

分类号\_\_\_\_\_密级\_\_\_\_\_

UDC \_\_\_\_\_ 编号\_\_\_\_\_

中国科学院研究生院  
硕士学位论文

2007 年江淮流域梅雨期中尺度对流系统  
(MCS) 特征研究

孟庆涛

指导教师 孙建华 研究员 赵思雄 研究员

中国科学院大气物理研究所

申请学位级别 硕士 学科专业名称 气象学

论文提交日期 2009 年 5 月 论文答辩日期 2009 年 5 月

培养单位 中国科学院大气物理研究所

学位授予单位 中国科学院研究生院

答辩委员会主席 高守亭





# 中国科学院研究生院硕士学位论文

## 2007 年江淮流域梅雨期中尺度对流系统 (MCS) 特征研究

Study on the Characteristics of the Meso-scale Convective Systems  
(MCSs) Occurred in the Yangtze and Huai River Basin during Meiyu  
Period of 2007

孟庆涛

指导教师 孙建华 研究员 赵思雄 研究员

中国科学院大气物理研究所

申请学位级别 硕士 学科专业名称 气象学

论文提交日期 2009 年 5 月 论文答辩日期 2009 年 5 月

培养单位 中国科学院大气物理研究所

学位授予单位 中国科学院研究生院

答辩委员会主席 高守亭

**Dissertation for Master Degree**

**Study on the Characteristics of the Meso-scale Convective  
Systems (MCSs) Occurred in the Yangtze and Huai River  
Basin during Meiyu Period of 2007**

**By**

**Meng Qingtao**

**Directed by**

**Profs. Sun Jianhua and Zhao Sixiong**

**Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences**

**Beijing, China**  
**May 2009**

# 中国科学院大气物理研究所

## 学 位 论 文 原 创 性 声 明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名： 孟 庆 涛

日期： 2009 年 5 月 15 日

## 摘要

江淮流域的致洪暴雨的发生往往与中尺度对流系统（MCS）的活动密切相关。国内缺少针对江淮流域 MCS 系统性的探讨和深入研究。本文利用 2007 年江淮梅雨期的卫星 TBB 资料，雷达资料，NCEP 资料，地面观测资料和常规探空资料，对江淮流域梅雨期的 MCS 进行了详细的统计，分类分析和数值模拟工作，对利用雷达资料统计得到的四种类型的典型个例进行了详细分析，同时，利用较为可信的数值模拟结果，对典型个例发生发展环境和对流线结构进行了分析。本文的主要结论如下：

(1) 2007 年 6 月 29 日至 7 月 9 日（世界时）共统计出 48 个 MCS 个例（其中  $M\beta CS$  38 个，占 79.2%； $M\alpha CS$  10 个，占 20.8%）和 4 类 MCS 雷达分类型：虚线型，3 个个例；散面型，11 个个例；实面型，21 个个例；实线型，6 个个例。MCS 从淮河流域到长江流域都有分布，MCS 多生成于江淮流域中游地区，大部分 MCS 由生成地生成后向偏东方向移动。

MCS 生成时刻的日变化规律与大气气温日变化规律成正位相分布，MCS 生成个数在凌晨黎明前后达到低谷，在午后前后达到高峰。MCS 消亡时刻的日变化规律与生成时刻日变化规律相反。

(2) 四类雷达分类型的主要特征为：实线型和虚线型两种线性对流个例中发展较弱的个例对流回波在其生命周期内始终成线性形态，发展较强的个例对流回波则在发展强盛期转变为较为密实的面（片）状对流回波。散面型个例对流回波在对流发展强盛期转变为密实的面（片）状回波，实面型个例仅仅是对流回波范围随对流的发展而扩展。

四种类型中实线型个例产生的降水最为强烈，虚线型和实面型个例次之，散面型个例产生的降水强度最弱。虚线型和实线型两种线性个例产生的强降水沿线性对流线附近分布。实面型和散面型个例产生的降水覆盖范围一般较广，强降水倾向于在面状（片）对流云系覆盖范围的北侧和西侧产生。

四种雷达分类型共同的环流形势特征为： $\beta$  中尺度 MCS 个例上空对流层中层 500 hPa 环流形势较为平直，部分  $\alpha$  中尺度个例对流层中层 500 hPa 受短波槽控制。对流层低空一般存在辐合区，中层存在辐散区，低空辐合区常伴随相对湿度大值

区和正涡度区的重叠。对流层低空存在西南风急流，高空500 hPa以下存在风场切变线和风场的垂直切变。绝大多数MCS个例地面场上存在锋面和风场辐合。

(3) 利用 ARPS 模式资料同化系统 ADAS 系统和 WRF 模式对 2007 年 6 月 30 日 17 时到 7 月 2 日 2 时的 MCS 个例进行了模拟试验，表明：

五组试验方案均成功模拟出了该个例的带状降水，降水强度也与实况相接近，但模拟的主要雨带相对实况偏南，加入雷达径向风资料和反射率资料后模拟效果最好。

挑选模拟效果最好的高时空分辨率模拟结果分析发现该个例发生发展前后上空对流层中层 500 hPa 受西风短波槽控制，在对流发展强盛期低空存在强烈的西南风急流。对流云带上强回波中心伴随着伸展强烈的正涡度柱和中低空辐合的重叠，强回波中心随着中低空辐合区与高空辐散区之间的强上升气流向西延伸而延伸，对流云系覆盖范围内受负扰动气压控制，对流层中低层空气水汽混合比在个例发生发展前后保持较高水平。沿安徽，江苏境内的强回波中心的经向剖面上正涡度柱与中低空辐合区高空辐散区之间的强上升气流伸展范围较窄，对应的对流云系在经向伸展范围也较窄，从而形成从鄂东延伸到苏南，绵延上千公里的狭长对流云带。

**关键词：** 中尺度对流系统 江淮流域 统计和分类 结构和演变 资料同化 模拟

**Study on the Characteristics of the Meso-scale Convective Systems  
(MCSs) Occurred in the Yangtze and Huai River Basin during the  
Meiyu Period of 2007**

**Meng Qingtao (Meteorology)**

**Directed by Profs. Sun Jianhua and Zhao Sixiong**

**Abstract**

The occurrence of the rainstorm causing flooding during the Meiyu Periods in the Yangtze and Huai River Basin often closely relates to the activities of the Mesoscale Convective System (MCS). The research about the MCS in the Yangtze and Huai River Basin lacks systemic discuss and deep studies. **By utilizing the satellite TBBdata, radar observations, NCEP grid reanalysis data, surface observation and routine rawinsonde**, this paper provides detailed analysis, classification and numerical simulation on the MCSs occurred i during the Meiyu Period of 2007 in the Yangtze and Huai River Basin. Furthermore, we discussed **the evolution of the radar reflectivity, satellite TBB, precipitation, synoptic circulation, and surface field** of the typical cases of the four types classified by using radar data in detail. **We also adopted the best simulation result to analyze the environmental condition for the occurrence and development and the structure of the convective line.** The main conclusions of this paper are given below.

**(1). 48 MCSs (38 M  $\beta$  CSs, accounting for 79.2%, 10 M  $\alpha$  CSs, accounting for 20.8%) and 4 types of the classification of the radar data ( Broken Line, 3 samples; Broken Areal, 11 samples; Embedded Areal, 21 samples; Solid Line, 6 samples) were totally identified between 29 June and 9 July in 2007.**

The 48 MCS cases located in both the Huai River Basin and the Yangtze River Basin. **Most MCS samples occurred over the middle reaches of the Yangtze and**

**Huai River Basin and moved eastward from their formation locations.**

**The diurnal variation of the MCS cases' occurrence time positively relates to diurnal variation of the atmospheric temperature: the occurrence of the MCSs reaches the bottom in the middle night and the dawn and reaches the top after the noon. The diurnal variation of the extinction time of the MCSs is just opposite to that of its formation.**

(2). The Main characteristics of the typical samples of the four types classified by using the radar data:

**The radar reflectivity of the cases which develop weakly always present linear formation of the two linear types, namely Solid Line types and Broken Line types; the radar reflectivity of the ones that develop strongly of the two linear types tend to change into relatively denser areal formation. The formation of the Broken Areal type turns into denser areal formation in their severe mature periods. The samples of the Embedded Areal type just expand their areas during the convection's development.**

**The Solid Line type produces the strongest precipitation among the four types, the Broken Line type and Embedded Areal type take the second place, while the Broken Areal type causes the weakest precipitation. The severe precipitation of the two linear types, the Broken Line type and the Solid Line type, occur along the convective line. For the Embedded Areal type and the Broken Areal type, the strong precipitation tend to occur in the north and west side of the convection area.**

**The common characteristics of the circulation of the 4 MCS types are: the circulation at 500 hPa of the M $\beta$  CSs are relatively straight, while the circulation of the M $\alpha$  CSs at 500 hPa are always controlled by the short wave westerlies troughs. There are convergences in the low troposphere and divergences in the middle troposphere. The low level convergence area accompanies the overlap between high relative humidity area and positive vorticity region. Low level southwest jet, wind field shear line and wind field vertical shear can be found under the 500 hPa. Surface frontal and convergence of wind field can be found in**

**the surface fields of most MCSs.**

(3). Different data were adopted to improve the WRF model initial fields by utilizing the data assimilation system ADAS of the ARPS model, we had designed five simulation tests for the MCS sample occurred between 1700UTC Jun 30, 2007 and 0200UTCJul 02, 2007. Several conclusions can be found below:

**The intensity of the simulated precipitation of the five tests is close to the observations; however,** the main simulated rain-belts locate in the south of the real rain-belt. **The simulation presents the best result while only the radar radial wind and radar reflectivity are adopted.**

The analysis of the high resolution documents with best simulation effect shows that **the middle troposphere of this case was controlled by the westerlies short wave troughs during its occurrence and development periods. Strong low level southwest jet can be found during its developing period. The strong reflectivity center accompanied the overlap between positive vorticity column stretching to upper level and middle and low level convergence. The strong reflectivity centers moved westward along with the strong updrafts between middle and low level convergence and upper level divergence.** The coverage of the convection was controlled by negative pressure perturbation while the total hydrometeor mixing ratio maintained a relatively high level. **The positive vorticity columns and the updrafts between middle and low level convergence and upper air divergence along the reflectivity centers expanded narrowly, which induced to a thousand kilometers long convective system to expand narrowly.**

**Key word:** Mesoscale Convective System, Yangtze and Huai River Basin, statistics and analysis, structure and Evolution, data Assimilation, numerical simulation

# 目 录

<b>第一章 绪 论</b>	1
1.1 引言	1
1.2 中尺度对流系统（MCS）的相关研究进展回顾	2
1.2.1 国外中尺度对流系统（MCS）相关研究回顾	2
1.2.2 国内中尺度对流系统（MCS）相关研究回顾	7
1.3 本论文的科学问题，研究内容及创新	11
<b>第二章 江淮流域中尺度对流系统（MCS）的统计分类</b>	15
2.1 引言	15
2.2 江淮流域中尺度对流系统（MCS）的分类标准	17
2.2.1 TBB 资料判定分类标准	17
2.2.2 雷达资料判定分类标准	21
2.3 江淮流域中尺度对流系统（MCS）个例选取和分类	23
2.3.1 TBB 资料分析以及 MCS 个例	24
2.3.2 雷达资料分析以及 MCS 个例分类	31
2.3.3 背景天气形势分类分析	39
2.4 本章小结	40
<b>第三章 江淮流域中尺度对流系统（MCS）典型个例分析研究</b>	43
3.1 引言	43
3.2 江淮流域中尺度对流系统（MCS）典型个例分析	45
3.2.1 虚线型中尺度对流系统（MCS）典型个例分析	45
3.2.2 散面型中尺度对流系统（MCS）典型个例分析	56
3.2.3 实面型中尺度对流系统（MCS）典型个例分析	66
3.2.4 实线型中尺度对流系统（MCS）典型个例分析	72
3.3 本章小结	82
<b>第四章 江淮流域中尺度对流系统（MCS）典型个例数值模拟研究</b>	85
4.1 引言	85
4.2 资料、中尺度模式及试验方案	87
4.2.1 资料简介	87
4.2.2 中尺度模式简介	87
4.2.3 试验方案	89
4.3 6.30.17-7.2.2MCS 个例概况	91
4.4 五组试验方案降水模拟效果分析	94
4.5 模拟结果分析	96
4.6 本章小结	107
<b>第五章 结论和讨论</b>	109
5.1 主要结论	109
5.2 讨论和展望	111
<b>参考文献</b>	113

硕士在学期间发表论文.....	122
致 谢 .....	123

## 第一章 绪 论

### 1.1 引言

我国地处欧亚大陆东岸，位于世界著名的季风区--东亚季风区内。受季风环流控制和影响，我国大多数地区夏季高温多雨，雨热同期型气候容易引发各种自然灾害。我国是世界上少数几个受自然灾害影响最严重的国家之一，每年由自然灾害引发的损失占国民生产总值的 1-3%。在我国所遭受的自然灾害中，以暴雨洪涝灾害最为常见。新中国成立以来，先后出现过 1954 年长江全流域特大洪水，“75.8”暴雨，1991 年淮河流域大洪水，1998 年长江、松花江、嫩江全流域特大性洪水等暴雨灾害，给人民生命财产造成了巨大损失。

进入新世纪以后，2003 年，2007 年淮河流域相继发生洪水灾害。此次暴雨的特点是强度大，时段和落区集中。如自 2007 年 6 月 17 日湖北省进入梅雨季节后，先后 8 次遭受暴雨袭击，多地降雨量创历史新高，甚至局部地区重复受灾，灾害损失严重，灾区人民的生产生活受到严重影响。6 月 17 日至 7 月 3 日，湖北省京山县永隆镇两次遭受特大暴雨袭击，降水量超过 350 毫米，超过历史同期平均雨量的 3 倍。有 14 个乡镇发生严重灾情，基础设施被毁，农田被淹，房屋倒塌，经济损失超过 1.7 亿元人民币。据统计，截至 2007 年 6 月 28 号，湖北全省受灾人次高达 1682.3 万人，其中死亡人数达 80 人，失踪人数达 28 人，转移安置灾民 47.18 万人，倒塌房屋 62418 间，损坏房屋 187501 间，受灾农作物 1181.12 千公顷，其中绝收 223.12 千公顷，直接经济损失 48.05 亿元，其中农业经济损失 37 亿元。2007 年 6 月 30 日开始，淮河流域发生了自 1954 年以来的第二位流域性大洪水。皖南和皖西部分县（区）爆发山洪灾害，淮河流域持续的洪涝灾害使农业大省安徽遭受重创。安徽省农委的灾情统计显示，截至 2007 年 7 月 24 日，安徽全省农作物受灾面积 2201 万亩，毁坏畜舍 4 万多间，受灾大牲畜 242 万头，家禽 2581 万只。全省渔业受灾面积也达 168 万亩，损失较为严重。部分农场受淹，水毁严重。淮河洪涝灾害已造成安徽全省农业直接经济损失达 63. 1 亿元，占全省各项直接损失的近 6 成。

江淮流域位于我国东部地区，夏季六、七月份受西风带，热带，副热带系统

共同影响，在有利的大尺度环流形势下，常常会有中尺度对流系统（Mesoscale Convective System，简称 MCS）的发生发展。国内外许多研究表明，中纬度地区的致洪暴雨的发生往往与中尺度对流系统（MCS）的活动密切相关。中尺度对流系统（MCS）强烈发展后造成的暴雨强度和频次都很大。此外，由于中尺度对流系统（MCS）本身生命期较短，一般维持几小时至几十小时，由其所引发的强降水在时间分布上常常比较集中。以上条件使得中尺度对流系统（MCS）成为 2003 年，2007 年江淮流域大多数暴雨洪涝灾害的“罪魁祸首”。

因此，开展针对江淮流域梅雨期的暴雨研究很有必要，尤其是针对中尺度对流系统（MCS）的研究显得尤为迫切。而国内有关江淮流域梅雨期中尺度对流系统（MCS）的研究内容并不多，多数是比较零散的单次暴雨过程中对于中尺度对流系统（MCS）的分析，缺少针对中尺度对流系统（MCS）系统性的探讨和深入研究。鉴于此，本论文集中对 2007 年 6 月底到 7 月上旬江淮流域的中尺度对流系统（MCS）进行了系统性的普查，分类研究，并做具体的各类型典型个例分析，以及其数值模拟研究，以期能提高对江淮流域梅雨期的中尺度对流系统（MCS）整体性的认识，有利于我们从整体上把握其特征，这无疑将加深我们对这类系统的认识，从而有助于气象工作者对江淮流域梅雨期中尺度对流系统（MCS）所引发暴雨等自然灾害的预警，预报能力，达到防灾、减灾的目的。

## 1.2 中尺度对流系统（MCS）的相关研究进展回顾

### 1.2.1 国外中尺度对流系统（MCS）相关研究回顾

Orlanski (1975) 对各尺度天气系统进行了系统性的量化分类标准，提出中尺度系统的范围为 2~2000 km，其中 2~20 km 属于  $\gamma$ -中尺度，20~200 km 属于  $\beta$ -中尺度，200~2000 km 属于  $\alpha$ -中尺度，这为中尺度系统的研究奠定了空间尺度上的基础。Maddox (1982) 和 Houze (1990) 研究了北美中尺度对流系统（MCS）造成的大范围强对流天气。Fritsch (1986) 发现中尺度对流系统（MCS）是暖季美国中部的重要降雨系统。

Maddox (1980, 1982, 1983), McAnelly 和 Cotton (1986), Cotton (1989) 利用红外云图对中尺度对流系统（MCS）的子类型--中尺度对流复合体（Mesoscale Convective Complexes，简称 MCCs）进行了研究。Maddox (1980) 最早根据红外

云图上云团的形状、尺度和生命期特征对中尺度对流复合体（MCCs）进行了定义。Augustine（1985）利用（编写）文件程序对MCCs生命史中每小时的形状，质心，偏心率信息进行了采集分析。Augustine和Howard（1988）对Maddox的中尺度对流复合体（MCCs）定义进行了补充和修改，并给出了中尺度对流系统（MCS）的定义：凡是水平尺度在10~500 km范围，生命期10小时左右，且在生命期内有明显的对流活动的降水性风暴系统就是中尺度对流系统（MCS）。Cotton等（1989）从中尺度对流复合体（MCCs）的水平尺度与Rossby变形半径的关系提出了一种新的动力分类定义。Anderson和Arritt（1998）从形状上对 $\alpha$ 尺度的中尺度对流系统（MCS）进行了分类，以偏心率的大小为标准将中尺度对流系统（MCS）细分为中尺度对流复合体（MCCs）和持续性加长对流系统（Persistent Elongated Convective Systems，简称PECSs），两者区别仅仅在于红外云图的形状，持续性加长对流系统（PECSs）又称为线性中尺度对流系统（Linear MCS）。Jirak等（2003）综合Maddox，Augustine和Howard，Anderson和Arritt的分类标准，分别对 $\alpha$ ， $\beta$ 尺度的MCS从形状、尺度和生命期特征为标准进行了分类，将中尺度对流系统（MCS）分为中尺度对流复合体（MCCs），持续性加长对流系统（PECSs）， $\beta$ 中尺度圆形对流系统（Meso- $\beta$  Circular Convective Systems，简称M $\beta$  CCSs）， $\beta$ 中尺度加长对流系统（Meso- $\beta$  Elongated Convective Systems，简称M $\beta$  ECSs），前两者属于 $\alpha$ 中尺度，后两者属于 $\beta$ 中尺度。Parker和Johnson（2000）指出合适的中尺度对流系统（MCS）时间尺度分类下限为 $f^l$ ，在中纬度其大约为3小时。

Aspliden（1976）和Martin（1981）采用人工目视判别法，Leese（1971）和Smith（1972）采用人工和电脑相结合的半自动追踪方法，Williams和Houze（1987），Arnaud（1992）采用面积重叠算法，Carvalho等（2001）采用最大空间相关算法，Guilber（2007）采用蛇模型算法追踪中尺度对流系统（MCS）云团变化。

Bartels和Maddox（1990）利用红外云图，探空资料等对中尺度对流系统（MCS）产生的中尺度对流涡旋（Mesoscale Convective Vortex，简称MCV）进行了研究，指出只有很少中尺度对流系统（MCS）会产生中尺度对流涡旋（MCV），中尺度对流涡旋（MCV）产生于大尺度相对涡度远小于科氏力参数的地方，弱的垂直切变有利于涡旋的维持。Fristch等（1994）和Trier（2000）指出中尺度对流涡旋

(MCV) 可以引起二次对流，产生强的降水。

此外，Fritsch 等 (1981)，Miller 和 Fritsch (1991)，Bartels 和 Rockwood (1983)，Kane 等 (1987) 对中尺度对流复合体 (MCC) 的定义，发生，发展，结构等方面做了大量研究。Maddox 和 Perkey 等 (1981) 对发生在密西西比河谷的一个强中尺度对流复合体 (MCC) 个例进行了分析，指出中尺度对流系统的发展可能导致大尺度环流的明显变化。Cotton 等 (1983) 利用中尺度资料描述了一个由多尺度对流元形成的中尺度对流复合体 (MCC)。Kane (1987) 以及 McAnelly 和 Cotton (1989) 对中纬度地区中尺度对流复合体 (MCC) 降水气候学特征以及云盖发展有关的降水生命期进行了研究。Leary 和 Rappaport (1987) 则详细讨论了一个中尺度对流复合体 (MCC) 个例的结构和组织，利用雷达、地面观测、探空以及卫星资料给出了中尺度对流复合体 (MCC) 的内部三维结构。Velasco 和 Fritsch (1987) 利用增强红外云图，以及常规地面和探空资料对南美洲中纬度地区和南北美洲之间的热带地区发生的中尺度对流复合体 (MCC) 进行了普查研究，指出中尺度对流复合体 (MCC) 在南北美洲非常普遍，热带地区中尺度对流复合体 (MCC) 群体比中纬度地区的系统群体大。热带海洋上出现的中尺度对流复合体 (MCC) 一部分发展为热带风暴，有暖心结构的中尺度对流涡旋

(MCV) 可能有利于海洋上中尺度对流复合体 (MCC) 发展为热带风暴。Miller 和 Fritsch (1991) 指出西太平洋地区中尺度对流复合体 (MCC) 是常见对流系统，特征许多与美洲的相似，具有明显夜发性特点，与美洲相似，春末、夏初是中纬度地区中尺度对流复合体 (MCC) 发生最多的季节，热带地区的系统区域均匀发生于整个暖季。春末夏初，80% 以上的中尺度对流复合体 (MCC) 发生在中国东南部和孟加拉国，中尺度对流复合体 (MCC) 出现的地理分布大致有四个密集中心，即澳洲北部，新几内亚，印度东北部和孟加拉国，中国大陆和南海地区。

Laing 和 Fritsch (1993a, b) 对发生于印度次大陆和非洲的中尺度对流复合体 (MCC) 进行了研究，指出上述地区的中尺度对流复合体 (MCC) 的气候学统计特征与其他大陆相类似，均具有夜发性，近大陆性和季节性特点，非洲的中尺度对流复合体 (MCC) 存在一个有趣现象，即撒哈拉地区中尺度对流复合体 (MCC) 频发，而热带雨林地区中尺度对流复合体 (MCC) 却很少见。Laing (1997) 给出了中尺度对流复合体 (MCC) 的全球分布统计结果，指出中尺度对流复合

体（MCC）最典型的特征就是夜发性。Ma等（1997）使用1993-1995年日本GMS静止卫星红外云图资料对中国的中尺度对流系统（MCS）进行了普查分析，主要是针对空间与时间尺度较大的M $\alpha$  CS和水平尺度达1.5°以上的M $\beta$  CS。

Bluestein和Jain（1985），Bluestein等（1987），Houze（1990），Parker和Johnson（2000）使用雷达资料对中尺度对流系统（MCS）的对流情况进行了详细分析。Houze（1990），Parker和Johnson（2000）根据层状降水与对流带的位置关系将线性中尺度对流系统（Linear MCS）分为追踪性层状（Trailing Stratiform，简称TS），引导性层状（Leading Stratiform，简称LS），平行性层状（Parallel Stratiform）三种理想模型，其中追踪性层状（TS）是最主要的类型，并对几种类型的背景天气形势进行了分析。Loehrer和Johnson（1995）利用雷达资料对最终发展成为非对称追踪性层状结构（Asymmetric TS Structure）的中尺度对流系统（MCS）的四种不同发展模型进行分类，指出其分别为无组织对流带（Disorganized Convective Bands），线性对流带（Linear Convective Bands），向后发展对流带（Back Building Convective Bands），交叉对流带（Intersecting Convective Bands）。Bluestein和Jain（1985）对强飑线（此处飑线即为线性中尺度对流系统，Linear MCS）的雷达回波类型进行分类，将其分为虚线型（Broken Line），向后发展型（Back Building），散面型（Broken Areal），实面型（Emebedded Areal）。Bluestein等（1987）对奥克拉荷马州的弱飑线形态进行研究，指出散面型（散面型）是弱飑线的主要形式。Blanchard（1990）对奥克拉荷马州到堪萨斯州的中尺度对流系统（MCS）利用雷达资料进行分类研究，指出其形态可分为线性对流系统（Linear Convective Systems），锢囚对流系统（Occluding Convective Systems），无序型对流系统（Chaotic Convective Systems）三类。Jirak等（2003）利用雷达资料，分别从层状降水存在与否类型：实面型（Embedded），非实面型（not Embedded），对流单体的分布类型：线性（Line），面型（Areal），结合型（Combination），对流簇之间的相互影响类型：孤立型（Isolated），合并型（Merger），非合并型（None-Merger）将中尺度对流系统（MCS）的雷达类型组合分类为17类，并对Bluestein和Jain（1985），Blanchard（1990），Loehrer和Johnson（1995）的分类分型进行了归类分类。Houze（1993），Geerts（1998），Parker和Johnson（2000）指出在雷达对流回波上合适的中尺度对流系统（MCS）空间尺度分类下限为100公里。

Houze (1990), Parker 和 Johnson (2000) 挑选最能代表中尺度对流系统 (MCS) 形成发展的独立空气团的探空资料进行了分析研究。Bluestein 和 Parks (1983), Bluestein 和 Jain (1985) 对空气团周围的探空资料进行了插值研究。Takeda 等 (1981) 研究了一次梅雨锋  $\beta$  中尺度对流带的活动, 发现在对流带后部不断有云生成并沿对流带移动。Takeda and Seko (1986) 利用雷达资料详细分析了一次  $\beta$  中尺度对流带的回波结构和演变, 细致分析了对流带上每一个  $\gamma$  中尺度对流单体的生命史, 产生位置, 移动等, 指出新对流体大概每 20 分钟出现在原来对流体的上风方 5 km 处, 单体的新生和移动影响着对流带的移动。杨金锡等 (1994) 分析江淮梅雨锋的  $\alpha$  中尺度演变过程时发现,  $\alpha$  中尺度对流系统中的  $\beta$  中尺度对流云几乎以相等间距有序的排列成“串状云核”。Ishihara 等 (1995) 利用雷达资料分析了 1988 年 7 月 17 日  $\beta$  中尺度雨带的精细结构和维持过程, 指出由间隔 10~15 km 的多个对流单体组成了一条西北东南向的  $\beta$  中尺度对流带, 成熟单体沿着雨带的走向移动, 新单体在成熟单体西南面 5 km 处形成。Takahashi 等 (1996) 分析了 1988 年 7 月 17~18 日两次梅雨暴雨的中尺度和对流尺度结构特征发现回波合并对暴雨形成有重要作用。Takahashi 等 (2001) 研究梅雨锋暴雨对流活动时指出, 新单体产生在老单体的上风方 15~100 km 的距离并和老单体合并, 合并加强了对流, 新单体的产生可能是由降水产生强下沉气流引发的直接低层出流引起的。Yamada 等 (2003) 利用雷达观测资料对 2001 年 6 月 18 日梅雨锋期间发生在长江中下游的一次  $\alpha$  中尺度低涡中出现的多个  $\beta$  中尺度对流群进行了分析, 这些  $\beta$  中尺度系统分布于低涡的不同位置, 其形成的三维流场也各不相同。Ishihara (1995) 利用雷达反演的风场分析了 1988 年 7 月 17 日  $\beta$  中尺度雨带的水平和垂直流场特征, 指出在这条雨带中存在对流尺度上升气流、后部入流、中尺度下沉气流、对流尺度下沉气流、向前辐散出流、向后辐散出流、中层上升气流等多支气流的相互作用, 并给出了雨带结构的概念模型。

Brooks 等 (1994) 利用探空资料使用数值模式对中尺度对流系统 (MCS) 进行分析研究。雷达资料在中尺度模式中的应用方法涉及到资料同化, 雷达资料的三维变分 (Gao 等, 2001, 2004)、四维变分 (Sun and Crook, 1997, 1998) 和集合卡尔曼滤波 (Zhang 等, 2004; Tong and Xue, 2005) 等, 目前都在研究中。也有研究工作将雷达资料直接应用于中尺度系统的模拟, Xue 等 (2003)、Xue and

Martin (2006) 利用高分辨率的ARPS模式及美国WSR-88D多普勒天气雷达资料对中尺度飑线、飓风等中尺度对流系统进行了研究。Hu等(2006)分别利用ARPS模式的资料分析系统(ADAS)和变分同化系统(3DVAR)，研究了美国WSR-88D多普勒天气雷达资料对初始场调整改进的效果，并在模拟中取得了很好的结果。

### 1.2.2 国内中尺度对流系统(MCS)相关研究回顾

国内学者也很早就开始涉及针对中尺度对流系统(MCS)的研究。李玉兰等(1989)利用1983~1986年的云图照片对中国西南和华南地区的中尺度对流复合体(MCC)进行普查，找出5个中尺度对流复合体(MCC)，并与美国的中尺度对流复合体(MCC)进行分析比较，发现中国中尺度对流复合体(MCC)数量较少，生成地集中，生命史较短。马禹等(1997)统计普查了1993~1995年夏季中国及其邻近地区的中尺度对流系统(MCS)，共统计得到234个M<sub>α</sub>CS和585个M<sub>β</sub>CS，并且给出了代表性较好的MCS的地理分布。陶祖钰等(1998)对1995年中国的M<sub>α</sub>CS进行普查分析，发现6~8月中国及其沿海地区共发生了102个M<sub>α</sub>CS，其主要分布在华南西部，西川盆地附近和黄河及长江中下游地区。郑永光等(2004)普查了1993年7~8月和1993年~1996年黄海及其周边地区M<sub>α</sub>CS的发生情况，用合成和客观诊断分析的方法分别考差了中尺度对流系统(MCS)两个活跃期和两对相对静寂期的大尺度环境场的热力和动力条件。

过仲阳等(2003)，林珲等(2006)用计算机自动追踪的方法揭示了青藏高原中尺度对流系统(MCS)的活动及其东移传播特征。师春香等(2000)普查统计了1998年长江流域大水期间的中尺度对流系统(MCS)，指出长江流域这场罕见的大水是由177个M<sub>β</sub>CS和138个M<sub>α</sub>CS对流云团直接造成的。费增坪等(2005)对2003年淮河流域洪水期间的中尺度对流系统(MCS)进行了普查分析。郑永光(2007, 2008)利用红外云图TBB资料对北京及其周边地区，以及中国及其周边地区夏季中尺度对流系统(MCS)进行普查分析。白洁(1997)采用模式匹配算法，方兆宝(2004)采用面积重叠算法、模式匹配算法追踪中尺度对流系统(MCS)云团。

方宗义(1986)对1980~1983梅雨期间8个中尺度云团进行合成研究后指出，静止锋西端、季风云系北端和高原东移的短波槽相接处有利于云团的产生。项续

康和江吉喜 (1995) 从1989~1993年的云图中选取了10个中尺度对流复合体 (MCC) 个例, 进一步指出中尺度对流复合体 (MCC) 发生在高温、高湿和低空急流的前方, 中国的中尺度对流复合体 (MCC) 偏心率小于北美, 生命史比北美长。陶祖钰 (1996) 通过对TBB的反演, 得到1个中尺度对流复合体 (MCC) 个例冷云盖的演变特征。陶祖钰和黄伟等 (1996) 研究了中尺度对流复合体 (MCC) 的环流结构, 指出在对流层上部是一个中尺度反气旋式辐散环流, 在对流层下部是一个气旋式辐合环流。石定朴等(1996)对1992年8月初中国  $\alpha$ -MCS 的TBB进行了反演, 发现冷云盖周围TBB等值线的疏密对预报  $\alpha$ -MCS 的发展有指示意义。陶祖钰等 (1998) 对1995年中国的  $\alpha$ -MCS 进行了研究, 对具有不同特征的6个  $\alpha$ -MCS 个例进行了分析。段旭等 (2001) 也对1999年6月6日低纬高原地区发生的一次中尺度对流复合体 (MCC) 进行了分析, 研究表明中尺度对流复合体 (MCC) 发生在副热带高压与滇缅高压之间辐合区中一个明显的中尺度辐合线上。寿绍文等 (2003) 研究指出中尺度对流系统 (MCS) 按结构可分为三类: 孤立对流系统, 带状对流系统和中尺度对流复合体 (MCC)。姚秀萍等 (2005) 研究发现, 梅雨锋云系为一条TBB低值带, 其上分布着由不同尺度、不同强度的对流单体 (包括  $\beta$  中和中  $\gamma$  尺度对流单体) 组成的中尺度对流系统 (MCS)。孙建华等 (2004) 分析2002年6月20~21日的梅雨锋中尺度对流系统回波特征时发现,  $\alpha$  中尺度系统中有  $\beta$  和  $\gamma$  中尺度系统的活动,  $\beta$  和  $\gamma$  中尺度系统与整个MCS 的移动方向并不一致。整个MCS向东北方向移动, 而对流带中的  $\gamma$  对流单体是沿对流带向东南方向移动。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。对流系统的移动不仅取决于对流单体的移动方向, 还取决单体的不断新生过程。方宗义等 (2006) 指出卫星对暴雨云团适宜的监测对象应该是  $\beta$  中尺度 (或者更大尺度, 如  $\alpha$  中尺度) 的对流云团。王欢和倪允琪 (2006) 发现梅雨锋上强烈发展并东移的多个  $\beta$  中尺度对流系统是造成江淮暴雨最直接的影响系统, 对称不稳定可能是  $\beta$  中尺度对流系统发生发展的一种重要机制。张云等 (2006) 等对04年6月的一次暴雨过程分析中指出, 条件对称不稳定在中尺度对流系统 (MCS) 的加深中扮演着重要的角色。

丁一汇(1993) 对1991年江淮流域持续性特大暴雨的中尺度分析得出, 绝大

多数 $\beta$ 中尺度系统是在低涡切变线或锋面中生成的。程麟生和冯伍虎(2001)对1998年7月20~23日发生在鄂东和鄂西南地区的突发性大暴雨的研究表明： $\beta$ 中尺度对流系统的强烈发展和500 hPa短波槽及700 hPa低涡切变线的相继生成密切相关，对持续时间较长的大暴雨，大尺度过程对中尺度系统的影响是重要的。陶诗言等(2001)对1998年夏季中国暴雨的 $\beta$ 中尺度系统研究表明， $\beta$ 中尺度系统在对流层中低层(700 hPa以下)风场上表现为浅气旋性扰动，低空急流前部充足的水汽条件及其上的风速扰动对中尺度系统的发生起到一定的作用。贝耐芳等(2002、2003)分析1998年7月20日~22日 $\beta$ 中尺度系统时指出，暖湿空气辐合为 $\beta$ 中尺度对流系统的形成提供了“原料”，低层中尺度风场的扰动形成的中尺度风速极值中心(即中尺度低空急流)为对流云团的发展提供了条件，边界层中的不稳定区有利于对流的启动。对流层中低层的水汽的大量集中以及对流不稳定条件的存在为造成特大暴雨的中尺度天气系统的发生发展提供了有利的环境。张小玲等(2002)分析1998年7月21日武汉暴雨时，在暴雨发生前(即 $\beta$ 中尺度对流系统形成前)武汉附近整个对流层大气积聚了大量的水汽，整个层结接近饱和，并且蕴涵着大量对流有效位能(CAPE)，通过某种机制促使对流有效位能释放并促发 $\beta$ 中尺度对流系统的发生发展。刘黎平等(2004)研究对流单体新生时发现了“新回波在右后侧生成的右移回波”现象。

刘黎平(2003)反演了回波带合并的三维风场，下层存在强烈的辐合，上层为辐散，从南侧进入云体的高温高湿气流穿过云体，形成上升气流的主体，最后在上层从北侧流出，上升气流区与强回波区相配合。刘黎平等(2004)对双多普勒雷达反演的风场分析表明，西南风和偏东风形成的风切变在4 km高度以下，暖湿西南气流与偏东气流在对流云中交汇形成上升气流。在对流单体合并时，往往伴有 $\gamma$ 中尺度涡旋，其尺度小于10 km，是对流云发展的重要过程。

我国气象学者也发现有中尺度对流涡旋(MCV)的存在，但研究的较少。Chen Min等(2003)分析了98年华南一个长生命史中尺度对流涡旋(MCV)的涡度收支情况。廖捷和谈哲敏(2005)在分析2003年一次暴雨过程指出，有一个中尺度对流涡旋(MCV)生成，它是由中尺度对流系统(MCS)的潜热释放造成的，中尺度对流涡旋(MCV)生成后进一步加强了切变线上的低层辐合，并导致了一个涡旋在切变线上形成。但此类中尺度对流涡旋(MCV)和北美的有

差别。

王智等 (2003) 利用 MM5、林永辉等 (2003) 利用 ETA 等中尺度数值模式对长江中下游地区出现的中尺度对流系统 (MCS) 进行了诊断分析, 也指出了一些中尺度对流系统 (MCS) 发生、发展规律。孙晶和楼小风等 (2007) 模拟了 2002 年 7 月 22-23 日发生在长江中游一次梅雨暴雨过程, 研究了暴雨过程  $\alpha$  中尺度到中  $\gamma$  尺度的回波结构以及动力特征和云降水粒子的分布。王婷和吴池胜等 (2008) 利用 MM5 模式成功地模拟出与中尺度对流系统 (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中尺度对流系统 (MCS) 的  $\beta$  中尺度系统的结构和演变特征。

国内学者在多普勒天气雷达资料的数值模式应用方面也进行了一些研究, 邱崇践等 (2000) 提出了单多普勒雷达资料反演风矢量场的准四维变分分析方法, 研究了多普勒雷达资料对中尺度系统短期预报的改进。托亚等 (2003) 利用多普勒雷达资料反演的降水率对 MM5 模式初始场进行调整, 提高了短期降水预报的质量; 王叶红等 (2004) 利用数字化天气雷达降水资料进行了一维变分同化的敏感性试验; Sheng 等 (2006)、盛春岩等 (2006) 利用 ARPS 模式及其资料分析系统 ADAS, 将多普勒雷达资料直接应用于中尺度数值模拟, 对我国北方秋季的一次降雨过程进行了试验, 结果表明经改进后的初始场明显增强 3h 内的降水强度和落区预报, 提高了中尺度数值模式的短时定量降水预报。矫梅燕等 (2004) 对 2003 年淮河大水进行了天气分析与研究, 通过对中尺度天气系统的模拟分析, 提出了暴雨发展的可能的机理, 指出暴雨过程中高空急流轴的倾斜及东移和强度的减弱, 低空急流 (西南气流) 的增强, 副高位置的相对稳定等特征, 使得高空辐散区辐散加强, 低层气旋性切变和辐合作用同时加强, 副高北缘垂直运动加剧, 使得长江中下游暴雨过程能够发生发展。雷恒池等 (2002) 利用积云模式模拟了 1998 年 7 月 21 日武汉的梅雨锋暴雨的积云发生发展过程, 发现低层水汽辐合和合适的风切变是积云维持发展的重要条件。吴庆丽 (2002) 利用模式输出的高时空分辨率资料对雨团的  $\beta$  中尺度流场结构进行了分析。指出在雨团中, 高、中、低空都存在明显的  $\beta$  中尺度环流系统, 存在上升的低空前方入流和下沉的中空后方入流。降水伴随的拖曳下沉气流还产生了行星边界层中浅薄的垂直环流。

### 1.3 本论文的科学问题，研究内容及创新

许多研究表明，中尺度对流系统（MCS）是世界范围内造成短期致洪暴雨的重要成因。国外针对中尺度对流系统（MCS）的研究开展很早，研究内容广泛，深入。国外学者对北美，印度次大陆，澳洲，非洲大陆的中尺度对流系统（MCS）进行了统计和分析。北美学者对北美大陆上发生发展的中尺度对流系统（MCS）进行了深入分析研究，对中尺度对流系统（MCS）的发生发展情况进行了长时期，大范围的统计工作，结合卫星，雷达，常规观测，探空资料以及数值模式模拟工作探讨了中尺度对流系统（MCS）的分类，物理结构，以及大尺度环境场，这些研究工作使得人们对北美大陆上空的中尺度对流系统（MCS）有了全面而深刻的理解。

我国学者对江淮流域梅雨期引发暴雨的中尺度对流系统（MCS）研究起步相对较晚，研究内容虽然较为广泛。但早期受观测资料时空分辨率的制约，对江淮流域梅雨期中尺度对流系统（MCS）的研究多数集中于大尺度的环流形势分析。有关江淮流域梅雨期中小尺度的 MCS 研究多是单次暴雨过程中个例的分析，针对江淮流域梅雨期较长时间，较大范围内的中尺度对流系统（MCS）的普查，统计工作研究不够深入和广泛。基于此，本论文针对性的提出以下科学问题，如：

1. 江淮流域梅雨期的中尺度对流系统（MCS）在较长时间，较大范围内有什么统计学特征？可以分为几类？每类的特点分别是什么？
2. 在分类的基础上，尤其是雷达回波特征分类基础上，每类的具体个例有什么特点，在目前的天气观测资料中，各类之间有哪些相同和不同的天气特征，这些特征能否对实际的中尺度对流系统（MCS）的诊断预报提供帮助？
3. 统计得到的中尺度对流系统（MCS）的典型个例发生发展过程能否在数值模式中较好的再现？采取不同资料，不同方案的模拟结果有何异同？

针对以上科学问题，我们利用 2007 年 6 月 29 日至 7 月 9 日 每小时一次的卫星 TBB 资料，每半小时一次的雷达反射率资料，每天 4 次的  $1^\circ \times 1^\circ$  的 NCEP

分析资料，每 3 小时一次的地面观测资料和常规探空资料进行详细分析和研究。通过对这段时期内江淮流域上空的中尺度对流系统（MCS）的统计，分析，模拟工作，以期能对江淮流域上空的中尺度对流系统（MCS）提供较为全面和深刻的认识。本论文的主要工作包括以下几个主要部分：

**第一章：绪论。**主要是对国内外有关中尺度对流系统（MCS）的研究工作进行回顾，提出本文的主要科学问题、主要内容和创新。

**第二章：江淮流域中尺度对流系统（MCS）的统计分类情况。**通过参考国内外分类标准，确立自己的分类标准，根据标准对 2007 年 6 月 29 日至 7 月 9 日 江淮流域上空的中尺度对流系统（MCS）进行统计分类工作，并对统计结果进行简单对比分析研究。

**第三章：江淮流域中尺度对流系统（MCS）各类典型个例分析。**在前面统计分类基础上，挑选每类的典型个例从天气诊断分析方面进行详细分析研究工作。

**第四章：江淮流域中尺度对流系统（MCS）典型个例数值模式模拟研究。**利用新一代 WRF 中尺度数值模式，加入雷达同化资料，对统计得到的中尺度对流系统（MCS）典型个例进行模拟分析研究工作。

**第五章：结论和讨论。**

**本论文主要创新点包含以下几点：**

1. 在综合利用各种资料的基础上，通过参考国内外针对中尺度对流系统（MCS）的统计分类标准，确立适合于江淮流域甚至我国上空的中尺度对流系统（MCS）的分类标准，采用此标准对江淮流域上空的 2007 年 6 月底到 7 月初之间的中尺度对流系统（MCS）进行统计分析。
2. 对每类典型个例从天气诊断分析进行详细分析研究，提出各类型的天气诊断分析方面的特点，为实际的暴雨预警，预报工作提供一定的参考价值。
3. 在统计得到的江淮流域上空的中尺度对流系统（MCS）中挑选典型

个例，采用不同资料（重点加入雷达同化资料），利用 WRF 模式进行模拟分析工作，探讨中尺度系统的结构特征。



## 第二章 江淮流域中尺度对流系统（MCS）的统计分类

**摘要：**本章首先确立 2007 年江淮流域梅雨期 TBB 分类判定标准和雷达资料分类判断标准，对 2007 年 6 月 29 日至 7 月 9 日（世界时）江淮流域 MCS 进行了统计分析，共统计出 48 个 MCS 个例（其中  $M\beta CS$  38 个，占 79.2%， $M\alpha CS$  10 个，占 20.8%）和 4 类 MCS 雷达分类型（7 个 MCS 没有雷达反射率回波资料，41 个 MCS 的雷达反射率回波形态类型共分为 4 类：虚线型，3 个个例；散面型，11 个个例；实面型，21 个个例；实线型，6 个个例）。MCS 从淮河流域到长江流域都有分布，MCS 多生成于江淮流域中游地区，大部分 MCS 由生成地生成后向偏东方向移动。MCS 生成时刻的日变化规律与大气气温日变化规律成正位相分布，MCS 生成个数在凌晨黎明前后达到低谷，在午后前后达到高峰，整个下午时段是江淮流域 MCS 的生成高峰段。MCS 的消亡时刻的日变化与生成时刻相反。共有 5 类天气背景形势有利于 MCS 的生成和发展：西风（短波）槽（前）系统；副高边缘系统；低空急流；低空风场切变；（西风槽）低涡系统。大部分个例受以上两种系统共同作用。

### 2.1 引言

Maddox (1980) 最早根据红外云图上云团的形状、尺度和生命期特征对中尺度对流复合体（MCCs）进行了定义。Augustine 和 Howard (1988) 对 Maddox 的中尺度对流复合体（MCCs）定义进行了补充和修改，并给出了中尺度对流系统（MCS）的定义：凡是水平尺度在 10~500 km 范围，生命期 10 小时左右，且在生命期内有明显的对流活动的降水性风暴系统就是中尺度对流系统（MCS）。

Anderson 和 Arritt (1998) 从形状上对  $\alpha$  尺度的中尺度对流系统（MCS）进行了分类，以偏心率的大小为标准将中尺度对流系统（MCS）细分为中尺度对流复合体（MCCs）和持续性加长对流系统（PECSs），两者区别仅仅在于红外云图的形状，持续性加长对流系统（PECSs）又称为线性中尺度对流系统（Linear MCS）。Jirak 等 (2003) 综合 Maddox, Augustine 和 Howard, Anderson 和 Arritt 的分类标准，分别对  $\alpha$ ,  $\beta$  尺度的 MCS 从形状、尺度和生命期特征为标准进行

了分类, 将中尺度对流系统 (MCS) 分为中尺度对流复合体 (MCCs), 持续性加长对流系统 (PECSs),  $\beta$  中尺度圆形对流系统 ( $M\beta$  CCSs),  $\beta$  中尺度加长对流系统 ( $M\beta$  ECSs), 前两者属于  $\alpha$  中尺度, 后两者属于  $\beta$  中尺度。Parker 和 Johnson (2000) 指出合适的中尺度对流系统 (MCS) 时间尺度分类下限为  $f^1$ , 在中纬度其大约为 3 小时。Bluestein 和 Jain (1985) 对强飑线 (此处飑线即为线性中尺度对流系统, Linear MCS) 的雷达回波类型进行分类, 将其分为虚线型 (Broken Line), 向后发展型 (Back Building), 散面型 (Broken Areal), 实面型 (Embedded Areal)。Bluestein 等 (1987) 对奥克拉荷马州的弱飑线形态进行研究, 指出散面型 (Broken Areal) 是弱飑线的主要形式。Jirak 等 (2003) 利用雷达资料, 分别从层状降水存在与否类型: 实面型 (Embedded), 非实面型 (not Embedded), 对流单体的分布类型: 线性 (Line), 面型 (Areal), 结合型 (Combination), 对流簇之间的相互影响类型: 孤立型 (Isolated), 合并型 (Merger), 非合并型 (None-Merger) 将中尺度对流系统 (MCS) 的雷达类型组合分类为 17 类, 并对 Bluestein 和 Jain (1985), Blanchard (1990), Loehrer 和 Johnson (1995) 的分类分型进行了归类分类。

李玉兰等 (1989) 利用 1983~1986 年的云图照片对中国西南和华南地区的中尺度对流复合体 (MCC) 进行普查, 找出 5 个中尺度对流复合体 (MCC), 并与美国的中尺度对流复合体 (MCC) 进行分析比较, 发现中国中尺度对流复合体 (MCC) 数量较少, 生成地集中, 生命史较短。马禹等 (1997) 统计普查了 1993~1995 年夏季中国及其邻近地区的中尺度对流系统 (MCS), 共统计得到 234 个  $M\alpha$  CS 和 585 个  $M\beta$  CS, 并且给出了代表性较好的 MCS 的地理分布。陶祖钰等 (1998) 对 1995 年中国的  $M\alpha$  CS 进行普查分析, 发现 6~8 月中国及其沿海地区共发生了 102 个  $M\alpha$  CS, 其主要分布在华南西部, 西川盆地附近和黄河及长江中下游地区。郑永光等 (2004) 普查了 1993 年 7~8 月和 1993 年~1996 年黄海及其周边地区  $M\alpha$  CS 的发生情况, 用合成和客观诊断分析的方法分别考差了中尺度对流系统 (MCS) 两个活跃期和两对相对静寂期的大尺度环境场的热力和动力条件。过仲阳等 (2003), 林珲等 (2006) 用计算机自动追踪的方法揭示了青藏高原中尺度对流系统 (MCS) 的活动及其东移传播特征。师春香等 (2000) 普查统计了 1998 年长江流域大水期间的中尺度对流系统 (MCS), 指出长江流域这场罕

见的大水是由177个M<sub>β</sub>CS和138个M<sub>α</sub>CS对流云团直接造成的。费增坪等（2005）对2003年淮河流域洪水期间的中尺度对流系统（MCS）进行了普查分析。郑永光（2007，2008）利用红外云图TBB资料对北京及其周边地区，以及中国及其周边地区夏季中尺度对流系统（MCS）进行普查分析。白洁（1997）采用模式匹配算法，方兆宝（2004）采用面积重叠算法、模式匹配算法追踪中尺度对流系统（MCS）云团。

江淮流域位于我国东部地区，夏季六、七月份受西风带，热带，副热带系统共同影响，在有利的大尺度环流形势下，常常会有中尺度对流系统（Mesoscale Convective System，简称MCS）的发生发展。国内外许多研究表面，中纬度地区的致洪暴雨的发生往往与中尺度对流系统（MCS）的活动密切相关。而国内有关江淮流域梅雨期中尺度对流系统（MCS）的研究内容并不多，多数是比较零散的单次暴雨过程中对于中尺度对流系统（MCS）的分析，缺少针对中尺度对流系统（MCS）系统性的探讨和深入研究。因此，开展针对江淮流域梅雨期的暴雨研究很有必要，尤其是针对中尺度对流系统（MCS）的研究显得尤为迫切。鉴于此，本论文将采用卫星TBB资料和多普勒雷达反射率资料对2007年6月底到7月上旬江淮流域的中尺度对流系统（MCS）进行了系统性的普查，分类研究。

## 2.2 江淮流域中尺度对流系统（MCS）的分类标准

### 2.2.1 TBB资料判定分类标准

中尺度对流系统（MCS）在世界范围内广泛存在，不过也存在相对集中地区，如北美，非洲等地区。中尺度对流系统（MCS）在各地的表现形式以及带来的强对流天气有所差别，在北美主要表现为风暴、龙卷，在非洲主要表现为线状的飑线，而在中国大陆则多表现为强降水。学者对各地中尺度对流系统（MCS）在统计时候也相应采取了不同标准。

Maddox（1980）首先根据北美上空 $\alpha$ 中尺度对流系统红外卫星云图特征提出中尺度对流系统（MCC）的分类标准，以红外卫星云图云顶温度 $\leq -32^{\circ}\text{C}$ 作为MCS的判定标准。Augustine和Howard（1988）发现 $-52^{\circ}\text{C}$ 的冷云盖覆盖了大多数MCC内强降水发生区域，以Maddox的定义， $\alpha$ 中尺度对流系统中会包括一个或者多个处于不同发展阶段的 $\beta$ 中尺度，或者 $\gamma$ 中尺度的对流系统，所以对Maddox的定

义做出修改，将 $\leq -32^{\circ}\text{C}$ 的条件改为了 $\leq -52^{\circ}\text{C}$ ，见表2.1。

表2.1 Augustine和Howard修订过的中尺度对流复合体 (MCC) 定义标准

物理特点	
尺寸	连续低红外温度小于等于 $-52^{\circ}\text{C}$ 的云团面积必须大于等于 $50\,000\text{ km}^2$
初生时刻	(云团) 大小初次满足尺寸定义标准的时刻
持续时间	满足尺寸定义标准的时间大于等于6小时
最大延伸范围	红外温度小于等于 $-52^{\circ}\text{C}$ 的连续冷云团延伸到达的最大范围
形状	最大延伸范围时偏心率(短轴与长轴长度之比)大于等于0.7
消亡时刻	大小不再满足尺寸定义标准

引自Augustine和Howard (1988)

表2.2 依据红外卫星数据分析的中尺度对流系统 (MCS) 定义标准

中尺度对流系统 (MCS) 种类	尺寸	持续时间	形状
中尺度对流复合体 (MCC)	冷云区域温度小于等于 $-52^{\circ}\text{C}$ 的面积大于等于 $50\,000\text{ km}^2$	满足尺寸定义标准大于等于6 小时	云盖延伸范围最大时刻偏心率大于 等于0.7
持续性加长对流系统 (PECSs)	同上	同上	云盖延伸范围最大时刻偏心率大于 等于0.2, 小于0.7
$\beta$ 中尺度圆形对流系 统 ( $M\beta CCS$ )	冷云区域温度小于等于 $-52^{\circ}\text{C}$ 的面积大于等于 $30\,000\text{ km}^2$ 并 且最大面积超过 $50\,000\text{ km}^2$	满足尺寸定义标准大于等于3 小时	云盖延伸范围最大时刻偏心率大于 等于0.7
$\beta$ 中尺度加长对流系 统 ( $M\beta ECSs$ )	同上	同上	云盖延伸范围最大时刻偏心率大于 等于0.2, 小于0.7

引自Jirak等 (2003)

Anderson和Arritt (1998) 又加入对中尺度对流系统 (MCS) 形状的考虑，按其偏心率大小将MCC分为中尺度对流复合体 (MCCs)，偏心率大于等于0.7；和持续性加长对流系统 (PECSs)，偏心率介于0.2到0.7之间，又称为线性中尺度对流系统 (Linear MCS)。两者区别仅仅在于红外云图的形状。Jirak等 (2003) 综合采纳Maddox, Augustine和Howard, Anderson和Arritt的分类标准，加入对 $\beta$  中尺度对流系统形状的考虑，提出以 $-52^{\circ}\text{C}$ 作为云顶温度阀值，以偏心率0.2, 0.7 作为对线性和近圆形中尺度对流系统 (MCS) 的判别标准，分别对 $\alpha$ ,  $\beta$  中尺度的MCS从形状、尺度和生命期特征为标准进行了分类，将中尺度对流系统 (MCS) 分为中尺度对流复合体 (MCCs)，冷云盖温度小于等于 $-52^{\circ}\text{C}$  面积大

于 $50\ 000\ km^2$ , 持续时间超过6小时, 面积伸展最大时刻偏心率大于等于0.7; 持续性加长对流系统（PECSs）, 冷云盖温度小于等于 $-52^\circ\text{C}$ 面积大于 $50\ 000\ km^2$ , 持续时间超过6小时, 面积伸展最大时刻偏心率大于等于0.2, 小于0.7;  $\beta$  中尺度圆形对流系统（ $M\beta$  CCSs）, 冷云盖温度小于等于 $-52^\circ\text{C}$ 面积大于 $30\ 000\ km^2$ , 且最大面积超过 $50\ 000\ km^2$ , 持续时间超过3小时, 面积伸展最大时刻偏心率大于等于0.7;  $\beta$  中尺度加长对流系统（ $M\beta$  ECSs）, 冷云盖温度小于等于 $-52^\circ\text{C}$ 面积大于 $30\ 000\ km^2$ , 且最大面积超过 $50\ 000\ km^2$ , 持续时间超过3小时, 面积伸展最大时刻偏心率大于等于0.2, 小于0.7。前两者属于 $\alpha$  中尺度, 后两者属于 $\beta$  中尺度, 见表2.2。

国内学者针对中尺度对流系统（MCS）的普查分析研究开展的比较早, 在普查中尺度对流系统（MCS）时候也采取了不同的标准。陶祖钰（1998）针对1995年中国 $\alpha$  中尺度的MCS统计时采取了以 $-32^\circ\text{C}$ 冷云盖、3个纬距的短轴长度、0.5的椭圆率（短长轴之比）的判别标准；项续康（1993）对江淮地区统计则采用 $-60^\circ\text{C}$ 作为标准, 而项续康（1995）对中国南方（ $30^\circ\text{N}$ 以南地区）中尺度对流复合体（MCC）普查时则采用了Maddox（1980）的标准, 不过其将椭圆率修改为0.6; 石定朴（1996）则定义中尺度对流复合体（MCC）为 $-50^\circ\text{C}$ 冷云盖面积超过 $50,0000\ km^2$ 的云团；段旭（2004）则将 $-32^\circ\text{C}$ 冷云盖短轴长度在1-2个经纬度的云团定义为 $\beta$  中尺度对流系统（ $M\beta$  CS）, 超过2个经纬度的定义为 $\alpha$  中尺度对流系统（ $M\alpha$  CS）,  $-32^\circ\text{C}$ 冷云盖短轴在3个经纬度以上, 且 $-54^\circ\text{C}$ 冷云盖短轴在2个经纬度以上的云团定义为中尺度对流复合体（MCC）。郑永光（2008）在统计中国及其周边地区近十年来夏季中尺度对流系统（MCS）的分布以及日变化特征中指出, 用TBB小于等于 $-52^\circ\text{C}$ 来识别中国及其周边地区夏季大气中的中尺度对流系统（MCS）, 是因为在对2003年淮河流域强降水与TBB关系的研究中发现TBB小于等于 $-52^\circ\text{C}$ 的中尺度对流系统（MCS）是导致淮河流域强降水的重要天气系统。费增坪等（2005）对2003年淮河大水期间中尺度对流系统（MCS）普查分析时候采取了比较严格的标准（表2.3）, 以 $-32^\circ\text{C}$ 为连续冷云盖的温度阀值, 椭圆率要求为0.5, 以 $10^5\ km^2$ 和直径 $20\ km$ 为 $\alpha$ 、 $\beta$  中尺度对流系统的尺寸标准, 其标准准则接近Augustine和Howard（1988）针对Maddox（1980）中尺度对流复合体（MCC）的判定标准的修改标准（表2.1）, 但也吸收了Jirak等（2003）提出的在

Augustine 和 Howard (1988) 标准基础上加入对 MCS 云团偏心率的考虑 (表 2.2)。

表 2.3 2003 年淮河流域 M $\alpha$  CS 和 M $\beta$  CS 的判定标准

判据	M $\alpha$ CS	M $\beta$ CS
最小尺度	TBB ≤ -32 °C 的连续冷云区面积 > 10 <sup>5</sup> km <sup>2</sup>	TBB ≤ -32 °C 的连续冷云区直径 20 km 以上
持续时间	不限	
形状	-32 °C 的连续冷云区达到最大范围时, 椭圆率 (短轴/长轴) ≥ 0.5	
初生时刻	从 β 尺度的对流云团开始算起	
形成时刻	开始满足最小尺度的时刻	
最大范围 (成熟) 时刻	连续冷云区 (TBB ≤ -32 °C) 达到其最大面积的时刻	
消亡时刻	不再满足最小尺度的时刻	
路径	-32 °C 冷云盖的面积中心 (及形心) 位置	

引自费增坪等 (2005)

本文拟采用人工目视判别方法对 2007 年江淮流域夏季中尺度对流系统 (MCS) 进行普查分析。根据对 2007 年江淮流域夏季中尺度对流系统 (MCS) 初步普查, 发现如果以 -32 °C 为冷云盖挑选温度阀值, 中国南方的中尺度对流系统 (MCS) 会呈现较为离散的分布, 难以实施人工目视判别法对其进行普查分析, 而以 -50 °C 左右温度为冷云盖温度阀值, 则云团呈现较为理想的块状到带状分布形式, 有利于目视判别法挑选中尺度对流系统 (MCS)。-50 °C 冷云盖也与强降水的覆盖范围比较吻合, 这与郑永光 (2008) 在统计中国及其周边地区近十年来夏季中尺度对流系统 (MCS) 的分布以及日变化特征中使用的标准一致。此外, 初步普查发现, 2007 年江淮流域夏季的中尺度对流系统 (MCS) 多成带状到片状分布, 缺乏类似于北美上空发展完善, 近似圆形的中尺度对流系统 (MCS), 这与北美上空多数中尺度对流系统近似圆形的结论有所差异。加之本文采用人工目视判别, 针对中尺度对流系统 (MCS) 冷云盖的偏心率统计不如采用计算机自动识别方法 (如模式匹配算法, 面积重叠法等) 有效, 故本文在统计研究时候不考虑中尺度对流系统 (MCS) 偏心率的大小对分类的意义, 对于中尺度对流系统尺度上的分类, 采用面积标准和直径标准来衡量, 将发展过程中面积超过 (包含) 10<sup>5</sup> km<sup>2</sup> 的中尺度对流系统 (MCS) 定义为 α 中尺度对流系统 (M $\alpha$  CS), 将直径超过 20 km, 发展过程中面积不超过 10<sup>5</sup> km<sup>2</sup> 的中尺度对流系统 (MCS) 定义为 β 中尺度对流系统 (M $\beta$  CS)。初步普查还发现, 3 小时是较

好的可以用来衡量2007年江淮流域梅雨期中尺度对流系统（MCS）持续时间的定义标准，持续时间3小时以内的的中尺度对流系统（MCS）一般都发展不强烈，造成的强对流天气，诸如强降水也很少，这与Parker和Johnson（2000）指出的合适的中尺度对流系统（MCS）时间尺度分类下限为 $f^1$ ，在中纬度其大约为3小时的结论相一致。

综上我们考虑采取类似于费增坪等（2005）针对中尺度对流系统（MCS）的普查分类标准（见表2.4），以-50 °C为冷云盖温度挑选阀值，以3小时为中尺度对流系统（MCS）的持续时间标准下限，以发展过程中连续冷云区面积超过（包含） $10^5 \text{ km}^2$ 为 $\alpha$  中尺度对流系统的尺度标准，以发展过程中连续冷云区直径大于等于20km，面积不超过 $10^5 \text{ km}^2$ 为 $\beta$  中尺度对流系统的尺度标准。

表2.4 2007年淮河流域M $\alpha$  CS和M $\beta$  CS的判定标准

判据	M $\alpha$ CS	M $\beta$ CS
最小尺度	TBB≤-50 °C的连续冷云区面积> $10^5 \text{ km}^2$	TBB≤-50 °C的连续冷云区直径20 km以上，面 积< $10^5 \text{ km}^2$
持续时间	≥3 h	
形状	不限	
初生时刻	从 $\beta$ 尺度的对流云团开始算起	
形成时刻	开始满足最小尺度的时刻	
最大范围（成熟）时刻	连续冷云区（TBB≤-50 °C）达到其最大面积的时刻	
消亡时刻	不再满足最小尺度的时刻	
路径	-50 °C冷云盖的面积中心（及形心）位置	

## 2.2.2 雷达资料判定分类标准

国外尤其是北美很早就建立起完善的雷达观测网络，针对强对流天气的雷达观测资料时空分辨率都很高，这就十分有利于北美学者采用雷达反射率资料对中尺度对流系统（MCS）的发展演变特征、时空结构进行分析研究。北美学者最早是首先使用雷达反射率回波图对北美上空的中尺度对流系统（MCS）的水平分布结构进行了分类统计研究，从不同的角度对不同的中尺度对流系统（MCS）进行了结构上的归类，并对各种归类方法进行了比较。Bluestein和Jain（1985）对强飑线（此处飑线即为线性中尺度对流系统，Linear MCS）的雷达回波类型进

行分类(见图2.1左),将其分为虚线型(Broken Line),向后发展型(Back Building),散面型(Broken Areal),实面型(Embedde Areal)。Bluestein等(1987)对奥克拉荷马州的弱飑线形态进行研究,指出散面型(Broken Areal)是弱飑线的主要形式。Jirak等(2003)利用雷达资料,分别从层状降水存在与否类型:实面型(Embedded),非实面型(not Embedded),对流单体的分布类型:线性(Line),面型(Areal),结合型(Combination),对流簇之间的相互影响类型:孤立型(Isolated),合并型(Merger),非合并型(None-Merger)将中尺度对流系统(MCS)的雷达类型组合分类为17类,并对Bluestein和Jain(1985),Blanchard(1990),Loehrer和Johnson(1995)的分类分型进行了归类分类。

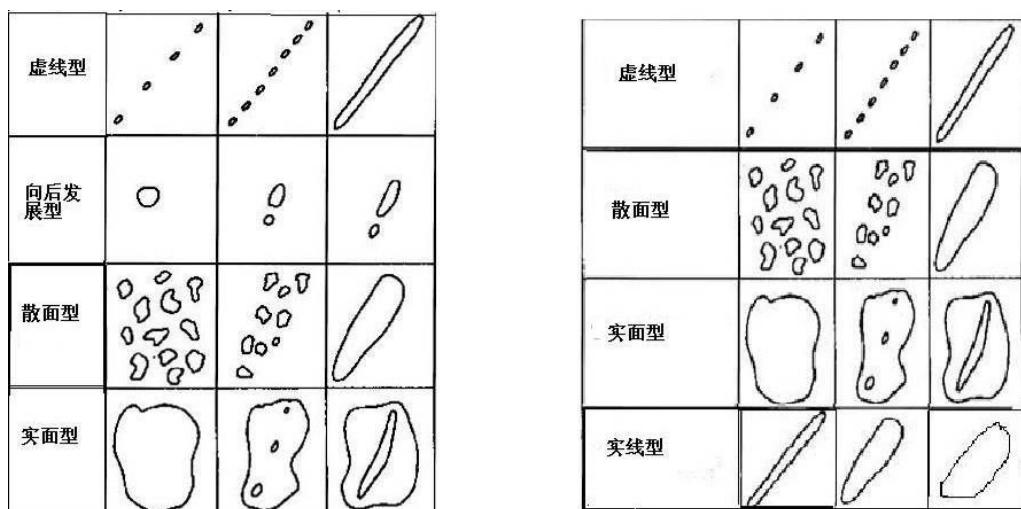


图 2.1 左图引自 Bluestein 和 Jain (1985), 理想飑线雷达回波形态分类; 右图是本文采用的雷达回波形态分类示意图。

国内由于雷达观测网络建立时间较晚,目前利用雷达观测资料对江淮流域梅雨期中尺度对流系统(MCS)的组织结构进行分类的研究工作较少,仅有的一些研究多集中于利用雷达反射率,雷达径向风资料针对单个的对流系统或单次的对流过程进行分析研究。本文尝试利用2007年雷达反射率资料对江淮流域夏季的中尺度对流系统(MCS)进行全面的较长时间范围内的统计分类研究工作。利用雷达反射率资料初步的分析研究发现,江淮流域甚至中国南方上空的中尺度对流系统(MCS)的雷达反射率反演图呈现类似于北美上空强飑线(即线性中尺度对流系统Linear MCS)的分类结构,北美上空强飑线分为虚线型(Broken Line),向

后发展型（Back Building），散面型（Broken Areal），实面型（Embedde Areal），但二者有差异（图2.1）。中尺度对流系统（MCS）发展演变过程中雷达回波类型会随之发生改变，常出现某个中尺度对流系统（MCS）生命史中会处于不同分类结构的现象，但其初期的雷达回波类型常常决定着其主要的雷达回波类型结构，故本文在对江淮流域梅雨期中尺度对流系统（MCS）进行分类时候以其初期的雷达回波类型为准。此外，受雷达反射率资料限制，其反射率等值线图只有在3000-5500m高空与TBB云图资料对应较好，尤其是在5500m高空，雷达回波图大值带（30dBz以上）与TBB云图上中尺度对流系统（MCS）对流中心位置、范围较吻合，故针对雷达回波图的分类是指对5500m高空雷达回波图的结构分类。

综上，本文采用类似于Bluestein和Jain（1985）对强飑线（此处飑线即为线性中尺度对流系统，Linear MCS）的雷达回波类型的分类方式，考虑5500m高空雷达回波图呈现的形状，将2007年江淮流域梅雨期中尺度对流系统（MCS）发生初期的雷达反射率回波图分为虚线型，实线型，散面型，实面型四类（见图2.1右）。其中，虚线型是指在系统发展初期，雷达反射率回波图上反射中心呈线性排列，但其反射中心不连续，整体的雷达回波图呈虚线型；实线型是指在系统发展初期，雷达反射率回波图上反射中心呈线性排列，且其反射中心连续，整体的雷达回波图呈实线型；散面型是指在系统发展初期，雷达反射率回波图上反射中心呈片（面）状分布，但其反射中心不连续，整体的雷达回波图呈散面型；实面型是指在系统发展初期，雷达反射率回波图上反射中心呈片状分布，且其反射中心连续，整体的雷达回波图呈实面型。

### 2.3 江淮流域中尺度对流系统（MCS）个例选取和分类

本文采用2007年6月29日至7月9日（世界时）每小时一次的风云2C卫星TBB资料，每半小时一次的分辨率为0.01度的雷达格点反射率资料，每天4次的 $1^\circ \times 1^\circ$ 的NCEP格点再分析资料，每3小时一次的地面观测资料和常规探空资料对江淮流域（ $28.87\text{--}35.99^\circ\text{N}$ ， $109.48\text{--}121.66^\circ\text{E}$ ）中尺度对流系统（MCS）进行了统计分析。

### 2.3.1 TBB 资料分析以及 MCS 个例

利用每小时一次的风云 2C 卫星 TBB 资料, 依照表 2.4 中尺度对流系统 (MCS) 的统计标准, 统计 2007 年 6 月 29 日 00 时 (世界时, 简写为 6.29.00) ~7 月 9 日 23 时 (世界时, 简写为 7.9.23) 共 264 时次, 其中 TBB 资料缺测时次为 7.7.1, 实际统计 263 时次, 资料完整率 99.7%。

6 月 29 日 ~7 月 9 日的 11 天共计 MCS 48 个, 日均 4.7 个, 其中  $M\beta CS$  38 个, 占 79.2%,  $M\alpha CS$  10 个, 占 20.8%。逐日的中尺度对流系统 (MCS) 的分布情况为表 2.5。

表 2.5 2007 江淮流域中尺度对流系统 (MCS) 统计分类表

MCS 种类/日期	6.29	6.30	7.1	7.2	7.3	7.4	7.5	7.6	7.7	7.8	7.9	总数
$M\alpha CS$ 个数	0	1	0	1	1	2	0	0	1	2	2	10
$M\beta CS$ 个数	6	3	3	3	5	1	4	3	5	3	2	38
MCS 总个数	6	4	3	4	6	3	4	3	6	5	4	48

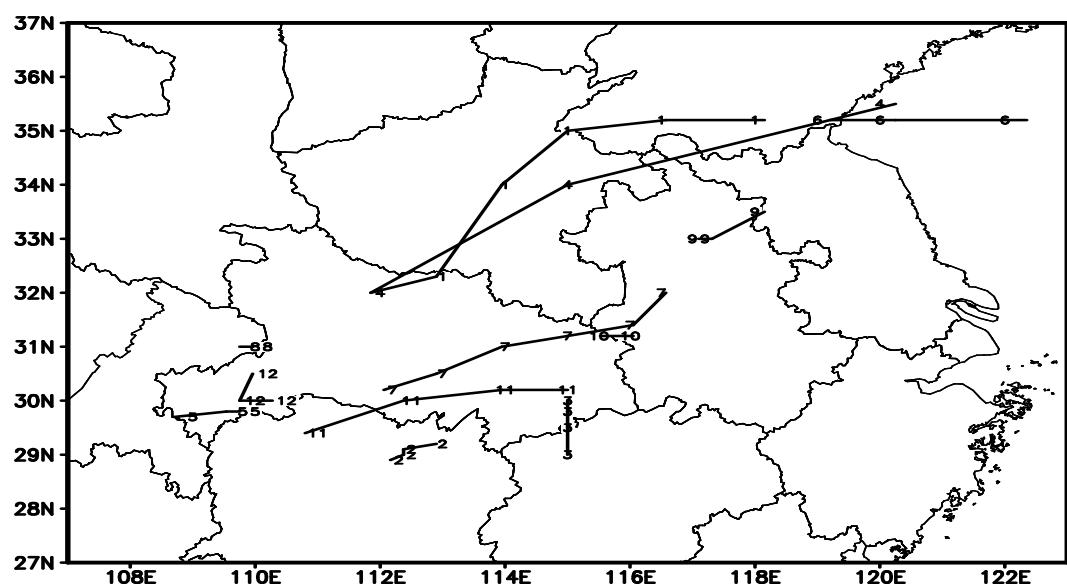
2007 年江淮流域梅雨期中尺度对流系统 (MCS) 以  $\beta$  中尺度居多,  $\alpha$  中尺度 MCS 较少 (表 2.5)。统计时间段内逐日发生的中尺度对流系统 (MCS) 也以  $\beta$  中尺度居多,  $\alpha$  中尺度 MCS 较少甚至没有发生 (有 4 天没有发生  $M\alpha CS$ , 单日内  $M\alpha CS$  发生个数最多为 2 个)。发生  $M\beta CS$  较少的单日内少有  $M\alpha CS$  的发生发展, 而发生  $M\beta CS$  较多的单日内一般会有  $M\alpha CS$  的发生发展, 这可能说明  $\alpha$ 、 $\beta$  中尺度对流系统发生发展的天气背景条件较为一致, 但  $M\alpha CS$  的发生发展对环境条件要求较高,  $M\beta CS$  发生发展后在有利的外部条件下才能进一步发展成  $M\alpha CS$ 。

统计期间详细的不同尺度中尺度对流系统 (MCS) 分布为:

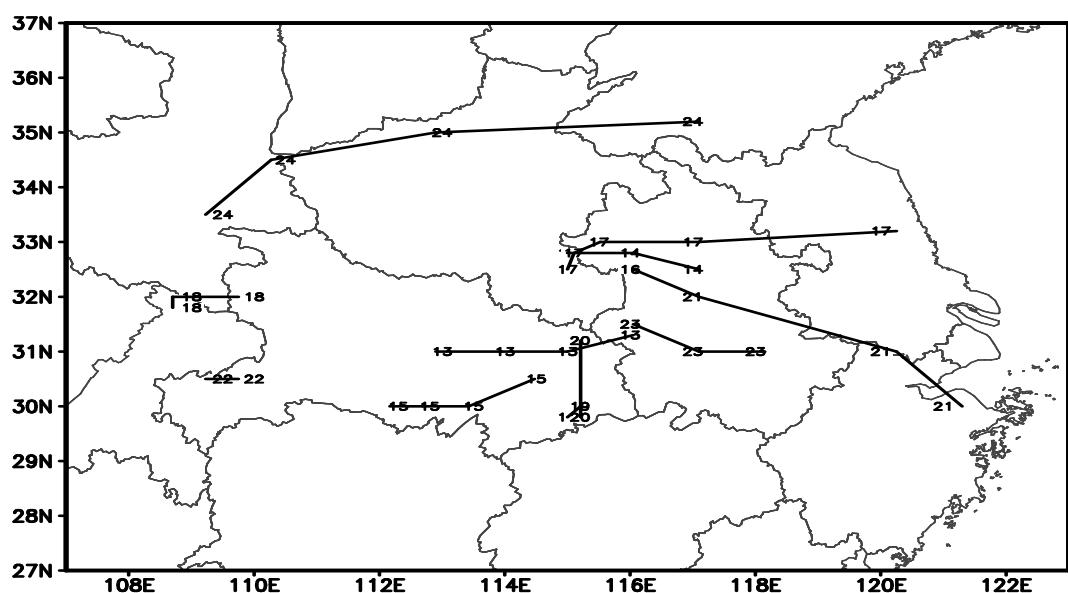
10 个  $M\alpha CS$  分别为 (表 2.7—2.10): 6.30.17-7.2.2, 33h; 7.2.8-7.3.6, 22h; 7.3.7-7.4.2, 19h; 7.4.3-7.4.17, 14h; 7.4.10-7.5.10, 24h; 7.7.7-7.7.22, 15h; 7.8.5-7.8.21, 16h; 7.8.12-7.9.5, 17h; 7.9.9-7.9.23, 14h; 7.9.11-7.9.23, 12h。

38 个  $M\beta CS$  分别为 (表 2.7—2.10): 6.29.5-6.29.17, 12h; 6.29.6-6.29.10, 4h; 6.29.6-6.29.11, 5h; 6.29.8-6.30.9, 25h; 6.29.19-6.30.0, 5h; 6.29.20-6.30.0, 4h;

6.30.5-6.30.15, 10h; 6.30.22-7.1.2, 4h; 7.1.13-7.2.0, 9h; 7.1.19-7.2.0, 5h;  
 7.1.21-7.2.8, 11h; 7.2.7-7.2.13, 6h; 7.2.8-7.2.16, 8h; 7.2.16-7.3.9, 17h; 7.3.0-7.3.14,  
 14h; 7.3.3-7.3.6, 3h; 7.3.7-7.3.19, 12h; 7.3.12-7.3.15, 3h; 7.3.18-7.4.13, 19h;  
 7.4.21-7.6.0, 27h; 7.5.10-7.5.15, 5h; 7.5.11-7.5.14, 3h; 7.5.12-7.5.19, 7h;  
 7.5.14-7.5.21, 7h; 7.6.5-7.6.14, 9h; 7.6.17-7.7.0, 7h; 7.6.18-7.6.22, 4h; 7.7.2-7.7.6,  
 4h; 7.7.2-7.7.13, 11h; 7.7.7-7.7.17, 10h; 7.7.17-7.8.8, 15h; 7.7.20-7.8.1, 5h;  
 7.8.5-7.8.9, 4h; 7.8.5-7.8.11, 6h; 7.8.6-7.8.10, 4h; 7.9.1-7.9.10, 9h; 7.9.1-7.9.12,  
 11h。



(a)



(b)

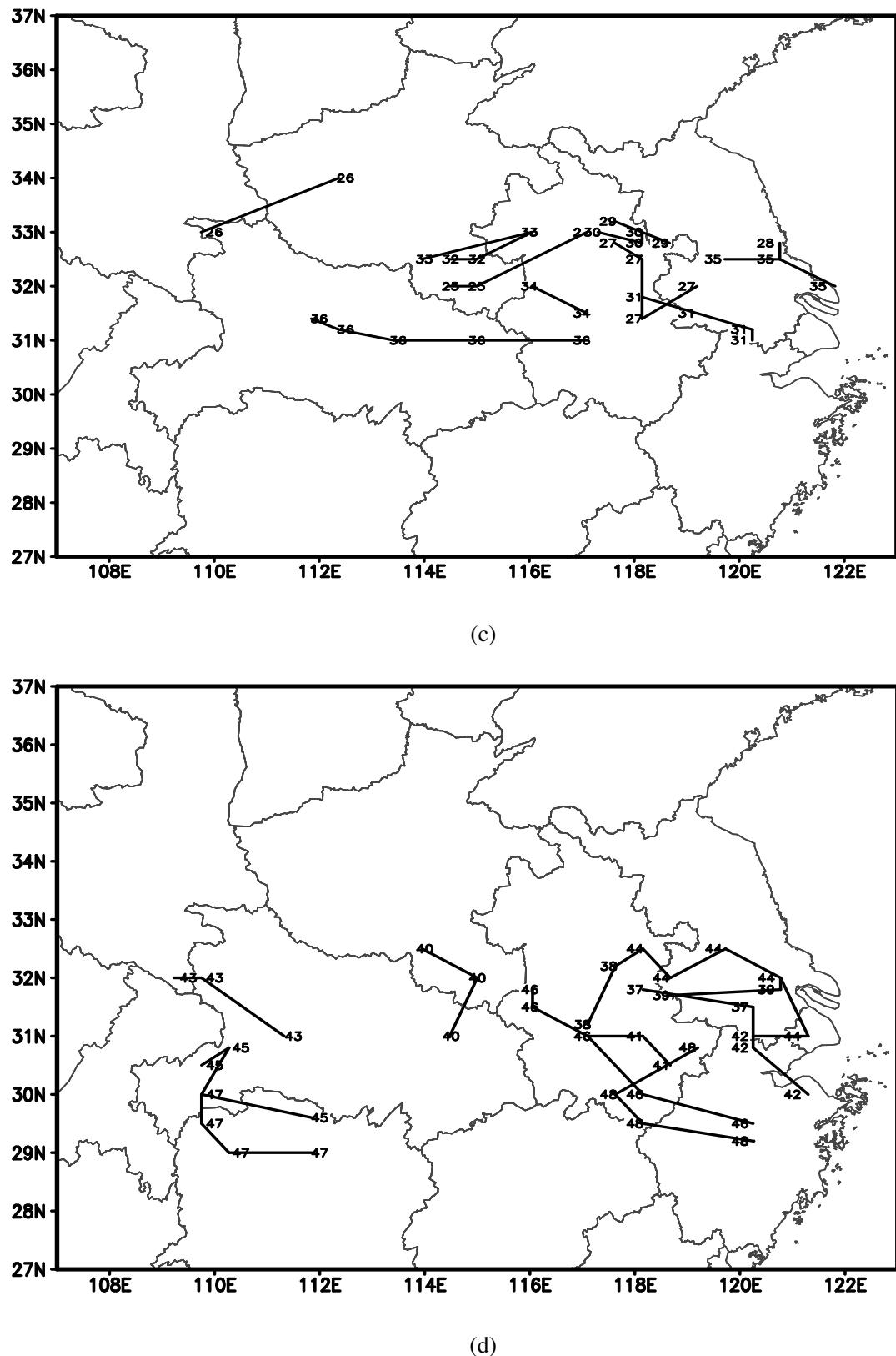


图 2.2 2007 年江淮流域 M<sub>α</sub>CS 和 M<sub>β</sub>CS 的移动路径图: (a) 中尺度对流系统 MCS 1—12 个例移动路径图; (b) 中尺度对流系统 MCS 13—24 个例移动路径图; (c) 中尺度对流系统 MCS 25—36 个例移动路径图; (d) 中尺度对流系统 MCS 37—48 个例移动路径图。

2007 年江淮流域梅雨期中尺度对流系统（MCS）分布范围较广（图 2.2），广泛分布于川、晋、陕、豫、皖、鲁、苏、沪、浙、渝、湘、鄂、黔等省（市）份，其中，从四川到陕西一带分布相对较少，集中于鄂、皖、豫、苏、沪等省市，以鄂、皖为最。

中尺度对流系统（MCS）从淮河流域到长江流域都有分布，中尺度对流系统（MCS）多生成于江淮流域中上游地区，直接生成于江淮流域下游地区的中尺度对流系统（MCS）个例较少，大部分中尺度对流系统（MCS）由生成地生成后向偏东方向移动，淮河流域以北到淮河流域的中尺度对流系统（MCS）移向以偏东方方向到偏东北方向为主，淮河流域以南到长江流域的中尺度对流系统（MCS）移向以偏东方向到偏东南方向为主。

维持时间较短（6 小时以内）、尺度较小（不超过三百公里）的  $\beta$  中尺度对流系统（MCS）一般移动范围较小，倾向于在生成地附近发生发展，其所产生的对流天气较弱，降水较少，个别个例甚至无降水。维持时间较长（6 小时以上）、尺度较大（超过三百公里）的  $\alpha$ 、 $\beta$  中尺度对流系统（MCS）一般移动范围较大，在其生成后发生发展过程中覆盖较大范围地区，产生较强的对流天气和降水。多数  $\alpha$  中尺度对流系统（MCS）覆盖范围超过几个省份，发生发展过程降水强烈。

对流和降水越强烈的中尺度对流系统（MCS）覆盖范围一般较广，移动范围也较大，但值得注意的是，并不是对流和降水最强烈的中尺度对流系统（MCS）的覆盖范围和移动范围最广，一些覆盖范围并不是很大，降水和对流不是特别强烈的中尺度对流系统（MCS）移动范围较广，在其移动过程中由于移动距离较远，虽然其对流天气和降水不会特别强烈，但是其仍会对较大范围内地区产生影响。

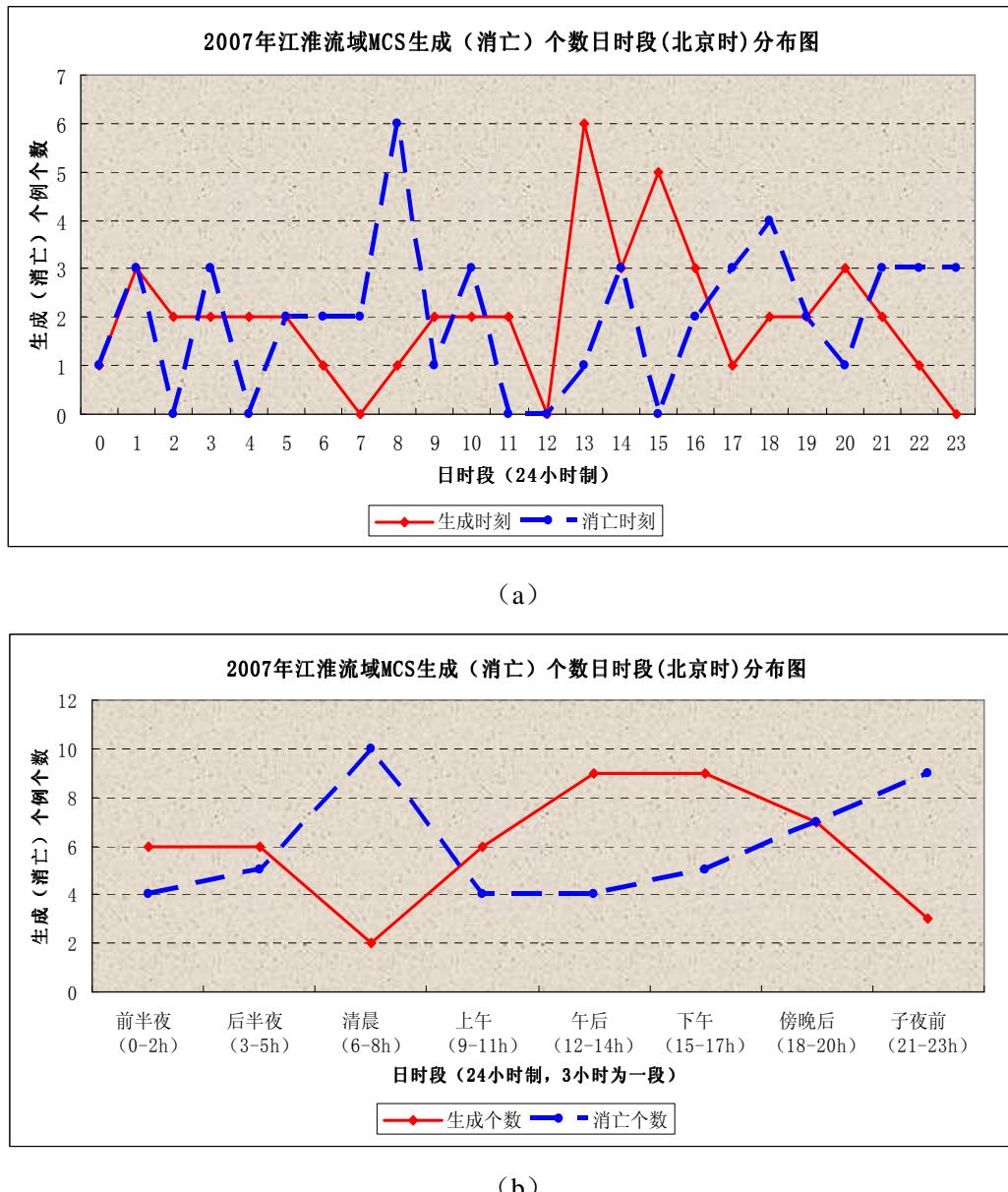


图 2.3 (a) 2007 年江淮流域  $M\alpha$  CS 和  $M\beta$  CS 的生成和消亡个数日时段分布图, 1 小时为一段; (b) 2007 年江淮流域  $M\alpha$  CS 和  $M\beta$  CS 的生成和消亡个数日时段分布图, 3 小时为一段。

江淮流域梅雨期中尺度对流系统 (MCS) 生成与消亡有明显的日变化。总体上江淮流域梅雨期中尺度对流系统 (MCS) 生成时刻高低峰分布与大气气温的日变化规律相一致 (图 2.3): 从凌晨开始, 随着气温的下降江淮流域中尺度对流系统 (MCS) 生成个数逐渐减少, 在凌晨黎明前后达到低谷, 随后随着气温上升生成个数又开始增加, 在午后前后达到高峰, 整个下午时段是江淮流域中尺度对流系统 (MCS) 的生成高峰段, 傍晚后随着气温下降 MCS 生成个数随之走低。

这很有可能说明江淮流域梅雨期中尺度对流系统（MCS）的发生具有明显的热力驱动性质：即江淮流域梅雨期中尺度对流系统（MCS）的发生是在有利的大尺度环境条件下，可能由气温升高产生的热力加热作用而诱发。

统计时间段内江淮流域中尺度对流系统（MCS）的生成时段最高峰期出现在下午（13-17时，北京时，下同，图2.3），有超过三分之一（18个）的江淮流域中尺度对流系统（MCS）生成于此段时间内。后半夜（0-5时）是另一个江淮流域中尺度对流系统（MCS）生成集中期，接近四分之一（12个）江淮流域中尺度对流系统（MCS）生成于此段时间。此外，傍晚后（20时前后）也是江淮流域中尺度对流系统（MCS）生成的高峰期。凌晨黎明前后生成的江淮流域中尺度对流系统（MCS）最少，6-8时三小时内总共只有2个江淮流域中尺度对流系统（MCS）生成。

有趣的是，江淮流域梅雨期中尺度对流系统（MCS）生成和消亡时间的日变化基本相反，在江淮流域中尺度对流系统（MCS）生成高峰期，消亡的江淮流域中尺度对流系统（MCS）数量较少，反之，江淮流域在中尺度对流系统（MCS）的消亡高峰期，生成的江淮流域中尺度对流系统（MCS）也不多。总体上江淮流域梅雨期中尺度对流系统（MCS）的消亡时刻存在与大气气温反位相的统计规律。从凌晨开始，随着气温的降低，江淮流域中尺度对流系统（MCS）消亡个数逐渐增加，在清晨黎明前后达到高峰，随后随着气温的升高江淮流域中尺度对流系统（MCS）消亡个数开始减少，在午后达到低谷，随后又随着气温的降低而增加。这同样很有可能说明江淮流域梅雨期中尺度对流系统（MCS）发生后的维持与发展具有明显的热力驱动性质。

统计时间段内中尺度对流系统（MCS）的消亡时间最高峰期出现在清晨黎明时刻（6-8时，北京时，日变化研究用北京时，图2.3），有接近三分之一（14个）左右的中尺度对流系统（MCS）在此段时间内消亡，仅仅上午8时就有6个中尺度对流系统（MCS）消亡。此外，前半夜到子时（18-23时）也是江淮流域中尺度对流系统（MCS）的另一个消亡高峰期，此段时间内消亡的中尺度对流系统（MCS）也占三分之一左右，达到16个，子夜前（21-23时）三小时内就共有9个中尺度对流系统（MCS）消亡。

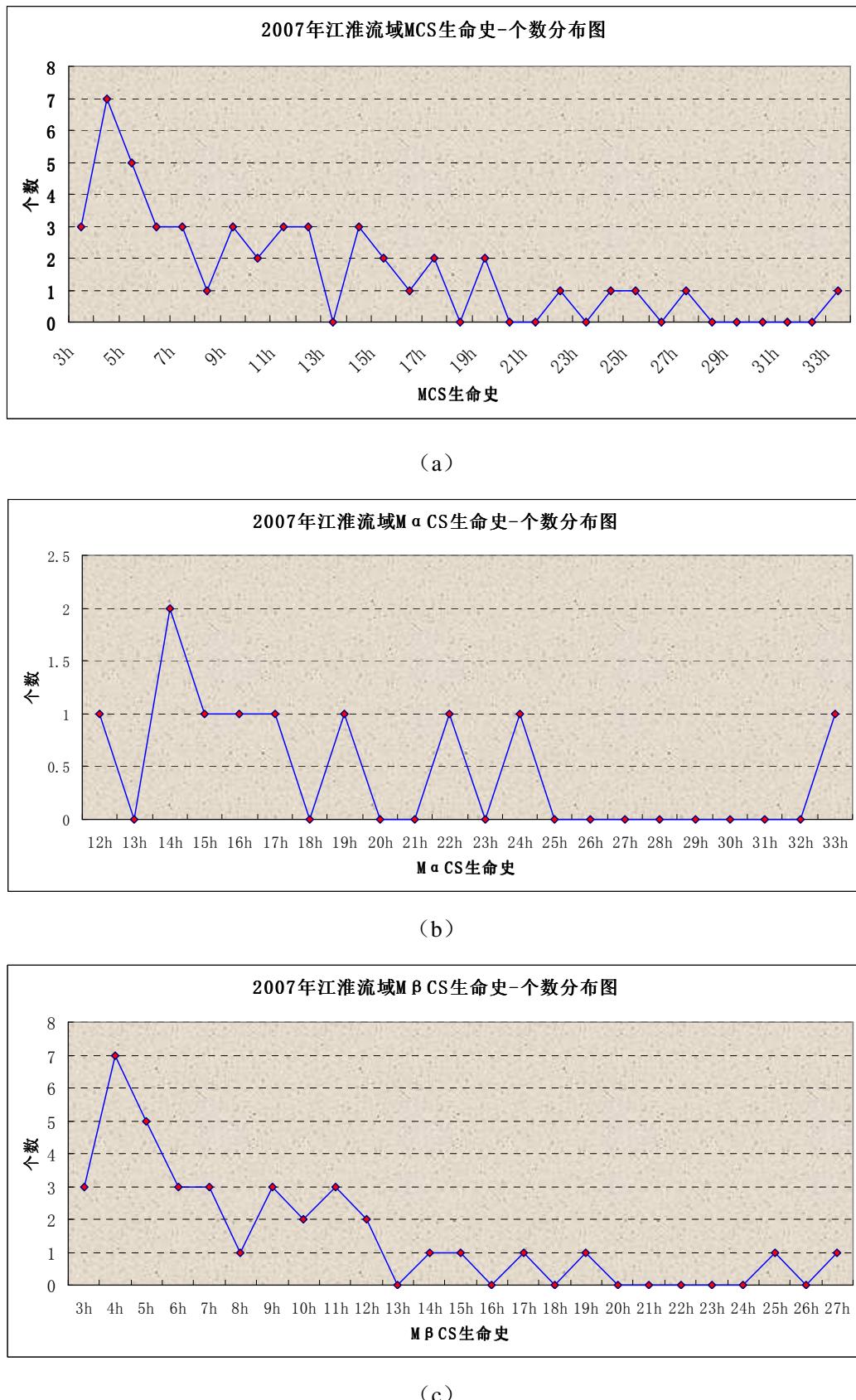


图 2.4 (a) 2007 年江淮流域 MCS 生命史-个数分布图, (b) 2007 年江淮流域 M $\alpha$  CS 生命史-个数分布图, (c) 2007 年江淮流域 M $\beta$  CS 生命史-个数分布图。

2007 年统计时间段内江淮流域中尺度对流系统（MCS）的维持时间呈现从低到高依次减少的趋势（图 2.4），其生命史最长为 33 小时，最短为 3 小时。其中，生命史在 5 小时左右的中尺度对流系统（MCS）数量最多，接近三分之一（15 个），从 3 小时到 7 小时呈现单峰形式分布，峰值出现在 5 小时。而 12 小时到 15 小时左右的中尺度对流系统（MCS）也在三分之一左右（16 个），期间中尺度对流系统（MCS）的生命史呈现较为均匀的分布。生命史超过 20 小时的中尺度对流系统（MCS）不多，多数为  $\alpha$  中尺度对流系统（ $M\alpha CS$ ），生命史最长的中尺度对流系统（MCS）也在此出现，其生命史为 33 小时。

### 2.3.2 雷达资料分析以及 MCS 个例分类

本文采用 2007 年 6 月 29 日至 7 月 9 日（世界时）每半小时一次的分辨率为 0.01 度的雷达格点反射率资料，利用图 2.1 右图所示的雷达回波形态分类标准，以采用表 2.4 的中尺度对流系统（MCS）统计标准由 TBB 云图资料挑选出的 48 个中尺度对流系统（MCS）的 5500m 高空雷达反射率回波形态组织形态为分类研究对象（5500 m 高空以 10, 20, 30dBz 为等值线，3000m 高空以 5, 10, 15dBz 为等值线，其大值中心与 TBB 云图以 -50 °C 为最低温度阀值所选择的强对流中心范围较为吻合），对江淮流域（28.87~35.99°N, 109.48~121.66°E）中尺度对流系统（MCS）的雷达反射率回波图组织形式进行了统计分类分析。

2007 年 6 月 29 日~7 月 9 日（世界时）间雷达资料共计 11 天 528 时次，其中资料缺测 12 时次，分别为 6.29.23.30、7.1.23.30、7.2.23.30、7.3.23.30、7.4.23.30、7.5.0.0、7.5.23.30、7.6.23.30、7.7.0.0、7.7.23.30、7.8.23.30、7.9.18.30，资料完整性为 97.8%。

利用 2007 年江淮流域梅雨期 TBB 资料统计得到 48 个中尺度对流系统（MCS），但总共有 7 个中尺度对流系统（MCS）没有明显的雷达反射率回波（可能受雷达观测角度、范围局限），其分别为：6.29.6-6.29.10,  $M\beta CS$ , 4h; 6.29.19-6.30.0,  $M\beta CS$ , 5h; 6.29.20-6.30.0,  $M\beta CS$ , 4h; 6.30.13-6.30.19,  $M\beta CS$ , 6h; 7.3.3-7.3.6,  $M\beta CS$ , 3h; 7.3.12-7.3.15,  $M\beta CS$ , 3h; 7.9.9-7.9.23,  $M\alpha CS$ , 14h。实际共对 2007 年江淮流域梅雨期 41 个中尺度对流系统（MCS）的雷达反射率回波形态类型进行了分类研究，41 个中尺度对流系统（MCS）的雷达反射率回波形

态类型共分为 4 类：虚线型，3 个个例；散面型，11 个个例；实面型，21 个个例；实线型，6 个个例，个例分析完整率为 85.4%。

虚线型中尺度对流系统 (MCS) 初始时刻对流层中层雷达反射率回波呈线性形态分布 (图 2.5)，其线性对流带上分布着一个个相对独立的对流单体，这些单体相互不连续，整体形成“虚线”型形态。根据对流生成后发展强弱的不同，由相对独立的对流单体组成的“虚线”会逐渐密实成实线或者发展成面 (片) 状形态，其随后会随对流的减弱而逐渐消散。

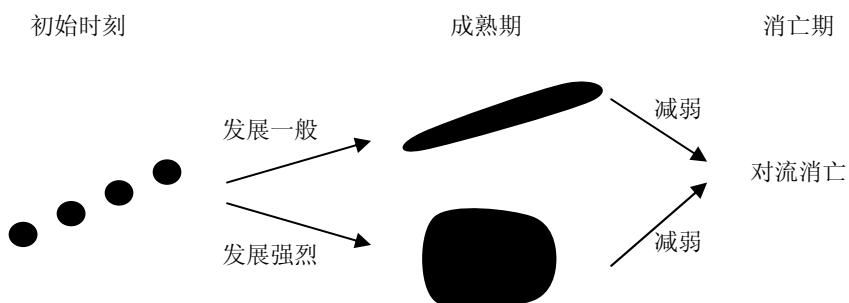


图 2.5 虚线型 MCS 雷达反射率回波理想演变图，黑色区域表示强对流回波区

3 个虚线型个例分别为 (表 2.7): 6.29.5-6.29.17, M $\beta$  CS, 12h; 7.6.5-7.6.14, M $\beta$  CS, 9h; 7.8.5-7.8.11, M $\beta$  CS, 6h。占总个例数的 7.3%。

表2.7 多普勒雷达资料虚线型分类个例

个例	MCS类型	雷达分类	背景天气系统	生命周期	概况
6. 29. 5-6. 2 9. 17	M $\beta$ CS	虚线型	西风槽前系统	12h	生成于鄂豫省界中部，沿东偏北方移动，雷达回波区呈近圆形
7. 6. 5-7. 6. 14	M $\beta$ CS	虚线型	副高边缘区，低空 存在急流	9h	生成于江苏西南部太湖流域，其后在其西面，皖南部，皖苏交界处陆续出现对流云团，三处成直线排列，雷达回波区上为线性东西向带状分布，南北向伸展，移动较为缓慢
7. 8. 5-7. 8. 11	M $\beta$ CS	虚线型	西风短波槽前系统	6h	生成于浙江西部地区，雷达回波区呈带状分布，东向发展移动

散面型中尺度对流系统（MCS）初始时刻对流层中层雷达反射率回波呈离散的面（片）状形态分布（图 2.6），其面（片）状对流带上分布着一个个相对独立的对流单体，这些对流单体相互不（完全）连续，整体构成“散面”型形态。随着对流生成后的逐步发展，由相对独立的对流单体组成的“散面”会逐渐发展成较为密实的面（片）状形态，其随后会随对流的减弱而逐渐消散。

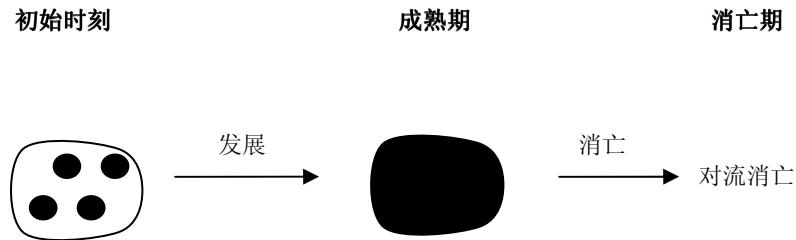


图 2.6 散面型 MCS5500 m 雷达反射率回波理想演变图，黑色区域表示强对流回波区

11 个散面型个例分别为(表 2.8):6.30.5-6.30.15, M β CS, 10h; 6.30.22-7.1.2, M β CS, 4h; 7.1.13-7.2.0, M β CS, 9h; 7.2.8-7.3.6, M α CS, 22h; 7.2.8-7.2.16, M β CS, 8h; 7.3.0-7.3.14, M β CS, 14h; 7.3.18-7.4.13, M β CS, 19h; 7.4.3-7.4.17, M α CS, 14h; 7.4.21-7.6.0, M α CS, 27h; 7.7.7-7.7.17, M β CS, 10h; 7.8.5-7.8.9, M β CS, 4h。占总个例数的 26.8%。

表 2.8 多普勒雷达资料散面型分类个例

个例	MCS类型	雷达分类	背景天气 系统	生命 周期	概况
6.30.5-6.30.15	M β CS	散面型	西风槽前 系统	10h	生成于湖北西南地带，覆盖渝，贵，鄂，豫，皖，湘等省份，主要位于湖北东部地区，消散于安徽北部地区。南北方向发展，移动偏向东北方向，成带状分布，雷达回波区成带状线性分布
6.30.22-7.1.2	M β CS	散面型	西风槽前 系统	4h	生成于湖北东北部地区，向东移动，发展不明显，雷达回波区不明显，
7.1.13-7.2.0	M β CS	散面型	西风短波 槽系统	9h	生成于贵州北部地区，东北向移动，主要强盛区位于湖北东南部，雷达回波区相对不明显，云区南部在雷达波上显示不明显，北部成东西向带状分布

7.2.8-7.3. 6	M <sub>a</sub> CS	散面型	西风槽前 系统, 低空 存在急流	22h	生成于湖北西南地区, 东北向移动发展, 雷达回波区成 散状分布, 后逐渐加密成椭圆形, 又慢慢变为南北带状 形状分布, 而云区近似椭圆形, 生成后慢慢发展东北向 移动, 在皖中地区减弱消散
7.2.8-7.2. 16	M <sub>b</sub> CS	散面型	副高边缘 系统, 低空 存在急流	8h	生成于安徽南部长江沿岸, 东向移动发展, 雷达回波区 呈带状分布
7.3.0-7.3. 14	M <sub>b</sub> CS	散面型	西风短波 槽前系统	14h	生成于四川东部地区, 东向移动, 雷达回波区成近似圆 形, 后逐渐向带状分布, 925hPa存在闭合风场
7.3.18-7.4. .13	M <sub>b</sub> CS	散面型	低空切变, 500hPa 处 为西风脊	19h	生成于河南南部, 东南向移动发展, 雷达回波区成近似 为东西向带状分布, 后转为东南向分布, 成散装分布, 覆盖皖, 苏, 浙等省份
7.4.3-7.4. 17	M <sub>a</sub> CS	散面型	西风短波 槽前系统, 低空存在 风向切变	14h	生成于陕南东部地区, 东向偏北移动发展, 雷达回波区 呈东西向带状分布, 后成大面积散片分布, 覆盖陕, 豫, 鄂, 皖, 冀, 鲁等省份
7.4.21-7.6. .0	M <sub>b</sub> CS	散面型	西风短波 槽前系统	27h	生成于陕南东部, 南北向缓慢发展, 东偏北向移动, 雷 达回波成东北向带状分布, 后东偏南向移动, 雷达回波 区转变成大面积散点分布, 覆盖陕, 鄂, 豫, 皖, 苏等 省份, 700-925hPa之间存在风场涡旋MCV
7.7.7-7.7. 17	M <sub>b</sub> CS	散面型	副高边缘 系统, 低空 存在急流	10h	生成于湖北西部地区, 雷达回波区呈带状分布, 东向移 动发展
7.8.5-7.8. 9	M <sub>b</sub> CS	散面型(并 未形成完 全密实的 Area)	西风短波 槽前系统	4h	生成于安徽南部地区, 雷达回波区呈带状分布, 移动不 明显

实面型中尺度对流系统 (MCS) 初始时刻对流层中层雷达反射率回波呈密实的面 (片) 状形态分布 (图 2.7), 其面 (片) 状对流带或由单个独立的对流单体组成, 或分别由许多连续的对流单体整体构成“实面”型形态。随着对流生成后的逐步发展, 初始时刻密实的面 (片) 状雷达对流回波带会逐渐发展成为范围更大, 更为密实的面 (片) 状形态, 其随后会随对流的减弱而逐渐消散。

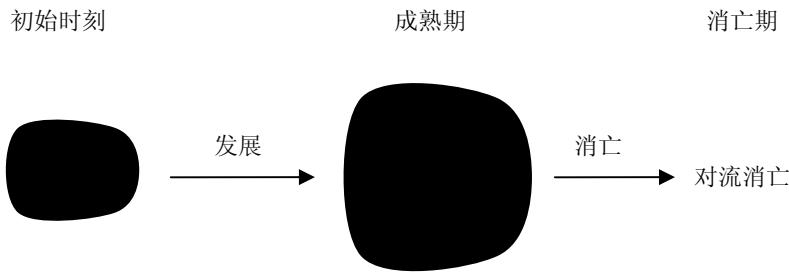


图 2.7 实面型 MCS5500 m 雷达反射率回波理想演变图，黑色区域表示强对流回波区

21 个实面型个例分别为 (表 2.9): 6.29.6-6.29.11, M<sub>β</sub> CS, 5h; 6.29.8-6.30.9, M<sub>β</sub> CS, 25h; 6.30.17-7.2.2, M<sub>α</sub> CS, 33h; 7.1.21-7.2.8, M<sub>β</sub> CS, 11h; 7.2.16-7.3.9, M<sub>β</sub> CS, 17h; 7.3.7-7.4.2, M<sub>α</sub> CS, 19h; 7.4.10-7.5.10, M<sub>α</sub> CS, 24h; 7.5.11-7.5.14, M<sub>β</sub> CS, 3h; 7.5.12-7.5.19, M<sub>β</sub> CS, 7h; 7.6.17-7.7.0, M<sub>β</sub> CS, 7h; 7.6.18-7.6.22, M<sub>β</sub> CS, 4h; 7.7.2-7.7.6, M<sub>β</sub> CS, 4h; 7.7.2-7.7.13, M<sub>β</sub> CS, 11h; 7.7.17-7.8.8, M<sub>β</sub> CS, 15h; 7.7.20-7.8.1, M<sub>β</sub> CS, 5h; 7.8.5-7.8.21, M<sub>α</sub> CS, 16h; 7.8.6-7.8.10, M<sub>β</sub> CS, 4h; 7.8.12-7.9.5, M<sub>α</sub> CS, 17h; 7.9.1-7.9.10, M<sub>β</sub> CS, 9h; 7.9.1-7.9.12, M<sub>β</sub> CS, 11h; 7.9.11-7.9.23, M<sub>α</sub> CS, 12h。占总个例数的 51.3%，是最多的一类系统。

表 2.9 多普勒雷达资料实面型分类个例

个例	MCS类型	雷达分 类	背景天气系统	生命周 期	概况
6. 29. 6-6. 2 9. 11	M <sub>β</sub> CS	实面型	副高边缘系统	5h	生成于湖南西部，向北移动
6. 29. 8-6. 3 0. 9	M <sub>β</sub> CS	实面型	西风槽前系统， 低空存在风场 切变	25h	生成于湖北中部，覆盖鄂，豫，皖，苏四省，东北方向 移动，雷达回波成带状分布，生命周期较长，25h，发 展比较旺盛
6. 30. 17-7. 2. 2	M <sub>α</sub> CS	实面型	西风槽低涡	33h	生成于江苏西部地区中部，向东移动，雷达回波区近似 圆形，在7. 1. 1时雷达回波区转变成带状分布，同时云 区大规模向西伸展，与7. 1. 1生成于贵州西北部地区， 向东北方向移动发展的另一云区汇合并于从贵州北 部，湖北大部，到安徽西部地区的大片地区，此时雷达

					回波区转成近似椭圆形，后向南向东发展，伸入湖南，安徽南部，消散于浙江西部地区，期间降水强烈，隶属于series系列
7. 1. 21-7. 2 . 8	M <sub>B</sub> CS	实面型	西风短波槽前系统，低空存在风场急流	11h	生成于湖北南部地区，南北向发展，东西移动，覆盖湖北东部，南部地区，雷达回波区成近似圆形
7. 2. 16-7. 3 . 9	M <sub>B</sub> CS	实面型	西风短波槽前系统	17h	生成于河南南部地区，东北方向移动发展，后又东南向移动，雷达回波区成圆形，3号9时对流云系并入南部云区，时间界定上认为此次M <sub>B</sub> CS结束，北部云区925hPa上存在风场涡旋MCV
7. 3. 7-7. 4. 2	M <sub>a</sub> CS	实面型	西风槽	19h	生成于安徽江苏交界地区中部，东南向移动发展，在10号与北部对流云系合并产生a尺度对流云团，雷达回波区成圆形分布，低空风场形成闭合涡旋MCV
7. 4. 10-7. 5 . 10	M <sub>a</sub> CS	实面型	西风短波槽	24h	初生成于河南南部地区，在原地南北向快速发展，后有生成于陕南，河南西部地区的对流云系东移相继加入，形成覆盖陕，豫，皖，苏，沪，浙等省份的大面积对流云区，雷达回波区成片状分布，低空925hPa存在风切变，700hPa处存在风场涡旋MCV
7. 5. 11-7. 5 . 14	M <sub>B</sub> CS	实面型	西风短波槽与副高边缘系统共同作用	3h	生成于苏东南部地带，南向移动发展，雷达回波区呈带状分布
7. 5. 12-7. 5 . 19	M <sub>B</sub> CS	实面型	西风短波槽	7h	生成于皖北部地带，东向移动发展，雷达回波区呈东北-西南带状分布
7. 6. 17-7. 7. . 0	M <sub>B</sub> CS	实面型	西风短波槽系统	7h	生成于河南南部，东北向移动，雷达回波区呈带状分布，西风短波槽系统，从500hPa一直延伸到地面
7. 6. 18-7. 6 . 22	M <sub>B</sub> CS	实面型	西风短波槽系统	4h	生成于河南南部，东向移动，雷达回波区呈带状分布，西风短波槽系统，从500hPa一直延伸到地面
7. 7. 2-7. 7. 6	M <sub>B</sub> CS	实面型	低空切变	4h	生成于豫东南与皖西交界处，东向移动，雷达回波区呈南北片状分布，500hpa比较平直，在700hPa和925hPa风场切变比较明显，925hpa形成闭合涡旋MCV
7. 7. 2-7. 7. 13	M <sub>B</sub> CS	实面型	副高边缘系统，低空存在风场切变和急流	11h	生成于苏南地区，东南向移动，雷达回波区呈近似圆形
7. 7. 17-7. 8 . 8	M <sub>B</sub> CS	实面型	初期主要是低空风场切变，后期为西风短波	15h	生成于安徽西部靠近豫东南地区，初期雷达回波区呈带状分布，后逐渐成圆形分布，东偏南向移动

			槽上低涡系统		
7. 7. 20-7. 8 . 1	M <sub>B</sub> CS	实面型	低空风场切变	5h	生成于江苏西南部，雷达回波区成带状分布，后逐渐转成圆形分布，覆盖苏、沪、浙三省，东向移动发展，925hPa处风场形成闭合涡旋MCV
7. 8. 5-7. 8. 21	M <sub>A</sub> CS	实面型	西风槽系统，初期低空存在风场切变	16h	生成于河南南部地区，南北向发展，缓慢西南移动，与7. 8. 7生成于湖北中部地区的对流云系合并后，此后东向移动发展，雷达回波区成近似圆形，初期低空存在风场切变，中后期低空形成闭合涡旋，从700hpa到925hpa都存在，形成MCV
7. 8. 6-7. 8. 10	M <sub>B</sub> CS	实面型	西风槽，低空存在西南延伸过来的低压系统，后期低空存在风场切变	4h	生成于川鄂两省交界处，雷达回波区成近似片状分布，东向移动缓慢，低空存在西南延伸过来的低压系统，后期低空存在风场切变
7. 8. 12-7. 9 . 5	M <sub>A</sub> CS	实面型	西风槽系统，低空存在闭合涡旋，低空流场也存在涡旋	17h	生成于安徽东部地区，与7. 8. 19生成于河南西南部的对流云系，以及7. 8. 5生成于河南南部的对流云系在21时汇合，覆盖皖、苏、浙等省份，雷达回波区成大片的带状分布，低空存在闭合涡旋，低空流场也存在涡旋，形成MCV
7. 9. 1-7. 9. 10	M <sub>B</sub> CS	实面型	初期为西风槽系统，低空一直存在风场切变	9h	生成于湖北西南地区，东向移动，雷达回波区呈片状，初期为西风槽系统，低空一直存在风场切变。
7. 9. 1-7. 9. 12	M <sub>B</sub> CS	实面型	西风槽系统，低空存在风场切变和低空急流	11h	生成于河南东南地区，东向移动，雷达回波区呈片状，后偏南移动
7. 9. 11-7. 9 . 23	M <sub>A</sub> CS	实面型	西风槽，低空存在风场切变	12h	生成于安徽南部，移动缓慢，原地发展，雷达回波区呈片状分布，19时与7. 9. 9时生成于重庆南部的对流云系合并，实际上23时云系范围依然很大，应该不至于消失，生命史暂为12h

实线型中尺度对流系统（MCS）初始时刻对流层中层雷达反射率回波呈线性形态分布（图 2.8），其线性对流带或由单个独立的线状对流单体组成，或分别由许多连续的对流单体整体构成密实的“实线”型形态。随着对流生成后的逐步发展，初始时刻密实的线状雷达对流回波带会逐渐发展成为范围更大，更为密实的线状或面（片）状形态，其随后会随对流的减弱而逐渐消散。

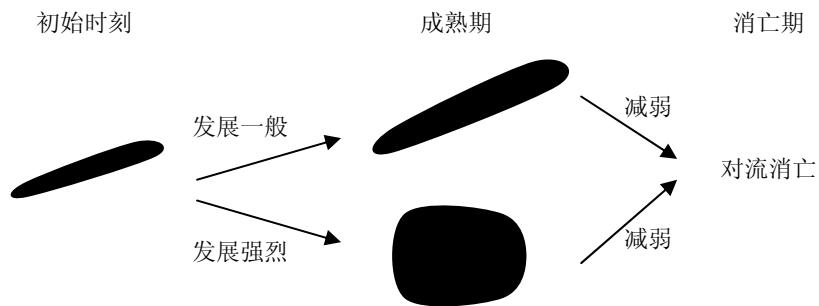


图 2.8 实线型 MCS5500 m 雷达反射率回波理想演变图, 黑色区域表示强对流回波区

6 个实线型个例分别为 (表 2.10): 7. 1. 19-7. 2. 0, M $\beta$  CS, 5h; 7. 2. 7-7. 2. 13, M $\beta$  CS, 6h; 7. 3. 7-7. 3. 19, M $\beta$  CS, 12h; 7. 5. 10-7. 5. 15, M $\beta$  CS, 5h; 7. 5. 14-7. 5. 21, M $\beta$  CS, 7h; 7. 7. 7-7. 7. 22, M $\alpha$  CS, 15h。占总个例数的 14.6%。

表 2.10 多普勒雷达资料实线型分类个例

个例	MCS类型	雷达分类	背景天气系统	生命周期	概况
7. 1. 19-7. 2. . 0	M $\beta$ CS	实线型	西风短波槽系统	5h	生成于湖北南部地区, 移动不明显, 雷达回波区不明显
7. 2. 7-7. 2. 713	M $\beta$ CS	实线型	低空急流, 500hPa处 为短波脊	6h	生成于豫东南, 东南向移动发展, 雷达回波区不明显
7. 3. 7-7. 3. 19	M $\beta$ CS	实线型	西风槽与副高之间的 急流区	12h	生成于湖北东部, 东向缓慢移动发展, 雷达回波区成东西带状分布
7. 5. 10-7. 5. . 15	M $\beta$ CS	实线型	西风短波槽与副高边 缘系统共同作用	5h	生成于皖苏交界中部地带, 南向移动发展, 雷达回波区呈带状分布
7. 5. 14-7. 5. . 21	M $\beta$ CS	实线型	副高边缘系统	7h	生成于安徽北部, 雷达回波区呈东西带状分 布, 向东南移动, 500hPa处为高压脊, 低空 存在风场切变和急流
7. 7. 7-7. 7. 22	M $\alpha$ CS	实线型	副高边缘系统, 低空 存在风场切变	15h	生成于皖, 苏交界处, 移动缓慢, 原地发展, 雷达回波区呈带状分布, 与9时生成于安徽 西部地区的对流云团在11时合并, 覆盖皖, 苏, 浙, 沪等地区

### 2.3.3 背景天气形势分类分析

根据MCS发生发展的背景天气形势分析，共有5类天气背景形势有利于MCS的生成和发展：西风（短波）槽（前）系统；副高边缘系统；低空急流；低空风场切变；（西风槽）低涡系统。大部分个例受以上两种系统共同作用，为数不多的个例仅受单独的背景天气系统作用。西风（短波）槽（前）系统影响个例最多，低空风场切变影响次之，副高边缘系统和低空急流影响个例也不少，（西风槽或西南）低涡系统影响的个例最少。

由于第三章会对2007年江淮流域梅雨期MCS典型个例进行详细的背景天气形势分析，限于篇幅限制以及考虑到文章内容前后可能存在重复性，这里将不涉及各类背景天气形势的详细分析，仅给出各背景天气形势分类的个例分布情况。

西风（短波）槽（前）系统个例共有37个：6.29.5-6.29.17, M $\beta$  CS, 虚线型, 12h; 6.29.8-6.30.9, M $\beta$  CS, 实面型, 25h; 6.29.19-6.30.0, M $\beta$  CS, 5h; 6.29.20-6.30.0, M $\beta$  CS, 4h; 6.30.5-6.30.15, M $\beta$  CS, 散面型, 10h; 6.30.13-6.30.19, M $\beta$  CS, 6h; 6.30.17-7.2.2, M $\alpha$  CS, 实面型, 33h; 6.30.22-7.1.2, M $\beta$  CS, 散面型, 4h; 7.1.13-7.2.0, M $\beta$  CS, 散面型, 9h; 7.1.19-7.2.0, M $\beta$  CS, 实线型, 5h; 7.1.21-7.2.8, M $\beta$  CS, 实面型, 11h; 7.2.8-7.3.6, M $\alpha$  CS, 散面型, 22h; 7.2.16-7.3.9, M $\beta$  CS, 实面型, 17h; 7.3.0-7.3.14, M $\beta$  CS, 散面型, 14h; 7.3.3-7.3.6, M $\beta$  CS, 3h; 7.3.7-7.3.19, M $\beta$  CS, 实线型, 12h; 7.3.7-7.4.2, M $\alpha$  CS, 实面型, 19h; 7.3.12-7.3.15, M $\beta$  CS, None, 3h; 7.3.18-7.4.13, M $\beta$  CS, 散面型, 19h; 7.4.3-7.4.17, M $\alpha$  CS, 散面型, 14h; 7.4.10-7.5.10, M $\alpha$  CS, 实面型, 24h; 7.4.21-7.6.0, M $\alpha$  CS, 散面型, 27h; 7.5.10-7.5.15, M $\beta$  CS, 实线型, 5h; 7.5.11-7.5.14, M $\beta$  CS, 实面型, 3h; 7.5.12-7.5.19, M $\beta$  CS, 实面型, 7h; 7.6.17-7.7.0, M $\beta$  CS, 实面型, 7h; 7.6.18-7.6.22, M $\beta$  CS, 实面型, 4h; 7.7.17-7.8.8, M $\beta$  CS, 实面型, 15h; 7.8.5-7.8.21, M $\alpha$  CS, 实面型, 16h; 7.8.5-7.8.9, M $\beta$  CS, 散面型, 4h; 7.8.5-7.8.11, M $\beta$  CS, 虚线型, 6h; 7.8.6-7.8.10, M $\beta$  CS, 实面型, 4h; 7.8.12-7.9.5, M $\alpha$  CS, 实面型, 17h; 7.9.1-7.9.10, M $\beta$  CS, 实面型, 9h; 7.9.1-7.9.12, M $\beta$  CS, 实面型, 11h; 7.9.9-7.9.23, M $\alpha$  CS, 14h; 7.9.11-7.9.23, M $\alpha$  CS, 实面型, 12h。

副高边缘系统个例共有11个：6.29.6-6.29.10, M $\beta$  CS, 4h; 6.29.6-6.29.11, M $\beta$  CS, 实面型, 5h; 7.2.8-7.2.16, M $\beta$  CS, 散面型, 8h; 7.3.7-7.3.19, M $\beta$  CS, 实线型,

12h; 7.5.10-7.5.15, M<sub>β</sub> CS, 实线型, 5h; 7.5.11-7.5.14, M<sub>β</sub> CS, 实面型, 3h; 7.5.14-7.5.21, M<sub>β</sub> CS, 实线型, 7h; 7.6.5-7.6.14, M<sub>β</sub> CS, 虚线型, 9h; 7.7.2-7.7.13, M<sub>β</sub> CS, 实面型, 11h; 7.7.7-7.7.17, M<sub>β</sub> CS, 散面型, 10h; 7.7.7-7.7.22, M<sub>α</sub> CS, 实线型, 15h。

低空急流个例共有 9 个: 7.1.21-7.2.8, M<sub>β</sub> CS, 实面型, 11h; 7.2.7-7.2.713, M<sub>β</sub> CS, 实线型, 6h; 7.2.8-7.3.6, M<sub>α</sub> CS, 散面型, 22h; 7.2.8-7.2.16, M<sub>β</sub> CS, 散面型, 8h; 7.3.7-7.3.19, M<sub>β</sub> CS, 实线型, 12h; 7.6.5-7.6.14, M<sub>β</sub> CS, 虚线型, 9h; 7.7.2-7.7.13, M<sub>β</sub> CS, 实面型, 11h; 7.7.7-7.7.17, M<sub>β</sub> CS, 散面型, 10h; 7.9.1-7.9.12, M<sub>β</sub> CS, 实面型, 11h。

低空风场切变个例共有 14 个: 6.29.8-6.30.9, M<sub>β</sub> CS, 实面型, 25h; 7.3.18-7.4.13, M<sub>β</sub> CS, 散面型, 19h; 7.4.3-7.4.17, M<sub>α</sub> CS, 散面型, 14h; 7.7.2-7.7.6, M<sub>β</sub> CS, 实面型, 4h; 7.7.2-7.7.13, M<sub>β</sub> CS, 实面型, 11h; 7.7.7-7.7.22, M<sub>α</sub> CS, 实线型, 15h; 7.7.17-7.8.8, M<sub>β</sub> CS, 实面型, 15h; 7.7.20-7.8.1, M<sub>β</sub> CS, 实面型, 5h; 7.8.5-7.8.21, M<sub>α</sub> CS, 实面型, 16h; 7.8.6-7.8.10, M<sub>β</sub> CS, 实面型, 4h; 7.9.1-7.9.10, M<sub>β</sub> CS, 实面型, 9h; 7.9.1-7.9.12, M<sub>β</sub> CS, 实面型, 11h; 7.9.9-7.9.23, M<sub>α</sub> CS, 14h; 7.9.11-7.9.23, M<sub>α</sub> CS, 实面型, 12h;

(西风槽或西南) 低涡系统个例共有 2 个: 6.30.17-7.2.2, M<sub>α</sub> CS, 实面型, 33h; 7.7.17-7.8.8, M<sub>β</sub> CS, 实面型, 15h。

## 2.4 本章小结

本章首先确立 2007 年江淮流域梅雨期 TBB 分类判定标准和雷达资料分类判断标准, 对 2007 年 6 月 29 日至 7 月 9 日 (世界时) 的江淮流域的 MCS 进行了统计分析, 共统计出 48 个 MCS 个例和 4 类 MCS 雷达分类型。主要结论如下:

1. 2007 年 6 月 29 日~7 月 9 日的 11 天共计 MCS 48 个, 日均 4.7 个, 其中 M<sub>β</sub> CS 38 个, 占 79.2%, M<sub>α</sub> CS 10 个, 占 20.8%。

2. 2007 年江淮流域梅雨期 MCS 从淮河流域到长江流域都有分布, MCS 多生成于江淮流域中游地区, 大部分 MCS 由生成地生成后向偏东方向移动, 淮河流域以北到淮河流域的 MCS 移向以偏东方方向到偏东北方向为主, 淮河流域以

南到长江流域的 MCS 移向以偏东方向到偏东南方向为主。

维持时间较短（6 小时以内）、尺度较小（不超过三百公里）的  $\beta$  中尺度对流系统（MCS）倾向于在生成地附近发生发展，其所产生的对流天气较弱，降水较少。维持时间较长（6 小时以上）、尺度较大（超过三百公里）的  $\alpha$ 、 $\beta$  中尺度对流系统（MCS）生成后发生发展过程中覆盖较大范围地区，产生较强的对流天气和降水。

3. 2007 年江淮流域梅雨期 MCS 生成时刻的日变化规律与大气气温日变化规律成正位相分布，MCS 生成个数在凌晨黎明前后达到低谷，在午后前后达到高峰，整个下午时段是江淮流域 MCS 的生成高峰段。江淮流域 MCS 的消亡时刻的日变化与生成时刻相反。生命史最长为 33 小时，最短为 3 小时。生命史在 5 小时左右的 MCS 数量接近三分之一（15 个），峰值出现在 5 小时。而 12 小时到 15 小时左右的 MCS 也在三分之一左右（16 个）。

4. 利用 2007 年江淮流域梅雨期 TBB 资料统计得到 48 个 MCS，但有 7 个 MCS 没有雷达反射率回波资料，41 个 MCS 的雷达反射率回波形态类型共分为 4 类：虚线型，3 个个例；散面型，11 个个例；实面型，21 个个例；实线型，6 个个例，个例分析完整率为 85.4%。

5. 共有 5 类天气背景形势有利于 MCS 的生成和发展：西风（短波）槽（前）系统；副高边缘系统；低空急流；低空风场切变；（西风槽）低涡系统。大部分个例受以上两种系统共同作用，为数不多的个例仅受单独的背景天气系统作用。



### 第三章 江淮流域中尺度对流系统（MCS）典型个例分析研究

**摘要** 利用雷达反射率资料对2007年江淮流域梅雨期中尺度对流系统（MCS）进行统计分类的基础上，本章重点分析了每类型典型个例的雷达对流回波，卫星TBB云图，对流降水的演变以及它们发生的大尺度天气形势，高空天气形势和风场演变，地面场演变等特征，发现：1. 实线型和虚线型两种线性对流个例中发展较弱的个例对流回波在其生命周期内始终成线性形态，发展较强的个例对流回波则在发展强盛期转变为较为密实的面（片）状对流回波。散面型个例对流回波在对流发展强盛期转变为密实的面（片）状回波，实面型个例仅是对流回波范围随对流的发展而扩展。2. 四种类型中实线型个例产生的降水最为强烈，虚线型和实面型个例次之，散面型个例产生的降水强度最弱。虚线型和实线型两种线性个例产生的强降水沿线性对流线附近分布。实面型和散面型个例产生的降水覆盖范围一般较广，强降水倾向于在面状（片）对流云系覆盖范围的北侧和西侧产生。3. 四种类型共同的环流形势特征为： $\beta$  中尺度MCS个例上空对流层中层500 hPa环流形势较为平直，部分 $\alpha$  中尺度个例对流层中层500 hPa受短波槽控制。对流层低空一般存在辐合区，中层存在辐散区，低空辐合区常伴随相对湿度大值区和正涡度区。对流层低空存在西南风急流，高空500 hPa以下存在风场切变线和风场的垂直切变。绝大多数MCS个例地面场上存在锋面和风场辐合。

#### 3.1 引言

Houze (1990), Parker和Johnson (2000) 挑选最能代表中尺度对流系统（MCS）形成发展的独立空气团的探空资料进行了分析研究。Bluestein和Parks (1983), Bluestein和Jain (1985) 对空气团周围的探空资料进行了插值研究。Takeda等 (1981)研究了一次梅雨锋 $\beta$  中尺度对流带的活动，发现在对流带后部不断有云生成并沿对流带移动。Takeda and Seko (1986) 利用雷达资料详细分析了一次 $\beta$  中尺度对流带的回波结构和演变，细致分析了对流带上每一个 $\gamma$  中尺度对流单体的生命史，产生位置，移动等，指出新对流体大概每20分钟出现在原来对流体的上风方5 km处，单体的新生和移动影响着对流带的移动。Ishihara 等 (1995) 利用

雷达资料分析了1988年7月17日 $\beta$  中尺度雨带的精细结构和维持过程，指出由间隔10~15 km的多个对流单体组成了一条西北东南向的 $\beta$  中尺度对流带，成熟单体沿着雨带的走向移动，新单体在成熟单体西南面5 km处形成。Yamada等(2003)利用雷达观测资料对2001年6月18日梅雨锋期间发生在长江中下游的一次 $\alpha$  中尺度低涡中出现的多个 $\beta$  中尺度对流群进行了分析，这些 $\beta$  中尺度系统分布于低涡的不同位置，其形成的三维流场也各不相同。

方宗义(1986)对1980~1983梅雨期间8个中尺度云团进行合成研究后指出，静止锋西端、季风云系北端和高原东移的短波槽相接处有利于云团的产生。项续康和江吉喜(1995)从1989~1993年的云图中选取了10个中尺度对流复合体(MCC)个例，进一步指出中尺度对流复合体(MCC)发生在高温、高湿和低空急流的前方。陶祖钰(1996)通过对TBB的反演，得到1个中尺度对流复合体(MCC)个例冷云盖的演变特征。陶祖钰和黄伟等(1996)研究了中尺度对流复合体(MCC)的环流结构，指出在对流层上部是一个中尺度反气旋式辐散环流，在对流层下部是一个气旋式辐合环流。段旭等(2001)也对1999年6月6日低纬高原地区发生的一次中尺度对流复合体(MCC)进行了分析，研究表明中尺度对流复合体(MCC)发生在副热带高压与滇缅高压之间辐合区中一个明显的中尺度辐合线上。

孙建华等(2004)分析2002年6月20~21日的梅雨锋中尺度对流系统回波特征时发现， $\alpha$  中尺度系统中有 $\beta$  和 $\gamma$  中尺度系统的活动， $\beta$  和 $\gamma$  中尺度系统与整个MCS的移动方向并不一致。整个MCS向东北方向移动，而对流带中的 $\gamma$  对流单体是沿对流带向东南方向移动。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。对流系统的移动不仅取决于对流单体的移动方向，还取决于单体的不断新生过程。

丁一汇(1993)对1991年江淮流域持续性特大暴雨的中尺度分析得出，绝大多数 $\beta$  中尺度系统是在低涡切变线或锋面中生成的。陶诗言等(2001)对1998年夏季中国暴雨的 $\beta$  中尺度系统研究表明， $\beta$  中尺度系统在对流层中低层(700 hPa以下)风场上表现为浅气旋性扰动，低空急流前部充足的水汽条件及其上的风速扰动对中尺度系统的发生起到一定的作用。贝耐劳等(2002、2003)分析1998年7月20日~22日 $\beta$  中尺度系统时指出，对流层中低层的水汽的大量集中以及对流不

稳定条件的存在为造成特大暴雨的中尺度天气系统发生发展提供了有利的环境。张小玲等（2002）分析1998年7月21日武汉暴雨时，在暴雨发生前（即 $\beta$ 中尺度对流系统形成前）武汉附近整个对流层大气积聚了大量的水汽，整个层结接近饱和，并且蕴涵着大量对流有效位能(CAPE)，通过某种机制促使对流有效位能释放并促发 $\beta$ 中尺度对流系统发生发展。

刘黎平（2003）反演了回波带合并的三维风场，下层存在强烈的辐合，上层为辐散，从南侧进入云体的高温高湿气流穿过云体，形成上升气流的主体，最后在上层从北侧流出，上升气流区与强回波区相配合。刘黎平等（2004）对双多普勒雷达反演的风场分析表明，西南风和偏东风形成的风切变在4 km高度以下，暖湿西南气流与偏东气流在对流云中交汇形成上升气流。

本章在第二章分类研究的基础上，对每类系统发生发展的过程及其环流背景进行分析。

## 3.2 江淮流域中尺度对流系统（MCS）典型个例分析

利用TBB卫星资料，雷达格点反射率资料，NCEP格点再分析资料，地面观测资料和常规探空资料，我们在第二章讨论了2007年江淮流域梅雨期中尺度对流系统（MCS）的统计分类情况。在确定了新的TBB统计标准（表2.4）之后，共统计出48个中尺度对流系统（MCS），从背景天气系统、雷达反射率回波组织形式对统计出的41个个例进行了详细的分类研究（表2.7~2.10），对雷达反射率回波组织形式进行了分类研究，根据雷达反射率回波形态类型共分为4类：虚线型，3个个例（3个M $\beta$ CS）；散面型，11个个例（2个M $\alpha$ CS，9个M $\beta$ CS）；实面型，21个个例（6个M $\alpha$ CS，15个M $\beta$ CS）；实线型，6个个例（1个M $\alpha$ CS，5个M $\beta$ CS）。每类个例将挑选1个典型个例在下文中进行详细分析。

### 3.2.1 虚线型中尺度对流系统（MCS）典型个例分析

2007年江淮流域梅雨期中尺度对流系统（MCS）3个虚线型个例分别为：6.29.5-6.29.17（世界时，下同），M $\beta$ CS，12h；7.6.5-7.6.14，M $\beta$ CS，9h；7.8.5-7.8.11，M $\beta$ CS，6h。其中，个例7.6.5-7.6.14，M $\beta$ CS，9h的雷达反射率回波组织形式最为典型（呈现清晰的虚线型，图3.1—3.2），这里选取此个例为例对虚线型中尺度

对流系统（MCS）进行详细分析。

该个例于7月6日5时（世界时，下同）生成于江苏西南部太湖流域，后在其西面，安徽南部，皖苏交界处陆续出现对流云团，三处成直线排列，随后三处云团合併发展。在三处云团生成初期，其雷达回波呈线性东西向带状分布，南北向伸展，成虚线型（图3.2a）。

MCS对流云系最初于05时出现在安徽中部地面低压中心的东南侧（图3.1），TBB云图上表现为小于等于-50 °C的冷云盖，可能由于个例挑选时候TBB温度标准较高，在05时，05: 30时对流层中层雷达反射率回波图上MCS系统已经表现为较为明显的三个相对不连续的对流单体，成虚线型排列（图3.2a）。MCS系统对流单体云系从东向西依次出现，在雷达反射率垂直剖面图上可以清晰的看出这个过程，05时最强的对流单体位于120 °E左右，其西侧对流单体较弱，对流云系一般可伸展至200 hPa处（图3.2b），05: 30时最强对流单体已经位于117.7 °E左右，这正是西侧对流单体发展的结果。05时地面降水已经开始，降水集中在117 °E以东地区，随对流云系的发展而有所移动，由于西侧对流单体相对较强，强降水也出现在西侧（图3.1）。

06时，MCS系统的对流云系开始呈现完整的虚线型排列（图3.1），其对流层中层雷达反射率回波逐渐加强，并连成完整的线性形态。此时雷达反射率垂直剖面图上MCS云系对流单体已经逐渐连续，最强的对流云系位于118 °E左右，对流云系顶端伸展至100 hPa处（图3.2b），随着对流向西延伸加强，地面降水范围也随之向西扩展（图3.1）。

07时MCS系统对流相对有所减弱，对流云系顶端降到200 hPa以下（图3.2b），不过降水仍在持续。08时，MCS对流云系破裂，原来连成一片的对流云系分为两个相对独立的对流云系，各自独立发展。5500 m雷达反射率回波图上对流强反射带出现断裂，雷达反射率垂直剖面图又呈现出“虚线型”形态，并且对流强度有所减弱，最强的对流单体出现116.5 °E附近，系统降水也集中在西侧对流云系覆盖范围内。

09时，东侧对流云系东移发展，西侧对流云系继续发展并造成降水，对应的雷达反射率回波图和反射率垂直剖面图上MCS系统内较强的对流单体仅仅存在于117 °E附近。10时，MCS系统内对流在持续减弱（图3.2a， b）。11时开始，东部

的对流云系已经开始趋于消散，对流层中层雷达反射率回波图上对应的强对流回波带已经不明显（图3.2a）。11时以后，MCS系统对流云系逐渐减弱消失，对应的5500 m雷达回波反射率强回波带和雷达反射率垂直剖面图上对流单体强度也逐渐减弱至消失，地面降水也逐渐停止。

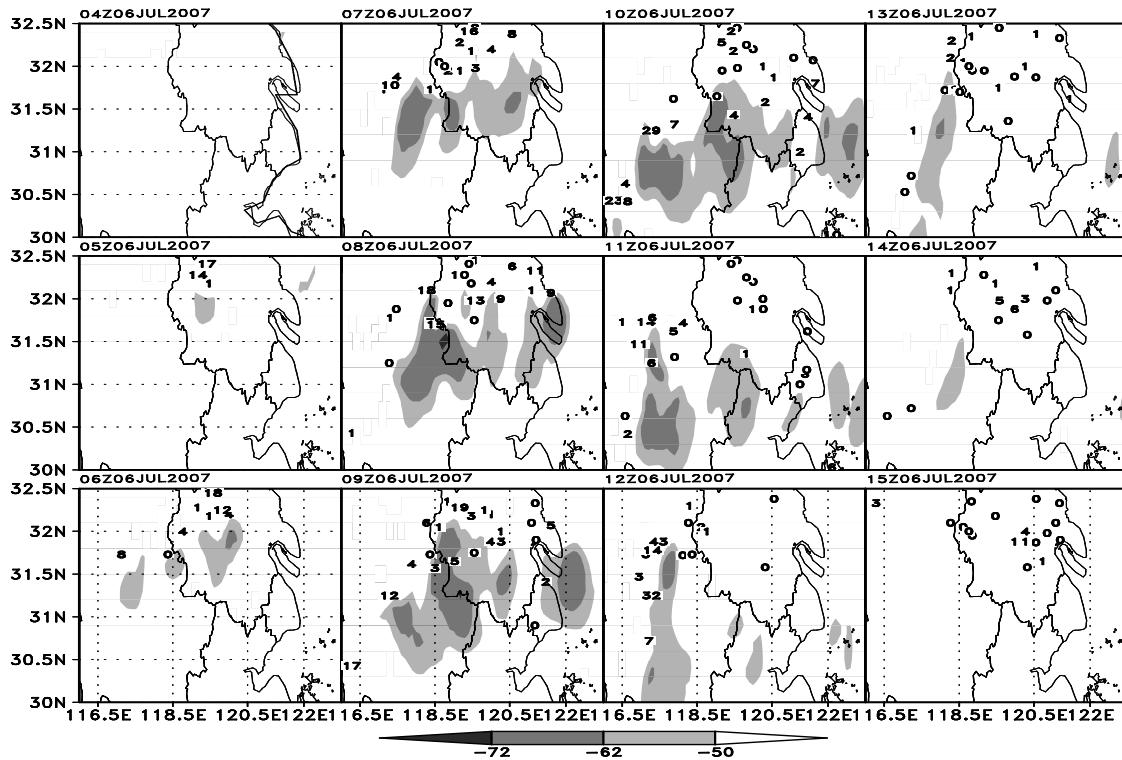
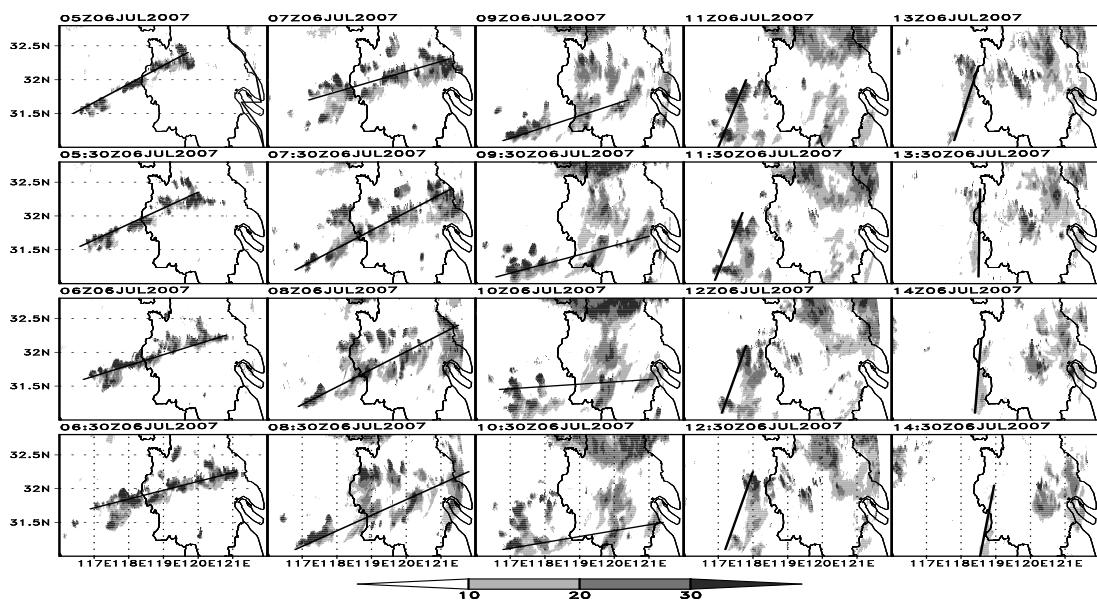
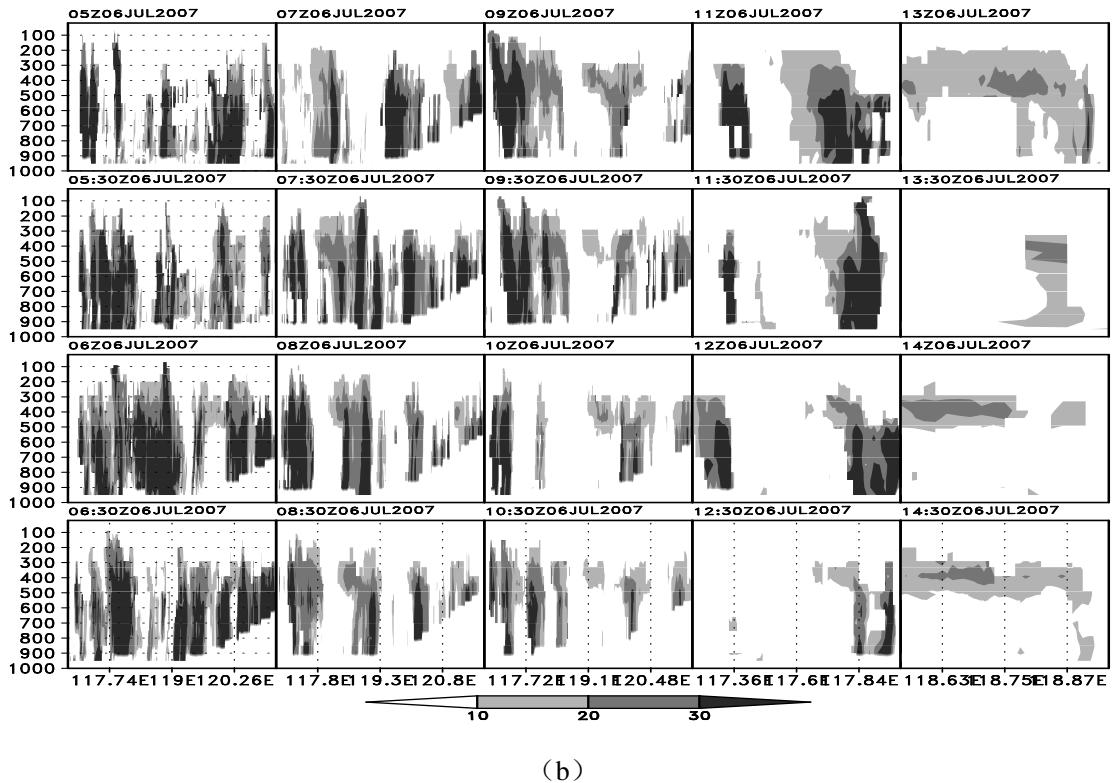


图3.1 虚线型个例(7.6.5-7.6.14, M $\beta$  CS, 9h)生命周期发展过程图。阴影为TBB云图资料填图(单位:  $^{\circ}\text{C}$ )，数字为前1 h降水量(单位: mm)。

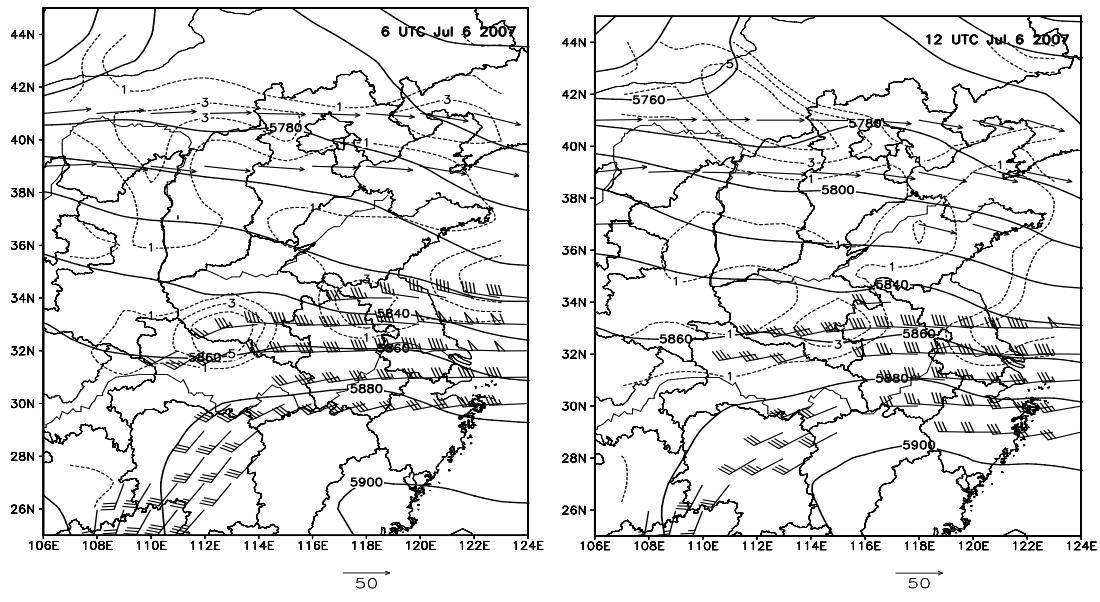


(a)



(b)

图 3.2 (a) 虚线型个例 (7.6.5–7.6.14, M $\beta$  CS, 9h) 5500 m 雷达回波反射率图 (单位: dBZ); (b) 虚线型个例 (7.6.5–7.6.14, M $\beta$  CS, 9h) 沿图 (a) 中黑色直线的雷达反射率垂直剖面图 (单位: dBZ)。



(a)

(b)

图 3.3 虚线型个例大尺度天气形势的分布图 (7.6.5–7.6.14, M $\beta$  CS, 9h)。图 (a) 为 2007 年 7 月 6 日 06 时 (世界时), 图 (b) 为 2007 年 7 月 6 日 12 时 (世界时)。箭矢线表示 200 hPa 上风速  $\geq 40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的高空急流; 风标表示 700 hPa 上的风速  $\geq 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的低空急流; 粗实线为 500 hPa 等高线 (单位: gpm); 短虚线表示 500 hPa 上的等涡度线 (单位:  $\times 10^{-5} \cdot \text{s}^{-1}$ )。

7月6日00时西太平洋副热带高压西伸北抬至我国南方的广大地区，中纬度地区中低层大气受平直的西风气流控制，水汽输送作用不明显，此时，安徽南部到江苏南部地区尚未有中尺度对流系统(MCS)发生(图略)。到6日6时(图3.3a)，副热带高压进一步北抬西伸，太湖流域处于副高边缘地区，500 hPa上5880 gpm线西伸至 $110^{\circ}\text{E}$ ，北端到达 $30^{\circ}\text{N}$ ，控制贵州东部以东的我国南方大范围地区，安徽南部到江苏南部地区处于副高边缘北部地区5880 gpm线以北。与此同时低空700 hPa上有明显的西南低空急流，水汽沿副热带高压西侧西南气流从南海一路输送到皖南到苏南一带(图略)。

此时从苏南太湖附近向西南方向依次出现三个单独的较强对流云系，走向从东北方向向西南方向延伸，成直(虚)线排列，对流云系发展处于初期，降水也随之开始。随后从7时开始对流云系合并成独立的中尺度对流系统(MCS)(图3.1)。到6日12时，中纬度地区500 hPa上依然受平直西风气流控制，副高有所西伸，北抬不明显，皖南到苏南依然处于副高边缘地区。低空700 hPa西南低空急流有所减弱(图3.3b)。合并后的对流系统已经处于发展过程的后期，较强的对流带位于安徽南部，降水仍在持续(图3.1)。

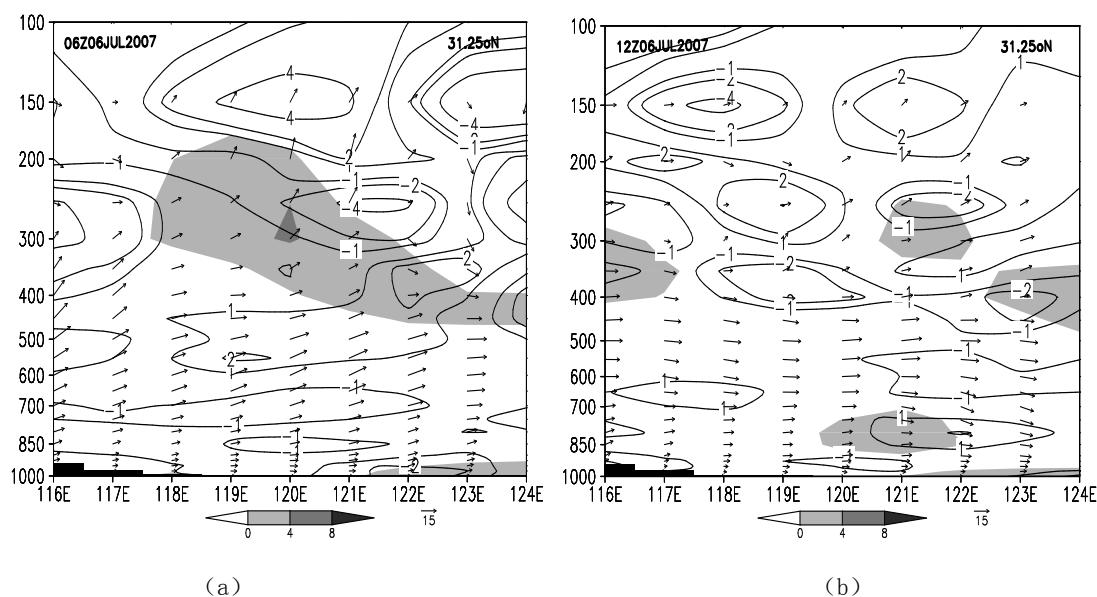


图3.4 虚线型个例沿 $31.25^{\circ}\text{N}$ 大尺度环境动力场的垂直剖面图(7.6.5–7.6.14, M $\beta$  CS, 9h)。图(a)为2007年7月6日06时(世界时)，图(b)为2007年7月6日12时(世界时)。箭矢线表示沿纬向风速u分量(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )和垂直方向风速 $w \cdot 100$ (单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )的合成风矢量；实线表示散度分布(单位: $\times 10^{-5} \cdot \text{s}^{-1}$ )；阴影区域表示涡度分布(单位: $\times 10^{-5} \cdot \text{s}^{-1}$ )；低层柱形黑色阴影表示地形。

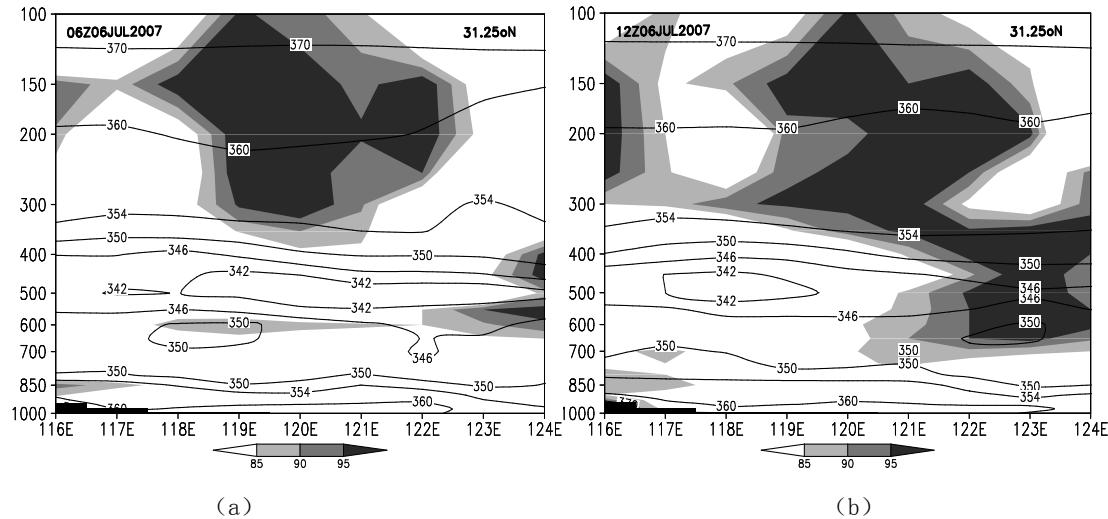


图3.5 虚线型个例沿31.25°N大尺度环境热力场的垂直剖面图(7.6.5~7.6.14, M $\beta$  CS, 9h)。图(a)为2007年7月6日06时(世界时),图(b)为2007年7月6日12时(世界时)。实线表示假相当位温(单位:K);阴影区域表示相对湿度(单位: %);低层柱形黑色阴影表示地形。

通过对该个例发生时大尺度环境动力场和热力场的垂直分布分析可以看出,在该个例开始前后的06时,沿31.25°N的垂直剖面图(图3.4)上在个例发生地区( $117^{\circ}\text{E} \sim 121^{\circ}\text{E}$ )低空850~700 hPa存在大片的辐合区,在辐合区域上空600~400 hPa之间则是辐散区。对流层中上层(300 hPa)存在正涡度区,正涡度中心在 $120^{\circ}\text{E}$ 。在个例发生的整个空间区域,都存在明显的垂直上升气流,气流的垂直速度随高度增加而增加,垂直速度大值中心出现在200 hPa。而在该个例生命史后期的12时,主对流云区( $116^{\circ}\text{E} \sim 118^{\circ}\text{E}$ )低空已经受辐散区控制,仅在500 hPa以上高空存在辐散区和辐合区的高低配置(400~300 hPa处为辐合区,300 hPa以上为辐散区),垂直对流也显著减弱,风场上以水平风场为主。

考虑热力场特征(图3.5),可以看到在06时,沿31.25°N线上垂直剖面经度范围内对流层低空都为不稳定层结,在500 hPa以下假相当位温都随高度增加而递减,其递减率在个例发生区域( $118^{\circ}\text{E} \sim 119^{\circ}\text{E}$ )上空700~600 hPa之间达到最大,同时在这层存在着大片的湿润空气,其相对湿度超过85%。到12时,沿31.25°N线上仍然存在较大范围的不稳定层结,但层结不稳定性相对06时有所降低,同时低空水汽饱和度也有所下降,相对湿度大值区已经东移至个例对流云系范围外( $121^{\circ}\text{E}$ 以东)。

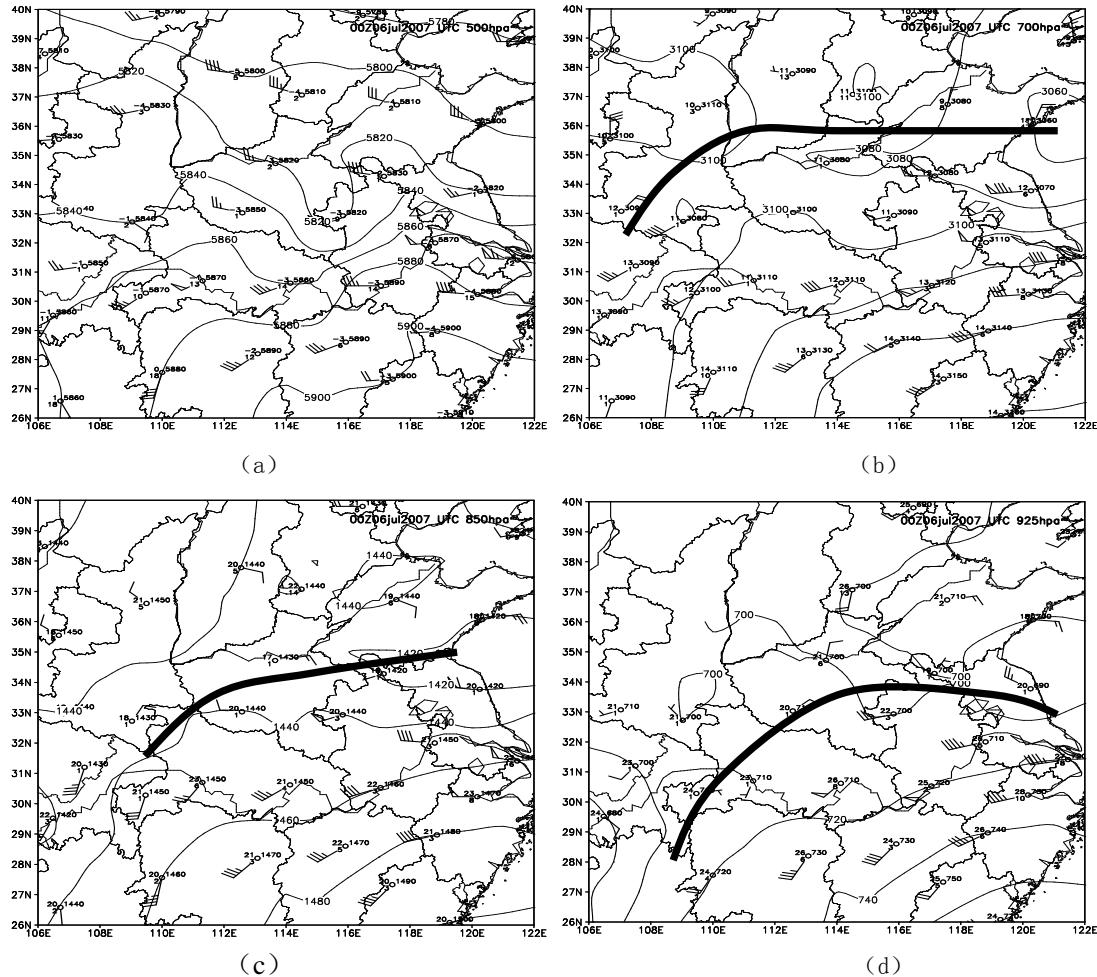


图3.6 虚线型个例(7.6.5–7.6.14, M $\beta$  CS, 9h) 2007年7月6日00时(世界时)高空天气形势分布图。图(a)为500 hPa, 图(b)为700 hPa, 图(c)为850 hPa, 图(d)为925 hPa。风标为站点处风速风向(单位: $m \cdot s^{-1}$ )；站点处左边数字上面数字为温度(单位: $^{\circ}C$ )，下面数字为温度露点差(单位: $^{\circ}C$ )，右边数字为位势高度(单位:gpm)；实线为等高线(单位:gpm)；黑色粗线为风场切变线。

利用探空资料,我们也可以分析该MCS个例发生发展前后的高空风场以及天气形势。7月6日00时该MCS个例尚未发生,500 hPa探空场上苏皖交界处受浅薄脊控制(图3.6a),700 hPa以下环流形势较为平直,在低层700~925 hPa都存在风场切变线(图3.6b, c, d),切变线位置由高至低逐渐南压,个例发生区域苏皖交界处位于风场切变线南侧。对流层中低层存在垂直风场的切变,从500~925 hPa该MCS个例发生地区(安徽南部到江苏南部)风场逐渐从偏西北风转为偏西南风,此时个例上空低空水汽饱和程度相对较低,500 hPa以下安庆、南京两站温度露点差基本都在3  $^{\circ}C$ 以上,仅仅在850 hPa上空气水汽饱和程度较高,安庆、南京两站温度露点差都是3  $^{\circ}C$ 。

到12时个例生命史发展后期,500 hPa上环流较为平直(图3.7a)。此时700 ~

925 hPa 的风场切变线东缩并南压, 个例发生区域仍位于风场切变线南侧(图3.7b, c, d)。而对流层中低层的垂直风场切变仍然存在并有所加强, 从500 hPa到中低空的偏西北、偏西南风风速加大, 低空空气湿度也随着低空西南急流的水汽输送加大, 安庆、南京上空的温度露点差已经变得很小, 在500 hPa以下都低于5 °C, 水汽饱和程度在850~700 hPa之间达到最大, 安庆、南京上空的温度露点差均为1 °C。

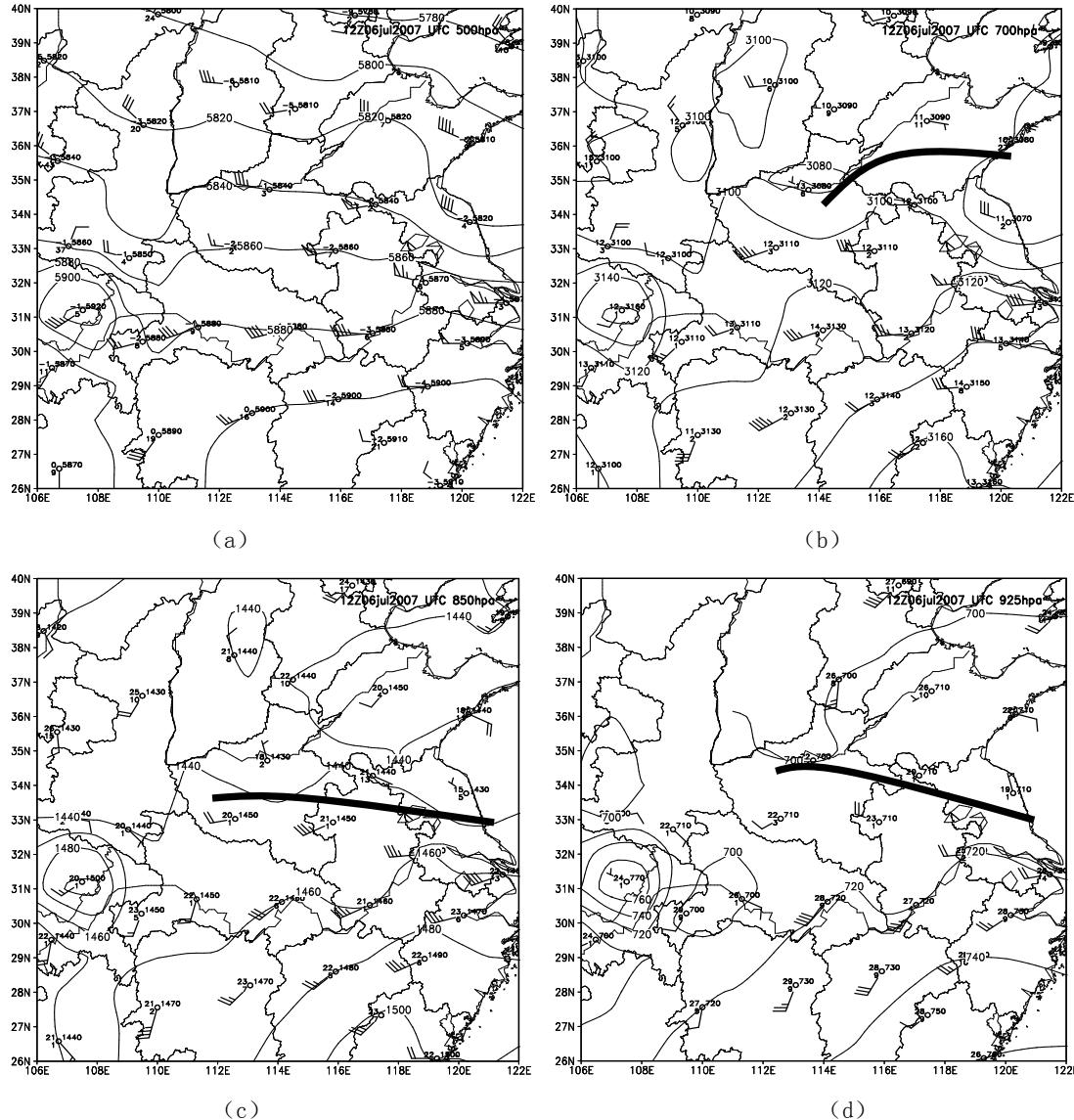


图3.7 虚线型个例 (7.6.5–7.6.14, MB CS, 9h) 2007年7月6日12时(世界时)高空天气形势分布图。图(a)为500 hPa, 图(b)为700 hPa, 图(c)为850 hPa, 图(d)为925 hPa。实线为等高线(单位: gpm); 风标为站点处风速风向(单位:  $m \cdot s^{-1}$ ) ; 站点处左边数字上面数字为温度(单位: °C), 下面数字为温度露点差(单位: °C), 右边数字为位势高度(单位: gpm) ; 黑色粗线为风场切变线。

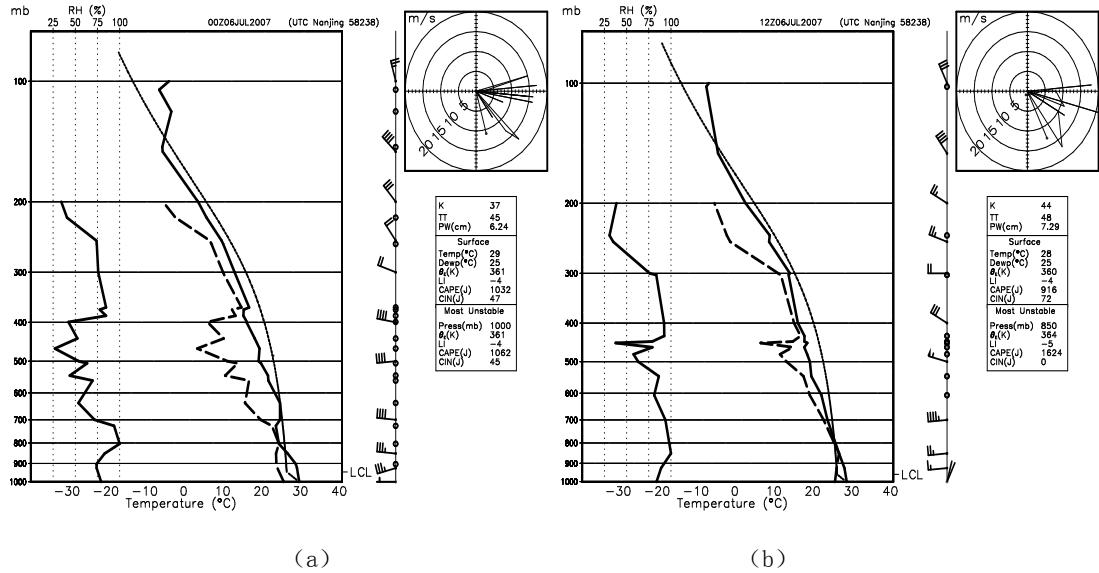


图3.8 2007年7月6日00时（世界时）(a)和12时（世界时）(b)南京的探空曲线。左侧实线为相对湿度（单位：%），右侧虚线为露点温度（单位： $^{\circ}\text{C}$ ），实线为温度（单位： $^{\circ}\text{C}$ ），点线为过程曲线（单位： $^{\circ}\text{C}$ ）。

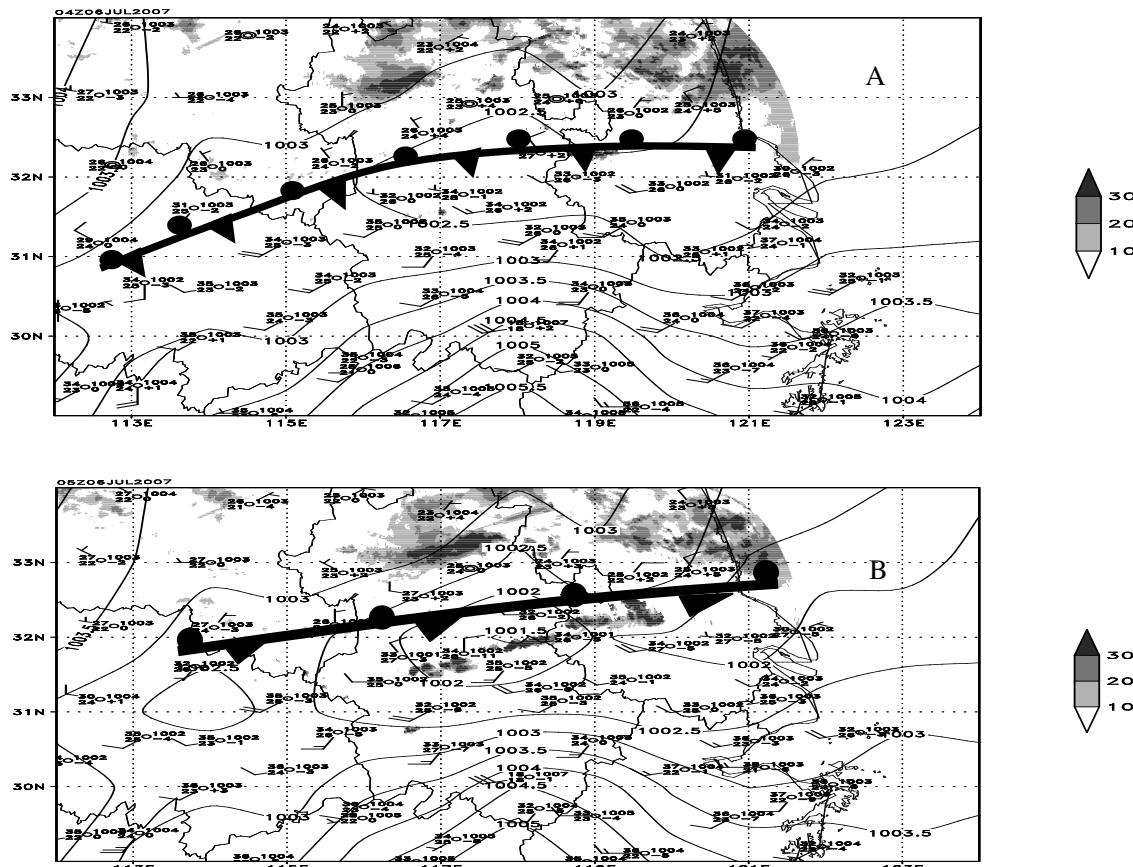
南京站位于此个例发生发展过程中绝大多数强对流云系的覆盖之下，这里选取南京站的探空曲线来分析有利大尺度环境下强对流发生发展的层结条件。2007年7月6日00时，该MCS个例尚未发生，南京上空的空气湿度并不大（图3.8a），在700 hPa以上都在75%以下，仅仅在900 hPa到700 hPa之间超过75%。此时对流有效位能（CAPE）为 $1032 \text{ J}\cdot\text{Kg}^{-1}$ ，而对流抑制能量也较小，为 $47 \text{ J}\cdot\text{Kg}^{-1}$ ，空气中可降水量达62 mm，其抬升指数为-3，如有触发机制可引发南京上空的强对流MCS的发生。到12时（图3.8b），由于低空西南急流的水汽输送作用，使得南京上空的空气湿度进一步加大，300 hPa以下空气的相对湿度几乎都超过75%，仅仅在500~600 hPa之间空气出现了一个薄的干层，此时可降水量达到73 mm。800 hPa以上虽然过程曲线都在温度曲线右侧，但是两者之间相对00时更为靠近，此时对流有效位能为 $916 \text{ J}\cdot\text{Kg}^{-1}$ ，所以虽然南京上空的空气仍然很潮湿，但是由于对流能量已经有所释放，而且对流抑制能量加大到 $72 \text{ J}\cdot\text{Kg}^{-1}$ ，以及空气不稳定性的降低，使得强对流降水虽然在持续，但是已经开始减弱，随后MCS系统趋于消亡。

2007年7月6日04时（图3.9a），该MCS个例尚未发生，此时地面上从江苏中部到安徽中部一直往西存在明显的准静止锋面，锋面上有风场辐合线（图3.9b）。地面锋面与风场辐合线南侧靠近锋面的站点1小时地面变压为负，锋面与风场辐合线南侧的地面风速明显要高于辐合线北侧风速。地面锋面与风场辐合线

南侧皖、浙、赣三省交界处受地面高压控制，南来水汽顺着高压西侧的西南气流源源不断地向辐合线处输送并在辐合线处堆积。

05时，随着地面南部高压中心的减弱（图3.9b），地面锋面与风场辐合线进一步加强，并在安徽中部以及湖北东北部形成低压闭合中心，安徽中部的低压中心范围较大，中心压强为1001.5 hPa，锋面和地面风场辐合线南侧风场风速有所加大，南侧1小时地面变压为负的观测站点数量增加很快，覆盖从江苏中南部，安徽中南部到江西北部，浙江北部的广大地区。此时锋面南侧出现一条明显的呈“虚线”形态的对流层中层强雷达反射率回波带，其中心强度可达30 dBz，该MCS个例对流系统已经生成。

06时，地面锋面与风场辐合线维持在原地并继续加强，其南部的地面高压随之减弱（图3.9C），湖北东部和安徽中部的低压中心也继续加强，锋面和地面风场辐合线南侧站点1小时地面负变压加深，对应MCS系统的对流云系开始呈现完整的虚线型排列（图2.1），其对流层中层雷达反射率回波逐渐加强，并连成完整的线性形态（图3.9C）。随着对流向西延伸加强，地面降水范围也随之向西扩展（图3.1）。



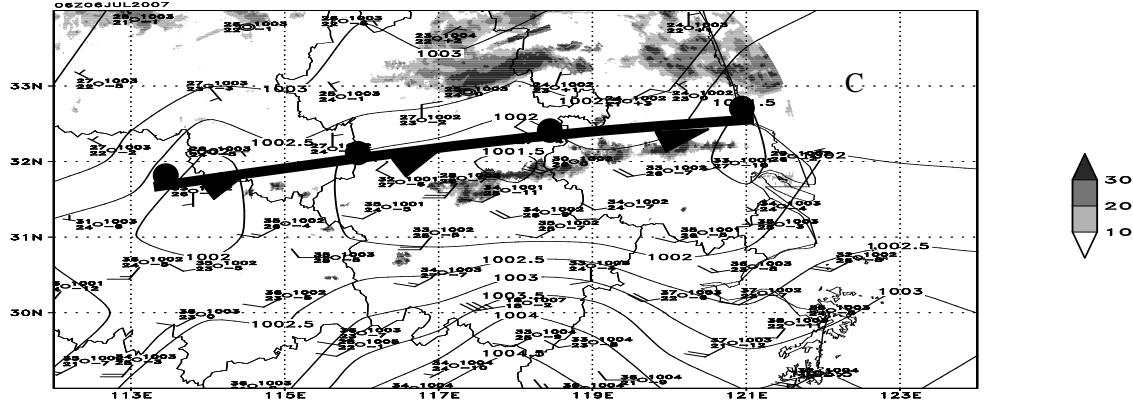


图3.9 虚线型个例 (7.6.5-7.6.14, M $\beta$  CS, 9h) 地面图。图中实线为等压线 (单位: hPa)，阴影区为5500m雷达反射率回波 (单位: dBz)，黑色粗实线为地面准静止锋面。A图为2007年7月6日04时；B图为2007年7月6日05时；C图为2007年7月6日06时。

地面锋面与风场辐合线在07时达到最大范围，辐合线南侧地面站1小时负变压继续加深，不过地面低压中心有所减弱，闭合中心范围减小，对应的MCS系统对流相对有所减弱，对流云系顶端降到200 hPa以下（图3.2b），但降水仍在持续（图3.1）。

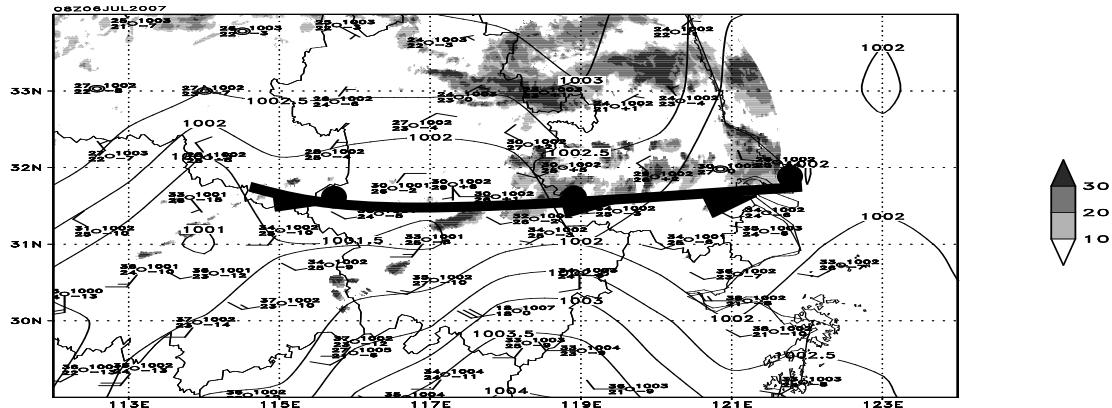


图3.10 虚线型个例 (7.6.5-7.6.14, M $\beta$  CS, 9h) 2007年7月6日08时（世界时）地面图。图中实线为等压线 (单位: hPa)，阴影区为5500 m雷达反射率回波 (单位: dBz)，黑色粗实线为地面锋面。

08时在江苏西部有地面高压从北部向南延伸，使得地面低压区出现断裂。地面锋面与风场辐合线西侧北抬（图3.10），在MCS对流云系上表现为对流云系的破裂，原来连成一片的对流云系分为两个相对独立的对流云系，各自独立发展（图3.1）。5500 m雷达反射率回波图上对流强反射带出现断裂（图3.10），雷达反射率

垂直剖面图又呈现出“虚线型”形态，并且对流强度有所减弱，最强的对流单体出现 $116.5^{\circ}\text{E}$ 附近，系统降水也集中在西侧对流云系覆盖范围内（图3.2a, b）。

09时北面的地面高压中心继续南压，安徽东部到江苏中北部地面站已经出现1小时正变压，东侧地面风场辐合线继续东伸，东侧对流云系受其影响东移发展。不过西侧湖北东部到安徽西部的低压中心仍然维持，这使得西侧的地面锋区与风场辐合线得以维存，从而使得MCS系统西部对流云系继续发展并造成降水，对应的雷达反射率回波图和反射率垂直剖面图上MCS系统内较强的对流单体仅仅存在于 $117^{\circ}\text{E}$ 附近（图3.2）。

从11时开始，受地面南北高压中心的合并挤压，湖北东部到安徽中部的低压中心开始减弱，整个MCS系统覆盖范围内地面观测站1小时地面变压已经为正，东部的对流云系已经开始趋于消散，对流层中层雷达反射率回波图上对应的强对流回波带已经不明显（图3.2a），强的对流回波维持在地面西侧低压区控制范围内地面风场辐合线上空。11时以后，随着地面西侧低压中心的持续减弱，西侧地面风场辐合线也逐渐趋于消亡，MCS系统对流云系逐渐减弱消失。

此虚线型个例发生时，中层大尺度环境场环流较为平直，低空存在着西南急流的水汽输送。对大尺度环境垂直动力场和热力场的剖析表明个例发生区域低空一般存在大范围辐合区，高空存在大范围辐散区，同时中低空空气层结趋于不稳定，在低空辐合区常常伴随着相对湿度大值区，利用探空资料还可以发现低空存在风场切变线和风场的垂直切变。地面上最主要的影响系统是地面准静止锋面与风场辐合线，个例对流云系受地面锋面与风场辐合线激发产生，在有利的低压环境中会发展较深并产生降水。对流云系内部强对流中心随着地面锋面与风场辐合线的消亡而趋于消散，降水也会随之停止。

### 3.2.2 散面型中尺度对流系统 (MCS) 典型个例分析

2007年江淮流域梅雨期中尺度对流系统 (MCS) 11个散面型个例分别为：  
 6.30.5-6.30.15, M  $\beta$  CS, 10h; 6.30.22-7.1.2, M  $\beta$  CS, 4h; 7.1.13-7.2.0, M  $\beta$  CS, 9h;  
 7.2.8-7.3.6, M  $\alpha$  CS, 22h; 7.2.8-7.2.16, M  $\beta$  CS, 8h; 7.3.0-7.3.14, M  $\beta$  CS, 14h;  
 7.3.18-7.4.13, M  $\beta$  CS, 19h; 7.4.3-7.4.17, M  $\alpha$  CS, 14h; 7.4.21-7.6.0, M  $\alpha$  CS, 27h;  
 7.7.7-7.7.17, M  $\beta$  CS, 10h; 7.8.5-7.8.9, M  $\beta$  CS, 4h。其中，个例7.4.3-7.4.17, M  $\alpha$  CS,

14h分别为典型的 $\alpha$ 中尺度对流系统，其系统初始时刻对流层中层雷达反射率回波形态呈现较为典型的散面型形态，本文选取此个例为例对散面型中尺度对流系统（MCS）进行详细分析。

该个例对流云系于2007年7月4日3时生成于陕西东南部，随即产生降水，降水集中在对流云系覆盖范围的中西部。系统形成后向东南发展，并缓慢东北向移动，生成1小时后对流中心温度低于-62  $^{\circ}\text{C}$ （图3.11）。系统产生初期云系内部对流在对流层中层雷达回波上呈现为松散的“散面型”形态，系统垂直伸展不高，04时前后对流云系在雷达回波垂直剖面图上仅仅维持在400~700 hPa之间，对流中心强度在10~20 dBz左右（图3.12）。

MCS个例对流云系在4时伸展出陕西境内，进入河南，山西，对流云系覆盖范围内降水强度持续加强，07时陕西南部又生成强对流中心，生成时云顶温度即低于-62  $^{\circ}\text{C}$ ，随后其东移并入主对流系统（图3.11）。对流云系覆盖范围内06~10时的每小时最大降水平分为4, 5, 22, 25, 11 mm。对流层中层雷达反射率回波06时出现超过30 dBz的强对流中心，到08时对流云系已经移至河南北部，对流层中层雷达反射率回波形态呈离散的片状分布，最强的高空雷达反射率回波出现在11时前后，在10: 30强度超过30 dBz的雷达回波覆盖范围最广，从雷达反射率垂直剖面图上可以清晰看到对流云系从06时前后迅速扩展并在垂直范围内伸展，06时在剖面的东面出现强度超过30 dBz的强对流中心，强对流中心位于600 hPa附近，垂直雷达反射率剖面在09~11时出现最大范围的强度超过30 dBz的对流中心（图3.12）。

11时以后，位于豫，皖，鲁三省交界处上空的最初生成于陕西南部的对流云系开始呈现离散程度较大的“支离破碎”的形态，07时生成于陕南的强对流中心持续发展并缓慢东移，11时位于陕南，河南西部交界处。随着东部对流云系的逐渐消亡，强降水中心从11时开始移动至西部对流云系的覆盖范围之下，降水强度在14时前后到达最大，14~15时1小时最大降水平分为20、14 mm。东部对流云系在17时前后逐渐消失，西部对流云系在14时后逐渐开始减弱，16时前后消散（图3.11）。

11时以后该个例内部虽然存在两个相对独立的强对流中心，但其对流层中层雷达反射率回波强度超过10 dBz的对流带仍然连续。两个对流中心的雷达回波带

在13时分离，东部对流带逐渐东移消散，但其对流中心强度仍超过30 dBz，西部对流带移动缓慢，主要维持在河南西部上空，对流中心强度也超过30 dBz（图3.12）。

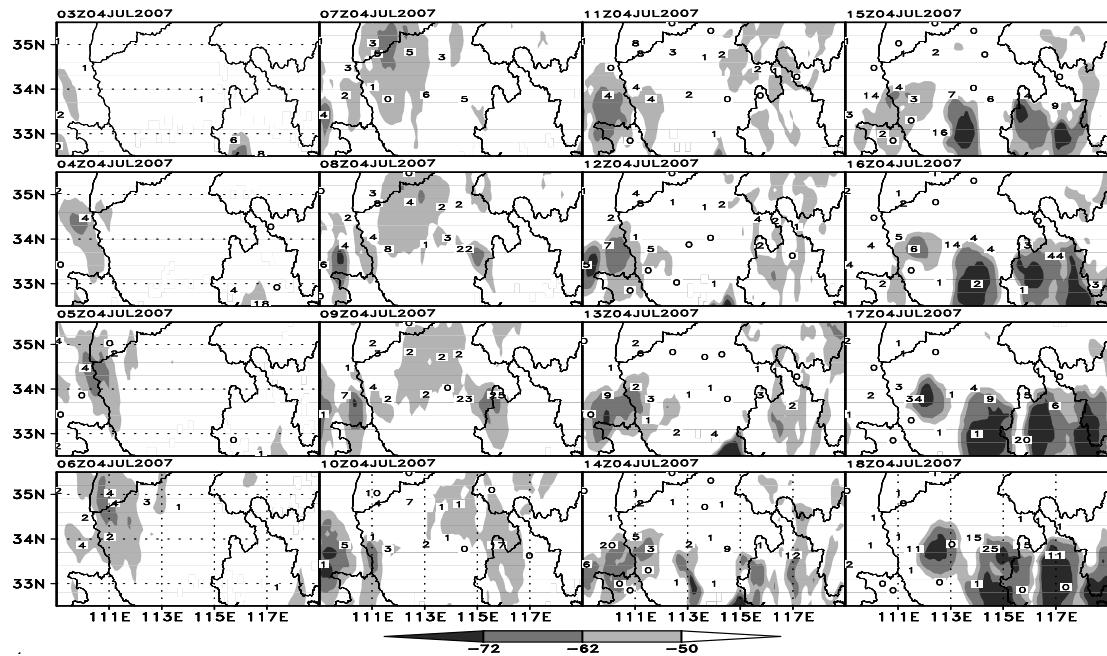
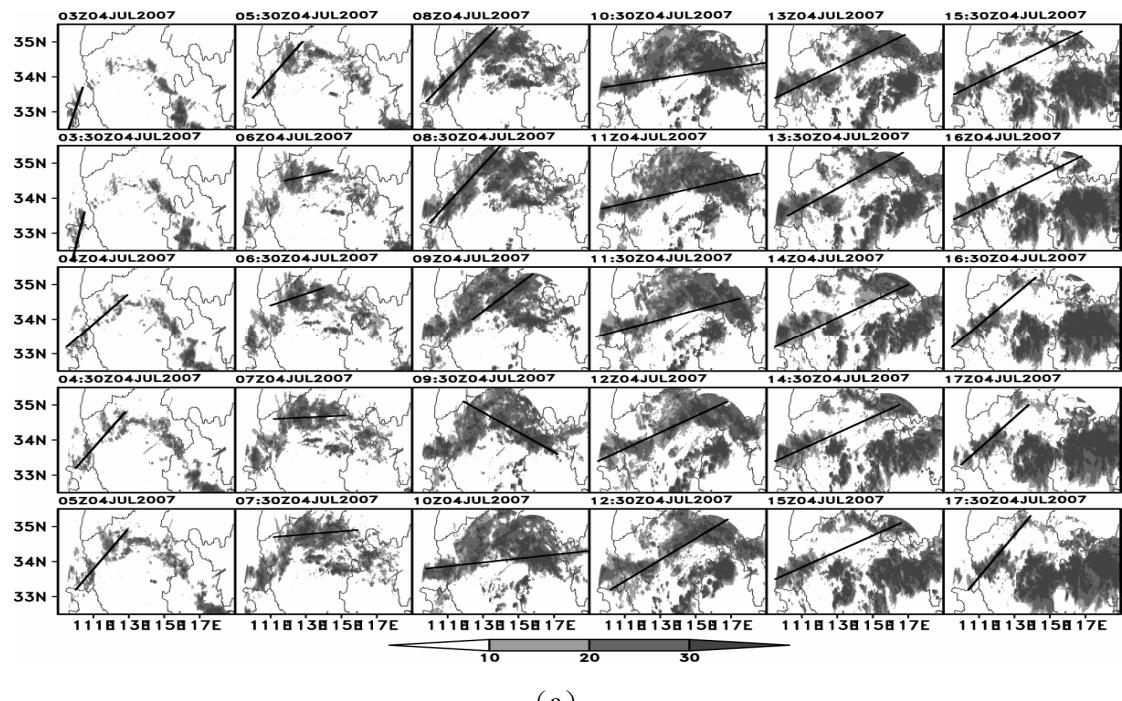
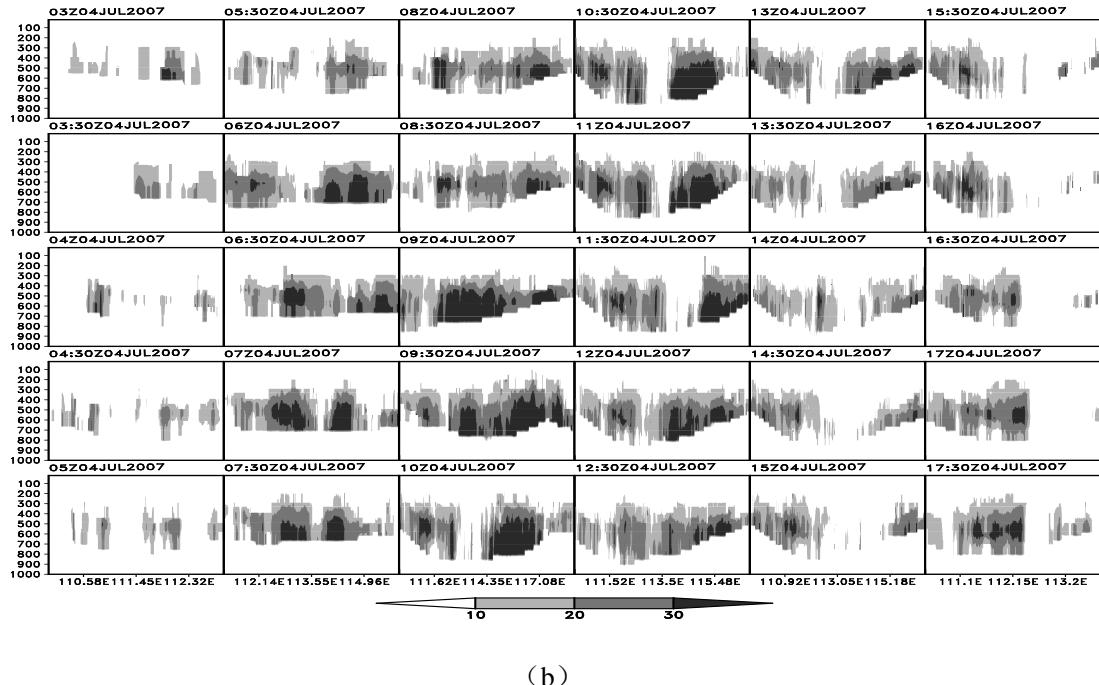


图3.11 散面型个例(7.4.3-7.4.17, M $\beta$  CS, 14h)生命周期发展过程图。阴影为TBB云图资料填图(单位: $^{\circ}\text{C}$ )，数字为前1 h降水量(单位: mm)。





(b)

图 3.12 (a) 散面型个例 (7.4.3-7.4.17, M<sub>B</sub> CS, 14h) 5500 m 雷达回波反射率图 (单位: dBz) ; (b) 散面型个例 (7.4.3-7.4.17, M<sub>B</sub> CS, 14h) 沿图 (a) 中黑色直线的雷达反射率垂直剖面图 (单位: dBz) 。

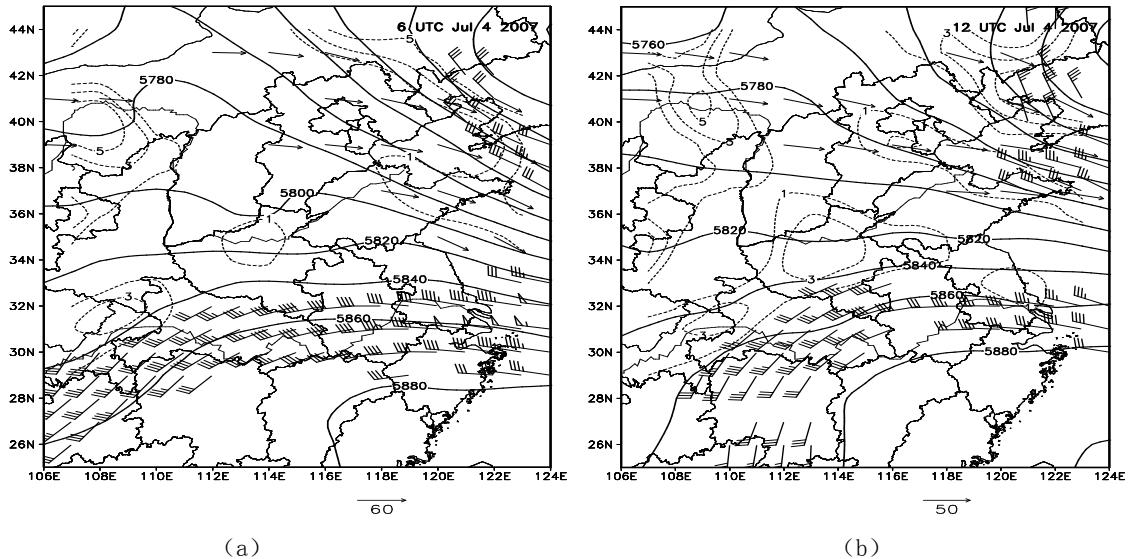


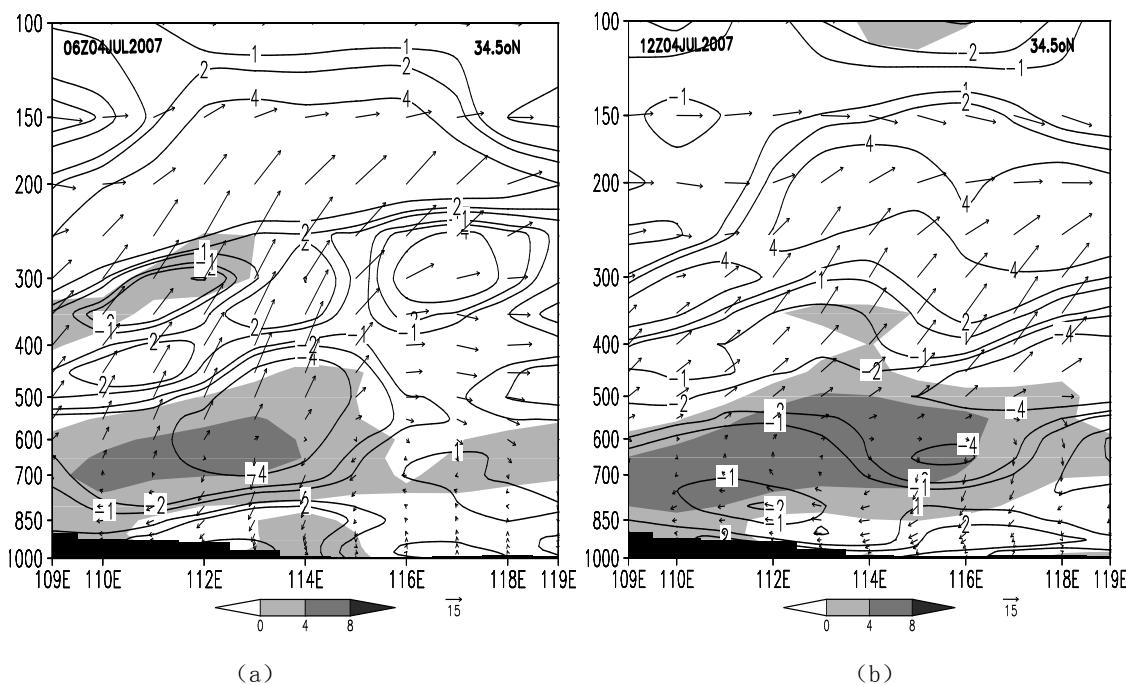
图3.13 散面型个例大尺度天气形势的分布图 (7.4.3-7.4.17, M<sub>B</sub> CS, 14h)。图 (a) 为2007年7月4日06时, 图 (b) 为2007年7月4日12时。箭矢线表示200 hPa上风速 $\geq 40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的高空急流; 风标表示700 hPa上的风速 $\geq 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的低空急流; 粗实线为500 hPa等高线 (单位: gpm); 短虚线表示500 hPa上的等涡度线 (单位:  $\times 10^{-5} \cdot \text{s}^{-1}$ )。

2007年7月4日00时, 陕西南部位于西风槽前, 500 hPa上西风槽位于106°E以西, 槽前存在正涡度区 (图略), 该个例系统尚未发生。副高位置偏南偏东, 低空700 hPa上沿副高西侧, 西风带上存在西南低空急流, 陕西南部位于低空西南

急流前方。

06时，西风槽位置少动， $110^{\circ}\text{E}$ 以东500 hPa上西风环流较为平直（图3.13），西风槽前正涡度区中心涡度加强并有所东伸，河南北部到陕西南部地区也出现正涡度区。700 hPa上低空西南急流加强北伸，湖北大部位于低空西南急流覆盖之下。此时个例对流云系已经发生并移至河南西部地区，个例发生区域位于500 hPa正涡度区内。从06时沿 $34.5^{\circ}\text{N}$ 和 $110^{\circ}\text{E}$ 针对大尺度环境场的剖面图可以看到（图3.14，图3.15）， $110^{\circ}\text{E} \sim 114^{\circ}\text{E}$ ,  $34^{\circ}\text{N} \sim 35^{\circ}\text{N}$ 之间区域上空存在大范围的正涡度区，正涡度区以低空辐合为主，辐合区上空是高空辐散区，高低空之间存在很强的垂直上升气流，同时对流层中低空空气相对湿度很大，超过95%。这种有利的大尺度环境使得个例对流云系在生成后迅速发展，形成大范围的对流云系。

12时，500 hPa上个例云系上空正涡度区范围扩大，低空西南风急流减弱（图3.13）。沿 $34.5^{\circ}\text{N}$ 上中低空垂直上升气流和相对湿度大值区东移减弱（图3.14，图3.15），东部对流云系受其控制对流活动开始减弱，降水开始减弱。沿 $110^{\circ}\text{E}$ 上中低空主要的低空辐合，高空辐散区和相对湿度大值区位于 $33^{\circ}\text{N} \sim 34^{\circ}\text{N}$ 之间（图3.14，图3.15），西部对流云系受其影响仍然维持较强的对流强度并产生强降水。



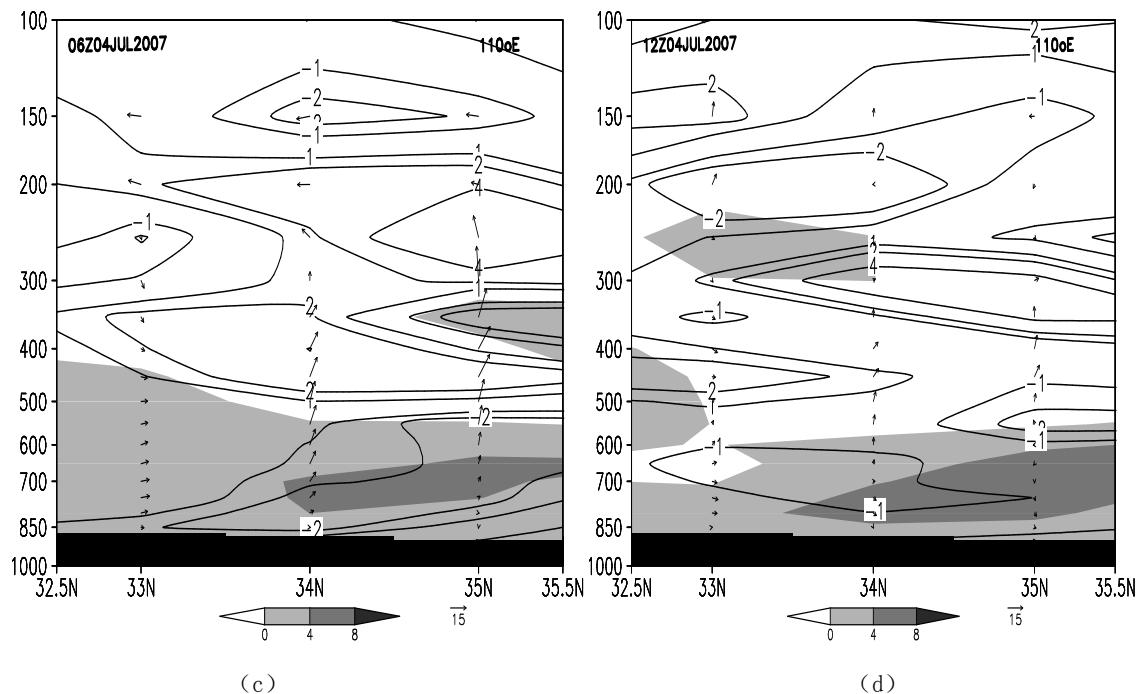
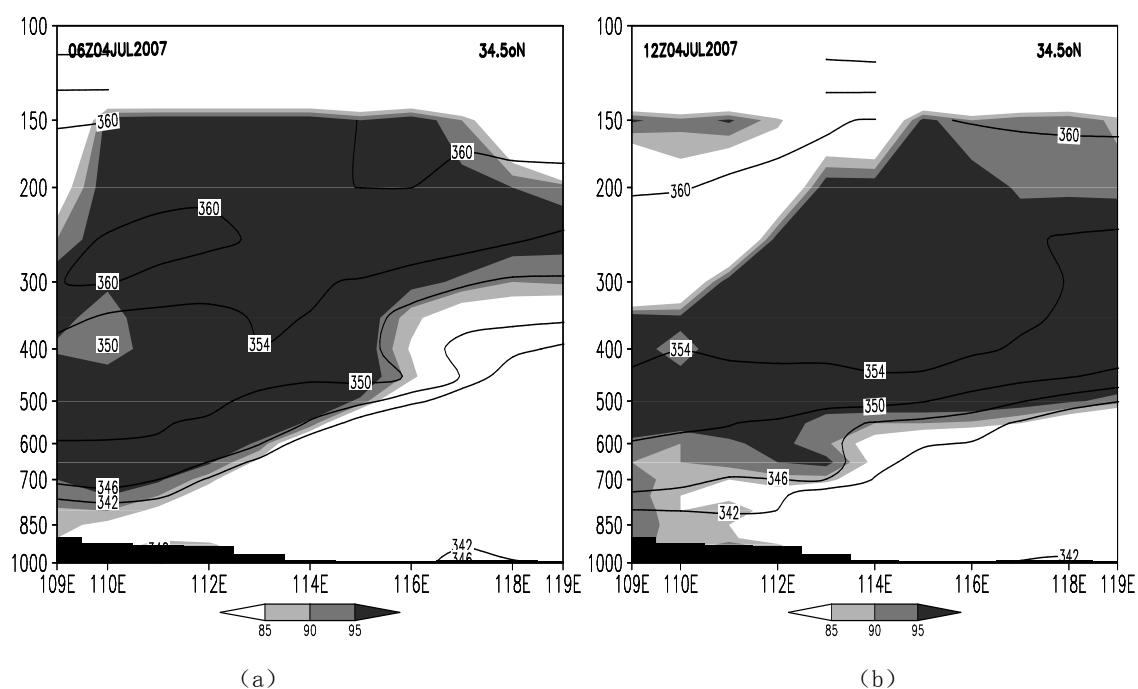


图 3.14 散面型个例大尺度环境动力场的垂直剖面图 (7.4.3–7.4.17, M $\beta$  CS, 14h)。图 (a) 为 2007 年 7 月 4 日 06 时, 沿 34.5°N; 图 (b) 为 2007 年 7 月 4 日 12 时, 沿 34.5°N; ; 图 (c) 为 2007 年 7 月 4 日 06 时, 沿 110°E; 图 (d) 为 2007 年 7 月 4 日 12 时, 沿 110°E。沿纬向剖面箭矢线表示沿纬向风速  $u$  分量 (单位:  $m \cdot s^{-1}$ ) 和垂直方向风速  $w*100$  (单位:  $m \cdot s^{-1}$ ) 的合成风矢量; 沿经向剖面箭矢线表示沿经向风速  $v$  分量 (单位:  $m \cdot s^{-1}$ ) 和垂直方向风速  $w*100$  (单位:  $m \cdot s^{-1}$ ) 的合成风矢量; 实线表示散度分布 (单位:  $\times 10^{-5} \cdot s^{-1}$ ); 阴影区域表示涡度分布 (单位:  $\times 10^{-5} \cdot s^{-1}$ ); 低层柱形黑色阴影表示地形。



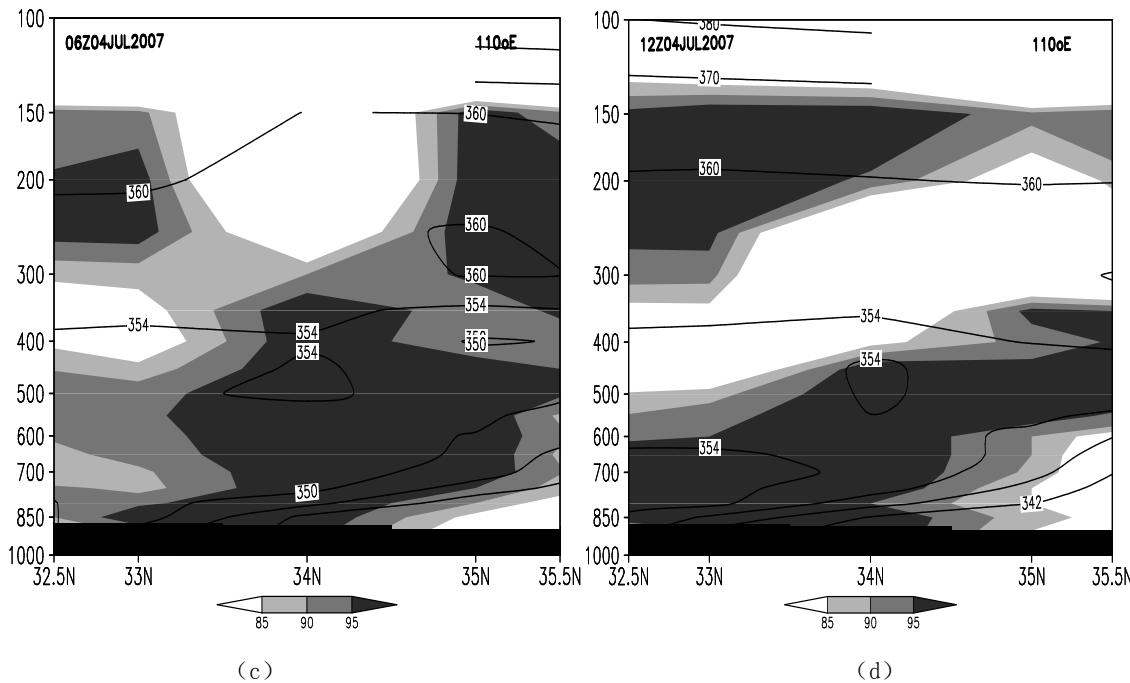


图 3.15 散面型个例大尺度环境热力场的垂直剖面图 (7.4.3~7.4.17, M $\beta$  CS, 14h)。图 (a) 为 2007 年 7 月 4 日 06 时, 沿 34.5°N; 图 (b) 为 2007 年 7 月 4 日 12 时, 沿 34.5°N; ; 图 (c) 为 2007 年 7 月 4 日 06 时, 沿 110°E; 图 (d) 为 2007 年 7 月 4 日 12 时, 沿 110°E。实线表示假相当位温 (单位: K); 阴影区域表示相对湿度 (单位: %); 低层柱形黑色阴影表示地形。

7 月 4 日 00 时, 个例尚未发生, 500 hPa 上陕西东南部位于西风槽前(图 3.16), 西风槽从中层延伸到低层, 850 hPa 出现低压闭合中心。槽前 500~700 hPa 陕西南部到河南西部地区存在因风速变化而产生的风场辐合区, 500 hPa 到低层 925 hPa 风场由偏西南风逐渐转为偏东南风, 对流层中低层存在风场垂直切变。500 ~700 hPa 个例的东北方向存在风场切变线, 切变线由对流层中层到低层逐渐东伸南压, 850 hPa 以下风场切变线与个例发生区域近似平行 (图 3.16)。采用 NCEP 资料对个例发生区域上空低空风场和动力场分析会发现低空 700~850 hPa 的流场上关中东部到河南西部大片地区存在风场的气旋性切变, 切变区存在正涡度区, 正涡度区大值中心位于 850 hPa (图略)。06 时低空风场气旋性切变区逐渐东移, 风场的气旋性切变加强, 700 hPa 上沿个例移动方向存在狭长的正涡度区, 正涡度中心位于关中东部到河南北部地区, 涡度中心强度超过  $4 \times 10^{-5} \cdot s^{-1}$  (图 3.17)。

到 12 时, 个例处于生命史发展后期, 110°E 以西西风槽内出现闭合低压中心, 低压中心一直伸到低层 925 hPa。对流层中低层存在风场由高到低风向逐渐

偏东的垂直切变，500 hPa 到 925 hPa 存在风场切变线（图 3.18）。NCEP 低空流场上 700~850 hPa 风场气旋性切变继续加强，个例对流云系覆盖范围内正涡度区范围加大，700 hPa 上正涡度中心强度都在  $4 \times 10^{-5} \cdot s^{-1}$  以上（图 3.19）。

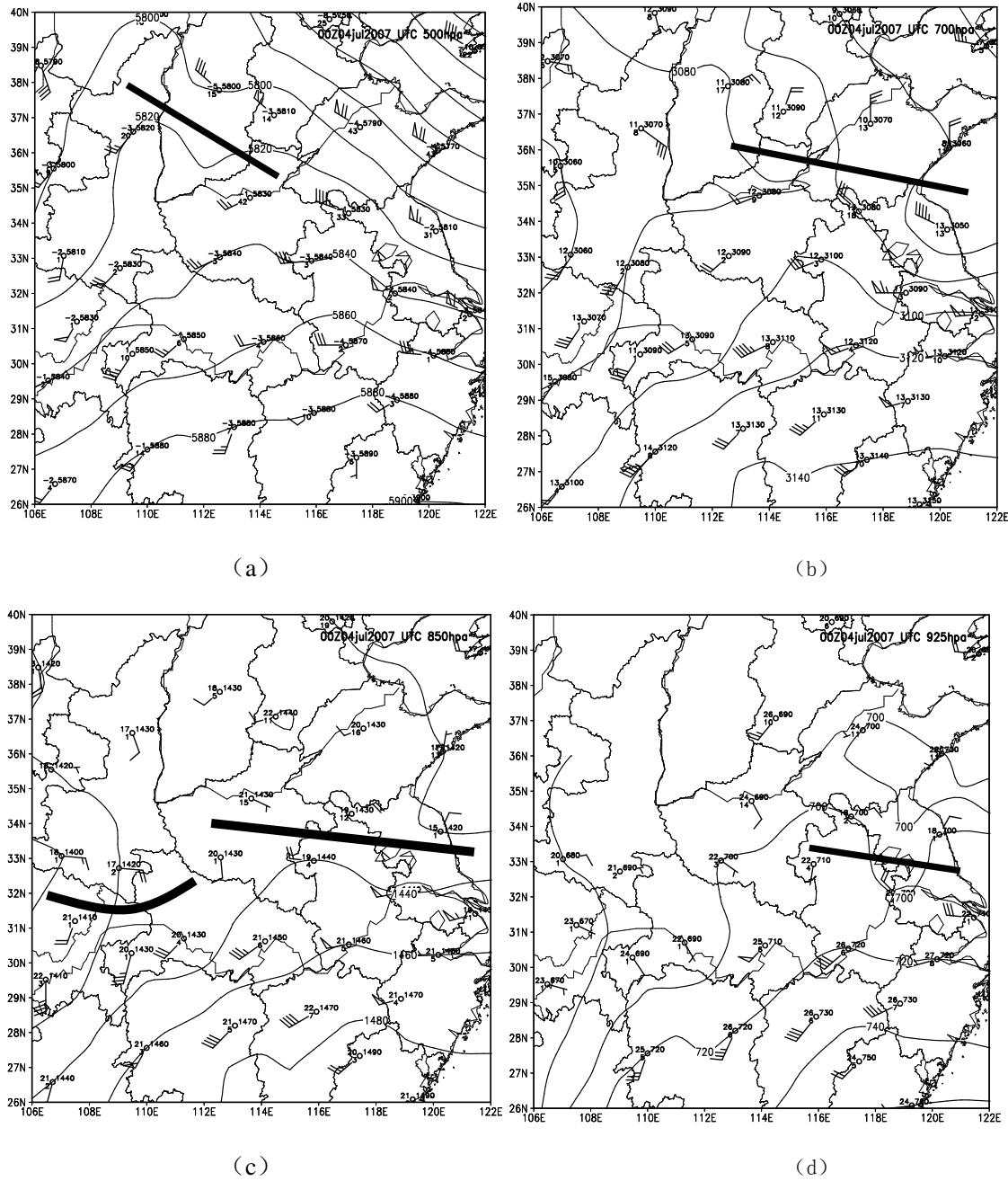


图3.16 散面型个例(7.4.3-7.4.17, M $\beta$  CS, 14h) 2007年7月4日00时高空天气形势分布图。图(a)为500 hPa, 图(b)为700 hPa, 图(c)为850 hPa, 图(d)为925 hPa。风标为站点处风速风向(单位: $m \cdot s^{-1}$ )；站点处左边数字上面数字为温度(单位: $^{\circ}C$ )，下面数字为温度露点差(单位: $^{\circ}C$ )，右边数字为位势高度(单位:gpm)；实线为等高线(单位:gpm)；黑色粗线为风场切变线。

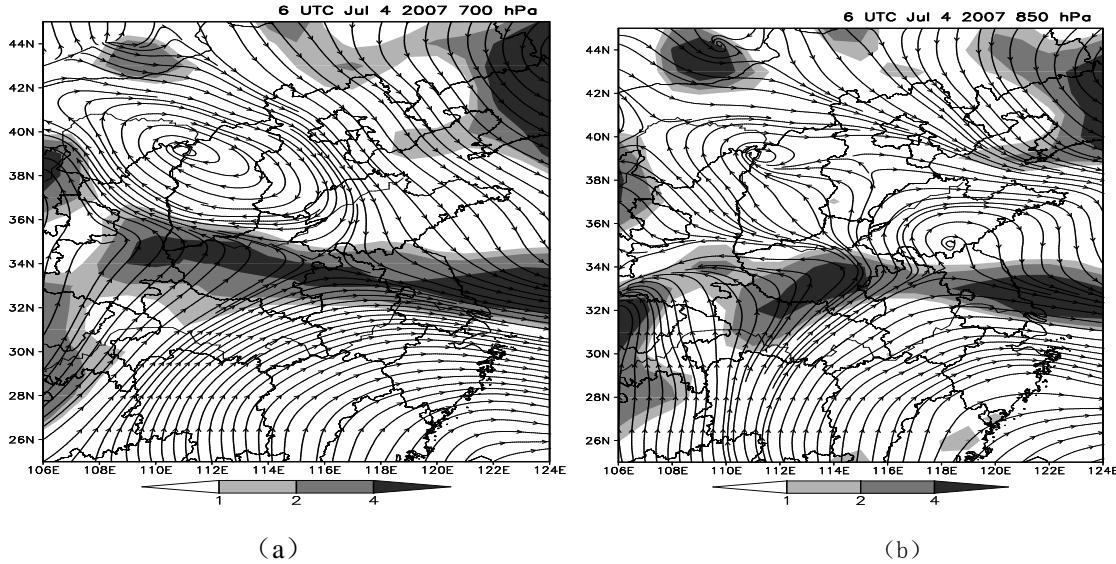


图3.17 散面型个例 (7.4.3-7.4.17, M $\beta$  CS, 14h) 2007年7月4日06时大尺度低空流场和涡度分布图。

图(a)为700 hPa, 图(b)为850 hPa。实线表示低空风场流场, 阴影区表示涡度(单位:  $\times 10^{-5} \cdot s^{-1}$ )。

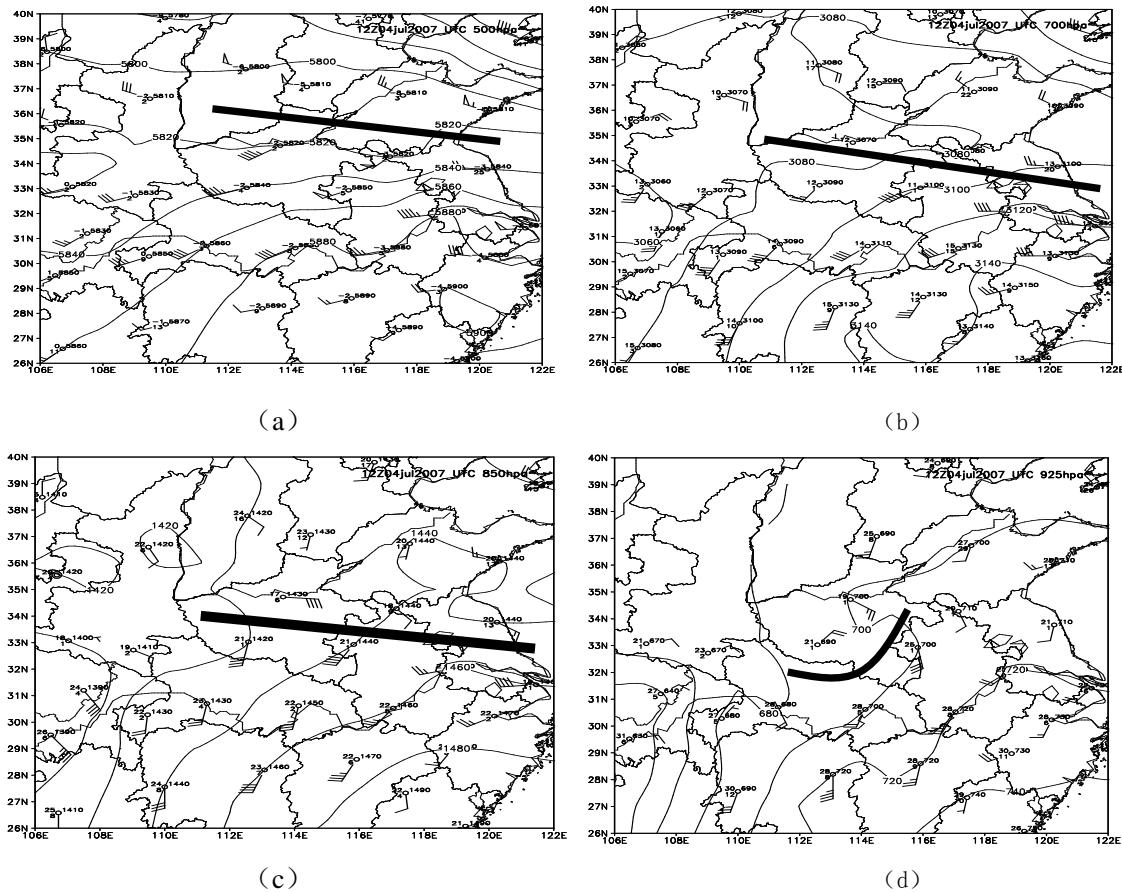


图3.18 散面型个例 (7.4.3-7.4.17, M $\beta$  CS, 14h) 2007年7月4日12时高空天气形势分布图。图(a)为500 hPa, 图(b)为700 hPa, 图(c)为850 hPa, 图(d)为925 hPa。风标为站点处风速风向(单位:  $m \cdot s^{-1}$ ) ; 站点处左边数字上面数字为温度(单位:  $^{\circ}C$ ), 下面数字为温度露点差(单位:  $^{\circ}C$ ), 右边数字为位势高度(单位: gpm) ; 实线为等高线(单位: gpm) ; 黑色粗线为风场切变线。

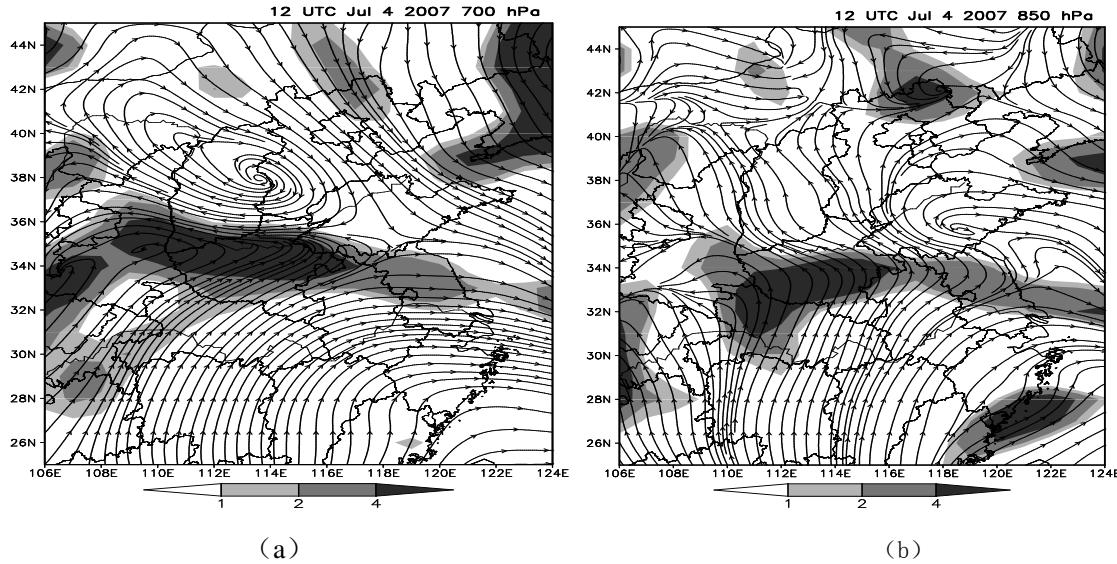
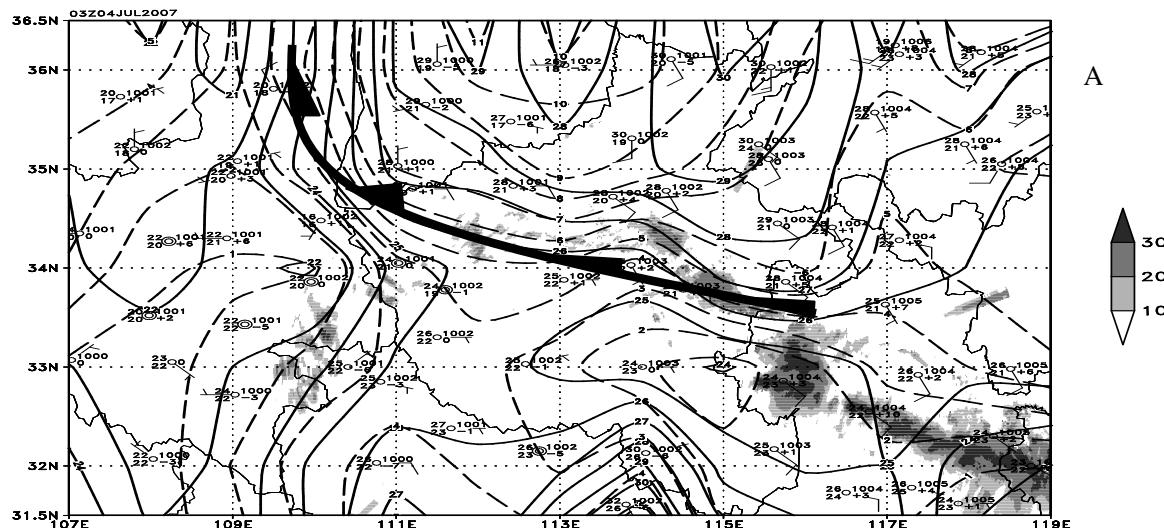


图3.19 散面型个别例(7.4.3-7.4.17, M<sub>B</sub> CS, 14h) 2007年7月4日12时大尺度低空流场和涡度分布图。

图(a)为700 hPa, 图(b)为850 hPa。实线表示低空风场流场, 阴影区表示涡度(单位:  $\times 10^{-5} \cdot s^{-1}$ )。

2007年7月4日03时，地面上从 $110^{\circ}\text{E}$ 以西向个例发生区域伸出一条冷的湿舌，沿陕西、河南、山西三省交界处存在地面冷锋，地面上锋面内温度、湿度变化剧烈（图3.20A），MCS个例最初对流云系发生于陕西东南部地面冷锋面附近，在初始对流云系产生地区沿锋面存在地面风场辐合区，云系内部对流在地面风场辐合的激发下产生，此时降水已经开始。到06时，随着湿冷舌的东移推进，锋面移至山西南部到河南大部地区，此时相应的强对流延伸至河南北部地区（图3.20B）。06时以后个例生命史范围内冷湿舌持续东移，范围逐渐扩大，强对流带随冷湿舌东移而向东发展，于14时前后随着地面冷锋的逐渐减弱而逐渐消散，降水随即停止。



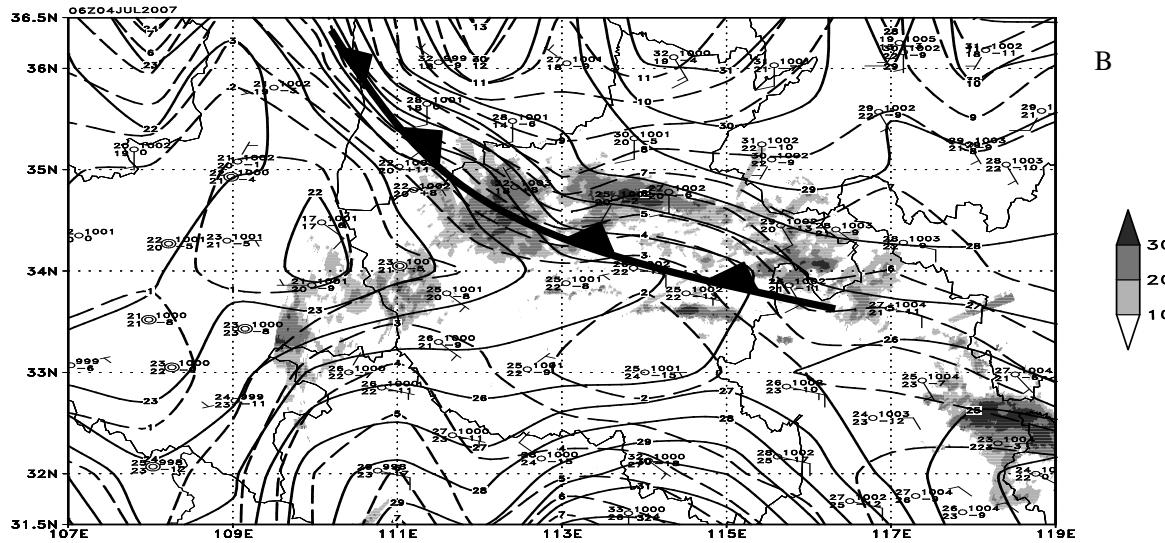


图 3.20 散面型个例 (7.4.3-7.4.17, M $\beta$  CS, 14h) 地面图。粗黑线为锋面, 实线为等温线 (单位:  $^{\circ}$ C) , 虚线为等温度露点差线 (单位:  $^{\circ}$ C) 。A 图为 2007 年 7 月 03 时, B 图为 2007 年 7 月 06 时。

此例位于对流层中层 500 hPa 上深厚西风槽前, 槽伸至低空 925 hPa 附近, 槽前 850 hPa 到 500 hPa 之间存在深厚的正涡度区, 例上空空气相对湿度很大, 对流层中低层相对湿度超过 95%。对流层低层存在辐合, 中层存在辐散, 高空辐散区和低空辐合区之间存在强烈的垂直上升气流。低空存在偏西南风急流, 中低层存在风场的垂直切变, 850 hPa 以上中低层存在风场流场气旋性切变与正涡度区的重叠。例对流云系初生于地面冷锋锋面内的地面风场辐合区, 但此例的地面风场辐合没有前面分析的 2 个例强。地面冷锋受其西侧冷湿舌的东移而向东推进, 对流云系内部强对流带随着地面冷锋的移动而向前发展并产生降水, 随着地面冷锋的减弱移出强对流带逐渐消散, 降水随即停止。

### 3.2.3 实面型中尺度对流系统 (MCS) 典型个例分析

2007 年江淮流域梅雨期中尺度对流系统 (MCS) 21 个实面型个例分别为: 6.29.6-6.29.11, M $\beta$  CS, 5h; 6.29.8-6.30.9, M $\beta$  CS, 25h, 6.30.17-7.2.2, M $\alpha$  CS, 33h; 7.1.21-7.2.8, M $\beta$  CS, 11h; 7.2.16-7.3.9, M $\beta$  CS, 17h; 7.3.7-7.4.2, M $\alpha$  CS, 19h; 7.4.10-7.5.10, M $\alpha$  CS, 24h; 7.5.11-7.5.14, M $\beta$  CS, 3h; 7.5.12-7.5.19, M $\beta$  CS, 7h; 7.6.17-7.7.0, M $\beta$  CS, 7h; 7.6.18-7.6.22, M $\beta$  CS, 4h; 7.7.2-7.7.6, M $\beta$  CS, 4h; 7.7.2-7.7.13, M $\beta$  CS, 11h; 7.7.17-7.8.8, M $\beta$  CS, 15h; 7.7.20-7.8.1, M $\beta$  CS, 5h;

7.8.5-7.8.21, M $\alpha$  CS, 16h; 7.8.6-7.8.10, M $\beta$  CS, 4h; 7.8.12-7.9.5, M $\alpha$  CS, 17h; 7.9.1-7.9.10, M $\beta$  CS, 9h; 7.9.1-7.9.12, M $\beta$  CS, 11h; 7.9.11-7.9.23, M $\alpha$  CS, 12h。

这里选取个例 7.7.2-7.7.6, M $\beta$  CS, 4h 做一分析，其系统初始时刻对流层中层雷达反射率回波形态呈现较为典型的实面型形态。

该个例于2007年7月7日02时生成于河南安徽交界处，云系内最强的对流出现在初始时刻，生成一小时内对流云顶温度即低于-62 °C，对流覆盖区域产生降水（图3.21）。其初始时刻对流云系覆盖范围内对流层中层雷达反射率回波呈典型的“实面型”分布，对流中心强度超过30 dBz，对流从900 hPa延伸到200 hPa，强度超过30 dBz的对流中心从低层延伸至500 hPa（图3.22）。

个例于03时对流云系主体移入安徽境内，随后在安徽中部东向移动发展，对流云顶温度逐渐升高，04时对流云顶温度超过-62 °C，系统逐渐东移减弱，06时对流系统移动到苏皖交界中部地带，于06时消亡。02时开始，对流降水集中在云系北部附近，最强一小时出现在04时，1小时降水为3 mm，降水在个例对流云系消亡前一小时停止（图3.21）。03时前后对流层中层对流反射率强回波中心位于河南东南部与安徽中部交界处，垂直方向强度超过30 dBz的强对流中心高度仍维持在500 hPa附近，强对流中心沿剖面方向伸展范围减小，04时强对流带继续东移，对流中心强度逐渐减弱，至05时对流层中层雷达反射率回波强度降至30 dBz以下，垂直方向上强度超过30 dBz的对流带仅仅维持在800 ~ 900 hPa之间。05:30分，上述强对流带消失，系统对流雷达回波迅速减弱，于06时前后逐渐消散（图3.22）。

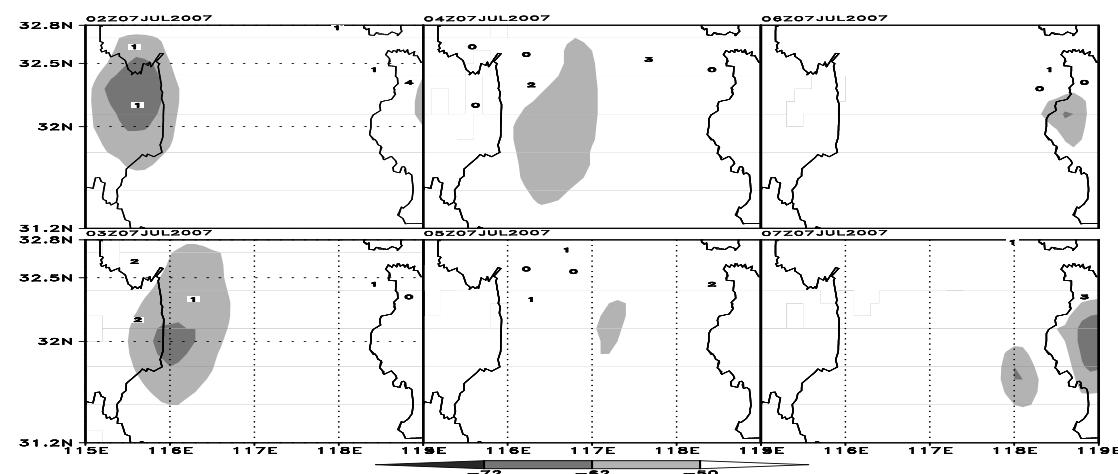


图3.21 实面型个例 (7.7.2-7.7.6, M $\beta$  CS, 4h) 生命周期发展过程图。阴影为TBB云图资料填图 (单位: °C)，数字为前1 h降水量 (单位: mm)。

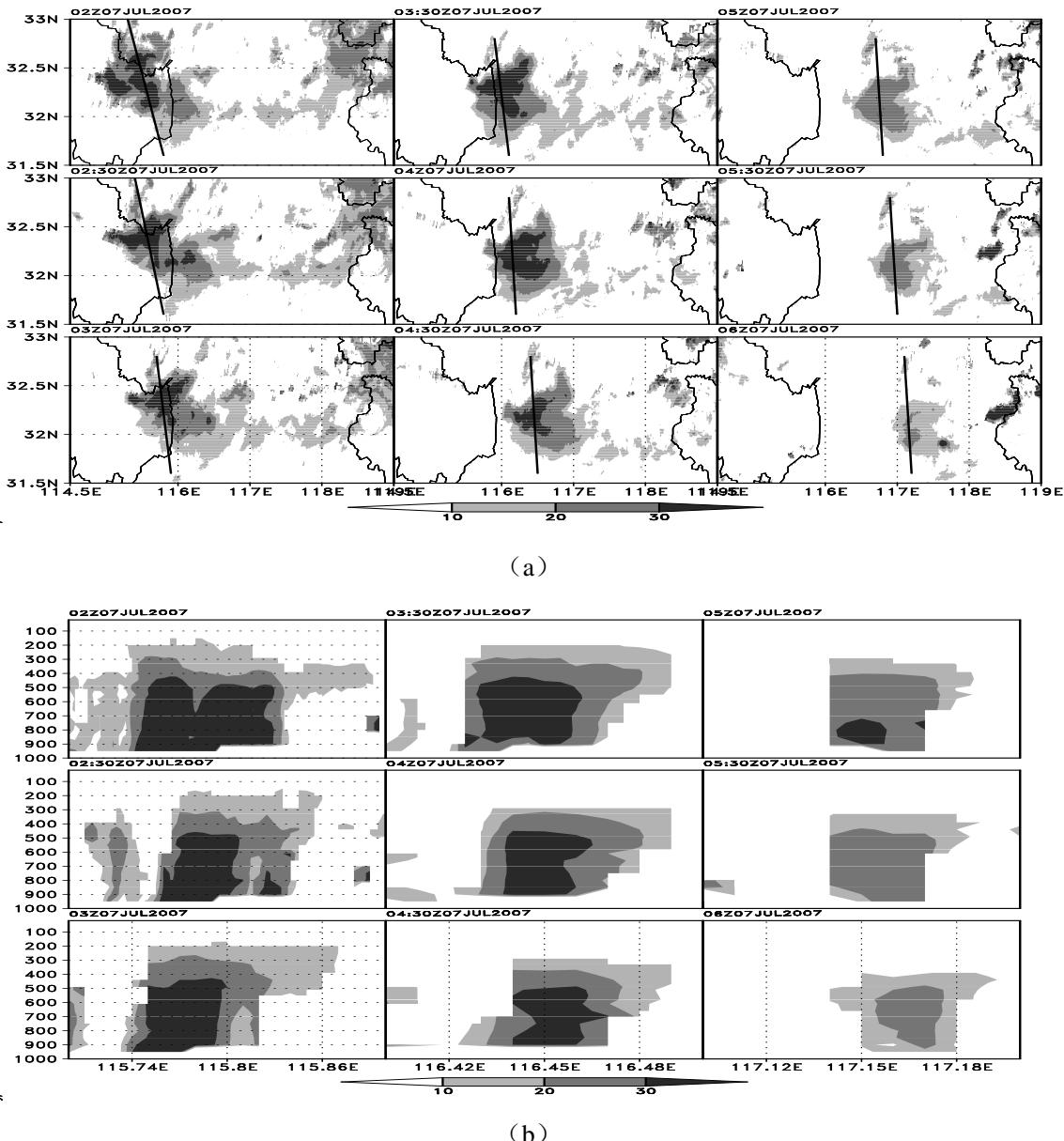


图 3.22 (a) 实面型个例 (7.7.2-7.7.6, M $\beta$  CS, 4h) 5500 m 雷达回波反射率图 (单位: dBZ); (b) 实面型个例 (7.7.2-7.7.6, M $\beta$  CS, 4h) 沿图 (a) 中黑色直线的雷达反射率垂直剖面图 (单位: dBZ)。

2007 年 7 月 7 日 00 时, 个例尚未发生, 500 hPa 上淮河流域受平直的西风气流控制, 5880 gpm 线北端到达 30°N, 河南南部到安徽西部地区存在正涡度区(图 3.23a)。低空 700 hPa 从 28°N~33°N 之间, 108°E 以东存在强烈的低空偏西急流, 个例发生区域上空位于低空急流轴的左侧。低层 700~925 hPa 风场流场上个例发生区域北边存在风场的气旋性切变, 850 ~925 hPa 上风场流场上气旋性切变位于低空涡旋的南部。河南到安徽北部, 江苏北部地区覆盖大片的正涡度区,

涡度区中心超过  $4 \times 10^{-5} \cdot s^{-1}$  (图 3.23b, c, d)。沿  $115.5^{\circ}\text{E}$  和  $116.2^{\circ}\text{E}$  对个例发生区域上空对流层低层 500 hPa 以下存在相对湿度大值区, 相对湿度中心超过 95% (图略)。

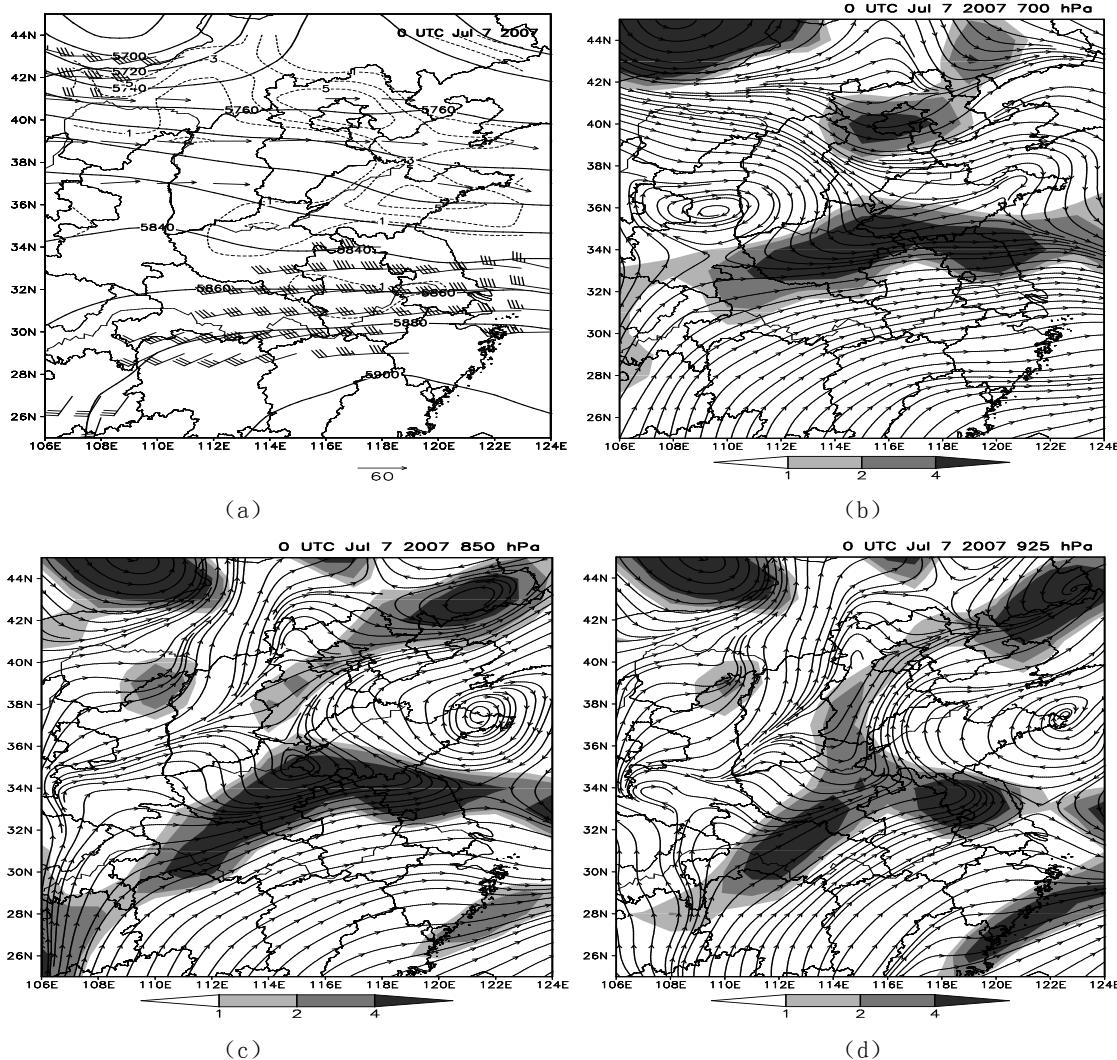


图3.23 实面型个例(7.7.2-7.7.6, MB CS, 4h) 2007年7月7日00时大尺度天气形势和低空流场和涡度分布图。图(a)为大尺度天气形势, 箭矢线表示200 hPa上风速 $\geq 40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的高空急流; 风标表示700 hPa上的风速 $\geq 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的低空急流; 粗实线为500 hPa等高线(单位:gpm); 短虚线表示500 hPa上的等涡度线(单位: $\times 10^{-5} \cdot \text{s}^{-1}$ )。图(b), (c), (d)分别为700 hPa, 850 hPa, 925 hPa低空流场和涡度分布图。实线表示低空风场流场, 阴影区表示涡度(单位: $\times 10^{-5} \cdot \text{s}^{-1}$ )。

2007年7月7日00时, 探空场上, 个例发生区域河南东南部到安徽中部地区500 hPa上位于西风短波槽前方, 短波槽从500 hPa延伸到低层925 hPa(图3.24)。对流层中低层存在风场切变线, 500 hPa风场切变线位于关中到河南西部地区, 700 hPa风场切变线以河南中部为中心, 左侧切变线北伸到山西境内, 右侧切变线向

东北方向延伸到山东境内，850 hPa到925 hPa风场切变线维持在沿河南北部到安徽北部，江苏北部地区。对流层低层风场切变线南侧风速明显高于切变线北侧风速。个例发生区域位于对流层中低层风场切变线南侧。对流层中低层空气湿度较大，700 hPa以下阜阳，安庆，南京三站温度露点差都在 $3^{\circ}\text{C}$ 以下，三站温度露点差在925 hPa达到最小，均为 $1^{\circ}\text{C}$ （图3.24）。阜阳站上空对流层中低层400 hPa以下空气相对湿度都超过75%（图略）。

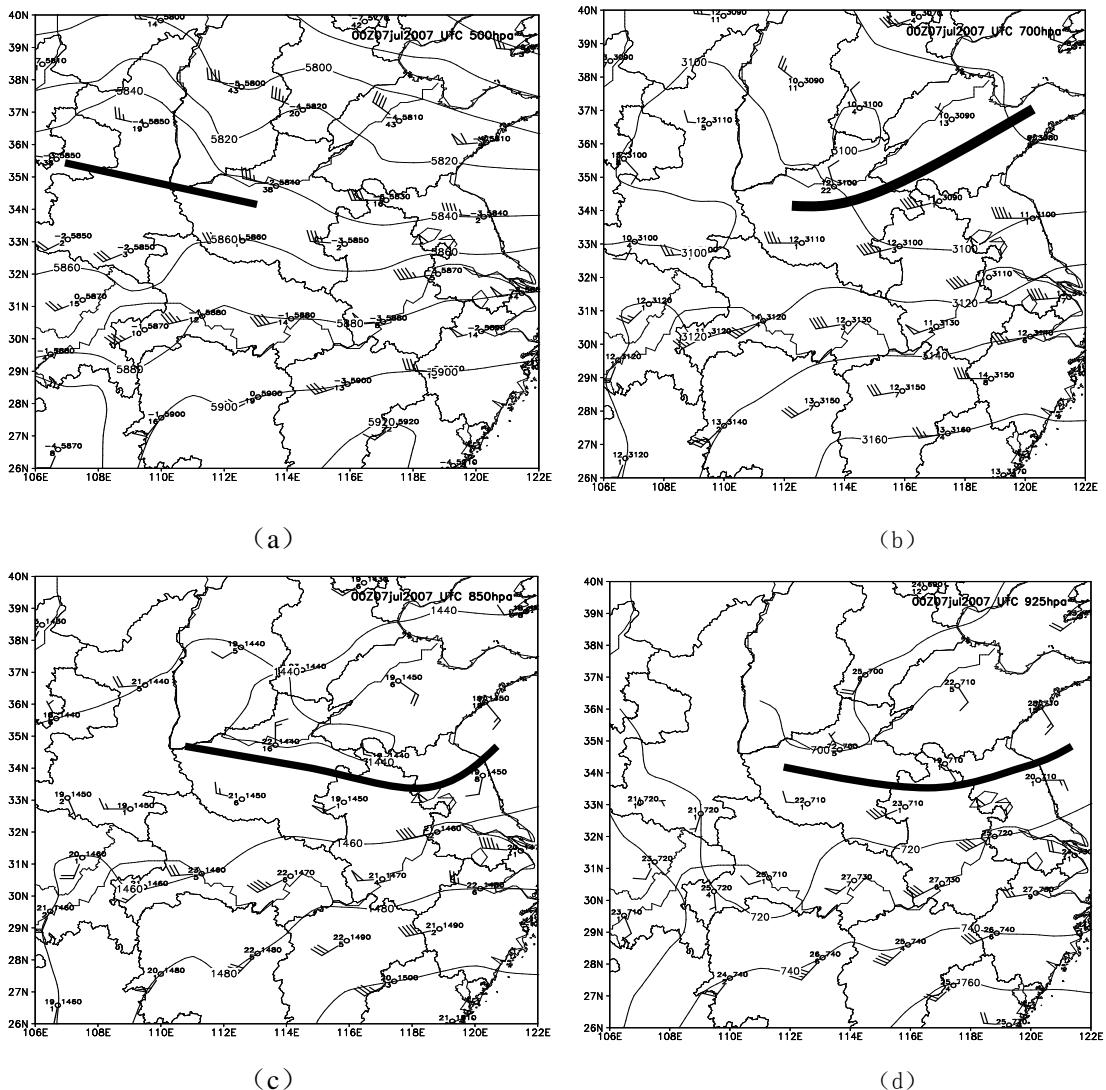
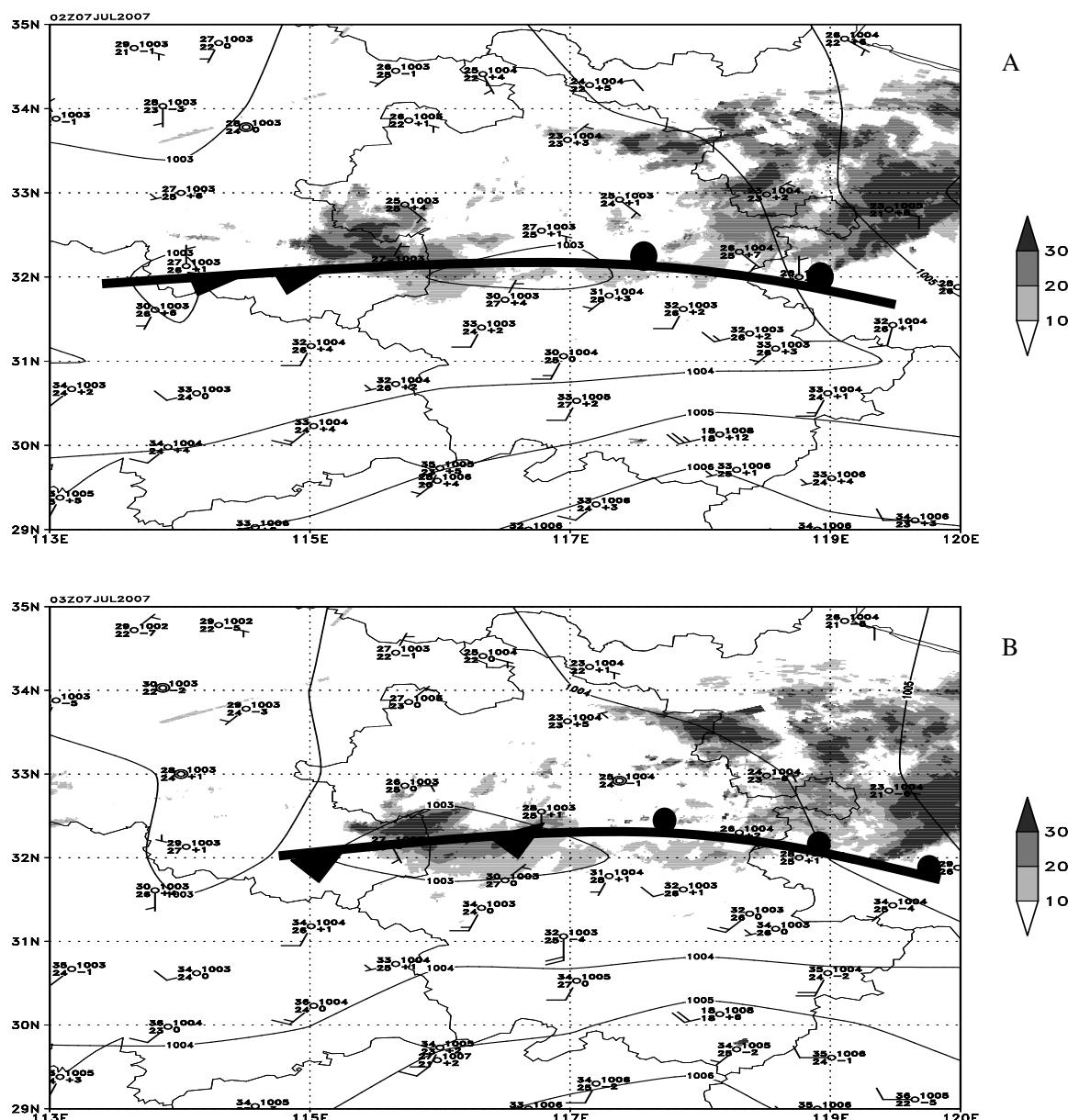


图3.24 实面型个例(7.7.2-7.7.6, M $\beta$  CS, 4h) 2007年7月7日00时高空天气形势分布图。图(a)为500 hPa, 图(b)为700 hPa, 图(c)为850 hPa, 图(d)为925 hPa。风标为站点处风速风向(单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )；站点处左边数字上面数字为温度(单位:  $^{\circ}\text{C}$ )，下面数字为温度露点差(单位:  $^{\circ}\text{C}$ )，右边数字为位势高度(单位: gpm)；实线为等高线(单位: gpm)；黑色粗线为风场切变线。

2007年7月7日02时个例发生初始时刻，河南到安徽大部为地面低压区，河南南部到安徽西部存在地面低压中心，沿地面低压中心两侧，河南南部到安徽中部

为地面锋面，地面锋面两侧温度变化剧烈，达 $3\sim6^{\circ}\text{C}$ ，地面锋面内存在地面风场切变辐合区，个例对流云系最初在地面冷锋区内低压中心风场切变辐合区附近产生（图3.25A）。03时，随地面低压区东移，地面锋面位置有所东移，地面闭合低压中心覆盖范围扩大，对流云系东移发展（图3.25B），到04时，地面低压区继续东移，闭合中心消失，安徽中部形成地面风场辐合区，锋面西侧冷锋面南压，对流云系在冷锋区附近发展，位置少动（图3.25C）。04时以后，随着个例发生区域地面锋面的逐渐减弱，个例云系内部对流强度逐渐减弱，对流于06时逐渐减弱消亡。



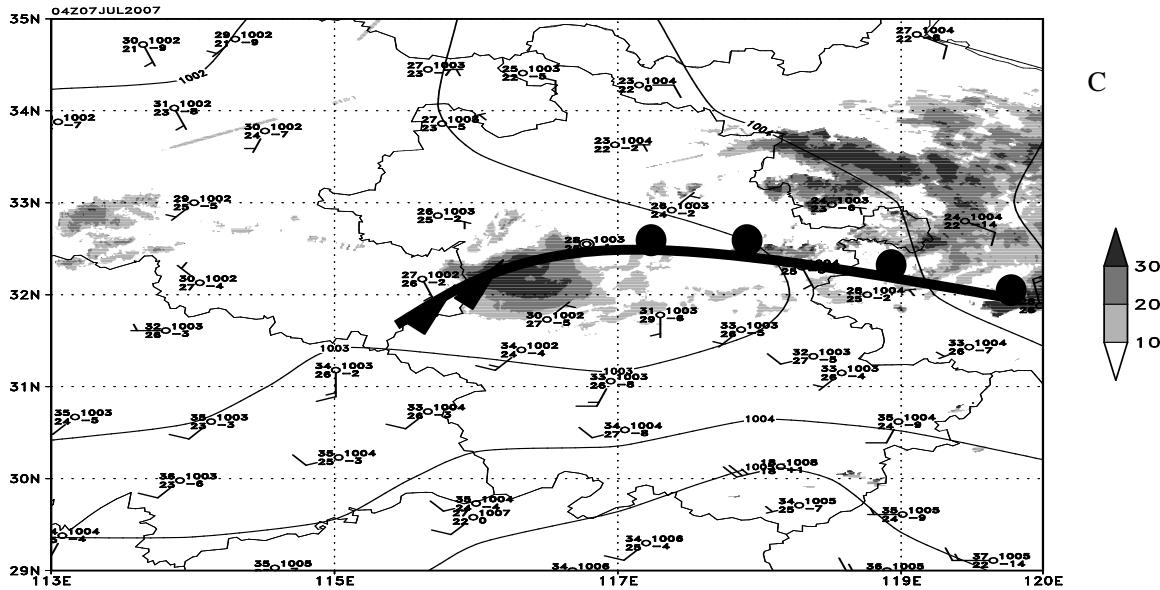


图 3.25 实面型个例 (7.7.2-7.7.6,  $M\beta$  CS, 4h) 地面图。图中实线为等压线 (单位: hPa)，黑色粗线为地面锋面，阴影区为 5500 m 雷达反射率回波 (单位: dBz)。A 图为 2007 年 7 月 7 日 02 时；B 图为 2007 年 7 月 7 日 03 时；C 图为 2007 年 7 月 7 日 04 时。

此个例维持时间较短，对流层中层 500 hPa 环流形势较为平直，利用探空资料可以发现个例发生区域位于对流层中低层短波槽前方，槽前对流层中低层低空存在风场的气旋性切变，对流层低层整层切变区附近伴随着大片正涡度区与相对湿度大值区的重叠，对流层低层空气较为潮湿。地面场上个例发生区域位于宽广的低压区范围内，个例发生在地面低压中心两侧的地面锋面附近的风场辐合区内，对流云系内部强对流带随着地面锋面西侧冷锋的东移而移动发展并产生降水，随着地面锋面西侧冷锋的东移减弱，对流云系内部强对流逐渐减弱消散，降水随即逐渐减弱并消失。

### 3.2.4 实线型中尺度对流系统 (MCS) 典型个例分析

2007 年江淮流域梅雨期中尺度对流系统 (MCS) 6 个实线型个例分别为：7.1.19-7.2.0,  $M\beta$  CS, 5h; 7.2.7-7.2.13,  $M\beta$  CS, 6h; 7.3.7-7.3.19,  $M\beta$  CS, 12h; 7.5.10-7.5.15,  $M\beta$  CS, 5h; 7.5.14-7.5.21,  $M\beta$  CS, 7h; 7.7.7-7.7.22,  $M\alpha$  CS, 15h。这里选取典型的  $\alpha$  中尺度个例 7.7.7-7.7.22,  $M\alpha$  CS, 15h 对该类型中尺度对流系统 (MCS) 进行详细分析。

该个例于 2007 年 7 月 7 日 07 时生成于江苏、安徽交界处，个例对流云系最初呈线性形态，从太湖流域附近东北-西南向延伸至安徽境内，生成时 TBB 云图对流

云系中心云顶温度即低于-62 °C，对流产生的降水已经开始。此时对流层中层雷达反射率回波图上个例云系内部强对流呈现出典型的“实线型”形态，对流回波沿对流云系云图覆盖区域延伸。个例对流云系初始时刻伸展较高，从900 hPa延伸至100 hPa附近，中心强度超过30 dBz，雷达反射率垂直剖面图呈现密实的连续线状分布形态（图3.26，3.27）。

08时开始对流云系范围逐渐扩大，云系内部对流迅速发展，09时对流云顶温度即低于-72 °C，线性对流云系横向跨越江苏全境，个例对流云系覆盖范围出现强降水，1小时降雨量达22 mm。08时到09时个例对流云系内部强对流回波和其垂直剖面图形态变化不大，只是对流回波强度超过30 dBz的强对流带范围持续扩展（图3.26，3.27）。

10时，沿个例对流云系走向方向在安徽西部产生新的对流云系，云顶温度低于-62 °C。11时两相对独立对流云系连成一片，其云顶温度低于-72 °C范围大大扩展，覆盖安徽东南部到江苏西南部大部分地区。连续的对流云系带随后快速发展，并缓慢东南向移动，覆盖长三角大部分地区，对流云系内部强对流活动于14时前后到达顶峰。10时至14时个例覆盖区域附近对流降水强度很大，10时在江苏西部出现1小时42 mm的雨量，12时安徽东南部出现1小时48 mm的雨量。个例对流云系对流层中层雷达回波从11时前后逐渐从实线型线性形态转变为密实的片状分布形态，随后于15时前对流回波持续增强（图3.26，3.27）。

15时开始，个例对流云系内部对流强度逐渐减弱，并加速东移，于18时完全移出安徽境内，此时云顶温度开始高于-72 °C，19时后对流云系快速减弱并东移，于20时前后东移入海，22时前后完全移出江淮流域境内。在此期间对流云系覆盖范围内强降水仍在持续，15~20时最大1小时降雨量分别为14, 21, 17, 4, 3, 8 mm，降水在云系覆盖整个范围内都存在。对流层中层雷达反射率回波从15时前后开始逐渐减弱，对流中心强度超过30 dBz的对流带范围逐渐减小，强回波对流带随个例云系的加速东移也向东加速移动，雷达反射率回波在垂直方向延伸范围从15时开始快速减小，16时以后的回波仅维持在700 ~300 hPa之间，随后对流强度迅速减弱。强对流带回波于20时前后东移入海，此时雷达反射率资料上该个例对流云系已经完全消失（图3.26，3.27）。

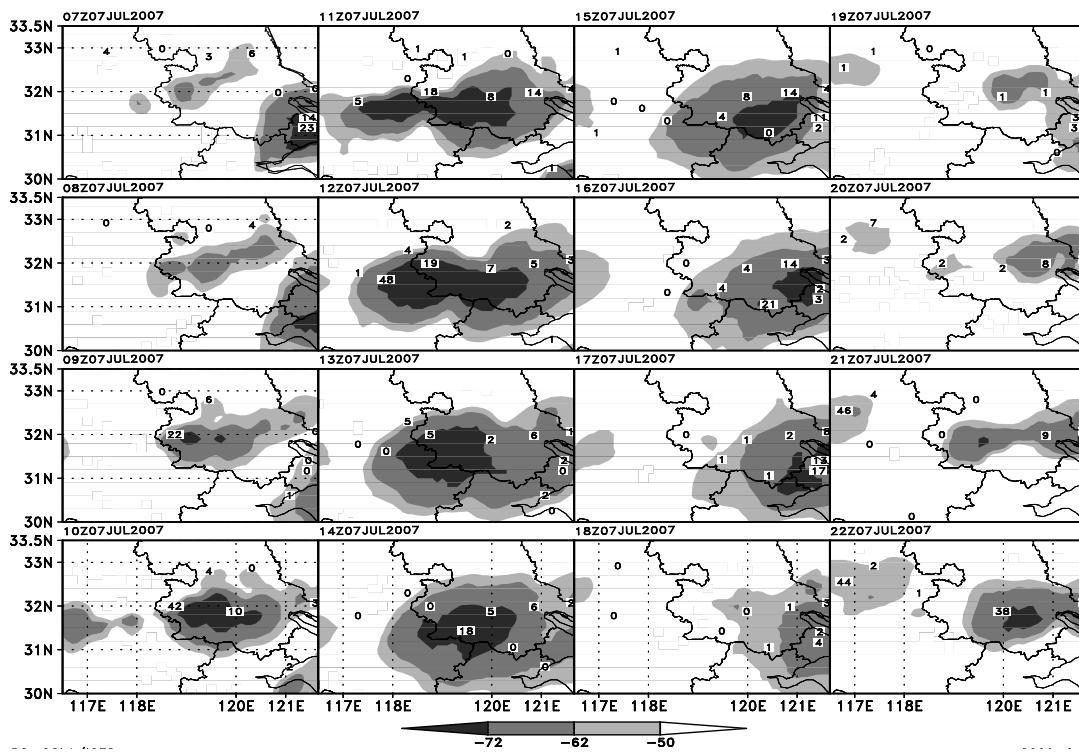
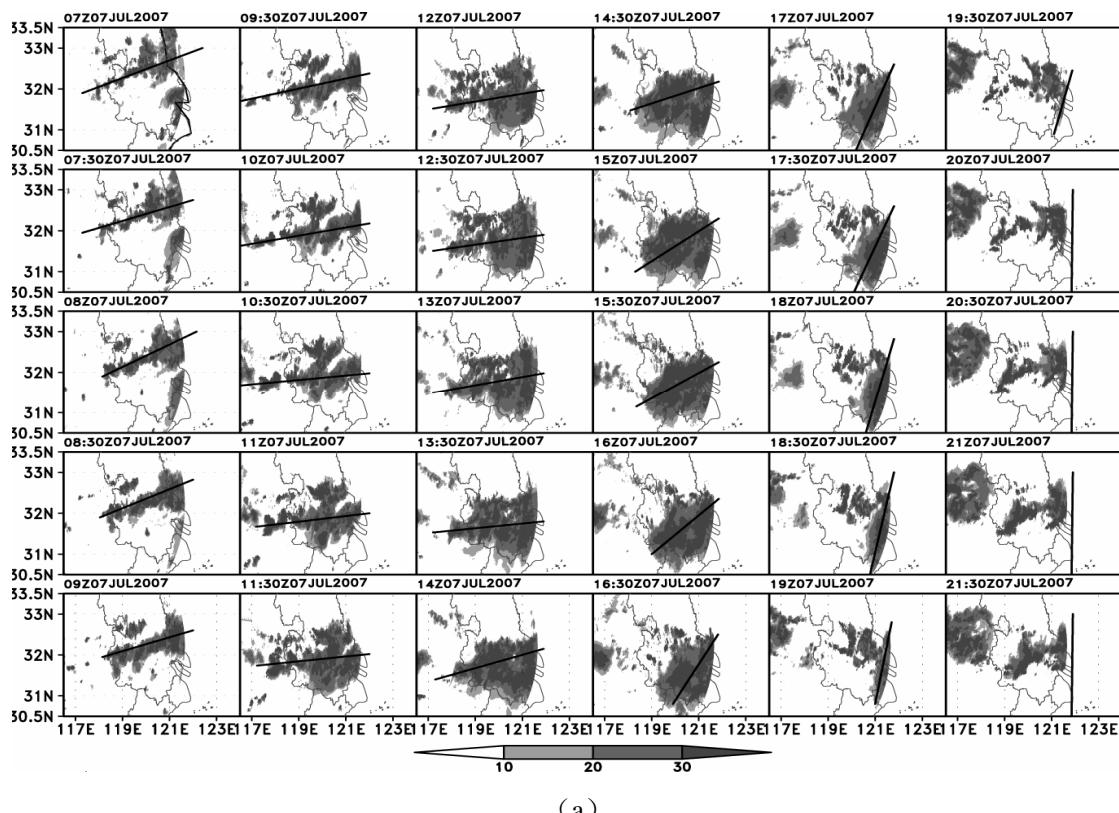
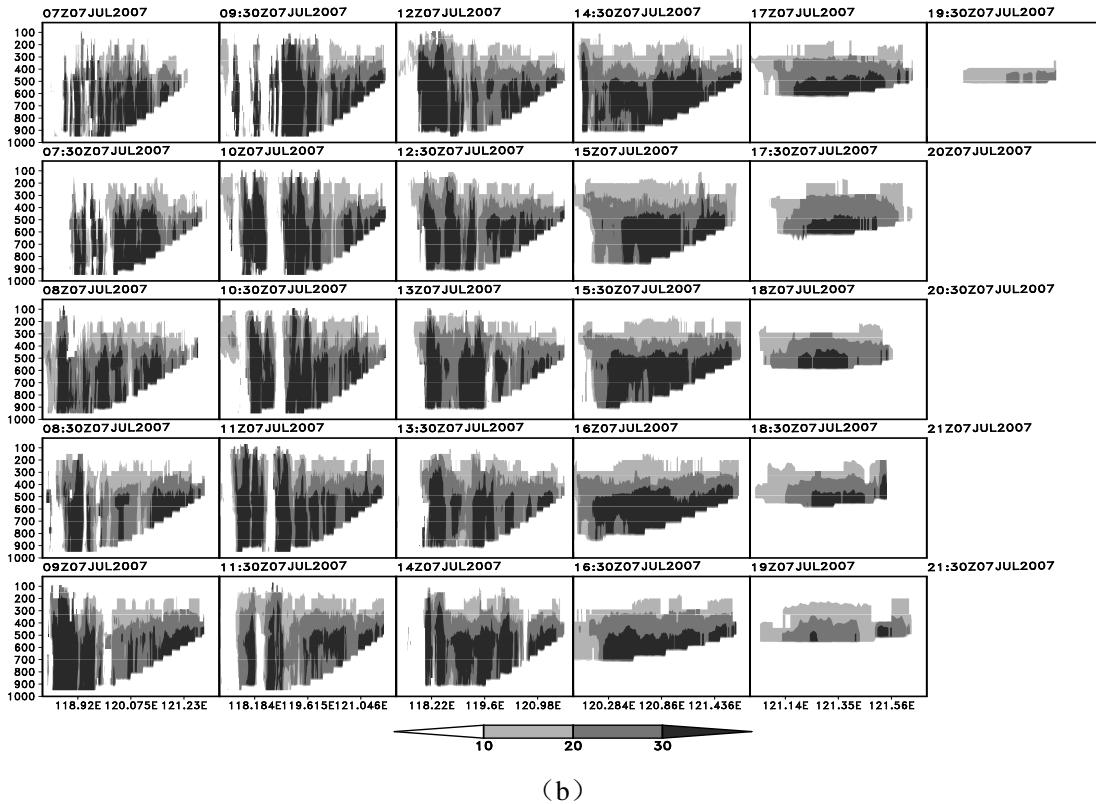


图 3.26 实线型个例 (7.7.7-7.7.22, Ma CS, 15h) 生命周期发展过程图。阴影为 TBB 云图资料填图 (单位: °C), 数字为前 1 h 降水量 (单位: mm)。



(a)



(b)

图 3.27 (a) 实线型个例 (7.7.7-7.7.22, Ma CS, 15h) 5500 m 雷达回波反射率图 (单位: dBZ); (b) 实线型个例 (7.7.7-7.7.22, Ma CS, 15h) 沿图 (a) 中黑色直线的雷达反射率垂直剖面图 (单位: dBZ)。

2007 年 7 月 7 日 06 时, 个例尚未发生。安徽东南部与江苏西南部交界处对流层中层 500 hPa 上受平直的西风环流控制, 副高北抬至安徽南部到浙江北部地区, 5880 gpm 线北端到达  $30^{\circ}\text{N}$  附近, 个例发生区域上空存在明显的正涡度区。此时对流层低层 700 hPa 上沿副高西北侧为大范围的低空急流, 急流北端伸至  $33^{\circ}\text{N}$  左右, 个例发生区域位于低空急流轴左侧辐合区内 (图 3.28a)。

12 时, 个例对流云系处于发展成熟期, 苏皖交界南部上空对流旺盛。500hPa 上副高轻微北抬, 在安徽境内形成短波脊, 而江苏境内受短波槽控制, 个例对流云系主体位于短波槽控制下, 槽内正涡度区范围扩大, 强度增强。此时低空 700 hPa 上西南风急流大大减弱, 低空西风急流维持在副高 5880 gpm 线附近 (图 3.28b)。个例发生前后的 06 时和 12 时, 低空 700 hPa 以下个例发生区域北边风场流场上都存在低空风场切变线, 切变区与正涡度区相互重叠, 个例发生区域苏皖交界南部位于低空风场切变区与正涡度区的南缘 (图略)。

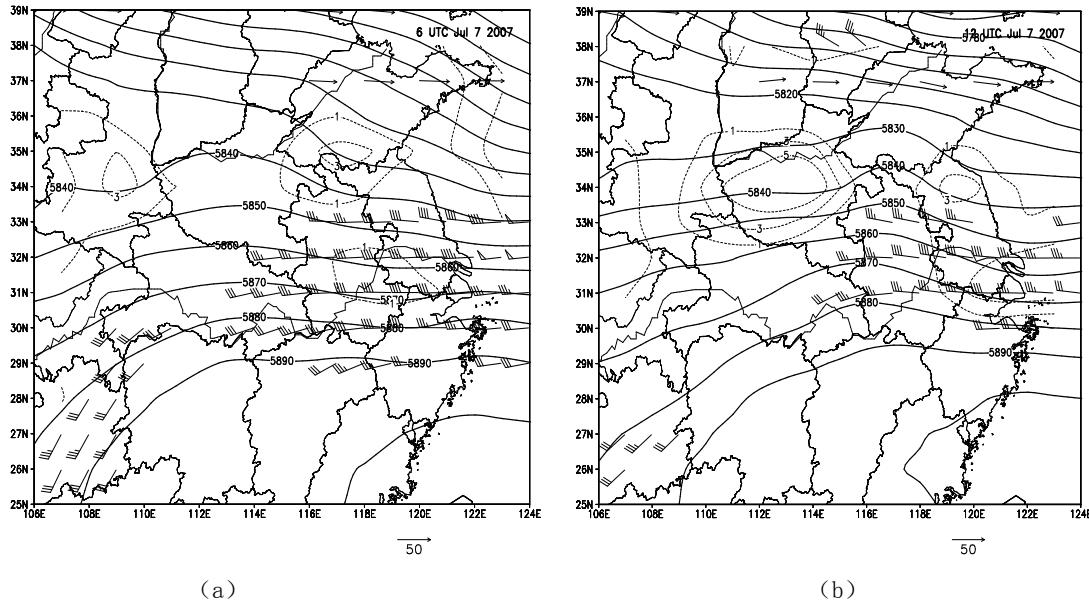


图 3.28 实线型个例 (7.7.7-7.7.22, Ma CS, 15h) 大尺度天气形势的分布图。图 (a) 为 2007 年 7 月 7 日 06 时, 图 (b) 为 2007 年 7 月 7 日 12 时。箭矢线表示 200 hPa 上风速  $\geq 40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的高空急流; 风标表示 700 hPa 上的风速  $\geq 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的低空急流; 粗实线为 500 hPa 等高线 (单位: gpm); 短虚线表示 500 hPa 上的等涡度线 (单位:  $\times 10^{-5} \cdot \text{s}^{-1}$ )。

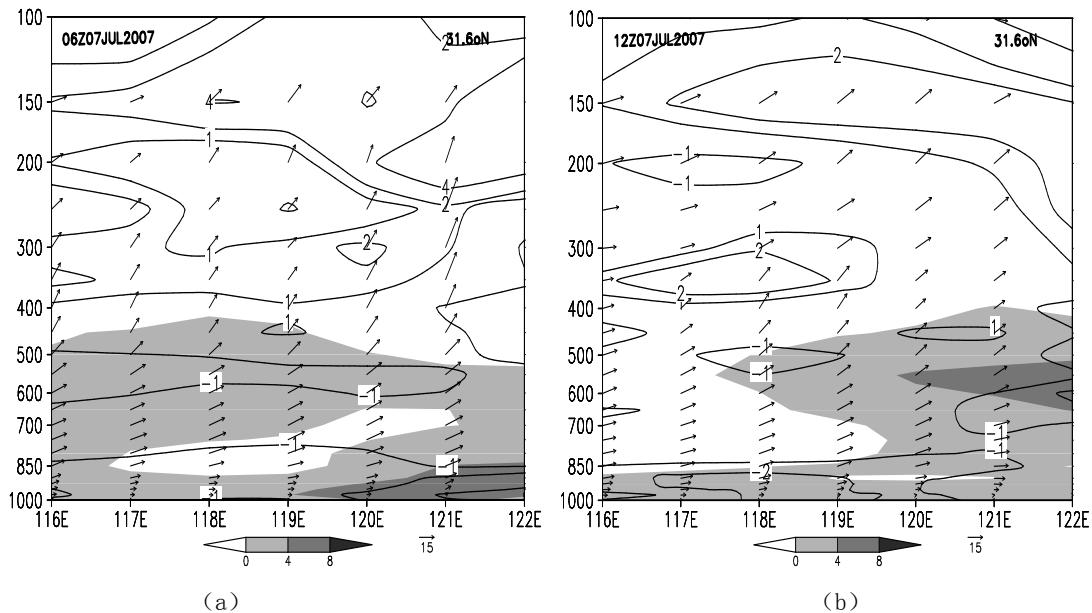


图 3.29 实线型个例 (7.7.7-7.7.22, Ma CS, 15h) 沿  $31.6^{\circ}\text{N}$  大尺度环境动力场的垂直剖面图。图 (a) 为 2007 年 7 月 7 日 06 时, 图 (b) 为 2007 年 7 月 7 日 12 时。箭矢线表示沿纬向风速  $u$  分量 (单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 和垂直方向风速  $w*100$  (单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 的合成风矢量; 实线表示散度分布 (单位:  $\times 10^{-5} \cdot \text{s}^{-1}$ ); 阴影区域表示涡度分布 (单位:  $\times 10^{-5} \cdot \text{s}^{-1}$ ); 低层柱形黑色阴影表示地形。

在个例发生前后的 7 日 06 时和 12 时, 沿  $31.6^{\circ}\text{N}$  对该个例发生区域 ( $116^{\circ}\text{E}$  到  $122^{\circ}\text{E}$  之间) 大尺度环境的垂直剖面可以发现, 无论是个例发生前的 06 时还是个例发展成熟期的 12 时, 个例上空对流层低层 500 hPa 以下都存在大范围的

正涡度区，个例发生前的 06 时 500 hPa 以下正涡度区分布范围最为广泛，几乎覆盖个例发生整个区域低空，正涡度区中心位于 120 °E 移动的 850 hPa 以下。个例发展成熟期的 12 时，在 118 °E 以东个例对流云系主体上空 500 hPa 以下仍存在大范围的正涡度区，涡度中心移至 700 hPa 附近。此外，在个例发生前后的 06 时和 12 时，个例上空对流层低层 500 hPa 以下与正涡度区伴随的是低空辐合区，而 500 hPa 以上是高空辐散区，高空辐散区与低空辐合区之间存在强烈的上升气流（图 3.29）。

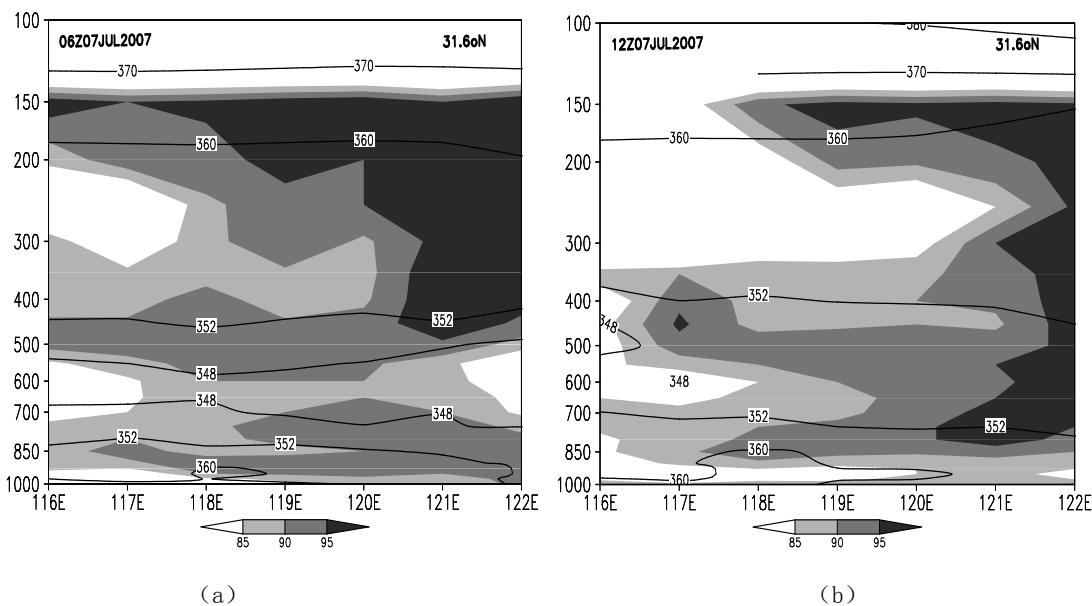


图3.30 实线型个例 (7.7.7-7.7.22, MaCS, 15h) 沿31.6 °N大尺度环境热力场的垂直剖面图。图(a)为2007年7月7日06时，图(b)为2007年7月7日12时。实线表示假相当位温(单位: K)；阴影区域表示相对湿度(单位: %)；低层柱形黑色阴影表示地形。

针对热力场的剖面可以发现个例发生前后的 06 时和 12 时个例区域上空空气湿度都很大，尤其是 06 时，沿个例上空整个气层的相对湿度几乎都超过 85%，个例发展成熟的 12 时个例对流云系主体上空湿度加大，在 120 °E 移动 850 hPa 以上气层相对湿度超过 95%（图 3.30），这样整层潮湿的空气为个例发生发展提供了充足的水汽，使得此个例对流发生发展过程间降水强度很大。此外，个例发生前后 06 时和 12 时个例上空对流层低层存在空气的不稳定层结，400 hPa 以下个例上空空气假相当位温随高度递减，个例发生前的 06 时假相当位温递减率要高于个例发展成熟期的 12 时（图 3.30），这说明个例发生前空气层结更加不稳定，这中不稳定的层结有利于对流云系的发生，个例发生后不稳定层结为个例发展提

供能量，十分有利于对流云系的发展。

2007年7月7日00时，个例发生区域苏皖交界南部地区在500 hPa上位于西风短波槽前方，短波槽从500 hPa延伸到低层925 hPa（图3.24）。对流层低层风场切变线南侧风速明显高于切变线北侧风速。个例发生区域位于对流层中低层风场切变线南侧。对流层中低层空气湿度较大，700 hPa以下南京站温度露点差都在3 °C以下，在925 hPa达到最小，均为1 °C。

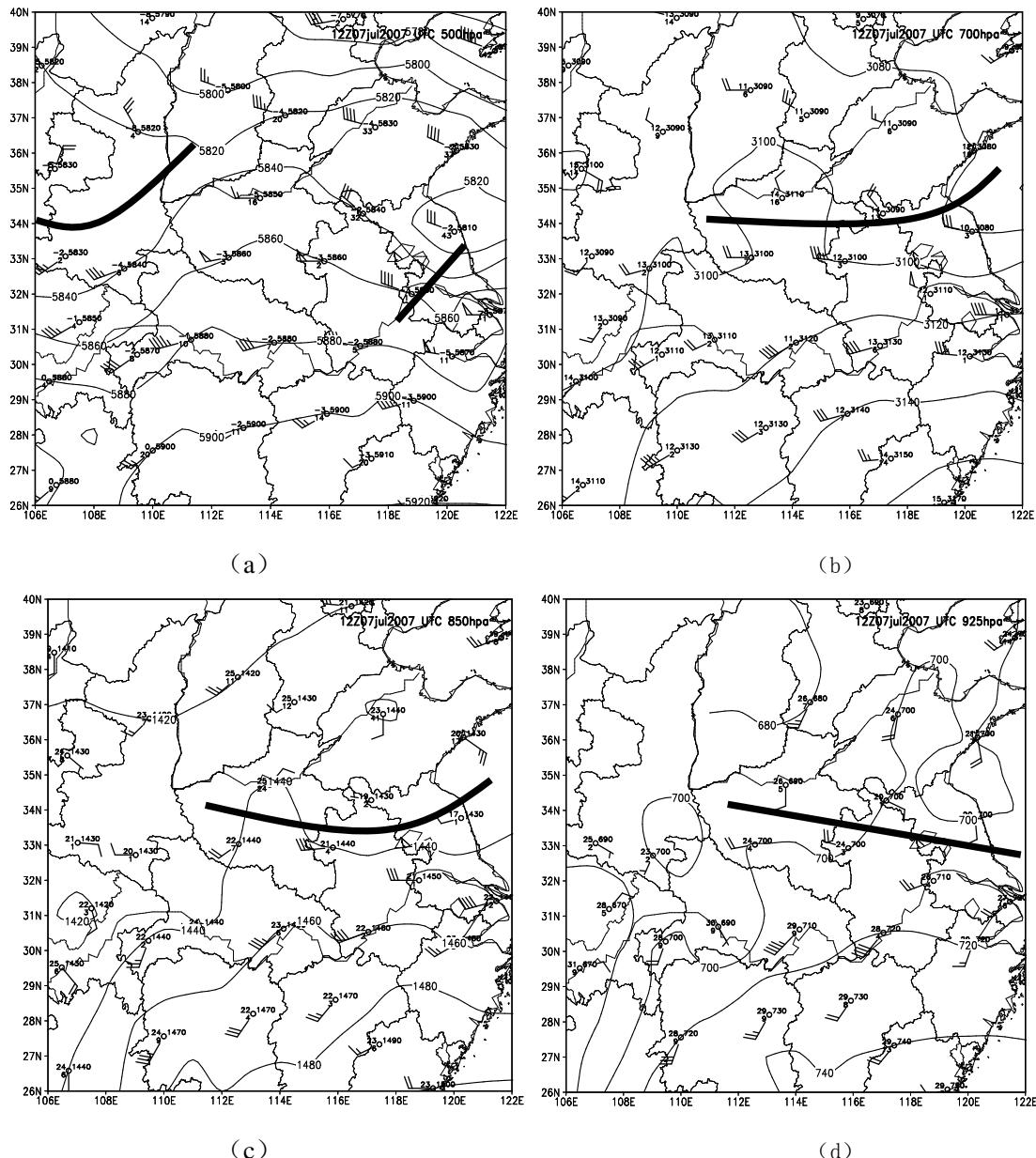


图3.31 实线型个例(7.7.7-7.7.22, Ma CS, 15h) 2007年7月7日12时 高空天气形势分布图。图(a)为500 hPa, 图(b)为700 hPa, 图(c)为850 hPa, 图(d)为925 hPa。风标为站点处风速风向(单位:  $m \cdot s^{-1}$ )；站点处左边数字上面数字为温度(单位: °C)，下面数字为温度露点差(单位: °C)，右边数字为位势高度(单位: gpm)；实线为等高线(单位: gpm)；黑色粗线为风场切变线。

到12时，500 hPa短波槽加深东移，江苏北部500 hPa上出现低压中心，槽向下延伸较浅，700 hPa以下槽位置不明显（图3.31）。个例发生区域受西风槽控制，沿槽里向西南方向伸出风场切变线，同时，沿关中平原到山西南部也出现风场切变线。700 hPa上风场切变线位置南移，沿河南北部，安徽，江苏北部延伸，850 hPa到925 hPa上风场切变线与00时差别不大。低空切变线南侧风速仍然明显高于切变线北侧风速（图3.31）。个例对流云系在对流层中层500 hPa西风低涡引导下，在低空尤其是925 hPa风场切变线的有利环境下发展强烈。

此个例在发生发展过程中对流云系主体覆盖南京站，这里选取南京站在个例发生前后7日00时和12时（世界时，下同）的探空曲线来分析有利大尺度环境下强对流发生发展的层结条件。7日00时，该个例尚未发生，南京站上空700 hPa以下空气相对湿度较大（图3.32a），超过75%，空气中可降水量达到67.3 mm。800 hPa以上过程曲线都在温度曲线右侧，这说明800 hPa以上空气层结不稳定，此时空气中对流有效位能（CAPE）很大，达到 $2083 \text{ J}\cdot\text{Kg}^{-1}$ ，而对流抑制能量仅为 $11 \text{ J}\cdot\text{Kg}^{-1}$ ，南京站上空对流可利用能量很大，个例对流云系在此有利环境下产生，并产生强降水。到12时，个例处于发展成熟期，南京站上空空气湿度大大增强，露点曲线与温度曲线十分接近，300 hPa以下空气相对湿度超过75%（图3.32b），仅在500 hPa到600 hPa之间存在一层薄的相对湿度在60%到75%之间的相对干层，空气中可降水量达到72 mm。此时950 hPa以上空气过程曲线在温度曲线右侧，说明950 hPa以上空气层结不稳定，对流有效位能（CAPE）仍然较大，达到 $1197 \text{ J}\cdot\text{Kg}^{-1}$ ，对流抑制能量仍然较小，为 $69 \text{ J}\cdot\text{Kg}^{-1}$ ，南京站上空对流十分活跃，对流云系内部对流活动在南京站附近产生强降水。

对比个例发生前后南京站上空探空曲线可以发现，对流产生的最强降水出现在个例发生后07时到12时前后，12时以后对流云系虽然处于衰减期，受空气层结的不稳定以及空气相对湿度较大影响，对流降水不会迅速衰减，强降水会维持一段时间，这与实际雨量观测情况相一致（图3.26）。

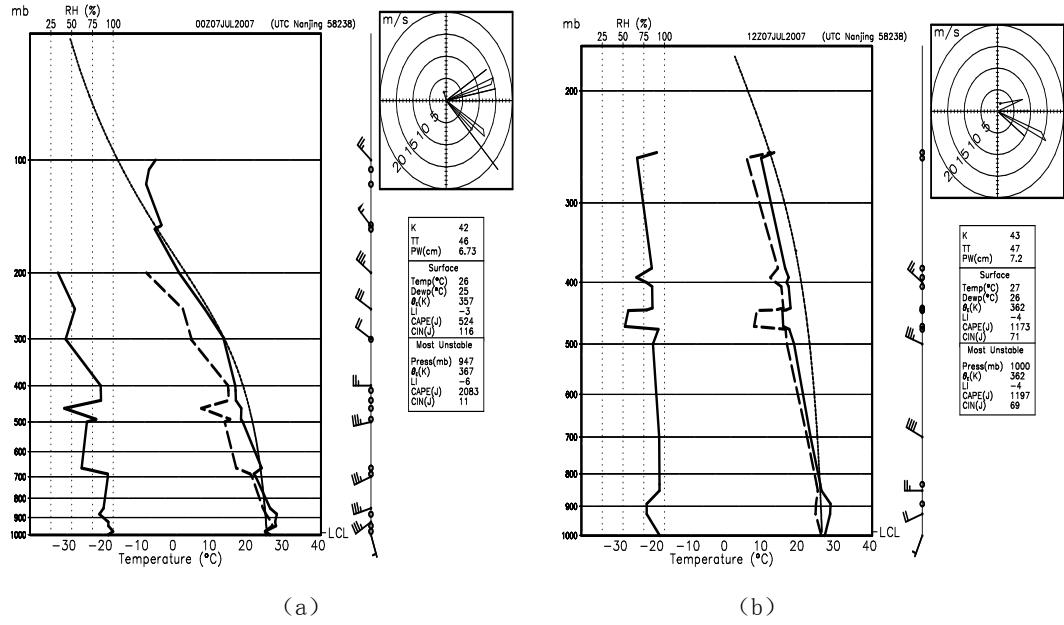
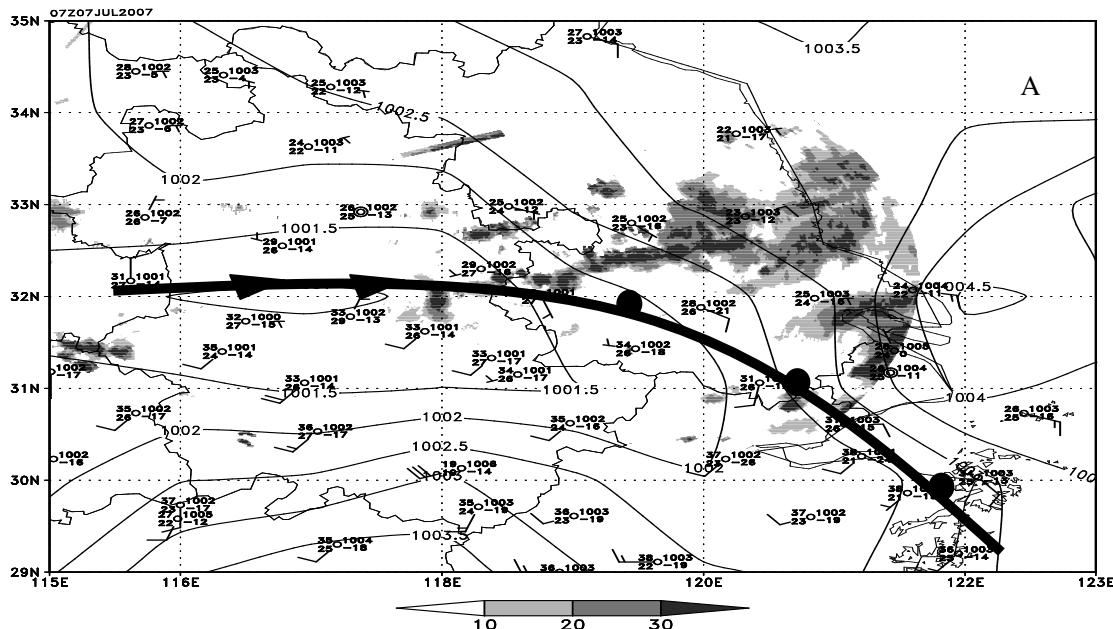


图 3.32 2007 年 7 月 7 日 00 时 (a) 和 12 时 (b) 南京的探空曲线。左侧实线为相对湿度 (单位: %), 右侧虚线为露点温度 (单位: °C), 实线为温度 (单位: °C), 点线为过程曲线 (单位: °C)。

2007 年 7 月 7 日 07 时, 地面场上安徽中部到江苏西南部为宽广的地面低压区, 低压中心位于安徽西部 (图 3.33A), 地面低压区地面观测站 1 小时地面变压为负。沿低压区安徽西部到江苏西南部, 浙江北部存在地面锋面, 锋面附近低压区存在地面风场切变辐合区, 个例对流云系最初在地面暖锋锋面北侧产生。08~09 时, 地面低压区范围不断扩大, 低压中心加强, 地面锋面位置变化不大, 个例对流云系迅速向西向低压中心延伸, 对流云系内部强对流快速发展。



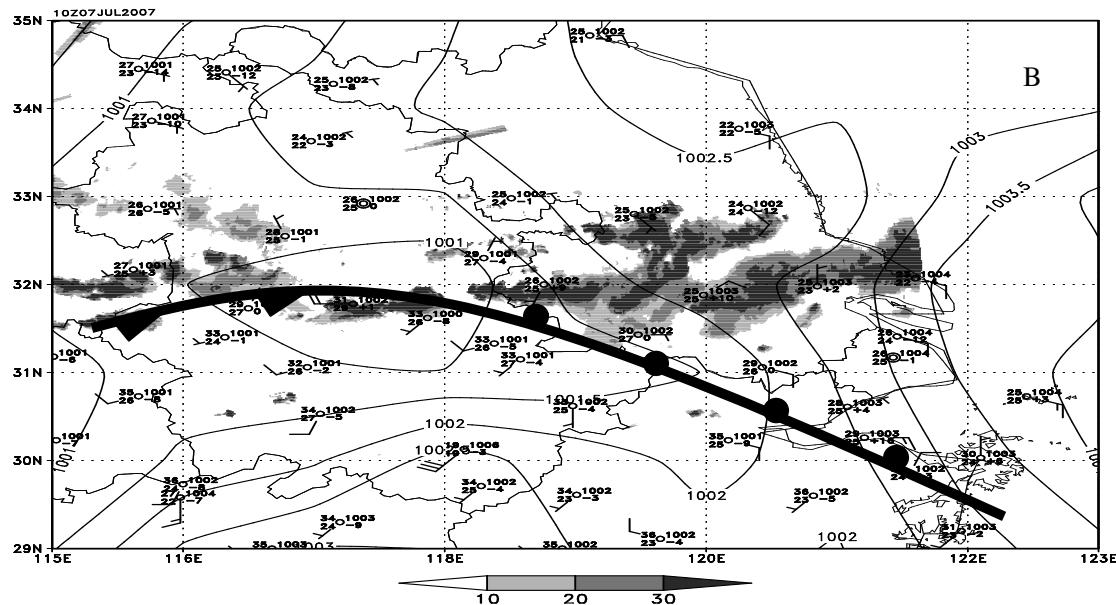


图 3.33 实线型个例 (7.7.7–7.7.22, Ma CS, 15h) 地面图。图中实线为等压线 (单位: hpa)，黑色粗线为地面锋面，阴影区为 5500 m 雷达反射率回波 (单位: dBz)。A 图为 2007 年 7 月 7 日 07 时；B 图为 2007 年 7 月 7 日 10 时。

10 时，低压区范围扩展至最大，低压中心覆盖安徽中部大部地区，地面 1 小时负变压达到最大，地面锋面仍沿低压中心向东南方向延伸。此时，在安徽西部低压中心处产生新的对流云系，新旧对流云系成线性形态排列（图 3.33B）。11 时，地面低压中心强度维持不变，个例对流云系在地面低压控制范围内快速发展，形成旺盛的对流活动。不过受地面低压区西侧地面 1 小时变压转正影响，个例对流云系逐渐东移。12~15 时，地面低压西侧地面 1 小时正变压逐步增强，个例对流云系受其抑制，对流云系主体移至江苏境内，在地面暖锋锋面北侧持续发展。

15 时以后，江苏南部地面低压区逐渐减弱，地面锋面强度随温度梯度减小而逐渐减弱，个例对流云系主体受其影响开始快速东移减弱，于 18 时以后东移入海，个例逐渐趋于消亡，于 22 时前后完全消亡。

此个例发生前对流层中层 500 hPa 西风环流较为平直，对流发生发展时候 500 hPa 上出现西风短波槽。个例发生前低空存在强的西南风急流，个例发展后期低空西南急流减弱明显。对流层中低层存在风场的气旋性切变和风场的垂直切变。个例上空对流层低层存在辐合区，中层存在辐散区，高低空辐散辐合区之间存在强的上升气流。对流层中低层可以发现不稳定层结。地面场上个例发生区域位于

宽广的地面低压区内低压中心东侧，个例对流云系最初产生在低压区地面暖锋锋面北侧，向地面低压区内强烈发展产生强降水。随着西侧地面低压区的减弱，对流云系主体逐渐东移入海，强对流逐渐减弱消亡，降水逐渐停止。

### 3.3 本章小结

在第二章利用雷达反射率资料对2007年江淮流域梅雨期中尺度对流系统(MCS)进行统计分类的基础上，本章重点分析了每类型典型个例的雷达回波，卫星TBB云图，降水的演变以及它们发生的高空天气形势和地面场演变等特征。主要结论如下：

1. 实线型和虚线型两种线性对流个例中，发展较弱的线性个例对流回波在其生命周期内始终成线性形态，最后趋于消亡。而发展较强的线性个例对流回波则在发展强盛期转变为较为密实的面(片)状对流回波，最后趋于消亡。散面型和实面型两种面(片)状个例的回波演变特征则相对较为简单，散面型个例对流回波在对流发展强盛期转变为密实的面(片)状回波，而实面型个例在其生命周期内回波形态变化不大，其强对流回波仅随个例的发展而扩展。
2. 四种类型中实线型个例产生的降水最为强烈，虚线型和实面型个例次之，发展强烈的虚线型个例会产生强于发展较弱的实面型个例产生的降水。虚线型个例产生的降水落区分布与实线型相似，强降水沿线性、相对较为松散的对流线附近分布。实面型个例产生的降水覆盖范围一般较广，强降水倾向于在密实的面状(片状)对流云系覆盖范围的北侧和西侧产生。散面型个例产生的降水强度最弱，强降水倾向于在离散的面状(片状)对流云系覆盖范围的北侧和西侧产生。
3. 四种类型江淮流域中尺度对流系统(MCS)一般在有利的大尺度环境下产生(图2.56)，其共同的环流形势特征为： $\beta$ 中尺度MCS个例上空对流层中层500 hPa环流形势较为平直，部分 $\alpha$ 中尺度个例对流层中层500 hPa受短波槽控制。对流层低空一般存在辐合区，中层存在辐散区，低空辐合区常伴随相对湿度大值区和正涡度区的重叠。对流层低空存在西南风急流，高空500 hPa以下存在风场切变线和风场的垂直切变。绝大多数MCS个例地面场上存在锋面和风场辐合。

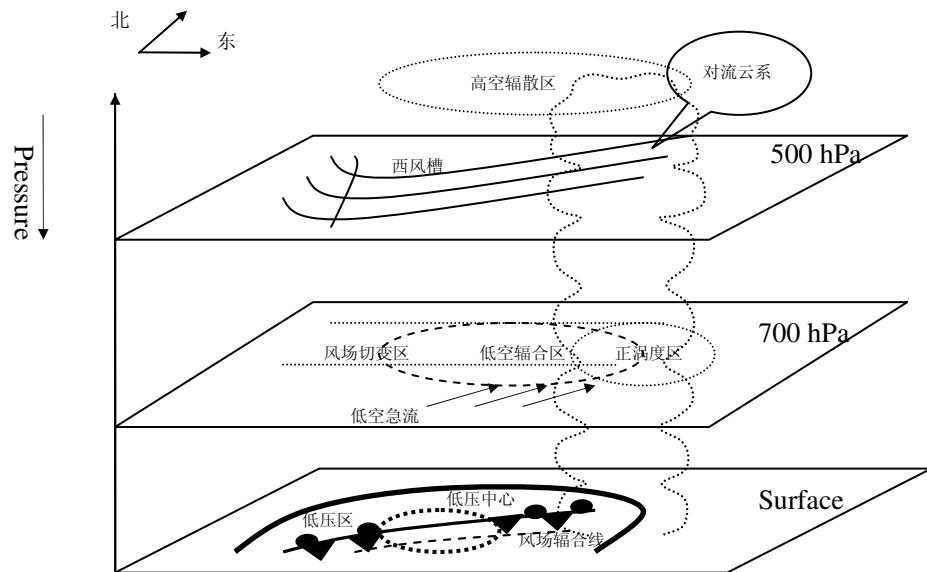


图2.56 2007年江淮流域梅雨期中尺度对流系统（MCS）高低空天气（系统）形势配置图



## 第四章 江淮流域中尺度对流系统（MCS）典型个例数值模拟研究

**摘要** 本章利用 ARPS 模式资料同化系统 ADAS 系统分别加入不同资料对 WRF 模式初始场进行改进的基础上，对 2007 年 6 月 30 日 17 时到 7 月 2 日 2 时的中尺度对流系统个例进行了五组模拟试验，主要结论如下：1. 五组试验方案 24 小时降水模拟均成功模拟出了该个例的带状降水，降水强度也与实况相接近，但模拟的主要雨带相对实况偏南，加入雷达径向风和反射率资料后模拟效果最好。2. 利用模拟效果最好的高时空分辨率模拟结果分析表明该个例发生发展前后上空对流层中层 500 hPa 受西风短波槽控制，在对流发展强盛期低空存在强烈的西南风急流。对流云带上强回波中心伴随着伸展较高的正涡度柱和中低空辐合的重叠，强回波中心随着中低空辐合区与高空辐散区之间的强上升气流向西延伸而延伸，对流云系覆盖范围内受负扰动气压控制，对流层中低层空气水汽混合比在个例发生发展前后保持较高水平。沿安徽、江苏境内的强回波中心的经向剖面上正涡度柱与中低空辐合区高空辐散区之间的强上升气流伸展范围较窄，对应的对流云系在经向伸展范围也较窄，从而形成从鄂东延伸到苏南，绵延上千公里的狭长对流云带。

### 4.1 引言

Brooks 等（1994）利用探空资料使用数值模式对中尺度对流系统（MCS）进行分析研究。雷达资料在中尺度模式中的应用方法涉及到资料同化，雷达资料的三维变分（Gao 等，2001, 2004）、四维变分（Sun and Crook, 1997, 1998）和集合卡尔曼滤波（Zhang 等，2004；Tong and Xue, 2005）等，目前都在研究中。也有研究工作将雷达资料直接应用于中尺度系统的模拟，Xue 等（2003）、Xue and Martin（2006）利用高分辨率的ARPS模式及美国WSR-88D多普勒天气雷达资料对中尺度飑线、飑风等中尺度对流系统进行了研究。Hu 等（2006）分别利用ARPS模式的资料分析系统(ADAS)和变分同化系统(3DVAR)，研究了美国WSR-88D多普勒天气雷达资料对初始场调整改进的效果，并在模拟中取得了很好的结果。

邱崇践等（2000）提出了单多普勒雷达资料反演风矢量场的准四维变分分析

方法, 研究了多普勒雷达资料对中尺度系统短期预报的改进。托亚等 (2003) 利用多普勒雷达资料反演的降水率对 MM5 模式初始场进行调整, 提高了短期降水预报的质量; 王叶红等 (2004) 利用数字化天气雷达降水资料进行了一维变分同化的敏感性试验; Sheng 等 (2006)、盛春岩等 (2006) 利用 ARPS 模式及其资料分析系统 ADAS, 将多普勒雷达资料直接应用于中尺度数值模拟, 对我国北方秋季的一次降雨过程进行了试验, 结果表明经改进后的初始场明显增强 3h 内的降水强度和落区预报, 提高了中尺度数值模式的短时定量降水预报。

王智等 (2003) 利用 MM5、林永辉等 (2003) 利用 ETA 等中尺度数值模式对长江中下游地区出现的中尺度对流系统 (MCS) 进行了诊断分析, 也指出了一些中尺度对流系统 (MCS) 发生、发展规律。矫梅燕等 (2004) 对 2003 年淮河大水进行了天气分析与研究, 通过对中尺度天气系统的模拟分析, 提出了暴雨发展的可能的机理, 指出暴雨过程中高空急流轴的倾斜及东移和强度的减弱, 低空急流 (西南气流) 的增强, 副高位置的相对稳定等特征, 使得高空辐散区辐散加强, 低层气旋性切变和辐合作用同时加强, 副高北缘垂直运动加剧, 使得长江中下游暴雨过程能够发生发展。雷恒池等 (2002) 利用积云模式模拟了 1998 年 7 月 21 日武汉的梅雨锋暴雨的积云发生发展过程, 发现低层水汽辐合和合适的风切变是积云维持发展的重要条件。吴庆丽 (2002) 利用模式输出的高时空分辨率资料对雨团的  $\beta$  中尺度流场结构进行了分析。指出在雨团中, 高、中、低空都存在明显的  $\beta$  中尺度环流系统, 存在上升的低空前方入流和下沉的中空后方入流。降水伴随的拖曳下沉气流还产生了行星边界层中浅薄的垂直环流。王婷和吴池胜等 (2008) 利用 MM5 模式成功地模拟出与中尺度对流系统 (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中尺度对流系统 (MCS) 的中  $\beta$  尺度系统的结构和演变特征。

本章采用先进区域预报系统 ARPS (Advanced Regional Prediction System) 模式资料同化系统 ADAS (Arps Data Assimilation System) 系统和天气研究和预报模式 WRF (Weather Research & Forecasting) 模式, 分别加入常规地面观测资料, 探空资料和 CINRAD (Chinese Netrad Radar Data) /SA 多普勒雷达资料对 2007 年江淮流域中尺度对流系统 (MCS) 典型个例 6.30.17-7.2.2, M<sub>a</sub>CS, 33h 进行模拟。文章首先介绍数值模拟所用的资料、中尺度模式以及试验方案, 分析不同

观测资料对暴雨预报准确度的提高效果差异的前提下，挑选暴雨预报效果最好的试验方案，然后利用该试验方案模拟出的高分辨率连续时空资料对该个例进行详细的动力场、热力场和垂直结构分析。

## 4.2 资料、中尺度模式及试验方案

### 4.2.1 资料简介

本章模拟分析研究中所使用的资料有：

- (1) 常规观测资料（包括常规 12 小时一次高空探测资料、3 小时一次地面观测资料、1 小时一次地面全自动观测资料）；
- (2) NCEP  $1^\circ \times 1^\circ$  再分析资料；
- (3) FY2C 卫星红外云顶亮温 TBB 资料；
- (4) CINRAD/SA 多普勒雷达资料；

其中，2007 年多普勒雷达资料由合肥、郑州、南京、宜昌共 4 部多普勒雷达观测得到。

### 4.2.2 中尺度模式简介

#### 4.2.2.1 ARPS 模式资料同化系统 ADAS 系统

作为 ARPS (Advanced Regional Prediction System) 模式的资料分析系统，ADAS (Arps Data Assimilation System) 是一个能同化常规和一些非常规资料的中尺度分析系统。它采用 Bratseth 提出的连续迭代方法 (Bratseth, 1986)，将观测资料中的物理量（如温度、压强、湿度和风场等）直接转化到模式三维网格空间，形成模式初始场。ADAS 包含微物理调整系统和复杂云分析系统，其中复杂云分析系统是基于局地分析和预报系统 LAPS (Local Analysis and Prediction System) (Zhang, 1999) 的云分析方案构造的。它可以利用多普勒雷达资料、卫星资料及地面云观测资料进行三维云分析，构建一个具有高分辨率的三维初始云场和降水场，再通过基于湿绝热或非绝热初始化的方法对温、湿量和风分量等进行调整，使得雷达观测信息在初始场形成中得到应用，从而改进初始场。ADAS 将雷达观测资料进行水平和垂直插值，转化成模式三维网格上的值。

**ADAS** 直接利用雷达径向风和反射率资料对初始场在三维空间中进行模式变量的调整, 得到一个热力和动力平衡的初始场。在调整过程中, 初始的热量场根据云凝结的潜热释放进行调整, 相对湿度场则重点对常规资料中湿度量观测缺少处进行调整。

首先, 在雷达观测区, 根据模式网格点所对应位置的径向风速和雷达方位角, 得到常规观测的风场  $u$ 、 $v$  分量的增量, 然后利用所得增量对初始场进行调整的, 提取风分量增量的公式如下:

$$u_j(x, y, \phi) = \cos \phi [v_r - (\cos \phi u(x, y) + \sin \phi v(x, y))]$$

$$v_j(x, y, \phi) = \sin \phi [v_r - (\cos \phi u(x, y) + \sin \phi v(x, y))]$$

其中,  $\phi$  为雷达方位角,  $v_r$  为雷达径向风,  $u_j, v_j$  为调整后风场  $u, v$  分量的增量。

在实际大气中, 对流系统中气块所受的重力是由潜热释放引起的向上的加速度来平衡的, 因此, 通过非绝热初始化的方法, 利用雷达反射率资料便可以得到温湿量场调整, 推导公式如下:

ARPS 模式中, 垂直动量方程为:

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} - \tilde{f}u = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + B + D_w$$

其中,  $\rho$  为空气密度,  $p$  为气压,  $D_w$  为次网格尺度扰动和计算混合项, 浮力项

$$B = g \left[ \frac{\theta'}{\bar{\theta}} - \frac{p'}{\bar{\rho} c_s^2} + \frac{q_v'}{\varepsilon + \bar{q}_v} - \frac{q_v' + q_w'}{1 + \bar{q}_v} \right], \text{ 这里, } q_w = q_c + q_i + q_r + q_s + q_h, \quad \varepsilon = 0.622.$$

假定背景场气压和空气密度在调整过程中不变, 为使调整前后浮力项守恒, 则有:

$$\frac{\Delta \theta'}{\bar{\theta}} + \frac{\Delta q_v'}{\varepsilon + \bar{q}_v} - \frac{\Delta q_v' + \Delta q_w'}{1 + \bar{q}_w} = 0,$$

这里,  $\Delta \theta'$ ,  $\Delta q_v'$ ,  $\Delta q_w'$  为调整前后位温、水汽混合比、总水汽混合比扰动的变化。

进一步可得到,  $\Delta \theta' = \bar{\theta} \cdot [(\Delta q_v' + \Delta q_w')/(1 + \bar{q}_v) - \Delta q_v'/(0.622 + \bar{q}_v)]$

#### 4.2.2.2 WRF 模式

WRF 是由美国国家大气研究中心（NCAR）、国家海洋和大气管理局（NOAA）、预报系统实验室（FSL）以及俄克拉荷马大学风暴分析预报中心（CAPS）联合多家科研机构开发的新一代中尺度数值模式，适用于理想化的动力学研究，全物理过程的天气预报、空气质量预报以及区域气候模拟等。

WRF 为非静力模式，但也提供静力框架的选择，水平方向采用 Arakawa C 网格，垂直方向为质量追随坐标（mass-based terrain following coordinate），其分辨率可随高度变化。若采用时间分裂方案，声波和重力波采用小步长，可使用 Runge Kutta 3 阶或 2 阶方案。若采用平流方案，可选择从 2~6 阶的方案。此外，WRF 还提供单向和双向嵌套，嵌套区域可移动，包含的物理过程有辐射、边界层参数化、对流参数化、次网格湍流扩散以及微物理等。WRF 模式为中尺度研究和业务数值天气预报提供了共同框架，同时也适合高分辨率的数值模拟。

#### 4.2.3 试验方案

为了探讨 ADAS 系统利用不同观测资料对 WRF 模式初始场的改进效果差异，进而检验常规地面观测资料、探空资料、CINRAD/SA 多普勒资料等对降水模拟效果的不同影响，论文针对 2007 年 MCS 典型个例 6.30.17-7.2.2， $M \alpha CS$ , 33h 设计了五组试验（见表 3.1）。试验中背景场均采用美国国家环境预报中心（NCEP）的  $1^\circ \times 1^\circ$  格点再分析资料。在此基础上，除对照试验 CNTL 以外其余四组试验均利用 ADAS 系统结合常规观测资料，CINRAD/SA 雷达资料对模式初始场进行改进。

在对照试验 CNTL 中，只使用 NCEP  $1^\circ \times 1^\circ$  格点再分析资料作为模式背景场；试验 SURFACE 使用 NCEP  $1^\circ \times 1^\circ$  格点再分析资料作为模式背景场，加入常规地面观测资料对模式初始场和边界条件进行改进；试验 SOUNDING 使用 NCEP  $1^\circ \times 1^\circ$  格点再分析资料作为模式背景场，加入常规高空探空资料对模式初始场和边界条件进行改进；试验 RADAR 使用 NCEP  $1^\circ \times 1^\circ$  格点再分析资料作为模式背景场，加入 CINRAD/SA 雷达资料对模式初始场和边界条件进行改进，并利用雷达资料和复杂云分析方案对模式初始场进行调整；试验 SSRDAR 使用 NCEP  $1^\circ \times 1^\circ$  格点再分析资料作为模式背景场，加入常规地面观测资料，

高空探空资料, CINRAD/SA 雷达资料对模式初始场和边界条件进行改进, 并利用雷达资料和复杂云分析方案对模式初始场进行调整。

表 3.1 试验设计

试验名称 Exp.	CNTL	SURFACE	SOUNDING	RADAR	SSRadar
常规地面观测资料	无	有	无	无	有
常规高空探空资料	无	无	有	无	有
CINRAD/SA 雷达资料	无	无	无	有	有

其中, 对照试验 CNTL 中 WRF 模式 (WRF3.0.1.1) 的模拟采用双重双向嵌套网格 (图 4.1), 区域一 (即外层区域) 格距为 30 km, 格点数为 200×140, 中心位置为 (32.5 °N, 102.5 °E); 区域二格距为 10 km, 格点数为 181×136, 中心位置为 (29.76 °N, 115.53 °E); 两层区域垂直方向均为 28 层。两层区域的微物理过程均为 WSM 3 阶简单冰方案, 均采用 Kain-Fritsch 积云参数化方案, 边界层采用 YSU 方案, 陆面过程采用 Noah 陆面模式, 长波辐射采用 rrtm 方案, 短波辐射采用 Dudhia 方案。

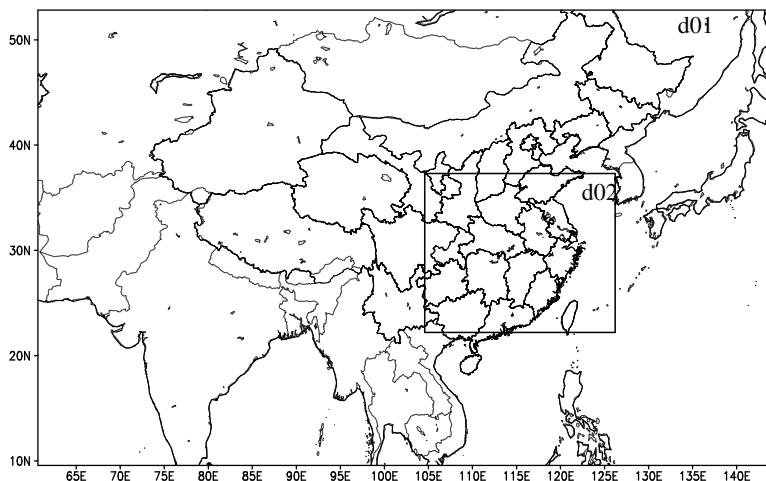


图4.1 WRF模式模拟区域示意图

其余四组试验中 WRF 模式 (WRF2.2.1) 的模拟采用单重网格, 网格格距, 格点数, 中心位置均与对照试验 CNTL 区域一完全相同。四组试验区域的垂直方向均为 28 层, 微物理过程均为 WSM 3 阶方案, 均采用 Kain-Fritsch 积云参数化方案, 边界层采用 YSU 方案, 陆面过程采用 Noah 陆面模式, 长波辐射采用

rrtm 方案，短波辐射采用 Dudhia 方案。

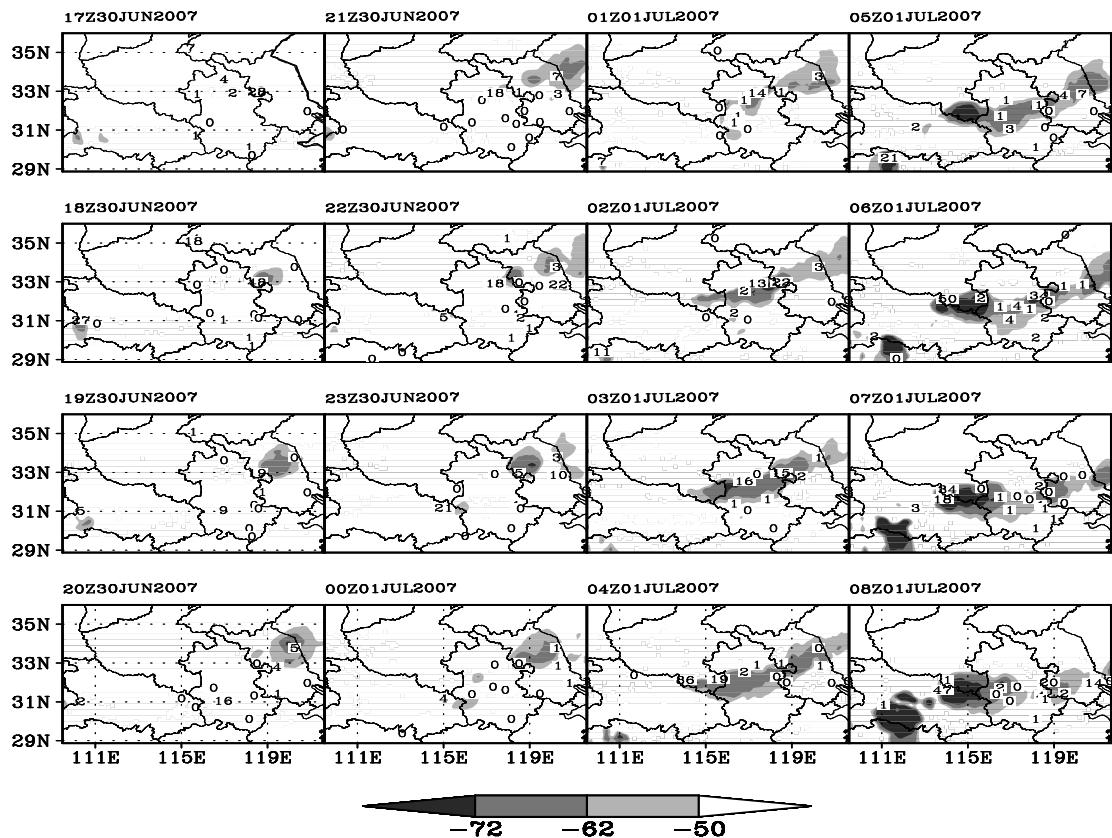
五组试验模式积分初始时刻均为 2007 年 6 月 30 日 12 时（世界时，下同），均积分 48 小时。

#### 4.3 6.30.17-7.2.2 MCS 个例概况

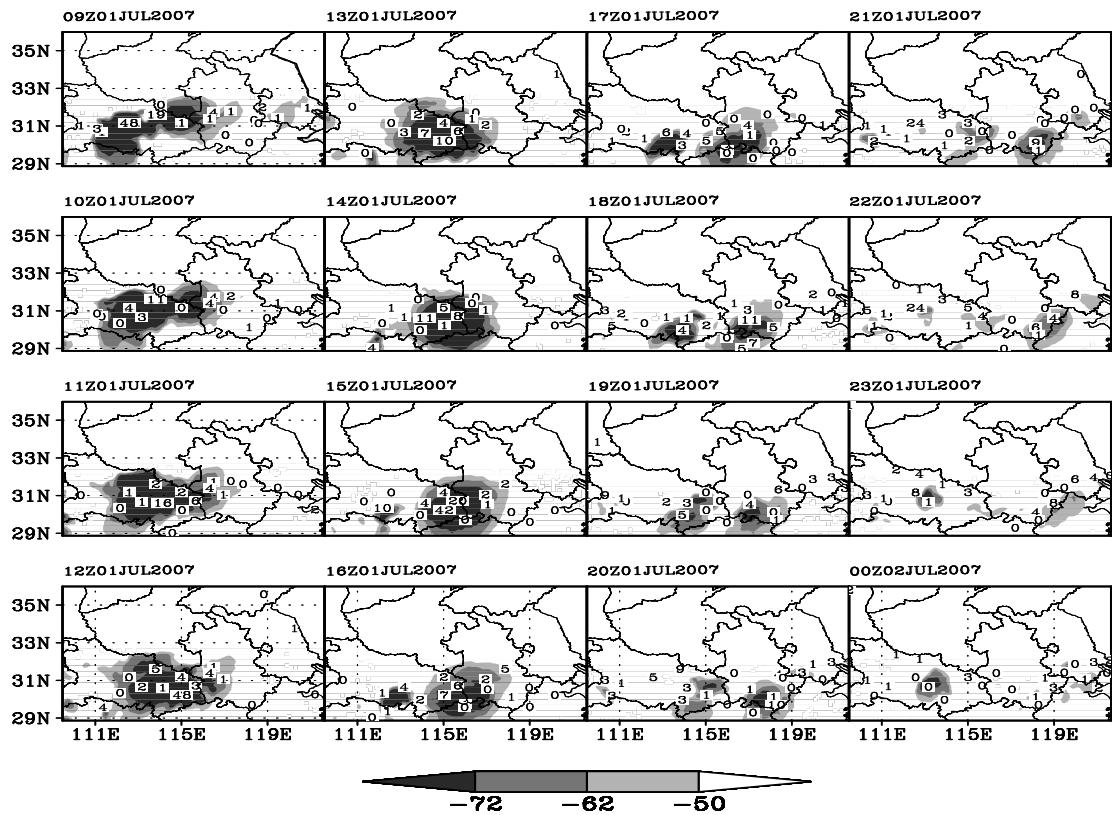
该MCS个例于2007年6月30日17时生成于江苏中西部地区（图4.2a），个例对流云系生成后缓慢东移发展，生成1小时后云顶温度低于-62 °C。对流生成后产生强降水，2小时降水量超过76 mm。18时前后对流层中层雷达反射率回波成相对较为密实的面（片）状形态，分布于江苏到安徽地区（图4.2c）。

22时在苏皖交界北部新的对流云系生成，快速发展（图4.2a），7月1日00时已经覆盖江苏北部大部，该对流云系与最初的对流云系合并后迅速向西扩展，01时开始扩展至安徽中部，02时延伸至湖北东部，05时前后对流云顶温度开始低于-72 °C。合并后的对流云系成带状（图4.2a），沿湖北东部向东一直延伸到江苏中部，对流云带上强对流中心位于湖北东北部到河南南部地区。对流产生的强降水中心随着对流云带的西伸而向西移动，强降水范围逐渐扩大，到06时前后6小时降水超过50 mm的强降水中心已经移至安徽西部到河南南部，湖北东部地区。从01时开始，对流云系在对流层中层雷达反射率回波上开始呈现为狭长的绵延上千公里的强对流回波带，从江苏中部向西延伸到安徽中部，河南南部地区（图4.2c）。05时以后，狭长的对流回波开始逐渐减弱，强回波带上出现断裂，同时该强对流带逐渐南压，并离散化，到08时前强对流回波带东缘已经减弱消散，对流带西缘逐渐转变成片状回波（图4.2c）。

08时以后对流云系带安徽中部以东强对流逐渐减弱消亡（图4.2b），安徽以西对流带上强对流中心维持发展，并逐渐缓慢向南移入湖北境内，11时前后该对流中心逐渐发展成片状对流云系，覆盖湖北东部大部地区。15时以后，强对流中心对流逐渐减弱，对流云系逐渐东移，覆盖范围逐渐减小（图4.2b），22时前后对流云系云顶温度开始高于-72 °C，随后对流云系快速减弱消散，于2日02时前后消亡。



(a)



(b)

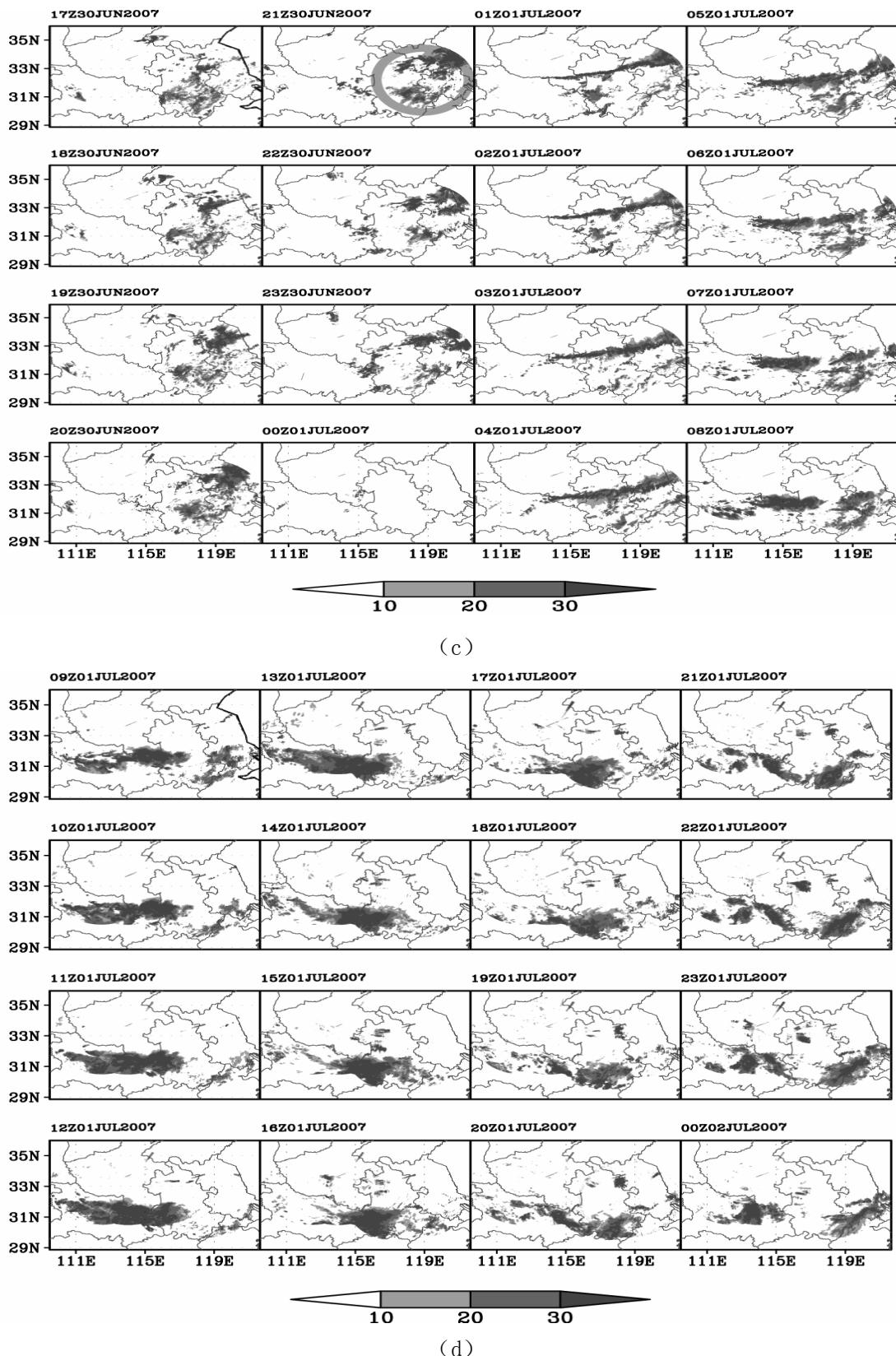
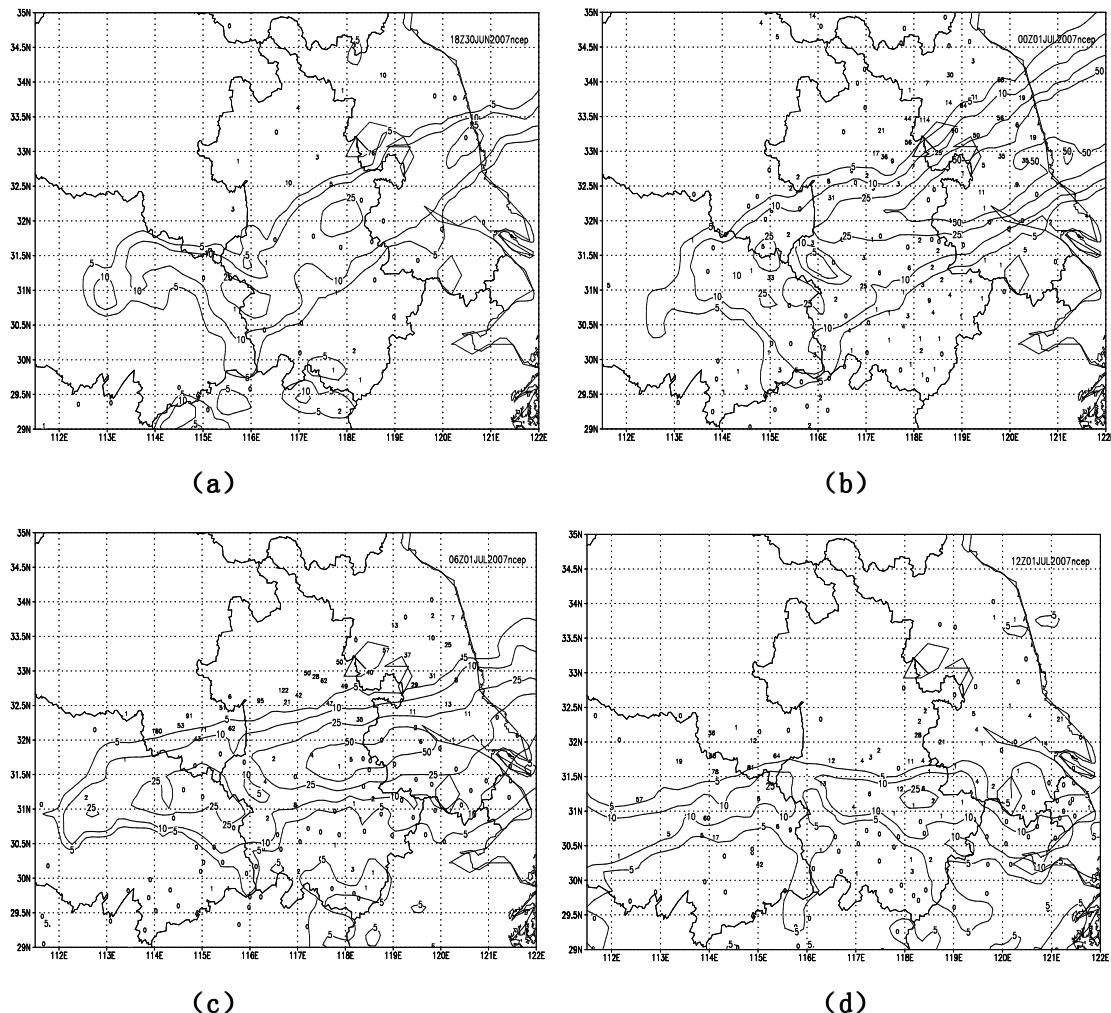


图4.2 2007年江淮流域MCS个例（6.30.17-7.2.2, Ma CS, 33h）生命周期发展过程图。图(a), (b) 阴影为TBB（单位:  $^{\circ}\text{C}$ ），数字为前1 h降水量（单位: mm）。图(c), (d) 阴影为5500 m雷达反射率（单位: dBz）。

由于对流云带东部对流云系的逐渐消亡,7月1日12时前后安徽东部到江苏由对流产生的强降水已经逐渐结束(图4.2b)。强降水中心维持在湖北东部到安徽西部地区,1小时最大降水量达到48 mm。15时以后随着湖北东部上空对流云系的逐渐减弱,对流降水覆盖范围逐渐减小,降水强度也逐渐减弱。

08时以后随着对流云系内部强对流中心的西移,江苏到安徽上空强对流回波逐渐减弱消亡(图4.2d),强的对流回波中心逐渐移到湖北东部到安徽西部地区,强对流回波成密实的面(片)状分布,15时以后,湖北东部到安徽西部地区上空对流层中层强对流回波逐渐减弱消散(图4.2d)。此个例属于实面型个例,中期发展为对流线,后期又转为实面型。

#### 4.4 五组试验方案降水模拟效果分析



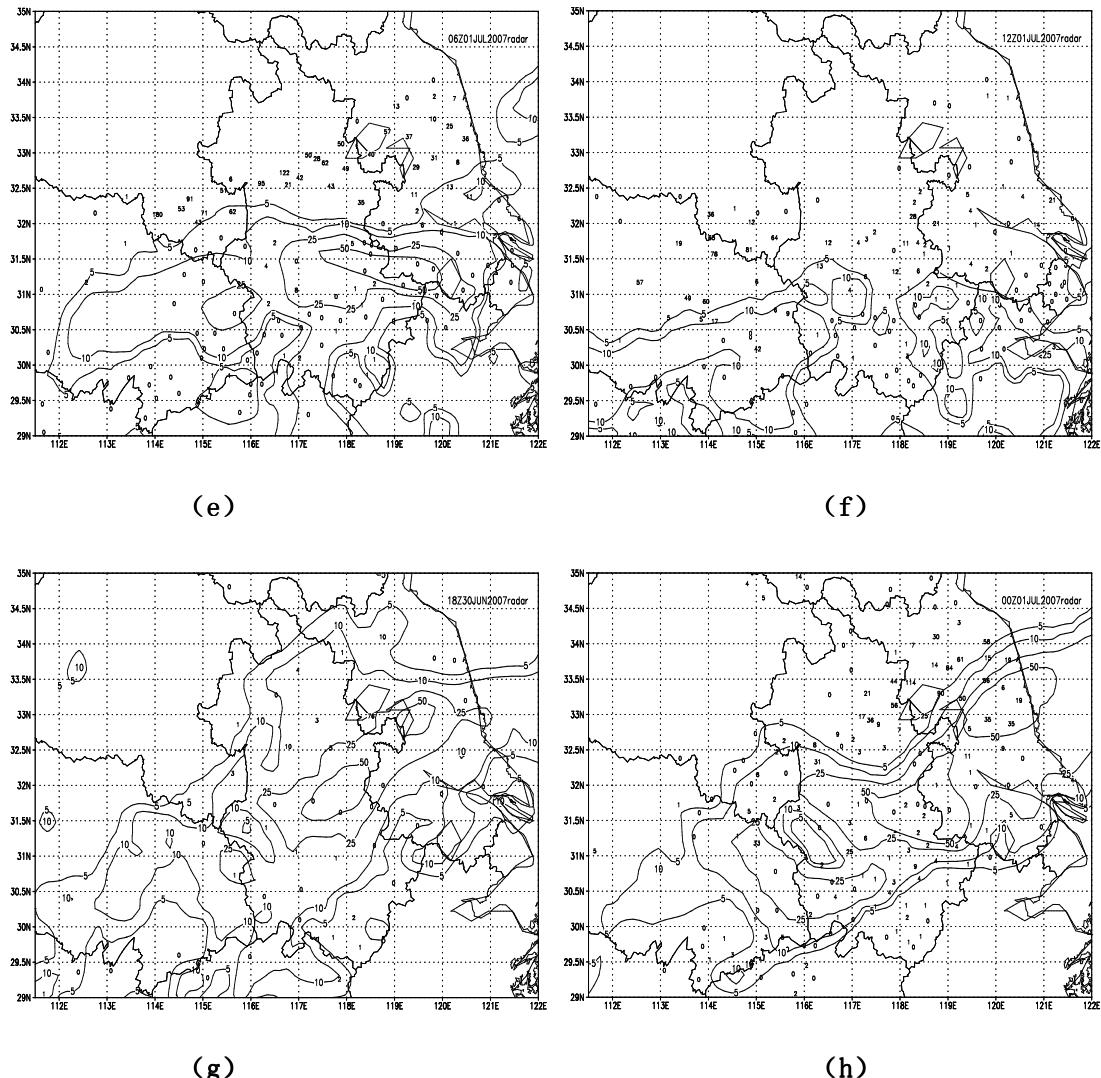


图4.3 五组试验方案6 h模拟降水量与实况降水图。数字为2007年6月30日12时至7月1日12时每6小时实况降水（单位：mm），等值线为对应时刻每6小时模拟降水（单位：mm）。图（a），（b），（c），（d）对应试验方案CNTL，图（e），（f），（g），（h）对应试验方案RADAR。

从6小时模拟降水与实况降水对比情况进行分析，在模式开始积分的6小时内（6月30日12时-18时）五组试验方案对降水的模拟情况差异较大。积分初始6小时内个例对流云系覆盖范围下苏皖交界北部实况6小时降水出现超过50 mm的强降水中心（图4.3），而五组试验方案只有单独加入CINRAD/SA多普勒雷达资料的方案RADAR成功的模拟出了6 h降水超过50 mm的强降水中心，其余四组方案对降水强度的模拟相对实况都偏小，其最大降水量维持在25 mm左右。

从模拟降水的落区来看，虽然五组试验方案成功模拟出了苏皖交界北部对流云系覆盖下的强降水中心，但五组试验方案模拟的降水落区都比实况降水范围要大。

从上面的分析可以看到，五组试验方案中试验RADAR由于加入的CINRAD/SA多普勒雷达资料空间分辨率较高，其对模式初始场的改善较为明显，模式初始积分6小时内针对降水的模拟效果较好，而其余四组方案或由于加入的探空，地面资料空间分辨率较低（试验SURFACE，试验SOUNDING），或由于探空，地面资料对CINRAD/SA多普勒雷达资料的抵消作用（试验SSRTOTAL），其对模式初始场的改善不明显，模式初始积分6小时效果不明显。

综上，论文选取试验方案 RADAR 模拟的高分辨率连续时空资料来进一步详细分析个例 6.30.17-7.2.2 的动力场，热力场和垂直结构。

#### 4.5 模拟结果分析

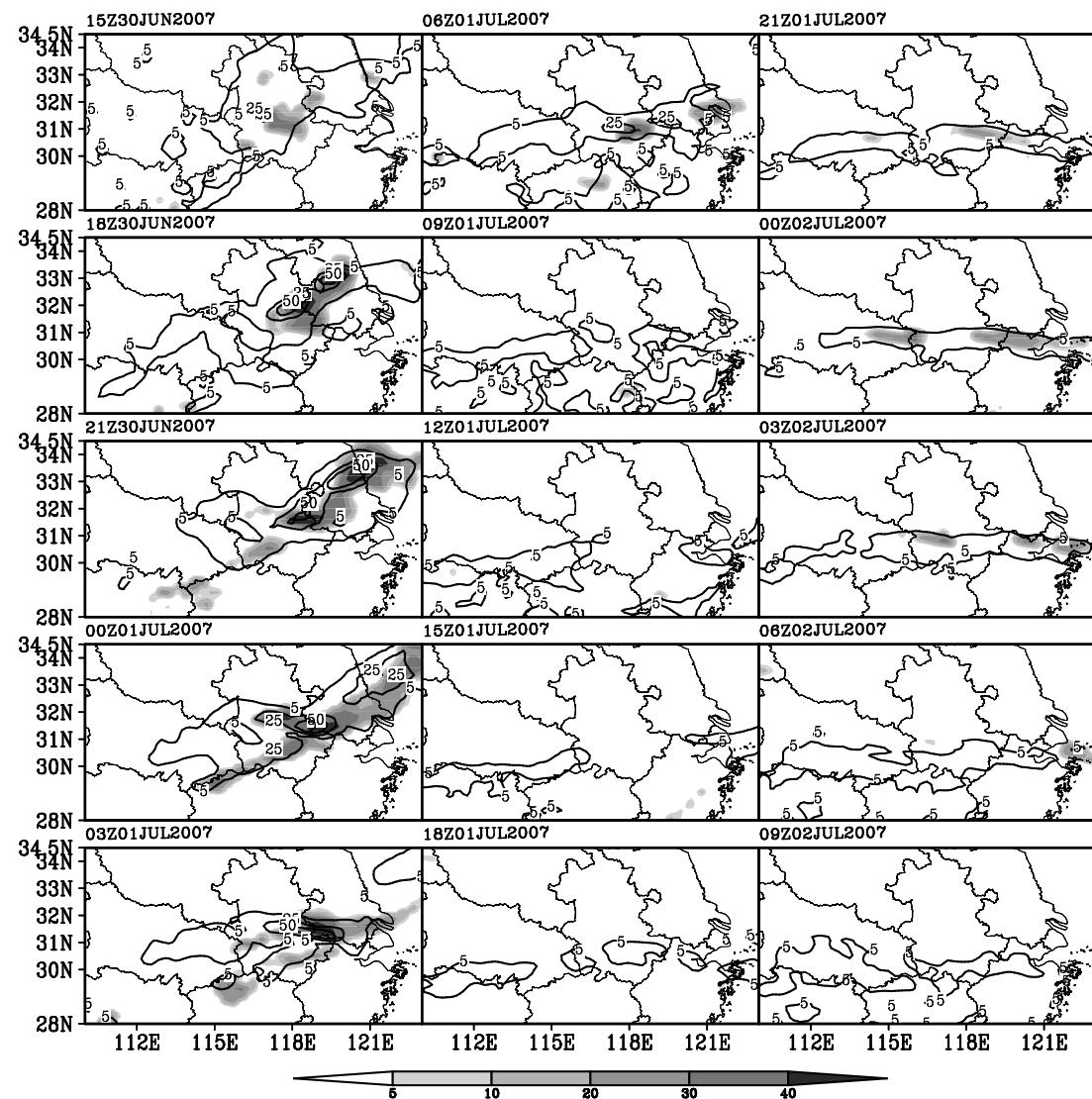
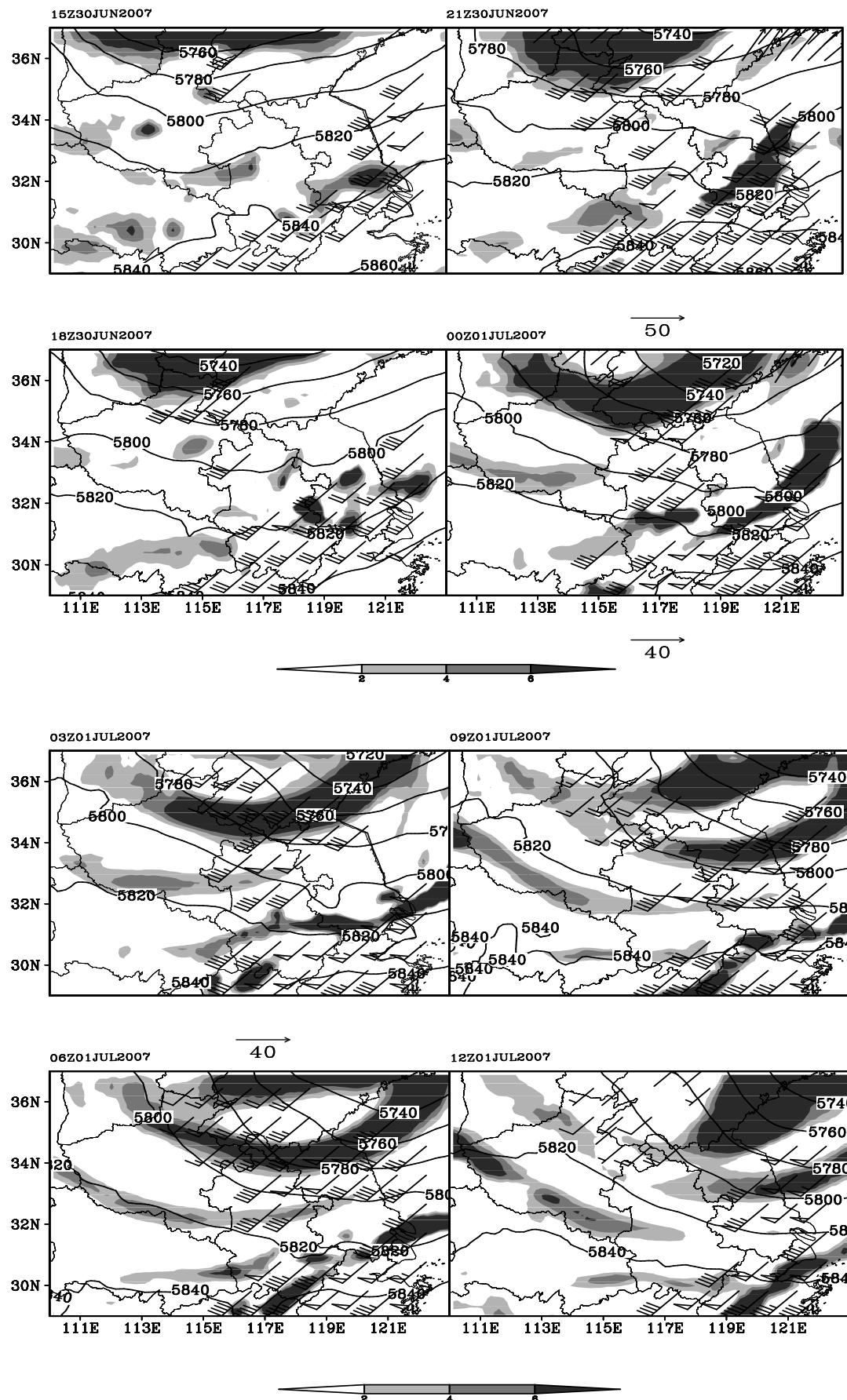


图4.4 试验方案RADAR模拟的每3小时最大反射率回波（单位：dBz）和每3小时降水（单位：mm）。

从模拟的每3小时反射率回波来看，6月30日18时，个例发生1小时后，对流云系已经成东北-西南向带状分布（图4.4），从江苏中部一直向西南延伸至安徽东部。对流云带上在江苏中部，安徽东部分别存在两个强度超过40 dBz的强回波中心，两个回波中心模拟的前3小时降水均超过50 mm。到21时，对流云带范围有所扩大，安徽西南部出现新的对流云系，7月1日00时此对流云系与原来的对流云系连成一条长度超过上千公里，横跨安徽南部到江苏南部，湖北东南部的对流云带，强度超过40 dBz的强回波中心位于安徽东南部与江苏西南部交界处，对流云系覆盖范围下模拟3小时降水均超过25 mm，3小时降水超过50 mm的强降水中心始终对应于对流带上强回波中心（反射回波强度超过40 dBz）。7月1日03时，安徽南部的对流云系已经开始减弱，安徽东南部与江苏西南部交界处的强回波中心仍然维持。06时强回波云带消散强烈，仅在安徽南部存在强度超过20 dBz的回波中心。09时以后，个例发生区域模拟的强回波中心已经基本消失，到21时前后湖北东部又出现较强的回波中心。06时模拟的前3小时降水超过25 mm，09时以后模拟的每3小时降水仍然存在，但降水强度相对较弱，保持在5 mm左右。

图4.5给出个例发生前后48小时内每3小时模拟的200 hPa高空急流，500 hPa高度场，涡度场以及700 hPa低空急流分布。个例发生前，江苏到安徽南部一带位于西风短波槽前，槽前存在正涡度区，低空700 hPa存在较强的西南低空急流。6月30日18时以后，西风短波槽逐渐加深，在苏皖北部到山东半岛附近出现低压闭合中心，苏南到皖南的正涡度区逐渐加强，并逐渐转向成东北-西南的带状分布，正涡度区附近低空急流风速逐渐加大，急流覆盖范围也在增加，对流云系出现区域位于低空急流轴的左侧。7月1日00时到03时，苏南到皖南对流层中层500 hPa上正涡度区呈现明显的带状分布，06时开始，安徽南部的正涡度区逐渐减弱消散，到09时，较强的正涡度区仅维持在江苏南部。12时以后，西风槽逐渐东移，苏南到皖南受平直的西风气流控制，大范围的正涡度区也逐渐消散，低空西南急流逐渐减弱，模拟的对流强回波中心也随之逐渐消散。



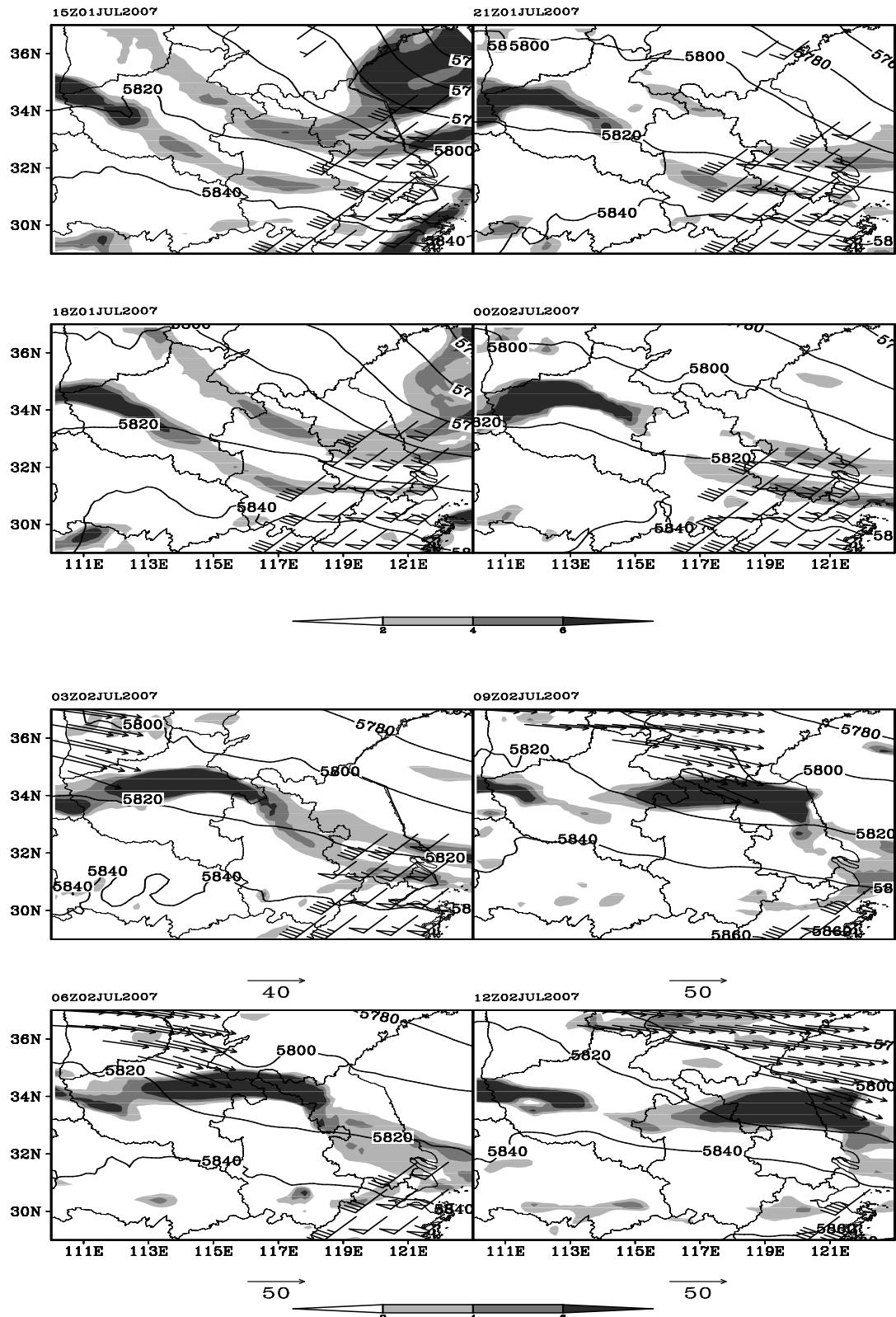
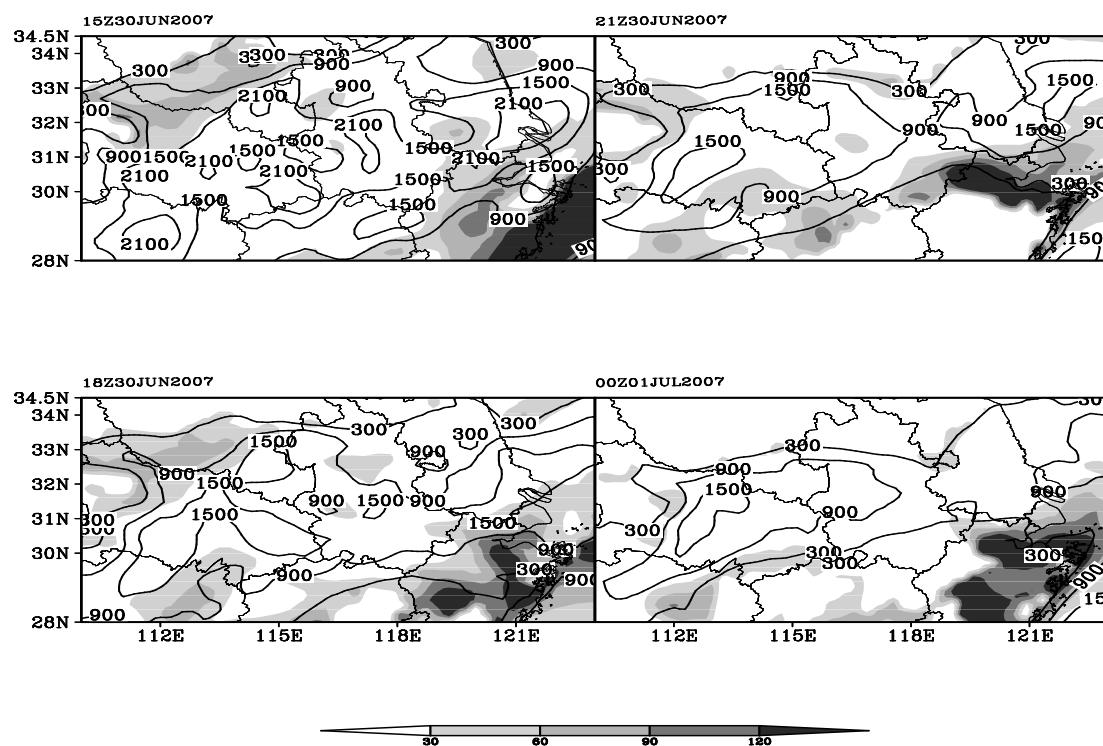
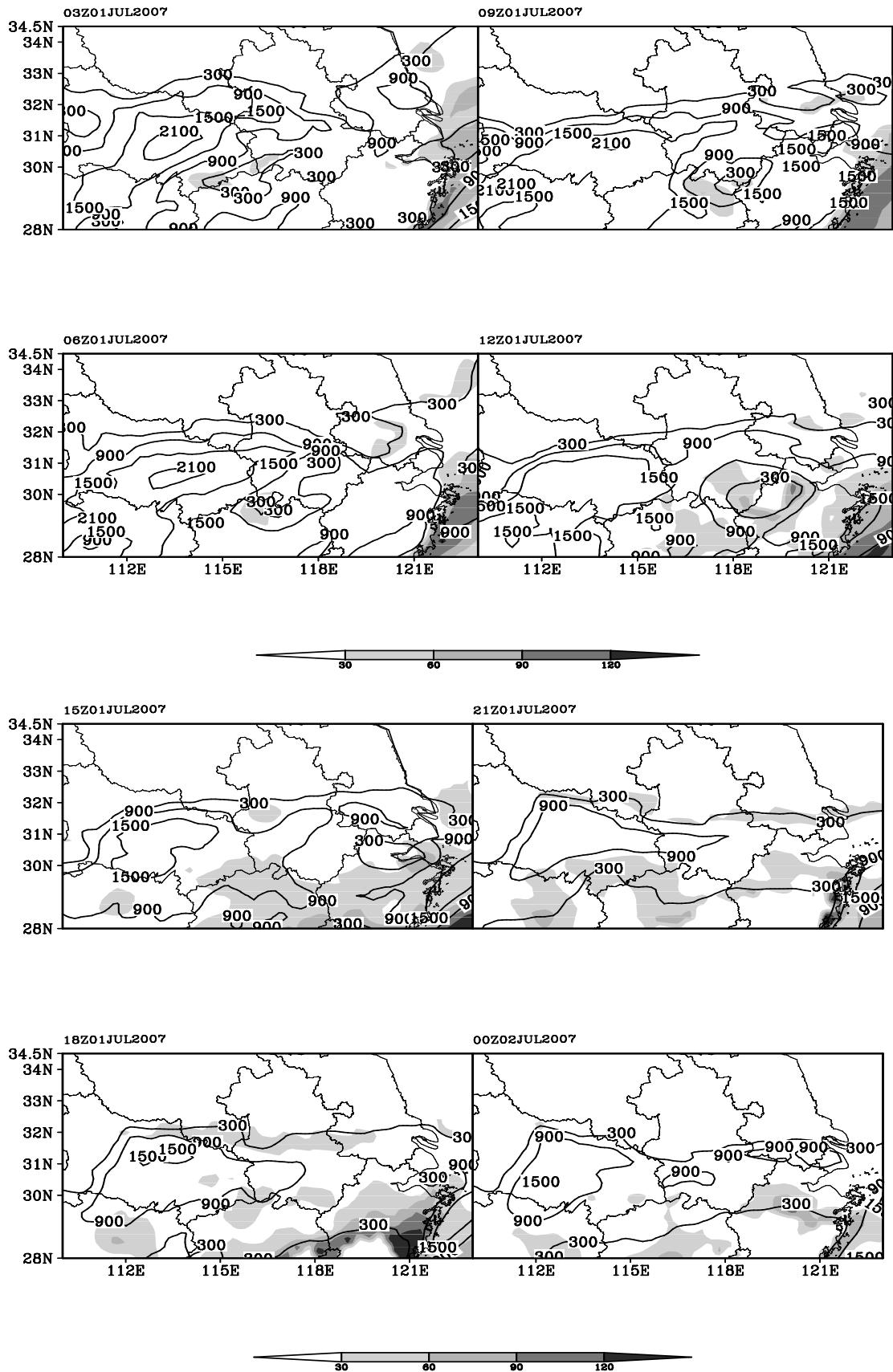


图4.5 试验方案RADAR模拟的每3小时大尺度天气形势图。阴影为模拟的500 hPa涡度（单位： $\times 10^{-5} \cdot s^{-1}$ ），等值线为模拟的500 hPa高度场（单位：gpm），箭矢线表示200 hPa上风速 $\geq 40 \text{ m} \cdot s^{-1}$ 的高空急流；风标表示700 hPa上的风速 $\geq 12 \text{ m} \cdot s^{-1}$ 的低空急流。

图4.6给出模拟的每3小时最大对流有效位能 (MCAPE) 和最大对流抑制能量 (MCIN) 分布。可以看出, 6月30日15时前后, 从湖北东部到安徽南部, 江苏南部存在一条较为明显的对流有效位能大值带, 湖北东南部, 安徽南部, 江苏南部最大对流有效位能均超过 $2100 \text{ J}\cdot\text{Kg}^{-1}$ , 在对流有效位能极大值分布区域最大对流抑制能量均小于 $30 \text{ J}\cdot\text{Kg}^{-1}$ , 此时鄂东到皖南, 苏南地区上空气层处于不稳定的状态, 模拟的对流云系最初在此有利环境下产生。18时开始, 苏南上空气层最大对流有效位能逐渐减小到 $900 \text{ J}\cdot\text{Kg}^{-1}$ 左右, 最大对流抑制能量变化不明显。安徽南部到湖北东部上空气层最大对流有效位能仍然维持在 $1500 \text{ J}\cdot\text{Kg}^{-1}$ 以上, 7月1日03时到09时超过 $2100 \text{ J}\cdot\text{Kg}^{-1}$ , 而最大对流抑制能量均在 $30 \text{ J}\cdot\text{Kg}^{-1}$ 以下, 受其影响, 模拟的对流云系生成后主要向偏西方向延伸, 从18时位于苏南, 皖南的对流云系逐渐伸向湖北东部地区, 形成一条狭长的绵延上千公里的对流云带。1日15时以后, 从湖北东部到安徽南部, 江苏南部上空气层模拟的最大对流有效位能减弱明显, 安徽南部到江苏南部上空最大对流有效位能均减弱到 $900 \text{ J}\cdot\text{Kg}^{-1}$ 以下, 苏南更甚, 基本上维持在 $300 \text{ J}\cdot\text{Kg}^{-1}$ 以下, 同时最大对流抑制能量逐渐增加到 $30 \text{ J}\cdot\text{Kg}^{-1}$ 以上, 这样的配置使得皖南到苏南地区上空气层逐渐趋于稳定, 模拟的对流云系从15时开始强回波中心已经逐渐消亡。





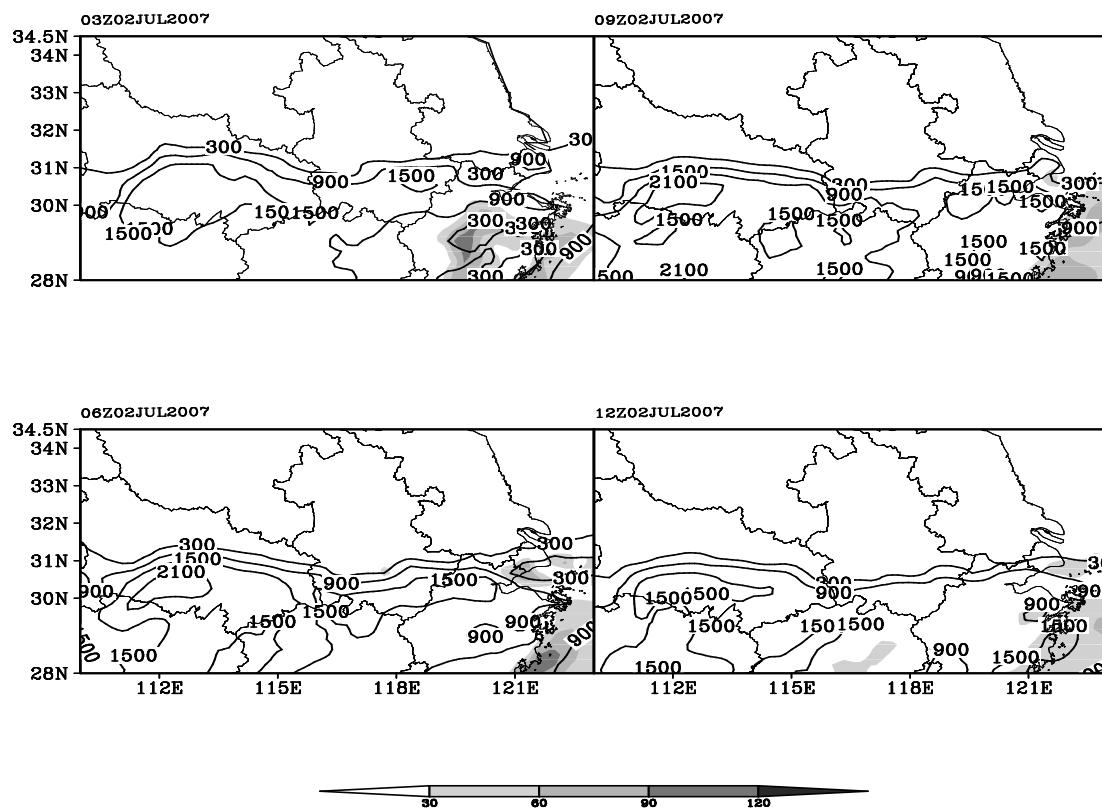
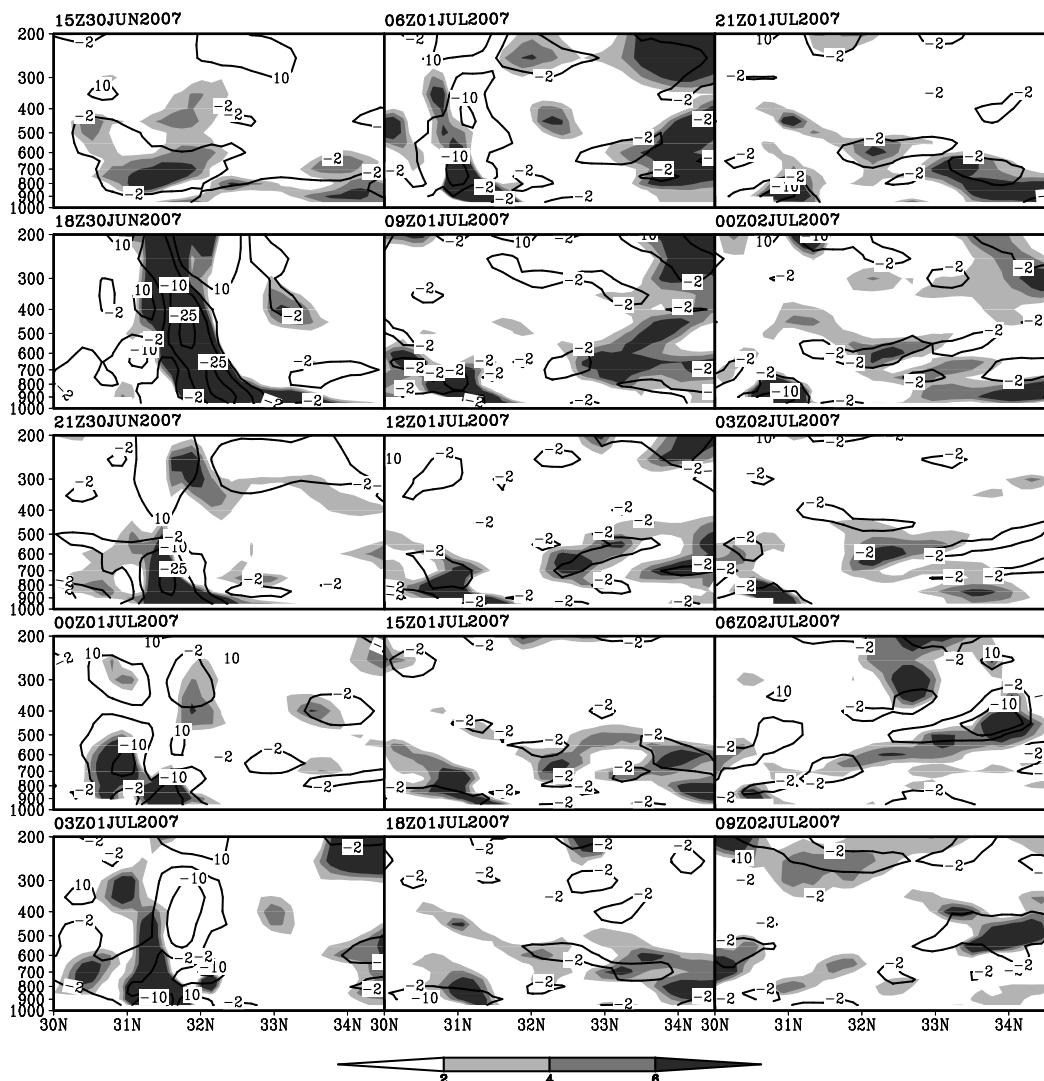


图4.6 试验方案RADAR模拟的每3小时最大对流有效位能（CAPE）和最大对流抑制能量（MCIN）分布图。阴影为模拟的最大对流抑制能量（MCIN，单位： $\text{J}\cdot\text{Kg}^{-1}$ ），等值线为模拟的最大对流有效位能（CAPE，单位： $\text{J}\cdot\text{Kg}^{-1}$ ）。

图4.7给出模拟的每3小时沿对流云带上的强中心的经向垂直剖面图。可以看出，个例发生前到发展强盛期，即6月30日15时到7月1日09时，沿 $118.3^{\circ}\text{E}$ 安徽境内在个例对流云系的强中心（31到 $32^{\circ}\text{N}$ 之间）上空存在明显的强中低空辐合区（图4.7a），辐合区最高可伸展至高空400~300 hPa之间，辐合在6月30日18~21时最强，中心强度达到 $25 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ ，其余时刻辐合区中心强度维持在 $10 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ 左右。同时，可以看到辐合区一般存在强的正涡度区，涡度中心强度维持在 $6 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ 以上，6月30日18时涡度柱伸至200 hPa以上，其余时刻涡度柱伸展高度基本与辐合区伸展高度接近。辐合区上空300 hPa以上存在较强的辐散区，辐散中心强度维持在 $10 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ 左右。

图4.8是模拟的每3小时沿对流云带上安徽，江苏境内的强中心的经向模拟反射率，扰动气压，风场垂直剖面图。6月30日15时~7月1日09时，沿 $118.3^{\circ}\text{E}$ 安徽

境内在个例对流云系的强中心( $31\sim32^{\circ}\text{N}$ )上空 $400\text{ hPa}$ 以下水汽混合比均超过 $2\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，向下逐渐增加(图略)， $900\text{ hPa}$ 以下水汽混合比已经超过 $15\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。高空 $300\text{ hPa}$ 以下 $31^{\circ}\text{N}$ 以北受负扰动气压控制，在图4.7a给出的中低空辐合区与正涡度柱重叠区域内存在强烈的上升气流。上升气流是在高空辐合区与低空辐散区之间的强抽吸作用下，配合正涡度柱内有利于上升气流的环境而产生，上升气流的位置和强度与辐合区内辐合强度以及正涡度柱强度和伸展高度基本相一致。模拟的强中心也出现在强上升气流与正涡度柱重叠区域内，模拟对流云系出现后1小时内即6月30日18时模拟的强中心伸展最高，顶端伸展到 $500\text{ hPa}$ 附近，中心强度超过 $40\text{ dBz}$ ，随后随着正涡度柱与上升气流的减弱，中心伸展高度也逐渐降低，但中心强度减弱较小，06时仍维持在 $40\text{ dBz}$ 左右(图4.8a)。



(a)

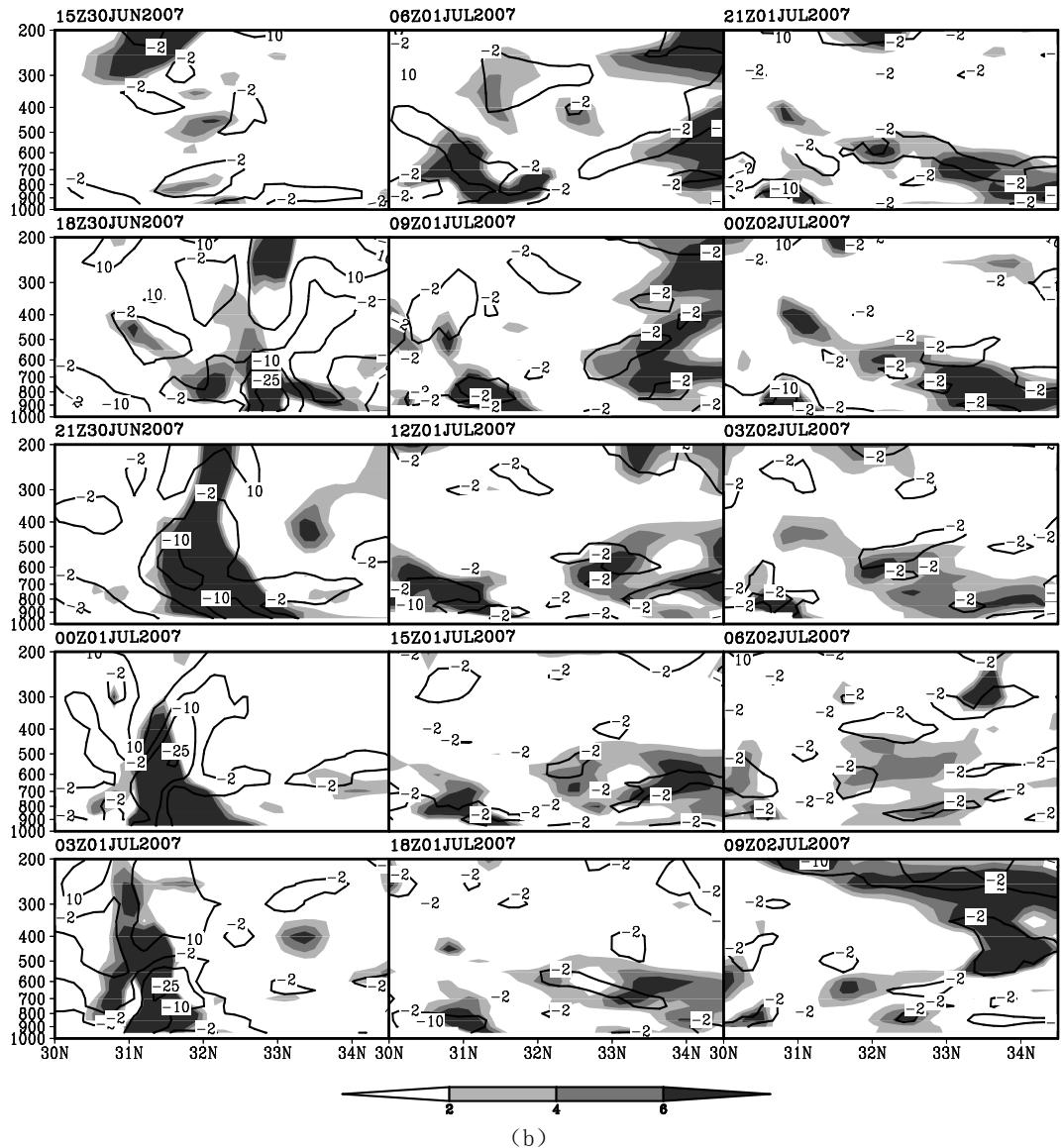
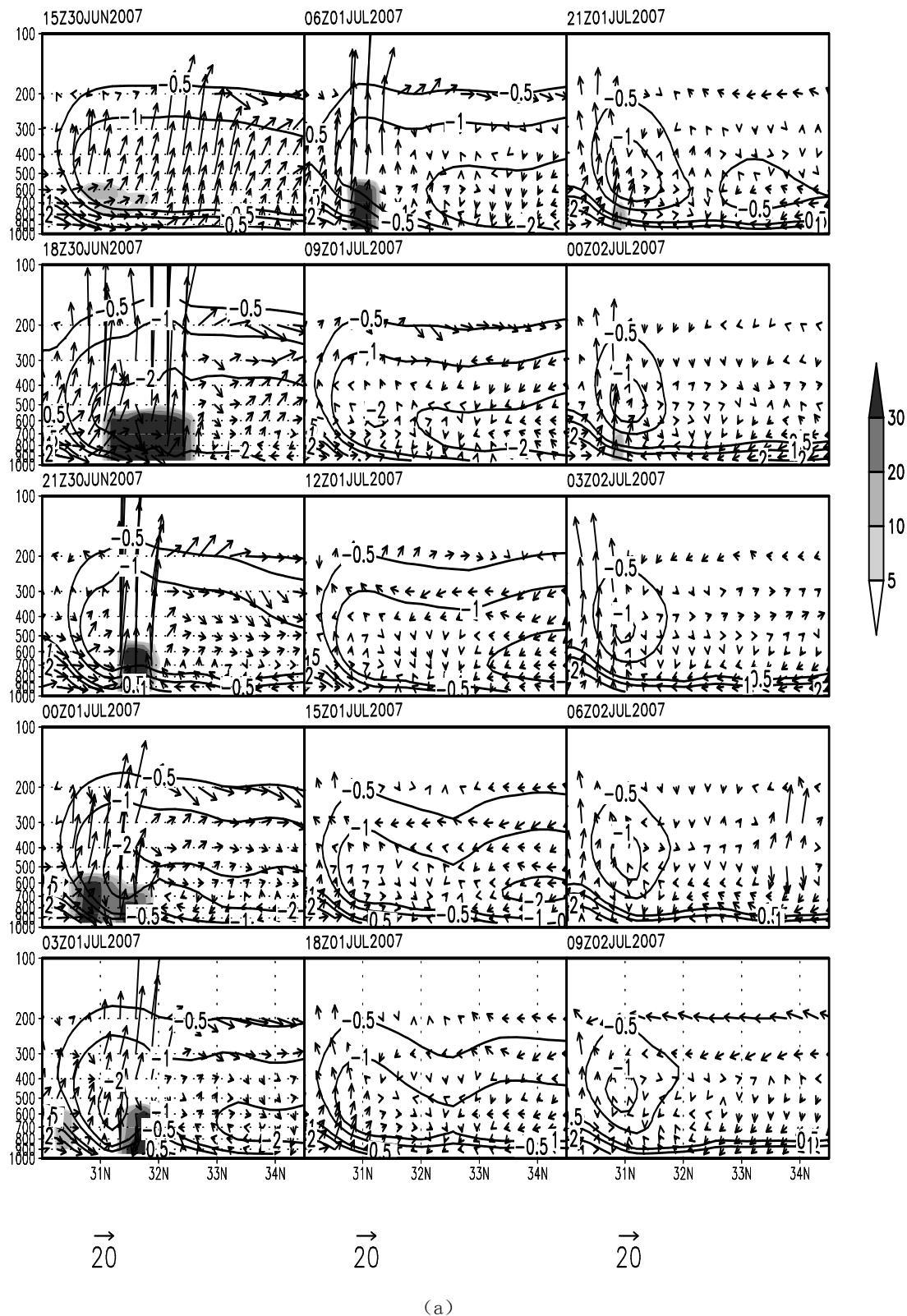


图4.7 试验方案RADAR模拟的沿经向每3小时涡度和散度的垂直剖面图, 阴影表示涡度(单位:  $\times 10^{-5} \cdot s^{-1}$ ), 等值线表示散度(单位:  $\times 10^{-5} \cdot s^{-1}$ )。图(a)是沿118.3 °E(模拟的对流云带在安徽境内的强回波中心所在经度)的剖面图, 图(b)是沿119.5 °E(模拟的对流云带在江苏境内的强回波中心所在经度)的剖面图。

7月1日09时以后, 沿118.3 °E经向剖面内强的低空辐合已经消失, 同时正涡度区范围和强度大大减弱(图4.7a), 受其影响, 上述区域内负扰动气压虽然仍然存在, 空气内水汽混合比变化不大, 但强的大范围上升气流已经消失, 沿118.3 °E经向剖面上气流紊乱, 低空多下沉气流。此时模拟的对流云系已经逐渐消散, 模拟的回波中心强度低于5 dBz(图4.8a), 随后对流云系快速消亡。

从6月30日18时, 即个例发生后1小时开始, 沿119.5 °E江苏境内对流云系的强回波中心(32到33 °N之间)上空存同样在明显的强中低空辐合区(图4.7b),

辐合区最高可伸展至高空400 ~300 hPa之间，辐合在6月30日18时~7月1日03时之间最强中心强度达到 $25 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。



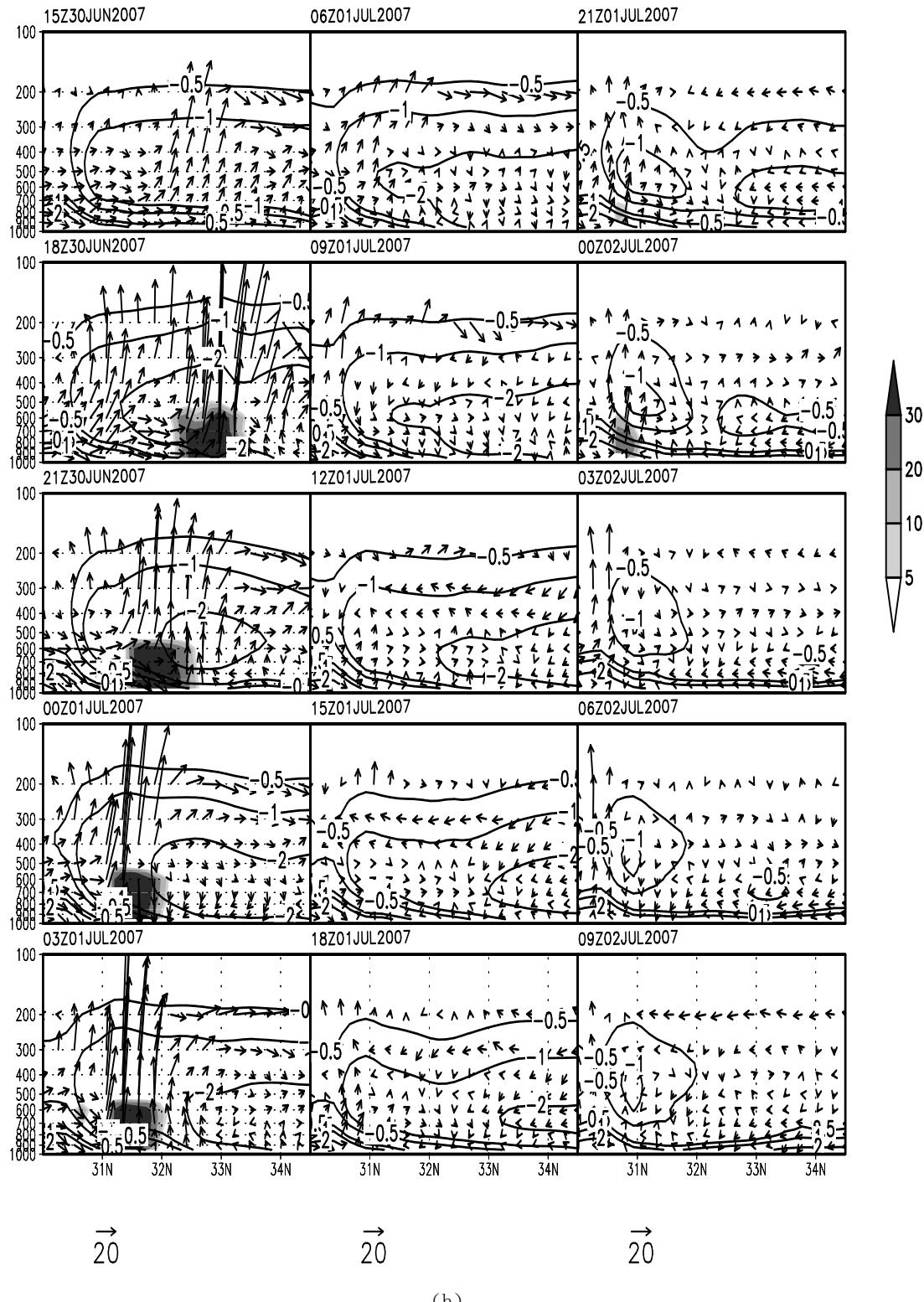


图4.8 试验方案RADAR模拟的沿经向每3小时反射率, 扰动气压和风场(水平风速 $u$ 和垂直风速 $w \times 100$ 的合成风矢量)的垂直剖面图, 阴影表示反射率(单位: dBz), 等值线表示扰动气压(单位: hPa), 箭头表示合成的风矢量(单位:  $m \cdot s^{-1}$ )。图(a)是沿118.3 °E(模拟的对流云带在安徽境内的强回波中心所在经度), 图(b)是沿119.5 °E(模拟的对流云带在江苏境内的强回波中心所在经度)。

同时，可以看到辐合区一般与强的正涡度柱相重叠，涡度柱中心强度维持在  $6 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  以上，6月30日21时涡度柱伸至200 hPa以上。辐合区上空300 hPa以上存在较强的辐散区，辐散中心强度维持在  $10 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  左右。6月30日15时～7月1日09时之间，沿  $119.5^{\circ}\text{E}$  江苏境内在个例对流云系的强回波中心 ( $31\text{--}32^{\circ}\text{N}$ ) 上空400 hPa以下水汽混合比均超过  $2 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，沿高度递减而加强（图略），低空900 hPa以下水汽混合比超过  $15 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。高空300 hPa以下  $31^{\circ}\text{N}$  以北受负扰动气压控制，在图4.7b给出的中低空辐合区与正涡度柱重叠区域内存在强烈的上升气流。上升气流同样是在高空辐合区与低空辐散区之间的强抽吸作用下，配合正涡度柱内有利于上升气流的环境而产生，上升气流的位置和强度与辐合区内辐合强度以及正涡度柱强度和伸展高度基本相一致。模拟的回波中心同样在对流云系出现后1小时内即6月30日18时伸展到500 hPa附近，回波中心强度超过40 dBz，随后随着正涡度柱与上升气流的减弱，回波中心伸展高度也逐渐降低，但回波中心强度减弱较小，03时仍维持在40 dBz左右（图4.8b）。

7月1日06时以后，沿  $119.5^{\circ}\text{E}$  经向剖面内强的低空辐合已经消失，同时正涡度区范围和强度大大减弱（图4.7b），受其影响，上述区域内负扰动气压虽然仍然存在，空气内水汽混合比变化不大，但强的大范围上升气流已经消失，沿  $119.5^{\circ}\text{E}$  经向剖面上气流紊乱，低空多下沉气流。此时模拟的对流云系已经逐渐消散，模拟的回波中心强度低于5 dBz（图4.8b），随后对流云系快速消亡。

## 4.6 本章小结

本章在利用 ARPS 模式资料同化系统 ADAS 系统对 WRF 模式的初始场进行改进的基础上，以 WRF 模式初始场包含同化资料的不同设计了五组试验方案，对 2007 年 6 月 30 日 17 时到 7 月 2 日 2 时的中尺度对流系统个例进行了模拟，在检验了五组试验方案降水模拟结果差异的基础上，挑选模拟效果最好的试验方案 RADAR 模拟结果对该个例进行了详细分析，主要结论如下：

1. 五组试验方案均成功模拟出了该个例的带状降水，降水强度也与实况相接近，但模拟的主要雨带相对实况偏南。五组试验方案中试验 RADAR 由于加入的 CINRAD/SA 多普勒雷达资料空间分辨率较高，对模式初始场的改善较为明显，对降水的模拟效果最好。

2. 模拟的回波相比实况有所偏南，但成功模拟出了个例发生发展强盛期的回波的形态变化，模拟的强中心首先出现在江苏境内，随后迅速向安徽，湖北境内延伸，在模拟开始 12 小时后成功模拟出绵延上千公里，从苏南延伸到鄂东的狭长对流云带。

3. 利用试验方案 RADAR 模拟的高时空分辨率结果分析可以发现该个例发生发展前后上空对流层中层 500 hPa 受西风短波槽控制，在对流发展强盛期低空存在强烈的西南风急流。对流云带上强中心伴随着伸展较高的正涡度柱和中低空辐合的重叠，强回波中心随着中低空辐合区与高空辐散区之间的强上升气流向西延伸而延伸，对流云系覆盖范围内受负扰动气压控制，对流层中低层空气水汽混合比在个例发生发展前后保持较高。沿安徽，江苏境内的强中心的经向剖面上正涡度柱与中低空辐合区高空辐散区之间的强上升气流伸展范围较窄，对应的对流云系在经向伸展范围也较窄，从而形成从苏南延伸到鄂东绵延上千公里的狭长对流云带。

## 第五章 结论和讨论

### 5.1 主要结论

本文利用 2007 年卫星 TBB 资料，雷达资料，NCEP 资料，地面观测资料和常规探空资料，对江淮流域上空的中尺度对流系统（MCS）进行了详细的统计，分类工作，并对利用雷达资料统计得到的四类型典型个例的雷达对流回波，卫星 TBB 云图，对流降水的演变以及它们发生的大尺度天气形势，高空天气形势和风场演变，地面场演变等特征进行了详细分析，得到了一些有意义的结果。此外，利用数值模拟结果对江淮流域中尺度对流系统（MCS）的一类典型个例发生发展环境和对流线结构进行了分析，探讨了绵延上千公里的  $\alpha$  中尺度对流线形成的原因。本文的主要结论如下：

#### 1. 江淮流域梅雨期 MCS 的统计分类：

2007 年 6 月 29 日～7 月 9 日的 11 天满足定义的 MCS 48 个，其中  $M\beta CS$  38 个，占 79.2%， $M\alpha CS$  10 个，占 20.8%。

2007 年江淮流域梅雨期 MCS 从淮河流域到长江流域都有分布，MCS 多生成于江淮流域中游地区，大部分 MCS 由生成地生成后向偏东方向移动，淮河流域以北到淮河流域的 MCS 移向以偏东方方向到偏东北方向为主，淮河流域以南到长江流域的 MCS 移向以偏东方向到偏东南方向为主。

维持时间较短（6 小时以内）、尺度较小（不超过三百公里）的  $\beta$  中尺度对流系统（MCS）倾向于在生成地附近发生发展，其所产生的对流天气较弱，降水较少。维持时间较长（6 小时以上）、尺度较大（超过三百公里）的  $\alpha$ 、 $\beta$  中尺度对流系统（MCS）生成后发生发展过程中覆盖较大范围地区，产生较强的对流天气和降水。

2007 年江淮流域梅雨期 MCS 生成时刻的日变化规律与大气气温日变化规律成正位相分布，MCS 生成个数在凌晨黎明前后达到低谷，在午后前后达到高峰。而江淮流域 MCS 的消亡时刻的日变化与生成时刻相反。生命史在 5 小时和 12~15 小时左右的 MCS 数量各接近三分之一，分别为 15 个和 16 个。

2007 年江淮流域梅雨期 MCS 的雷达反射率回波形态类型共分为 4 类：虚

线型, 3 个个例; 散面型, 11 个个例; 实面型, 21 个个例; 实线型, 6 个个例。

## 2. 四类分型典型个例的环流背景分析:

实线型和虚线型两种线性对流个例中, 发展较弱的线性个例对流回波在其生命周期内始终成线性形态, 最后趋于消亡。而发展较强的线性个例对流回波则在发展强盛期转变为较为密实的面(片)状对流回波, 最后趋于消亡。散面型个例对流回波在对流发展强盛期转变为密实的面(片)状回波, 而实面型个例在其生命周期内回波形态变化不大, 其强对流回波仅随个例的发展而扩展。

四种类型中实线型个例产生的降水最为强烈, 虚线型和实面型个例次之。虚线型个例产生的降水落区分布与实线型相似, 强降水沿线性、相对较为松散的对流线附近分布。实面型个例产生的降水覆盖范围一般较广, 强降水倾向于在密实的面状(片状)对流云系覆盖范围的北侧和西侧产生。散面型个例产生的降水强度最弱, 强降水倾向于在离散的面状(片状)对流云系覆盖范围的北侧和西侧产生。

四种类型江淮流域梅雨期中尺度对流系统 (MCS) 一般在有利的大尺度环境下产生 (图 5.1), 其共同的环流形势特征为:  $\beta$  中尺度 MCS 个例上空对流层中层 500 hPa 环流形势较为平直, 部分  $\alpha$  中尺度个例对流层中层 500 hPa 受短波槽控制。对流层低空一般存在辐合区, 中层存在辐散区, 低空辐合区常伴随相对湿度大值区和正涡度区的重叠。对流层低空存在西南风急流, 高空 500 hPa 以下存在风场切变线和风场的垂直切变。绝大多数 MCS 个例地面上存在锋面和风场辐合。

## 3. 对一类 MCS 的数值模拟分析:

试验均成功模拟出了该个例的带状降水, 降水强度也与实况相接近, 但模拟的主要雨带相对实况偏南。

试验方案 RADAR 成功模拟出了个例发生发展的形态变化, 模拟的强中心首先出现在江苏境内, 随后迅速向安徽, 湖北境内延伸, 在模拟开始 12 小时后成功模拟出绵延上千公里, 从鄂东延伸到苏南的狭长对流云带。

利用试验方案 RADAR 模拟的高时空分辨率结果分析可以发现该个例发生

发展前后上空对流层中层 500 hPa 受西风短波槽控制，在对流发展强盛期低空存在强烈的西南风急流。对流云带上强回波中心伴随着伸展强烈的正涡度柱和中低空辐合的重叠，强回波中心随着中低空辐合区与高空辐散区之间的强上升气流向西延伸而延伸，对流云系覆盖范围内受负扰动气压控制，对流层中低层空气水汽混合比在个例发生发展前后保持较高水平。沿安徽、江苏境内的强回波中心的经向剖面上正涡度柱与中低空辐合区高空辐散区之间的强上升气流伸展范围较窄，对应的对流云系在经向伸展范围也较窄，从而形成从鄂东延伸到苏南，绵延上千公里的狭长对流云带。

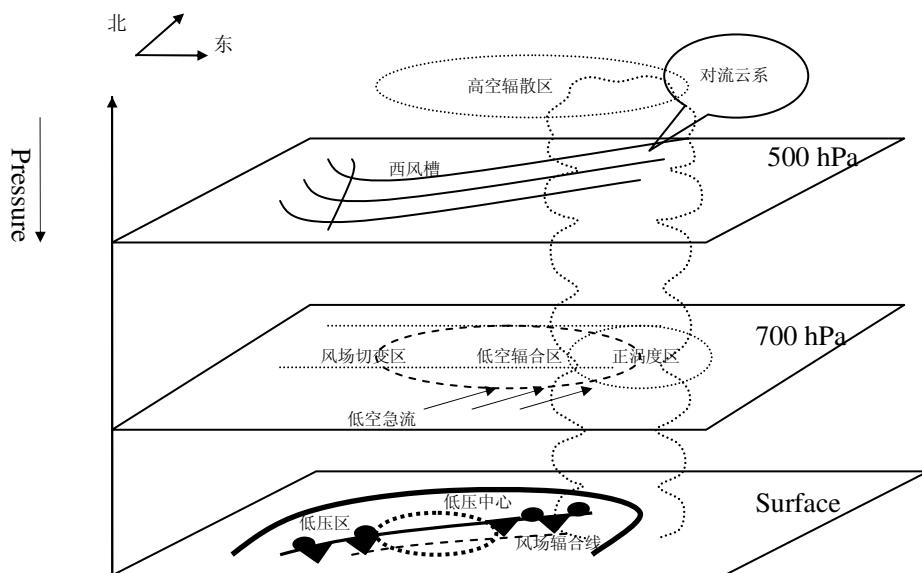


图5.1 2007年江淮流域梅雨期中尺度对流系统（MCS）高低空天气（系统）形势模型图

## 5.2 讨论和展望

针对江淮流域梅雨期中尺度对流系统（MCS）较长时间范围的详细统计分析研究工作仍是我国中尺度天气系统研究领域较为紧迫的问题，本文利用 2007 年 6 月底到 7 月初卫星 TBB 资料，雷达资料，NCEP 资料，常规观测和探空资料以及数值模拟对其作了一定的探讨和分析，取得了一些有意义的结果，但仍有需要进一步深入分析研究的问题，总结如下：

1. 本文虽然对 2007 年江淮流域梅雨期中尺度对流系统（MCS）做了较为详

细的统计分析和模拟研究，但仅统计了 6 月底到 7 月初十天左右内江淮流域发生的 MCS 概况，考虑到统计样本偏少以及中尺度对流系统发生发展的复杂性，今后需要对更大时间范围内的江淮流域 MCS 进行详细的统计和分析模拟工作。

2. 本文针对江淮流域梅雨期 MCS 采用的 TBB 资料判定标准和雷达资料判定标准代表性如何？能否适应在更大时间范围内和更大区域范围内对江淮流域 MCS 的统计和分类的工作？利用上述标准得到的分类型，尤其利用雷达资料判断标准得到的四种 MCS 类型是否在江淮流域具有普遍性？这些问题都需要进一步的统计分类研究工作来证实。
3. 本文仅对四种 MCS 雷达分类型每类型 1 个典型个例进行了详细分析，取得的 TBB 云图，雷达回波，降水，大尺度环流形势，地面场演变特征对该类型个例这些特征的代表性有些不足，尤其是抽象出的高低空天气形势模型能否在较大范围内代表江淮流域梅雨期 MCS 的高低空天气形势？它们之间的差异在哪里？这些问题仍需要进一步工作去验证和分析。
4. 本文的数值模拟仅完成了一个个例，且分析有待深入，今后应对每类个例进行模拟工作，进行系统的对比研究。

## 参考文献

- 白洁, 王洪庆. 1997. "GMS 卫星红外云图强对流云团的识别与追踪." 热带气象学报 13002: 158-167.
- 贝耐芳, 赵思雄, 高守亭. 1998 年“二度梅”期间武汉—黄石突发性暴雨的模拟研究, 大气科学, 2003, 27, 399~418
- 贝耐芳, 赵思雄. 1998 年“二度梅”期间突发强暴雨系统的中尺度分析, 大气科学, 2002, 26 (4), 526~540
- 程麟生, 冯伍虎. “987”突发大暴雨及中尺度低涡结构的分析数值模拟, 大气科学, 2001, 25, 465~478
- 丁一汇. 1991 年江淮流域持续性特大暴雨研究. 北京: 气象出版社. 1993, 254p
- 段旭, 李英. 低纬高原地区一次中尺度对流复合体个例研究 [J]. 大气科学, 2001, 25(5):676-682
- 段旭, 张秀年. 2004. 云南及其周边地区中尺度对流系统时空分布特征. 气象学报. 62 (2): 243-251.
- 方兆宝, 林珲, 等. 2004. "流形群运动目标自动识别与跟踪技术研究——以 MCS 自动追踪方法为例." 遥感学报 8(001): 14-22.
- 方宗义, 覃丹宇. 2006. "暴雨云团的卫星监测研究进展." 应用气象学报 17005: 583-593.
- 方宗义. 夏季长江流域中尺度云团的研究. 大气科学进展, 1986, 2: 334~340
- 费增坪, 郑永光, 王洪庆. 2003 年淮河大水期间 MCS 的普查分析. 气象, 2005, 31, 18~22
- 矫梅燕, 姚学祥, 周兵, 等. 2003 年淮河大水天气分析与研究. 北京: 气象出版社, 2004, 93~159
- 雷恒池, 王宏, 胡朝霞. 1998 年 7 月 21 日武汉暴雨小尺度动力特征的数值模拟研究, 大气科学, 2002, 26, 647~662
- 李玉兰, 王倩熔, 郑新江等. 我国西南、华南地区中尺度对流复合体 (MCC) 的研究. 大气科学, 1989, 13 (4): 417-422
- 廖捷, 谈哲敏. 一次梅雨锋特大暴雨过程的数值模拟研究: 不同尺度天气系统的影响作

- 用.气象学报, 2005, 63 (5), 771-789
- 林珲, 江吉喜, 等 2006. "青藏高原中尺度对流系统的时空演变特征及规律." 武汉大学学报: 信息科学版 31007: 576-581.
  - 林永辉, 布朝鲁 2003. "2001 年 8 月初上海强暴雨中尺度对流系统的数值模拟研究." 气象学报 61002: 196-202.
  - 刘黎平, 邵爱梅, 葛润生等. 一次混合云暴雨过程风场中尺度结构的双多普勒雷达观测研究, 大气科学, 2004, 28, 278~284
  - 刘黎平. 用双多普勒雷达反演降水系统三维风场试验研究, 应用气象学报, 2003, 14, 502~504
  - 马禹, 王旭, 陶祖钰.中国及其邻近地区中尺度对流系统的普查时空分布特征.自然科学进展, 1997, 7 (6): 701-706
  - 邱崇践, 余金香, Xu Q. 多普勒雷达资料对中尺度系统短期预报的改进. 气象学报, 2000, 58, 244~249
  - 盛春岩, 浦一芬, 高守亭. 多普勒天气雷达资料对中尺度模式短时预报的影响. 大气科学, 2006, 30, 93~107
  - 师春香, 江吉喜, 方宗义. 1998 长江大水期间对流云团活动特征研究. 气候与环境研究, 2000, 5, 279~286
  - 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, 600~611
  - 寿绍文, 励申申, 姚秀萍.中尺度气象学.北京: 气象出版社, 2003, 370pp
  - 孙建华, 张小玲, 齐琳琳等. 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, 2004, 62, 423~438
  - 孙晶, 楼小凤等 2007. "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 31001: 1-18.
  - 陶诗言, 倪允琪, 赵思雄. 1998 夏季中国暴雨的形成机理与预报研究, 北京: 气象出版社. 2001, 184p
  - 陶祖钰, 顾雷 1996. "常规资料揭示的中尺度对流复合体的环流结构." 热带气象学报 12004: 372-379.
  - 陶祖钰, 王洪庆, 王旭等.1995 年中国的中- $\alpha$  尺度对流系统.气象学报, 1998, 56 (2): 166-177

- 陶祖钰, 王洪庆, 王旭等.1995 年中国的中- $\alpha$  尺度对流系统.气象学报, 1998, 56 (2): 166-177
- 托亚, 梁海河, 马淑芬, 等. 用雷达观测资料改进 MM5 初始场的初步试验研究. 南京气象学院学报, 2003, 26, 661~667
- 王欢, 倪允琪.2003 年淮河汛期一次中尺度强暴雨过程的诊断分析数值模拟研究.气象学报, 2006, 64 (6): 734-742
- 王婷, 吴池胜等 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." 大气科学 32001: 184-196.
- 王叶红, 赵玉春, 崔春光. 雷达降水资料一维变分同化的敏感性研究. 气象, 2004, 30, 6~10
- 王智, 翟国庆等 2003. "长江中游一次  $\beta$  中尺度低涡的数值模拟." 气象学报 61001: 66-77.
- 吴庆丽, 陈敏 2002. "暴雨雨团中  $\beta$  尺度流场结构的数值模拟." 科学通报 47018: 1437-1440.
- 项续康, 马岚, 王大昌.1993.1991 年梅雨锋云系的中尺度分析. 应用气象学报, 4 (3): 286-292
- 项续康, 江吉喜.我国南方地区的中尺度对流复合体.应用气象学报, 1995, 6 (1): 1-17
- 杨金锡, 冯志娴, 郑媛媛. 1991 年 6 月 12—16 日江淮特大暴雨中尺度天气过程分析. 气象学报, 1994, 52, 187~193
- 姚秀萍, 于玉斌. 2003 年梅雨期干冷空气的活动及其对梅雨降水的作用. 大气科学, 2005, 29, 973~985
- 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- $\beta$  系统的发生发展分析, 应用气象学报, 2002 , 13, 385~397
- 张云, 潘晓滨等.一次特大暴雨中尺度系统结构特征机理分析.解放军理工大学学报, 2006, 7 (4), 386~404
- 郑永光, 陈炯等 2007. "北京及周边地区 5~ 8 月红外云图亮温的统计学特征及其天气学意义." 科学通报 52014: 1700-1706.
- 郑永光, 陈炯等 2008. "中国及周边地区夏季中尺度对流系统分布及其日变化特征." 科学通报 53004: 471-481.
- 郑永光, 朱佩君等 2004. "1993~ 1996 黄海及其周边地区 M  $\alpha$  CS 的普查分析." 北京

大学学报: 自然科学版 40(001): 66-72.

- Anderson, C. J. and R.W. Arritt, 1998. Mesoscale Convective Complexes and Persistent Elongated Convective Systems over the United States during 1992 and 1993. *Monthly Weather Review*, 126, 578-599.
- Arnaud, Y. and M. Desbois, et al. 1992. Automatic tracking and characterization of African convective systems on Meteosat Pictures. *Journal of Applied Meteorology*, 31, 443-453.
- Aspliden, C. I. And Tourre, Y. et al. 1976. Some climatological aspects of West African disturbance lines during GATE. *Monthly Weather Review*, 104, 1029-1035.
- Augustine, J. A., 1985: An automated method for the documentation of cloud-top characteristics of mesoscale convective systems. NOAA Tech. Memo. ERL ESG-10, Dept. of Commerce, Boulder, CO, 121 pp.
- Augustine, J.A. and K.W. Howard, 1988. Mesoscale Convective Complexes over the United States during 1985. *Monthly Weather Review*, 116, 685-701.
- Bartels D L, and Maddox R A. Midlevel cyclonic vortices generated by mesoscale convective systems. *Mon. Wea. Rev.*, 1990, 119:104-117
- Bartels D L, Rockwood A A. Internal structure and evolution of a dual mesoscale convective complex. *Amer. Meteor. Soc.* 1983, 97-102.
- Blanchard, D. O., 1990: Mesoscale convective patterns of the southern High Plains. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 71, 994–1005.
- Bluestein, H. B. and G. T. Marx, and M. H. Jain, 1987: Formation of mesoscale lines of precipitation: Nonsevere squall lines in Oklahoma during the spring. *Mon. Wea. Rev.*, 115, 2719–2727.
- Bluestein, H. B. and M. H. Jain, 1985: Formation of mesoscale lines of precipitation: Severe squall lines in Oklahoma during the spring. *J. Atmos. Sci.*, 42, 1711–1732.
- Bluestein, H. B., and C. R. Parks, 1983: A synoptic and photographic climatology of low-precipitation severe thunderstorms in the southern Plains. *Mon. Wea. Rev.*, 111, 2034–2046.
- Bratseth A. Statistical interpolation by means of successive corrections. *Tellus*, 1986, 38A, 439~447
- Brooks, R. H., C. A. Doswell, and J. Cooper, 1994: On the environments of tornadic and

- nontornadic mesocyclones. *Wea. Forecasting*, 9, 606–618.
- Carvalho, L.M. V. and C.Jones.2001.A satellite method to identify structural properties of mesoscale convective systems based on the maximum spatial correlation tracking technique (MASCOTTE).*Journal of Applied Meteorology*, 40, 1683-1701.
  - Cotton, W. R., M. S. Lin, R. L. McAnelly, and C. J. Tremback, 1989: A composite model of mesoscale convective complexes. *Mon. Wea. Rev.*, 117, 765–783.
  - Cotton, W.R., R.L. George, et al. 1983. A Long-Lived Mesoscale Convective Complex. Part I: The Mountain-Generated Component. Part II: Evolution and Structure of the Mature Complex *Monthly Weather Review*, 111, 1893–1937.
  - Fristch J M, Murphy J D, Kain J S. Warm-core vortex amplification over land. *J. Atmos. Sci.*, 1994, 5,1780-1807
  - Fritsch, J. M., R. J. Kane, and C. R. Chelius, 1986: The contribution of mesoscale convective weather systems to the warm-season precipitation in the United States. *J. Climate Appl. Meteor.*, 25, 1333–1345.
  - Gao J D, Xue M, Brewster K, et al. A three dimensional variational data analysis method with recursive filter for Doppler radars. *J. Atmos. Oceanic Technol.* 2004, 21, 457~469
  - Gao J D, Xue M, Shapiro A, et al. Three dimensional simple adjoint velocity retrievals from single Doppler radar. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 2001, 18, 26~38
  - Geerts, B., 1998: Mesoscale convective systems in the southeast United States during 1994–95: A survey. *Wea. Forecasting*, 13, 860– 869.
  - Guilber, E. and Hui Lin.2007.A New model for cloud tracking and analysis on satellite images. *Geoinformatica*, 11, 287-309.
  - Houze, B. F. Smull, and P. Dodge, 1990: Mesoscale organization of springtime rainstorms in Oklahoma. *Mon. Wea. Rev.*, 118, 613–654.
  - Hu M, Xue M, Bratseth K. 3DVAR and cloud analysis with WSP-88D level-II data for the prediction of the Fort Worth, Texas, tornadic thunderstorms. Part I: Cloud analysis and its impact. *Mon. Wea. Rev.*, 2006, 134, 675~698
  - Hu M, Xue M, Gao J D. 3DVAR and cloud analysis with WSP-88D level-II data for the prediction of the Fort Worth, Texas, tornadic thunderstorms. Part II: Impact of radial velocity analysis via 3DVAR. *Mon. Wea. Rev.*, 2006, 134, 699~721

- Ishihara M., Y. Fujiyoshi, A. Tabata, et al. Dual Doppler radar analysis of an intense mesoscale rainband generated along the Baiu front in 1988: its kinematical structure and maintenance process. *J. Meteorol. Soc. Japan.* 1995, 73(2), 139~163
- Israel L. Jirak, William R. Cotton and Ray L. McAnelly. 2003. Satellite and Radar Survey of Mesoscale Convective System Development. *Monthly Weather Review*, 131(10):2428-2449.
- Kane R J Jr, Chelius C R, Fristch J M. Precipitation characteristics of mesoscale convective weather systems. *J. Climate Appl. Meteor.*, 1987, 26 ,1345-1357
- Laing, A.G. and J.M. Fristch, 1993a. Mesoscale Convective Complexes in Africa. *Monthly Weather Review*, 121, 2254-2263.
- Laing, A.G. and J.M. Fristch, 1993b. Mesoscale Convective Complexes over the Indian Monsoon Region. *Journal of Climate*, 6, 911-919.
- Laing, A.G. and J.M. Fristch, 1997. The global population of mesoscale convective complexes. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 123, 389-405.
- Leary, C. A. and E. N. Rappaport. 1987. The Life Cycle and Internal Structure of a Mesoscale Convective Complex. *Monthly Weather Review*, 115, 1503–1527.
- Leese, J.A. and C.S.Novak.1971. An automated technique for obtaining cloud motion from Geosynchronous Satellite data using cross correlation. *Journalof Applied Meteorology*,10,118-132.
- Loehrer, S. M., and R. H. Johnson, 1995: Surface pressure and precipitation life cycle characteristics of PRE-STORM mesoscale convective complexes. *Mon. Wea. Rev.*, 123, 600–621.
- Ma Y, Wang X, and Tao ZY, Geographic distribution and life cycle of mesoscale convective system in China and its vicinity, *Prog in Natur Sci*, 1997, 7(6):701-706.
- Maddox R A. Large-scale meteorological conditions associated with midlatitude mesoscale convective complexes. *Mon. Wea. Rev.*, 1983,111, 1475~1493
- Maddox R A. Mesoscale convective complex. *Bull.Amer.Meteor.Soc.*,1980, 61, 1374~1387
- Maddox, 1983: Large-scale meteorological conditions associated with midlatitude, mesoscale convective complexes. *Mon. Wea. Rev.*, 111, 126–140.
- Maddox, D. M. Rogers, and K. W. Howard, 1982: Mesoscale convective complexes over the United States during 1981—An annual summary. *Mon. Wea. Rev.*, 110, 1501–1514.

- Maddox, R .A., D.J. Perkey, et al. 1981. Evolution of upper troposphere features during the development of a mesoscale convective complex. *Journal of Atmospheric Sciences*, 38, 1664-1674.
- Martin, D. W. and Schreiner, A. J. 1981. Characteristics of West and east Atlantic cloud clusters: a survey from GATE. *Monthly Weather Review*, 109, 1671-1688.
- McAnelly R.L. and Cotton.W.R.1989. The Precipitation Life Cycle of Mesoscale Convective Complexes over the Central United States. *Monthly Weather Review*, 117, 784–808.
- McAnelly, R. L. and Cotton, W. R. 1989. The Precipitation Life Cycle of Mesoscale Convective Complexes over the Central United States. *Monthly Weather Review*, 117, 784-808.
- Miller D, Fritsch J M. Mesoscale convective complexes in the western Pacific region. *Mon. Wea. Rev.*, 1991,119: 2978-2992
- Miller, D. and J. M. Fritsch, 1991. Mesoscale Convective Complexes in the Western Pacific Region. *Monthly Weather Review*, 119, 2978-2992.
- Min, C. and Z. Yongguang 2004. "Vorticity budget investigation of a simulated long-lived mesoscale vortex in South China." *Advances in Atmospheric Sciences* 21(6): 928-940.
- Orlanski, I.. 1975. A rational subdivision of scales for atmospheric processes. *Bulletin American Meteorological Society*, 56, 527-530.
- Parker, M. D., and R. H. Johnson, 2000: Organizational modes of midlatitude mesoscale convective systems. *Mon. Wea. Rev.*, 128, 3413–3436.
- Perkey D J, Maddox R A. A numerical investigation of mesoscale convective complexes. *Mon. Wea. Rev.*, 1983, 113, 553~566
- Smith, E. A. and D.R.Philips.1972.Automated cloud tracking using precisely aligned digital ATS pictures. *IEEE Transactions on computers*,c-21,715-729.
- Sheng C, Gao S, Xue M. Short-range prediction of a heavy precipitation event by assimilating Chinese CINRAD-SA radar reflectivity data using complex cloud analysis. *Meteorol. Atmos. Phys.*, 2006, 94, 167~183
- Sun J, Crook N A. Dynamical and microphysical retrieval from Doppler radar observations using a cloud model and its adjoint. Part I: Model development and simulated data experiments. *J. Atmos. Sci.*, 1997, 54, 1642~1661

- Sun J, Crook N A. Dynamical and microphysical retrieval from Doppler radar observations using a cloud model and its adjoint. Part II: Retrieval experiments of an observed Florida convective storm. *J. Atmos. Sci.* 1998, 55, 835~85
- Takahashi N., Uyeda H., Kikuchi K, et al. Mesoscale and convective scale features of heavy rainfall events in lae period of the Baiu season in July 1988, Nagasaki Prefecture. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1996, 74, 539~561
- Takahashi T., Yamaguchi N., Kawano T. Videosonde observation of torrential rain during Baiu season. *Atmos. Research*, 2001, 58, 205~228
- Takeda T, Seko K. Formation and maintenance of band-shaped convective radar echoes. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1986, 64, 941~955.
- Takeda T. Case study of the structure and formation of a heavy rain band. *J. Natural Disaster Science*, 1981, 3, 40~51
- Tong M, Xue M. Ensemble kalman filter assimilation of Doppler radar data with a compressible non-hydrostatic model: OSSE experiments. *Mon. Wea. Rev.*, 2005, 133, 1789~1807
- Trier S B, Davis C A, and Skamarock W C. Long-lived Meso-convective vortices and their environment. Part II: Induced thermodynamic destabilization in idealized simulations. *Mon. Wea. Rev.*, 2000, 128:3396-3412
- Velasco L. and J. M. Fritsch, 1987. Mesoscale convective complexes in Americas. *Journal of Geophysics Research*, 192, 9591-9613.
- Williams, M. and R.A. Houze, J.R. 1987. Satellite-observed characteristics of winter monsoon cloud clusters. *Monthly Weather Review*, 115,505-519.
- Xue M, Martin W J. A High-Resolution Modeling Study of the 24 May 2002 Dry-line Case during IHOP. Part I: Numerical Simulation and General Evolution of the Dry-line and Convection. *Mon. Wea. Rev.*, 2006, 134, 149~171
- Xue M, Wang D H, Gao J D. The Advanced Regional Prediction System (ARPS), storm-scale numerical weather prediction and data assimilation. *Meteorol. Atmos. Phys.*, 2003, 82, 139~170
- Yamada H., Geng, B., Reddy K K. Three-Dimensional Structure of a Mesoscale Convective System in a Baiu-Frontal Depression Generated in the Downstream Region of the Yangtze

River J. Meteoro. Soc. Japan., 2003, 81, 1243~1271

- Zhang J. Moisture and diabatic initialization based on radar and satellite observations. Ph.D. dissertation, University of Oklahoma, 1999
- Zhang F, Synder C, Sun J. Impacts of initial estimate and observations on the convective-scale data assimilation with an ensemble kalman filter. Mon.Wea.Rev., 2004, 132, 1238~1253

## 硕士在学期间发表论文

1. 孟庆涛, 孙建华, 乔枫雪. 20 世纪 90 年代以来东北暴雨过程特征分析. 气候与环境研究, 已接收

## 致 谢

时光荏苒，岁月如梭，不经意间毕业如期而至，论文也终于在紧张的五月匆匆交卷。回首三年来，付出很多，也收获很多。三年前，刚走出大学校门的我，对科研懵懵懂懂，如今的我，已是一名有一定科研能力的硕士毕业生了。花开花落昔年同，又是一年毕业时，即将毕业的我，虽有些不舍，但终要离开，带着一颗感恩的心。

本文是在孙建华研究员和赵思雄研究员悉心指导下完成的。从论文选题到开展研究，导师都给予了孜孜不倦的指导和帮助，论文的每一部分无不凝结着导师的心血。孙建华老师是一位年轻有为，治学严谨，认真敬业，有着高尚情操，为人坦荡正直的老师，从论文题材的选择，每一步科研过程中给予的指导，到论文撰写过程中细致的修改，孙老师付出太多太多。孙老师不仅仅教我如何科研，在生活中更教会了我许多做人的道理。赵思雄老师是一位德高望重，学识渊博，和蔼可亲，有着高尚情操，为人正直的老师，在科研和生活中，赵老师给予我许多关怀，不仅仅教会我如何做学问，更告诉我如何做人。三年多的学习生活中，两位老师对我的教导和关心，让我铭记于心，终身难忘。在此论文完成之际，谨向孙老师和赵老师致以由衷的敬意和深深的感激！

感谢国家气象局张小玲老师，她为论文的研究提供了宝贵的资料，感谢气象科学研究院刘黎平老师课题组，感谢何宇翔老师，他们在雷达资料控制和处理方面给予了无私的帮助！

感谢研究生部安俊岭、刘荣华、孙鹏宇、张应斌、刘淑秋、王鹤等诸位老师给予的学习和生活上的关心和鼓励！感谢国家气象中心赵琳娜老师、科技外事处张璐老师，姚莉师姐在工作和生活上给予的关心和帮助！

感谢同课题组的张立生、夏茹娣、徐广阔、傅慎明、李博、孔期、乔枫雪、龚晓雪、Angkool Wangwongchai、董海萍、孙晶、崔丽梅、黄翠银、张元春、郑淋淋、梁栋宇等师兄弟和师姐妹们，同你们的交流和讨论让我学到了许多知识，有你们办公室和所里的生活不再单调，谢谢你们！

感谢陈博宇、李超凡、张伟、王涛、邓佳、贾炳浩、苏同华、刘宝超、房云龙、王秀成、晏平仲、孙泓川、蔡兆南、程殿忠、汪雷、汪君、陈活泼、张雅乐、马倩、牛晓瑞、王筝、马音、叶红、李艺苑、吴福婷、王炳兰、姜超、李敏、曹美春、卢冰、朱本璐、刘祥翠、杨慧玲等 06 级硕士班同学以及盛杰、王刚、刘一、刘香娥、王艳、沈钟平、权继梅、张婷、陈晓丽等气象科学研究院 06 级硕士班同学，感谢荆俊山、向纯怡、杨大生等大气所的朋友们，这些年和你们一起生活和学习使我收获许多，和你们在一起很快乐！

感谢常蕊、朱科峰等浙大 01 级师兄师姐，感谢陆小勇、沈杭峰、黄琪波、赵成华、赵伟、王超琪、晏利斌、励圣华、陆方甲、王琴、王勤、姜莹、韩沉花、周燕等浙大 02 大气的同学们，感谢高磊、黄鹏波、严栋、傅超杰、朱新芳、卢峰、陈树青、周文静等浙大 02 级的同学们，感谢樊兴兵、付长青、张奔、杨伟鹏、程党博、程威龙、刘美娟、韩倩、魏燕妮、马岚、程梦妮等好友们，感谢你们这么多年在学习和生活中给予我的关心和帮助，谢谢你们！

感谢我的父亲、母亲、外公、奶奶、叔叔、姑姑，姨妈，他们的养育之恩和无私关爱使我终身难忘！感谢哥哥，妹妹，表哥，表弟，表姐，多年来对我的求学给予了很大的支持！感谢我的女友，感谢所有关心和支持我的人！

谨以此文献给所有关心我和帮助过我的人！

孟庆清

2009 年 5 月于北京

本论文得到中国科学院知识创新工程项目 kzcx2-yw-202 和国家  
自然科学基金项目 40620120437 资助，特此致谢！