

郝莹,姚叶青,郑媛媛,等. 短时强降水的多尺度分析及临近预警[J]. 气象,2012,38(8):903-912.

短时强降水的多尺度分析及临近预警^{* 1}

郝 莹^{1,2} 姚叶青² 郑媛媛² 鲁 俊³

1 南京大学大气科学学院,南京 210039

2 安徽省气象台,合肥 230031

3 安徽省气候中心,合肥 230031

提 要: 利用安徽省 1995—2010 年逐小时降水量资料,统计了不同强度的短时强降水的时空分布特征,并分析典型短时强降水过程的环境背景场特征,建立了短时强降水的三种概念模型,总结出有利于其发生的大尺度影响系统。通过分析物理量得知,短时强降水发生时大气水汽充沛、湿层深厚,厚的暖云层保证了云粒子在降水系统的下沉气流里较少的被蒸发,而中等强度的对流有效位能和高的 KI 指数值有利于高降水效率的产生。短时强降水的雷达反射率因子有“低质心结构”和“高质心结构”两种结构特征。而径向速度场上的中小尺度风速切变、辐合、气旋式辐合则是强降水回波在某地维持和发展的重要原因。强降水发生前半小时边界层急流显著增强,也是短时强降水临近预警的一个重要指标。

关键词: 短时强降水,多尺度,临近预警,雷达回波

Multi-Scale Analysis and Nowcasting of Short-Time Heavy Rainfall

HAO Ying^{1,2} YAO Yeqing² ZHENG Yuanyuan² LU Jun³

1 School of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210039

2 Anhui Meteorological Observatory, Hefei 230031

3 Anhui Climate Centre, Hefei 230031

Abstract: Hourly precipitation data at 79 stations in Anhui Province during 1995 to 2009 were used to statistically compute the spatial and temporal distributions of short-time heavy rainfall with different intensity. Then the environmental background characteristics of typical short-time heavy rainfall were obtained so as to build three conceptual models of short-time heavy rainfall and abstract large-scale systems beneficial to its occurrence. By using the statistical analysis of physical parameters, conclusions can be drawn as follows. When short-time heavy rainfall occurs, the atmospheric water vapor is abundant and there are wet-thick layer and warm-thick cloud layer, the latter ensures cloud particles from being evaporated in the down-draft airflow of system. At the same time, moderate convective $CAPE$ and higher KI index are beneficial for the appearance of high-efficiency precipitation. On the other hand, there are two structural characters of radar reflectivity factor, i. e., the low-quality core structure and high-quality core structure. The important reasons for maintenance and development of heavy precipitation echo in some areas are attributed to small and mesoscale wind shear, convergence and cyclonic convergence zone. In addition, the boundary layer jet enhanced significantly half an hour before heavy rainfall is another important indicator of nowcasting of heavy rainfall.

Key words: short-time heavy rainfall, multi-scale, nowcasting, radar echoes

* 公益性行业(气象)科研专项(GYHY200906003、GYHY201006002)、中国气象局预报员专项(CMAYBY2012-025)及安徽省自然科学基金项目(090415209)共同资助

2011 年 3 月 25 日收稿; 2011 年 9 月 28 日收修定稿

第一作者: 郝莹,主要从事强对流天气预报方法研究. Email:haohaoha_82@163.com

引言

短时强降水是指短时间内降水强度较大,其降雨量达到或超过某一量值的天气现象。短时强降水累积形成的较大降水在短时间内可形成暴洪,造成农田渍涝、城市内涝,甚至引发泥石流、山洪等地质灾害,造成重大经济损失和人员伤亡。因此加强其机理研究及临近监测预警具有非常重要的意义。近年来,不少学者对短时强降水进行了深度并卓有成效的探讨:国外对雨强的探测和估算进行了深入的研究^[1-3]。在国内,许多学者对短时强降水的气候特征和环流形势特征进行了分析^[4-6]。随着数值预报的发展和人们对短时强降水发生发展机理的认识加深, α 中尺度的分析被越来越多地用于短时强降水的研究中,殷雪莲等^[7]通过对沿祁连山两次典型强降水的对比分析得出“东高西低”切变辐合及低空急流是区域性强降水产生的关键。周淑玲等^[8]强调了高低空急流的耦合作用。杨贵名等^[9]对2003年梅雨期的一次强降水的分析中揭示了干侵入对强降水起到激发作用。各种表征热力、动力的物理量也被广泛地应用到短时强降水的分析诊断中^[10-13]。杨诗芳等^[5]通过个例分析发现,短时强降水时大气层结不稳定,各个大气对流参数场中心与短时强降水中心对应较好。随着新一代天气雷达资料的广泛应用,短时强降水的分析研究和短时预报预测服务水平得到很大提高。应冬梅等^[14]通过对比分析冰雹、大风和短时强降水的雷达特征,得到相对平均径向速度图上“S”型暖平流及表现强低空急流的“牛眼”,深厚的湿度层等是短时强降水的主要特征。陈秋萍等^[15]分析了福建北部前汛期短时强降水的时空分布及雷达回波特征,得到了短时强降水的回波高度和回波强度特征。众所周知,短时强降水是在中小尺度系统中产生的,但以大尺度天气系统为背景,大尺度天气系统影响或决定着中小尺度天气系统的生成、发展和移动过程,而中小尺度天气系统又对大尺度天气系统有反馈作用。因此对其进行多尺度分析研究是非常有必要的。本文在前人工作的基础上,分析安徽省1995—2010年间的短时强降水过程,总结了短时强降水的气候特征、大尺度背景场模型、主要影响系统及物理量特征,并分析雷达的反射率因子、径向速度、回波顶高等多种产品得到短时强降水的中小尺度特征。探求了强降水回波维持和发

展的原因,最终得到短时强降水预报,预警的着眼点,对服务防灾减灾,具有一定积极意义。

1 定义及资料说明

使用安徽省79个市(县)1995—2010年逐小时降水资料统计短时强降水($\geq 30 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$)的气候特征,并提取一日中有3个站1小时降水量超过50 mm的过程分析典型短时强降水过程的大尺度环流特征。在典型强降水过程中,选取距离合肥雷达站150 km以内的 $\geq 50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 强降水,分析其雷达特征。

2 短时强降水的气候特征

为更加详细地分析短时强降水的气候特征,在分析 $\geq 30 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ (2135 时次)短时强降水的时空分布的基础上,对 $\geq 40 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ (813 时次)和 $\geq 50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ (264 时次)这两种雨强更强的降水也进行了统计分析。

2.1 空间分布特征

短时强降水的高发区基本都在淮北和大别山区和江南西部。大别山区、江南西部是 $\geq 30 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 短时强降水(图1a)的频发区,地形增幅作用起到了一定的作用,但随着降水强度的增大,淮北逐渐超越南部,成为 $\geq 40 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ (图略), $\geq 50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ (图1b)强降水的易发区。据统计,淮北的极端短时强降水多出现在夏季,夏季时淮北处于副高边缘,500 hPa平均高度为584 dagpm左右,是水汽的输送带,西风带系统东移,冷暖空气在此地交汇,形成对流性强的短时强降水。

2.2 时间分布特征

短时强降水的月分布呈现单峰型特征,7月是强降水最频繁发生的月份。 $\geq 30 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的短时强降水出现在6和8月的次数几乎相等、9月出现次数比5月略多;而分别 ≥ 40 和 $50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 这种强度更强的降水则更易出现在盛夏末,8月出现次数比6月多,9月出现次数比5月多,且降水强度越强,这种特征越明显(图2)。

日分布呈明显的双峰型特征(图3),在早晨、午后到傍晚这两个时间段是强降水易发时间段,而中

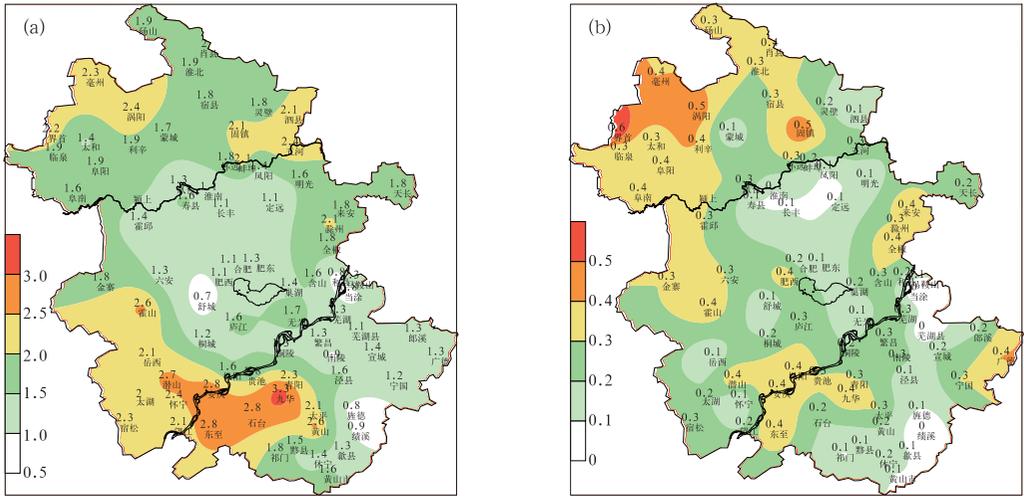


图 1 短时强降水年平均次数

(a) $\geq 30 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, (b) $\geq 50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$

Fig. 1 Annual average number of short-time heavy rainfall with intensity

(a) $\geq 30 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, and (b) $\geq 50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$

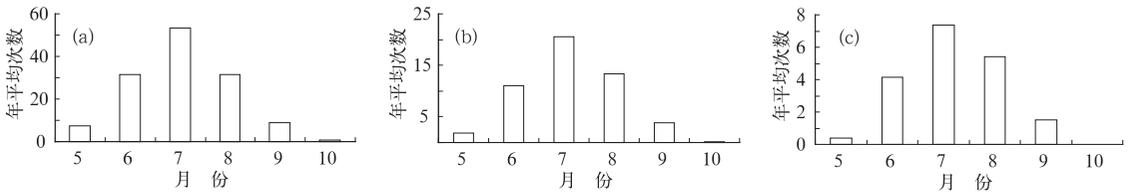


图 2 短时强降水的月分布特征

(a) $\geq 30 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, (b) $\geq 40 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, (c) $\geq 50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$

Fig. 2 Monthly distribution characteristics of short-time heavy rainfall with intensity

(a) $\geq 30 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, (b) $\geq 40 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, and (c) $\geq 50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$

午及夜里则是强降水的低发时间段。强度越强的降水其双峰结构越明显。根据以往研究^[16],低空急流会在凌晨达到最大值,且急流结构最清楚,短时强降水在凌晨多发可能和低空急流的加强有着密切的关系。另外,地面气压具有日变化特征,凌晨 03—04 时(北京时,下同)的地面气压是一天中次低值,这个

时间恰好在短时强降水频发时段(05—06 时)前,地面气压的降低使辐合增强,更有利于短时强降水的发生发展。午后到傍晚地面受日射而强烈加热,常在近地层形成绝对不稳定的层结,使对流容易发展,如果当天水汽丰富,那么这一天午后到傍晚就易出现短时强降水。

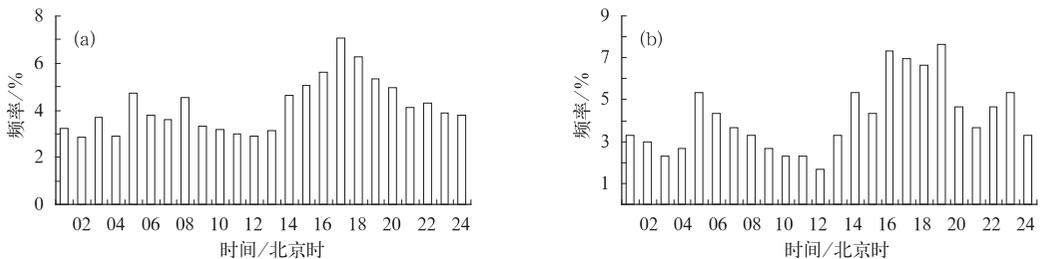


图 3 短时强降水日分布特征

(a) $\geq 30 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, (b) $\geq 50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$

Fig. 3 Daily distribution characteristics of short-time heavy rainfall with intensity

(a) $\geq 30 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, and (b) $\geq 50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$

3 短时强降水的大尺度环流背景特征

3.1 短时强降水的环流形势特征

通过分析得知,短时强降水的环流背景一般有三种类型(见图 4):低槽东移型,占 66.7%;西北气流型,占 22.2%;台风强降水,占 11.1%。这三种类型分别有以下环流特征。

(1)低槽东移型(见图 4a):河套东部到西南地区有低槽,部分情况下低槽的北部即内蒙古、山西、河北一带同时有低涡,副高势力较强,呈西低东高的形势,500 hPa 低槽东移,同时低层配合有低涡或切变线,强降水往往出现在暖式切变线的南侧。

(2)西北气流型(见图 4b),副高受冷空气影响断裂成东西两环,安徽省处于沿海槽后的西北气流

中,北方有冷空气补充南下,中低层有低涡、切变线,风随高度顺转,呈前倾槽的形势,当中低层的小尺度系统过境时出现短时强降水。此类型一般显著湿区较窄,系统移动较快。

(3)台风型(见图 4c),据统计,近年来造成安徽大范围短时强降水的台风基本为西北路径并结合有西风槽。台风在闽浙沿海登陆,并沿西北路径(登陆点切线与正北方向夹角为 $15^{\circ}\sim 75^{\circ}$)移向安徽,在安徽周边或境内减弱为低压环流,此时若北方有西风槽东移,往往产生大范围的持续强降水。台风减弱后的低压环流较为深厚,到 300 hPa 的高度仍有明显的辐合,再到高层就转变为反气旋辐散环流,呈低层辐合、高层辐散的形势,最为重要的是台风倒槽为降雨区源源不断地输送水汽,非常有利于强降水的持续出现。强降水的落区基本在台风倒槽前、台风倒槽的偏南风急流的交汇处或略偏东北的位置。

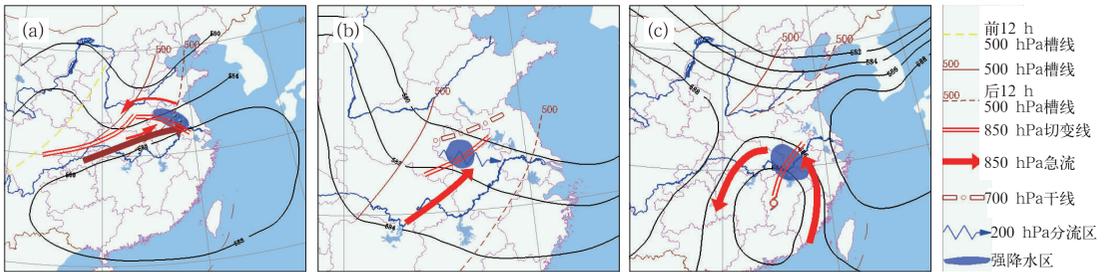


图 4 短时强降水概念模型图

(a) 低槽东移型, (b) 西北气流型, (c) 台风型

Fig. 4 Conceptual model diagrams of short-time heavy rainfall for

(a) eastward low trough type, (b) northwest airflow type, and (c) typhoon type

3.2 短时强降水的大尺度及 α 中尺度影响系统

在大尺度环流背景场的基础上,利用中尺度分析工具分析其大尺度及 α 中尺度影响系统,表 1 中按其重要程度依次排列。

从表 1 可见,低层辐合、高层辐散还是短时强降水最重要的垂直结构特征,短时强降水的区域在高空辐散区下方低涡、暖切附近或略偏南的位置。对流层中层的低槽活动也起到比较重要的作用,有

83%的低槽东移型和 75%的西北气流型 500 hPa 有一 30 gpm 以上的负变高,所有的台风型也都有负变高,并且强降水区域和负变高区域重合。低空急流也和短时强降水关系密切,75%的低槽东移型、100%的西北气流型和台风型的短时强降水都在低空存在急流,平均的风速为 $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,强降水出现在急流轴的左侧。急流的风向主要是东到西南风,其中西南风最多,占 66.7%,偏东风占 16.7%,存在东风和南风两支急流的占 16.7%。经分析,所有

表 1 短时强降水的大尺度及 α 中尺度影响系统

Table 1 Large-scale and meso- α scale affecting systems of short-time heavy rainfall

类型	高空辐散(反气旋、分辐区、风速辐散)	低涡暖式切变线	500 hPa 负变高	低空急流	低层显著降温	700 hPa 干线
低槽东移型	100%	92%	83%	75%	0%	0%
西北气流型	100%	100%	75%	100%	100%	100%
台风型	100%	100%	100%	100%	0%	0%

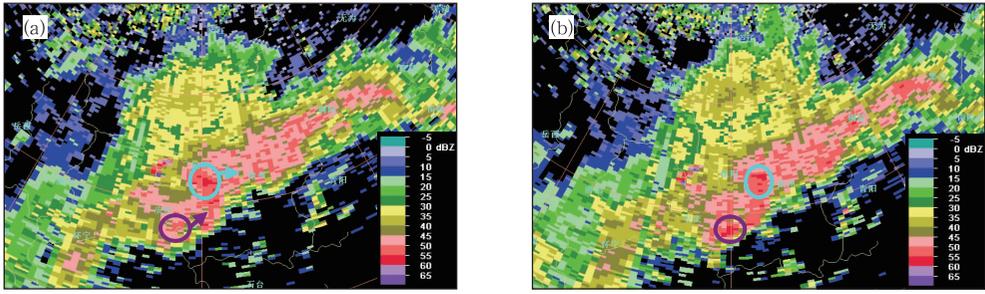


图 5 2005 年 6 月 27 日合肥雷达 0.5°仰角基本反射率因子图
(a) 03:06, (b) 03:17

Fig. 5 Reflectivity factors of Hefei radar at 0.5° elevation
at 03:06 BT (a) and 03:17 BT (b), 27 June 2005

低槽东移型的急流在强降水出现前都有显著的加强,12 h 风速平均增加为 $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。仅有一半的西北气流型的急流有显著加强,12 h 风速平均增加为 $7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。而台风型强降水前低空急流则没有显著变化。可见急流的显著增强对低槽东移型的强降水具有较好的指示意义。

西北气流型和其他两种类型的不同在于低层有明显的锋区并且 700 hPa 存在干线。西北气流型强降水区域的北侧都有干线,干线这种干湿空气强烈对比的不连续线,给对流层中低层带来干空气,在西北气流型强降水中扮演着触发机制的角色,强降水出现在干线南侧暖而湿的区域。西北气流型的锋区很明显,冷锋过后 850 hPa 会有 $4 \sim 9^\circ\text{C}$ 的显著降温。

3.3 短时强降水的物理量特征

Brooks 等^[17]认为造成洪水的强降水的前提是持续的高降水率和湿空气迅速上升,郑仙照等^[18]、

陈春艳等^[19]和王晓芳等^[20]的研究表明:位势不稳定能量的释放是暴雨产生发展的可能机制之一。因此分别选择表征不稳定能量、风切变、水汽及一些高度

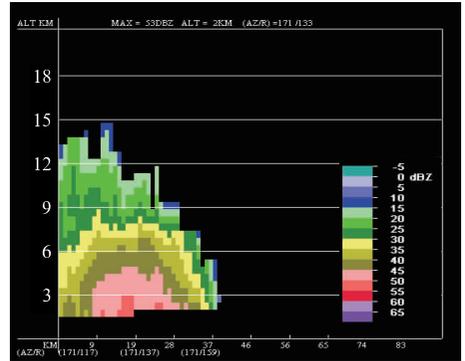


图 6 2005 年 6 月 27 日 03:28 池州强降水反射率因子垂直剖面图

Fig. 6 Radar reflectivity factor profile of short-time heavy rainfall at Chizhou at 03:28 BT 27 June 2005

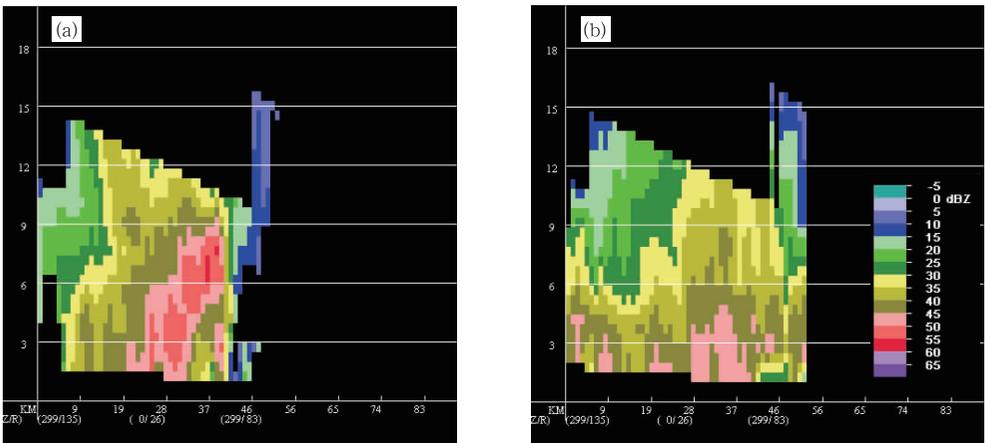


图 7 2008 年 8 月 17 日霍邱反射率因子垂直剖面图
(a) 17:23, (b) 17:41

Fig. 7 Radar reflectivity factor profiles in Huoqiu station at 17:23 BT (a) and 17:41 BT (b) 17 August 2008

厚度的物理量来分析短时强降水,以期得到短时强降水的发生机理。发现以下特征,(1)水汽充沛、湿层深厚,850 hPa 比湿均在 $13 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上,从 850 到 300 hPa 温度露点差均小于 5°C 。(2)有一定的不稳定能量,典型强降水的对流有效位能大部分在 $400 \sim 1500 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,属于中等强度,说明中等强度的对流有效位能比极端的对流有效位能更有利于高降水效率的形成。但 75% 的西北气流型的对流有效位能大于 $2000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,和低槽东移型和台风型有所不同。另外, KI 指数平均值为 37°C ,比夏季雷暴的 KI 平均值高 4°C 。(3)暖云层厚度较厚。暖云层厚度(暖云层厚度是抬升凝结高度到融化层高度之间的厚度)均在 $3700 \sim 4800 \text{ m}$ 。远大于冰雹大风时的暖云层厚度 3207 m 。厚的暖云层保证了云粒子在降水系统的下沉气流里较少的被蒸发,有利于高降水效率的产生。(4) 0°C 层高度较高,平均在 5000 m 左右,高于冰雹发生时的 0°C 层高度。

4 短时强降水的雷达特征及临近预警

4.1 短时强降水的雷达特征

分析典型强降水的雷达特征,将强降水分为两种类型:低质心结构,占 81.82%;高质心结构,占 18.18%。详细描述如下:

(1)低质心结构

低质心结构的雷达特征为:在 PPI 上降水回波一般呈带状,其移动方向和回波的长轴方向相近,产生列车效应。回波的移动速度较快,一般超过 $40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,最快的能达到 $101 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。反射率因子一般为 $40 \sim 50 \text{ dBz}$,最大可达 $50 \sim 55 \text{ dBz}$,且回波强度的变化不大,不存在激增或锐减。低质心结构的短时强降水的 VIL 基本在 $12 \sim 32 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 之间,远低于冰雹的 VIL 。在 RHI 上呈低质心特征,回波强度从低到高依次减弱,不存在强回波悬垂。 50 dBz 以上的强回波伸展高度在 $2 \sim 4 \text{ km}$,最高可达 5 km ,但达不到 0°C 层高度。可见主要是暖云产生高效率的短时强降水。以 2005 年 6 月 27 日凌晨 03—04 时池州出现了 1 小时降水量为 56.1 mm 的强降水为例。降水回波带呈东北—西南向,而回波的移动方向也是东北向,在池州的西南方向不断有新的降水回波生成并东北向移动。对流雨团的反复经过造成了池州的短时强降水。图 5 中 03:06 位于枞阳南部的 55 dBz 的强回波中心(亮蓝色圆圈区

域)向偏东方向移动,且强度逐渐减弱,其后部的弱降水回波(紫色圆圈区域)则在东北移动的过程中不断增强,由 $45 \sim 50 \text{ dBz}$ 增大到 55 dBz ,范围也有所扩大,并逐渐代替其前部的老单体。可见这个降水系统中的单体移动和传播相互抵消,产生了最大累积降水。对最强的回波沿径向做反射率因子的剖面(图 6),具有低质心结构, $50 \sim 55 \text{ dBz}$ 回波最高 3 km , $45 \sim 50 \text{ dBz}$ 回波最高伸展到约 5 km ,不超过 0°C 层高度(27 日 08 时安庆 0°C 层高度 5179 m)。

(2)高质心结构

此类短时强降水对流发展比较深厚,强回波中心伸展到较高的高度,呈高质心特征。 50 dBz 以上的强回波伸展高度到 0°C 层以上,高度达 $5 \sim 8 \text{ km}$,并在高悬的强回波下有弱回波区。其垂直液态积分含水量较大,能达 $50 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 以上,有的甚至高达 $72 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。这些特征和冰雹的雷达特征相类似,但和雹暴也有一定的差异,如回波的移动速度较慢,平均在 $10 \sim 30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,另外高质心结构强降水减弱时,质心在下降的同时强度迅速减弱,这与冰雹明显不同。以 2008 年 7 月 17 日 17—18 时霍邱的强降水为例。影响霍邱的强降水回波呈西北东南向带状,最大回波强度为 $50 \sim 55 \text{ dBz}$,回波向偏东方向移动,移动速度较慢,在霍邱停留的时间长达 50 min 。沿雷达径向做反射率因子的垂直剖面,有类似雹暴的结构,对流发展比较深厚(图 7)。17:23 50 dBz 以上的强回波中心扩展到 9 km 的高度(当日

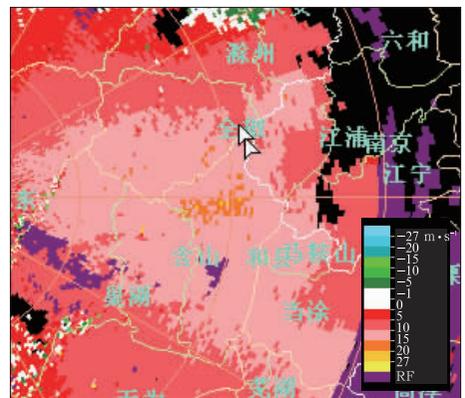


图 8 强降水径向速度场中的
中小尺度风速切变

(2008 年 8 月 1 日 14:51 合肥
雷达 0.5° 仰角径向速度场图)

Fig. 8 Small and mesoscale wind shear
in heavy rainfall radial velocity field
(Hefei radar, 0.5° elevation radial velocity
field, 14:51 BT 1 August 2008)

阜阳 0℃层高度 5113 m, -20℃层高度 8745 m),并在高悬的强回波下有弱回波区,17:29 强回波继续向高层扩展,到达了 14 km 的高度,但质心开始下降,同时低层的弱回波区也在减小,17:35 回波高度和回波强度迅速减弱,弱回波区消失,这时的垂直剖面特征呈低质心结构,强降水开始逐渐减弱。

4.2 持续强降水的机理初探

根据对 22 次 1 h 降水量超过 50 mm 强降水个例的分析,发现无论是低质心结构还是高质心结构,其共同的特征都是强回波长时间维持在强降水发生地区,因此探寻强回波因何能长时间存在且维持一定强度,是短时强降水预报预警的关键。本文分析

多次短时强降水的径向速度场,发现中小尺度辐合(辐合、中小尺度风速切变和气旋性辐合)的稳定维持是强降水回波维持少动的主要原因。另外边界层急流、中低空急流的加强也是短时强降水持续的重要原因,其中边界层急流早在强降水开始前半小时就显著增强。

(1) 中小尺度风速切变

强降水发生地常存在中小尺度风速切变(占个例的 27.3%),且在强降水开始前 30 min 至 2 h 中小尺度风速切变会明显增大,雨强和中小尺度风速切变的强弱关系密切。如 2008 年 8 月 1 日受台风凤凰影响,江淮东部出现了罕见强降水。其中全椒 14—15 时降水量为 54.1 mm。发现 0.5° 仰角径向

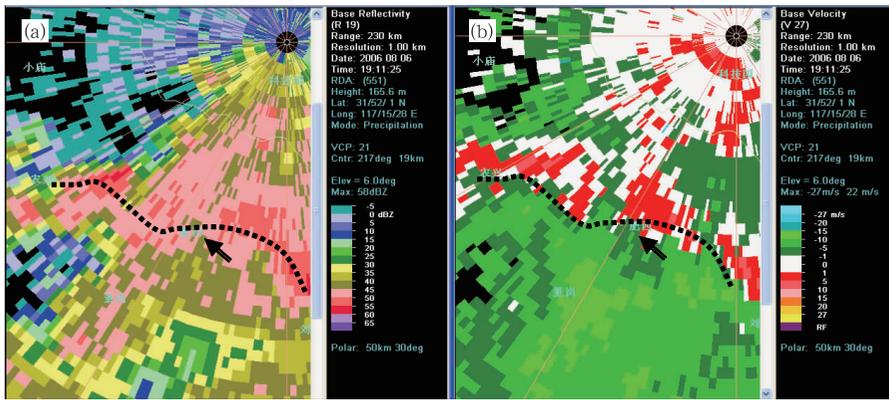


图 9 强降水径向速度场中的辐合

- (a) 2006 年 8 月 6 日 19:11 合肥雷达 6.0° 仰角基本反射率因子图,
- (b) 同时段合肥雷达 6.0° 仰角径向速度场图

Fig. 9 Convergence zones in radial velocity field of heavy rainfall
(a) Hefei radar, 6.0° elevation basic reflectivity factor, 19:11 BT 6 August 2006; (b) radial velocity field

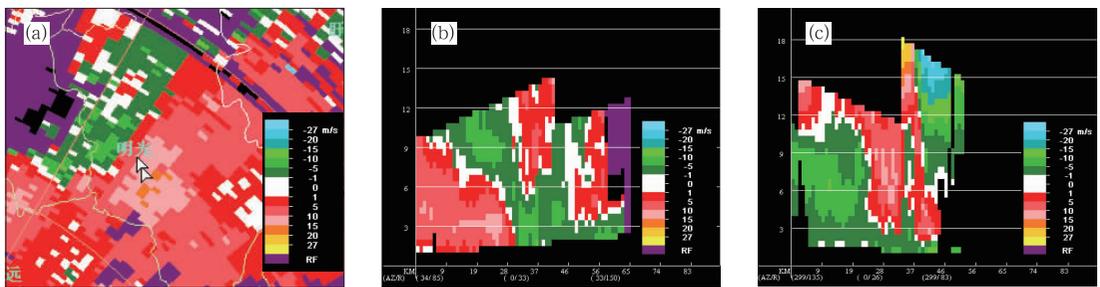


图 10 强降水径向速度场中的气旋式辐合

- (a) 2006 年 8 月 6 日 16:39 合肥雷达 0.5° 仰角基本反射率因子图, (b) 8 月 6 日 16:39 明光径向速度垂直剖面图, (c) 2008 年 7 月 17 日 17:29 霍邱径向速度垂直剖面图

Fig. 10 Cyclonic convergence in radial velocity field of heavy rainfall
(a) Hefei radar, 0.5° elevation basic reflectivity factor, 16:39 BT 6 August 2006
(b) Mingguang radial velocity vertical section at 16:39 BT 6 August 2006
(c) Huoqiu radial velocity vertical section at 17:29 BT 17 July 2008

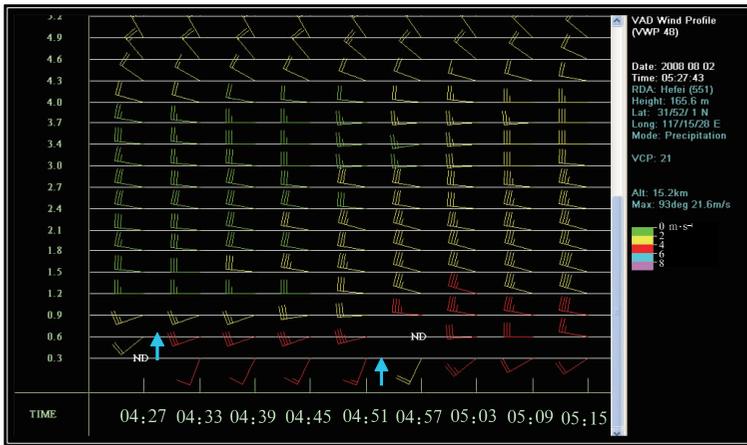


图 11 2008 年 8 月 2 日 05 时 27 分合肥雷达风廓线产品
(亮蓝色箭头指示急流显著加强的时刻)

Fig. 11 Wind profile products of Hefei radar at 05:27 BT 2 August 2008
(Light blue arrow indicates the moment of a significant strengthening of jet)

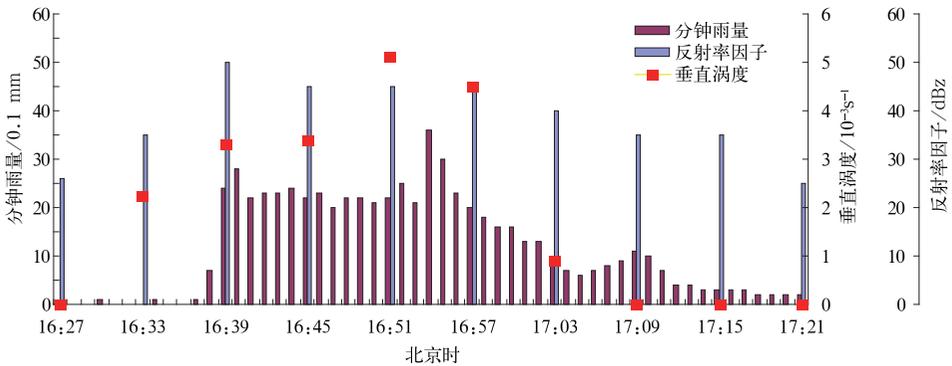


图 12 2006 年 8 月 6 日明光 16:27—17:15 分钟雨量(单位: 0.1 mm)及
相应时段反射率因子(单位: dBz)、垂直涡度(单位: 10^{-3} s^{-1})

Fig. 12 The minute-rainfall (unit: 0.1 mm) and the corresponding reflectivity
factor (unit: dBz) as well as vertical vorticity (unit: 10^{-3} s^{-1}) at Mingguang
Station during 16:27—17:15 BT 6 August 2006

速度(图 8)在强降水开始前 1 h,强降水区的南侧的风速开始不断增大,由 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 逐渐增强至 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,但全椒的径向速度一直维持在 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,和其南侧的风速切变加大。强降水开始时,强降水区的南侧逐渐形成一个径向速度为 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的正速度中心,且直到 5 km 的高度,该中心一直存在。全椒的径向速度虽然也增至 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,但和其南侧的风速切变仍是显著增大的。伴随着风速切变的加强,全椒的反射率因子也增至 45 dBz,且回波长时间维持。15:15 后正速度中心开始东移减弱并逐渐消失,反射率因子降至 30 dBz,降水强度随之减弱。

(2) 辐合

辐合(占个例的 50%)表现形式多为在雷达径向上出现正负速度,且正速度靠近雷达一侧。反射

率因子大值区和辐合线的位置非常吻合,强降水出现在辐合一侧。辐合的径向速度都比较小,基本不超过 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,但有时也能达 $15 \sim 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。例如 2006 年 8 月 6 日 19—20 时肥西出现了 64.9 mm 的强降水,早在 18:34 2.2 km 高度上在大片的负速度区中肥西西北边出现较小尺度的正径向速度。18:53 该正径向速度区移至肥西和西南侧的负速度区形成一个西北东南向的风向辐合线,该辐合线(图中黑色虚线)的形状及位置和强降水回波带非常吻合(图 9)。受其影响,肥西雨强增大,并且当强降水持续时,正径向速度区的位置稳定少动。

(3) 气旋式辐合

气旋式辐合(占个例的 22.7%)的表现形式为在雷达径向上的两侧存在比较对称的正负速度对,且

入流位于雷达径向的左侧。气旋式辐合是强对流风暴的上升气流和后侧下沉气流紧密相联的小尺度涡旋。其出现也表明风暴有一定的组织性,预示了强降水回波在一段时间内不会减弱,短时强降水将持续和发展。气旋式辐合的正负速度较大,可超过 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,有的甚至达到了中气旋的强度。且伸展高度能达到对流层的中高层。如2006年8月6日16—17时明光降水量达51.3 mm。在强降水开始前1 h,该地区为一致正径向速度区,径向速度 $1 \sim 5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,无降水回波。15:55在明光的南侧约10 km的位置正径向速度增大至 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,同时在雷达径向的左侧与其对称的位置出现 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的负径向速度区,有弱的气旋式辐合,与此同时该地的反射率因子增至50 dBz,出现强降水。16:33开始气旋式辐合移至明光,正负速度中心值分别为15和 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图10a)。直到对流层中高层该辐合一直存在,但辐合位置随高度的增加略向南倾斜(图10b),强回波位于低层的辐合区内。在之后的30 min内,该气旋式辐合一直维持在明光地区,强回波也稳定维持。17:03气旋式辐合减弱并移出明光,明光强降水结束。在短短的30 min降水量约50 mm,可见降水效率很高。在强降水回波发展旺盛时,辐合区上空往往叠加有辐散区,对2006年8月6日16:39径向速度场沿雷达径向做明光地区的垂直剖面图,可见在低层辐合区上,6 km高度开始有辐散,且反气旋式辐散在9 km高度有所加强。而2008年7月17日17:29径向速度场上监测霍邱有中气旋,在其上空15 km出现风暴顶辐散,正负径向速度均高达 $27 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图10c)。

(4)边界层急流的显著加强

经研究发现,在短时强降水开始前边界层急流开始显著加强,强降水开始时中低空急流开始有所加强。1 h内边界层急流可增强 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右,中低空急流增加得稍少,约为 $2 \sim 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。这点和以上的大尺度分析相吻合。以2008年8月2日肥西05—06时的强降水(1 h降水量57 mm)为例,从VWP产品可见(图11),边界层急流的显著增强对短时强降水有一定的预示意义,早在强降水开始前半小时,即04:33时0.6 km的风速开始显著增大,由 $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 增大至 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,随后在04:45时0.3和0.9 km的风速也分别增大了 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,随着雨强逐渐增强时,边界层风速进一步增大,在04:27—05:15这近1 h的时间内,边界层的风速基本都增大了 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。中低空急流则在强降水出现时间

附近自低而高有所增强,04:45在1.5 km高度风速增加了 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,之后随着时间的推移,从1.5~4.0 km风速都约增强了 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

(5)短时强降水持续时间的讨论

综合以上定性的分析,可见中小尺度辐合及急流增强均有利于气旋性涡度的产生、发展和维持,其中气旋性辐合形成了闭合的循环气流,导致中小尺度辐合的稳定维持。而中小尺度风速切变和边界层急流、低空急流的增强则造成低层强的暖湿空气的平流,加强了层结不稳定性,而且可以加强低层的扰动,触发不稳定能量的释放,从而使强降水加强和维持。

下面通过对个例的分析寻求径向速度场特征和强降水持续时间定量的关系,从图12可见16:27—16:32无气旋式辐合,6 min降水量为0.1 mm。16:33垂直涡度增至 $2.24 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$,随后6 min内累计降水量达0.9 mm。16:39垂直涡度增至 $3.31 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 时,每分钟降水量达2.0~2.8 mm,16:51虽然反射率因子和上个体扫相同,但垂直涡度进一步加大至 $5.12 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$,随后出现了最大 $3.6 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 的雨强,6 min累计降水高达15.5 mm。之后随着垂直涡度的逐步减小,雨强减弱。可见垂直涡度会略提前强降水出现,且其跃增时强降水出现并加强,其维持的时间略大于强降水持续时间,因此,可通过分析径向速度场的中小尺度辐合来预测强降水的生消发展,这较反射率因子有一定优势。

5 小 结

通过对安徽省短时强降水的气候特征、环流形势特征、物理量特征和雷达特征进行多尺度的分析,得到一些有意义的结论。

(1)短时强降水高发区位于淮北、大别山区和江南西部,极端的强降水多出现在淮北。7月是短时强降水最为频发的月份。短时强降水的日变化呈双峰结构,在早晨、午后到傍晚这两个时间段是强降水易发时间段。早晨多发可能和超低空急流的加强及地面低压在03—04时为一天之中的次低值有密切的联系。

(2)短时强降水的环流背景可分低槽东移型、西北气流型和台风型三种类型。影响因子按重要程度排列依次为:高空辐散、低涡切变线、低空急流和对流层中层的低槽活动。低槽东移型、50%的西北气流型在强降水出现前低空急流有显著加强,12 h风

速平均增加 $7\sim 8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。西北气流型低层有明显的锋区并且 700 hPa 存在干线,和其他两型不同。

(3)物理量特征为水汽充沛、湿层深厚。对流有效位能大部分在 $400\sim 1500\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$,属于中等强度。 KI 指数平均值为 37°C ,能较好地指示短时强降水。 0°C 层高度位于 5000 m 左右,暖云层厚度较厚,保证了云粒子在降水系统的下沉气流里较少的被蒸发。

(4)短时强降水的雷达特征有两种类型:①低质心结构:回波呈带状,其移向和回波的长轴方向相近,移速超过 $40\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 。反射率因子一般为 $40\sim 50\text{ dBz}$,最大可达 $50\sim 55\text{ dBz}$,垂直剖面呈低质心特征。 VIL 在 $12\sim 32\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 之间。②高质心结构: 50 dBz 以上的强回波伸展高度超过 0°C 层高度,并在高悬的强回波下有弱回波区。 VIL 达 $50\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 以上。回波的移速较慢。

(5)中小尺度辐合的稳定维持是强降水持续的主要原因。中小尺度辐合的表现形式主要有中小尺度风速切变、辐合和气旋性辐合。强降水发生地常存在中小尺度风速切变,且在强降水开始前 30 min 至 2 h 中小尺度风速切变会明显增大;辐合的表现形式多为在雷达径向上出现正负速度,且正速度靠近雷达一侧。强降水出现在辐合的一侧,并且反射率因子大值区和辐合线的位置非常吻合;气旋式辐合的出现也表明风暴有一定的组织性,预示短时强降水将持续和发展。气旋式辐合的正负速度较大,可超过 $15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,有的甚至达到了中气旋的强度。

(6)边界层急流、中低空急流的加强也是短时强降水预警的重要指标,边界层急流早在强降水开始前半小时就显著增强,强降水开始时中低空急流开始有所加强。 1 h 内边界层急流可增强 $6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右,中低空急流增加的稍少,约为 $2\sim 4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。这点和以上的大尺度分析相吻合。

(7)通过分析径向速度场特征对分钟雨量的影响,可见径向速度场特征会较强降水提前数分钟出现,其维持的时间略大于强降水持续时间,且当速度场特征增强时雨强加大。因此,可通过分析径向速度场的中小尺度辐合来预测强降水的生消发展,这较反射率因子有一定优势。

参考文献

- [1] Wim Klaassen. Determination of rain intensity from Doppler spectra of vertically scanning radar[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1989, 6(4): 552-562.
- [2] Hosking J G, Stow C D. Ground-based, high-resolution measurements of the spatial and temporal distribution of rainfall[J]. Journal of Applied Meteorology, 1987, 26(11): 1530-1939.
- [3] Marks F D Jr. Evolution of the structure of precipitation in Hurricane Allen[J]. Monthly Weather Review, 1985, 113(6): 909-930.
- [4] 姚莉,李小泉,张立梅. 我国 1 小时雨强的时空分布特征[J]. 气象, 2009, 35(2): 80-87.
- [5] 杨诗芳,郝世峰,冯晓伟,等. 杭州短时强降水特征分析及预报研究[J]. 科技通报, 2010(4): 2378-2390.
- [6] 叶谦,谢安,刘霞. 三峡东区春季首次强降水的气候特征[J]. 高原气象, 1999, 18(1): 71-78.
- [7] 殷雪莲,郭建华,董安祥,等. 沿祁连山两次典型强降水天气个例对比分析[J]. 高原气象, 2008, 27(1): 184-192.
- [8] 周淑玲,吴增茂,闫丽凤. 山东半岛一次强暴雨的分析和数值模拟[J]. 高原气象, 2008, 27(5): 1149-1160.
- [9] 杨贵名,毛冬艳,姚秀萍. “强降水和黄海气旋”中的干侵入分析[J]. 高原气象, 2006, 25(1): 16-27.
- [10] 屠妮妮,陈静,何光碧. 高原东侧一次大暴雨过程动力热力特征分析[J]. 高原气象, 2008, 27(4): 796-806.
- [11] 廖胜石,罗建英,姚秀萍. 广东西江流域致洪暴雨过程中尺度特征及机制分析[J]. 高原气象, 2008, 27(5): 1162-1171.
- [12] 井喜,李栋梁,李明娟. 青藏高原东北侧一次突发性大暴雨环境场综合分析[J]. 高原气象, 2008, 27(1): 46-57.
- [13] 王丽荣,汤达章,胡志群. 多普勒雷达对华北春季强降水过程的动力学诊断[J]. 高原气象, 2006, 25(3): 509-515.
- [14] 应冬梅,许爱华,黄祖辉. 江西冰雹、大风与短时强降水的多普勒雷达产品的对比分析[J]. 气象, 2007, 33(3): 48-53.
- [15] 陈秋萍,黄东兴,余建华,等. 闽北前汛期短时强降水与雷达回波特征[J]. 气象, 2001, 27(8): 48-53.
- [16] 丁一汇. 高等天气学[M]. 北京:气象出版社, 2005: 443-443.
- [17] Doswell III C A, Brooks H E, Maddox R A. Flash flood forecasting: An ingredients-based methodology [J]. Weather Forecasting, 1996, 11: 560-581.
- [18] 郑仙照,寿绍文,沈新勇. 一次暴雨天气过程的物理量分析[J]. 气象, 2006, 32(1): 102-106.
- [19] 陈春艳,孔期,李如琦. 天山北坡一次特大暴雨过程诊断分析[J]. 气象, 2010, 38(1): 72-80.
- [20] 王晓芳,黄华丽,黄治勇. 2010 年 5—6 月南方持续性暴雨的成因分析[J]. 气象, 2011, 37(10): 1206-1215.