

2005 年 6 月广东一次暴雨过程的中尺度对流系统的数值研究

王婷^{1, 3} 吴池胜¹ 冯瑞权²

1 中山大学大气科学系, 广州 510275

2 澳门地球物理暨气象局, 澳门大潭山

3 广东省气候中心, 广州 510080

摘 要 2005 年 6 月 20~21 日, 一个活动在锋前暖区的长生命史的中尺度对流系统 (Mesoscale Convective System, 简称 MCS) 给广东地区带来一次大范围的暴雨降水过程。天气学分析表明, 从北部湾指向广西东部的低空急流核前方的水汽通量辐合对 MCS 初始的发展加强有重要作用。作者利用 MM5 模式成功地模拟出与此 MCS 相联系的天气尺度背景场和中尺度的降雨分布, 利用高分辨的模式输出结果分析了成熟阶段 MCS 的 β 中尺度系统的结构和演变特征, 结果表明: (1) 在 MCS 的发展加强过程中, 其内的 β 中尺度对流中心经历了此消彼长的更替过程, 伴随着 β 中尺度对流中心的发展, 与之相联系的正涡度中心由对流层的下部向中上部伸展, 形成高达 300 hPa 附近的下宽上窄的强涡柱; 在成熟阶段, 沿系统移动方向上的对流层中部的涡度场呈正负相间, 宽约 50 km, 且与对流带近于平行的带状分布。(2) MCS 的海平面气压场呈跷跷板型的中尺度扰动, 即由前置中低压和后置中高压组成, 最强的对流带位于中低压和中高压之间的过渡区内。(3) 成熟阶段 MCS 的 β 中尺度环流特征主要包括: 强对流区内是一支近于垂直的深厚的对流尺度的上升流, 紧接在其后方的对流层下部有一支对流尺度的下沉气流; 系统前部有深厚的入流, 其中较强的两支入流分别出现在 900 hPa 和 300 hPa 高度附近; 层状降雨区内有中尺度的上升气流和下沉气流, 二者的分界线在 0°C 层高度附近; 对流层下 (上) 部强大的水平辐合 (散) 流中最大的水平辐合 (散) 约出现在 900 hPa (200 hPa)。

关键词 暴雨 数值模拟 MCS β 中尺度系统

文章编号 1006-9895 (2008) 01-0184-13

中图分类号 P445

文献标识码 A

A Numerical Study of a Mesoscale Convective System Associated with the Heavy Rain Event over Guangdong Province in June 2005

WANG Ting^{1, 3}, WU Chi-Sheng¹, and FONG Soi Kun²

1 Department of Atmospheric Science, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275

2 Macau Meteorological and Geophysical Service, Macau, China

3 Guangdong Climate Center, Guangzhou 510080

Abstract The Mesoscale Convective System (MCS) that produced the heavy rainfall during 20 - 21 Jun 2005 in Guangdong Province is examined. The observations reveal that the MCS initiated and developed in front of a cold front. The convergence of vapor flux in the ahead of the jet stream core at 925 hPa level appears to be a crucial factor for its development. A 24-hour numerical simulation of the developing and mature as well as decline stages of the MCS is performed using the fifth generation Penn State/NCAR mesoscale model (MM5). The synoptic scale circula-

lation evolutions and the mesoscale precipitation distributions associated with the MCS are reproduced successfully by the model. Using the higher-resolution output of the model, the meso- β -scale structure and evolution of the MCS at the mature stage are examined. The results show that: (1) with the development of the strong convective core, the associated positive relative vorticity core in the lower troposphere extends to the mid-upper troposphere, so as to form a deep and intense cyclonic air-column penetrating to the upper troposphere in the severe convective region of mature MCS. In the meantime, bands of positive and negative vertical vorticity, paralleled to the convective zone, are found in the middle troposphere. The maximum positive vorticity is near the severe convective zone, the negative vorticity near the rear of the convective zone and submaximum positive vorticity farther back. (2) On the surface map, the MCS is composed of a mesolow and a mesohigh which are located in the front of severe convective zone and behind the zone, respectively, i. e., the severe convective zone occurred at the transition zone between the mesolow and the mesohigh. (3) The mesoscale circulation characteristics viewed in the coordinate system moving with the MCS include: a strong, nearly perpendicular convective scale updraft penetrates the troposphere of the severe convective zone; a convective scale downdraft within the lower troposphere is behind severe convective zone; two major branches of inflows which occurred respectively near 300 hPa and 900 hPa are ahead of the severe convective zone; the mesoscale updraft and downdraft are divided near 0°C level in the stratiform precipitation region; the convergent inflows in the lower troposphere appear at 900 hPa and the divergent outflows in the upper troposphere appear at 200 hPa.

Key words heavy rain, numerical simulation, MCS, meso- β -scale system

1 引言

以往的研究结果表明, 强对流天气和突发性致洪暴雨的发生与中尺度对流系统 (Mesoscale Convective System, 简称 MCS) 的活动有密切的联系^[1]。因此, 对 MCS 的研究是当前大气科学的一个热门课题。Schumacher 等^[2]认为, MCS 的大小和组织结构及其运动学特征等是它们能否引发暴雨的关键因子。Houze 等^[3]发现雷达回波图上 MCS 内部经常存在 β 中尺度的线状强对流带, 并指出这种线状结构的 MCS 比非线状结构的 MCS 更容易产生强降水。Parker 等^[4]在研究了 MCS 的层状降雨区与线状强对流带的相对位置后把 MCS 划为三种类型, 即层状降雨区在线状对流带的后方型 (TS 型)、层状降雨区在线状对流带的前方型 (LS 型) 和层状降雨区与线状对流带的平行型 (PS 型), 同时指出在不同类型的 MCS 中, 对流层中、上部平均的相对于 MCS 的气流模型有明显的差异。由于 MCS 的时间尺度较小, 光依靠常规的探测资料难以深入揭示其内部组织特点和活动规律。近年来, 国内外学者^[5~17]利用高分辨的中尺度模式对 MCS 进行模拟研究, 取得了可喜的进展: 周秀骥^[10]在 98 华南暴雨试验中, 通过中尺度外场综合观测试验、数值模拟及天气动力学诊断分析, 研究了华南

前汛期暴雨及台风暴雨的中尺度结构及演变机制与规律; 孙建华等^[11]对华南“94.6”特大暴雨的 β 中尺度对流系统进行数值研究, 指出当系统发展到强盛期时, 上升气流由斜升转为直升; 夏茹娣等^[16]分析了华南锋前暖区暴雨 β 中尺度系统的环境特征, 指出季风的活动、边界层的影响、地形的动力作用等对 MCS 的发生发展具有重要影响。华南前汛期是 MCS 活动较为频繁的季节, 2005 年 6 月 20~21 日, 广东地区出现一次大范围的暴雨降水过程。卫星云图和天气学分析表明, 这次暴雨过程是与一个活跃在锋前暖区的长生命史的 MCS 有关。锋前暖区暴雨是华南前汛期暴雨的重要类型之一^[18]。但迄今对此类暴雨相联系的 MCS 的研究尚不多。本文利用美国国家大气研究中心/宾州大学的第五代中尺度模式 (MM5) 对此次暴雨过程进行模拟, 并利用模式的高分辨输出结果研究了此 MCS 的 β 中尺度结构特征和演变。

2 天气形势及 MCS 演变过程

2005 年 6 月 20 日 12 时 (国际协调时, 下同), 对流层下部 (925 hPa) 一条近于东北至西南走向的切变线位于南岭以北, 华南地区受脊后槽前的西南气流控制, 其中 10 m/s 的大风中心位于广西南面的北部湾海面上 (图略)。20 日 16 时, 在此大风中

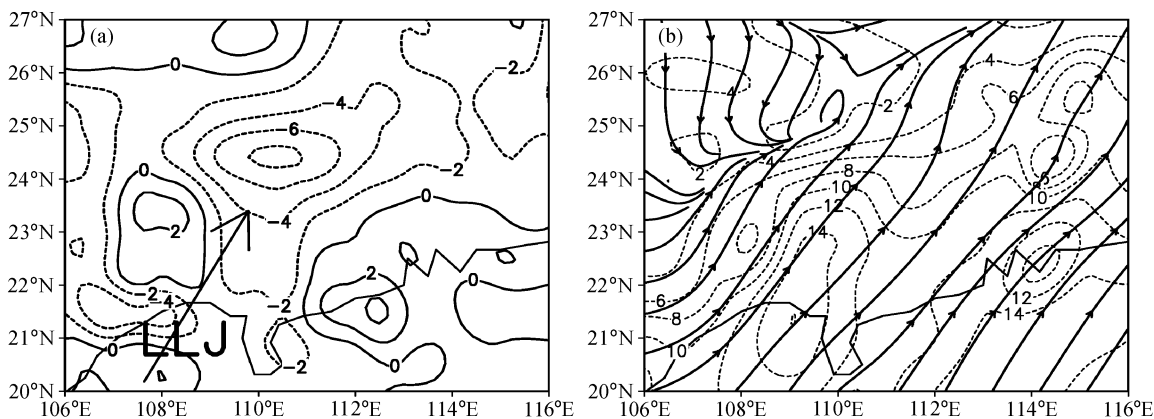


图1 (a) 客观分析的20日18时925 hPa水汽通量散度(单位: $10^{-8} \text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$), 粗箭头示意低空急流位置, LLJ代表急流核位置; (b) 客观分析的21日00时925hPa全风速(虚线, 单位: m/s)和流场

Fig. 1 (a) Objective analyses of vapor flux divergence ($10^{-8} \text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$) at 925 hPa at 1800 UTC 20 Jun, thick arrow indicates the low level jet and the “LLJ” stands for the jet core; (b) objective analyses of horizontal wind velocity (dashed line, units: m/s) and stream line at 925 hPa at 0000 UTC 21 Jun

心下游的广西东北部开始有小积云团出现(图略)。至20日18时,北部湾的大风中心增强至15 m/s,形成一支由北部湾指向广西东北部的低空急流,在急流核前方广西东北部地区产生明显的水汽通量辐合区(图1a),相应的,前述该区的小云团迅速发展成一个椭圆形面积约 $2.5^{\circ} \times 2^{\circ}$ 的中尺度云团(称之MCS-A)(图2a)。此后,北部湾的急流继续维持并有所增强,急流中心向北推进到北海附近且12 m/s等风速线向北推进至广西的中部(23.5°N),急流核前方的风速辐合也因此而得到增强(图1b)。相应的, MCS-A迅速发展成为一个 α 中尺度的MCC,其中心位于(24°N , 110°E)附近(图2b、图3)。此后至21日06时,此MCC中心基本准静止地停留原地,但其强度有所减弱(图2c、图3)。此外,在此期间(21日00~06时),广东省的东南部有一中尺度云团(MCS-B)在形成和发展,它造成河源、龙门地区的特大暴雨(图略)。21日06时后,伴随着广西上空的南支小槽的东移(图略),MCC也东移入广东,并在21日08时左右其前部与减弱中的MCS-B西部的小对流中心合并(图2d)。合并后MCC进一步发展并在21日12时左右达到其生命史的最大强度(图3),而MCS-B的中、东部云区则逐渐消散。以前也有研究表明,云团的合并可导致系统的进一步发展^[19]。此时(21日12时),MCC已移至珠三角的中部(图2h),此后MCC继续东移,但强度开始减弱(图3),至21日20时其

中心移至福建省沿海地区,此时其云顶TBB(黑体温度 black-body temperature)仍满足MCC的定义^[20](图2i),21日20时后MCC东移入海并迅速消散(图略)。可见,此MCS的生命史长达约32小时(20日16时~22日00时),在此期间,低层(925 hPa)切变线始终维持在 25°N 以北,广东的中南部无明显的天气尺度锋面活动(图略)。因此,这是典型的一个活动在锋前暖区有较长生命史的 α 中尺度对流系统。此MCS的东移发展,给广东带来大范围的暴雨天气。

图4是每3小时的广东降雨分布。对照图2(TBB)与图4,可以看出,在21日07时之前出现在河源、龙门的暴雨中心是由MCS-B产生的,此后随着MCS-A的东移发展,原位于两广交界处的雨区也逐渐东移,MCS-A(MCC)较强降水主要出现在其强度衰减之前(即在21日13时之前),最强的降雨中心出现在珠江三角洲的中部(广州地区附近)。

由于目前的观测资料无法清楚地揭示此MCS的 β 中尺度结构和演变,下面我们将通过数值模拟来研究这次暴雨过程以及相联系的MCS,并着重分析此MCS迅速发展至成熟阶段(21日08~12时) β 中尺度系统的结构和演变。

3 数值模拟

3.1 试验方案

数值试验所用的模式为美国国家大气研究中心

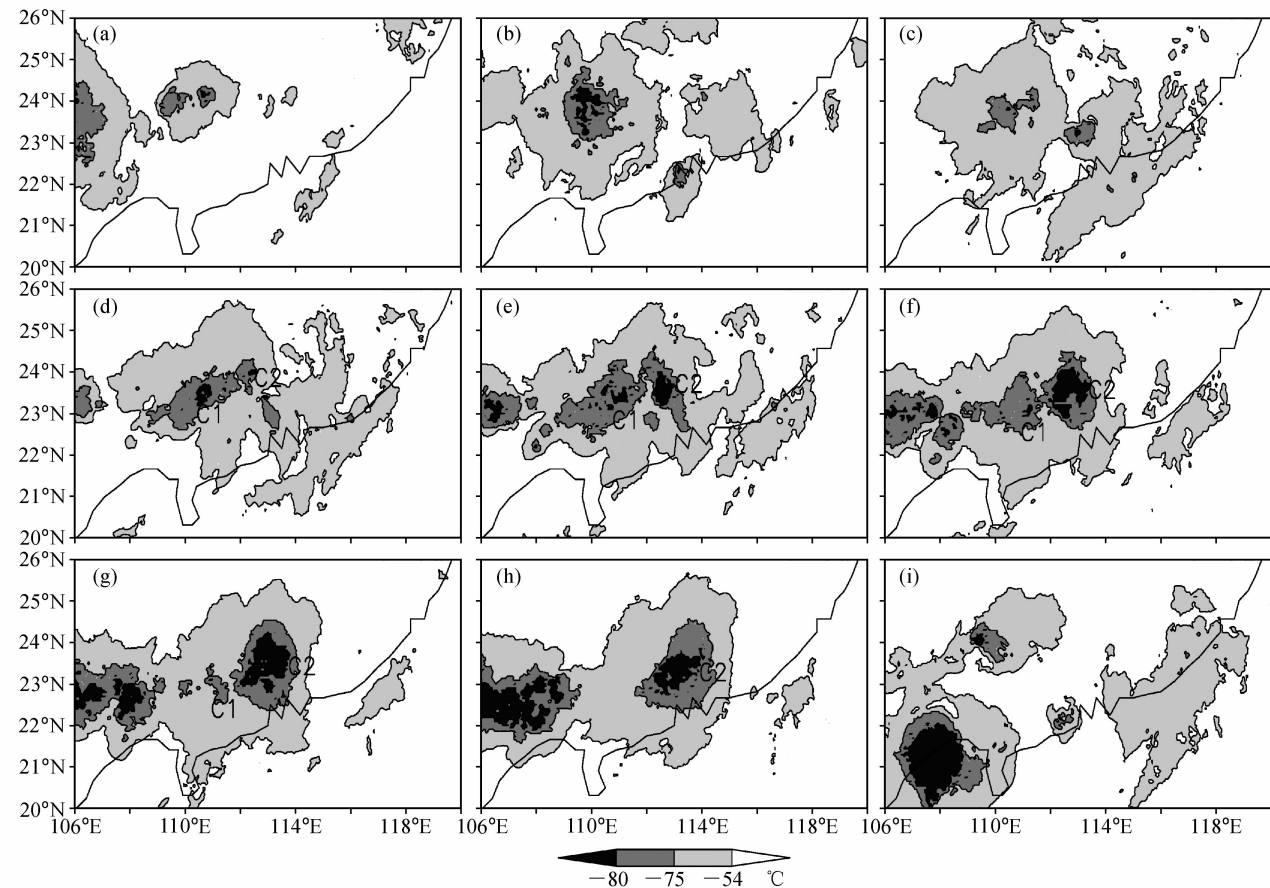


图 2 6 月 20 日 18 时~21 日 20 时观测的 TBB ($<-54^{\circ}\text{C}$) 时间演变: (a) 20 日 18 时; (b) 21 日 00 时; (c) 21 日 06 时; (d) 21 日 08 时; (e) 21 日 09 时; (f) 21 日 10 时; (g) 21 日 11 时; (h) 21 日 12 时; (i) 21 日 20 时

Fig. 2 The observed TBB ($<-54^{\circ}\text{C}$) at (a) 1800 UTC 20 Jun, (b) 0000 UTC 21 Jun, (c) 0600 UTC 21 Jun, (d) 0800 UTC 21 Jun, (e) 0900 UTC 21 Jun, (f) 1000 UTC 21 Jun, (g) 1100 UTC 21 Jun, (h) 1200 UTC 21 Jun, (i) 2000 UTC 21 Jun

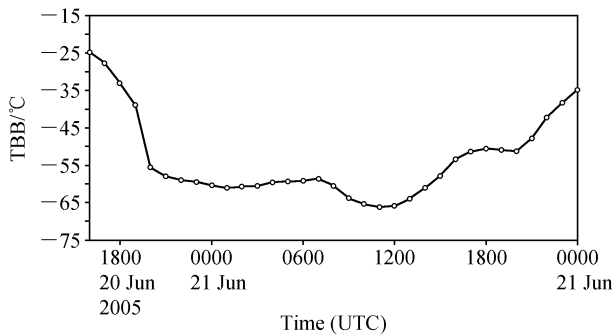


图 3 MCS 的中心区域 ($4^{\circ}\times 4^{\circ}$ 经/纬度) 平均的 TBB 时间演变图

Fig. 3 The time evolution of the averaged TBB in the central domain of MCS ($4^{\circ}\times 4^{\circ}$ longitude/latitude)

/宾州大学的第五代中尺度模式 (MM5V3.6), 模拟采用三重区域嵌套方案 (图 5), 模式的水平分辨率分别为 54 km、18 km、6 km, 模式垂直方向取为 23 层。利用 NCEP 的再分析资料作为初估场, 加

入常规观测资料经客观分析后得到模式的格点值。积分时间从 21 日 00 时到 22 日 00 时, 共 24 小时, 时间步长为 150 s。积云参数化方案第一个区域选用 BM 方案, 第二个区域选用 GRELL 方案, 第三个区域没有积云参数化方案。三个区域的边界层物理过程参数化方案均选用 Blackadar 方案。所有区域的显示水汽方案均采用 Simple Ice 方案。

3.2 结果分析

图 6d~f 给出模式积分第 24 小时 (22 日 00 时) 的对流层上、中和下部的水平流场, 对比相应时次的客观分析场 (图 6a~c) 可以看出, 模式对主要环流系统如西太平洋副热带高压、副高西北侧的切变线、南支西风低槽以及南亚反气旋等的位置和形态的模拟是相当好的。对其他时次的模拟也有类似的结果 (图略)。因此, 可以说模式成功地复制出了此次暴雨过程的环流背景。

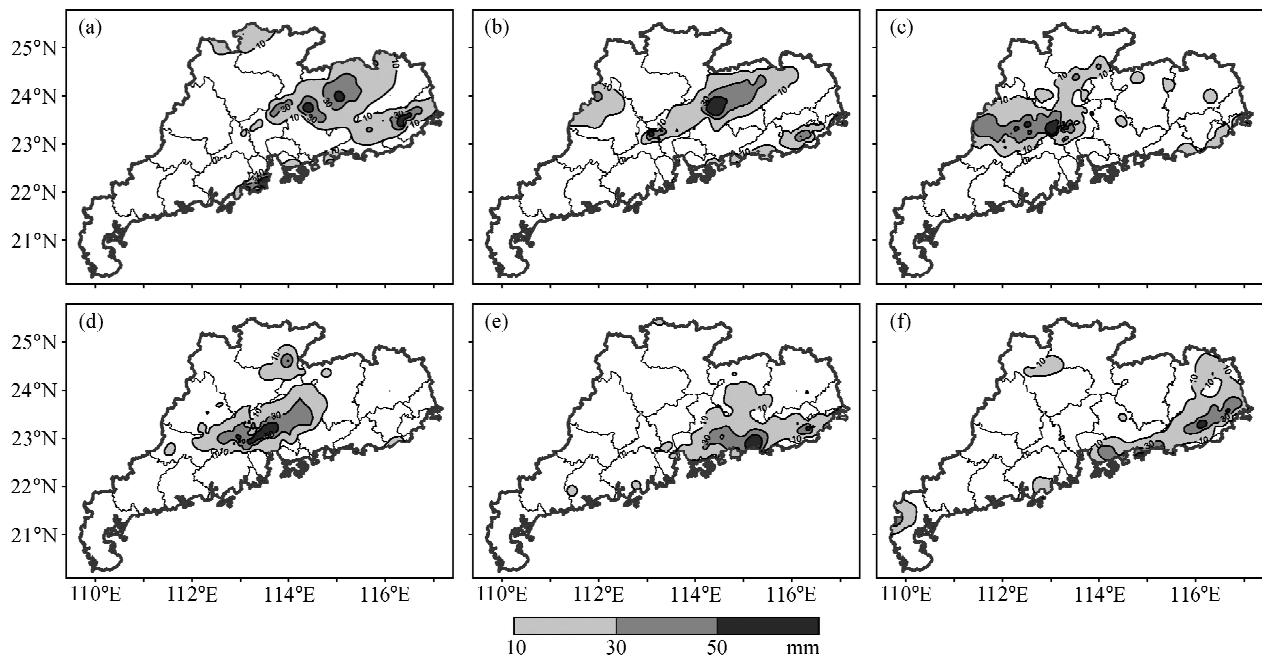


图4 6月21日广东省实测3小时降水图: (a) 02~04时; (b) 05~07时; (c) 08~10时; (d) 11~13时; (e) 14~16时; (f) 17~19时
Fig. 4 The observed 3-hour precipitation in Guangdong Province during (a) 0200 – 0400 UTC, (b) 0500 – 0700 UTC, (c) 0800 – 1000 UTC, (d) 1100 – 1300 UTC, (e) 1400 – 1600 UTC, (f) 1700 – 1900 UTC on 21 Jun

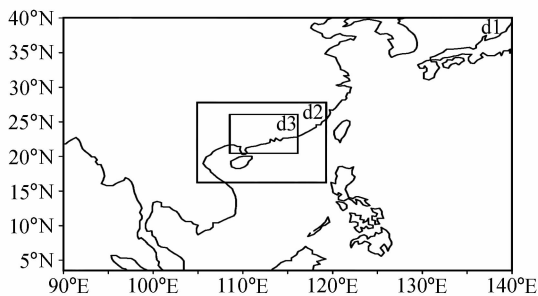


图5 三重嵌套网格模拟区域
Fig. 5 Spatial domains for model experiments

对比模拟和实测的广东省24小时降水(图7)可见:模拟的50 mm暴雨范围和落区与实测基本一致;模拟的降雨中心[322 mm, (23.8°N, 114°E)]与实测龙门降雨中心[311 mm, (23.7°N, 114.2°E)]非常接近。图4d是MCS-A(MCC)最强盛时期(21日11~13时)的3小时降雨分布,图8是相应时段的模拟结果。对比图4d与图8,可看出模拟的雨带位置和走向(EN-SW)与实测的非常接近,模拟的最大降雨在(23.5°N, 113.5°E)附近,比实测的广州附近(23.2°N, 113.5°E)的降雨中心略偏北,但在114°E以东出现了一些虚假的降水。

另外,模拟的MCC迅速发展和成熟期(21日

08~13时)的每小时降水量分布(图略),除了114°E以东虚假的降雨以外,与实测雨带的走向、范围、移动均非常相似。如前所述,这个期间的强降水主要出现在广州附近地区。图9是模拟与实测的广州附近暴雨中心区的区域平均1小时雨量变化曲线,从中可看出模式基本上模拟出广州附近暴雨中心的逐时降水变化趋势,但模拟的雨峰比实测的滞后1~2 h。因为每小时的降雨分布基本上可以反映出MCS β 中尺度降水特征,对它的成功模拟说明MM5模式能够模拟出此次暴雨过程的 β 中尺度系统的活动。此外,对比21日12时模拟和实测的雷达回波图(图10),可以见到模式基本上能成功模拟出广州附近的MCS内 β 中尺度的线状强对流带。

上述分析结果表明:模式成功模拟出与MCS-A相联系的大尺度环流形势的演变以及中尺度的降雨分布。因此,可以利用模式输出的高时空分辨率资料,对成熟阶段MCS β 中尺度系统的演变及结构特征进行分析。

4 MCS的 β 中尺度结构特征

4.1 β 中尺度强对流系统的演变特征及其物理结构

从TBB云图(图2)上可以看出:在MCS-A

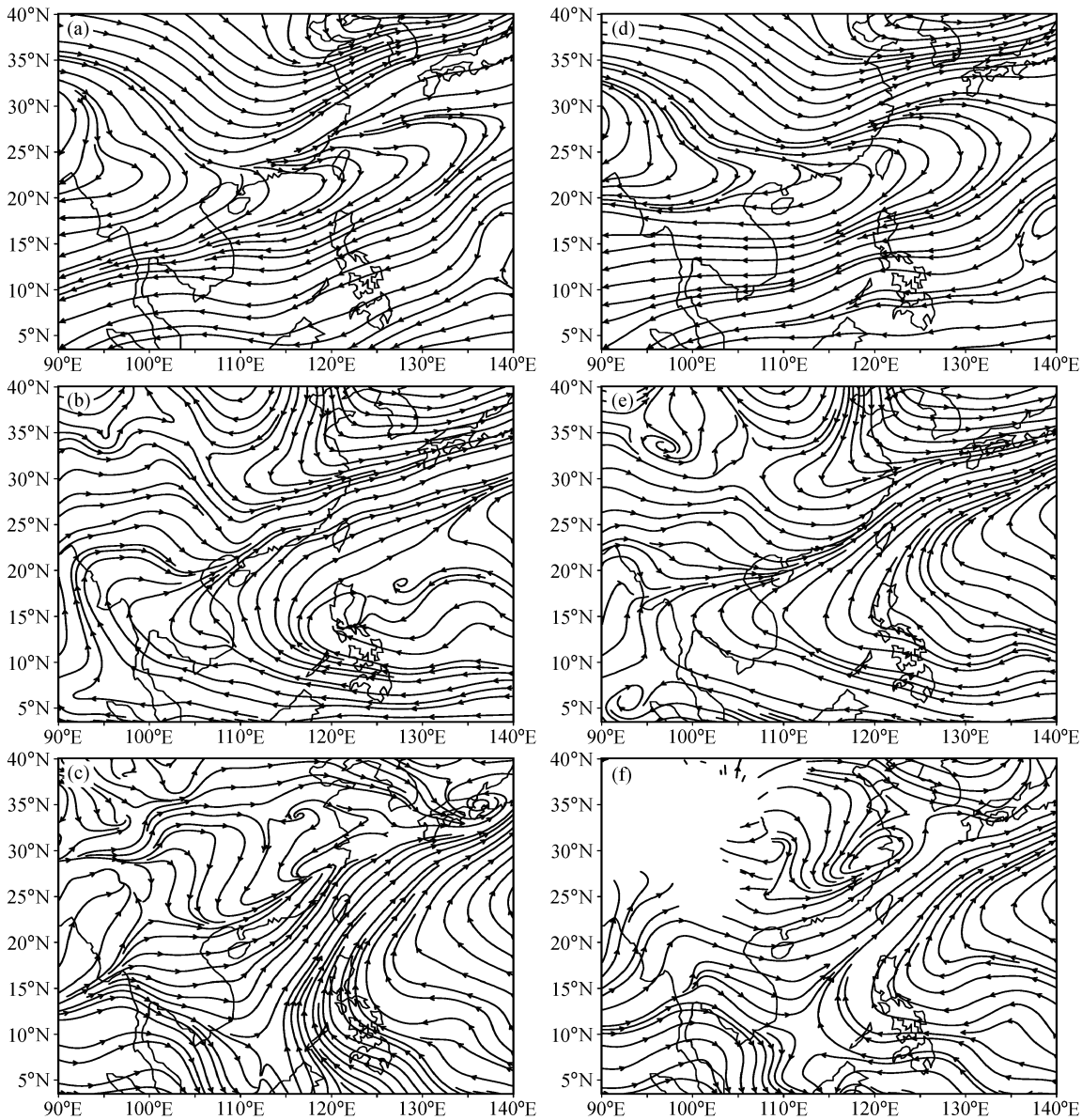


图 6 2006 年 6 月 22 日 00 时实测 (a~c) 和模拟 (d~f) 的各层水平流场: (a, d) 200 hPa; (b, e) 500 hPa; (c, f) 850 hPa
Fig. 6 (a-c) Observed and (d-f) simulated horizontal stream line at 0000 UTC 22 Jun 2006: (a, d) 200 hPa; (b, e) 500 hPa; (c, f) 850 hPa

与 MCS-B 合并的初期 (21 日 08 时), 其内部存在两个 β 中尺度的强对流中心 C1 (23.5°N , 111°E) 和 C2 (23.5°N , 112.5°E) (图 2d), 中心 C1 在 09 时发展到最强, 之后逐渐减弱到 11 时消散, 而中心 C2 则不断发展至 11、12 时达到最强。在此期间, 两个对流中心基本上沿着 23.5°N 自西向东缓慢移动。从模拟的沿 23.5°N 的涡度纬向垂直剖面图 (图 11) 上可看出: 21 日 09 时, 在 111°E 、 112.5°E 存在两个正涡柱, 它们分别与对流中心 C1 和 C2 的位置相对应; 此后, 伴随着对流中心 C1 的

东移减弱, 西侧的正涡柱也逐渐减弱 (涡柱的伸展高度降低且中心强度减少), 与此同时, 随着对流中心 C2 的东移发展, 东侧的正涡柱由对流层的下部向中上部扩展且中心强度加强。上述分析结果说明, 强对流中心是与正涡柱相陪伴的, 而且模式相当成功地重现了 MCS 发展过程中其内的 β 中尺度的强对流中心的此生彼消的更替过程。

图 12 是 MCS 发展至最强盛时 (21 日 12 时) 经过对流中心 C2 的 ($112.5^{\circ}\text{E} \sim 113.5^{\circ}\text{E}$) 平均的涡度、散度经向垂直剖面图。从图 12a 可以见到对

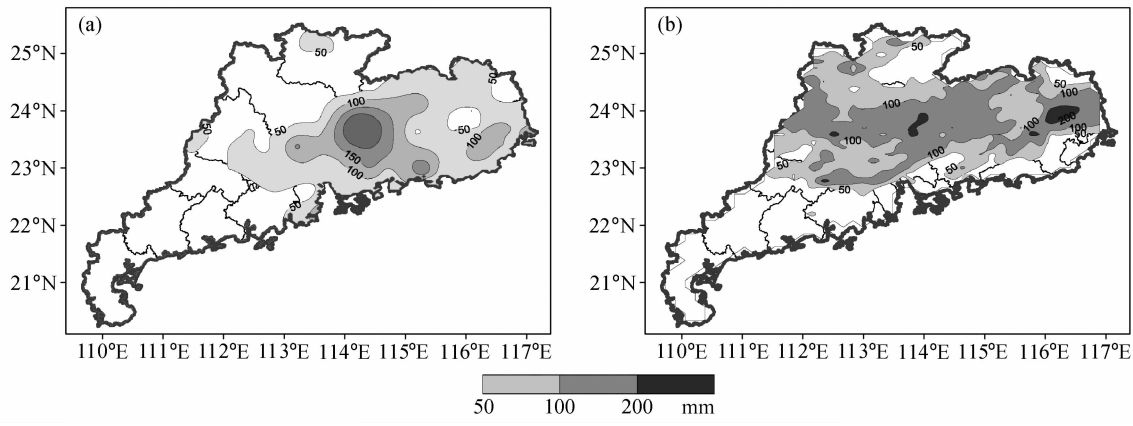


图 7 21 日 00 时~22 日 00 时广东省 24 小时实测 (a) 和模拟 (b) 降水图

Fig. 7 (a) Observed and (b) simulated 24 hour precipitation from 0000 UTC 21 Jun to 0000 UTC 22 Jun in Guangdong Province

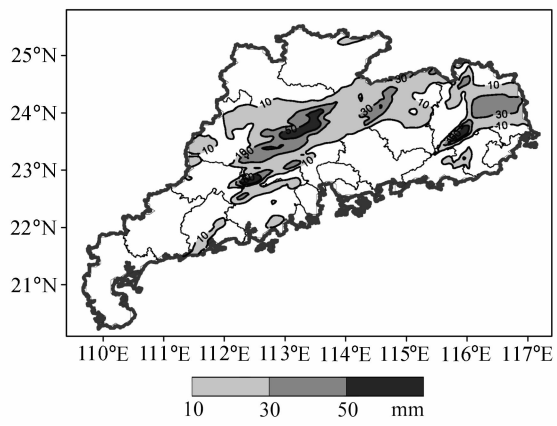


图 8 模拟的 21 日 11~13 时广东省 3 小时降水图
Fig. 8 The simulated 3 hour precipitation during 1100 - 1300 UTC 21 Jun in Guangdong Province

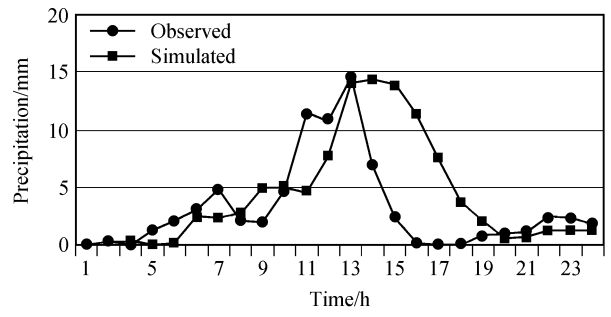


图 9 广州附近地区 (22.8°N~23.8°N, 112.8°E~113.8°E) 区域平均的 1 小时雨量变化曲线 (单位: mm)

Fig. 9 The time evolution of 1 hour precipitation averaged over domain (22.8°N~23.8°N, 112.8°E~113.8°E) in the vicinity of Guangzhou

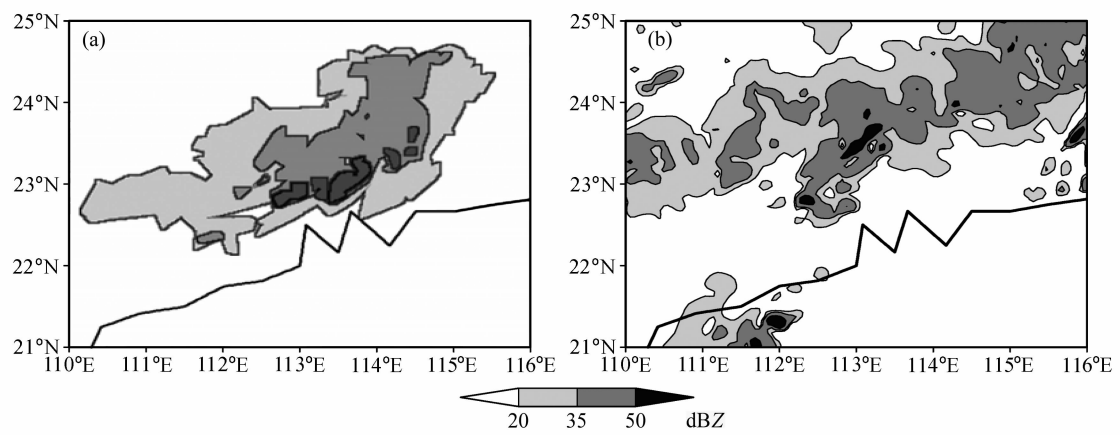


图 10 21 日 12 时雷达回波强度图: (a) 实测的雷达拼图; (b) 模拟的 850 hPa 雷达回波强度
Fig. 10 (a) Composite radar reflectivity and (b) simulated radar reflectivity at 850 hPa at 1200 UTC 21 Jun

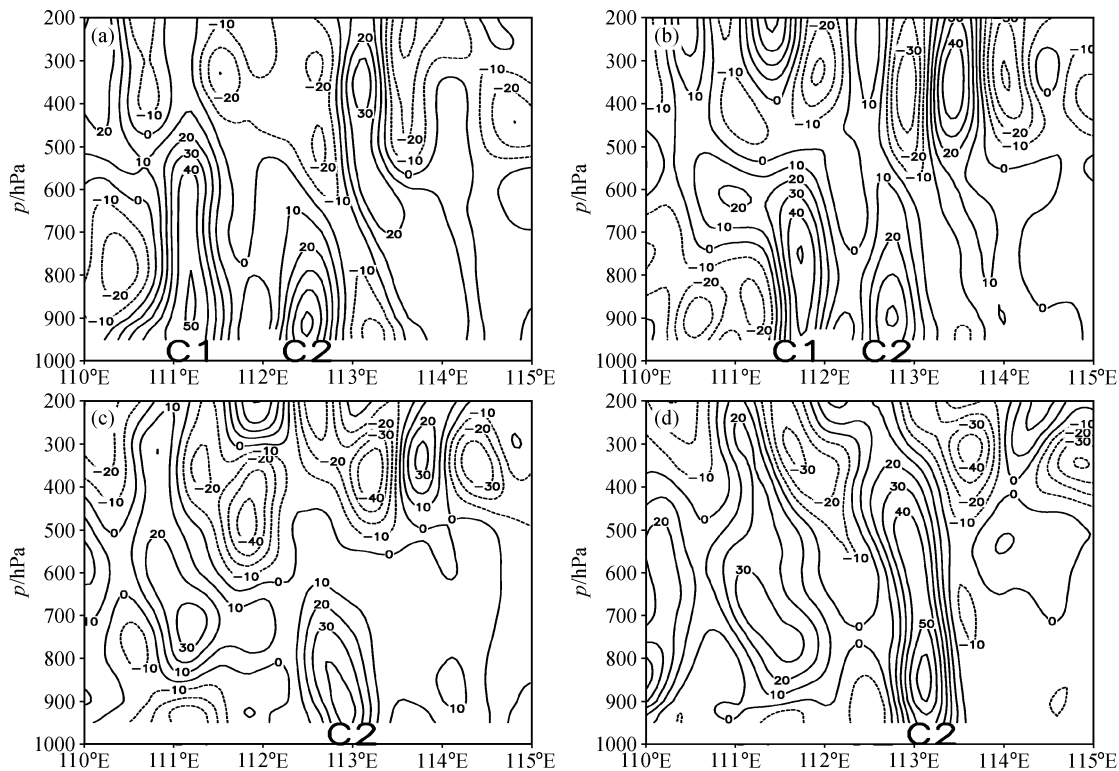


图 11 6 月 21 日模拟的涡度沿 23.5°N 的纬向垂直剖面图 (单位: 10^{-5}s^{-1}): (a) 09 时; (b) 10 时; (c) 11 时; (d) 12 时

Fig. 11 Longitude-height cross section of simulated relative vorticity (10^{-5}s^{-1}) along 23.5°N at (a) 0900 UTC, (b) 1000 UTC, (c) 1100 UTC, (d) 1200 UTC on 21 Jun

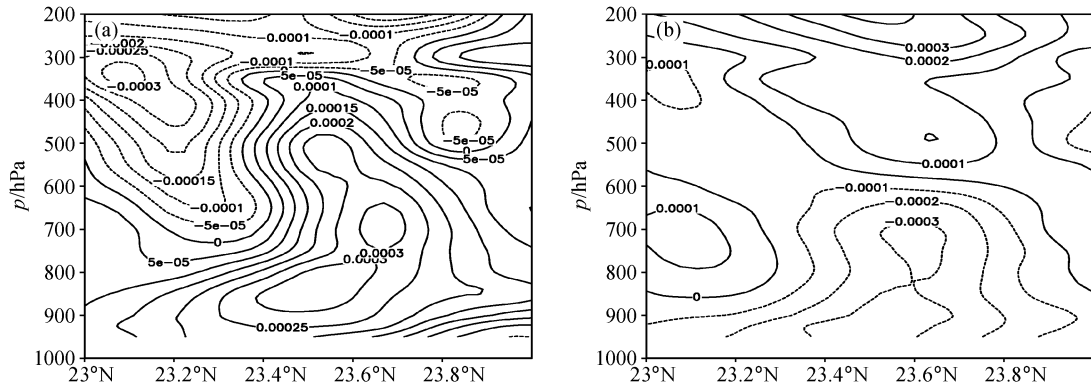


图 12 模拟 21 日 12 时 112.5°E – 113.5°E 平均的涡度 (a)、散度 (b) 经向垂直剖面图 (单位: s^{-1})

Fig. 12 Latitude-height cross section of simulated (a) relative vorticity and (b) horizontal divergence averaged over 112.5°E – 113.5°E at 1200 UTC 21 Jun (units: s^{-1})

流中心 (C2) 附近是一个下宽上窄的高达 300 hPa 附近的强大正涡柱, 在经过对流中心 C2 的纬向剖面上也发现有类似的分布型式(图略)。图 12b 表明对流层下部的正涡度中心伴有强烈的辐合, 其上 (约 600 hPa 以上) 则转为辐散。此外, 我们还注意到在约 600~300 hPa 之间的正涡度是与辐散相伴的, 这表明系统有很强的非地转性。

4.2 β 中尺度环流结构

雷达回波图能够分辨更为细致的中尺度系统结构, 21 日 12 时实测和模拟雷达回波图 (图 10) 显示, 在 TBB 云图所显示的 β 中尺度强对流系统中, 其前沿有一条线状强对流带, 对流带的后部是所谓的层状降水区, 这种结构类似于 Parker 等^[4]提出的线状强对流系统中的 TS 类型, 本节将研究此系

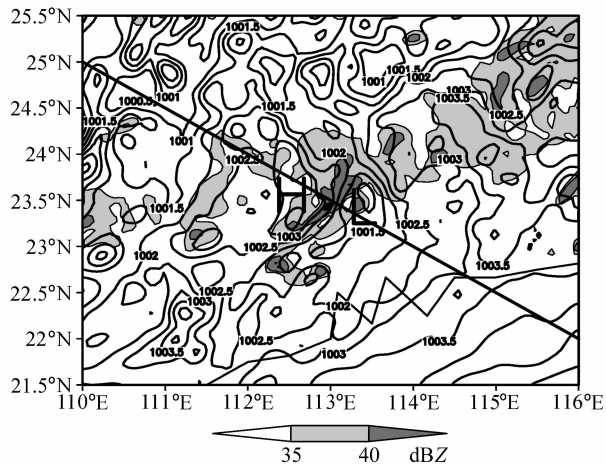


图 13 21 日 12 时模拟的海平面气压场 (单位: hPa) (阴影为雷达回波 > 35 dBZ)

Fig. 13 Simulated sea level pressure (hPa) at 1200 UTC 21 Jun (the shaded areas show radar reflectivity > 35 dBZ)

统的 β 中尺度环流结构。

图 13 是模拟的 21 日 12 时海平面气压场, 可以看出, 与 MCS 相联系的中尺度扰动包括一个中尺度高压和一个中尺度低压, 线状的强对流带位于此中高压和中低压之间的过渡带上, 在客观分析的气压场上也有类似的分布 (图略)。气压场和强对流的这种 β 中尺度的分布型式类似于 Johnson 等^[21]所归纳出的北美中纬度飑线系统的概念模型, Biggerstaff 等^[22]利用高分辨的观测资料所作的个例分析也得到类似的结果。因此, 图 13 中强对流带前的中低压类似于所谓的中纬度飑前低压 (presquall-low) 或前置低压, 但本例中在中高压之后没有出现中尺度的弱低压 (wake low)。

图 14a 是模拟的 925 hPa 流场和温度场, 从图上可见, 在强回波带附近是一条由西北气流和西南气流组成的中尺度切变线。切变线附近, 气流的汇合非常明显。另外, 在对流带后侧有一个冷中心, 它与地面上的中尺度高压 (图 13) 相对应, 关于此冷高压的形成在后面还要进一步讨论。为了分析切变线前后两侧空气的活动, 我们利用 VIS5D 软件制作了对流带附近空气团 M1、M2 (位置如图 14a 所示) 在 21 日 12 时前后的运动轨迹图 (图 15)。由图 15 可见, 对流带后侧的空气块 M1 始于 MCS 西北侧的对流层中层 (4.7 km), 它向东南方向移动, 并在这个过程中逐渐下沉, 于 21 日 12 时到达对流带低层, 在这之后穿越对流区并转向东北方向

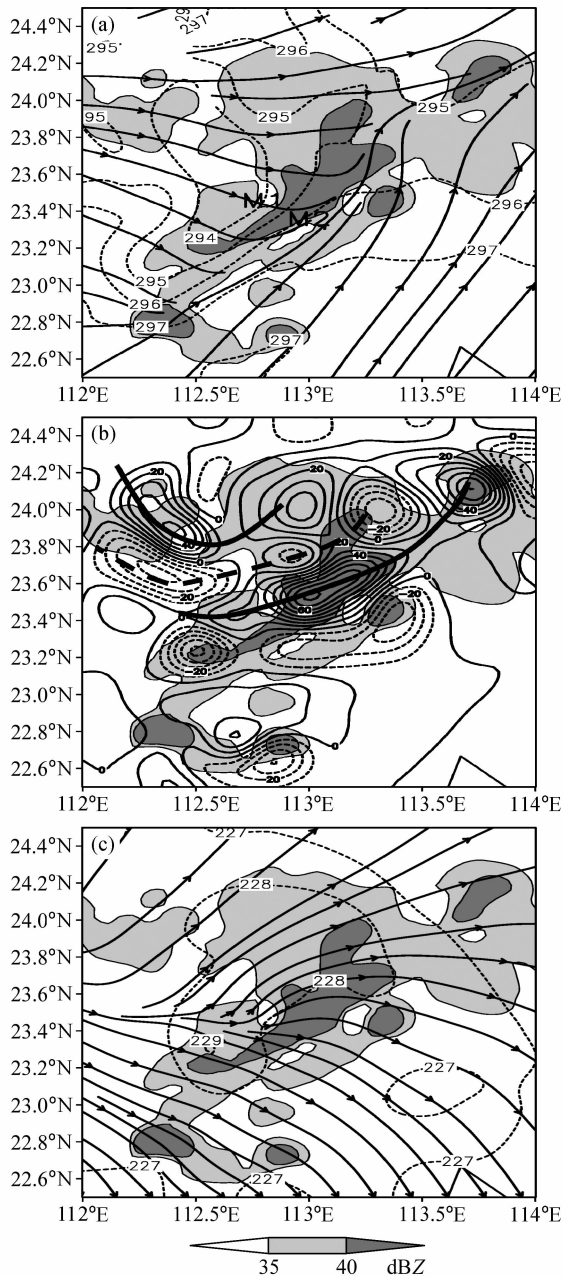


图 14 21 日 12 时模拟的气象要素场 (阴影为雷达回波 > 35 dBZ): (a) 925 hPa 流场和温度场 (虚线, 单位: K); (b) 600 hPa 涡度场 (等值线, 单位: 10^{-5} s^{-1} ; 粗实、虚线为最大、小涡度的轴线); (c) 同 a 图, 但为 200 hPa

Fig. 14 Simulated meteorological element field at 1200 UTC 21 Jun (the shaded areas show radar reflectivity > 35 dBZ): (a) Stream line and temperature (dashed line, units: K) at 925 hPa; (b) relative vorticity at 600 hPa (isoline, units: 10^{-5} s^{-1} , thick solid (dashed) lines denote the axes of maximum (minimum) vorticity); (c) same as (a), but for 200 hPa

逐渐上升而去。对流带前侧的空气块 M2 始于 MCS 西南侧的对流层低层 (0.7 km), 它向东北方

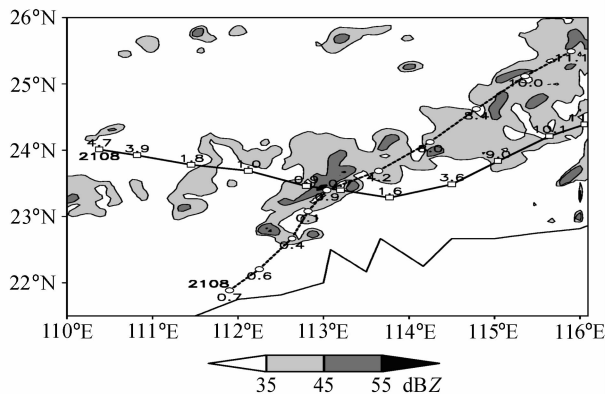


图 15 模拟的切变线两侧空气 M1、M2 运动迹线俯视图。阴影: 雷达回波>35 dBZ; 起始点为 21 日 08 时, 间隔 1 h; 点上标值为对应高度, 单位: km

Fig. 15 Simulated trajectories of M1 and M2 on $x-y$ plane. The shaded areas show radar reflectivity > 35 dBZ, trajectories begin at 0800 UTC 21 Jun with time interval 1 h, the labelled number on every dot indicates the relevant height (km)

向移动, 于 21 日 12 时到达对流带附近后由于前述下沉较冷空气块的抬升作用而突然上升, 再之后则是继续向东北方向移去并上升。

MCS 的对流层中层涡度场的特征是近年来关于 MCS 研究的一个重要方面。图 14b 是模拟的 600 hPa 层的涡度分布图, 由图可见, 在沿系统移动方向上, 涡度场呈正负相间、宽约 50 km, 且与对流带近于平行的带状分布, 最强的正涡度带与强对流带基本吻合, 紧接着此强正涡度带的后方是一条负涡度带, 其后的层状降雨区内又是一个次最大值的正涡度带。对流层中部涡度场的这种分布, 与 Biggerstaff 等^[22]对一个中纬度飑线系统进行分析所得的结果类似。以前有人曾把 MCS 层状降雨区内对流层中部的正涡度中心和涡旋统称为中尺度的对流涡旋 (MCV)^[23]。本例中, 层状降雨区内的正涡度中心在 (24°N, 113°E) 附近, 在实测的雷达回波图中 (图 10a), 可看出在 (24°N, 113°E) 附近是一个凹口区。以往的研究曾指出 MCS 系统中的 MCV 就发生在雷达回波图弓形结构的凹口区^[24], 这说明在本例 MCS 系统的层状降雨内, 似乎也存在着一个中尺度的对流涡旋 (MCV), 但在流场上并未发现与之对应的涡旋结构 (图略)。在对流层高层, 强对流带呈暖心结构, 中心附近气流的辐散很明显 (图 14c)。

图 16 是通过强对流带的经向剖面上的温度经

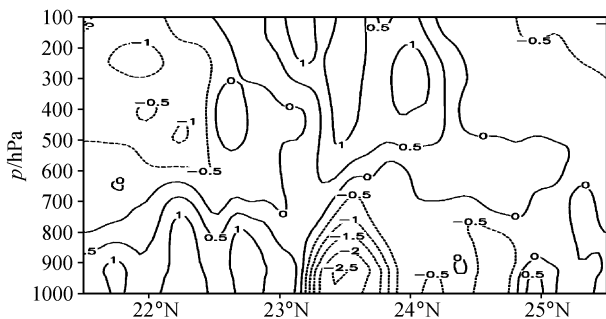


图 16 模拟 21 日 12 时沿 113°E 的温度距平的垂直剖面 (单位: K)

Fig. 16 Latitude-height cross section of simulated temperature departure (K) along 113°E at 1200 UTC 21 Jun

向距平分布, 由图可见, 在对流层的中上部有一个宽约 100 km 的正距平区, 此暖距平应与由对流潜热释放引起的加热有关。而在对流层下部 (约 700 hPa 以下), 则为负距平区, 最冷的中心约出现在 925 hPa 附近, 此冷距平可能与后面将提到的下沉气流中雨滴的蒸发或升华所引起的冷却有关。

我们以模拟的强回波带的移动作为 β 中尺度系统的移动, 发现此系统在 21 日 12 时前后沿西西北-东东南方向移动 (图略), 移速约为 9.72 m/s。沿系统移动方向做垂直剖面 (切线位置如图 13 所示), 并在实际风上减去系统的移动速度, 得到在与系统一起移动的坐标系里的中尺度 (相对于此 β 中尺度系统的) 垂直环流图 (图 17a, 垂直速度放大 10 倍)。图 17b 是相应的垂直速度分布图。结合图 17a 与 17b, 可以看出 MCS 的相对环流有如下一些主要的特征。

在系统的前部存在着深厚的入流, 结合水平速度分布图 (图略), 可以见到两支较强的入流分别出现在对流层的下部 (900 hPa) 和上部 (约 300 hPa) 附近。在对流中心 (113°E) 附近是一支近于垂直的深厚上升流, 最大上升速度约在 500 hPa 高度附近, 达 4.5 m/s。上升流到达对流层上部 (200 hPa) 后分别向前或向后辐散流出。在紧邻强上升气流的后侧, 对流层中下部有一支对流尺度的下沉气流 (图 17b), 它可能主要是由于雨滴的下降拖曳和蒸发冷却作用而形成的^[25]。

在强对流带后部的层状降雨区内, 大约在 550 hPa 以下是一片中尺度下沉运动区, 它对应着前述的地面中尺度冷高压 (图 13), 它们的产生与

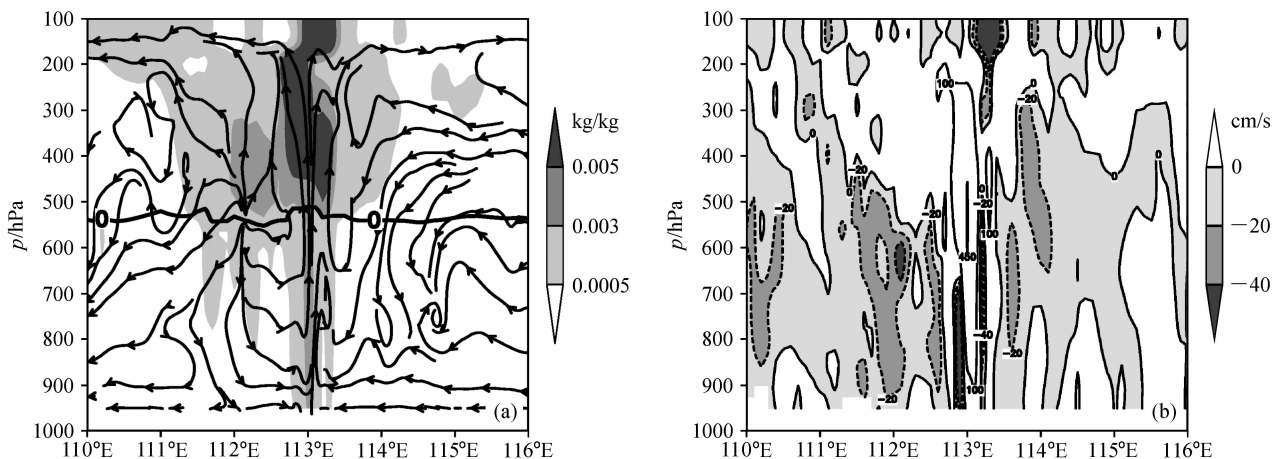


图 17 21 日 12 时模拟的沿系统移动方向剖面上的相对环流 (a, 阴影为云水含量加雨水含量 $> 0.0005 \text{ kg/kg}$, 粗实线为 0°C 温度线) 和垂直速度 (b)

Fig. 17 Vertical cross section of simulated system-relative flows (a, shaded areas show cloudwater concentration + rainwater concentration $> 0.0005 \text{ kg/kg}$, thick line stands for temperature isoline 0°C) and vertical velocity (b) along the system moving direction at 1200 UTC 21 Jun 2005

由层状云下落的降水粒子(雨滴/冰晶)的蒸发、升华和融解而引起的冷却效应有关^[26]。下沉气流从中空下沉到低层后,一部分向系统移动的后方流出,另一部分则向前流去,与系统前方的入流在对流带附近汇合后转为上升。在中尺度下沉运动区的上方是一片中尺度的上升运动区,两者的分界位置在 0°C 层高度附近,Kniefel 等^[27]在分析一中纬度 MCS 时也得到类似的结果。

以往的研究^[27]曾在中纬度的 MCS 内发现有“由前向后的(倾斜的)中尺度上升流”,这一环流特征在图 17a 中并不明显,这可能与本例 MCS 是处于斜压性较弱的环境有关。另外,在 MCS 后部(112°E 以西)的对流层中部也没有出现(相对于系统的)所谓的后部入流^[28]。Houze^[25]认为,一般来说中层的入流可来自各个方向,后部的入流只是这种普遍现象的一种特例。在 21 日 12 时,此 MCS 正处于 500 hPa 南支西风小槽内,对流层中部的天气尺度环境风比较弱(图略),从而使得在沿西西北至东东南方向(图 13 所示剖面方向)上的相对风(环境风与 MCS 移速之差)呈现不出所谓的后部入流这一特征。

以上的分析结果表明,模拟生成于华南锋前暖区的 MCS 的 β 中尺度环流结构,除由前向后的倾斜中尺度上升气流外,其他的一些主要特征与以往的中纬度 MCS 的观测或模拟研究结果^[25]基本上相

类似。

5 结语

2005 年 6 月 21 日,广东珠江三角洲地区出现一次大范围的暴雨天气,此次暴雨过程与一个长生命史的中尺度对流系统(MCS)有关。天气学分析表明,此 MCS 生成和活动时于地面冷锋南面斜压性较弱的暖区里,低空急流核前方的水汽通量辐合对它的生成和发展可能是紧要的。MCS 降水(云)的回波区由层状云降雨区和对流区组成,在其强盛(成熟)期间,最强的 β 中尺度深对流带位于层状降水区的前沿(东南部),这种结构分布类似于 Parker 等^[4]提出的中纬度 MCS 的 TS 型结构。

我们利用 MM5 模式成功地模拟出与此 MCS 相联系的天气尺度环流背景场以及中尺度的降雨分布,并利用高分辨的模式输出结果分析了发展和成熟阶段的 MCS 的 β 中尺度系统的结构和演变,主要结果有:

(1) 在 MCS 的发展加强过程中,其内的 β 中尺度对流中心经历了此消彼长的更替过程,伴随着 β 中尺度对流中心的发展,与之相联系的正涡度中心由对流层的下部向中上部伸展,形成高达 300 hPa 附近的下宽上窄的强涡柱。在成熟阶段,沿系统移动方向上的对流层中部的涡度场呈正负相间、宽约 50 km,且与对流带近于平行的带状分布,最强的

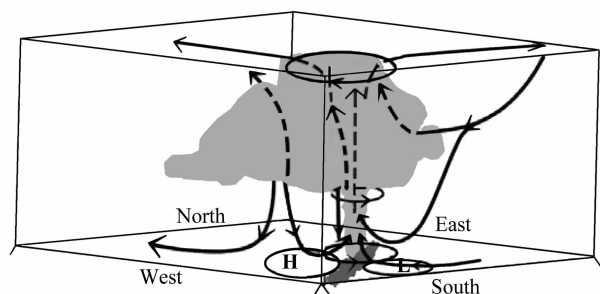


图 18 MCS 成熟阶段 β 中尺度环流模型图。浅色阴影区代表云水加雨水, 带箭头的粗实(虚)线为流线, 带箭头的圆环表示气旋(反气旋)式环流, 底面深色阴影区代表强对流带, H 和 L 分别表示地面的中高压和中低压

Fig. 18 Schematic diagram of the meso- β -scale circulation pattern at the mature stage of MCS. The light shading shows the cloud water and rain water; the solid (dashed) lines with arrow indicate the stream lines; the rings with arrow show the cyclonic (anticyclonic) circulation; the dark shading at the bottom represents the severe convective belt, H and L denote mesohigh and mesolow, respectively

正涡度带与强对流带基本吻合。

(2) MCS 的海平面气压场呈跷跷板型的中尺度扰动, 即由前置中低压和后置中高压组成, 最强的对流带位于中低压和中高压之间的过渡带内。

(3) 对流中心的低层是冷心, 中高层是暖心。

(4) 在随 MCS 移动的坐标系里观测到的相对于 MCS 的中尺度环流特征主要包括: ① 强对流区内是一支近于垂直的深厚的对流尺度的上升流, 紧接在其后方的对流层下部有一支对流尺度的下沉气流; ② 系统前部有深厚的入流, 其中较强的两支入流分别出现在 900 hPa 和 300 hPa 高度附近; ③ 层状降雨区内有中尺度的上升气流和下沉气流, 二者的分界线在 0°C 层高度附近, 此下沉气流到达低层后, 一部分向系统移动的后方流出, 另一部分则向前流去, 与系统前方的入流在对流带附近汇合后转为上升; ④ 对流层下(上)部强大的水平辐合(散)流, 其中最大的水平辐合(散)出现在 900 hPa (200 hPa) 附近。

根据上述的分析结果, 我们概括出了华南地区锋前暖区的 MCS 成熟阶段的 β 中尺度系统结构模型(如图 18 所示)。

上述结果仅是对一个例的研究所得, 要全面揭示华南地区这一类 MCS 系统的结构和演变特征还需要更多的个例分析。

参考文献 (References)

- [1] Zhou Xiaoping, Lu Hancheng, Ni Yunqi. A review of major progresses in mesoscale dynamic research in China since 1999. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2004, **21**: 497~504
- [2] Schumacher R S, Johnson R H. Organization and environmental properties of extreme-rain-producing mesoscale convective systems. *Mon. Wea. Rev.*, 2005, **133**: 961~976
- [3] Houze R A, Smull B F, Dodge P. Mesoscale organization of springtime rainstorms in Oklahoma. *Mon. Wea. Rev.*, 1990, **118**: 613~654
- [4] Parker M D, Johnson R H. Organizational modes of midlatitude mesoscale convective systems. *Mon. Wea. Rev.*, 2000, **128**: 3413~3436
- [5] Zhang D L, Gao K, Parsons D B. Numerical simulation of an intense squall line during 10 - 11 June 1985 PRE-STORM. Part I: Model verification. *Mon. Wea. Rev.*, 1989, **117** (5): 960~994
- [6] Zhang D L, Gao K. Numerical simulation of an intense squall line during June 10 - 11, 1985 PRE-STORM. Part II: Rear inflow, surface pressure perturbations and stratiform precipitation. *Mon. Wea. Rev.*, 1989, **117** (9): 2067~2094
- [7] Chen S J, Kuo Y H, Wang W. A modeling case study of heavy rainstorms along the Mei-Yu front. *Mon. Wea. Rev.*, 1998, **126**: 2330~2351
- [8] 李鲲, 徐幼平, 宇如聪. 梅雨锋上三类暴雨特征的数值模拟比较研究. *大气科学*, 2005, **29** (2): 236~248
Li Kun, Xu Youping, Yu Rucong. Comparative studies of three types of heavy rainstorms associated with the Meiyu front by numerical simulations. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2005, **29** (2): 236~248
- [9] 孙晶, 楼小凤, 胡志晋. 梅雨期暴雨个例模拟及其中小尺度结构特征分析研究. *大气科学*, 2007, **31** (1): 1~18
Sun Jing, Lou Xiaofeng, Hu Zhijin. A numerical simulation on torrential rain during the Meiyu period and analysis of mesoscale and microscale structure of convective systems. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2007, **31** (1): 1~18
- [10] 周秀骥. 海峡两岸及邻近地区暴雨试验研究. 北京: 气象出版社, 2000. 370pp
Zhou Xiujie. Torrential rainfall experiment research over the both sides of the Taiwan Strait and adjacent area. Beijing: China Meteorological Press, 2000. 370pp
- [11] 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 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*, 2002, **26** (4): 541~557
Sun Jianhua, Zhao Sixiong. A study of mesoscale convective systems and its environmental fields during the June 1994 re-

- cord heavy rainfall of south China. Part I: A numerical simulation study of meso- β convective system inducing heavy rainfall. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2002, **26** (4): 541~557
- [12] 蒙伟光, 王安宇, 李江南. 华南前汛期一次暴雨过程中的中尺度对流系统. 中山大学学报(自然科学版), 2003, **42** (3): 73~77
- Meng Weiguang, Wang Anyu, Li Jiangnan. Multi-MCSs (mesoscale convective system) over the heavy rainfall region during 23 - 24 May 1998 in South China. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni* (in Chinese), 2003, **42** (3): 73~77
- [13] 齐琳琳, 赵思雄. 一次热带低压引发上海特大暴雨过程的中尺度系统分析. 大气科学, 2004, **28** (2): 254~268
- Qi Linlin, Zhao Sixiong. An analysis of mesoscale features of heavy rainfall in Shanghai on 5 - 6 August 2001. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2004, **28** (2): 254~268
- [14] 孙建华, 张小玲, 齐琳琳, 等. 2002 年中国暴雨试验期间一次低涡切变上发生发展的中尺度对流系统研究. 大气科学, 2004, **28** (5): 675~691
- Sun Jianhua, Zhang Xiaoling, Qi Linlin, et al. A study of vortex and its mesoscale convective system during China heavy rainfall experiment and study in 2002. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2004, **28** (5): 675~691
- [15] 隆霄, 程麟生, 文莉娟. “02.6” 梅雨期一次暴雨 β 中尺度系统结构和演化的数值模拟研究. 大气科学, 2006, **30** (2): 327~340
- Long Xiao, Cheng Linsheng, Wen Lijuan. A numerical study of the structure and evolution of meso- β scale system during “02.6” Meiyu. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2006, **30** (2): 327~340
- [16] 夏茹娣, 赵思雄, 孙建华. 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, 2006, **30** (5): 988~1008
- Xia Rudi, Zhao Sixiong, Sun Jianhua. A study of circumstances of meso- β -scale systems of strong heavy rainfall in warm sector ahead of fronts in South China. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2006, **30** (5): 988~1008
- [17] 刘淑媛, 孙健, 王洪庆. 香港特大暴雨 β 中尺度线状对流三维结构研究. 大气科学, 2007, **31** (2): 353~363
- Liu Shuyuan, Sun Jian, Wang Hongqing. Research on the three-dimensional structure of meso- β -scale convective systems in a heavy rain process in Hong Kong. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2007, **31** (2): 353~363
- [18] 包澄澜, 王两铭, 李真光. 华南前汛期暴雨的研究. 气象, 1979, **10**: 8~11
- Bao Chenglan, Wang Liangming, Li Zhenguang. The research of rainstorm during the spring rain-season in South China. *Meteorology* (in Chinese), 1979, **10**: 8~11
- [19] Zhang D L. A numerical study of a mesoscale convective system during TOGA COARE. Part I: Model description and verification. *Mon. Wea. Rev.*, 2001, **129**: 2501~2519
- [20] Maddox R A. Mesoscale convective complexes. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1980, **61**: 1374~1387
- [21] Johnson R H, Hamilton P J. The relationship of surface pressure features to the precipitation and air flow structure of an intense midlatitude squall line. *Mon. Wea. Rev.*, 1988, **116**: 1444~1472
- [22] Biggerstaff M I, Houze R A. Kinematic and precipitation structure of the 10 - 11 June 1985 squall line. *Mon. Wea. Rev.*, 1991, **119**: 3034~3065
- [23] Zhang D L, Fritsch J M. Numerical simulation of the meso- β -scale structure and evolution of the 1977 Johnstown flood. Part II: Inertially stable warm-core vortex. *J. Atmos. Sci.*, 1987, **44**: 2593~2612
- [24] Zhang D L. A numerical study of a mesoscale convective system during TOGA COARE. Part II: Organization. *Mon. Wea. Rev.*, 2004, **132**: 1000~1017
- [25] Houze R A. Mesoscale convective systems. *Rev. Geophys.*, 2004, **42**: RG4003
- [26] Fujita T T. Precipitation and cold air production in mesoscale thunderstorm systems. *J. Meteor.*, 1959, **16**: 454~466
- [27] Knievel J C, Johnson R H. The kinematics of a midlatitude, continental mesoscale convective system and its mesoscale vortex. *Mon. Wea. Rev.*, 2002, **130**: 1749~1770
- [28] Smull B F, Houze R A. Rear inflow in squall lines with trailing stratiform precipitation. *Mon. Wea. Rev.*, 1987, **115**: 2869~2889