

2007年7月18日济南大暴雨的 β 中尺度分析^{*}

廖移山 李俊 王晓芳 崔春光 李武阶

LIAO Yishan LI Jun WANG Xiaofang CUI Chunguang LI Wujie

中国气象局武汉暴雨研究所,武汉,430074

Wuhan Institute of Heavy Rain, China Meteorological Administration, Wuhan 430074, China

2008-08-08 收稿, 2008-11-26 改回.

Liao Yishan, Li Jun, Wang Xiaofang, Cui Chunguang, Li Wujie. 2010. A meso- β scale analysis of the torrential rain event in Jinan in 18 July 2007. *Acta Meteorologica Sinica*, 68(6):944-956

Abstract A meso- β scale analysis is made on the torrential rain process occurred in Jinan in 18 July 2007 based on the $1^\circ \times 1^\circ$ NCEP reanalysis data, the surface-observed hourly rainfall data and the FY-2C IR satellite images. The physical mechanism for the formation and evolution of the surface meso- β scale cyclone is revealed. Furthermore, the impact of multi-scale merging processes on the torrential rain is especially studied. It is found that the sinking cold flows diffused southwest in the low level at the left rear of the developed mature MaCS, which enhanced the baroclinicity near surface under the joint effect with the southwest warm moist flows strengthened continually since afternoon with the result that the cyclonic disturbance over the surface convergence line was intensified and the meso- β scale cyclones are generated and developed quickly. The mesoscale convective systems experienced a multi-scale cloud merging process including four stages from the meso- γ scale convective cell, to the meso- β scale and then the meso- α scale convective cluster, and finally to the mesoscale convective complex system. During every stage, the surface meso- β scale cyclones had played an important role, which were an organizer for both the meso- β scale convective cluster and the meso- α scale convective cluster. With the encounter and merger of meso- β scale cyclones, the convective cluster organized by more than one meso- β scale cyclones was intensively developed and the rainfall was enormously strengthened. During the more than one hour before the torrential rain event occurred in Jinan, there were the meso- β scale super-low-level jets emerging continuously in the southeastern boundary layer, which stimulated the echo cells to emerge successively in this area and grew into a strong echo band during their moving northeast. When the strong echo north of Jinan moved southwardly and encountered with this strong echo band, they combined with each other and developed quickly, which resulted in the severe rainfall.

Key words Torrential rain event in Jinan, Meso- β scale analysis, Meso- β scale cyclone, Cloud merger

摘要 利用 $1^\circ \times 1^\circ$ 的 NCEP 再分析资料、地面逐小时的观测资料和红外云图,对 2007 年 7 月 18 日的济南大暴雨过程进行了详细的 β 中尺度分析,揭示了地面 β 中尺度气旋新生发展的一种物理机制,并重点分析了多尺度的积云并合过程对此次强降水形成的重要作用。研究结果表明:在一个已经发展成熟的 MaCS 的左后侧出现的下沉冷出流在低层向西南方向扩散,与午后不断加强的西南暖湿气流共同作用增强了地面的斜压性,从而使地面辐合线上的气旋性扰动加强,并迅速新生发展出 β 中尺度气旋。在此次强降水过程中共经历了从 γ 中尺度对流单体到 β 中尺度对流云团,再到 α 中尺度对流云团,最后形成中尺度对流复合系统的 4 个多尺度积云并合过程,而地面 β 中尺度气旋在每一个阶段都扮演了非常重要的角色,它们既是 β 中尺度对流云团的组织者,同时也是 α 中尺度对流云团的组成者, α 中尺度对流云团往往都由一个以上的 β 中尺度气旋组织而成,当 β 中尺度气旋出现遭遇、合并之时,对流云团和降水得以强烈发展。在济南强降水发生前的 1 个多小时内,其西南方边界层内不断出现 β 中尺度超低空西南急流,它促使这一区域内不断产生回波单体并在向东北方向移动的过程中迅速发展成强回波带,当济南北面的强回波南移与这一强回波带并合后快速发展产生强降水。

关键词 济南大暴雨, β 中尺度分析, β 中尺度气旋, 积云并合

* 资助课题:国家自然科学基金项目(40975025)。

作者简介:廖移山,主要从事暴雨中尺度研究。E-mail:liaoyishan@whihr.com.cn

中图法分类号 P458.2 P458.1+21.1

1 引言

根据 Orlandi(1975)对大气运动尺度的划分方法,我们常常将中尺度分为 α 中尺度、 β 中尺度和 γ 中尺度,对 α 中尺度和 β 中尺度的划分一般以200—250 km为界,这与中国目前高空探测网的平均间距一致,在高空天气图上可以很容易分析出 α 中尺度系统(如西南低涡、江淮切变、低空急流等),它们往往都是暴雨过程的直接影响系统。但是,暴雨过程经常又是在 α 中尺度系统影响范围内的一种 β 中尺度现象,这可以从卫星云图、雷达回波以及地面时空密集的降水资料(雨团活动)看出来,虽然最后的降水结果可能表现出较大范围的雨带以及较长时间的持续,但它们却是由一次次 β 中尺度雨团活动的结果造成的,这种 β 中尺度过程以及 β 中尺度系统在目前的高空探测网(高空天气图)上还无法分辨出来,这就从根本上制约了对暴雨过程的深入认识(廖移山等,2008)。

由于暴雨具有明显的中尺度特性,因而对暴雨的分析研究一直以中尺度为主,其中多数又以次天气尺度或 α 中尺度为主(孙淑清,2007;赵思雄,1998;高守亭,2008)。对于 β 中尺度分析则大致可以分为两类:数值模拟和观测分析。近10多年来,随着中尺度数值模式的不断发展,用50 km以下水平分辨率开展 β 中尺度数值模拟的研究工作越来越多(吴庆丽等,2002;王建捷等,2002;王智等,2003;姜勇强等,2003;程麟生等,2003;江晓燕等,2005;廖移山等,2006;Chen, et al,2000;Nachamkin, et al,2000a,2000b),很多模拟工作也都结合了观测资料,但能比较完整地模拟一次暴雨过程的 β 中尺度详细特征的工作还很少见,这本身也受制于模式的不完善性(如物理过程参数化方案和初值的不确定性)等。尽管如此,这些工作还是从不同方面揭示了暴雨过程的 β 中尺度特征。用观测资料开展暴雨的 β 中尺度分析一直是暴雨研究的一个重要方面,尤其是近年来利用多普勒雷达资料反演分析 β 中尺度暴雨系统的三维风场和空间结构的研究开始逐渐增多(Yamada, et al,2003;周海光等,2005;潘玉洁等,2008),但反演方法还需要进一步提高,其他研究都是结合卫星、雷达及地面观测资料进行综合分析(胡

伯威等,2001;何立富等,2006;赵玉春等,2008),而其中对卫星云图、雷达回波的分析较多,地面资料则主要是利用逐时的降水来分析中尺度雨团的变化,尽管它们都从不同的方面反映了暴雨 β 中尺度系统的特征,但却都是大气中尺度运动所造成的现象,或许利用地面其他观测资料在目前能更好地分析大气 β 中尺度运动和系统,尽管它们也受到地形及地面摩擦的影响且只有单一层次,但其较高的时空分辨率可以更充分发挥它们在 β 中尺度分析中的作用,而且在平原地区作用可能更好一些。

2007年7月18日傍晚,山东济南突然遭受强暴雨袭击,暴雨来势凶猛,强度很大,不仅对城市交通造成了极大的影响,而且给人民生命财产造成了严重的损失(杨芙蓉等,2007)。尹承美等(2008a,2008b)利用卫星、雷达及地面加密资料对这次过程进行了初步分析。本文试图利用一天两次的常规高空观测资料、每6 h间隔的 $1^\circ \times 1^\circ$ 的NCEP再分析资料、地面逐小时的观测资料、每半小时间隔的FY-2C红外云图、山东省每10 min的地面自动站资料、济南每6 min的多普勒雷达资料,对这次过程进行更详细的 β 中尺度分析,以揭示地面 β 中尺度系统发生、发展、演变的过程以及对此类强降水形成的重要作用,最终能更深入地揭示这类强降水过程的形成原因和物理机制。

2 降水过程及天气形势简介

根据2007年7月18日08时—19日08时(北京时间,下同)24 h降水分布(图略)可以看出,这是一次较大范围的暴雨过程,山东省境内绝大部分观测站点均出现50 mm以上的暴雨,其中鲁北有多个站点出现100 mm以上的大暴雨,最强暴雨中心出现在济南,24 h雨量达到153 mm。根据市区21个自动雨量站资料显示,济南市强降水主要集中在17—20时,1 h最大降水量达151 mm(17时20分—18时20分),3 h最大降水量达180 mm,均为该市有气象记录以来历史最大值。

此次强降水过程是一次东北冷涡切变过程,从18日850 hPa的高空形势(图1)可以看到,08时(图1a),从冷涡后部分裂南下的偏北气流与副热带高压外围的西南暖湿气流在 40°N 附近形成切变,并

在河北北部形成一个中尺度涡旋;此时,西南低空急流(如图中点虚线所示)20 m/s的急流中心前沿位于长江中游地区。到20时(图1b),河北北部的中尺度涡旋东移到了渤海湾,与之相连的切变线则快速南压;此时,西南低空急流迅速向东北方向伸展,山东省

大部分地区均处于急流轴左前侧,而在对流层高层则一直位于高空急流轴的右前侧(图略),这样的动力结构配置为中尺度系统的发展和强降水的发生提供了有利的大气环流背景,尤其是低空急流的发展为暴雨区提供了充足的水汽和能量。

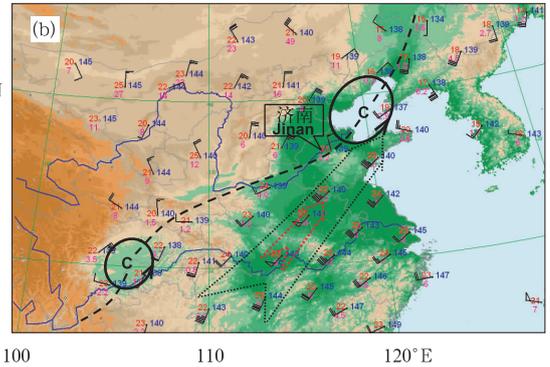
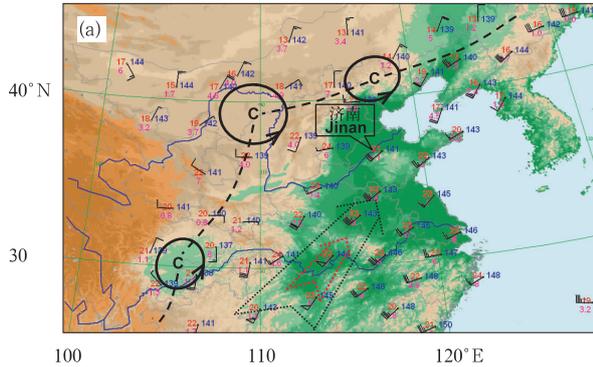


图1 2007年7月18日08时(a)和20时(b)850 hPa高空形势

Fig. 1 Synoptic pattern at 850 hPa in 08:00 BT (a) and 20:00 BT (b) 18 July 2007

3 中尺度降水系统的发展演变

3.1 地面中尺度系统的发展演变

利用地面逐小时的观测资料,并结合每半小时间隔的FY-2C红外云图,详细分析了此次降水过程地面降水系统的发展演变过程,尤其是地面 β 中尺度气旋发生、发展、演变的细致过程。分析过程中,由于地面站间距还不够充分地密集或遇到地形的影响或资料有缺测,部分时次中尺度气旋在风场上表现并不十分完整,但通过结合对流云团的发展演变以及海平面气压场的变化,最终比较详细地分析得到了地面降水系统的发展演变情况(图2)。从图中可以看到,在 39°N 附近,与上述高空切变线上中尺度涡旋相配合的地面中尺度气旋C,从18日清晨开始逐步完整形成并加速东移进入渤海湾,而与之对应的中尺度涡旋云系在东移发展过程中,其尺度也逐步由 β 中尺度增大到 α 中尺度,中午前后该 α 中尺度涡旋云系已发展得相当完整成熟,并在其地面移动路径的北侧(40°N 附近,高空中尺度涡旋的南侧)出现了强降水。

随着中尺度气旋C的东移发展,与高空切变线相配合的地面辐合线也逐步东移南压,午后13时开始,在地面辐合线上不断有 β 中尺度气旋新生发展,至15时辐合线上共出现4个 β 中尺度气旋,其中C1、C2出现后不断南压东移,而C3、C4则从不同的方向于19时在济南的西南侧交汇合并成C5,然后

继续南压东移;22时以后,辐合线上仍不断有 β 中尺度气旋新生发展,但已不是本文要讨论的重点,故略去。

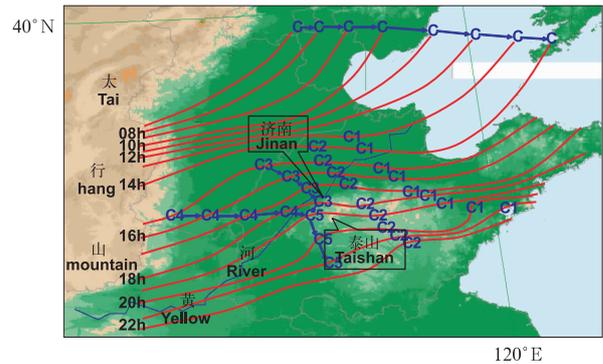


图2 2007年7月18日地面降水系统的发展演变

(实线为地面辐合线,C表示气旋,其后的数字为气旋编号,箭头表示气旋移动的方向)

Fig. 2 Evolution of the rainfall system at surface on 18 July 2007

(The solid line indicates surface convergence line, C with No. represents the different cyclones, and arrows show the moving direction of cyclones)

3.2 中尺度对流云团的发展演变

为了更进一步地了解这次降水过程的发展特点,将进一步分析中尺度对流云团的发生、发展、演变过程以及它们与地面辐合线、 β 中尺度气旋的配置关系。图3给出了2007年7月18日08—19时FY-2C红外云图,图中地面辐合线、 β 中尺度气旋

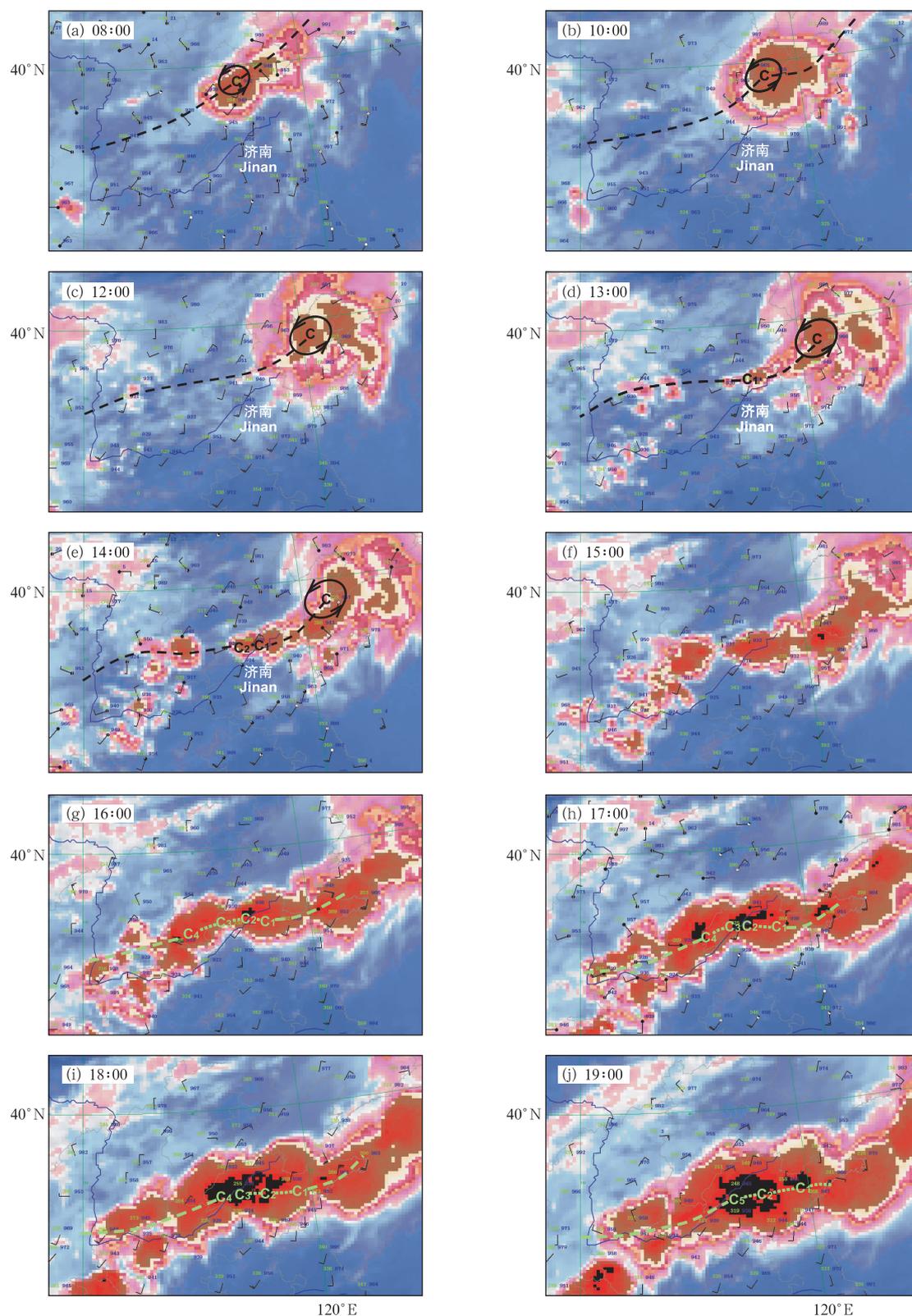


图3 2007年7月18日08—19时FY-2C红外云图
(虚线为地面辐合线,C表示气旋,其后的数字为气旋编号)

Fig. 3 FY-2C IR satellite images from 08:00 to 19:00 BT, 18 July 2007

(Dash line indicates the surface convergence line and C with No. represents the different cyclones)

与图 2 中的一致。需要说明的是,叠加红外云图与地面形势场是在 Micaps 系统下进行的,为了较完整地显示对流云团的发展过程,选取的范围较大,因而使得地面测站资料不能更充分地显示出来,但在分析地面降水系统时已充分考虑了这些资料。从图中可以看到,18 日上午,与中尺度气旋 C 对应的涡旋云系在东移过程中,逐步发展成一个完整成熟的 α 中尺度对流系统 ($M\alpha CS$);到中午 12 时,首先在其西南侧向西南方向新生出一个尺度极小的 (γ 中尺度)新的对流单体;13 时,这一对流单体已发展成一个 β 中尺度对流云团,同时在地面辐合线上则发展出了一个 β 中尺度气旋 C1,此时,在它的偏西方向又新生发展出一个 γ 中尺度对流单体;14 时, γ 中尺度对流单体又发展成 β 中尺度对流云团,地面辐合线上同时也发展出 β 中尺度气旋 C2,C1、C2 相距约 100 km,此时,与 C1、C2 对应的两个对流云团虽然在快速发展过程中已连接在一起,但外围廓线仍表现出 β 中尺度特征,15 时,它们迅速合并发展成为一个 α 中尺度对流云团,虽然从总体来看它们已经是一个完整的对流体,但是在地面流场上仍存在两个 β 中尺度气旋。

当 15 时 β 中尺度气旋 C3、C4 出现的时候,它们已经位于一个正在发展的对流单体的东西两端,追溯到 12 时,可以清楚看到,午后这一与地面辐合线相联系、在黄土高原上新生发展的对流云团也经历了一个多单体并合的过程,只是在山地中地面流场上难以分析出清晰的中尺度系统,当发展的对流云团从太行山东坡移入华北平原时,地面 β 中尺度气旋开始加速东移;16—17 时,C3、C2 逐步靠近,两个由 β 中尺度对流云团并合、发展、形成的 α 中尺度对流云团亦迅即在济南北面交汇并合,且迅猛向南发展;18 时,C4 已快速东移逼近济南(其东移速度可达 80 km/h),并与正位于济南上空的 C3 遭遇;19 时,两个已经很接近的 β 中尺度气旋 C3、C4 在济南的西南侧交汇合并成一个 β 中尺度气旋 C5,随后快速南压。

3.3 中尺度雨团的发展演变

由于地面中尺度雨团能够更进一步地反映出 β 中尺度系统所造成的对流降水的结果,在此将进一步分析中尺度雨团的发展演变过程以及它们与地面辐合线、 β 中尺度气旋的配置关系。图 4 给出了 2007 年 7 月 18 日 13—19 时地面风场、辐合线、 β 中

尺度气旋以及该时刻后半小时的 FY-2C 红外云图和该时刻后 1 h 内的雨量。分析中仅选取了济南附近较小的区域,雨量以 ≥ 10 mm/h 作为中尺度雨团的分析标准。从图中可以比较清晰地看到,中尺度雨团和 β 中尺度气旋有较好的对应关系,但值得注意的是,在气旋发展的前几个小时(13—15 时),强降水带主要位于地面辐合线的北侧,中尺度雨团大多出现在 β 中尺度气旋的西北侧,亦即落后于 β 中尺度气旋的移动路径,这可能有两个方面的原因:一是地面辐合线(含辐合线上的 β 中尺度气旋)以及高空的切变线呈后倾状分布,低层最强的辐合区及其所对应的强降水区位于地面辐合线的北侧,另一方面这也可能同时反映出地面 β 中尺度气旋发生后对对流的组织作用有一个发展的过程,这个过程有快有慢,一般大约在 2 个小时之内。在气旋发展的后几个小时(16—19 时),强降水带(包括中尺度雨团)与地面辐合线及 β 中尺度气旋所对应的位置更为一致,根据 NCEP 再分析资料显示(图略),从 18 日 08—20 时,地面辐合线到 700 hPa 切变线由后倾逐步转为垂直及略为前倾状分布,这可能是这种转变的一个重要原因,同时在另一方面也反映出地面 β 中尺度气旋在发展的成熟、旺盛阶段,它对对流的组织作用更加明显。

根据前面分析中给出的 β 中尺度气旋发生发展的过程以及中尺度对流云团、中尺度雨团发生发展的演变特征,至少有 3 个问题值得关注:

(1) 为什么会在一个已经发展成熟的 $M\alpha CS$ 的尾部新生出一连串的对流单体(预报员常说的“甩坩子”)?——针对这一问题将重点诊断分析 C1、C2 发生发展的物理过程。

(2) 太行山东坡的对流云团和气旋是如何发展出来的?——针对这一问题将简单分析 C3、C4 新生发展的过程。

(3) 济南的降水为什么会如此之强?——针对这一问题将重点分析对流云团、雷达回波并合发展过程及地面 β 中尺度气旋的活动特征。

4 降水中尺度系统发展的诊断分析

4.1 C1、C2 的发生发展过程

从 2007 年 7 月 18 日 12 时地面形势及红外云图(图 5)可以清楚地看到沿地面辐合线强锋区的发展,强锋区约位于 $38^\circ N$ 附近。在图 1 中已经看到,

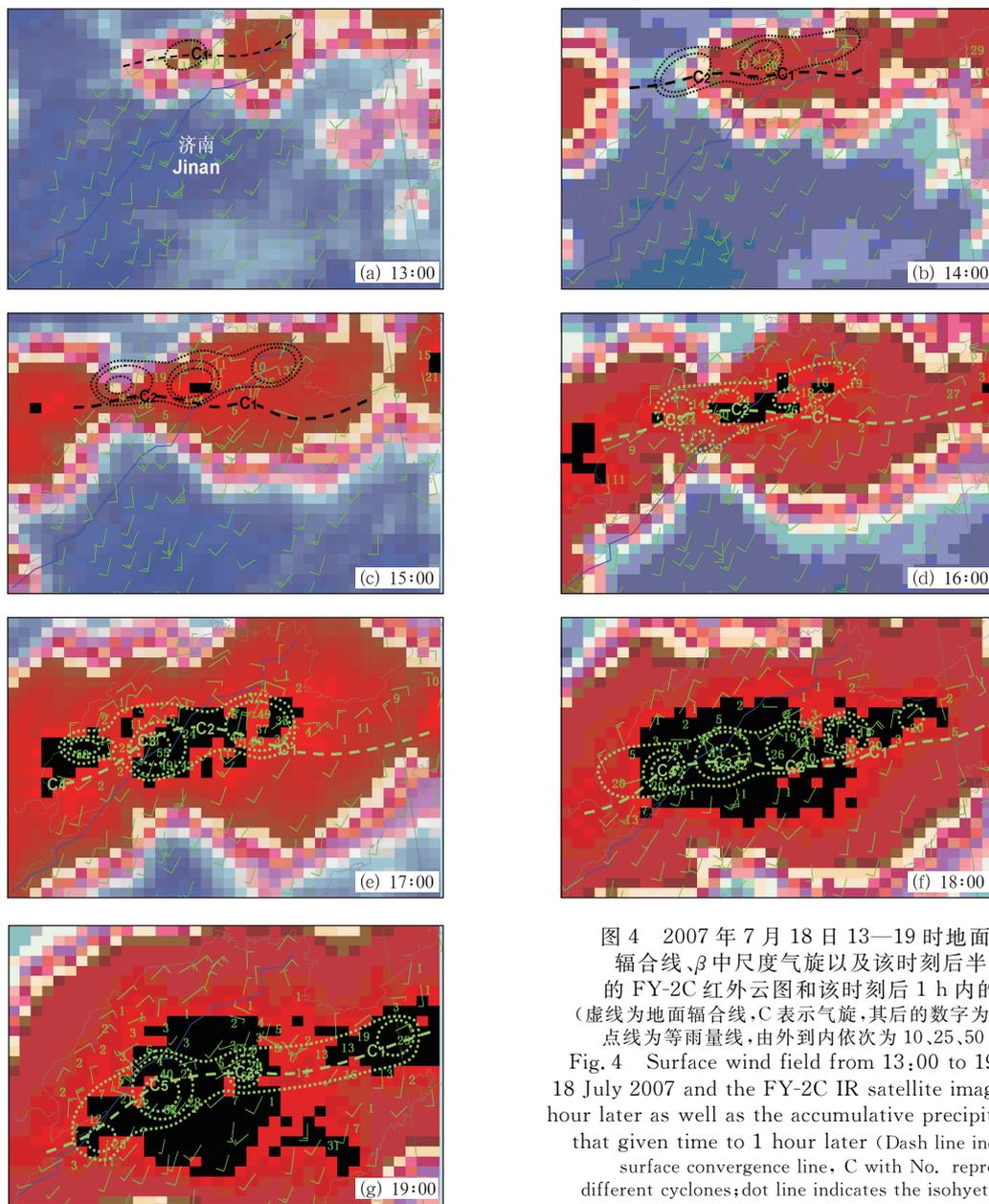


图4 2007年7月18日13—19时地面风场、辐合线、 β 中尺度气旋以及该时刻后半小时的FY-2C红外云图和该时刻后1h内的雨量(虚线为地面辐合线,C表示气旋,其后的数字为气旋编号;点线为等雨量线,由外到内依次为10、25、50 mm/h)
 Fig. 4 Surface wind field from 13:00 to 19:00 BT, 18 July 2007 and the FY-2C IR satellite images half an hour later as well as the accumulative precipitation from that given time to 1 hour later (Dash line indicates the surface convergence line. C with No. represent different cyclones; dot line indicates the isohyet which is, from outside to inside, 10, 25 and 50 mm/h, respectively)

从18日08—20时,西南低空暖湿急流迅速向东北方向伸展;而从地面温湿场的变化来看,中午前后地面辐合线南侧的暖湿气流不断加强,真正值得注意的是,此时在已经发展成熟的 $M\alpha CS$ 的左后侧,有一支冷出流沿云系外围边缘分裂南下,在温度场上它表现出明显的冷舌特征,冷舌中心来自对流云系的内部,它在地面辐合线北侧向东南方向伸展至 $116.5^{\circ}E$ 附近(济南经度为 $117^{\circ}E$),地面强锋区也主要出现在这一经度以东,从随后该强锋区上 γ 中尺度对流单体的发生发展过程来看,这种对流单体沿

地面辐合线向偏西方向连续发展而以强锋区为西界,它们在发展后1—2小时之内迅速组织成 β 中尺度对流云团,并很快发展成 α 中尺度对流云团。在对流云团的这一发展过程中,地面辐合线上首先出现气流扰动,并很快发展出 β 中尺度气旋C1、C2,从前面的分析已经看出,它们既是 β 中尺度对流云团的组织者,同时也是 α 中尺度对流云团的组成者。

根据前面的分析,已经看到在 $M\alpha CS$ 左后侧向西南方向伸展的冷舌对地面强锋区的形成发展起到了非常重要的作用。为了弄清楚这一冷舌的形

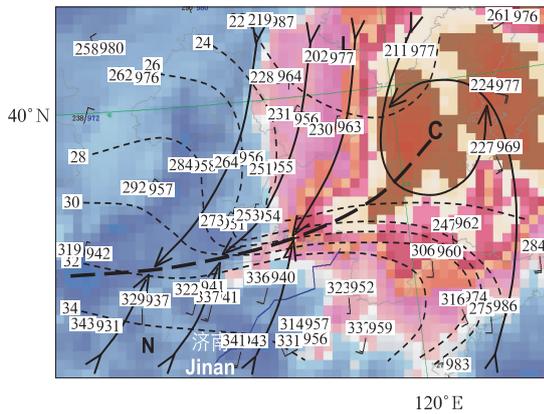


图5 2007年7月18日12时地面形势及红外云图

(矢线为地面流场,细虚线为地面等温线,间隔2°C,粗虚线为地面辐合线,C表示气旋,L表示冷中心,N表示暖中心)

Fig. 5 Surface synoptic pattern and the FY-2C IR satellite image at 12:00 BT 18 July 2007

(Vectors indicate the surface streamline, thin dash line shows the surface isothermal lines in the interval of 2°C, thick dash line shows the surface convergence line, and C represents the cyclone)

成过程及原因,用 $1^\circ \times 1^\circ$ 的NCEP再分析资料对它进行诊断分析。从2007年7月18日14时850 hPa流场和垂直速度场(图6)可以看到,涡旋环流中心位于(40°N,120°E)附近,与图5中M α CS对应一致(尽管时间上相差2 h,但可以、也只有用14时的资料来分析),在涡旋环流西北侧有一片东北—西南走向的下沉运动区。分析此时各层温度场的分布可以发现(图略),在850 hPa及以下各层,在涡旋环流西北侧都有一个明显的东北—西南走向的冷区,冷中心在119°—120°E附近,冷区向西南方向伸展到117°E附近。此时沿119°E的经向环流和温度距平(指对该图纬度范围内经向平均的距平)剖面(图7)可以看到,在40°—41°N上空是M α CS的上升运动区,它在对流层高层向北扩散并在整个对流层中形成一支完整的经向环流,在42°N附近的对流层低层有一片明显的负温度距平区,它正好位于该经向环流下沉支的下方。它独立于其北面对流层中层东北冷涡后部分裂南下的偏北冷气流,是由发展成熟的M α CS北侧的下沉冷出流造成的,它的形成使其南侧低层出现明显锋生。这支下沉冷出流形成后

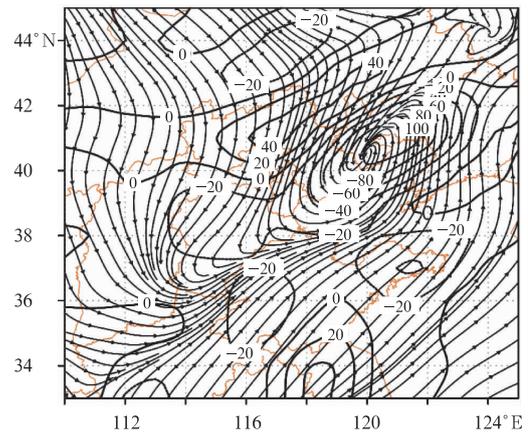


图6 2007年7月18日14时850 hPa流场和垂直速度场

(矢线为流线,实线、虚线为垂直速度 ω ,单位:Pa/s)

Fig. 6 Streamline and vertical velocity fields on 850 hPa at 14:00 BT 18 July 2007 (the line with arrows on it indicates the streamline, solid and dash lines show the vertical velocity in unit of Pa/s)

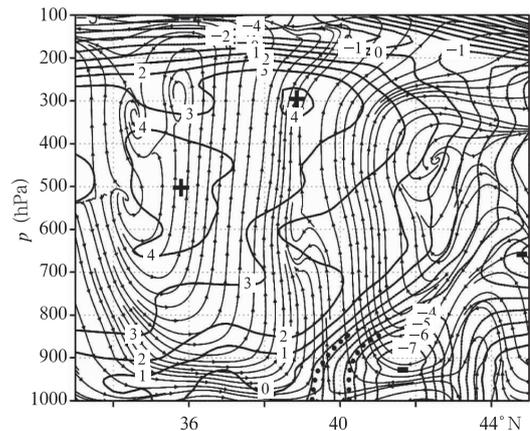


图7 2007年7月18日14时沿119°E经向环流和温度距平剖面

(矢线为 v 和 ω 合成的流线, ω 扩大100倍;点线表示低层新生的锋区;正负号分别为正负温度距平中心,单位:°C)

Fig. 7 Meridional cross section of the winds and the temperature anomaly along 119°E at 14:00 BT 18 July 2007 (the line with arrows on it indicate the streamline on the meridional cross section, ω is magnified 100 times, dot lines indicate the frontal zone, positive and negative signs show the positive and negative center of temperature anomaly (unit: °C), respectively)

沿 $M\alpha CS$ 西北侧的东北气流向西南方向扩散南下,与午后不断加强的低层西南暖湿气流之间形成强锋区,沿强锋区气旋性扰动和辐合也不断加强。值得注意的是,这支下沉冷出流范围不广,它以一条狭窄冷舌的形式沿云系外围向西南方向楔入,由此造成强锋区上对流单体向西南方向发展且以强锋区的西伸点为西界。

进一步,在图7剖面西侧2个经度($117^\circ E$)处给出经向环流和垂直速度剖面(图8),可以看到在($40^\circ-42^\circ N, 500\text{ hPa}$ 以下)范围内是一个明显的下沉运动区,与图7不同的是,没有明显的负温度距平区与该下沉运动区相配合(图略),这与前面分析的在涡旋环流西北侧低层的东北—西南向的冷区仅向西南方向伸展到 $117^\circ E$ 附近是一致的,它反映了 $M\alpha CS$ 的下沉冷出流只是出现在云系外围边缘,由于它偏东北倾斜向下,因此当它到达近地层的时候,与西南暖湿气流交汇在 $38^\circ N$ 附近,此处正是午后地面辐合线及强锋区发展的位置,这些分析结果与图5所表现出来的特征非常吻合。尽管冷暖气流的交汇只出现在浅薄的近地层,但是该下沉冷出流的形成加强了低层气流的辐合及其斜压性,使地面辐

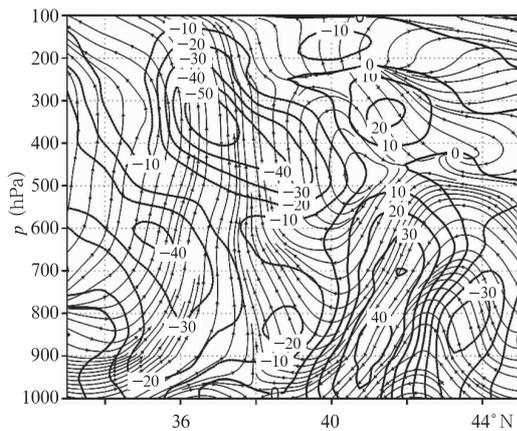


图8 2007年7月18日14时沿 $117^\circ E$ 经向环流和垂直速度剖面

(矢线为 v 和 ω 合成的经向流线, ω 扩大100倍; 实线、虚线为 ω , 单位: Pa/s)

Fig. 8 Meridional cross section of the winds and the vertical velocity along $117^\circ E$ at 14:00 BT 18 July 2007 (the line with arrows on it indicates the streamline on the meridional cross section, ω is magnified 100 times, solid and dashed lines show vertical velocity in unit of Pa/s)

合线上的气旋扰动加强,并很快形成 β 中尺度气旋 $C1, C2$ (注意 $C1, C2$ 出现的顺序,反映了冷出流运动的方向),其上空的对流运动也不断加强。注意到在强上升运动的南北两侧对流层中层有次级经向垂直环流出现,到20时(图略),随着地面辐合线的不断南压,强上升运动区也随之南压至 $36^\circ-37^\circ N$,正好位于济南上空(济南的纬度 $36.7^\circ N$),上升运动也明显加强,其南北两侧的次级经向垂直环流也不断加强并靠近强上升运动区。这种次级经向垂直环流能够加强和维持强上升运动,这在其他几个个案研究(廖移山等,2006,2008)中也出现过,20时以后,整个中尺度强对流系统在不断南压过程中仍维持了较长时间。

根据前面的分析,可以用图9来综合表达地面中尺度气旋 $C1(C2)$ 的发生发展过程。首先,在一个已经发展成熟的 $M\alpha CS$ 的 850 hPa 和地面上均可分析出明显的气旋环流 C ,并都有切变线(辐合线)与之配合。在东移发展过程中, $M\alpha CS$ 的左后侧(西北侧)出现下沉冷出流并有垂直环流 C_a 发展(位于西北—东南向剖面中),这支下沉冷出流在低层向偏西方向扩散南下(偏东北下沉冷出流),到达近地面层时形成一条狭窄的冷舌,它与午后不断加强的西南暖湿气流共同作用形成地面强锋区,强斜压性使地面辐合线上的气旋性扰动不断加强,并迅速新生出 β 中尺度气旋 $C1(C2)$,随着其上空对流上升运动的不断加强,在其南北两侧对流层中层有次级经向垂直环流 C_b, C_c (位于南—北向剖面中)出现,它对于加强和维持强上升运动具有重要作用。

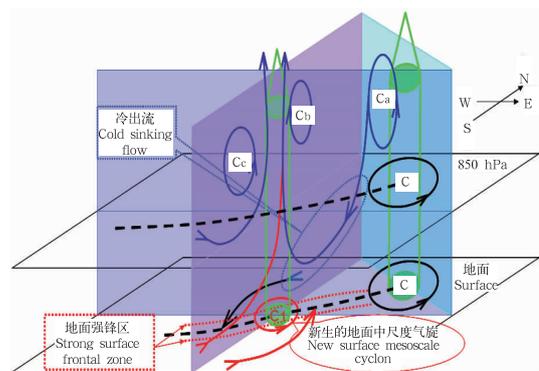


图9 地面中尺度气旋发展示意

Fig. 9 Demonstrative diagram for the development of surface mesoscale cyclone

4.2 C3、C4 新生发展的过程

由于 C3、C4 的发展最终对济南的强降水起到了非常重要的作用,因此有必要分析它们新生发展的过程。详细分析 2007 年 7 月 18 日 14 时地面流场和海平面气压场的分布(图 10a)可以看到,在地面辐合线的南侧靠近太行山东侧的区域,地面南风流场出现了明显的气旋性弯曲,它是午后随着地面南风的不断加强以及地面辐合线的不断南压,在山地东侧地形摩擦作用下强迫出现的绕流,与之相配合在太行山东坡上有一个 β 中尺度低压发展,低压倒槽线沿气旋性弯曲最大处向东北方向伸展,在它在地面辐合线的交汇处有低压扰动发展。

从红外云图上可以看到(图 3),此时沿地面辐合线发展起来的对流云团从太行山东坡开始迅速东移、南压,至 15 时(图 10b),地面辐合线移入气旋性

弯曲环流中,原位于太行山东坡的 β 中尺度低压东移进入华北平原,与之相配合,在流场上可以分析出一个比较完整的 β 中尺度气旋 C4,而原位于低压倒槽线与地面辐合线交汇处的低压扰动附近也新发展出一个 β 中尺度气旋 C3,在 C3、C4 以及它们之间的地面辐合线所覆盖的范围内是一个正在发展的、长轴方向与辐合线一致的对流云团,该云团在地面辐合线移入气旋性弯曲环流并与低压倒槽线交汇的过程中得到强烈发展,邢台站 14—16 时还出现了 117 mm 的短历时强降水。但随着 C3、C4 的新生发展,该 α 中尺度对流云团在 C4 的组织作用下逐步形成强的对流中心并快速东移,总体来看,与 C4 相伴的对流中心的移速要明显快于对流云团的移速,它最终对济南强降水的发展起到了很重要的作用。

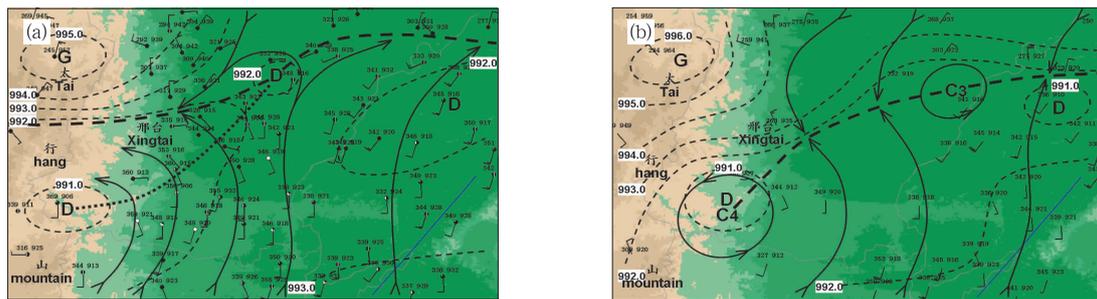


图 10 2007 年 7 月 18 日 14(a)、15(b)时地面形势

(矢线为流线,细虚线为等压线,粗虚线为辐合线,点线为低压倒槽线;D 表示低压,G 表示高压,C 表示气旋)

Fig. 10 Surface synoptic pattern at (a) 14:00 and (b) 15:00 BT 18 July 2007

(the line with arrows on it indicate the surface streamline, thin dashed line is the isobar, thick dashed lines show the convergence line, dot lines show the inverted trough line. D stands for low pressure, G for high pressure, and C with No. cyclones)

4.3 积云和雷达回波的并合发展过程

为了更详细分析济南强降水前后地面中尺度系统的活动特征,给出了 7 月 18 日 15—19 时 FY-2C 红外云图和地面风场、温度场的叠加图(图 11)。该图与图 3 一致,但局部进行了放大,并根据温度、气压、风场详细确定了地面 β 中尺度气旋的位置,通过与红外云图的叠加可以比较清楚地分析出气旋的移动和发展特征。15 时,当 C3 形成的时候,它与 C2 已相距很近,且各自位于两个快速靠近的 α 中尺度对流云团的东、西两端。

到 16 时,地面辐合线配合对流云带整体呈南压

的趋势,而中尺度气旋在随辐合线南压的同时又沿着辐合线东移,此时两个 α 中尺度对流云团已经连接在一起,同时 β 中尺度气旋 C2 开始强烈发展,这从其影响范围内对流云团的强烈发展可以得到证实;进一步分析济南的雷达资料还可以发现,从 14 时开始,在上述两个 α 中尺度对流云团之间不断有小的回波单体形成并组织成一条东西向的窄带将两个对流云团连接起来(图 12a),宛若一座空中的云桥,随着 β 中尺度气旋 C3 的形成及快速东移,整个对流回波系统都得到迅速发展(图 12b)。

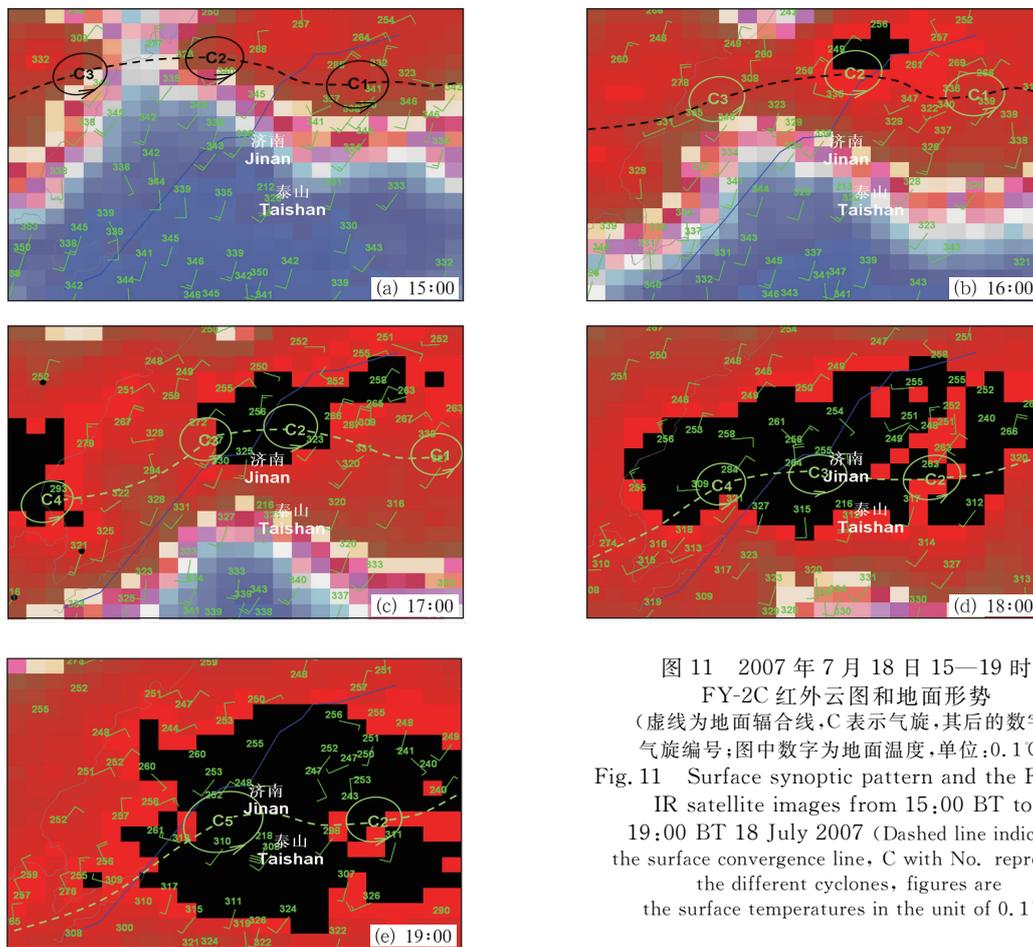


图 11 2007 年 7 月 18 日 15—19 时
FY-2C 红外云图和地面形势
(虚线为地面辐合线,C 表示气旋,其后的数字为
气旋编号;图中数字为地面温度,单位:0.1°C)
Fig. 11 Surface synoptic pattern and the FY-2C
IR satellite images from 15:00 BT to
19:00 BT 18 July 2007 (Dashed line indicates
the surface convergence line, C with No. represents
the different cyclones, figures are
the surface temperatures in the unit of 0.1°C)

到 17 时,C3、C2 继续随地面辐合线南压东移,同时分别从西北和东北两个方向逼近济南,此时两个 β 中尺度气旋已经相距很近,在它们影响、活动的区域范围内对流云团开始迅猛发展并组织形成一个强的对流中心;从此时的雷达回波(图 12c)上也可以清楚地看到,原来与 C3、C2 相对应的强回波此时已合并发展成一个中心强度达到 57 dBz 的密实的强回波团;有一个值得注意的现象,此时在济南上空及其西南、东南侧有一条近东北—西南走向的回波带,其中心强度达到 53 dBz,追溯其发展过程(图略)发现,大约从 16 时开始,在雷达站西南方约 80 km 范围内不断有回波单体发生并在向东北方向移动的过程中迅速发展成强回波带,分析此期间雷达的径向速度可以发现(图略),这一新生发展的强回波带一直处于西南(暖湿)气流中,值得注意的是,在西南气流中不断有范围很小的急流中心向雷达站移动,这可能是一种 β 中尺度超低空急流(最低可在

200 m 上空见到 24 m/s 的风),强辐合在低层暖区中迅速发展,但回波中一直没有降水发生;此时在太行山东坡形成的 β 中尺度气旋 C4 沿地面辐合线快速东移并不断发展。

到 18 时,C3 继续向东南方向移动进入济南上空,地面辐合线整体向南移到了济南的南面,C2 沿辐合线东移远离济南,而 C4 则快速东移靠近 C3,两个强对流中心在并合后再次得到猛烈发展;从雷达回波的演变可以更清楚地看到,17 时以后济南北面的强回波团随地面辐合线迅速南压,并与济南上空的强回波带并合发展,随即产生强降水;18 时左右(图 12d),随着 C4 的快速东移,其前方不断有回波单体移入济南上空,再次出现回波并合,它促使降水强度达到极值,18 时—18 时 20 分,20 min 内雨量达到 55 mm,随后大于 45 dBz 的强对流回波区迅速向南移出济南,降水强度开始减弱。

到 19 时,地面辐合线继续南移,C4 东移后与

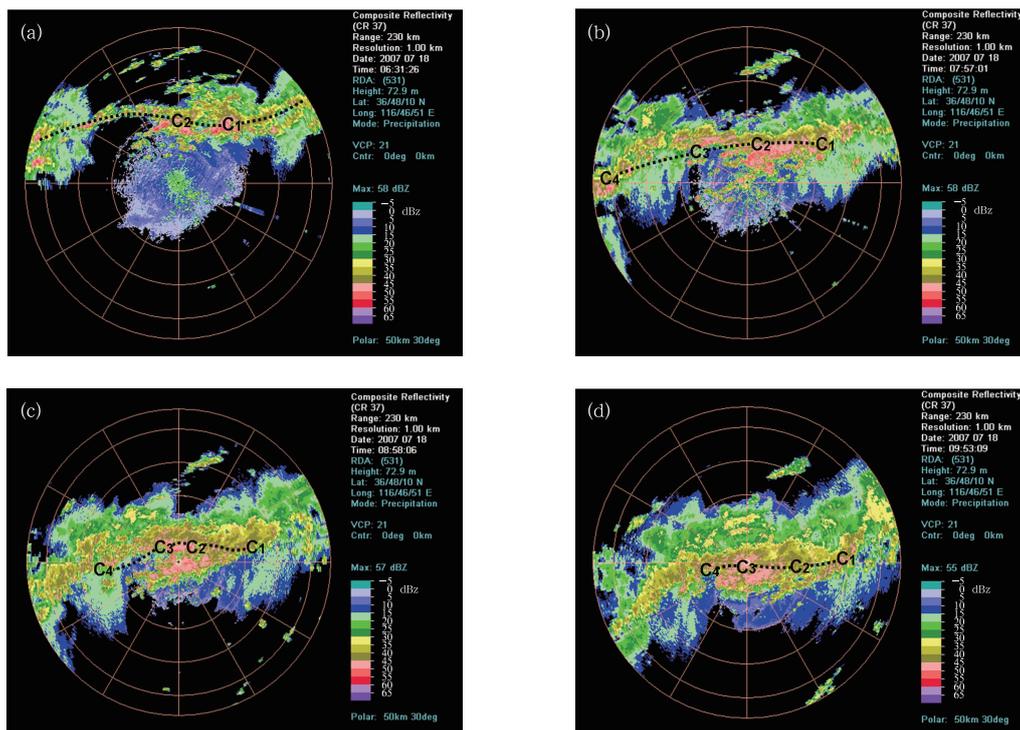


图12 2007年7月18日14时31分26秒(a)、15时57分01秒(b)、
16时58分06秒(c)、17时53分09秒(d)济南雷达回波

Fig. 12 Radar echos at Jinan at 14:31:26 (a), 15:57:01 (b),
16:58:06 (c) and 17:53:09 (d) BT 18 July 2007

C3 合并成一个范围比原先略大的 β 中尺度气旋 C5, 对流云团依然很强盛, 但雷达回波显示, 此时济南已经位于小于 35 dBZ 的层状回波区中, 强对流回波区在 C4 与 C3 合并成 C5 的过程中已经远离济南, 注意到泰山站的南风突然由 8 m/s 加大到 14 m/s, 这可能表明随着中气旋 C5 的形成、加强, 其东南侧的偏南风在边界层中有一个明显加强的过程, 此时与 C5 相联系的强对流回波区中仍然维持着强降水。

从前面的分析可以看出, 在这次强降水过程中共经历了如下几个积云并合过程:

- (1) 12—13 时, γ 中尺度对流单体并合发展成 β 中尺度对流云团;
- (2) 14—15 时, β 中尺度对流云团并合发展成 α 中尺度对流云团;
- (3) 16—17 时, 2 个 α 中尺度对流云团并合发展成 1 个具有多个强中心的中尺度对流系统;
- (4) 18—19 时, 中尺度对流系统内强中心并合发展。

在积云并合过程中, 地面 β 中尺度气旋异常活

跃:

在过程(1)中, 伴随着 β 中尺度气旋的新生发展 (C1、C2);

在过程(2)中, α 中尺度对流云团往往都由 1 个以上的 β 中尺度气旋组织而成 (C1、C2、C3、C4);

在过程(3)中, 不同 α 中尺度对流云团中的 β 中尺度气旋在遭遇时使对流强烈发展 (C2、C3);

在过程(4)中, 同样也是 β 中尺度气旋的遭遇、合并 (C3、C4、C5)。

需要重点关注的是, 17—19 时, 地面上先后有 4 个 β 中尺度气旋影响到了济南 (C2、C3、C4、C5), 对流中心也得到多次发展、加强, 对流降水在这期间发展非常强盛。在 17—20 时济南每 10 min 的降水直方图 (图 13) 中可以看到, 最强降水出现在 17 时 30 分—18 时 30 分, 1 h 降水量达到 104.3 mm, 雨势非常强烈, 随后一个小时降水量仍达到 29.6 mm。付丹红 (2007) 在研究北京一次强对流天气过程中根据雷达回波分析了积云的并合过程, 整个形成过程也经历了从单体并合、积云团并合和强中心并合的多尺度并合过程, 与本例的积云并合过程极为相似,

该文献还用数值模式详细模拟了积云并合过程中云内气流的变化及其物理机制,研究结果表明云的并合过程可导致区域降水增加,而强中心的并合过程可以显著提高降水,这对本个例及此类个例研究有重要的启发意义。

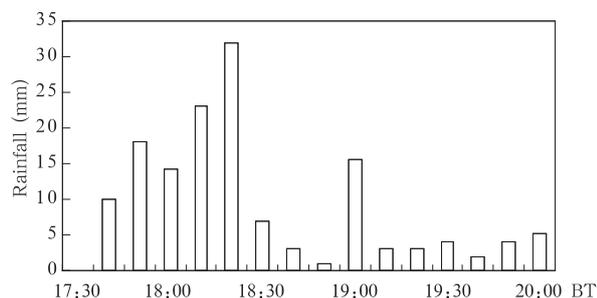


图 13 2007 年 7 月 18 日 17 时 30 分—20 时
济南每 10 分钟降水直方图

Fig. 13 Histogram for the observed 10-minute
accumulative rainfall in Jinan
from 17:30 to 20:00 BT 18 July 2007

5 结 论

通过对“7.18”济南大暴雨的 β 中尺度分析,可以得到以下几点结论:

(1) 此次强降水过程是在东北冷涡切变、西南低空急流等主要系统影响下造成的,有利的大气环流背景与动力结构配置为中尺度系统的发展和强降水的发生提供了充足的条件。

(2) 在一个已经发展成熟的 $M\alpha CS$ 的左后侧出现的下沉冷流出在低层向偏西方向扩散南下,到达地面层时形成一条狭窄的冷舌,它与午后不断加强的西南暖湿气流共同作用增强了地面的斜压性,从而使地面辐合线上的气旋性扰动加强,并迅速新生出 β 中尺度气旋,随着其上空对流上升运动的不断加强,在其南北两侧对流层中层产生的次级经向垂直环流能进一步加强和维持强上升运动。

(3) 多尺度积云并合对此次强降水形成起到了非常重要的作用。并合过程共经历了 4 个阶段: γ 中尺度对流单体并合发展成 β 中尺度对流云团、 β 中尺度对流云团并合发展成 α 中尺度对流云团、两个 α 中尺度对流云团并合发展成一个具有多个强中心的中尺度对流复合系统、中尺度对流复合系统内强中心并合发展。

(4) 在积云并合过程中,地面 β 中尺度气旋异常活跃,它们既是 β 中尺度对流云团的组织者,同时也是 α 中尺度对流云团的组成者。 γ 中尺度对流单体并合发展成 β 中尺度对流云团往往伴随着 β 中尺度气旋的新生发展,而 α 中尺度对流云团往往都由一个以上的 β 中尺度气旋组织而成,当 β 中尺度气旋出现遭遇、合并之时对流云团和强降水得以强烈发展。

(5) 在济南强降水发生前的 1 个多小时,其西南方边界层内不断有 β 中尺度超低空西南急流出现,它促使这一区域内不断有回波单体发生并在向东北方向移动的过程中迅速发展成强回波带,当济南北面的强回波南移与这一强回波带并合后快速发展产生强降水。

致谢:武汉中心气象台张家国高工对本文的雷达分析部分给予了指导,在此表示感谢。

参 考 文 献

- 程麟生,冯伍虎. 2003. “98.7”暴雨 β 中尺度低涡生成发展结构演变:双向四重嵌套网格模拟. 气象学报, 61(4):385-395
- 陈敏,陶祖钰,郑永光等. 2007. 华南前汛期锋面垂直环流及其与中尺度对流系统的相互作用. 气象学报, 65(5):785-791
- 付丹红,郭学良. 2007. 积云并合在强对流系统形成中的作用. 大气科学, 31(4):635-644
- 高守亭,孙建华,崔晓鹏. 2008. 暴雨中尺度系统数值模拟与动力诊断研究. 大气科学, 32(4):854-866
- 何立富,陈涛,湛芸等. 2006. 大气探测资料在中尺度暴雨中的分析和应用. 应用气象学报, 17(增):88-97
- 胡伯威,崔春光,房春花. 2001. 1998年7月21—22日鄂东沿江连日特大暴雨成因探讨. 大气科学, 25(4):479-491
- 江晓燕,倪允琪. 2005. 一次梅雨锋暴雨过程的 β 中尺度对流系统发展机理的数值研究. 气象学报, 63(1):77-92
- 姜勇强,王昌雨,张维桓等. 2003. 台风倒槽内 β 中尺度低涡及特大暴雨的数值模拟. 气象学报, 61(3):312-322
- 廖移山,张兵,李俊等. 2006. 河南特强暴雨 β 中尺度流场发展机理的数值模拟研究. 气象学报, 64(4):500-509
- 廖移山,李俊,闵爱荣等. 2008. 一次暴雨过程的数值模拟分析. 高原气象, 27(3):558-566
- 潘玉洁,赵坤,潘益农. 2008. 一次强飑线内强降水超级单体风暴的单体多普勒雷达分析. 气象学报, 66(4):621-636
- 孙淑清,周玉淑. 2007. 近年来我国暴雨中尺度动力分析研究进展. 大气科学, 31(6):1171-1188
- 王建捷,李泽椿. 2002. 1998年一次梅雨锋暴雨中尺度对流系统的模拟与诊断分析. 气象学报, 60(2):146-155
- 王智,翟国庆,高坤. 2003. 长江中游一次 β 中尺度低涡的数值模拟. 气象学报, 61(1):66-77
- 吴庆丽,陈敏,王洪庆等. 2002. 暴雨雨团 β 中尺度流场结构的数值模

- 拟. 科学通报, 47(18):1437-1440
- 杨芙蓉, 尹承美, 卓鸿. 2007. 济南市“7.18”大暴雨雨情与灾情. 暴雨灾害, 26(4):381-382
- 尹承美, 杨芙蓉, 刘爱梅等. 2008a. 济南市“7.18”大暴雨成因的中尺度分析. 山东气象, 27(4):14-18
- 尹承美, 卓鸿, 胡鹏等. 2008b. FY-2 产品在济南“7.18”大暴雨临近预报中的应用. 气象, 34(1):27-34
- 赵思雄. 1998. 中尺度动力学与暴雨等灾害性天气预测理论的研究. 大气科学, 22(4):503-510
- 赵玉春, 李泽椿, 王叶红等. 2008. 2006年6月5—8日梅雨锋上中尺度对流系统引发福建北部暴雨的诊断分析. 大气科学, 32(3):598-614
- 周海光, 张沛源. 2005. 一次局地大暴雨三维风场的双多普勒雷达探测研究. 大气科学, 29(3):372-386
- Chen S J, Wang W, Lau K H, et al. 2000. Mesoscale convective systems along the Meiyu front in a numerical model. Meteor Atmos Phys, 75:149-160
- Nachamkin J E, McAnelly R L, Cotton W R. 2000a. Interactions between a developing mesoscale convective system and its environment. Part I: Observational analysis. Mon Wea Rev, 128:1205-1224
- Nachamkin J E, Cotton W R. 2000b. Interactions between a developing mesoscale convective system and its environment. Part II: Numerical Simulation. Mon Wea Rev, 128:1225-1244
- Orlanski I. 1975. A rational subdivision of scales for atmospheric processes. Bull Amer Meteor Soc, 56:527-530
- Yamada H, Geng B, Reddy K K. 2003. Three-dimensional structure of a mesoscale convective system in a baiu-frontal depression generated in the downstream region of the Yangtze River. J Meteor Soc Japan, 81(5):1243-1271