

2002 年 6 月 20 ~ 24 日梅雨锋中尺度 对流系统发生发展分析*

孙建华 张小玲 齐琳琳 张高英 赵思雄 陶诗言

(中国科学院大气物理研究所, 北京, 100029)

摘 要

利用“973”中国暴雨试验获得的加密观测资料,首先对 2002 年 6 月 20 ~ 24 日发生在长江中下游地区的中尺度对流系统发生发展进行了分析,有 7 个尺度较大的中尺度对流系统在长江中下游地区发展,造成了大范围的强降雨。然后针对安徽南部发生的中尺度对流系统发生发展过程进行了详细分析:MCS 生成于切变线南侧的西南暖湿气流中,其源地是大别山区和大别山与九华山之间的长江河谷地带;低层西南风的水汽输送是安徽南部对流不稳定和对流有效位能积聚的主要原因;在降雨发生前整层可降水量有明显增加,开始降雨后则逐渐减小。雷达探测的回波显示中尺度对流系统中有中尺度系统的活动,中尺度系统与整个中尺度对流系统的移动方向不一致;中尺度对流系统中的带状回波有地面中尺度辐合线配合,对流带随地面的中尺度辐合线移动,对流带中的对流单体沿辐合带移动。

关键词: 中尺度对流系统, GPS, 风廓线, 中尺度辐合线。

1 引 言

中尺度对流系统(MCS)是暴雨的直接影响系统。国外对 MCS 的研究主要集中在中尺度对流辐合体(MCC), Maddox^[1]定义 MCC 是一类尺度较大、强度较强的 MCS。Miller 和 Fritsch^[2]也曾对西太平洋地区的 MCC 进行了分析,但他们的普查结果认为中国东部的 MCC 比较少。马禹等^[3]对中国及邻近地区 1993 ~ 1995 年 MCSs 的普查结果表明,中国的 MCS 主要集中在西南地区 and 黄河、长江中下游地区。Liang 等^[4]研究了非洲、澳大利亚、中国、南美洲和美国 MCCs 的平均生成环境, MCCs 初生在明显的斜压区内,以对流层低层垂直风强切变和高的对流有效位能(CAPE)为特征。1991 年中国江淮洪涝和 1998 年长江洪涝的强降雨大部分是由 MCS 造成的,特别是 1998 年 7 月 20 ~ 21 日湖北武汉和黄石的特大暴雨是由梅雨锋上局地突发的 MCS 造成^[5,6], 1991 年造成暴雨的 MCS 大部分生成于低涡切变线或梅雨锋上^[7]。过去对中国

MCS 的分析主要采用常规资料讨论他们产生的环境场,对 MCS 结构的分析多采用模式的模拟结果^[8~10]。

2002 年 6 ~ 7 月“973”项目中国暴雨外场试验(CHeRES)在长江中下游地区进行,试验分中游和下游两个区,中游试验区主要包括湖南北部、湖北大部分地区、下游试验区包括安徽大部分地区、江苏南部和浙江北部地区。梅雨期中游、下游试验区分别进行了 6,4 次加密观测。2002 年观测系统包括:地面观测站 118 个(基准站 18 个,遥测站 26 个,加密站 74 个),探空站 15 个,风廓线仪 2 部,边界层观测站 1 个。多普勒雷达 9 部(宜昌、荆州、合肥、马鞍山、无为、上海、长沙、常德、南昌)。此外,还有杭州数字化雷达 1 部。

2002 年的梅雨期有两段:第 1 段 6 月 16 日 ~ 7 月 2 日,第 2 段 7 月 16 ~ 24 日。第 1 段中 6 月 20 ~ 24 日梅雨锋持续维持在 30°N 以北的长江流域,先后有几个较强的 MCS 在中下游地区发生发展,造成了大范围强降雨。本文将利用该试验的观测资料

* 初稿时间:2003 年 6 月 11 日;修改稿时间:2003 年 8 月 10 日。

资助课题:国家重点基础研究发展规划项目“我国重大灾害天气机理和预测理论研究”(G1998040900)、中国科学院知识创新工程重要方向项目 KZCX3-SW-213 和中国科学院大气物理研究所创新知识工程。

首先对 6 月 20 ~ 24 日发生在长江中下游地区的 MCSs 发生发展的情况进行分析,然后,针对 6 月 20 ~ 21 日在安徽南部发生的 MCS 进行较深入的分析,特别是利用合肥的雷达资料对其结构进行研究,以期对梅雨期间 MCS 的结构获得更多新的认识。

2 中尺度对流系统的活动

2002 年 6 月 20 ~ 24 日有几个较强的 和 中尺度对流系统发生发展,造成了大范围的强降水。20 ~ 24 日的中尺度对流系统活动情况见表 1。6 月 20 ~ 21 日安徽南部有一个较强的对流系统发展 (MCS1),该系统的生命史约 1 d,在安徽南部、江苏南部造成了大范围的降水,最强的降水出现在黄山。MCS2 在湖南北部生成,穿过湖北省,达到湖北北

部、河南南部时形成一个低涡,低涡很快发展东移,在低压后部 22 日 12 时在南阳盆地又有一中尺度对流系统生成 (MCS3),此对流云生成后迅速发展向东北移动,其强度超过 MCS2。23 和 24 日在中游和下游试验区又有较强的对流发生,但这些局地中尺度对流系统影响范围小。图 1 给出了 20 ~ 24 日主要的中尺度对流系统 (MCS 1, 2, 3 和 4) 的移动路径,这几个系统影响范围最大的是 MCS2,影响范围最小的是 MCS4。发展最强的是 MCS3,其最强盛时, TBB 温度低于 -70 的面积大约有 $500 \text{ km} \times 300 \text{ km}$ 。

表 1 中列出的 MCS 的生命史都在 10 h 以上,生命史长的能维持 24 h 以上,它们在发展初期属于 MCS, MCS, 而成熟期都达到了 MCS 的尺度。

表 1 6 月 20 ~ 24 日的中尺度对流系统活动情况 (时间为北京时,下同)

Table 1 The activities of MCSs during 20 - 24 June 2002

名称	初生时间	消亡时间	初生地点	消亡地点	最强盛时的范围	是否移动
MCS1	20 日 20 时	21 日 20 时	31.5°N, 116°E 31°N, 118°E (安徽南部)	江苏南部	600 km × 500 km	两个系统合并发展 东移, 21 日 09 时分裂
MCS2	21 日 14 时	22 日 15 时	29.5°N, 111°E (湖南北部)	安徽、江苏、山东	500 km × 500 km	东北移
MCS3	22 日 12 时	23 日 11 时	32.5°N, 112.5°E (湖北、河南交界处)	安徽、江苏	500 km × 300 km	东北移动
MCS4	23 日 16 时		33°N, 119.5°E 江苏中部	23 日 20 时合并东移影 响安徽、江苏南部、上海	500 km × 300 km	东移出海
MCS5	23 日 16 时		31.5°N, 118°E (安徽南部)	23 日 20 时合并东移影 响安徽、江苏南部、上海	500 km × 300 km	东移出海
MCS6	23 日 20 时	24 日 06 时	29°N, 109°E	湖北西南部	300 km × 200 km	东北移动
MCS7	24 日 04 时	24 日 12 时	29°N, 109°E	湖北西南部	300 km × 200 km	东北移动

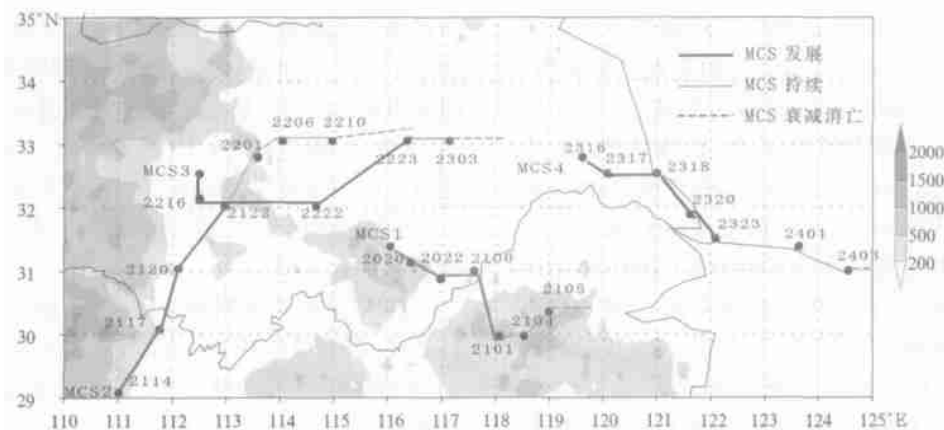


图 1 2002 年 6 月 20 ~ 24 日中尺度对流系统 MCS1 ~ 4 的活动示意图

(图中数字表示时间, 2020 表示 20 日 20 时)

Fig. 1 The pathway of MCS1 - 4 during 20 - 24 June 2002

(The number indicates time, for example, 2020 is 20 BST 20 June)

表1中列出的MCS基本达到了Maddox^[1]定义的MCC标准,但个别个例的偏心率没有达到的标准,例如MCS2,但中国学者在研究中国的MCC时曾对Maddox的定义进行了一些修改,有些研究将偏心率改小^[3],因此,2002年6月20~24长江中下游地区的MCS是属于MCC,本文中引用马禹等^[3]的用法,把尺度在200 km的MCS称为MCS。马禹等^[3]的普查结果MCS和MCS的生命史一般分别为7~8 h和5~6 h,生命史较长的MCS能维持20~28 h,而MCS生命史较长的也能维持10~16 h。2002年6月20~24日在长江中下游地区发展的MCS的生命史、尺度与马禹等的普查结果相似,

MCS1, MCS2 和 MCS3 都是生命史比较长的MCS。长江中下游地区是MCS多发区,该地区的环境条件有利于MCS发展为MCS^[3]。20~24日的24 h降雨量(图2)显示,这几个MCS在长江中下游地区造成了大范围的强降雨,20日的强降雨主要发生在安徽南部,由MCS1造成,21日的降雨相对较弱,22日的强降雨范围最大,主要由MCS2和MCS3造成,23日安徽、江苏的强降雨由MCS4和MCS5造成。以上分析表明,6月20~24日强降雨过程基本由一些MCS造成。本文主要针对MCS1作详细的分析,对MCS2和MCS3的分析和模拟将另文研究。

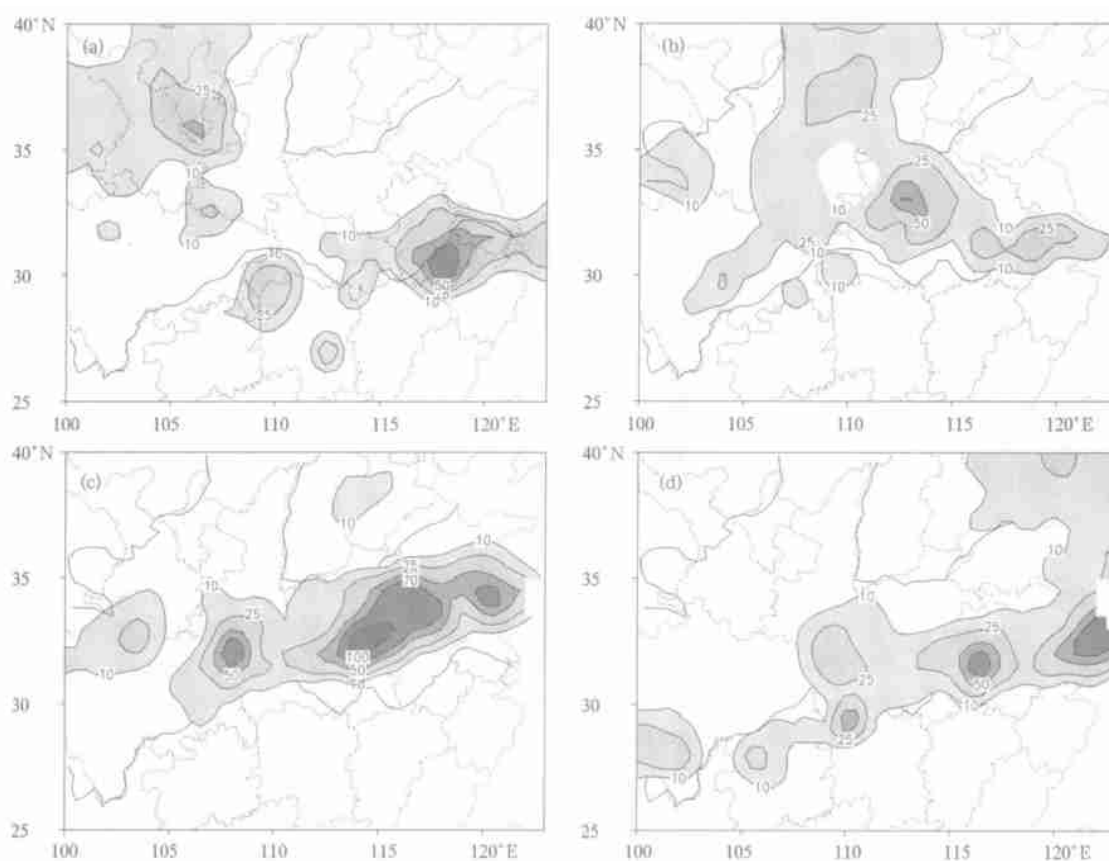


图2 2002年6月20~24日的降雨量

(a. 20日08时~21日08时, b. 21日08时~22日08时, c. 22日08时~23日08时, d. 23日08时~24日08时, 单位:mm)

Fig. 2 The daily precipitation in mm of 20 - 24 June 2002 (a) 08 BST 20 - 08 BST 21 ,

(b) 08 BST 21 - 08 BST 22 , (c) 08 BST 22 - 08 BST 23 , (d) 08 BST 23 - 08 BST 24

3 安徽南部对流系统(MCS1)发生的背景

2002年6月20~21日,梅雨锋维持在30°N以北的长江流域,这使得这些地区的对流活动异常活

跃。6月20日08时,500 hPa中纬度中国东部地区(110°E)处于槽后脊前,东北地区有一低涡,副高主体位于海上(图略)。21日,东部沿海地区低槽东移,东部地区被高压脊控制,高原东侧有一低槽东移,副高也开始伸向大陆,中国东部的大部分地区由

西北风转为西南风控制(图略)。对应低层 850 hPa 上,20,21 日副高北侧的西南风与华北地区高压南侧的东风之间的切变线正好位于 31°N 的长江流域(图略)上,20,21 日切变线上有强对流活动,在中下游试验区都产生较强的降水。

根据以上分析,图 3 综合 MCS1 发生时的天气尺度背景条件,MCS1 生成在梅雨锋南侧的高值区的轴线附近,这里正好是西风带南部边界与西太平洋副热带高压脊线的西北侧西南气流交汇处,处于 1000~500 hPa 等厚度线散开区,在这个散开区,沿着气流方向出现很强的非地转风。500 hPa 的正涡度区正好位于河南西部、安徽、江苏南部,这里也是低空急流出口区的左侧。低空急流的强水汽输送主要在 MCS 的南西南边界,在 MCS 的西南侧生成

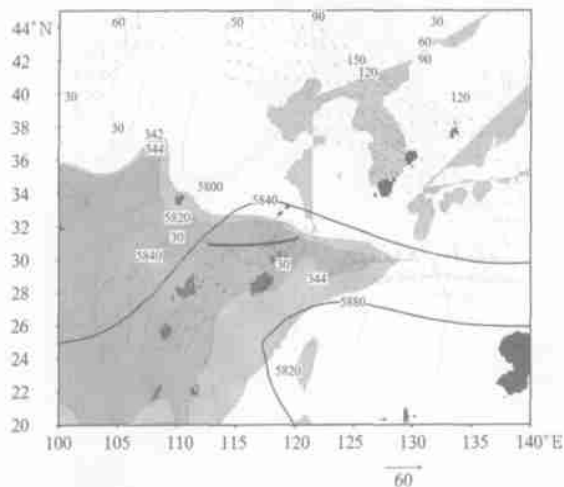


图 3 2002 年 6 月 21 日 08 时中尺度 MCS 发生时的天气形势合成分布

(浅色阴影区是 850 hPa θ 342 K;深色阴影区 TBB -50 ,表示 MCS 活动区;对应时间的风速 40 m/s 表示 200 hPa 面上的高空急流(箭矢线),风速 16 m/s 表示 900 hPa 面上的低空急流(风标);粗实线分别代表 21 日 08 时 500 hPa 等位势高度线(gpm);短虚线为对应时间的 1000~500 hPa 的等厚度线(gpm);长虚线为 500 hPa 上的等涡度线(10^{-5} s^{-1});粗实线表示 850 hPa 切变线)

Fig. 3 Conceptual synoptic plot of MCS at 08 BST 21 June 2002, shallow shaded is θ 342 K on 850 hPa and deep shaded is TBB -50 . The arrows are wind speed exceeding 40 m/s on 200 hPa and barbs represents wind speed exceeding 16 m/s on 900 hPa. The thick solid lines are geopotential height (gpm) on 500 hPa. The short-dashed lines are thickness (gpm) of 1000 - 500 hPa. The long dashed lines are vorticity (10^{-5} s^{-1}) on 500 hPa. Bold solid line presents shear line on 850 hPa

新的对流单体。分析表明 6 月 21 日的大尺度环流形势有利于四川东部、河南南部、湖北北部和安徽的对流发生、发展,安徽南部 500 hPa 上有一个正涡度中心。

天气尺度的分析表明长江中下游地区 6 月 21 日是有利于对流发展的区域,MCS 20 日 22 时和 21 日 13 时两次生成于大别山东侧,以及大别山和九华山之间的长江河谷地区,而 1991 年造成江淮洪涝的中尺度对流系统主要产生于武汉和大别山^[7]。这表明除了与有利的大尺度条件有关外,可能还与那里的特殊地理条件有关。我们现有的观测资料尚难进行地形影响的分析,下面的分析主要是采用试验加密观测资料对 MCS1 发生发展过程的中尺度特征进行分析。

4 安徽南部对流云(MCS1)的发生发展及机理分析

4.1 对流系统的发生发展及降雨量

MCS1 于 20 日 20 时在安徽中、南部(大别山附近)生成(图 4),由在 31.5°N, 116°E;31°N, 118°E 生成的两个对流体合并发展,21 日 02 时系统发展到中尺度,TBB 出现 -70 低温中心,并开始出现弱降雨,02~08 时的每小时降雨量维持在 10 mm 以上,系统处于成熟期。21 日 09 时分裂后逐渐减弱,强对流主要维持在安徽南部,21 日 13 时在 31.5°N, 116°E 的大别山区又有一个中尺度系统生成,21 日 16 时与原减弱的云团合并,在安徽南部发展到 21 日 20 时基本减弱消失。从每小时降雨量与 TBB 演变看,在对流发展的初期有局地的降水发生,之后,在对流云的后部(云团的左侧)有较大范围的降水,并逐渐增强,其中 05~08 时中心降雨量都在 20 mm 以上,系统减弱后还有较强降雨发生。从此次 MCS 发展的过程看,MCS 在发展和强盛期(21 日 02~12 时),降水主要位于云团的后部,云团后部也是 TBB 等值线密集区,TBB 等值线的密集处是未来冷云盖的扩展方向,消散中的对流体其边缘的 TBB 等值线较稀^[11],这与大尺度分析结果低空急流的强水汽输送主要在 MCS 的西南边界,使新的对流单体在 MCS 的后部(西侧)生成一致。

由于“973”资料组收集到的有每小时降雨量资料的站点较少,而常规 6 h 观测降水的站点较多,因此更能显示对流系统产生降雨的范围,21 日 02 日之前降水在安徽南部,6 h 降水量最强为 20 mm,

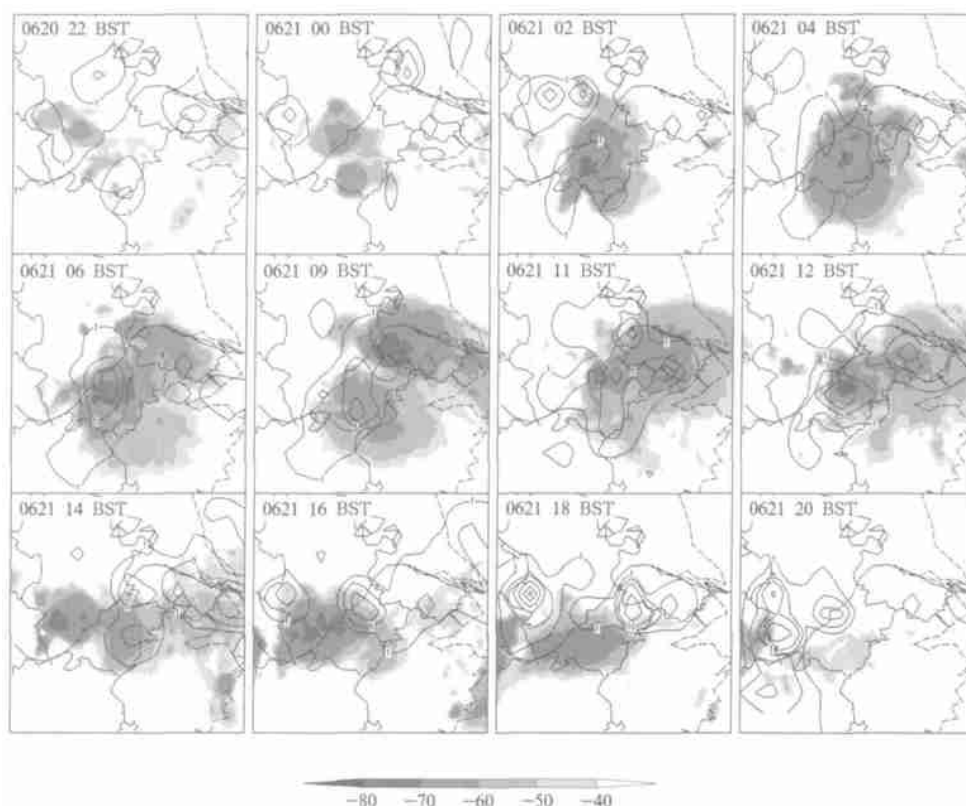


图4 2002年6月20日22时~21日20时TBB
(阴影,单位:)和每小时雨量(等值线间隔为:1,5,10,20,30,40,50mm)
Fig.4 Hourly precipitation in mm (solid line) and TBB in
(shaded) from 22 BST 20 to 20 BST 21 June 2002

02~14时降水在安徽、江苏南部(图略),主要是第1个系统发展东移造成,14~20时的降水发生在安徽南部是第2个系统发展造成。

MCS1造成的强降水主要发生在安徽、江苏南部,其中黄山21日00~12时有连续的降水过程(图略),降水过程是MCS1造成,最强的降水在04时达25mm。在这个降水过程中,也有两个峰值,04,08时降水量分别为25,17mm,可能有两个MCS影响黄山,由于缺乏雷达观测资料,现在还无法确认是否有两个MCS影响黄山。该站20~21日的降雨都有气压扰动,降雨时有低压扰动配合;温度场没有明显的扰动配合,由于露点缺测较多,无法进行分析;黄山20~21日一直是偏西风。霍山(31°24'N,116°19'E)为对流云初生地(图5),第1个对流云生成时,该站20日18~21时有连续降水,由于系统很快东移,降水强度较弱(小于5mm)。第2个对流云生成后,由于系统在原地发展,该站21日12~17时产生了连续强降水,有3h超过20mm,最强达40mm。地面有低压扰动(1~2hPa)与两次降

雨过程配合。两次降雨地面都是偏东风,并且偏东风早于降雨2h左右,这与该站的地理位置有关,虽然霍山站的海拔不高,但它位于大别山东侧的迎风坡,偏东风沿大别山的东坡爬升可能触发对流。温度的日变化比较明显,在12时达到最高温度。

以上分析表明,MCS1的生命史大约1d,先后有两个中尺度对流系统生成于大别山区,第1个云团在大别山造成的降水不大,很快向东南移动,在九华山附近发展加强,造成了较强的降水,黄山站连续12h都有降水。第2个云团生成后在原地维持了较长时间,霍山产生了连续5h的降水。大别山山区对流多发可能是夏季偏东风沿大别山的东坡爬升触发的。

4.2 MCS1发生发展过程的条件

持续的水汽输送是对流发展和持续的必要条件之一,整层可降水量和低层风变化在一定程度上也可反映水汽的输送情况。“973”暴雨试验在安徽设有6个GPS观测站:肥西、寿县、桐城、无为、芜湖和滁州,GPS可以得到每30min一次的大气整层可降

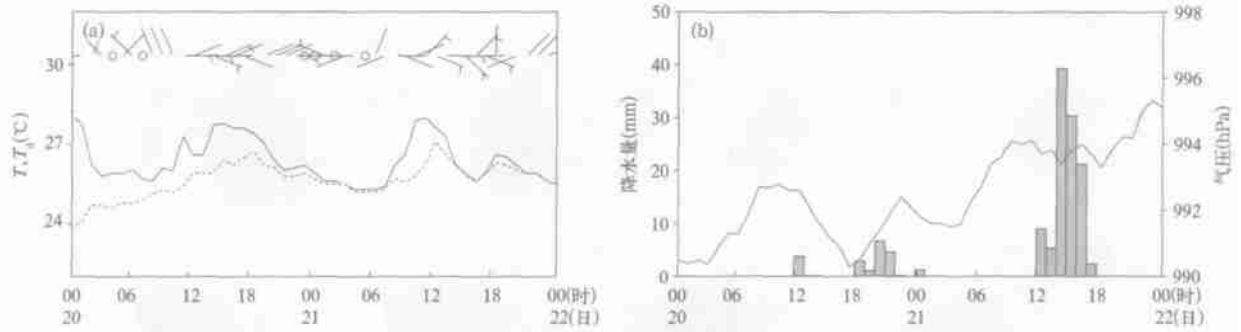


图5 霍山6月20日00时~22日00时(a) 温度(实线,单位: $^{\circ}\text{C}$)、露点(虚点线)和 wind 场(单位: m/s); (b) 每小时降雨量(直方)和地面气压(曲线)

Fig. 5 (a) Temperature in $^{\circ}\text{C}$ (solid line), dew point temperature in $^{\circ}\text{C}$ (dashed line) and wind vector in m/s , (b) Hourly precipitation in mm (bar, left coordinate) and surface pressure in hPa (solid line, right coordinate), at Huoshan station from 00 BST 20 to 00 BST 22 June 2002

水量,其他的观测手段目前都不能到达这样高时间分辨率的资料。肥西($31^{\circ}44'\text{N}$, $117^{\circ}08'\text{E}$)设有风廓线观测站,观测距地面 200 至 5500 m 风速、风向,风廓线观测的低层风场的时间和垂直分辨率比常规探空甚至加密探空观测要高得多。虽然肥西有 GPS 和风廓线观测,但在此次过程中降水较小,因此除了肥西的 GPS 观测,还给出了寿县的 GPS 观测。肥西大气中整层可降水量在 20 日 12 时~22 日 00 时有两次增长过程(图 6a),20 日 23 时和 21 日 15 时都到达 75 mm,这两次可降水量的增长都在两个对流系统发展之前 2~3 h,达到峰值后,降水开始之后,可降水量迅速减少。20 日 11~15 时的降水开始后可降水量没有减少,是由于当时较强的水汽输送造成的。寿县在 21 日 02~11 时连续降雨(图 6b),最强达到每小时 12 mm,降雨发生前 2 h 其整层可降雨量也达到 72 mm,降水开始后可降水量迅速减少。肥西和寿县的整层可降雨量在本地降雨开始前都有明显增长。GPS 资料的空间分辨率目前虽然有限,但它的时间分辨率却较高,在降雨前整层可降水量明显增加,可以用于较小尺度降水的预测。

由于风廓线仪的时间分辨率和垂直分辨率较高,可以有效地监测低空气流的演变,分析低层风场随时间的演变,而探空资料就不能分析这种演变。对应这次过程的发展,肥西风廓线资料(图 6c)显示 3000 m 以下盛行风向是西风或西南风,受对流系统的影响从 20 日 22 时~21 日 04 时,21 日 12 时以后风廓线资料有部分缺测,但仍可揭示风场的主要特征。20 日 18 时以后低层西南风逐渐加强,低空急

流也逐渐向上伸展,21 日 04 时在 2000 m 以下,到 18 时达到 4000 m。21 日 06~12 时低层 1000 m 以下有西北风,这种边界层的西北风有可能是北方冷空气的侵入,也有可能是对流系统低层的出流造成。

MCS1 发生发展的时段正处于下游试验区的加密观测期,加密观测期间探空为 6 h 一次,这种时间的加密可能观测到 MCS1 发展过程中的层结演变。与 MCS1 生成地最近的探空站是安庆,表 2 是安庆各时刻的对流有效位能(CAPE, J/kg)、对流抑制位能(CIN, J/kg)、抬升指数(LI)、K 指数、整层可降水量(PWAT, mm)和地面相当位温(θ_e , K)。20 日 20 时安庆(58424)对流有效位能达到 1981 J/kg ,到 21 日 02 时对流有效位能释放了 1200 J/kg ,只剩下了 718 J/kg ,此时对流系统东移,不稳定性减弱。但 21 日 02 时以后,对流有效位能重新积聚,不稳定性又开始增加,21 日 14 时有效位能达到 2455 J/kg ,有利于对流的再次发生;当对流发生后,21 日 20 时层结又变得较为稳定,对流抑制能量达到 345 J/kg 。对应这两次对流的发展,安庆在 20~21 日有两次较强的降雨:20 日 22 时~21 日 08 时;21 日 15~18 时(图略)。以上分析显示,如果只有常规每天两次探空,就不能分析出 CAPE 重新积聚的过程,而探空每天 4 次的加密观测就捕捉了两次对流系统发生之间的 CAPE 的变化。而 MCS1 影响的另一个站南京,降水发生于 21 日 02 时~12 时,降雨之后所有的对流有效位能被释放,降水结束后对流抑制能量达到 211 J/kg ,层结也转为稳定(表 3)。虽然在同一个 MCS 的影响下,为什么安庆的对流有效位能释放

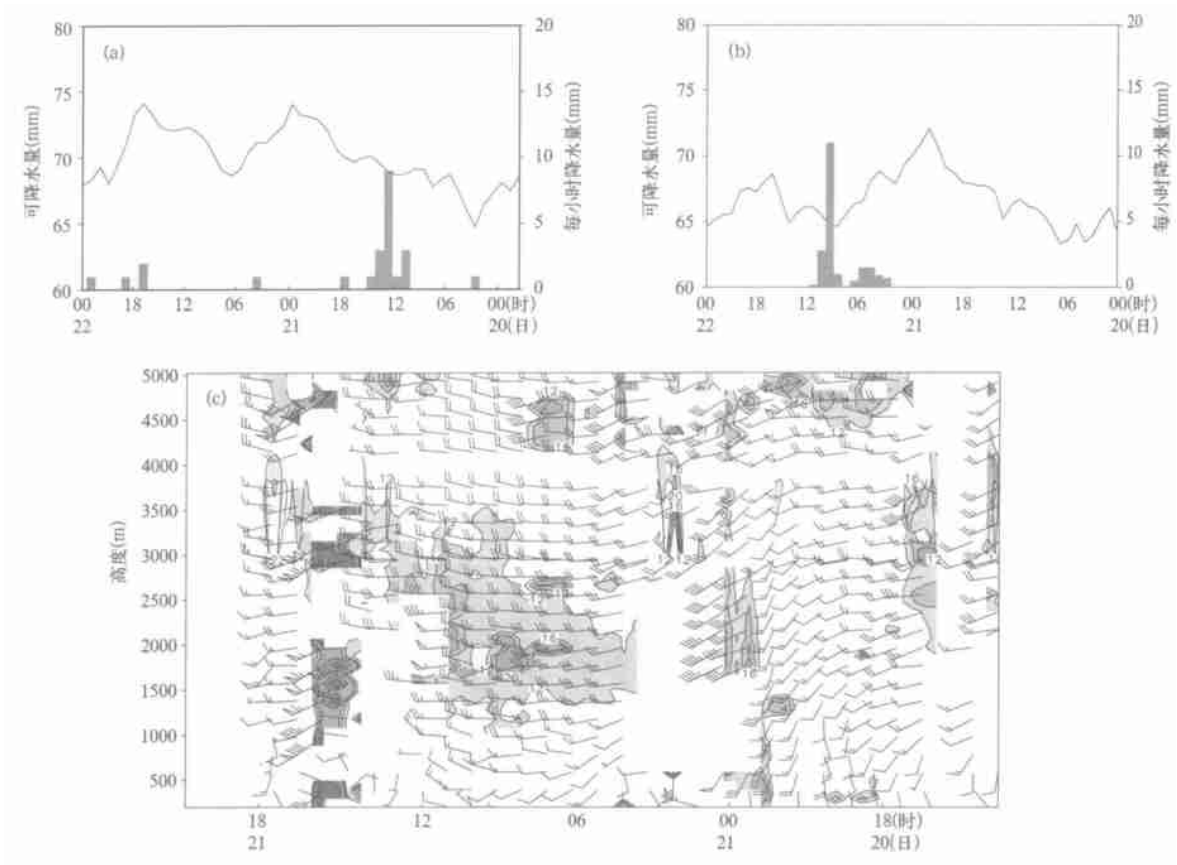


图 6 6 月 20 日 00 时 ~ 22 日 00 时 GPS 可降水量(曲线,左侧坐标,单位:mm)、每小时降雨量(直方)(a)肥西;(b)寿县;(c)肥西 20 日 14 时 ~ 21 日 22 时风廓线仪测风的时间 - 高度剖面(阴影为风速大于 12 m/s,单位 m/s)

Fig. 6 Precipitable water in mm from GPS (line, left coordinate), hourly precipitation in mm (bar, right coordinate) at (a) Feixi station, (b) Shouxian station; (c) Wind vector from wind profiler in m/s from 14 BST 20 to 22 BST 21 June 2002 at Feixi station, and wind speed 12 m/s is shaded

表 2 安庆 20 日 20 时 ~ 22 日 02 时探空曲线物理量变化

Table 2 The physical variables calculated by sounding data at Anqing station from 20 BST 20 to 02 BST 22 June

变量	20 日 20 时	21 日 02 时	21 日 08 时	21 日 14 时	21 日 20 时	22 日 02 时
CAPE	1981	718	1748	2455	67	86
CIN	2	14	5	0	345	300
LI	- 5	- 3	- 5	- 6	- 1	- 1
K	37	40	42	36	40	39
PWAT	65.4	71.1	69.4	60.4	68.1	70.1
e	365	360	364	370	352	352

后,能很快重新积聚,有利于新的对流系统的发展,而南京却没有对流有效位能重新积聚的过程。

安庆从 19 日 08 时 ~ 22 日 08 时低空一直盛行西南风(图 7a),西南低空急流一直持续到 21 日 14 时,并且在 20 日 14 时和 21 日 08 时在对流层中层分别有两次风场的脉动,中层最强风速达 18 m/s,

表明安庆一直处于切变线南侧的西南风控制下,有利于水汽的输送,这可能是肥西 20 日 11 ~ 15 时降水后可降水量没有减少的原因。持续的水汽输送可能是安庆的对流有效位能在释放后又能迅速积聚的主要原因。而南京在 20 日 08 时和 21 日 08 时分别有两次北风的侵入(图 7b),20 日 08 时在低层(800

表 3 南京 20 日 20 时~22 日 02 时探空曲线物理量变化

Table 3 The physical variables calculated by sounding data at Nanjing station from 20 BST 20 to 02 BST 22 June

变量	20 日 20 时	21 日 02 时	21 日 08 时	21 日 14 时	21 日 20 时	20 日 02 时
CAPE	1025	55	50	0	0	0
CIN	0	10	37	1	211	0
LI	- 3	- 3	1	2	0	2
K	37	39	38	34	35	39
PWAT	63	63.4	70.9	60.1	59.6	63.4
ρ	356	355	352	347	347	346

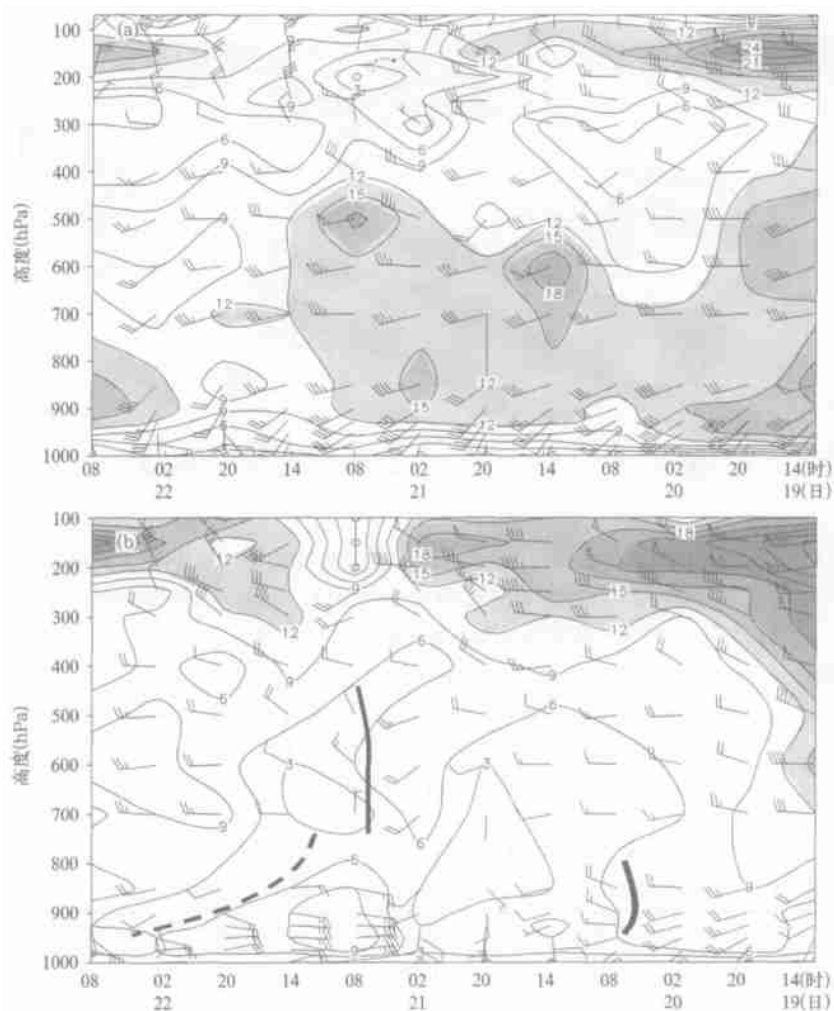


图 7 2002 年 6 月 19 日 08 时~22 日 08 时每隔 6 h 的探空测风时间-高度剖面

(a. 安庆, b. 南京; 粗实线为槽线, 虚线为东风和西风的切变, 阴影为风速大于 12 m/s)

Fig. 7 The time-height cross of sounding wind at six hour interval of 08 BST 19 - 08 BST 22 June 2002, shaded areas are wind speed greater than 12 m/s, at (a) Anqing and (b) Nanjing stations (bold line is trough line, broken line is shear line between westerly and easterly)

~900 hPa), 21 日 08 时在中层(500~700 hPa), 探空曲线分析也显示南京对流层中层的相对湿度要小于安庆(图略)。21 日 08 时低层的西南风转为东风, 南京在 900 hPa 以下都是东风, 而安庆只在地面有弱东风。东风与其上的西风有明显的垂直风切变

(图 7b 的虚线), 表明南京此时已经位于暖切变的北侧, 低层的弱东风不利于水汽的输送, 再加上强的垂直风切变, 使降雨很快结束。

4.3 合肥雷达回波分析

TBB 和每小时雨量(图 4)显示降雨区(和 中

尺度)明显小于云图上看到的对流区(中尺度),而且降水一般在局地比较强,这表明强降水是由更小尺度的和中尺度系统造成,而要分析和中尺度系统,卫星资料的分辨率是不够的,目前,采用雷达资料是分析这种尺度系统较好的工具。此次 MCS 在安徽南部发展,合肥雷达能观测到该云团的

一部分,合肥雷达的有效扫描半径大约为 150~200 km,外场试验资料组为我们提供了分辨率为 1 km,半径为 150 km 的回波强度资料。下面将利用合肥雷达的观测资料和每小时地面观测对 MCS 中的和中尺度系统进行分析,合肥雷达的观测范围及相关站点的分布见图 8。

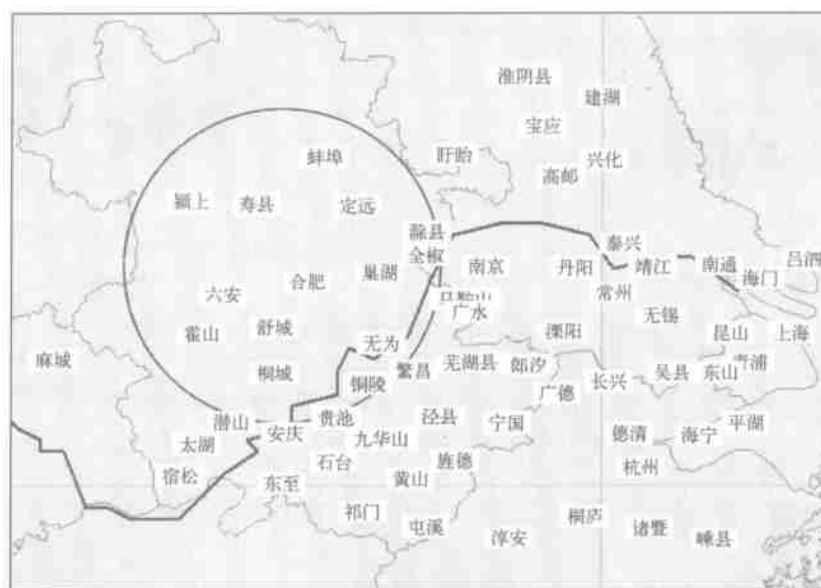


图 8 下游试验区地面观测站的分布(圆形框为合肥雷达的观测范围)

Fig.8 The distribution of surface observation stations in the Field experiment over lower reaches of Yangtze River, the circle shows the observation area by Hefei Radar

采用 TBB 和霍山每小时雨量分析显示 20 日 20 时和 21 日 13 时在大别山东侧有两次对流生成过程,但不能分析其内部对流单体的活动。雷达的观测显示 20 日 20 时(图 9a),在合肥的西南方向,有一些尺度在 10~30 km 的和中尺度系统,回波区分散,表明在 MCS 初生的阶段有一些和中尺度系统同时生成,这在云图上很难分辨出。另外,合肥北侧 50 km 处有一 200 km 长,20 km 宽的对流线,这可能就是造成合肥北侧 20 日 20~22 时降水的系统,该系统在 TBB 图上却没有显示出来。对流线在原地很快消亡,它与安徽南部发展的 MCS 没有关系。合肥西南侧的回波生成后向东偏北方向移动,其间不断有和中尺度系统发展,以团状回波为主(图略)。21 日 01 时之前回波是向东或东北方向移动的,但 01 时以后,回波团移到合肥附近时开始向西北方向移动,这可能是由于低层东南风造

成的(图 10a, b, c),观测的地面风场显示安徽的东部是东南风,北部是东北风,在合肥北侧形成一条 200 km 长的辐合线。在下游试验区收集到每小时资料的有 73 个站,主要位于安徽和江苏的南部,因此,图 10 中地面流场分析是基本可信的。

21 日 12 时以后在大别山山区又有对流系统生成,并不断进入雷达的观测区(图 9b),此时回波自东向西移动,19 时在合肥的南侧回波基本消失,对流系统消亡。地面风场由东南风转为东北风(图略),使 MCS 向南移动并消亡,在 TBB 分析(图 4)中 MCS 也是在 20 时左右南移消散的,TBB 与雷达观测的对流生成和消亡时间是一致的。由于中高层盛行偏西风,所以整个 MCS 从云图上看是向东移的,但其中对流体的移动方向却不一定与 MCS 的移动方向一致,下面将作进一步分析。

前面分析中提到 21 日 01 时之前回波是向东或

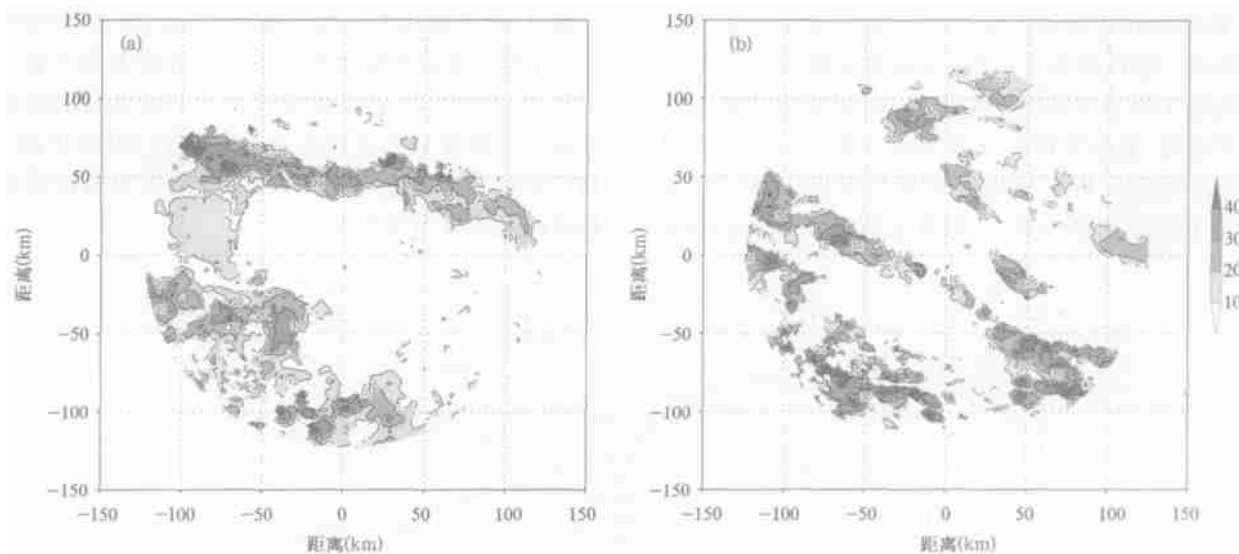


图9 2002年6月20,21日合肥雷达观测2 km高度的回波

(a. 20日20时02分, b. 21日12时; 单位: dBz)

Fig. 9 The reflectivity in dBz on 2 km ASL by Hefei Radar at

(a) 20:02 BST 20 and (b) 12:00 BST 21 June 2002

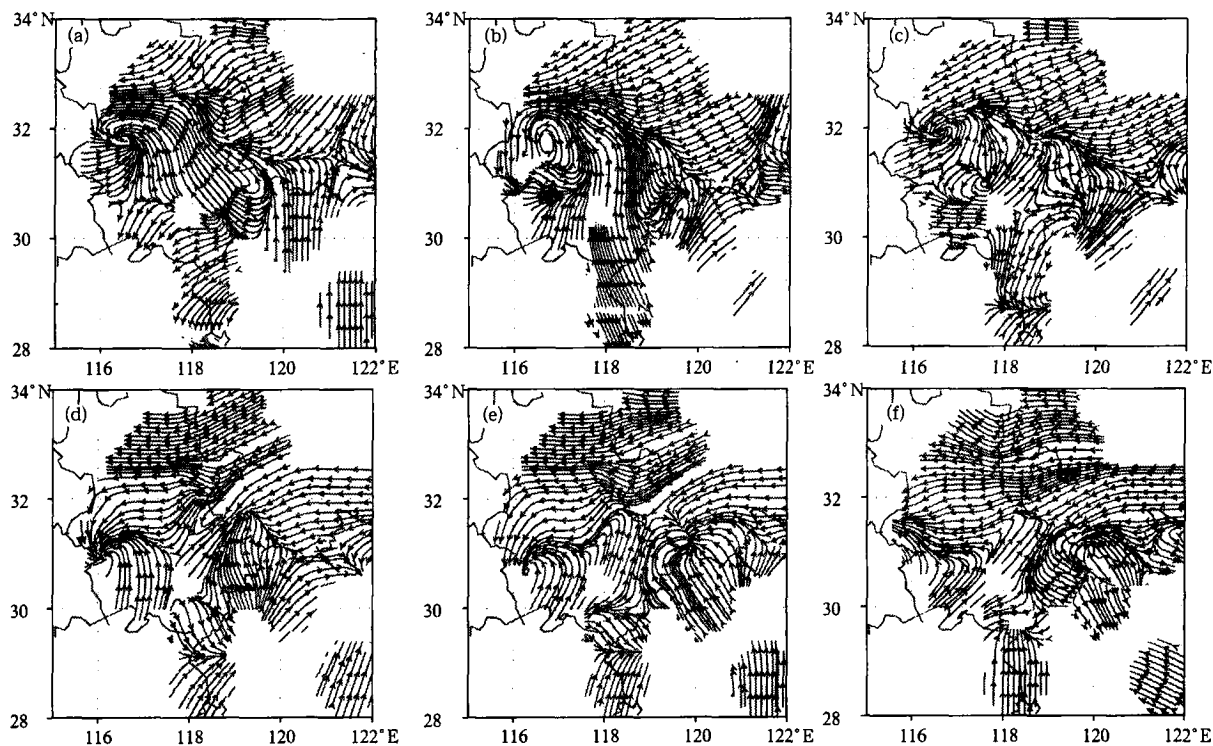


图10 2002年6月21日地面流场

(a. 03时, b. 05时, c. 07时, d. 10时, e. 11时, f. 12时)

Fig. 10 Surface streamline at (a) 03 BST, (b) 05 BST, (c) 07 BST,

(d) 10 BST, (e) 11 BST and (f) 12 BST 21 June 2002

东北方向移动的, 01 时以后开始向西北方向移动, 之后, 在合肥北侧先后有两条 200 km 长的带状回

波 (Mesoscale Convection Line, MCL, 图 11) 生成, 这两条回波位于 MCS1 的边缘地区, 最强的回波为

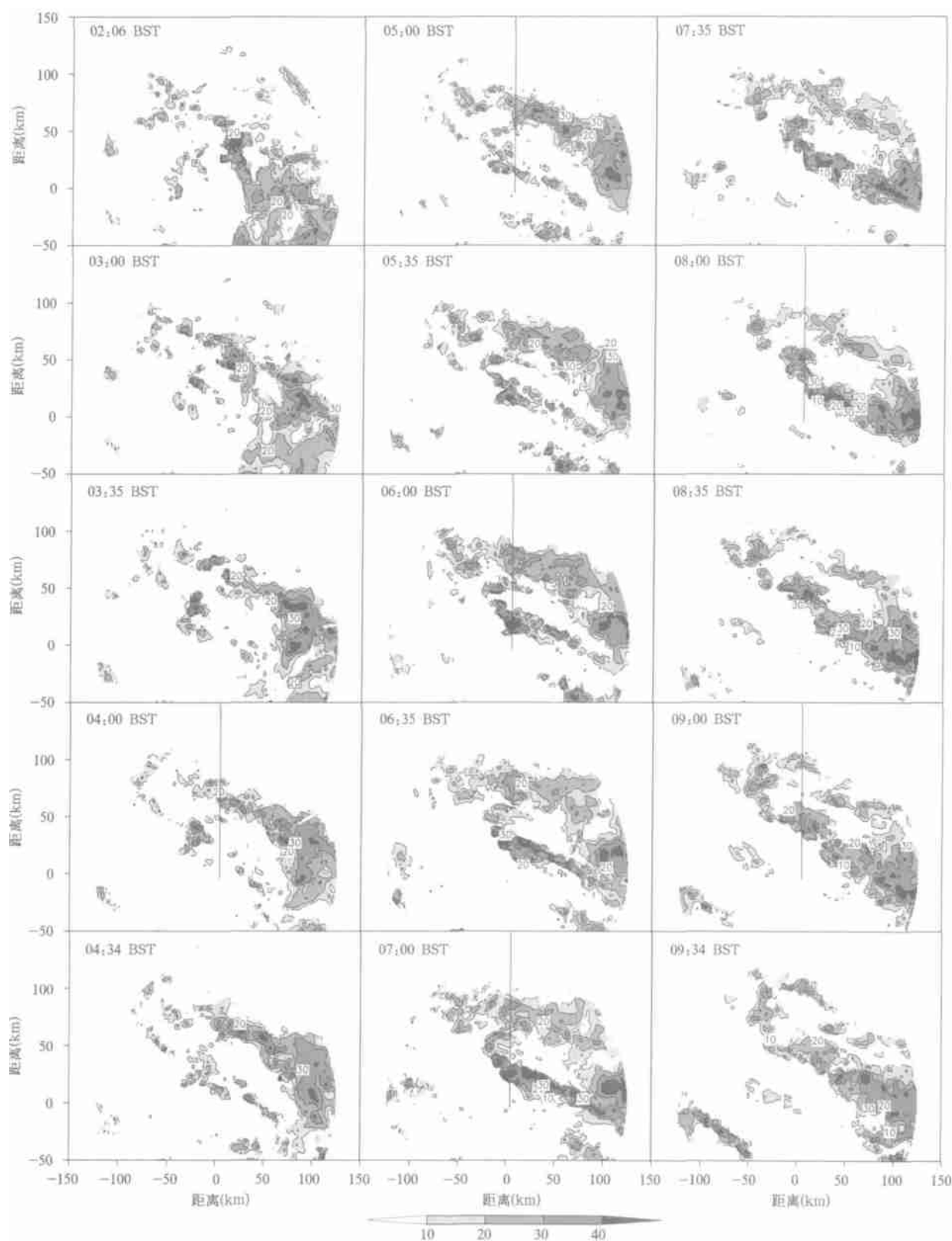


图 11 2002 年 6 月 21 日 02 ~ 09 时合肥雷达 2 km 回波强度

(单位: dBz, 图上标尺的 (0, 0) 处为雷达所在位置)

Fig. 11 The reflectivity in dBz on 2 km ASL by Hefei Radar during 02 BST - 09 BST

21 June 2002, the origin of coordinate (0, 0) shows the location of Hefei Radar

40 dBz。其中,北侧的对流带(MCL1)先发展,对流带是从东南向西北伸展,03时一条20 km宽的窄对流带已经形成。之后,因对流体在向西北移动的过程中减弱消亡,使对流带的长度不再增加,但对流带的宽度是逐渐增加的,MCL1发展到最强时(05~07时),其宽度达到40~50 km,最强的回波强度为40 dBz。当MCL1发展到最强时,南侧有一条新的对流带(MCL2)开始发展,06时MCL2基本形成,在MCL2增强过程中,MCL1逐渐减弱。这两条对流带基本没有移动,其中的对流体从东南向西北移动。MCL2的发展可能与MCL1有关,MCL1南侧的边界层出流(偏北风)与偏南风之间会形成另一条边界层辐合线,导致MCL2的形成,这只是一种推测,需要观测资料的验证。MCL2与MCL1的形成有所不同,MCL1主要是由对流体从东南向西北移动形成,而MCL2是由MCL1南侧形成的一系列对流体连接形成。

MCL1和MCL2的长度虽然均达到200 km左右,但宽度较窄,一般小于50 km,这种尺度的系统在天气尺度流场上很难分析出来,TBB分析(图4)也不能分辨该系统。然而,地面风场演变(图10a, b, c)可以清楚地看到在合肥北侧大约100 km处有一条东南风与东北风形成的辐合线,该辐合线在01时就形成,之后,在辐合线上有零星的对流单体生成(01~03时),03时一条西北东南向的对流带形成(图11)。在辐合线的西端有明显的气旋性涡旋,此

处位于大别山的北侧,可能是受大别山地形的影响。07时辐合线的位置比05时稍偏南,可能是MCL1减弱、MCL2增强的原因。由于地面观测资料的空间分辨率有限,虽然雷达观测有两条对流带,但地面风场只能分析出一条辐合线。

寿县位于安徽西北部,MCL1和MCL2的西北段正好影响该地,寿县的降雨开始于21日02时(图12a),是MCL1形成的初期。寿县21日有两段降雨:02~06时和08~10时,最强的降雨发生在08时。第1段降雨开始前2~3 h寿县地面的东南风转为东风,第1段降雨开始后又转为东北风,第2段降雨结束大约3 h后风场再次转为东南风。每小时风场演变虽然也不能确定MCL1和MCL2先后影响寿县,但其降雨明显分为两段,而且与雷达回波影响该地的时间一致。地面辐合线是东南风与东北风之间的辐合,寿县风场的演变表明其降雨发生在辐合线的北侧。合肥东侧的巢湖受MCL1东南段的影响,04时以后位于MCL1和MCL2之间,01~04时的降雨是MCL1造成的。巢湖的地面风场在20日18时以后为东南风,22时转为东北风,降雨在2 h后才开始,降雨过程中地面风又转为东南风。风向的演变显示降雨开始时巢湖也处于地面辐合线的北侧,降雨过程中辐合线推进到巢湖以北,10时以后辐合线南推,巢湖地面又盛行东北风,又产生了弱降雨。以上分析表明东北风对降雨的触发有一定的作用,降雨一般在地面中尺度辐合线的北侧触发。

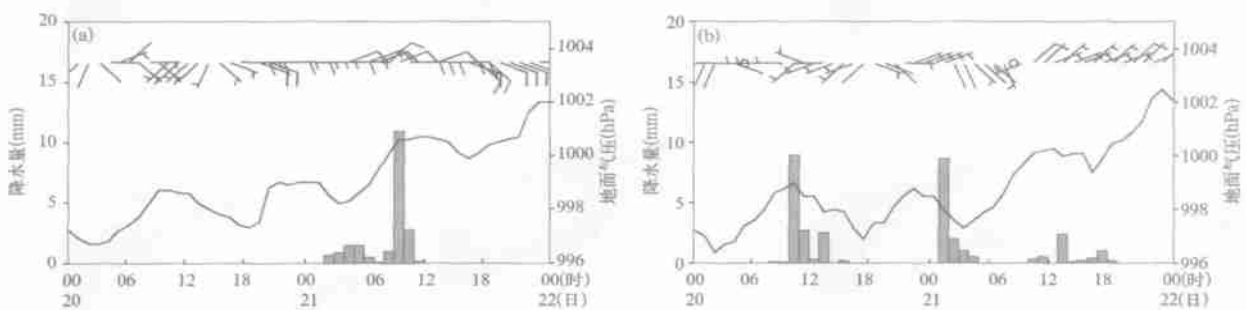


图12 安徽寿县(a)和巢湖(b)2002年6月20日00时~22日00时的每小时降雨量(直方)、地面气压(曲线)和风场(单位:m/s)

Fig. 12 Hourly precipitation in mm (bar, left coordinate), surface pressure in hPa (line, right coordinate) and wind vector in m/s from 00 BST 20 to 00 BST 22 June 2002 at (a) Shouxian and (b) Chaohu stations

地面流场也表明(图 10),西南气流在经过大别山、九华山和幕阜山之间的长江河谷地带后,转为东南风,与北侧的东北风形成地面辐合线。因此,该局地中尺度辐合线的形成是与当地的特殊地形有关。对流带回波的垂直剖面显示(图 13),强回波在中下层,30 dBz 以上的强回波基本出现在 7 km 以下,回

波顶高度在 10 km 以下。南侧的对流带在北侧对流带发展较强时开始发展,但随着南侧对流带的发展,北侧的对流带逐渐减弱,两条对流带之间的相距 20~30 km。是否是北侧对流带的流出造成边界层辐合而触发南侧对流带,这需要用双多普勒雷达反演的三维风场分析才能进一步证实。

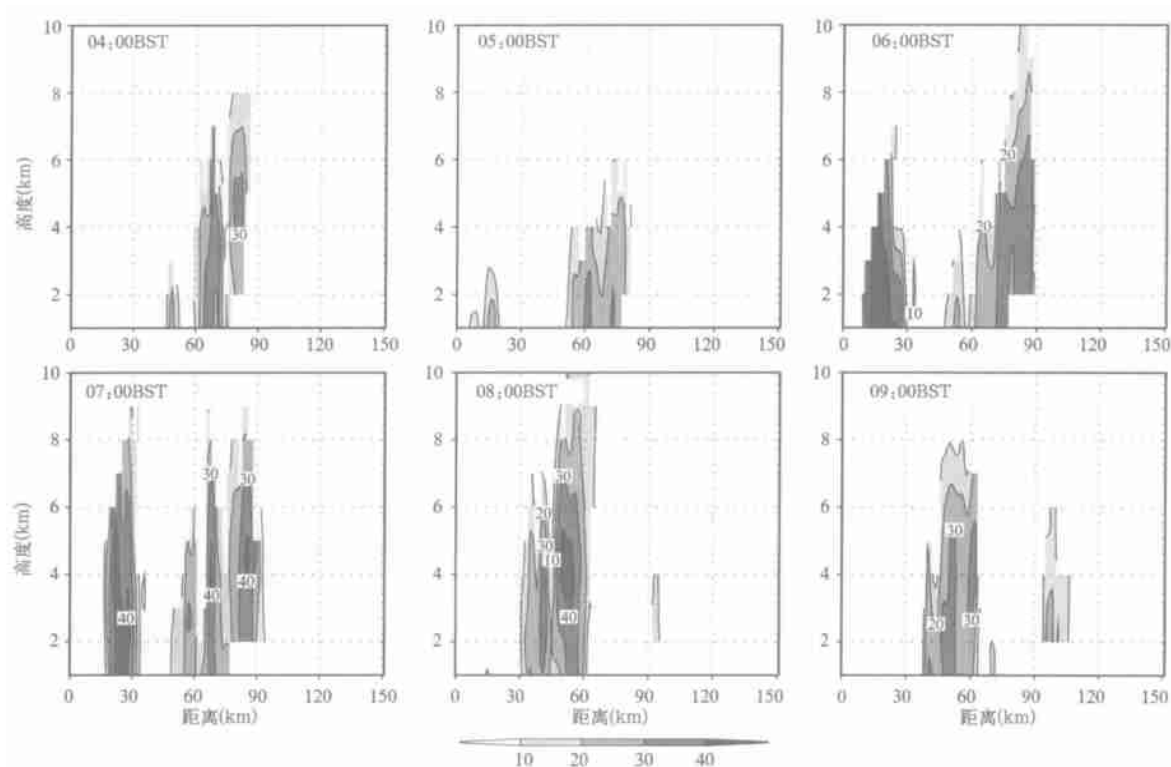


图 13 2002 年 6 月 21 日 04~09 时合肥雷达的垂直剖面
(剖面的位置见图 11,单位: dBz)

Fig. 13 The vertical cross sections of reflectivity in dBz by Hefei Radar of 04 BST
- 09 BST 21 June 2002, the locations of cross are indicated in Fig. 11

MCL1 和 MCL2 减弱时,21 日 08~12 时又有另一条对流带(MCL3)在合肥的西南侧生成,此对流带与 MCL1, MCL2 发生、发展过程不同,08:29 在霍山附近有一中尺度系统生成,该系统生成后向东南方向移动并增强,之后,在该系统的东南和西北侧分别有对流生成,这些对流单体连接成一条对流带(图 14)。整个对流带是从西南向东北方向移动的,而对流带中的中尺度系统是沿对流带向东南方向移动(图 14 中的虚线指示对流单体的移动)。地面风场(图 10d, e, f)显示, MCL1 和 MCL2 发展时位于合肥北侧的辐合线南移到合肥以南 100 km,安

徽中部以东北风为主,西南风经过长江河谷在大别山东侧转为东南风,在大别山的东侧形成一条辐合线,该辐合线可能与 MCL3 的发生发展有关。

由于合肥雷达的观测范围有限,很难对像 MCS1 这样的 MCS 进行有效的监测。它监测到的对流大部分时间是以团状回波为主,期间也探测到几条带状回波。然而,对雷达回波的分析却看到了中尺度的对流带及其上活动的对流单体,与地面观测的对比分析表明这些中尺度对流带有地面中尺度辐合线配合。对流带的移动一般随地面的中尺度辐合线移动,对流带中的对流单体沿辐合带移动。

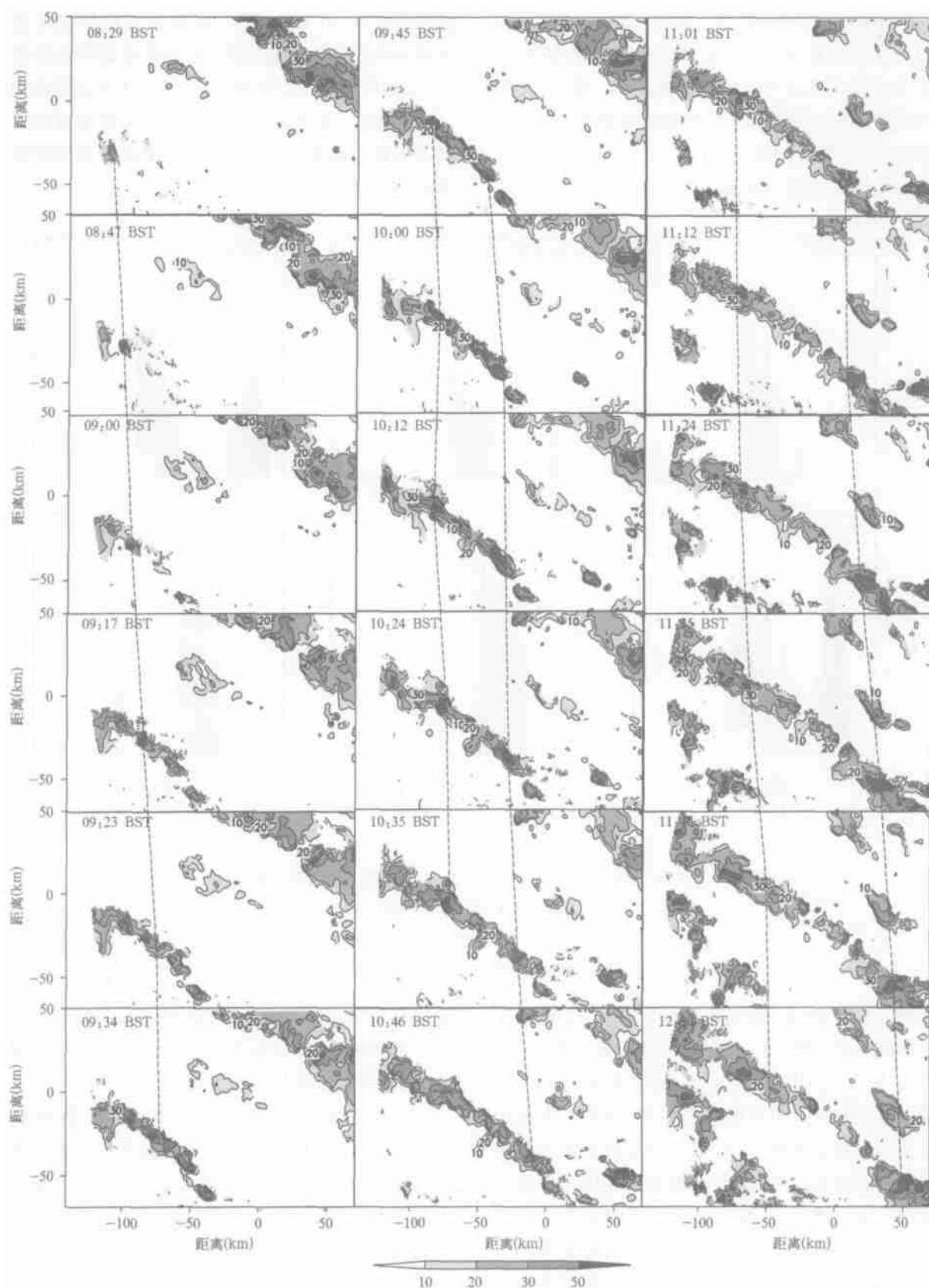


图 14 2002 年 6 月 21 日 08~12 时合肥雷达 2 km 回波强度(单位: dBz)

(图上标尺的 (0,0) 处为雷达所在位置, 虚线指对流单体的位置)

Fig. 14 The reflectivity in dBz on 2 km ASL by Hefei Radar during 08 BST - 12 BST 21 June 2002, the origin of coordinate (0,0) shows the location of Hefei Radar and broken lines indicate the propagation of convection cells.

5 结 论

本文利用“973”中国暴雨试验获得的加密观测资料,首先对 2002 年 6 月 20~24 日发生在长江中下游地区的 MCSs 进行了分析,然后针对安徽南部发生的 MCS1 的发生发展过程和中尺度特征进行了详细分析。6 月 20~24 日有几个尺度较大的 MCS 在长江中下游地区发展,造成了大范围的强降雨。MCS1 形成于副高北侧的切变线附近,其源地是大别山山区和大别山与九华山之间的长江河谷地带。该系统发生、发展过程中的主要特点如下:(1)此次过程分别有两次对流云的生成,第 1 次系统生成后发展东移,第 2 次系统生成后在原地发展,强降雨主要发生于对流系统的后部;(2)发生在安徽南部的 MCS 生成于切变线南侧的西南暖湿气流中,低层西南风的水汽输送是安徽南部对流不稳定和对

流有效位能积聚的主要原因。这与 Liang 等^[4]的研究结果,对流层低层垂直风强切变和高的对流有效位能(CAPE)特征一致,但长江流域梅雨期,切变线上的斜压性不是很强;(3)在降雨发生前整层可降水量有明显增加,开始降雨后则逐渐减小;(4)雷达监测的回波为团状和带状,MCS 中有 和 中尺度系统的活动,和 中尺度系统与整个 MCS 的移动方向并不一致。MCS 中的带状回波有地面中尺度辐合线配合,对流带随地面的中尺度辐合线移动,对流带中的对流单体沿辐合带移动。

另外,本文的分析只是针对一个个例进行的,不能概括长江中下游地区梅雨期其他 MCS 的发生发展过程中也一定有类似的特点,因此,要全面了解梅雨期的 MCS 的特征,必需进行大量个例的深入研究。

致谢:“973”中国暴雨试验加密资料由“973”项目资料组提供,在此表示感谢。

参考文献:

- 1 Maddox R A. Mesoscale convective complexes. Bull Amer Meteor Soc, 1980, 61(): 1374~1387
- 2 Miller D, Fritsch J M. Mesoscale convective complexes in the western Pacific region. Mon Wea Rev, 1991, 119(): 2978~2992
- 3 马禹,王旭,陶祖钰. 中国及邻近地区中尺度对流系统的普查和时空分布特征. 自然科学进展, 1997, 7(6): 701~706
- 4 Liang A G, Fritsch J M. The large-scale environments of the global populations of mesoscale convective complexes. Mon Wea Rev, 2000, 128(): 2756~2776
- 5 张小玲,陶诗言,张庆云. 1998 年 7 月 20~21 日武汉地区梅雨锋上突发性中尺度系统的发生发展分析. 应用气象学报, 2002, 13(4): 386~397
- 6 贝耐芳,赵思雄. 1998 年“二度梅”期间突发强暴雨系统及其环境场研究. 大气科学, 2002, 26(4): 526~540
- 7 丁一汇主编. 1991 年江淮流域持续性特大暴雨研究. 北京:气象出版社, 1993, 255pp
- 8 Bei N F, Zhao S X, Gao S T. Numerical simulation of a heavy rainfall event in China during July 1998. Meteor Atmos Phys, 2002, 80(): 153~164
- 9 徐亚梅,高坤. 1998 年 7 月 22 日长江中游中尺度低涡的数值模拟及分析. 气象学报, 2002, 60(1): 85~95
- 10 程麟生,冯伍虎. “987”突发大暴雨及中尺度低涡结构的分析和数值模拟. 大气科学, 2001, 25(4): 465~478
- 11 石定朴,朱文琴,王洪庆等. 中尺度对流系统红外云图云顶黑体温度的分析. 气象学报, 1996, 54(5): 600~611

AN ANALYSIS ON MCSs IN MEIYU FRONT DURING 20—24 JUNE 2002

Sun Jianhua Zhang Xiaoling Qi Linlin Zhang Gaoying Zhao Sixiong Tao Shiyao

(Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract

The routine observational data and intensive observational data of “China Heavy Rain Experiment and Study - CHeRES” were used to analyze MCSs in Meiyu front during 20—24 June, 2002. It was found that some MCSs produced severe heavy rainfall over middle and lower reaches of Yangtze River basin, the heaviest rainfall occurred at Huangshan station. The duration of these MCSs was longer than 10 h, some of them longer than 24 h.

Afterwards, the MCS1 triggered over southern part of Anhui province and produced heavy rainfall was further analyzed by using intensive observational data, especially, GPS, radar and wind profiler data. During 20 - 21 June 2002, the Meiyu front stagnated to the north of 30°N, while shear line on 850 hPa between southwesterly along rim of subtropical high and easterly from North China located at 31°N. The Meiyu front and shear line provided favorable synoptic condition for the development of convections. In addition, the analyses show that MCS1 formed in warm - moist southwesterly to the south of shear line over Dabieshan mountain and gorge between Dabieshan and Jiuhuashan mountains. During the evolution of MCS1, two systems originated over Dabieshan mountain area and moved eastwards. The first system moved eastwards quickly, whereas the second system stagnated and developed deeply. The severe rainfall occurred at rearward of MCSs.

The GPS observation indicates that the precipitable water increase obviously before occurrence of rainfall about 2—3 h and decrease after it. Although the observation sites of GPS are limited, but time resolution is very high, thus, it could be employed to predict local rainfall. The wind field from wind profiler reveals that LLJ extended to 4000 m accompanied the development of convection. The analysis of sounding data of 6 h interval at Anqing station captured the releasing and accumulating of CAPE during the evolution of convection. The abundant moisture transportation by southwesterly is favorable to the maintenance of convective instability and accumulation of CAPE.

The monitoring of radar reveals that meso and systems were very active in MCS and its propagation direction was not consistent with that of MCS. Several convection lines developed during the evolution of MCS1, which associated with surface convergence lines. The outflow boundary of convection line could trigger another convection line. The convection line moved with mesoscale surface convergence line, but the convective cells embedded in convergence line propagate along the line.

Key words: Mesoscale convective system, GPS, Wind profiler, Mesoscale convergence line.