

夏茹娣, 赵思雄. 2009. 2005年6月广东锋前暖区暴雨 β 中尺度系统特征的诊断与模拟研究[J]. 大气科学, 33(3): 468–488. Xia Rudi, Zhao Sixiong. 2009. Diagnosis and modeling of meso- β -scale systems of heavy rainfall in warm sector ahead of front in South China (middle part of Guangdong Province) in June 2005 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33(3): 468–488.

2005年6月广东锋前暖区暴雨 β 中尺度系统特征的诊断与模拟研究

夏茹娣^{1, 2} 赵思雄²

¹ 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

² 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘 要 通过对雷达、卫星、地面等观测资料的诊断分析以及数值模拟研究, 对2005年6月广东(粤中)地区特大持续性暴雨的 β 中尺度系统进行了研究, 得出以下结果: (1) β 中尺度系统是此次广东持续性暴雨的直接制造者, 当地的喇叭口地形非常有利于 β 中尺度系统的触发与维持。 β 中尺度系统发展初期有一些更小的 γ 中尺度系统的活动, 它们形成带状, 逐渐发展合并为 β 中尺度系统。(2) 在较为成功的模拟的基础上, 采用模式输出资料对 β 中尺度对流雨团P作了仔细分析, 结果显示低层对应风场的辐合, 高层对应风场的辐散, 这种高低空散度场配置非常有利于强降水的产生和维持, β 中尺度雨团中心对应着上升运动, 而在雨团北侧有弱下沉气流的补偿。引起降水的 β 中尺度系统多位于锋前暖区的相对更暖区域。(3) 在同一次暴雨过程中, 粤桂两地同处锋前暖区, 对其风场上的异同点作了比较。共同点是低层均存在风场的辐合。但广西为风速辐合, 辐合中心具移动性, 而广东为风向辐合, 有明显辐合线, 辐合中心, 稳定少动。(4) 地面辐合线上的扰动以及地面较强的温湿对比区的热力作用对于 β 中尺度系统的触发可能有重要的影响。地面资料提供了很有用的信息, 是一种重要的工具。(5) 在此基础上提出了锋前暖区中尺度对流系统及地形、地面风、温、湿分布对其影响的概念模型。

关键词 锋前暖区 暴雨 β 中尺度系统

文章编号 1006-9895(2009)03-0468-21

中图分类号 P458

文献标识码 A

Diagnosis and Modeling of Meso- β -scale Systems of Heavy Rainfall in Warm Sector ahead of Front in South China (Middle Part of Guangdong Province) in June 2005

XIA Rudi^{1, 2} and ZHAO Sixiong¹

¹ Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract The meso- β -scale systems of the continuous heavy rainfall in South China (the middle part of Guangdong Province) in June 2005 were investigated through diagnosis of radar, satellite, and surface observation data, as well as numerical simulation output. The conclusions are as follows: (1) Meso- β -scale systems are the direct maker of the continuous heavy rainfall in Guangdong Province in June 2005. At the initial stage, there are some meso- γ -scale systems, which distribute in line and gradually combine to meso- β -scale systems. (2) The numerical simulation of

收稿日期 2007-10-18, 2008-04-15 收修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展规划项目 2004CB418301, 国家自然科学基金资助项目 40405008

作者简介 夏茹娣, 女, 1981年出生, 博士, 主要从事中尺度气象学, 灾害天气动力学和数值模拟研究。E-mail: xiarudi@mail.iap.ac.cn

meso- β -scale cloud cluster P indicates that there is convergence in the lower layer and divergence in the upper layer, which is very favorable for the initiation and maintaining of the heavy rainfall. The center of meso- β -scale rain cluster corresponds to ascending movement, and there is compensatory descending movement to the north of rain cluster. The meso- β -scale system bringing heavy rainfall exists in the warmest area of the warm sector ahead of front. (3) The similarities and differences of wind field in warm sectors ahead of front in Guangdong Province and Guangxi Province during the same heavy rainfall process are discussed, respectively. The former belongs to the wind direction convergence and the latter is related to the wind speed convergence. (4) Surface observation data provide important information. The intersection of surface convergence line and quite strong contrast zone of temperature and humidity contributes to the initiation of meso- β -scale systems significantly. (5) Based on these, a conceptual model of mesoscale systems of heavy rainfall in the warm sector ahead of front in South China and related influences of terrain, wind, temperature, moisture at surface on the heavy rainfall has been proposed.

Key words warm sector ahead of front, heavy rainfall, meso- β -scale system

1 引言

华南是我国夏季的三大暴雨区之一,我国气象工作者对此非常重视,已经开展过多次外场试验,在此基础上还进行了一些卓有成效的研究(陶诗言,1980;黄土松等,1986;陈红等,2000,2004;孙建华等,2002a,2002b;张顺利等,2002;周秀骥等,2003;夏茹娣等,2006;Zhao Sixiong et al.,2007)。特别是对于其中的锋前暖区暴雨,已获得了一些很有意义的结果(陶诗言,1980;黄土松等,1986;周秀骥等,2003)。近年来,华南暴雨方面的研究工作也比较多(张庆红等,2000;吴庆丽等,2002;陈敏等,2005;蒙伟光等,2005;周海光等,2007;熊文兵等,2007;刘淑媛等,2007;王婷等,2008)。然而,分析表明发生在前汛期的锋前暴雨,在不同的环流背景下其造成的影响是不同的,诸如经向型环流(1998年6月)、纬向型环流(2005年6月)等。另外,同一次锋前暖区暴雨,在静止锋的东段与西段暴雨的发生发展也会有所不同。2005年6月18~22日在广西、广东均出现了强降水,对广西段已有过一些分析,其降水系统多移动性,且强降雨团多与洪峰“遭遇”,引发了西江流域的大洪水,使梧州洪水漫过堤防,进入市区(夏茹娣等,2006)。而在广东段,暴雨团多停滞集中于粤中的龙门、河源等地,以及广东东南沿海的海丰地区。在惠州市龙门县(23°44'N,114°14'E),19~21日的日降水量最大值分别达到了312.3 mm,355.0 mm和310.6 mm,实属罕见。由此可见,此次广东的降水不但强度大,而且强降水区稳定少动,与广西段明显不同,因此,很有必要对广东(粤中)地区

的锋前暖区暴雨进行研究。显然,这里有一些科学问题需要深入探讨:(1)为何广东段的降水如此之强?其中中尺度系统的作用和影响如何?(2)为何广东段的降水区域稳定少动,环境场对引发强降水的中尺度系统的触发、发展作用如何?(3)能否利用广东地区的特殊观测资料,尤其是地面观测资料,对该地区中尺度系统形成和发展的有利条件作些分析?此外,该次过程中特殊的环流状况、天气系统以及某些中尺度系统和云团演变和结构的主要特征能否用数值模式模拟出来?弄清这些问题,可为更好地理解这类暴雨发生的可能原因以及为改进今后的暴雨预报提供帮助。因此,本文采用数值模拟与诊断分析相结合的办法,对这场大暴雨的主要环流特征、锋前暴雨区东段及某些特定的中尺度系统集中进行研究。而对经向型与纬向型环流背景所造成的影响方面的研究,将在另文中发表。

2 资料与方法

本文使用的资料有:美国国家气候环境预测中心(NCEP)的再分析资料(分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$)、TBB(Temperature of Brightness Blackbody,黑体亮度温度)资料(分辨率 $0.01^\circ \times 0.01^\circ$)、广州新一代多普勒雷达资料、广东自动站观测资料(风、温度、湿度)以及常规观测资料。采用的方法主要为数值模拟和诊断分析。通过诊断分析探讨云团的时空分布和路径,揭示了中尺度云团的特征及雷达回波的演变,分析了地面距平风场及其散度的分布,此外,对中尺度系统及其环流场进行了数值模拟,并对模拟结果作再分析,还讨论了地面温度湿度场对中尺度系统发生发展的可能影响。相对于同一过

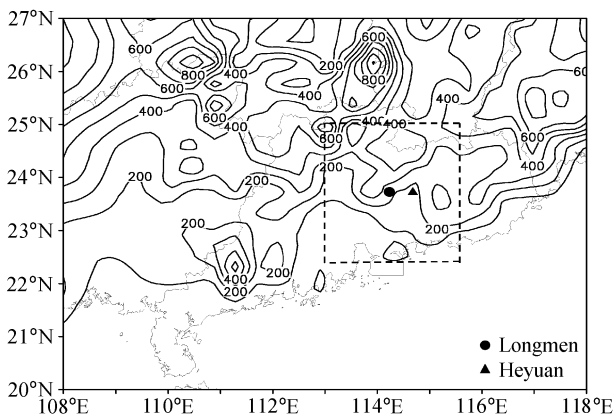


图1 地形分布(单位: m)。虚线方框为此次暴雨集中研究的区域(下同)

Fig. 1 Terrain height (m). The area encircled by dashed rectangle is the main studied area of the heavy rainfall (similar hereinafter)

程的广西暴雨而言,本文不但采用较高分辨率的数值模式进行了模拟和再诊断,而且充分使用地面资料讨论了地面温湿特征对中尺度系统的影响。为了讨论地形对暴雨中尺度的发展,这里给出了地形分布图(图1)。为对主要的强暴雨区域,尤其是其中的中尺度对流系统集中进行研究,在图1中用虚线方框标出了强暴雨区所在的范围(后文图中将多次提到此区域)。

3 中尺度系统特征

在本节中主要讨论这次暴雨过程的中尺度系统的特征。而在讨论中尺度系统之前,我们将首先分析此次暴雨过程的环流特点。为了便于比较环流分布的实况与后面给出的数值模拟结果,500 hPa、700 hPa图(图10、图11)将在5.1节中给出。6月18日00时(国际协调时,下同),500 hPa上,在高纬(70°N, 70°E)附近有一冷涡存在;中纬度地区有一高压脊位于贝加尔湖和巴尔喀什湖之间,一低压槽位于我国东北到黄海一带(图略)。应指出的是,在500 hPa上,河套地区的高压脊向北伸展,其东侧槽有明显加深,至21日有一个东北低压生成,且该东北低压有一槽线向西南伸展(图10c、d)。从700 hPa上的环流形势可以看到,6月18日后东亚槽逐渐加深,20日以后700 hPa上一条东北-西南指向的切变线非常明显,甚至达到了横槽的程度(图11c、d)。从850 hPa向上,一直伸展至700 hPa,像这样深厚的水平切变及500 hPa

上经向环流的强烈发展,在华南锋前暖区暴雨的个例中是不多见的。在这种背景下,暴雨发生得稳定而强烈,有利于大量的中尺度系统不断发生发展。此外,由夏茹娣等(2006)的图9可知华南地区从福建至广西一带维持了一条准静止锋云系,而广东位于锋前的暖区,这是一次典型的锋前暖区降水过程。

3.1 中尺度系统的路径和生命史

由TBB分布(图略)可见,暴雨期间,华南地区有一批中尺度对流系统(MCS)活动,为了更进一步了解这些中尺度对流云团在广东地区的活动特征,将 $TBB \leq -32^\circ\text{C}$ 的区域视为对流云团区域,分析19~21日连续三天每1小时一次的TBB图(图略),得出广东境内中尺度云团活动路径图(图2)。可以发现,广东境内中尺度云团尺度主要为 β 中尺度系统,它们的活动特征如下:

(1) 云团的生命史(2~13 h)和空间尺度(表1)均表明了云团具有 β 中尺度的特征,且都达到了强对流云团的标准($TBB \leq -52^\circ\text{C}$)。

(2) 云团多起始于广东的中北部地区,且在河源-龙门一带维持和发展(见图2虚线方框区域),即位于广东的喇叭口地形区域(见图1)。这表明,此次暴雨过程中广东特殊地形有利于中尺度系统的停滞,暴雨有很强的局地性。这与广西云团移动较快的情况有很大不同。

(3) 位于广东沿海地区的 β 中尺度云团多往东北偏东方向移动,而集中在广东中北部地区的 β 中尺度云团多往东南偏南方向移动,即向龙门-河源一带移动,在越过云团活动密集的喇叭口地区后,又有向东北偏东方向移动的趋势。位于喇叭口地形区域的云团移动速度要明显小于其他区域的云团。

(4) 云团的起始时刻分布如下:清晨(19时~次日00时):6个;上午(02时):1个;中午(04时):3个;下午(06时~09时):5个;晚间(15时~19时):7个。可见, β 中尺度云团多在午后至次日清晨时段发生,而较少在上午出现。

以上分析表明, β 中尺度系统在此次广东强降水过程中的活动特征及其重要性。下面将利用雷达、卫星资料以及中尺度数值模式来进一步研究 β 中尺度系统的流场结构及发生的可能机理。

3.2 β 中尺度系统的雷达回波特征

为了进一步研究 β 中尺度系统的特征,本文充

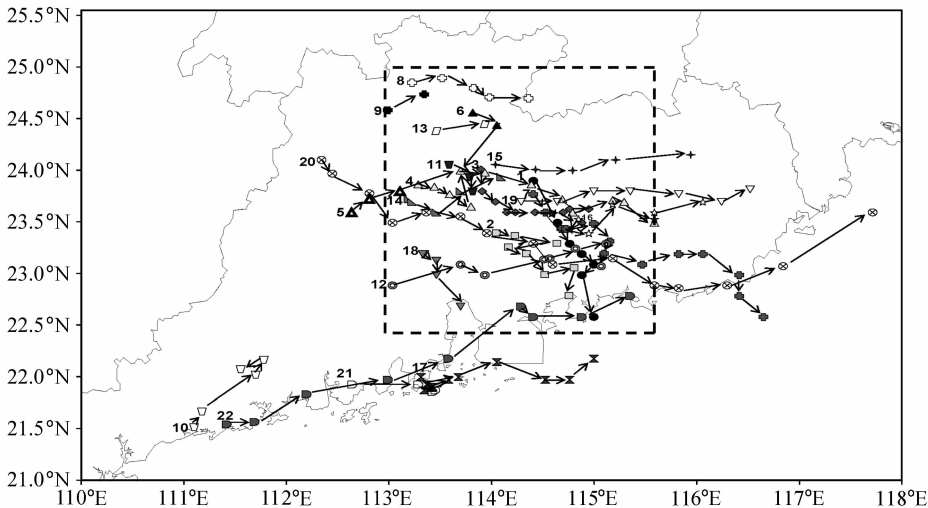


图 2 2005 年 6 月 18 日 22 时~22 日 05 时 β 中尺度云团活动路径图。数字：与表 1 的云团编号相对应

Fig. 2 Track of meso- β cloud clusters from 2200 UTC 18 Jun -0500 UTC 22 Jun 2005. The numbers in Fig. 2 correspond to the cloud cluster numbers in Table 1

表 1 2005 年 6 月 18 日 22 时~22 日 05 时 β 中尺度云团的时空分布特征

Table 1 The spatial and temporal characteristics of meso- β -scale cloud clusters from 2200 UTC 18 Jun - 0500 UTC 22 Jun 2005

编号	起始时刻	终止时刻	持续时间/h	发展鼎盛时期云团尺度/km	备注
1	18 日 22 时	19 日 04 时	7	100×100	
2	19 日 04 时	19 日 11 时	8	200×150	
3	19 日 09 时	19 日 18 时	10	200×200	
4	19 日 14 时	20 日 01 时	12	200×250	5、6 号云团在 19 日 18 时并入 4 号云团
5	19 日 15 时	19 日 17 时	3	70×100	
6	19 日 16 时	19 日 17 时	2	50×50	
7	20 日 00 时	20 日 12 时	13	300×100	
8	19 日 22 时	21 日 02 时	5	100×80	
9	20 日 02 时	20 日 03 时	2	100×100	
10	20 日 06 时	20 日 10 时	5	150×120	
11	20 日 08 时			150×120	11、12、13 号云团在 20 日 11 时合并为 12 号云团
12	20 日 08 时	20 日 15 时	8	350×350	
13	20 日 09 时			200×120	
14	20 日 15 时	20 日 19 时	5	150×80	
15	20 日 17 时	20 日 21 时	5	220×120	
16	20 日 21 时	21 日 04 时	8	300×200	
17	20 日 21 时	21 日 07 时	11	300×200	
18	21 日 03 时	21 日 08 时	6	120×100	
19	21 日 04 时	21 日 10 时	7	100×100	
20	21 日 15 时	21 日 21 时	7	120×120	
21	21 日 19 时	21 日 22 时	4	150×150	
22	21 日 21 时	22 日 05 时	9	450×300	

分利用观测资料对以上列出的 β 中尺度系统进行了逐个分析，但得出的结论基本一致，因此，本文以 21 日 01 时~08 时时段在粤中发展的一个 β 中尺度系统为例，具体阐明。由观测的 1 小时降水量分布（图 3）可见，降水具有明显的中尺度特点，广东境内有多个 10 mm/h 以上的降水中心。

21 日 03 时, 在广东中部出现一系列沿西南-东北方向带状排列的中尺度雨团, 且维持到 21 日 07 时, 之后减弱消失。在这条带状排列的中尺度云团中, 21 日 05 时的雨团 P (见图 3e) 最清楚, 其降水强度达 20 mm/h 以上, 位置在 (23.8°N, 114.2°E) 附近。这里我们可以把它定义为中尺度雨团 P, 该雨团在 06 时持续以 20 mm/h 左右的强度降水, 且略有东移。

从 4 km CAPPI 雷达基本发射率图可清楚地看到呈带状分布的回波特征。21 日 01:55, (23.5°N, 113.5°E) 附近有 γ 中尺度回波产生, 10 分钟后, 即 02:05, 在雷达回波图上已能看到四条呈带状分布的对流回波带。此后, 带状回波加强发展, 并趋于合并, 至 03:45, 雷达回波图上有一尺度范围在 200 km 左右的 β 中尺度雨团回波区, 而且, 在带状回波 C 的西端, 依然不断有对流回波发生、发展,

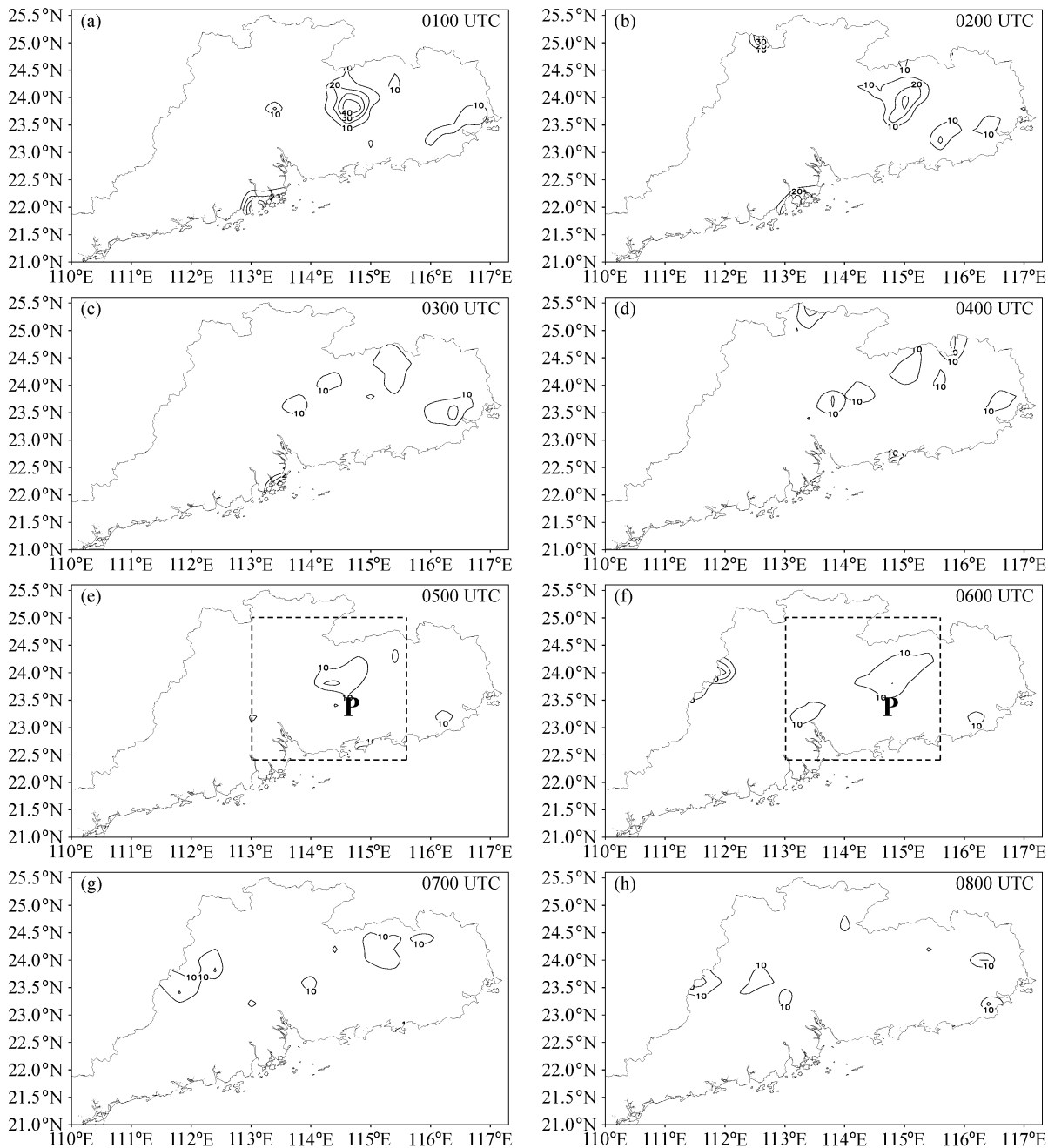


图 3 2005 年 6 月 21 日 01~08 时实测 1 小时降水分布 (单位: mm)

Fig. 3 Observed 1-hour precipitation (mm) from 0100 UTC–0800 UTC 21 Jun 2005

后并入到东面的 β 中尺度回波团中去。该 β 中尺度系统从触发、形成、发展至消亡经历了近 6 个小时。从雷达回波图上, 我们可见到 β 中尺度系统更

细的结构, β 中尺度系统内还存在着带状分布的 γ 中尺度系统 (如图 4 的 A、B、C、D 处), 尤其在云团发展初期。

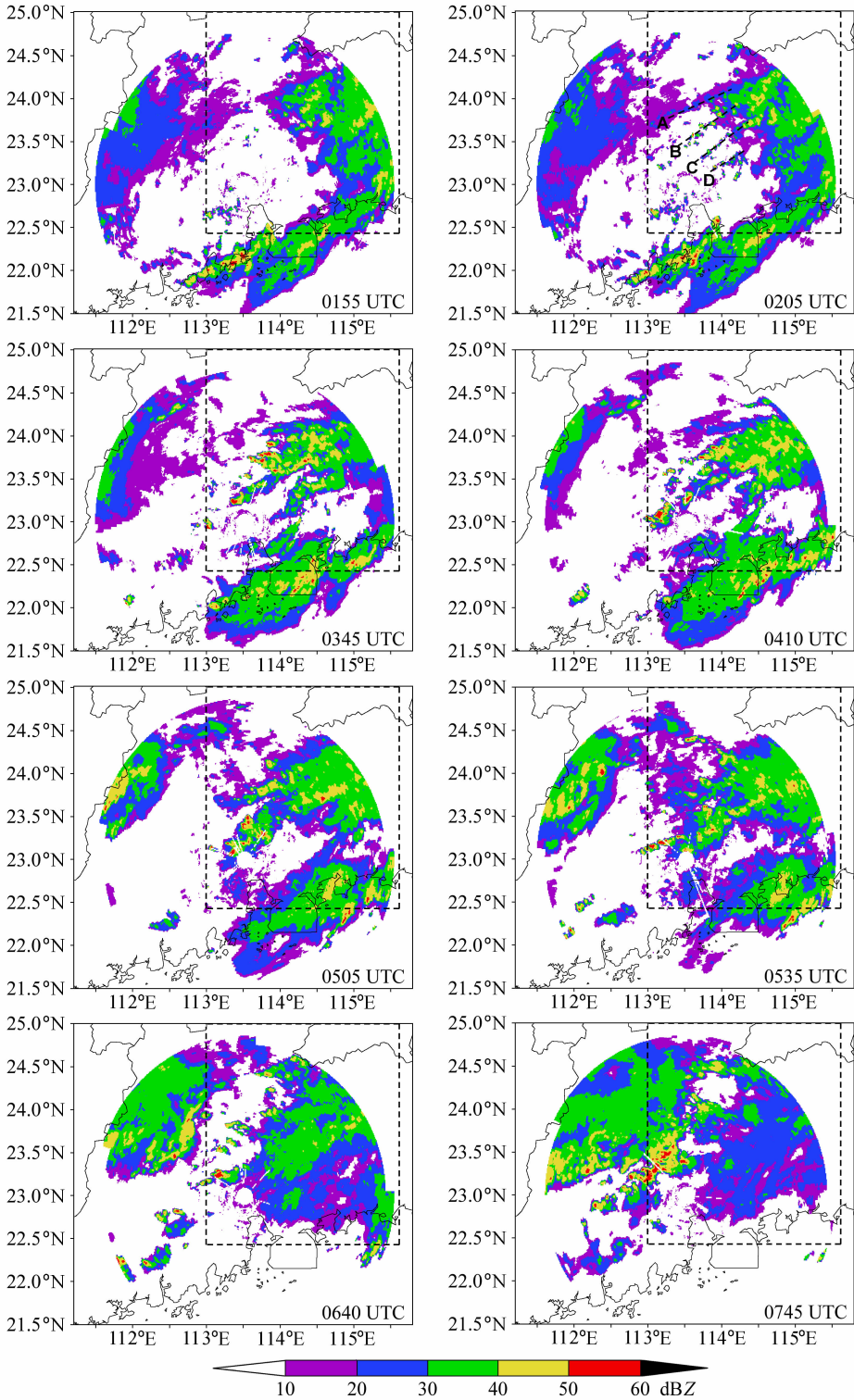


图 4 2005 年 6 月 21 日 02~08 时的 4 km CAPPI 广州雷达回波强度。虚线方框范围同图 2
Fig. 4 CAPPI (Constant Altitude Plan Position Indicator) reflectivity at 4 km height observed by Guangzhou radar from 0200 UTC - 0800 UTC 21 Jun 2005. The dashed rectangle area corresponds to that in Fig. 2

3.3 β 中尺度系统的卫星云图特征

由 1 小时分布的 TBB 图来看 β 中尺度系统的云系特征。21 日 03 时, (23.5°N, 113.8°E) 附近有一个 β 中尺度系统的对流云团产生, 随后云团不断发展加强, 直至 08 时后减弱消失。由于图 5 的区域有限, 从 TBB 图上虽然看不到明显的带状中尺度系统触发、发展、合并的特征, 但是从 21 日 04 时、05 时、06 时的图上的确可见在对流雨团内部有多个强对流中心分布, 它们大致呈西南-东北方向的排列。可见云图上也有可能反映雷达回波图上捕获到的某些 β 中尺度系统的特征。

4 地面气象要素场分布与中尺度系统可能的关系

对于华南暴雨而言, 行星边界层的作用至关重要, 而紧贴行星边界层最底层的地面, 除了地形对中尺度系统的发生发展可能有影响, 风场以及温度湿度场也可能起到重要的作用。

为了更进一步弄清地面风场的作用, 将实测地面风场求面积平均 (图 6 的区域即为计算区域), 再求出其距平。这是因为在引导气流的作用下, 系统有一个整体移动速度, 而各个站点的速度与系统移动速度矢量差能更好地反映系统内部气流的相对运动, 因而风场对面积平均求出距平, 再计算的散度场有可能提供影响暴雨发生的有用信息。由距平风场散度图 (图 6) 和距平风场流线图 (图 5) 可见, 地面风场的中尺度扰动频繁发生, 且的确与中尺度雨团的位置有一定关系。21 日 03 时, 在 (23.5°N, 113.8°E) 附近新生了 40 km 左右的 β 中尺度对流云团, 前一时次, 该对流云团所对应的区域恰好对应西侧弱辐散和东侧强辐合的梯度区域, 且偏于辐散区域。03 时, 云团右侧有一条南北向的气流辐合带, 强辐合中心达到 $-1.5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 。04 时, 云团加强增大, 其对应的地面风场上有一条辐合线分布, 且该辐合线一直维持到 06 时。05 时, 云团有分裂的趋势, 一共出现了 4 个 $\text{TBB} < -80^\circ\text{C}$ 的中心 (图略), 这四个中心中仅东南侧的中心处于较强辐散气流的控制下 (散度为 $1.5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$), 06 时, 处于强辐散气流控制下的云团消失, 其他三个中心都有所增强, 而各个中心区域既有强的风场辐散分布, 也有或弱或强的风场辐合分布。07 时, 云团减弱渐消失。可见, 地面风场辐合线可能对 β

中尺度系统的触发和维持起到了重要的作用。此外, 应注意到在广东地区大暴雨过程中, 地面有强的风速与风向的辐合, 其辐合中心稳定少动, 几乎维持在同一区域; 与同一过程中静止锋的西段相比, 即从广西地区大暴雨过程可以看到, 西段主要是南海季风涌的风速辐合, 且其辐合中心随季风气流向东移动 [夏茹娣等 (2006) 的图 10a、b], 形成了移动性的雨团 (夏茹娣等, 2006)。这也许是上述两地区暴雨的重要区别之一。

除了风场的扰动外, 地面温湿场对中尺度系统的触发可能有一定的作用。过去已有的研究表明 (Sanders et al., 1995), 地面干线 (又称露点锋) 以及对流所产生的地面冷池对对流系统的后续发展往往起到关键的作用, 故用自动站观测资料考察地面的湿度场和温度场, 以探讨其是否对强对流发生有影响。

由 21 日 01 时~12 时地面温度场分布 (图 7) 可见, 21 日 01 时, 广东境内地面温度大体上为西半部暖而东半部冷。在太阳辐射的影响下, 暖区温度继续上升, 直到午后两小时 (0600 UTC) 达到最高, 地面的增温致使该区上空的大气变得不稳定, 从 07 时又开始减弱。而在东北部的冷区一方面可能是由于降雨蒸发引起的降温, 另一方面, 东北方向的雨区与云区使太阳辐射减少。云层以下的下沉气流在低层向周边辐散, 有可能触发西部偏暖区域中的对流活动, 而该偏暖区相对较不稳定, 对流易于发展, 这一现象可能与边界层内的非均匀加热所致。这在一定程度上可能解释雨团多自西向东移动的原因。此外, 随着广东中部带状雨区向西南延伸, 地面冷区域的范围也有所向西南伸展。冷暖区域的交界区域与雷达回波较强区域也有较好的对应关系。21 日 08 时后, 由于太阳辐射作用而增暖的西南地区温度逐渐降低, 西南区域与东北区域温度对比减弱。

此外, 由图 8 可见, 随着降雨的发生, 温度露点差也逐渐增大。在该图的西北部, 湿区与冷区及下沉区有较好的对应关系。结合上面分析的一些结果认为可能存在这样一种机制: 由于降水区域的降温增湿以及太阳辐射在午前和中午的加热蒸发等, 使得降水区域和非降水区域的温度露点差加大, 形成了较强的干湿对比, 这种干湿对比强烈的梯度带类似于干线 (即露点锋)。这条东北-西南走向的露点锋又与较大尺度偏南气流的辐合线相交于雨

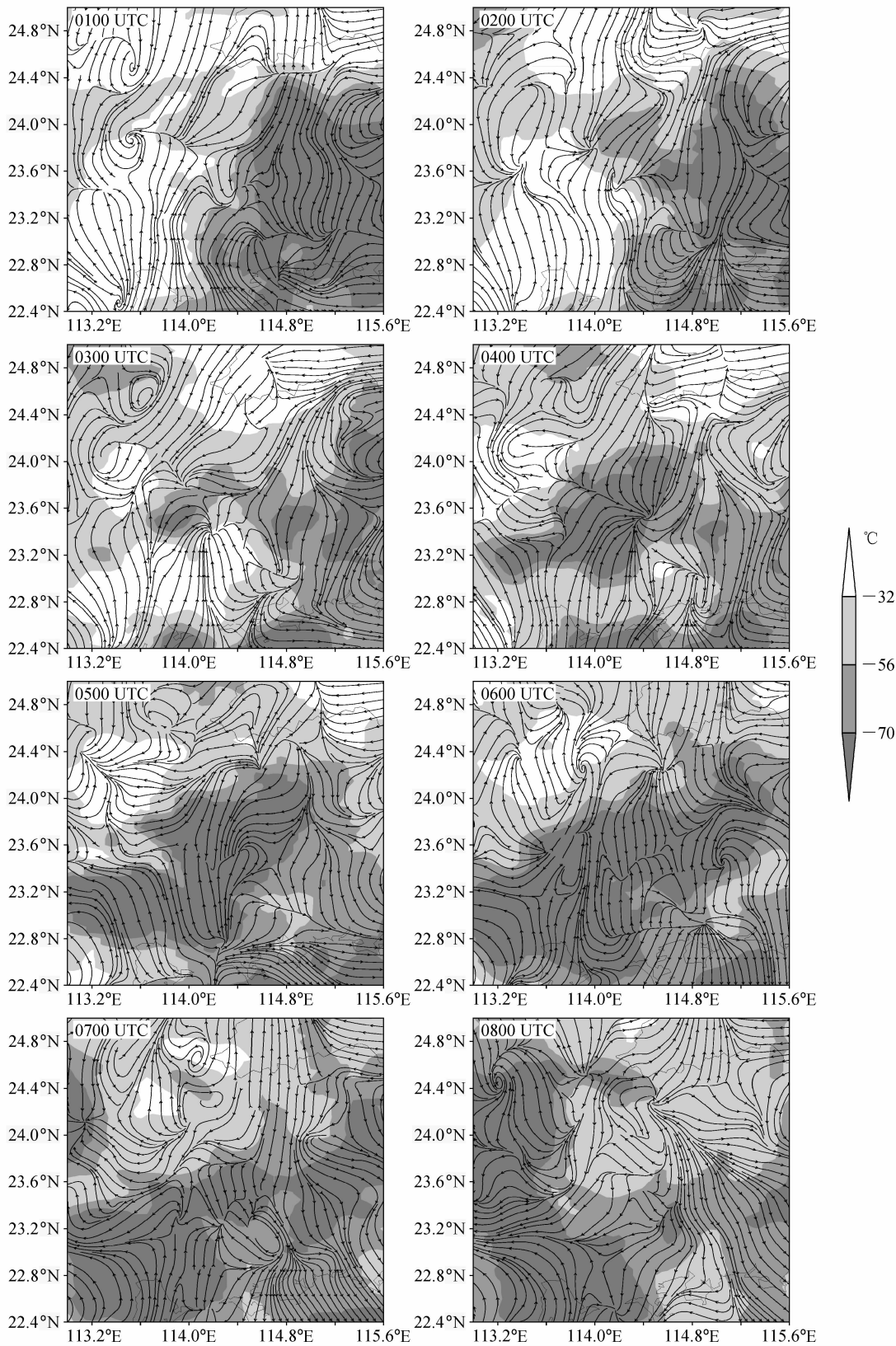


图 5 2005 年 6 月 21 日 01~08 时 TBB (阴影) 及地面距平风场流线分布。本图范围与图 1 中的虚线方框相同

Fig. 5 TBB (shade) and streamline of surface anomaly wind field from 0100 UTC to 0800 UTC 21 Jun 2005. The domain of Fig. 5 corresponds to the rectangle in Fig. 1

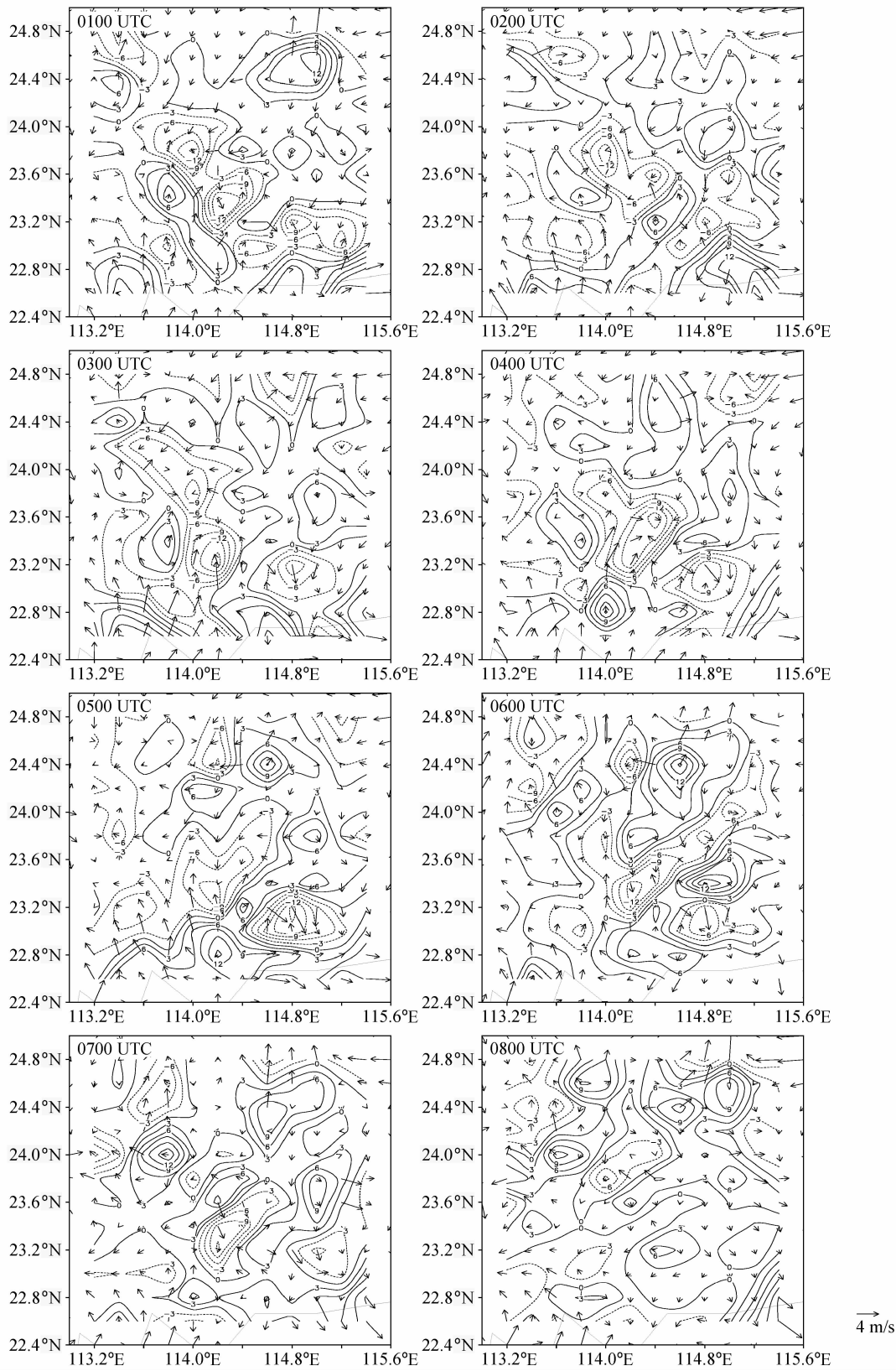


图 6 2005 年 6 月 21 日 01~08 时实测地面距平风场及散度分布 (单位: 10^{-4} s^{-1})。本图范围与图 1 中的虚线方框相同
Fig. 6 Observed anomaly wind and its divergence (10^{-4} s^{-1}) from 0100 UTC to 0800 UTC 21 Jun 2005. The area of Fig. 6 corresponds to the dashed rectangle in Fig. 1

团 P 附近, 在这个相交区域附近易发生对流。

5 暴雨中尺度系统特征的模拟研究

由于观测资料的分辨率有限, 很难对中尺度系统进行更详细的分析。为了更深入地研究 β 中尺度系统, 本文利用中尺度非静力区域数值模式 MM5 (The Fifth-Generation NCAR/Penn State Mesoscale Model) (Grell et al., 1994) 进行了数值模拟研究。但需要指出, 就目前的科学水平而言, 数值模式并不一定总是完美地描写好暴雨过程中的中尺度系统。因此, 首先应对模拟结果加以推敲, 在确认已有模拟结果基本可信的基础上, 方可对数值

模拟输出的资料作再诊断。在本文的数值试验中, 模式采用粗细两重网格嵌套 (计算区域见图 9), 内外嵌套的分辨率分别为 45 km 和 15 km, 垂直层数为 23 层。虽然 15 km 的水平分辨率不算很细, 但是对于描写 β 中尺度系统而言仍是可行的。外层采用 Anthes-Kuo 积云参数化方案和 RRTM 长波辐射方案, 内层采用 Kain-Fritsch2 积云参数化方案。内外层的物理过程均采用了 Schultz 的微物理过程。

模式采用 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 的 NCEP 再分析资料作为模式背景场, 并通过模式的客观分析程序 (Cressman 客观分析方法) 加入常规地面观测资料和广东省自动站观测的地面资料, 从而产生模式初始场和边界

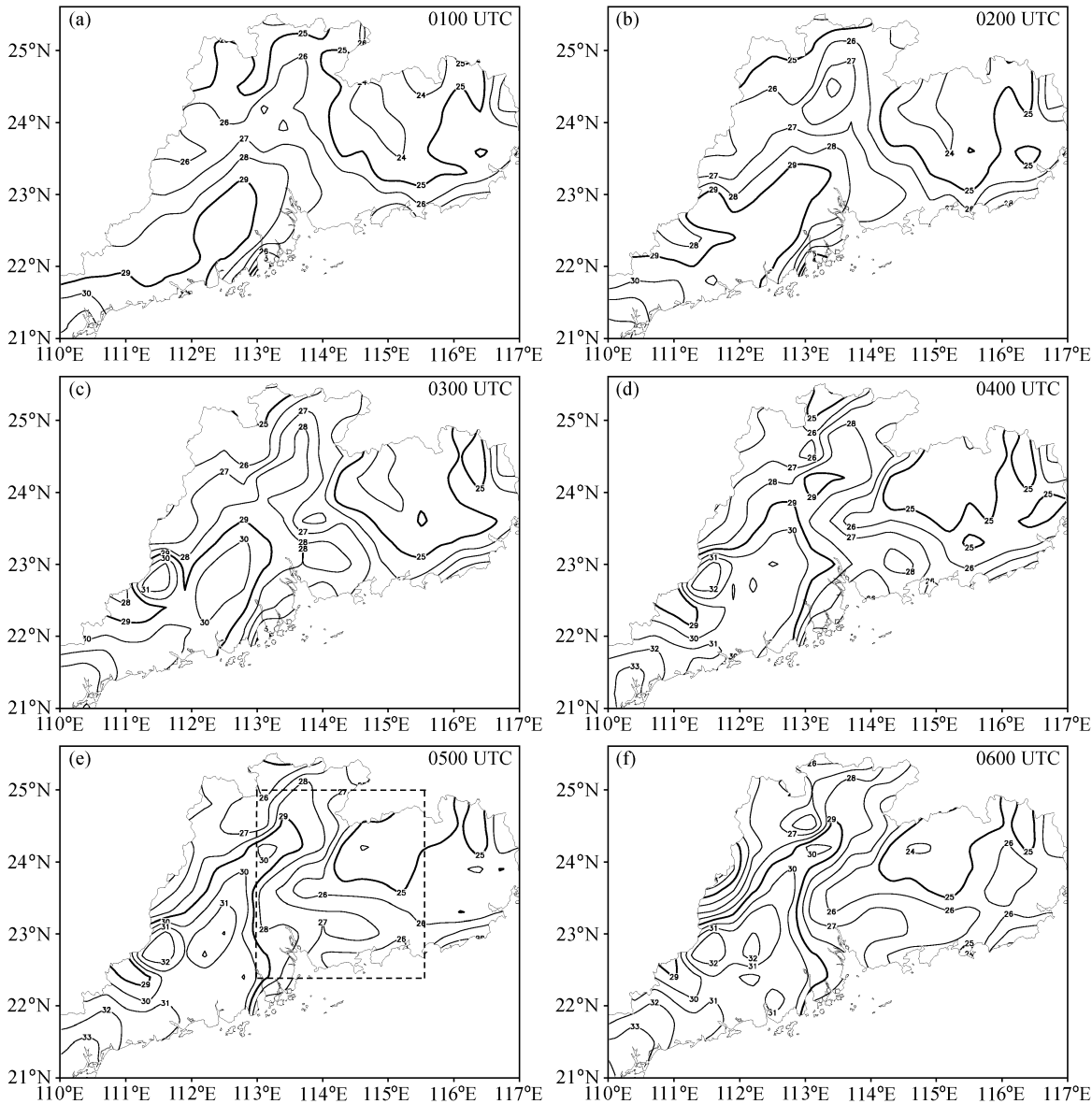


图 7 2005 年 6 月 21 日 01~12 时实测地面温度分布 (单位: $^{\circ}\text{C}$)
Fig. 7 Observed surface temperature ($^{\circ}\text{C}$) from 0100 UTC to 1200 UTC 21 Jun 2005

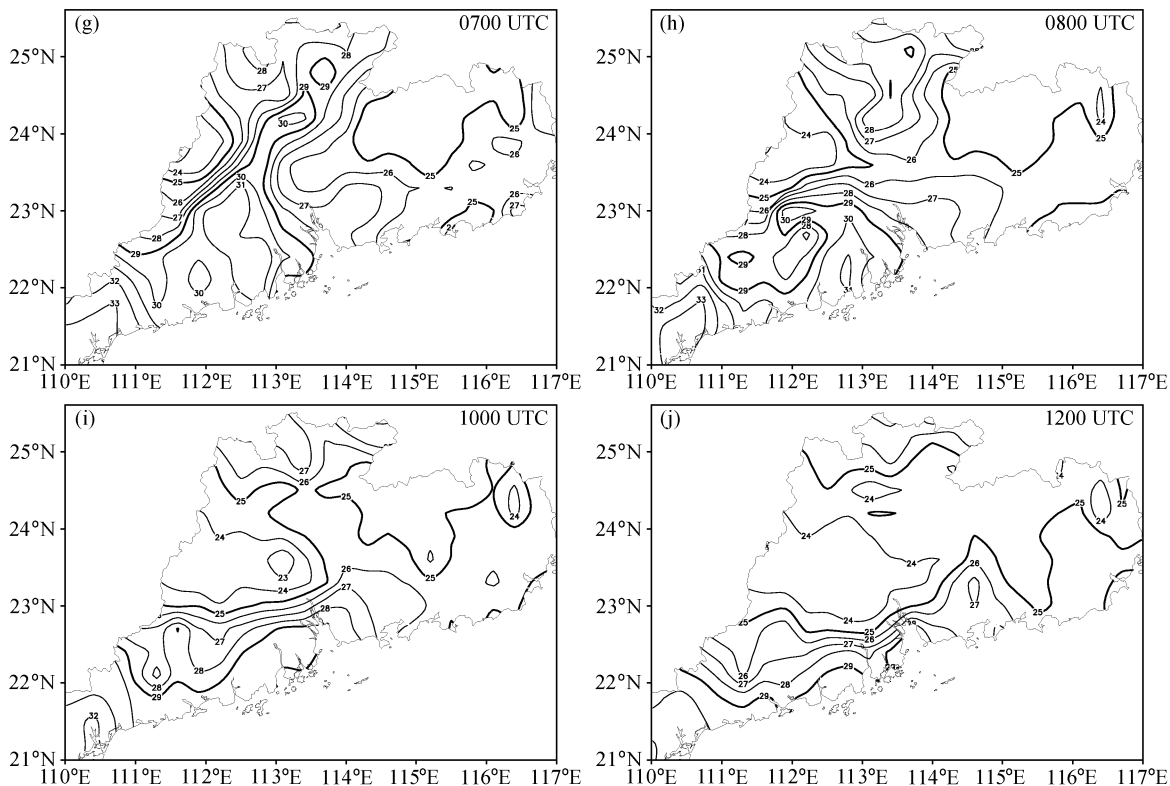


图 7 (续)

Fig. 7 (Continued)

值,从6月20日18时积分至6月22日00时。模拟结果每小时输出一次。为了确认模拟结果的可信程度,在利用数值模拟结果来对暴雨中尺度系统作再诊断前,本节对模拟输出的结果进行了一些检验,主要对实况和模拟的雨量、高低空环流场等进行了对比。

5.1 中低纬环流系统的模拟结果

由500 hPa位势高度场的模拟与实况对比可见(图10a、b),模式基本上模拟出了东北低涡、贝加尔湖高压的强度和位置,尽管强度偏弱。低纬的副热带高压系统模拟较好,5880 gpm范围的模拟比较理想。

由700 hPa位势高度场的模拟与实况对比可见(图11a、b),模拟的切变线和低空急流位置均与实况相对应,模拟效果较好。模拟的低涡的位置和强度也都比较好。

5.2 雨量模拟结果

图12a给出了24小时降水量的模拟与实况对比,可见,模式模拟出了一条东北东-西南西走向的雨带,与华南准静止锋(见图13)的走向有较好

的对应关系,这表明模式对大尺度雨带的模拟比较成功。但是由于本文研究重点在我国华南地区,故特别对华南地区的模拟雨量进行了检验。由图12a可见,实况中,华南地区主要存在三个降水中心,分别位于广西、广东和福建。从模拟的雨区和雨量看,广东和广西的雨区位置和强度都较接近于实况,而对福建来说,模拟的雨量大体相近,但降水中心位置偏南,相差50 km左右,这也许是由于武夷山地形处理方案的影响,今后应继续研究改进,更详细的原因有待进一步分析。由此可知,尽管初始场没有提供详尽的中尺度信息,但是模式在模拟过程中经过动力学的调整,仍然有可能比较成功地模拟出此次降水过程,尤其是对我们要重点讨论的广东地区暴雨的模拟更是如此。

还要特别提到的是,图12b还给出一个对比模拟试验的结果。这个试验与前一个试验的唯一区别在于:试验1(图12a)的初始场加入了常规的地面观测资料以及广东400多个自动站观测的地面资料,而试验2(图12b)的初始场未加入地面信息。从模拟结果可见,试验1对粤中、粤东南、桂东等

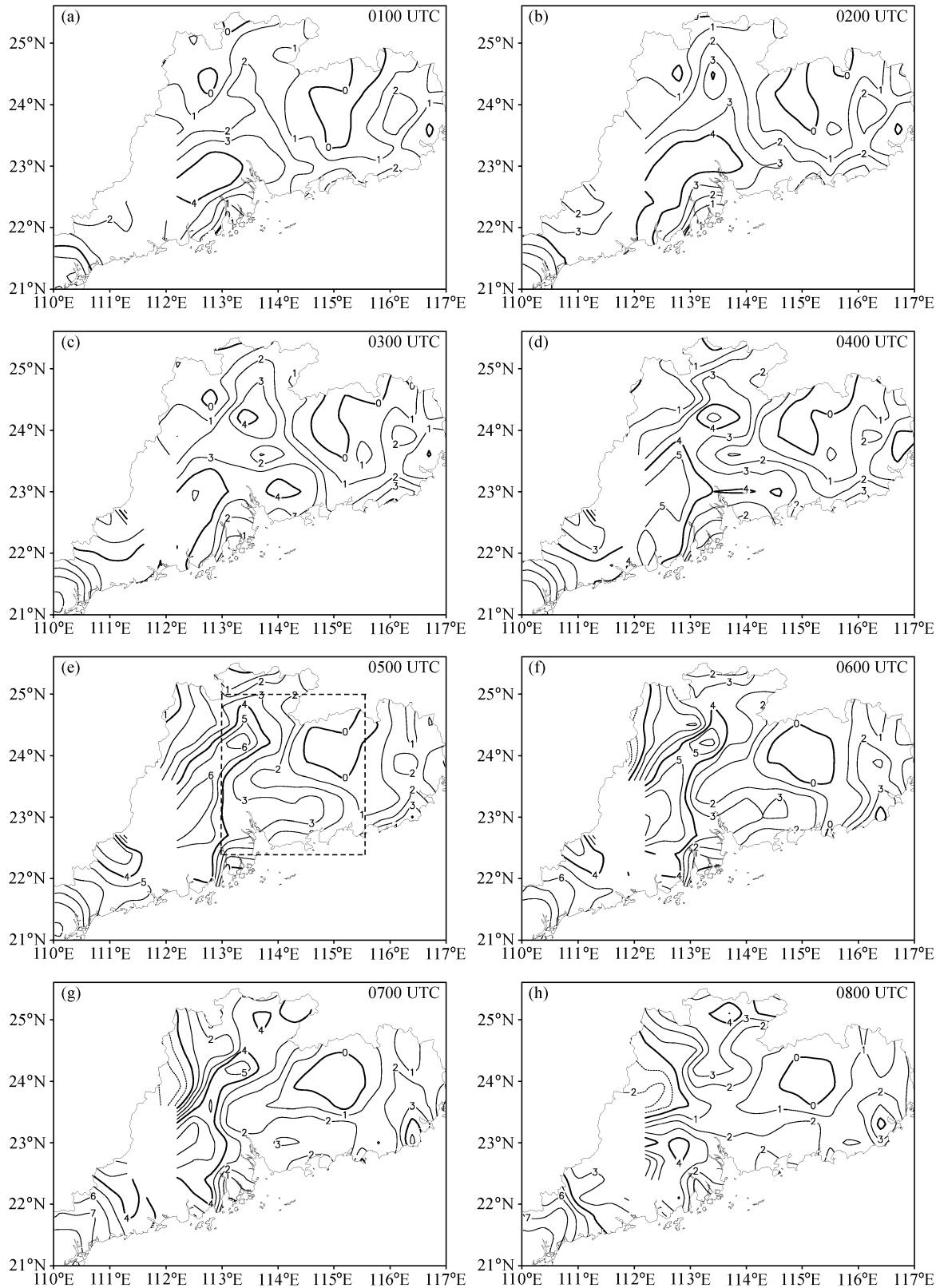


图 8 2005 年 6 月 21 日 01~08 时实测地面温度露点差分布 (单位: $^{\circ}\text{C}$)

Fig. 8 Observed surface dew - point depression ($^{\circ}\text{C}$) from 0100 UTC to 0800 UTC 21 Jun 2005

三片大暴雨区均可较好地复制。尽管,广东中部模拟的雨量较试验 2 稍为偏小,特别要强调的是实况中海丰附近的强降水中心在试验 1 中也能模拟出来,广西东部降水中心的模拟结果也有较大的改进,因此,就降水中心的位置和水平范围而言,试验 1 较试验 2 更接近实况。雨区位置的正确模拟与否是至关重要的,雨量的细微差别相对而言不是最

关键的。总的来说,试验 1 有更好的效果。由此可见,地面资料的采用对与中尺度系统的模拟结果的改进有帮助。这表明了地面资料包含有很有用的信息,地面状况与中尺度活动关系密切。

由于我们模拟和诊断研究的重点是 β 中尺度系统,为了考察模拟结果的可信程度,这里又进一步分析了细网格模拟输出的结果,即对每 6 小时的模拟降水和实况进行了对比。从 6 月 20 日 19 时开始,一共对比了 5 个时段。

由模拟和观测的 6 小时降水量对比(图 14)可见,主要的强降水区域基本上均能较为成功地模拟出来,与实况有较好的对应关系,但是模拟的降水强度比实况要偏弱,其原因有待于今后进一步分析研究。

6 暴雨中尺度系统数值模拟结果的再诊断

本文的研究方法是诊断-模拟-再诊断。以上的对比表明,模拟结果基本是可信的。因此,下面将有可能利用模拟结果,并结合前述地面观测等资料的分析对 β 中尺度系统的流场结构和可能发生机

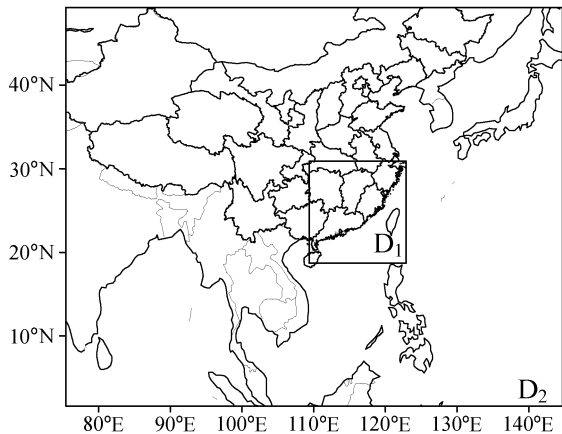


图 9 二重嵌套模拟区域 D_1 、 D_2
Fig. 9 Two-level nesting of simulation domains D_1 , D_2

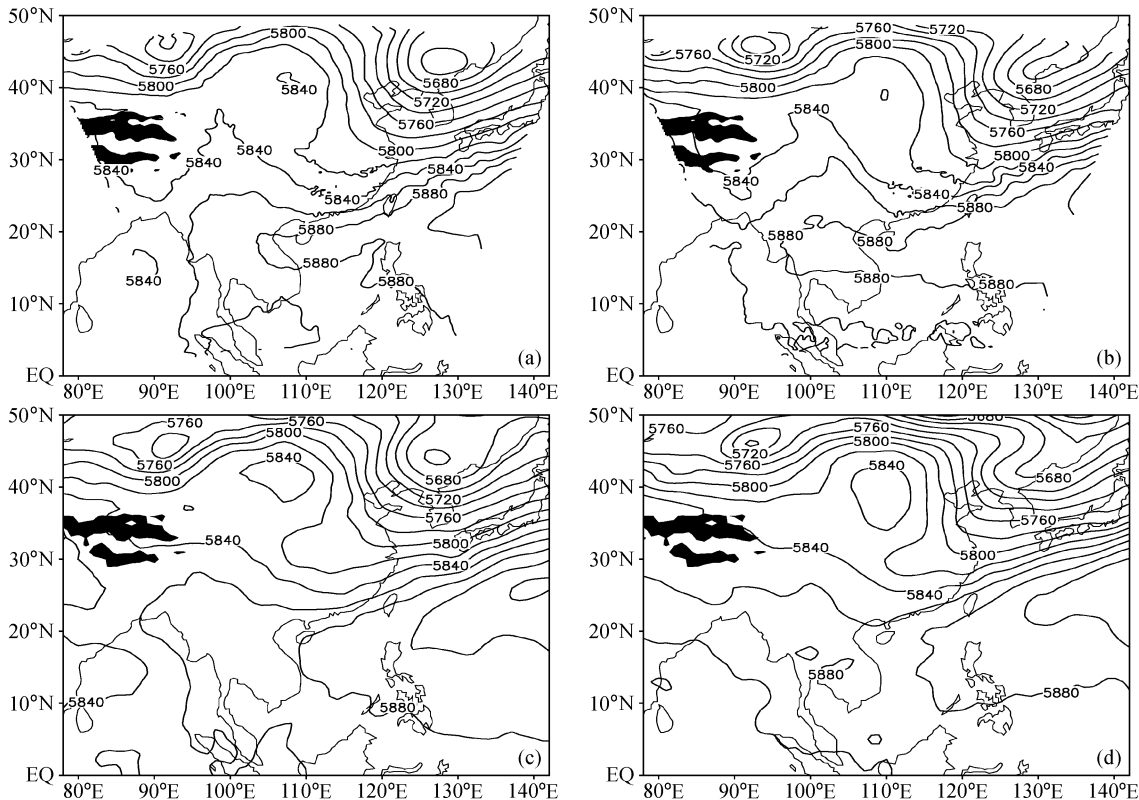


图 10 500 hPa 位势高度场的 (a、b) 模拟和 (c、d) 实况 (单位: gpm): (a、c) 21 日 12 时; (b、d) 22 日 00 时。黑色: 地形 ≥ 5000 m
Fig. 10 (a, b) Simulated and (c, d) observed geopotential height (gpm) at 500 hPa; (a, c) 1200 UTC 21 Jun; (b, d) 0000 UTC 22 Jun.
Black: terrain height ≥ 5000 m

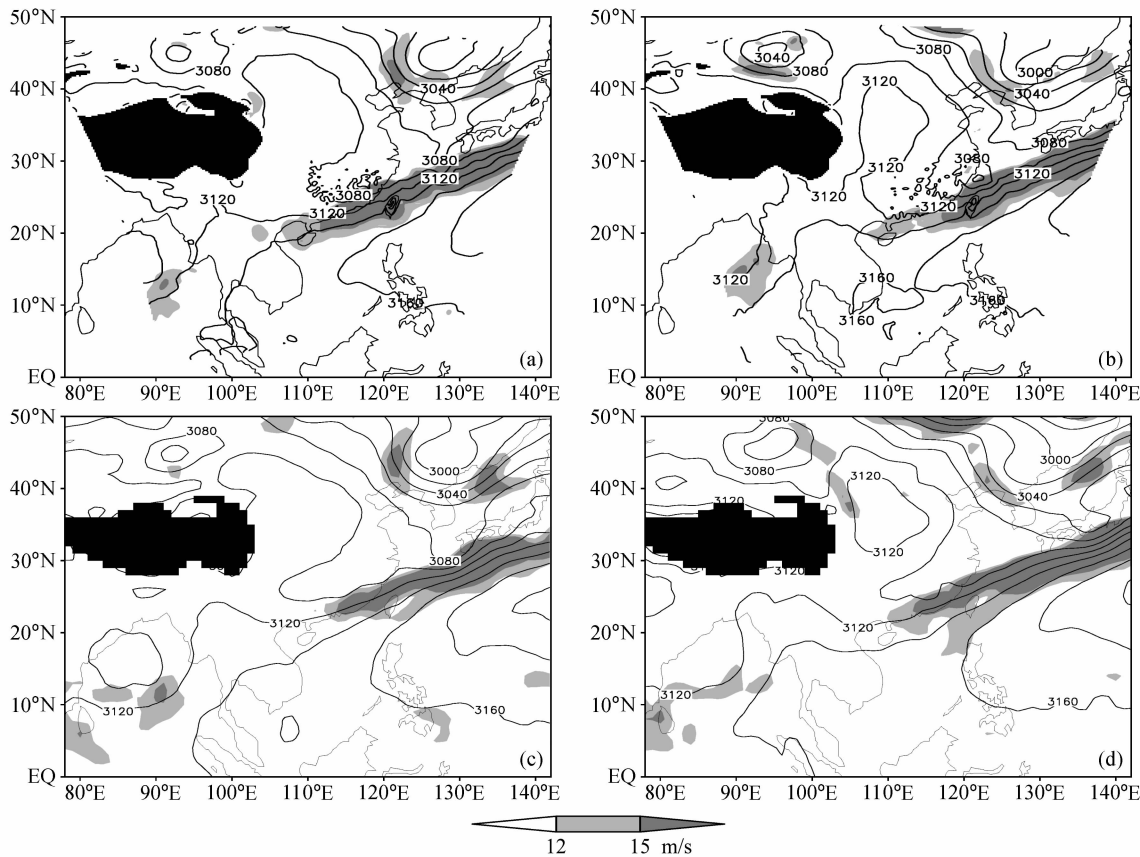


图 11 同图 10, 但为 700 hPa 位势高度场。黑色: 地形 ≥ 3000 m; 阴影: 风速 ≥ 12 m/s
Fig. 11 As in Fig. 10, except for the geopotential height at 700 hPa. Black; terrain ≥ 3000 m; shaded; wind speed ≥ 12 m/s

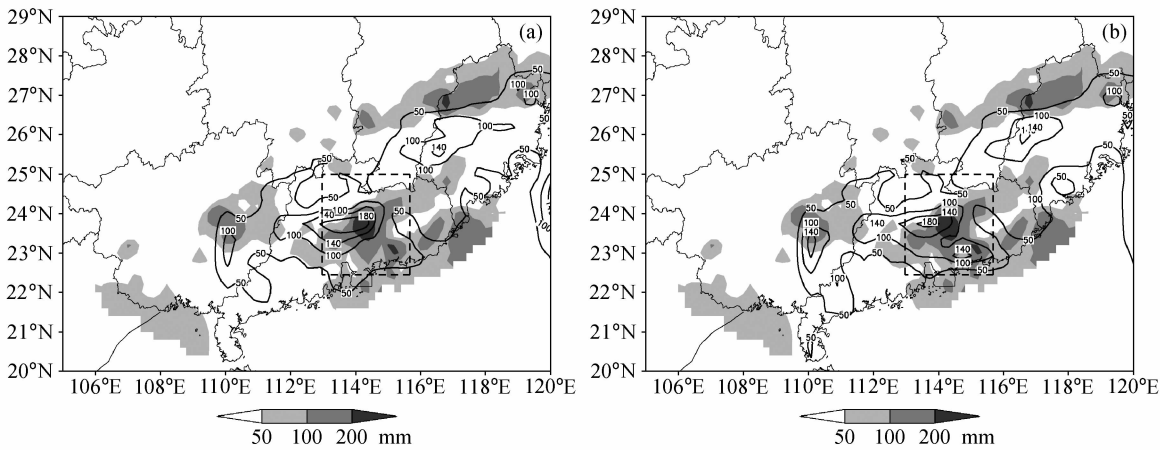


图 12 2005 年 6 月 21 日 00 时~22 日 00 时实况 (阴影) 与模拟 (等值线) 的 24 小时降水量分布 (单位: mm): (a) 初始场中加入了地面信息; (b) 初始场中未加入地面信息
Fig. 12 Observed (shade) and simulated (isoline) 24-hour precipitation (mm) from 0000 UTC 21 to 0000 UTC 22 Jun 2005; (a) The initial field contains surface information; (b) the initial field does not contain surface information

理作些研究。

对比每小时的降水实况分布与云团分布发现, 降水多发生于云团北侧和西北侧, 且对应地面的辐

散气流。分析广东整个强降水期间 β 中尺度对流云团的 地面距平风场, 发现也有同样的现象发生。

由图 15, 以模拟的 850 hPa 上雨水含量大于

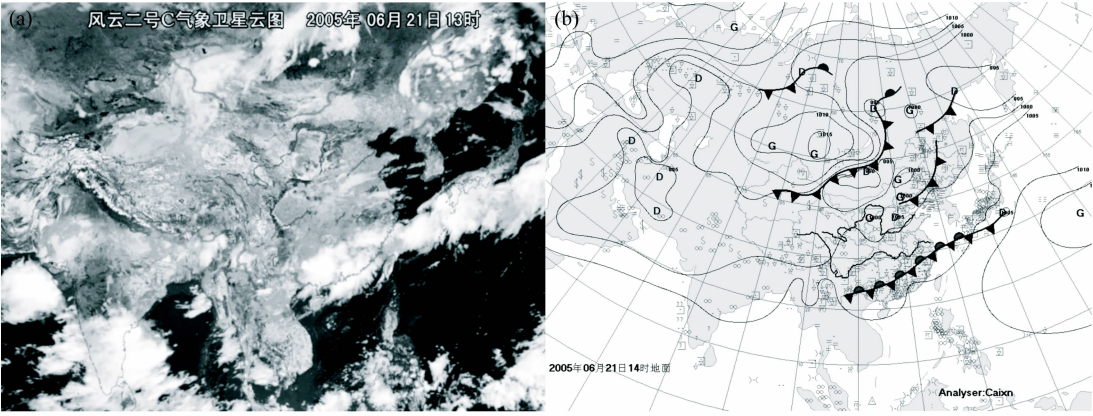


图 13 2005 年 6 月 21 日 (a) 05 时风云二号 C 星云图和 (b) 06 时地面天气图
Fig. 13 (a) FY-2C satellite infrared image at 0500 UTC 21 Jun 2005; (b) surface weather chart at 0600 UTC 21 Jun 2005

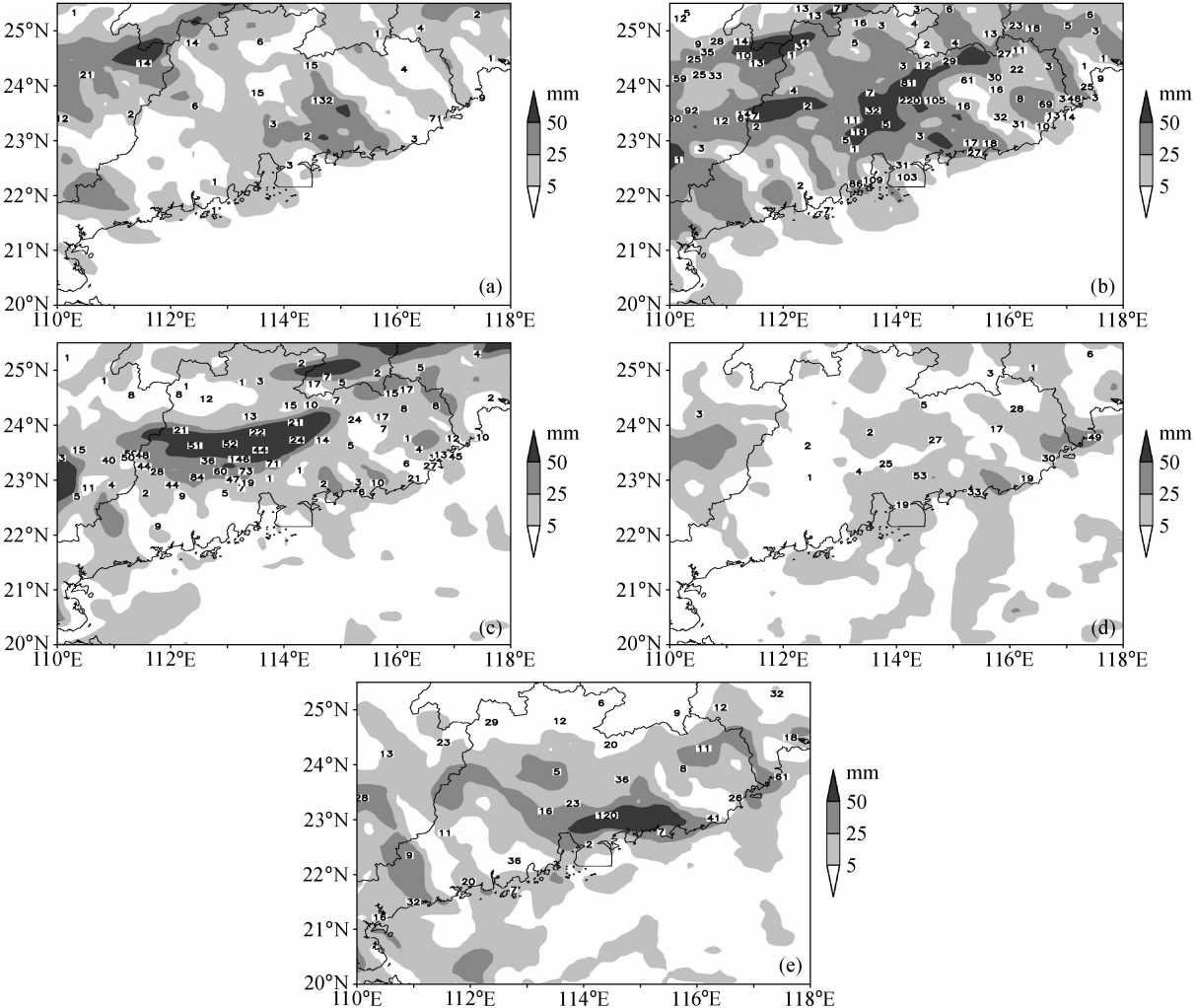


图 14 观测 (数字) 与模拟 (阴影) 的 6 小时雨量分布 (单位: mm): (a) 20 日 18 时~21 日 00 时; (b) 21 日 00 时~21 日 06 时; (c) 21 日 06 时~21 日 12 时; (d) 21 日 12 时~21 日 18 时; (e) 21 日 18 时~22 日 00 时
Fig. 14 Observed (digit) and simulated (shade) 6-hour precipitation (mm): (a) 1800 UTC 20 – 0000 UTC 21 Jun; (b) 0000 UTC 21 – 0600 UTC 21 Jun; (c) 0600 UTC 21 – 1200 UTC 21 Jun; (d) 1200 UTC 21 – 1800 UTC 21 Jun; (e) 1800 UTC 21 – 0000 UTC 22 Jun

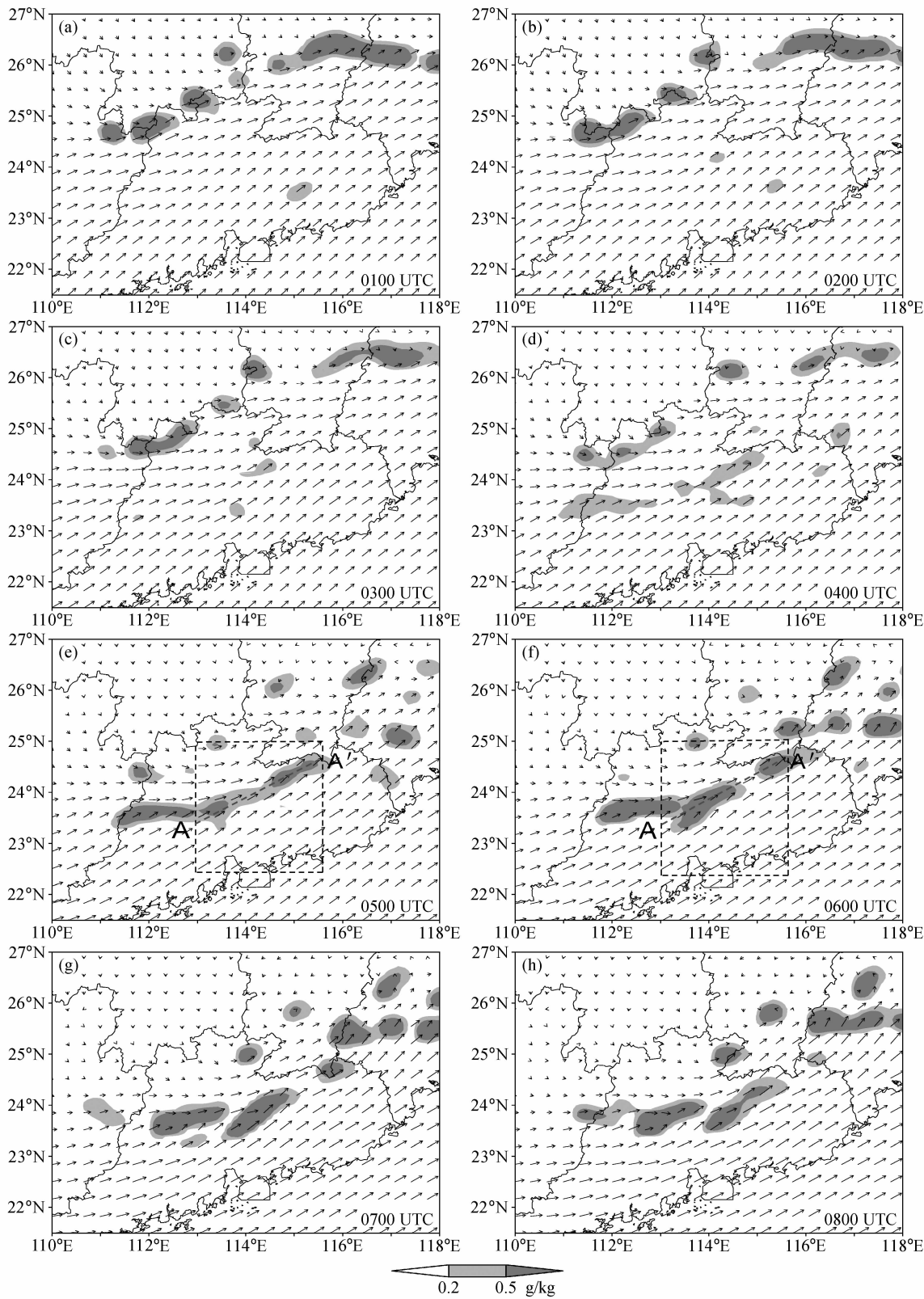


图 15 2005 年 6 月 21 日 01~08 时 850 hPa 模拟的流场分布 (细网格输出)。阴影：模拟的雨水含量大于 0.2 g/kg

Fig. 15 Simulated streamline at 850 hPa (fine grid output) from 0100 UTC to 0800 UTC 21 Jun 2005. Shaded: the area where simulated rain water content is greater than 0.2 g/kg

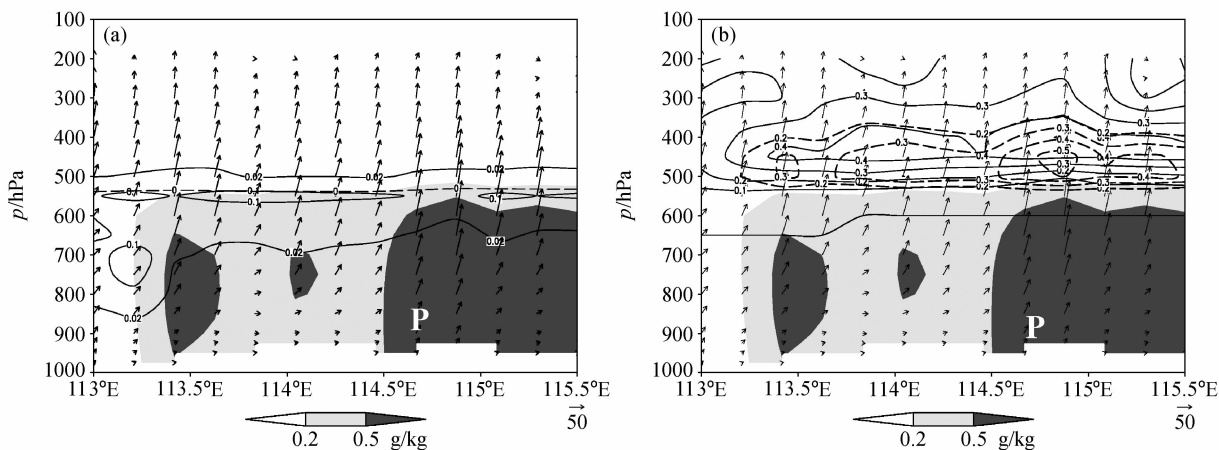


图 16 2005 年 6 月 21 日 06 时沿 AA' (见图 15e) 的剖面图 (细网格输出): (a) 实线: 云水含量 (单位: g/kg), 虚线: 0°C 层; (b) 实线: 冰含量 (单位: g/kg), 虚线: 雪含量 (单位: g/kg)。阴影: 雨水含量; 箭头: 沿 AA' 线的水平风场 (单位: m/s) 和垂直风场 (单位: cm/s) 的流场合成

Fig. 16 Cross sections along line AA' (Fig. 15e) at 0600 UTC 21 Jun 2005 (fine grid output): (a) Solid line: cloud water content (g/kg), dashed line: 0°C level; (b) solid line: ice content (g/kg), dashed line: snow content (g/kg). Shaded: rain water content; arrowhead: the composite of horizontal wind (m/s) along line AA' and vertical wind (cm/s)

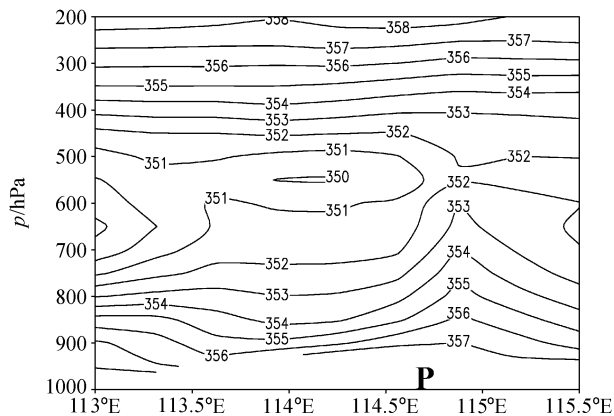


图 17 2005 年 6 月 21 日 05 时模拟的沿 AA' (见图 15e) 假相当位温剖面图 (细网格输出) (单位: K)

Fig. 17 Cross section of simulated pseudo-equivalent potential temperature (K) along line AA' (Fig. 15e) at 0500 UTC 21 Jun 2005 (fine grid output)

0.2 g/kg 的区域代表雨团, 其结果与 1 小时实际降水量的分布有较好的对应 (见图 3)。850 hPa 上一条西南风与西北风的辐合带逐渐南压, 广东境内的雨区也逐渐加强, 且呈现带状分布, 如 21 日 05 时 (图 15e) 和 06 时 (图 15f), 虚线方框内带状分布的两个雨水含量大值区分别对应了 1 小时降水图上 (图 3e 和图 3f) 的两个雨区, 不过在模拟结果中, 广东西部的降水中心偏强。沿图 15e 中带状分布雨区上的 AA' 线作一剖面, 分析该雨区中对应的中尺

度系统的垂直结构。

图 16 给出了沿 AA' (见图 15e) 的垂直环流及雨水的剖面图, 可以清楚地看到云水的分布, 云水含量在 0.02 g/kg 以上的区域主要在中层。其中在 113.5°E 附近和 114.5°E~115.5°E 的两个雨团 (云水含量在 0.5 g/kg 以上的区域) 与图 15e 中的雨团位置有很好的对应关系, 雨团高度达到 500 hPa, 雨团中心对应着强的上升运动区。雪和冰的分布中心也与雨团的位置有较好的对应。

为了探讨大气的稳定状况, 本文又沿着图 15e 中 AA' 作了假相当位温的垂直剖面图 (图 17)。由图 17 可见, 降水中心与地面向上伸展的暖舌相对应, 即降水区处于锋前暖区中相对更暖的区域。这也许是对流运动垂直交换的结果。

以上主要讨论了沿 AA' 的垂直剖面, 它们大体上是沿纬向的。经向上的分布如何? 为此, 垂直于 AA' 并过上述雨团 P 作了经向剖面 (图 18)。可以看到, 该雨团的南北向流场结构。雨团也均处于锋前暖区的相对最暖区, 且雨团区域对应气流的上升运动区, 另外在雨团的北侧有弱下沉补偿气流。

为了讨论中尺度雨团 P 与高低空流场分布的关系, 这里又对 21 日 05 时 200 hPa、850 hPa 的流场及散度场分布作了分析 (图 19a、b), 发现每个雨团所对应区域附近低层都存在强的风场辐合, 而高层都为强的风场辐散, 这种高低空的散度场分布

有利于低层垂直运动的加强和维持。其流场分布是：低层主要为西南风分布，在 24°N 附近，有一条偏北风与偏南风辐合的地带。200 hPa上 24°N 以南主要是偏西北风，而 24°N 以北以西南风为主，形成了图中区域整层辐散的形势。图4、5、15~19集中地从观测事实到模拟结果均表明在华南锋前暖区中辐合线上不断有 β 中尺度对流系统地此起彼伏、发生发展，引发了该区域强烈的暴雨。锋前暖区为何会存在辐合线？锋前暖区的辐合线北侧为何会有偏北风？这是否意味着华南准静止锋已不是严

格的温带意义上的锋面？辐合线南侧的偏南气流与南海季风有关，而处于锋前的偏北气流很有可能缘于低层有极浅薄的冷空气从边界层向南扩散，也可能是由密度流的作用所致。但更准确的解释和分析，还有待今后更深入的研究。

7 结论与讨论

本文利用较为稠密的地面观测资料、多普勒雷达资料、卫星资料及常规观测资料，对2005年6月一次华南前汛期锋前暖区（粤中地区）暴雨作了较为仔细的诊断分析与模拟研究。在这一暴雨过程中，广东、广西分别有两片暴雨区。由于缺少特殊的观测资料，对于广西暴雨，着重分析了它的中尺度系统发生发展的环境特征（夏茹娣等，2006）。在本研究中，由于获取到了雷达、自动站等观测资料，因而对广东（粤中）地区暴雨的特征与中尺度系统作更多的诊断与模拟研究，获得如下一些结果：

（1）深厚的切变线：在深厚切变线的有利大尺度背景下，广东中部有一系列 β 中尺度系统发生发展并引发了粤中地区持续性暴雨。该切变线上未见到有像梅雨锋上那样明显的中尺度涡旋（扰动）（张庆云等，2004）。

（2）地面辐合线及其上的扰动的作用：地面辐合线及其上的扰动，还有地面上较强的温度湿度对比的热力作用对 β 中尺度系统的触发有一定的作用。 β 中尺度系统的频发区，多见于地面风场东西向的辐合线、南北向的温度密集带和南北向的湿度

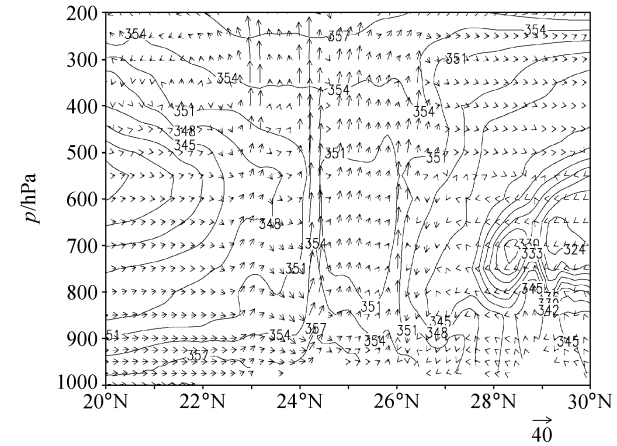


图18 2005年6月21日05时模拟的沿 114.8°E 的假相当位温分布（细网格输出）（单位：K）。箭头：经向风场（单位：m/s）和垂直风场（单位：cm/s）的合成
Fig. 18 Simulated pseudo-equivalent potential temperature (K) along 114.8°E at 0500 UTC 21 June 2005 (fine grid output) . Arrowhead: the composite of meridional wind (m/s) and vertical wind (cm/s)

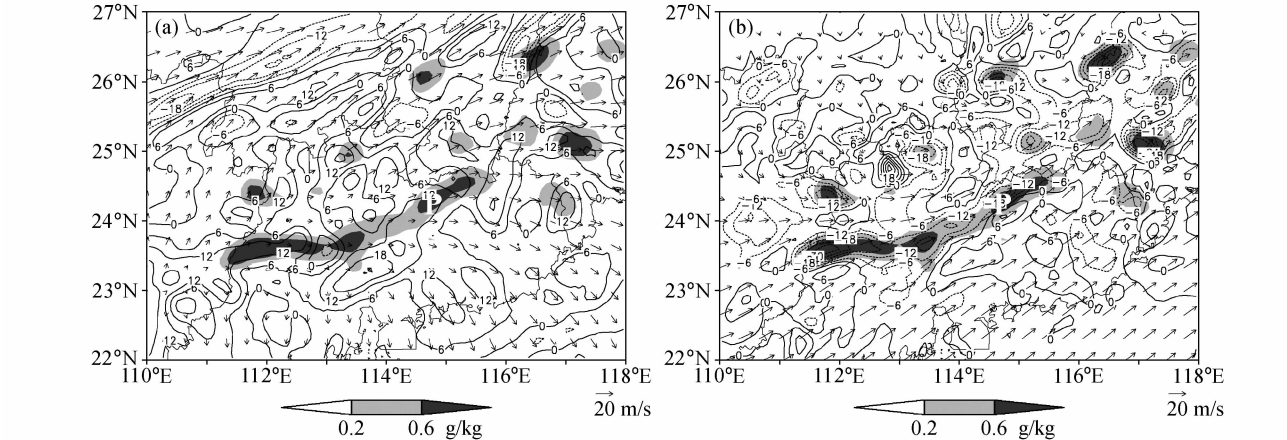


图19 2005年6月21日05时模拟的（a）200 hPa和（b）850 hPa的风场及散度场（等值线，单位： 10^{-4}s^{-1} ）。阴影表示850 hPa上雨水含量大于 0.2 g/kg 的区域（细网格输出）
Fig. 19 Simulated wind and divergence (isoline, units: 10^{-4}s^{-1}) at (a) 200 hPa and (b) 850 hPa at 0500 UTC 21 Jun 2005. Shaded area represents the area where rain water content is greater than 0.2 g/kg at 850 hPa (fine grid output)

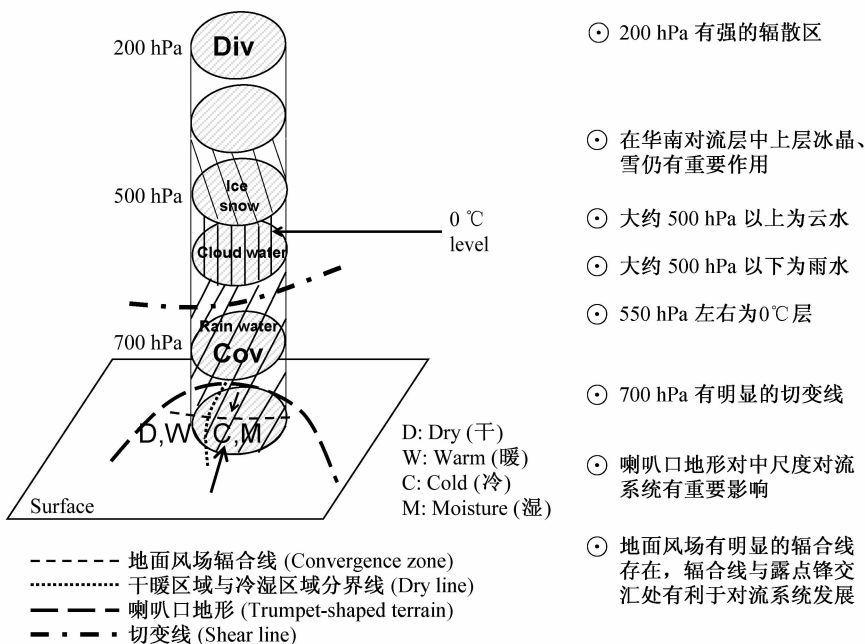


图 20 一类华南锋前暖区(粤中地区)中尺度对流系统及地形、地面风、温、湿分布影响的概念模型图

Fig. 20 Conceptual model of one category of mesoscale system in warm sector ahead of fronts in South China (the middle part of Guangdong Province) and influence of terrain, wind, temperature and moisture at surface on heavy rainfall

密集带相交汇的地区。这可能与边界层内的非均匀加热有一定的关系。另外，距平风场散度图表明， β 中尺度系统西侧的上升区与雨区有较好的对应关系，而 β 中尺度系统东侧与地面的辐散(下沉)区及冷区相对应。地形不仅热力作用明显，动力抬升影响也很明显。

(3) β 中尺度系统是暴雨的直接制造者。6 月 19 ~ 21 日期间大约有 22 个 β 中尺度系统活动，其生命史为 2 ~ 13 小时，鼎盛时期水平尺度为 50 km 至 350 km 不等。它们多自西北向东南移动，在粤中停滞发展。雷达分析表明， β 中尺度系统发展初期有很多结构更为细小的 γ 中尺度系统的活动，它们形成了带状扰动，逐渐发展合并而成为 β 中尺度系统。

(4) 同一暴雨过程粤桂两地静止锋前暖区风场上的对比：共同点是在低层来自海上的偏南气流均较明显，且两区皆有明显的辐合。但广西(西江流域)地区主要表现为季风扰动前沿的风速辐合，而不是一条辐合线，且多具移动性。而广东(粤中部分)表现为明显的风向辐合，有很清楚的辐合线维持。且辐合中心稳定少动，更利于强暴雨发生。

(5) 地面资料能提供有用的信息：过去的研究多着重于高空资料的分析。本研究表明，实际上除

了高空资料外，地面资料也有可能提供很多重要的信息。在地面辐合线上，粤中有一个个 β 中尺度系统发生，这些 β 中尺度系统可以由 1 小时雨量图、雷达回波、地面风场资料所揭示和证实。这启示我们应该认真考虑地面资料，并充分利用地面资料。

(6) 高分辨率的中尺度数值模式较细致地模拟出上述暴雨区及其中的中尺度系统：与梅雨锋不同的是，它们是一些较小的 β 中尺度系统的发展，而且流场上是一些中尺度辐合中心，并没有明显的涡旋(扰动)存在。对雨团 P 所对应的中尺度系统的垂直结构的模拟和再分析发现，其 0 °C 线在 550 hPa 附近，其云水和雨水分布状况等的模拟结果也较合理，与理论和实际分布大体相符，数值模拟较好地印证了由诊断分析所得的主要结果，且更细化了我们对中尺度系统的认识。低层存在风场的辐合，高层存在风场的辐散，这种高低空散度场配置非常有利于强降水的产生和维持。而且， β 中尺度雨团中心对应着上升运动，而在雨团北侧还有弱下沉气流的补偿。此外，降水区域对应着由地面向上伸展的暖舌和中性层结区域，即引起降水的 β 中尺度系统处于锋前暖区相对更暖的区域。

(7) 在上述结果的基础上，提出了一类华南锋

前暖区(粤中地区)暴雨中尺度对流系统及地形、地面要素场分布对其影响的概念模型(图 20)。这种模型最重要的特点是有像中尺度对流系统 P 等沿低层辐合线东西方向排列的结构,且考虑了地面影响以及地面风场、温度场、湿度场对暴雨的影响,其云水、雨水及冰晶等的分布合理。请参考图 20 中的文字,此处不再重复。

当然,要强调的是,本文所讨论的华南锋前暖区 β 中尺度系统仅限于广东 2005 年 6 月发生的暴雨,其结果的代表性如何还需要更多的个例研究来补充和修正,此外,对于 β 中尺度系统发生发展机理等理论问题还有更深入研究的必要(高守亭, 2007)。

致谢 感谢中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室王红艳博士在雷达资料质量控制方面给予的帮助!

参考文献 (References)

陈红, 赵思雄. 2000. 第一次全球大气研究计划试验期间华南前汛期暴雨过程及其环流特征的诊断分析 [J]. 大气科学, 24 (2): 238–252. Chen Hong, Zhao Sixiong. 2000. Heavy rainfalls in South China and related circulation during first GARP global experiment period [J]. Chinese Journal of Atmosphere Sciences (in Chinese), 24 (2): 238–252.

陈红, 赵思雄. 2004. 海峡两岸及邻近地区暴雨试验 (HUAMEX) 期间暴雨过程及环流特征研究 [J]. 大气科学, 28 (1): 32–47. Chen Hong, Zhao Sixiong. 2004. Heavy rainfalls in South China and related circulation during HUAMEX period [J]. Chinese Journal of Atmospheric Science (in Chinese), 28 (1): 32–47.

陈敏, 郑永光, 王洪庆, 等. 2005. 一次强降水过程的中尺度对流系统模拟研究 [J]. 气象学报, 3: 313–324. Chen Min, Zheng Yongguang, Wang Hongqing, et al. 2005. Numerical simulation study on MCS of a heavy rainfall process in South China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 3: 313–324.

高守亭. 2007. 大气中尺度运动动力学基础及预报方法 [M]. 北京: 气象出版社. Gao Shouting. 2007. Dynamic Basis and Forecasting Method of Atmospheric Mesoscale Motion (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press.

Grell G A, Dudhia J, Stauffer D R. 1994. A description of the fifth-generation Penn State/NCAR mesoscale model (MM5) [R]. NCAR Technical Note, NCAR/TN-398+STR.

黄士松, 李真光, 包澄澜, 等. 1986. 华南前汛期暴雨 [M]. 广州: 广东科技出版社. Huang Shisong, Li Zhenguang, Bao Chenglan, et al. 1986. Heavy Rainfalls in the Pre-flood Season in South China (in Chinese) [M]. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press.

刘淑媛, 孙健, 王洪庆, 等. 2007. 香港特大暴雨 β 中尺度线状对流

三维结构研究 [J]. 大气科学, 31 (2): 353–363. Liu Shuyuan, Sun Jian, Wang Hongqing, et al. 2007. Research on the three-dimensional structure of meso- β -scale convective systems in a heavy rain process in Hong Kong [J]. Chinese Journal of Atmospheric Science (in Chinese), 31 (2), 353–363.

蒙伟光, 李江南, 王安宇, 等. 2005. 凝结加热和地表通量对华南中尺度对流系统 (MCS) 发生发展的影响 [J]. 热带气象学报, 21 (4): 368–376. Meng Weiguang, Li Jiangnan, Wang Anyu, et al. 2005. Effects of condensation of heating and surface fluxes on the development of a South China mesoscale convective system (MCS) [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 21 (4): 368–376.

Sanders F, Doswell C A III. 1995. A case for detailed surface analysis [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 76 (4): 505–521.

孙建华, 赵思雄. 2002a. 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 [J]. 大气科学, 26 (4): 541–557. Sun Jianhua, Zhao Sixiong. 2002a. 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 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Science (in Chinese), 26 (4): 541–557.

孙建华, 赵思雄. 2002b. 华南“94·6”特大暴雨的中尺度对流系统及其环境场研究 II. 物理过程、环境场以及地形对中尺度对流系统的作用 [J]. 大气科学, 26 (5): 633–646. Sun Jianhua, Zhao Sixiong. 2002b. 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 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Science (in Chinese), 26 (5): 633–646.

陶诗言. 1980. 中国之暴雨 [M]. 北京: 科学出版社. Tao Shiyan. 1980. Heavy Rainstorm in China (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press.

王婷, 吴池胜, 冯瑞权. 2008. 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 [J]. 大气科学, 2008, 32 (1): 184–196. Wang Ting, Wu Chisheng, Fong Soi Kun. 2008. A numerical study of a mesoscale convective system associated with the heavy rain event over Guangdong province in June 2005 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (1): 184–196.

吴庆丽, 陈敏, 王洪庆, 等. 2002. 暴雨雨团中 β 尺度流场结构的数值模拟 [J]. 科学通报, 18: 1437–1441. Wu Qingli, Chen Min, Wang Hongqing, et al. 2002. Numerical simulation study on the structure of meso- β flow field of rain clusters [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 18: 1437–1441.

夏茹娣, 赵思雄, 孙建华, 等. 2006. 一次华南锋前暖区暴雨 β 中尺度系统的环境特征的分析研究 [J]. 大气科学, 30 (5): 988–1008. Xia Rudi, Zhao Sixiong, Sun Jianhua. 2006. A study of

- circumstances of meso- β -scale systems of strong heavy rainfall in warm sector ahead of fronts in South China [J]. Chinese Journal of Atmosphere Sciences (in Chinese), 30 (5): 988–1008.
- 熊文兵, 李江南, 姚才, 等. 2007. “05·6” 华南持续性暴雨的成因分析 [J]. 热带气象学报, 23 (1): 90–97. Xiong Wenbing, Li Jiangnan, Yao Cai, et al. 2007. Analyzing continuous rainstorm in southern China in June 2005 [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 23 (1): 90–97.
- 张庆红, 刘启汉, 王洪庆, 等. 2000. 华南梅雨锋上中尺度对流系统的数值模拟 [J]. 科学通报, 45 (18): 1988–1993. Zhang Qinghong, Liu Qihan, Wang Qinghong, et al. 2000. A numerical simulation study of mesoscale convective system associated with the Meiyu front in South China [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 45 (18): 1988–1993.
- 张庆云, 王会军, 林朝晖, 等. 2004. 中国天气气候异常成因研究——2003 年 [M]. 北京: 气象出版社. Zhang Qingyun, Wang Huijun, Lin Zhaohui, et al. 2004. The Mechanism of Abnormal Weather and Climate in China—2003 (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press.
- 张顺利, 陶诗言, 张庆云, 等. 2002. 长江中下游致洪暴雨的多尺度条件 [J]. 科学通报, 47 (6): 467–473. Zhang Shunli, Tao Shiyang, Zhang Qingyun, et al. 2002. Multiple scale conditions for flood-producing heavy rainfall in the middle and lower reaches of Changjiang River [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 47 (6): 467–473.
- Zhao Sixiong, Bei Naifang, Sun Jianhua. 2007. Mesoscale analysis of a heavy rainfall event over Hong Kong during a pre-rainy season in South China [J]. Advanced in Atmospheric Sciences, 24 (4): 555–572.
- 周海光. 2007. “6. 12” 华南局地暴雨中 β 和 γ 结构的双多普勒雷达反演试验 [J]. 热带气象学报, 23 (2): 117–125. Zhou Haiguang. 2007. Structure of meso- β and γ -scale on South China heavy rainfall on June 12–13, 2005 using dual-Doppler radar [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 23 (2): 117–125.
- 周秀骥, 薛纪善, 陶祖钰, 等. 2003. 98’ 华南暴雨科学试验研究 [M]. 北京: 气象出版社. Zhou Xiujie, Xue Jishan, Tao Zuyun, et al. 2003. Study of Experiment of Heavy Rainfall in South China in 1998 (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press.