n 为成熟对流单体, $n-1$ 为衰减对流单体)

Fig. 9 NOAA17 visible light cloud image at 10:40 BST on 12 Apr 2008(a) and the echo image of Liuzhou radar station at 10:54 BST on 12 Apr 2008(b)

图9a中箭头所指云线为成熟对流单体下沉气流外流边界线;图9a中对流单体与图9b中标号相同的回波块相对应。图9b东北部还有多块正减弱东移的回波块,这是比 $n-1$ 单体更早时候发展起来的对流单体。

4.2.3 MCS多单体分布特征

从图9还可以看到,MCS中对流单体的分布特征:新单体位于东南部位,成熟单体紧挨其西边,衰减期单体在东北部位,且分布范围更广。图9b中MCS成熟单体的回波强度最强,对流单体回波强度有从西南向东北递减趋势。新单体和成熟单体范围较小,回波强度 ≥ 25 dBz的半径一般为5—20 km,衰减单体的范围要大许多,但外形显得更不规则。数值模拟方法发现,MCS中对流单体这种分布特征主要受以下规则支配

$$V = V_E + V_R \quad (3)$$

式(3)中, V 为对流单体移动速度; V_E 为对流单体随高空偏东平均气流移动速度; V_R 为对流单体因各种其他影响而产生的随机速度。式(3)表明,对流单体的移动速度既受高空气流影响,也还有多种复杂的因素影响,但一般 $|V_E| > |V_R|$,仍以随高空平均气流速度影响为主。

MCS这种多单体分布特征主要是由锋面抬升触发及后向传播方式所决定的,这种机制有利于MCS中对流单体的更新补充,维持MCS的生命期。

4.3 MCS概念模式

根据图3a的MCS与中尺度水汽输送带C—C的配置关系,图1c准静止锋分析、图7中MCS随准

静止锋移动关系,图9中MCS多单体结构和后向传播等实际资料,以及图2的水汽图(WV)TBB剖面曲线变化特征,图4的位势不稳定形成等分析结果,把图6中二维的MCS的切面结构和触发机制示意图,图8中二维的中尺度水汽输送带、准静止锋与对流单体传播及MCS移向示意图等,综合成三维的MCS概念模式(图10)。

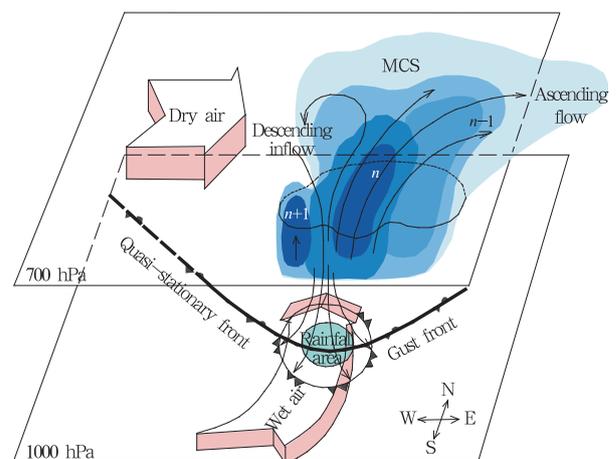


图10 MCS的概念模式

($n+1$ 为新生对流单体; n 为成熟对流单体;
 $n-1$ 为衰减期对流单体;箭头向上的实线表示上升气流;箭头向下的实线表示雷暴后部的下沉气流)

Fig. 10 Concept model of MCS
($n+1$ showed new convection cells, n showed mature ones, $n-1$ showed those in attenuation stage; lines with upward arrow showed ascending flow, and lines with downward arrow showed descending inflow at the end of thunderstorm)

图 10 中,在高空干空气与低空中尺度水汽输送带重合的地方大气层结处于强位势不稳定状态,当地面准静止锋向南移动时,西南暖湿空气沿锋面滑升,锋面抬升触发对流运动而形成 MCS。MCS 新对流单体产生地点位于准静止锋与中尺度水汽输送带相交的部位,产生时间是准静止锋过境时刻。因为高空干空气、低空中尺度水汽输送带、准静止锋等长时间的持续稳定,使锋面在南移过程中连续不断地触发新的对流单体,在后向传播机制下,新的对流单体在 MCS 西边或西南边形成后加入到 MCS 中,补充和替代旧对流单体,使 MCS 得以长时间维持。

5 结论和讨论

综上所述,2008 年 4 月 12 日在弱斜压大气环境下,MCS 生命期能维持长达 25 h,主要是两方面的因素起作用。

(1) 有利的环境条件。原从中南半岛流入的湿空气消失后,广西上空对流层中上层由湿变干,来自北部湾海面的低空中尺度水汽输送带把充沛的水汽输送到广西东南部,为 MCS 的发生发展和维持提供水汽和热量条件,在广西东南部高空干空气和低空湿空气的重合地方形成了强位势不稳定,有利 MCS 的发生发展和维持。在 MCS 维持过程中,低空中尺度水汽输送带的长时间持续和稳定起了关键作用。

(2) 合适的对流触发机制。准静止锋抬升暖湿西南气流触发对流运动而形成 MCS,成熟后期的对流单体中下沉气流形成外流边界产生二次触发,加强了锋面的触发作用。移动缓慢的准静止锋在南下过程中持续的对流触发机制,用后向传播方式在 MCS 西南边缘不断触发新的对流单体并入 MCS,补充东移减弱的旧对流单体,使 MCS 具有持续的生命力。

在以上的分析中,通过利用 FY-2C 多通道卫星云图,辅以雷达探测和自动气象站观测资料等,分析出了对 MCS 能维持长生命期所起关键作用的环境条件和触发机制,加深了对 MCS 的发生发展和维持机制的认识。但由于受缺乏资料条件限制,目前所获得的 MCS 内部结构信息较少,对于此类 MCS 的内部精细结构及演变特征仍不很清楚,而 MCS 的结构特征与其所造成的对流和降雨强度等关系密

切相关,如何获取更多的 MCS 结构信息,是深入研究 MCS 机理的一个亟待解决的问题。

References

- Augustine J A, Howard K W. 1991. Mesoscale convective complexes over the United States during 1986 and 1987. *Mon Wea Rev*, 119:1575-1589
- Chen Min, Tao Zuyu, Zheng Yongguang, et al. 2007. The front-related vertical circulation occurring in the pre-flooding season in South China and its interaction with MCS. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 65(5):785-791
- Chen Weimin. 2003. *Satellite Meteorology (in Chinese)*. Beijing: China Meteorological Press, 196-222
- Houze R A 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
- Leary C A, Rappaport E N. 1987. The life cycle and internal structure of a mesoscale convective complex. *Mon Wea Rev*, 115: 1503-1527
- Maddox R A. 1980. Mesoscale convective complexes. *Bull Amer Meteor Soc*, 61:1374-1387
- Meng Weiguang, Wang Anyu, Li Jiangnan, et al. 2004. Moist potential vorticity analysis of the heavy rainfall and mesoscale convective system in South China. *Chinese J Atmospheric Science (in Chinese)*, 28(3):330-341
- Meng Weiguang, Zhang Yanxia, Daj Guangfeng, et al. 2007. The formation and development of a heavy rainfall mesoscale convective system along southern China coastal area. *J Tropical Meteor (in Chinese)*, 23(6):521-530
- Nachamkin J E, Mcanally R L, Cotton W R. 1994. An observational analysis of a developing mesoscale convective complex. *Mon Wea Rev*, 122: 1168-1188
- Raymond D J, Jiang H. 1990. A theory for long-lived mesoscale convective system. *J Atmos Sci*, 47(24):3067-3077
- Shou Yixuan, Xu Jianmin. 2007. The rainstorm and mesoscale convective system over Northeast China in June 2005 I: A synthetic analysis of MCS by convectional observations and satellite data. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 65(2):160-170
- Shou Yixuan, Xu Jianmin. 2007. The rainstorm and mesoscale convective system over Northeast China in June 2005 II: A synthetic analysis of MCSs dynamical structure by radar and satellite observations. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 65(2): 171-182
- Sun Jian, Liu Shuyuan, Tao Zuyu, et al. 2004. An analysis of the meso-scale convective system in a heavy rain process during June 8 to 10 1998 at Hongkong. *Chinese J Atmospheric Science (in Chinese)*, 28(5):713-721
- Sun Jianhua, Zhang Xiaoling, Qi LinLin, et al. 2004. An analysis on

- MCSs in meiyu front during 20—24 June 2002. *Acta Meteor Sinica* (in Chinese), 62(4):423-438
- Sun Jianhua, Zhao Sixiong. 2002. 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. *Chinese J Atmos Sci* (in Chinese), 26(4):541-556
- Sun Jianhua, Zhao Sixiong. 2002. A study of mesoscale convective systems and its environmental fields during the June 1994 record heavy rainfall of South China Part II: Effect of physical processes initial environmental fields and topography on meso- β convective system. *Chinese J Atmos Sci* (in Chinese), 26(5):633-646
- Wang Yiping, La Weisong, Pan Yinong, et al. 2008. Numerical simulation of a torrential rain in the northeast of Huaihe Basin Part I: Model verification and the characteristics analysis of M β CS. *Acta Meteor Sinica* (in Chinese), 66(2):167-176
- Wang Yiping, La Weisong, Pan Yinong, et al. 2008. Numerical simulation of a torrential rain in the northeast of Huaihe Basin Part II: Instability condition and the mechanism of intensification and maintenance. *Acta Meteor Sinica* (in Chinese), 66(2):177-189
- Wetzel P J, Cotton W R, Mcanally R L. 1983. A long-lived mesoscale convective complex. Part II: Evolution and structure of the mature complex. *Mon Wea Rev*, 111:1919-1937
- Xia Rudi, Zhao Sixiong, Sun Jianhua. 2006. A study of circumstances of Meso- β -scale system of strong heavy rainfall in warm sector ahead of fronts in South China. *Chinese J Atmos Sci* (in Chinese), 30(5):988-1008
- Zhao Yuchun, Li Zechun, Wang Yehong, et al. 2008. Diagnosing analysis of heavy rain in northern Fujian province triggered by mesoscale convective system along the meiyu front during 5—8 June 2006. *Chinese J Atmos Sci* (in Chinese), 32(3):598-614
- Zhu Qianguan, Lin Jinrui, Shou Shaowen, et al. 2000. *Theory and Methods of Synoptic Meteorology* (Third Edition) (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 423-428
- 附中文参考文献**
- 陈敏,陶祖钰,郑永光等. 2007. 华南前汛期锋面垂直环流及其与中尺度对流系统的相互作用. *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
- 蒙伟光,王安宇,李江南等. 2004. 华南暴雨中尺度对流系统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. 华南沿海一次暴雨中尺度对流系统的形成和发展过程. *热带气象学报*, 23(6):521-530
- 寿亦萱,许健民. 2007. “05.6”东北暴雨中尺度对流系统研究 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”东北暴雨中尺度对流系统研究 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日香港特大暴雨中尺度对流系统分析. *大气科学*, 28(5):713-721
- 孙建华,张小玲,齐琳琳等. 2004. 2002年6月20—24日梅雨锋中尺度对流系统发生发展分析. *气象学报*, 62(4):423-438
- 孙建华,赵思雄. 2002. 华南“94.6”特大暴雨的中尺度对流系统及其环境场研究. I. 引发暴雨的 β 中尺度对流系统的数值模拟研究. *大气科学*, 26(4):541-557
- 孙建华,赵思雄. 2002. 华南“94.6”特大暴雨的中尺度对流系统及其环境场研究. II. 引发暴雨的 β 中尺度对流系统的数值模拟研究. *大气科学*, 26(5):633-646
- 王亦平,陆维松,潘益农等. 2008. 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 I 中尺度对流系统的特征分析. *气象学报*, 66(2):167-176
- 王亦平,陆维松,潘益农等. 2008. 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日梅雨锋上中尺度对流系统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