

王啸华, 吴海英, 唐红昇, 等. 2009年7月7日南京短时暴雨的中尺度特征分析[J]. 气象, 2012, 38(9): 1060-1069.

# 2009年7月7日南京短时暴雨的中尺度特征分析<sup>\*</sup>

王啸华<sup>1,2</sup> 吴海英<sup>2</sup> 唐红昇<sup>3</sup> 喜 度<sup>2</sup>

1 南京大学大气科学学院, 南京 210093

2 江苏省气象台, 南京 210008

3 江苏省气象科技服务中心, 南京 210008

**提 要:** 利用 FY-2C 卫星红外辐射亮度温度( $T_{BB}$ )资料、多普勒天气雷达资料、加密自动站资料、NECP 再分析资料、常规观测资料对 2009 年 7 月 7 日发生在南京地区的一次短时大暴雨过程的中尺度特征进行分析, 结果表明: 在有利的天气尺度背景形势下, 多个中尺度对流系统在南京地区合并, 合并后的中尺度对流系统强度强, 移速慢, 造成了南京地区的强降水。这次短时暴雨的中尺度特征在云图  $T_{BB}$  资料上表现为对流云团合并后强度和范围显著增强, 移速缓慢,  $T_{BB}$  梯度大值区在南京地区停留; 在地面风场上体现为南移的中尺度辐合线与南京地区局地生成的中尺度辐合中心合并, 使得地面风场辐合显著增强; 在雷达回波上表现为, 南京地区上空不断有对流单体并入形成大面积高效率降水回波, 镶嵌其中的  $\gamma$  尺度对流单体沿着相同方向依次通过南京地区。分析中还发现, 低空急流、低空切变线是这次短时暴雨天气过程的重要影响系统, 利用多普勒雷达资料可以识别和分析它们的发展、变化特征, 为短时暴雨的临近预报提供依据。

**关键词:** 中尺度对流系统, 对流云团, 地面辐合线, 低空急流, 低空切变线

## Mesoscale Characteristic Analysis on a Short-Time Torrential Rain in Nanjing on 7 July 2009

WANG Xiaohua<sup>1,2</sup> WU Haiying<sup>2</sup> TANG Hongsheng<sup>3</sup> XI Du<sup>2</sup>

1 School of Atmosphere Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093

2 Jiangsu Meteorological Observatory, Nanjing 210008

3 Jiangsu Meteorological Science and Technology Service Centre, Nanjing 210008

**Abstract:** Based on  $T_{BB}$  data, Doppler radar, AWS data, NCEP data and conventional observation data, the mesoscale convective system which caused the short-time torrential rain in Nanjing on July 7, 2009 is studied. The results show that under the favorable weather background situation, multiple mesoscale convective systems merged in Nanjing, and produced a new mesoscale convection system, which has strong convection and moving slowly, thus caused a short-time torrential rain. The short-time torrential rain's mesoscale characteristics reflected in  $T_{BB}$  data are that the convective clouds after merging intensified and low temperature region obviously increased, moving slowly. The big value area of  $T_{BB}$  gradient stayed in Nanjing for a long time. The mesoscale characteristics reflected in the surface wind field are that the combination of the southward ground wind convergence line and the convergence center locally generated in Nanjing caused the surface convergence obviously increased. The mesoscale characteristics reflected in radar data are that the convergence in Nanjing obviously increased which is caused by the convective cell continuously merged, high precipitation efficiency of low centroid multi-cell storm and the mesoscale cells passing by Nanjing along the same direction. Additionally, the shear line and the low-level jet stream are

\* 江苏省气象局科研开放基金项目“中尺度分析技术方法研究”和江苏省气象局青年基金项目“城市边界层过程对南京市夏季强降水的影响”共同资助

2011年5月9日收稿; 2012年3月1日收修定稿

第一作者: 王啸华, 主要从事强对流天气预报、雷达资料应用等研究. Email: njbocai@163.com

the important influence system of the he short-time torrential rain. Using Doppler radar may identify and analyze this development, and lay the basis of the short-time torrential rain's nowcasting.

**Key words:** mesoscale convective system, convective clouds short-time torrential, ground wind convergence line, low-level jet stream, low-level shear line

## 引言

中尺度天气系统是直接造成暴雨的天气系统,它的水平尺度在几十至几百千米之间,生命期几个小时。其地面辐合量级为  $10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ,降水强度可达到或超过  $10 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ,几个小时的连续降水就可以造成暴雨。对暴雨过程中尺度天气系统的研究一直是气象工作者关注的课题之一。陶诗言<sup>[1]</sup>先生指出:中尺度天气系统对暴雨有两个作用,一是可直接造成强烈暴雨,二是中尺度气系统对积云对流活动有明显的组织和增强作用。近年来,随着各种非常规观测资料的应用和中尺度数值模式的发展,在中尺度天气系统的研究方面取得了很大进展。通过数值模拟,程麟生等<sup>[2]</sup>发现特大暴雨与700 hPa上 $\beta$ 中尺度低涡的生成和强烈发展直接关联。蒙伟光等<sup>[3]</sup>对华南暴雨中尺度对流系统的形成及湿位涡进行分析;陈敏等<sup>[4]</sup>研究了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。牟容等<sup>[5]</sup>利用四维变分同化方法反演风场,研究了强对流天气的发展机制;周海光等<sup>[6]</sup>利用双多普勒雷达风场反演结果对台风外围螺旋雨带的中尺度结构特征进行了研究。曹春燕等<sup>[7]</sup>、张京英等<sup>[8]</sup>、刘淑媛等<sup>[9]</sup>分别利用风廓线资料研究了低空急流脉动与强降水之间的关系。夏文梅等<sup>[10]</sup>分析研究了低空急流的单多普勒速度特征。综合利用非常规观测资料,郑媛媛等<sup>[11]</sup>、林宗贵等<sup>[12]</sup>分别对发生在淮河流域和广西地区的暴雨过程进行分析,指出后向传播机制使得造成暴雨的中尺度对流系统移动缓慢、生命力持久。陈明轩等<sup>[13]</sup>对北京地区的一次暴雨进行分析,发现北京西南部的移入雷暴与新生成的雷暴合并加强,造成强降水;何群英等<sup>[14]</sup>对发生在天津地区的一次暴雨进行分析,发现地面中尺度辐合线增强了地面的辐合抬升,是造成大暴雨的中尺度系统和触发条件。周宏伟等<sup>[15]</sup>对苏北东部地区一次强梅雨锋大暴雨过程进行诊断分析,揭示了暴雨过程中不同尺

度系统的特征。另外,许爱华等<sup>[16]</sup>对江西8种强对流天气形势与云型特征进行分析,提炼了引发强对流天气的中尺度对流云带(团)发生发展的典型云型特征。苗爱梅等<sup>[17]</sup>通过山西5次横切变暴雨的对比分析,发现水汽锋区走向与中低层切变线走向基本一致,且稳定性暴雨过程比强对流暴雨过程水汽锋区形成时间有更多的提前量。姚晨等<sup>[18]</sup>对滁州地区不同类型大暴雨过程进行对比分析,发现两次过程中都有次级环流的存在,作用方式有所不同,对高低空系统都有加强作用。然而,迄今为止,对造成暴雨的中尺度系统的发生、发展及移动变化规律等尚有许多缺乏客观认识的方面,在对非常规资料的应用和中尺度数值模式的资料同化方面还值得进一步研究。

南京属于暴雨的多发地区,尤其是在梅雨期间暴雨过程频发,降水强度较强,分布不均匀,暴雨的中尺度特征明显。本文利用FY-2C卫星红外辐射亮度温度( $T_{\text{BB}}$ )资料、地面自动站资料、多普勒天气雷达资料、NECP再分析资料以及常规观测资料对2009年7月7日发生在江苏西南部地区的一次局地大暴雨过程进行分析,研究导致这次强降水的中尺度系统被不同观测资料所“捕捉”到的物理图像特征,加深对该地区中尺度系统的认识,探索这种突发性、局地性很强的大暴雨在短时临近预报中着眼点。

## 1 降水实况

2009年7月7日江苏西南部地区出现了一次短时暴雨过程,02—14时,南京、句容、丹阳三站降水超过100 mm,南京主城区9个自动站降水超过100 mm,最大的光华东街自动站降水达到151.2 mm。强降水集中出现在05—11时,南京站最大雨强为09—10时的51.3 mm(图1)。这次暴雨过程具有明显的突发性和局地性,中尺度特征明显,受其影响南京市出现大面积积水,部分小区被淹,交通接近瘫痪;郊区26个街镇被淹,3.4×

$10^4 \text{ hm}^2$  农田积水。短时间内降水强度之大,历史罕见。

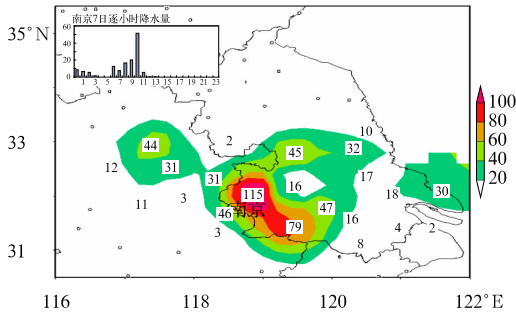


图1 2009年7月7日02—14时降水分布实况  
Fig.1 Observational 12 h precipitation over Nanjing area from 02:00 BT to 14:00 BT 7 July 2009

## 2 环流形势演变特征和主要影响天气系统

### 2.1 环流形势演变特征

在这次暴雨过程前期,500 hPa 高度在  $50^\circ \sim 70^\circ \text{N}$  维持两槽一脊的形势,阻塞高压稳定于贝加尔湖西北方向,副热带高压脊线在  $22^\circ \text{N}$  左右,588 线北界在  $30^\circ \text{N}$  附近摆动,江苏处于副热带高压西北侧的西南暖湿气流中,属于典型梅雨期环流形势。7月6日08时开始贝加尔湖东侧低压槽发展加深,在  $50^\circ \text{N}$  附近形成冷涡(图2),其中心逐渐向东南方向移动,7日08时槽线尾部一直延伸到江淮流域,冷空气沿槽后西北气流扩散南下,受其影响,6日20时至7日08时副热带高压明显减弱南退。

### 2.2 $\beta$ 中尺度影响天气系统

在高层冷空气沿槽后西北气流迅速南下的同时,江苏西南部上空的低空急流迅速发展加强。7日08时南京探空资料显示500 hPa 对流层中层已经转为西偏北风,而700 hPa 以下对流层低层仍然是西南风,且风速较大,达到  $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的急流强度。强盛的低空急流建立起一条贯通南北的水汽通道,将源自孟加拉湾的水汽沿副热带高压西北侧输送到江淮流域,6日20时至7日08时在江苏的西南部以及安徽大别山地区形成了平均水汽通量值超过  $0.16 \text{ g} \cdot (\text{s} \cdot \text{hPa} \cdot \text{cm})^{-1}$  的大值区(图略)。同

时这种高空低槽的前倾配置使得大气层结不稳定能量得到了聚集,7日02时江苏西南部已经出现了CAPE值大于  $1500 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$  的位势不稳定高能区(图3)。7日08时850 hPa 在江淮之间南部出现了一条西北风与西南风的切变线。陶诗言<sup>[1]</sup>指出“暴雨的生成除了需要充沛的水汽和暖湿的不稳定大气层结,还需要强烈的低空辐合来加速垂直环流,使大量暖湿空气得到抬升产生降水。”而随着低层冷空气的南下,6日20时以后自北向南移动的低空切变线使得这一条件得到满足。另外在低空切变线附近形成的低空水平辐合场使得暴雨区水汽有集中的趋势,为暴雨的发生提供充足的水汽。

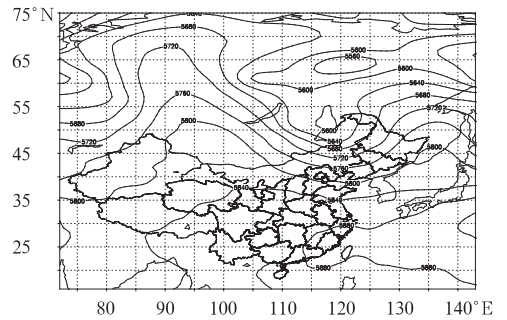


图2 2009年7月6日08时500 hPa 高度场  
Fig.2 The 500 hPa geopotential heights at 08:00 BT 6 July 2009

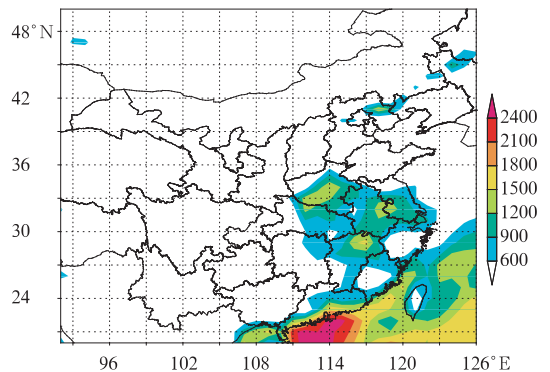


图3 2009年7月7日02时CAPE值分布图  
(单位:  $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ )

Fig.3 The field of CAPE at 02:00 BT 7 July 2009 (unit:  $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ )

### 2.3 地面中尺度辐合系统

低层冷空气的南下在低空表现为自北向南移动的切变线,在地面又以怎样的形式表现呢?地面加密自动站资料显示,7日05时,地面流场上存在一

条明显的辐合线 L,在其附近出现了 3 个中尺度雨团(由一些小尺度的对流性降水细胞所组成的雨团,雨强大于  $10 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ )(图 4a), 7 日 07 时,风场辐

合线 L 向南移动,同时在南京地区局地生成一个中尺度的风场辐合中心 M,原先的 3 个中尺度雨团逐渐合并形成了一条西北—东南向的中尺度对流雨带

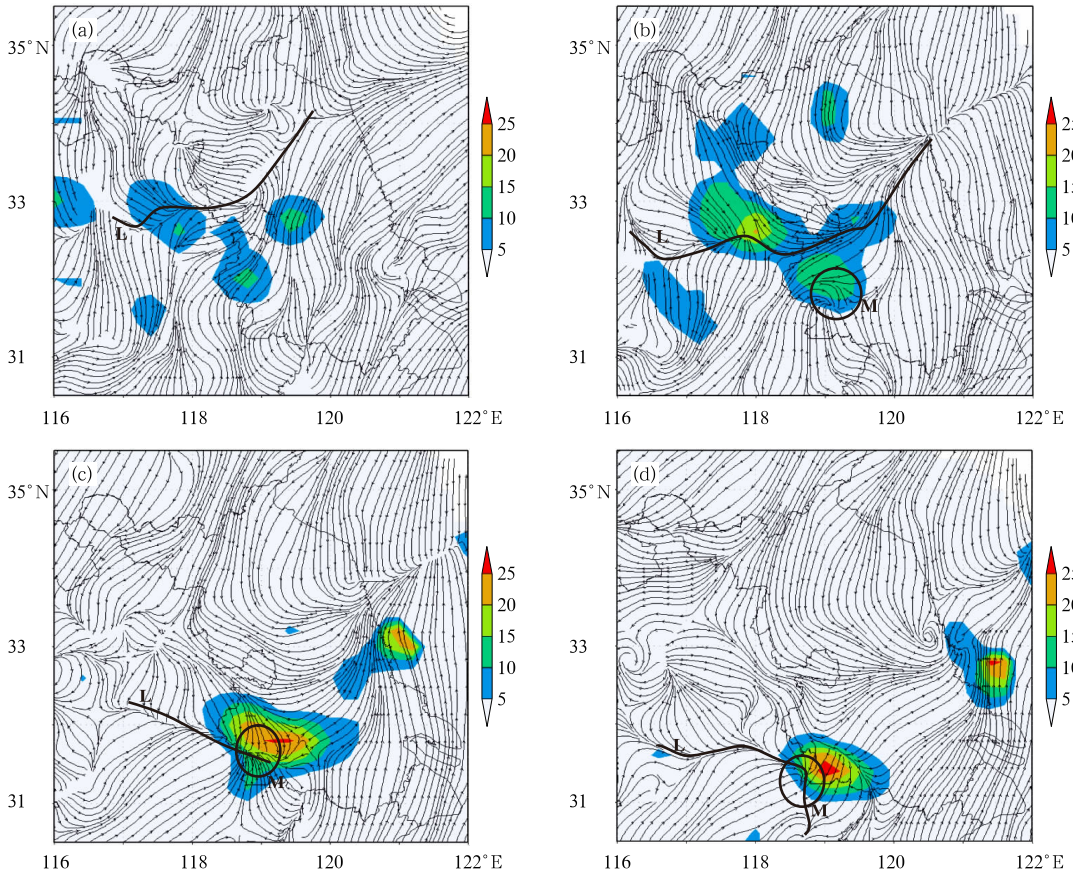


图 4 2009 年 7 月 7 日 05 时(a), 07 时(b), 09 时(c)和 11 时(d)地面风场流线和 1 小时降水量 (色斑表示降水量)

Fig. 4 Surface wind field streamline and observational 1 h precipitation on 7 July 2009 at 05:00 BT (a), 07:00 BT (b), 09:00 BT (c) and 11:00 BT (d)

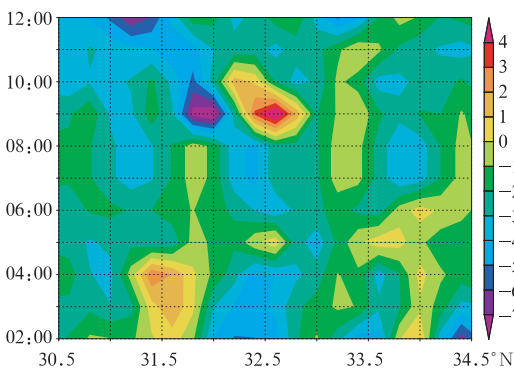


图 5 2009 年 7 月 7 日沿  $118.7^\circ\text{E}$  地面散度场时间-经度剖面 [单位:  $\text{m} \cdot (\text{s} \times 1^\circ)^{-1}$ ]

Fig. 5 The time-latitude cross section of surface wind divergence along longitude  $118.7^\circ\text{E}$  on 7 July 2009 [unit:  $\text{m} \cdot (\text{s} \times 1^\circ)^{-1}$ ]

(图 4b),雨强明显增强。7 日 09 时,中尺度辐合中心 M 与南压的风场辐合线 L 的右端合并,此时在南京地区形成了降水效率极高的中尺度对流雨带,雨量中心 1 小时降水超过  $25 \text{ mm}$ (图 4c)。7 日 11 时,随着中尺度的风场辐合中心 M 和 风场辐合线 L 继续南压,中尺度对流雨带也逐步移出南京地区(图 4d)。

为分析地面中尺度系统演变过程中地面风场辐合强度的变化情况,沿  $118.7^\circ\text{E}$  作地面散度场的时间-经向剖面(图 5),05 时以后散度值低于  $-3 \text{ m} \cdot (\text{s} \times 1^\circ)^{-1}$  的低值区随着中尺度辐合线向南移动,09 时,南移的中尺度辐合线与南京地区局地生成的中尺度辐合中心发生合并,在  $32^\circ\text{N}$ (南京地区所在纬度)附近,辐合中心散度出现了小于  $-7 \text{ m} \cdot (\text{s} \times 1^\circ)^{-1}$  的

极小值,地面风场辐合显著增强。10 时以后散度值低于  $-3 \text{ m} \cdot (\text{s} \times 1^\circ)^{-1}$  的低值区辐合中心继续南移,地面风场辐合强度有所减弱。

以上分析表明,中尺度雨团的演变过程与地面中尺度辐合系统演变过程有着很好的对应。此次暴雨过程具有的局地性和突发性等中尺度特征,是地面中尺度辐合系统造成的。南移的中尺度辐合线与南京地区局地生成的中尺度辐合中心合并,使得地面风场辐合显著增强,有利于直接造成南京地区强降水的中尺度对流系统进一步加强和维持。

### 3 $\beta$ 中尺度对流云团演变特征分析

中尺度对流云团是中尺度对流系统在卫星云图上的表现。利用 FY-2C 卫星红外辐射亮度温度 ( $T_{\text{BB}}$ ) 资料分析南京地区这次强降水过程。探测表明,06 时,南京地区有一  $T_{\text{BB}}$  值低于  $-52^\circ\text{C}$  的中尺度

对流云团(A),同时在地面辐合线的西端有  $T_{\text{BB}}$  值低于  $-32^\circ\text{C}$  的西北—东南向带状中尺度对流云团(B)生成。对流云团 A 原地发展,而对流云团 B 则向东南方向移动。07 时,对流云团 A、B 强度都有迅速发展,  $T_{\text{BB}}$  值分别下降到  $-62^\circ\text{C}$  和  $-52^\circ\text{C}$  以下。08 时,随着南移的地面辐合线与地面中尺度辐合中心的合并,对流云团 B 并入对流云团 A,地面系统的合并加强了地面的风场辐合,使得影响南京的对流系统进一步加强,形成了西北—东南向宽带状分布的 MCS。合并后带状 MCS 的北端对流快速减弱。而其南端对流进一步加强,云顶温度  $T_{\text{BB}}$  低于  $-62^\circ\text{C}$  的范围显著扩大,09 时, MCS 已经由带状演变成团状,之后 MCS 转为向西南方向缓慢移动,11 时以后逐渐移出江苏。

分析得到,06 时在对流云团 A 的北侧和对流云团 B 的东侧分别出现雨强大于  $10 \text{ mm}$  的中尺度雨团,随后两雨团雨强持续增强,随着对流云团 B 并

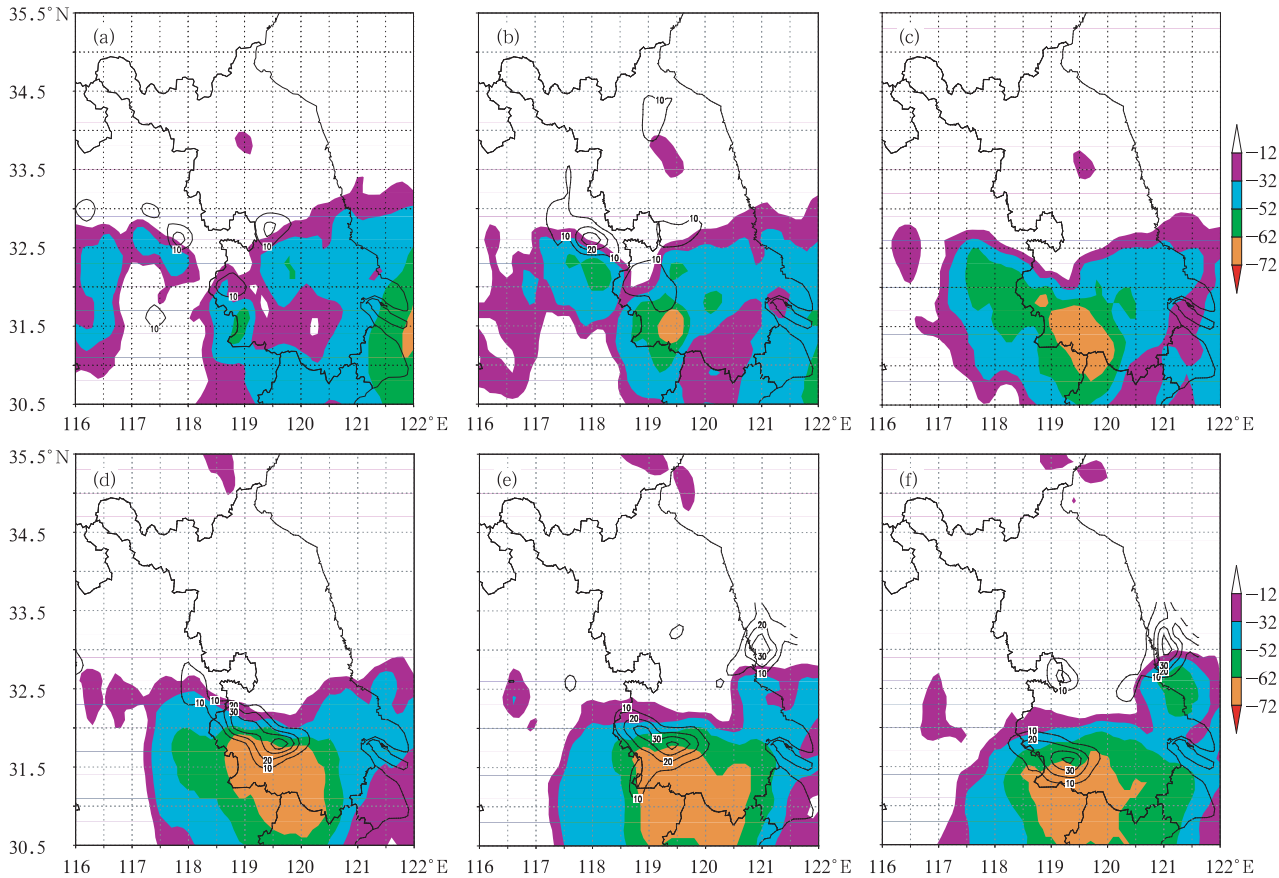


图 6 2009 年 7 月 7 日 06 时(a),07 时(b),08 时(c),09 时(d),10 时(e)和 11 时(f)  $T_{\text{BB}}$  (色斑)和 1 小时降水量(等值线)

Fig. 6  $T_{\text{BB}}$  and observational 1 h precipitation on 7 July 2009

at 06:00 BT (a), 07:00 BT (b), 08:00 BT (c), 09:00 BT (d), 10:00 BT (e), and 11:00 BT (f)

入对流云团 A,中尺度雨团也发生合并。09 时已在南京地区形成一条西北—东南向中尺度雨带,雨强最大值达到 40 mm 以上,之后雨带逐渐转为东西走向,雨带整体随着合并后的对流云团缓慢南压。由于 MCS 在高空向暖区倾斜,在其上风方向  $T_{BB}$  梯度的大值区是中低层对流比较旺盛的地区,整个过程中强降水区出现在对流云团  $T_{BB}$  梯度的大值区,中尺度雨团随着  $T_{BB}$  梯度的大值区移动。雨强的增强与梯度值的变化一致,这一点从南京站单点的  $T_{BB}$  梯度值随时间的变化可以证实(图 7),也与陈晓红等<sup>[19]</sup>利用  $T_{BB}$  场分析 2007 年淮河流域特大暴雨所指出的“TBB 梯度大值区在某地长时间维持将产生长时间强降水”的结论一致。

以上分析表明:两个中尺度对流云团迅速发展并在南京地区合并,合并后的对流云团对流强度和范围显著增强,移动速度缓慢,使得较强的  $T_{BB}$  梯度大值区在南京地区上空出现了停留,导致了强降水的发生。

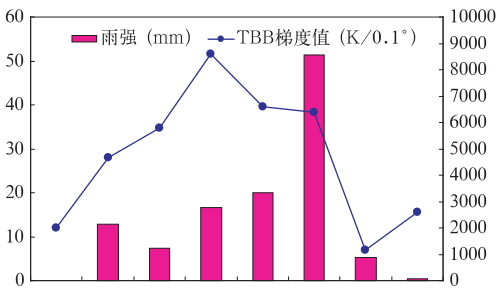


图 7 2009 年 7 月 7 日 05—12 时南京站单点逐时  $T_{BB}$  梯度值和雨强

Fig. 7  $T_{BB}$  gradient and observational 1 h precipitation from 05 BT to 12 BT 7 July 2009

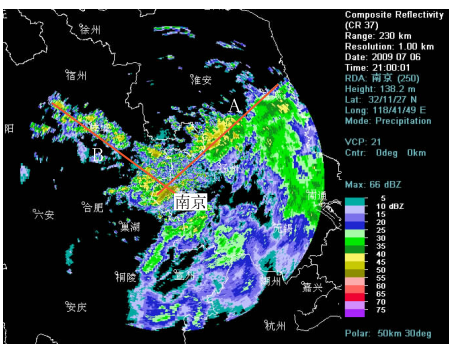


图 8 2009 年 7 月 7 日 05 时南京雷达组合反射率图

Fig. 8 The composite reflectivity detected by Nanjing radar at 05:00 BT 7 July 2009

## 4 中尺度对流风暴的雷达回波演变和特征分析

### 4.1 雷达回波演变情况

中尺度对流风暴或中尺度对流系统泛指具有旺盛对流运动的中尺度天气系统。分析雷达回波的演变过程可以看到,7 日 02 时开始随着低空切变线的

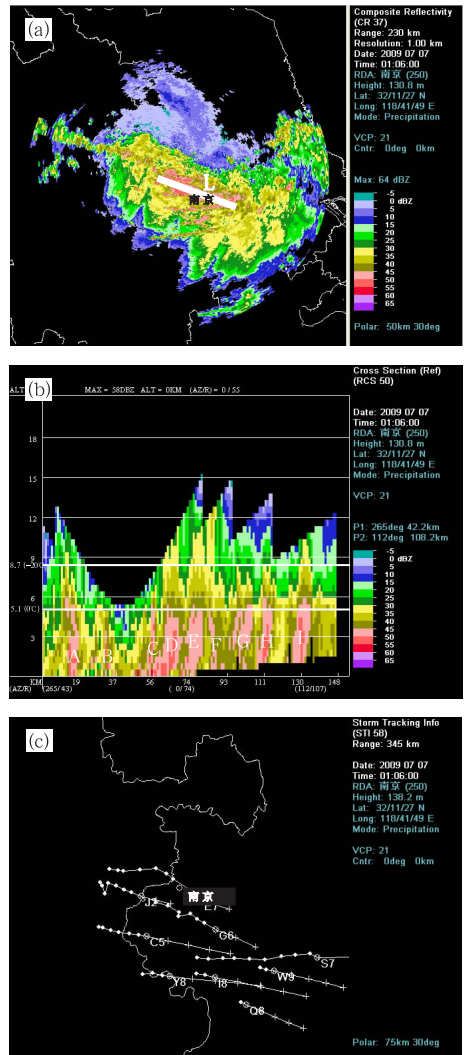


图 9 2009 年 7 月 7 日 09:06 南京雷达组合反射率(a)、反射率因子垂直剖面(b)和风暴追踪信息(c)图

Fig. 9 The composite reflectivity (a), the base reflectivity cross section (b) along the line from the point (2650/43 km) to (1120/107 km) and storm tracking information (c) derived from Nanjing radar at 09:06 BT 7 July 2009

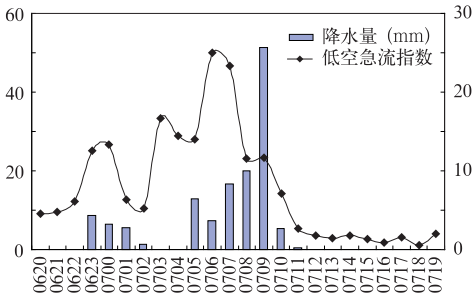


图 10 2009 年 7 月 6 日 20 时至 7 日 20 时逐小时低空急流指数与雨量叠加图

Fig. 10 Distributions of hourly average precipitation (histogram) and the index of low-level jet (rhomboidal solid) during 20:00 BT 6 July—20:00 BT 7 July 2009

南压,与其对应的东北—西南向中尺度对流回波带 B 以  $20\sim 25\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  速度向东南方向移动,回波强度  $40\sim 50\text{ dBz}$ 。03 时开始,在低空切变线的西端、低空急流的左前侧,安徽蚌埠附近不断有小块对流回波生成,以  $40\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  速度向东南方向移动,逐渐形成西北—东南向中尺度对流回波带 A,回波强度  $40\sim 50\text{ dBz}$ 。在南移过程中,对流回波带 B 的西端与对流回波带 A 的南端合并,05 时组合反射率因子图上可以看到典型的人字型回波(图 8),南京地区位于人字型回波的头部,回波中心强度增强到  $50\sim 58\text{ dBz}$ 。合并之后,人字型回波头部移速缓慢,对流回波带 B 中的对流单体不断并入,导致南京地区

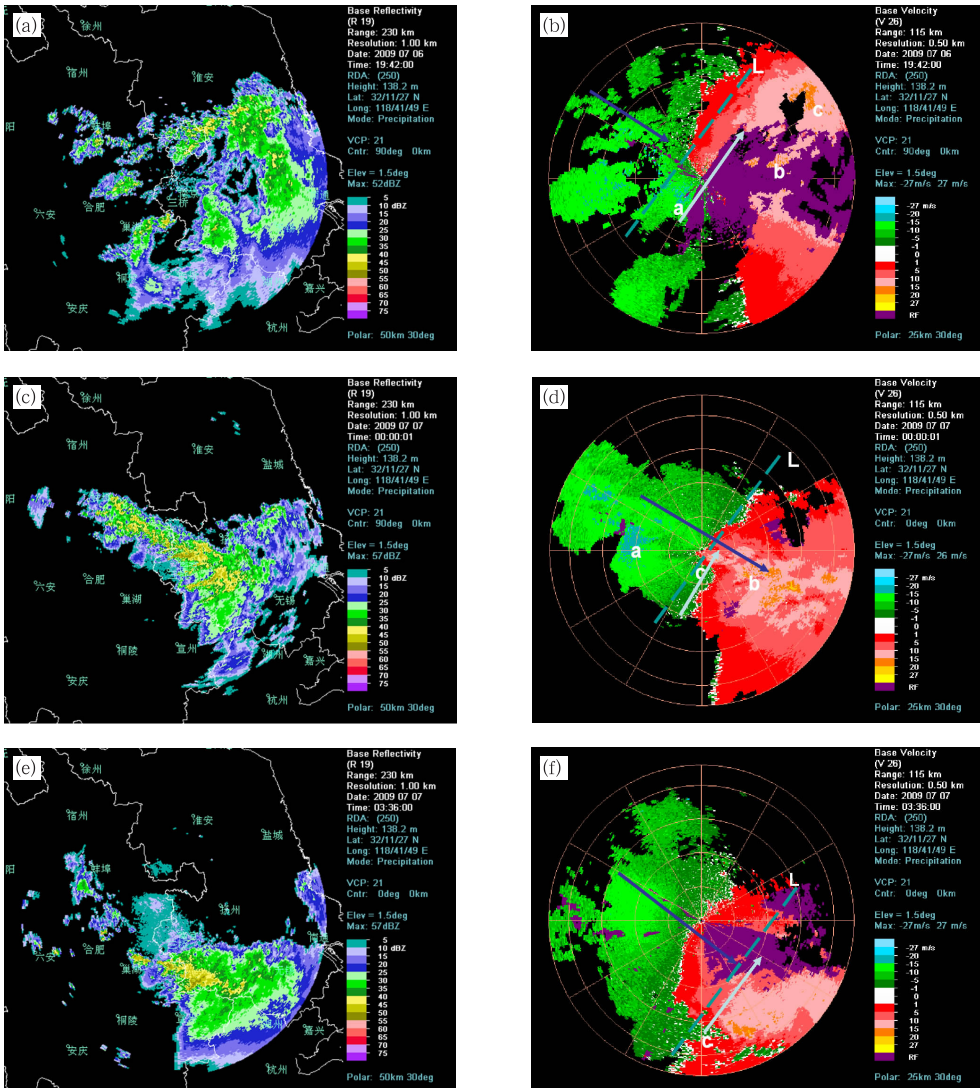


图 11 2009 年 7 月 7 日 03:42 (a,b), 08:00 (c,d)和 11:36 (e,f)

雷达  $1.5^\circ$  仰角基本反射率因子和径向速度图

Fig. 11 The base reflectivity ,base radial velocity with  $1.5^\circ$  elevation on 7 July (a,b) at 03:42 BT, (c,d) at 08:00 BT, and (e,f) at 11:36 BT 7 July 2009

上空对流回波的堆积和停留,形成大面积块状致密性强回波,11:30以后,块状对流回波南压移出江苏,本次降水过程结束。

## 4.2 对流风暴特征分析

### 4.2.1 雷达回波结构特征分析

强降水发生期间(09:06)南京雷达组合反射率产品(图9a)显示江苏西南部受一个发展旺盛的多单体风暴影响,多个中心强度超过50 dBz的 $\gamma$ 中尺度对流单体紧密地连接在一起,呈线性镶嵌在片状的层状云降水回波中。沿图中直线L作反射率因子垂直剖面(图9b)可以看到沿直线L排列着(A-I)多个 $\gamma$ 中尺度强对流单体,45 dBz以上强回波基本上在0℃层高度(5.12 km)以下,并且向下伸展到离地面很近的高度,表明该多单体风暴为低质心风暴,不可能形成冰雹或在地面出现降雹,地面观测也表明在这次强对流过程中未有降雹的记录。因此,对流雨区基本是液态雨滴散射的结果,该多单体风暴是一个液态强降水对流系统,具有较高的降水效率。

### 4.2.2 风暴跟踪信息

风暴跟踪信息产品是WSR-88D风暴单体识别和跟踪算法结果,其风暴识别算法识别出每个PPI上径向反射率因子超过一定阈值的连续段;风暴定位算法则将风暴段组合成每个PPI上二维风暴分量,再根据风暴垂直相关性组合成三维风暴单体,计算每个单体属性。风暴跟踪信息的匹配文字产品给出了各风暴单体的具体信息和总体平均信息。表1列出了7日04:30—11:30,南京多普勒雷达探测到的风暴总数、平均移向、平均移速。某一时刻被识别的风暴单体总数,可以反映该时刻多单体风暴的对流强弱。从05:30开始识别的风暴总数增加到60以上,基本呈现了上升的趋势。09—10时降水最强阶段,风暴单体总数达到了81,这说明在有回波单体不断并入的情况下,09—10时影响南京的多单体风暴对流相当旺盛。11:30以后风暴单体总数下降到40以下,降水过程也趋于结束。04:30—11:30,风暴平均移动方向在275°~300°之间,移动速度在8~12 m·s<sup>-1</sup>之间,说明强降水发生期间多单体风暴中的众多风暴单体整体上以稳定的速度向东南方向移动,09:06的风暴跟踪信息产品也可以看到风暴

单体几乎一致地向东南方向移动,且移动方向与强对流雨带平行分量很大,导致多个 $\gamma$ 尺度的对流单体依次经过南京地区上空,形成“列车效应”(图9)。

表1 2009年7月7日4:30—11:30风暴总数、平均移向、平均移速

Table 1 Number storms, their average direction and average speed detected by Nanjing radar during 04:30 BT—11:30 BT 7 July 2009

时间	风暴总数	平均移向/°	平均移速/m·s <sup>-1</sup>
04:30	57	276	11
05:00	60	279	8
05:30	62	275	10
06:00	69	278	11
06:30	79	283	10
07:00	64	289	9
07:30	60	289	12
08:00	65	285	12
08:30	78	284	11
09:00	81	281	11
09:30	81	292	11
10:00	60	286	11
10:30	64	291	9
11:00	44	288	10
11:30	34	299	9

以上分析表明,安徽东南部对流回波带中的对流单体不断并入,导致南京地区上空对流增强,影响南京的多单体风暴为低质心风暴,具有强的降水效率,其内部 $\gamma$ 中尺度的对流单体几乎一致地向东南方向移动,依次通过南京地区,导致了强降水的发生。

## 5 $\beta$ 中尺度天气系统的变化在强降水过程中作用分析

### 5.1 低空急流演变分析

为了清楚地显示降水的强度与低空急流的关系,刘淑媛等<sup>[5]</sup>中以2 km以下边界层急流中心的最大风速 $V(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ 和12 m·s<sup>-1</sup>风速在该小时中的最低位置 $D(\text{km})$ 的比值定义了低空急流指数 $I=V/D$ ,用它定量表示低空急流向下扩展的程度和风速脉动的强度,并考察它与雨强的关系。本文利用南京的雷达风廓线资料,对每小时的各层风速平均后计算出低空急流指数 $I$ ,从6日20时至7日20时逐小时低空急流指数与雨量叠加图(图10),可以看



到强降水发生时段(7日05—10时)低空急流指数  $I$  的值较大都在 10 以上,7日02—03时和05—06时指数  $I$  出现了两次快速的跃升过程,第一次出现在短时强降水过程开始前,指数  $I$  从 5.2 跃升到 16.4,第二次出现在降水最强阶段开始前,指数  $I$  从 14.05 跃升到 24.99。在指数  $I$  增大后 1~2 小时内雨强都出现了明显的增强过程,7日09—10时 1 小时降水量达到了 51 mm。这与文献[1]中利用香港天文台风廓线雷达资料分析华南的一次暴雨过程后指出的“指数  $I$  值迅速加大后,本地区在 1~2 小时内雨量迅速增强,指数  $I$  增大的程度与降水的强度存在正比关系”的结论相一致。从 7日07—10时的指数  $I$  值的变化看,指数  $I$  在达到峰值后逐步减小,但指数  $I$  的数值仍然较大,说明南京地区上空低空急流较前期有所减弱但依然很强,因此对应 7日07—10时雨强仍然是一个增大的过程。11时以后指数  $I$  下降到 3 以下,雨强快速减小。

以上分析表明,在表征低空急流强度及其向下扩展程度的指数  $I$  迅速增大后 1~2 小时内雨强将显著增大,指数  $I$  下降到 3 以下后,雨强快速减小。低空急流的迅速发展预示着强降水的出现和降水强度增强。

## 5.2 低空切变线过境分析

### 5.2.1 低空切变线移近南京雷达站

强降水发生之前(7日03:42),片状降水回波覆盖了江苏淮河以南大部分地区,此时回波的北侧边缘比较整齐,回波的整体移动方向也由原先向东北方向移动转为向东南方向移动,表明低层冷空气开始自西北向东南影响江苏地区(图 11a)。1.5° 径向速度图(图 11b)显示,低空切变线位于图中线段 L 处正在移向雷达站,其右端与零速度线相平行,左端沿着零速度线在其折角处向左外延。由于雷达站位于切变线南侧,切变线后侧为西北风,在雷达径向速度场上表现为朝向雷达的负速度,切变线前侧为西南风,在雷达右侧部分表现远离雷达的正速度,而在雷达左侧部分仍然表现为朝向雷达的负速度(如图中箭头所示)。在 0.7 km 高度附近(图中字母 a 处)西南风速最大达到 20~23  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,1.5 和 3.5 km 高度附近(图中字母 b、c 处)西南风速最大达到 15~17  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,切变线前为深厚且强盛的西南低空急

流。通过分析前后时刻零速度线位置可以判断低空切变线正在以 20~25  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$  的速度移近南京地区。

### 5.2.2 低空切变线过境南京雷达站

强降水发生阶段(7日08:00),西北—东南向强降水回波带穿过江苏西南部地区(图 11c),1.5° 径向速度图(图 11d)显示,低空切变线位于图中线段 L 处,正在从高到低先后过境雷达站,0.7 km 高度以下处于切变线前的西南气流之中,图中 c 处有最大值 12  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  的西南急流存在,而 0.7 km 高度以上则转为西北气流,1.2 km 高度以上,图中字母 a、b 处最大风速值都达到了 15~17  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。这样的高低层急流配置和强烈的垂直风切变的存在有利于短时强降水的形成和增强。

### 5.2.3 低空切变线远离南京雷达站

强降水结束阶段(7日11:36),西北—东南向强降水回波带北端已经逐渐减弱消散,回波主体南压,南京地区的降水也逐步减弱渐止。回波北侧边界整齐,且南压到苏南南部(图 11e)。1.5° 径向速度图(图 11f)显示,低空切变线已经南压到南京雷达站以南 70~80 km 处,位于图中线段 L 处,图中 c 处可以看到切变线前雷达左侧的负速度,但由于离雷达比较远,测得径向速度的云团位置较高在 3.5 km 左右,而高空已转为西北气流,所以测得的切变线前负速度区为一条狭窄的带状区域。从切变线过境雷达站到移到目前位置,其平均移动速度大约为 20~25  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,这与切变线移近雷达站的速度基本相当。

以上分析表明在这次南京地区短时强降水过程中,低空切变线是重要的中尺度影响系统。通过判断低空切变线的位置和移速可为预测短时强降水的开始和持续时间提供依据。

## 6 结 论

(1)在有利的环流背景形势下,强盛的西南低空急流和南移的低空切变线为中尺度对流系统(MCS)的形成和发展创造了条件。多个中尺度对流系统在南京地区上空发生合并,合并后的中尺度对流系统强度强,移速慢,造成了南京地区强降水。

(2)这次短时暴雨的中尺度特征在云图  $T_{\text{BB}}$  资

料上表现为合并后的对流云团,对流强度和范围显著增强,移动速度缓慢, $T_{BB}$ 梯度大值区在南京地区上空出现了停留;在雷达回波上表现为,不断并入的对流单体,导致南京地区上空对流增强,影响南京的多单体风暴具有强的降水效率,其内部 $\gamma$ 中尺度对流单体依次通过南京地区,导致了强降水的发生;在地面风场上体现的特征为南移的中尺度辐合线与南京地区局地生成的中尺度辐合中心发生合并,使得地面风场辐合显著增强。

(3)强盛的低空急流为此次短时强降水过程提供了充足的水汽和层结不稳定能量,低空急流的迅速发展预示着强降水的出现和降水强度增强。

(4)在这次南京地区短时强降水过程中,低空切变线是重要的中尺度影响系统。通过判断低空切变线的位置和移速可为预测短时暴雨的开始和持续时间提供依据。

## 参考文献

- [1] 陶诗言,等. 中国之暴雨[M]. 北京:科学出版社,1980:30-31.
- [2] 程麟生,冯伍虎.“9817”突发大暴雨及中尺度低涡结构的分析和数值模拟[J]. 大气科学,2001,25(4):465-478.
- [3] 蒙伟光,张艳霞,戴光丰,等. 华南沿海一次暴雨中尺度对流系统的形成和发展过程[J]. 热带气象学报,2007,23(6):521-529.
- [4] 陈敏,陶祖钰,郑永光,等. 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[J]. 气象学报,2007,65(5):785-791.
- [5] 牟容,余君,刘德,等. 重庆2008年7月21日强对流天气成因及其特征[J]. 气象,2009,35(5):49-54.
- [6] 周海光. 超强台风韦帕(0713)螺旋雨带中尺度结构双多普勒雷达研究[J]. 大气科学学报,2010,33(3):271-274.
- [7] 曹春燕,江崑,孙向明. 一次大暴雨过程低空急流脉动与强降水关系分析[J]. 气象,2006,32(6):102-106.
- [8] 张京英,漆梁波,王庆华. 用雷达风廓线产品分析一次暴雨与高低空急流的关系[J]. 气象,2005,31(12):57-63.
- [9] 刘淑媛,郑永光,陶祖钰. 利用风廓线雷达资料分析低空急流的脉动与暴雨关系[J]. 热带气象学报,2008,9(3):285-290.
- [10] 夏文梅,王凌震,张亚萍. 低空急流的单多普勒速度特征[J]. 南京气象学院学报,2003,26(4):489-495.
- [11] 郑媛媛,张小玲,朱红芳,等. 2007年7月8日特大暴雨过程的中尺度分析[J]. 气象,2009,35(2):3-7.
- [12] 林宗桂,李耀先,林开平. 一个长生命期中尺度对流系统维持机制的研究[J]. 气象学报,2009,67(4):640-651.
- [13] 陈明轩,俞小鼎,谭晓光,等. 北京2004年“7.11”突发性对流强降水的雷达回波特征分析[J]. 应用气象学报,2006,17(3):333-344.
- [14] 何群英,东高红,贾慧珍. 天津一次突发性局地大暴雨中尺度分析[J]. 气象,2009,35(7):16-22.
- [15] 周宏伟,王群,裴道好,等. 苏北东部一次梅雨锋大暴雨过程的多尺度特征[J]. 气象,2011,37(4):432-438.
- [16] 许爱华,马中元,叶小峰. 江西8种强对流天气形势与云型特征分析[J]. 气象,2011,37(10):1185-1195.
- [17] 苗爱梅,贾利冬,李苗,等. 2009年山西5次横切变暴雨的对比分析[J]. 气象,2011,37(8):956-967.
- [18] 姚晨,张雪晨,毛冬艳. 滁州地区不同类型特大暴雨过程的对比分析[J]. 气象,2010,36(11):18-25.
- [19] 陈晓红,胡雯,周扬帆,等. 2007年汛期淮河流域连续性大暴雨TBB场分析[J]. 气象,2009,35(2):57-63.