

文章编号: 1004- 4574(2009) 05- 0119- 08

珠江三角洲大暴雨的多普勒特征及形成机制

伍志方, 曾 沁, 胡 胜, 叶爱芬

(广州中心气象台, 广东 广州 510080)

摘 要: 利用广州 CINRAD-SA 新一代多普勒天气雷达资料, 结合天气形势分析, 研究了华南地区夏季短时大暴雨的发生、发展过程, 特别是中小尺度系统引发短时大暴雨不同发展阶段的多普勒特征以及辐合强度与短时大暴雨的关系, 并对短时大暴雨的发展机制进行了初步探讨。通过分析发现, 短时大暴雨产生于低空强盛西南气流等有利条件下, 近地层雨区附近的气旋式扰动有利于激发对流, 抽吸作用、局地锋生对对流的维持和加强起到了十分重要的作用。在短时大暴雨发生初期及发展旺盛期, 大多数都伴有逆风区、辐合带等多普勒特征, 中气旋更是与高强度降水、地面强风等剧烈天气密切相关。

关键词: 多普勒天气雷达; 短时大暴雨; 中气旋; 相对散度

中图分类号: P462.62

文献标识码: A

Doppler characteristics and cause mechanism of severe torrential rain in Pearl River Delta

WU Zhifang ZENG Qing HU Sheng YE Aifeng

(Guangzhou Central Meteorologic Observatory, Guangzhou 510080 China)

Abstract An overview of conditions associated with the local very-short-range torrential rains is presented with emphasis on the initiation and development characteristics of severe rainstorm using data from a new generation of Doppler weather radar (CINRAD-SA) in Guangzhou, combined with evolution of environmental characteristics by conventional weather observation networks most relevant to the forecasting of torrential rains. It is focus on analysis of the Doppler character occurring in different development stage of the torrential rains induced by meso-scale weather system and the relationship between intensity of convergence and torrential rains. It is found that the severe rainstorm occurring in favorable synoptic conditions with multi-cells echo band is consistent with its moving direction. The meso-cyclonic convergence (even the meso-cyclone feature) is found in strong cell with relative long life time. The "inverse-wind region" and the local frontogenesis play an important part in convection development and maintenance.

Key words Doppler weather radar; short time torrential rains; meso-cyclone; relative divergence

短时大暴雨是一种发生在狭小的有限区域内、持续时间短、3h内雨量超过100mm、有时甚至伴有强风的强对流天气。因其带来的剧烈强对流天气现象在很短时间内发生, 极易发生泥石流、洪水、城市内涝等, 严重威胁着人民的生命和财产安全, 黑龙江沙兰惨剧正是由突发短时大暴雨造成的。但由于其突发性和地方性,

收稿日期: 2008-03-13 修订日期: 2009-05-19

基金项目: 广州市科技局科技攻关项目(2005Z3-E0191); 广东省科技厅项目(2006B37202003)

作者简介: 伍志方(1964-), 女, 研究员, 主要从事雷达气象学应用研究. E-mail: zhifang_wu@tm.com

并且维持时间较短,用常规天气观测资料对其监测和预报都很困难。随着探测技术的发展,多普勒天气雷达所提供的丰富资料,使我们对引发此类突发短时大暴雨天气的中小尺度系统的发生发展过程及其结构特征有一定的了解,并由此提高对其的监测和预报能力。

暴雨研究一直是国内外研究的重点,倪允琪等^[1]开展了对长江中下游梅雨锋暴雨形成机理以及监测与预测理论和方法的研究,取得了一系列重要的研究成果。随着新一代天气雷达逐渐在全国布网后,利用新一代天气雷达开展暴雨监测研究越来越多,陈列等^[2]利用多普勒雷达资料反演出三维风场分析暴雨中尺度结构,阿迈德·迪狄安等^[3]联合雷达卫星估算大尺度流域降水量,伍志方等^[4]对中小尺度系统各种多普勒特征进行分型,还详细分析了强对流天气径向速度及其散度的变化^[5]。但目前对于在珠江三角洲地区经常发生的暖区短时暴雨的研究相对较少,而且主要是从天气形势方面着手分析^[6]。本文主要利用广州 CNRAD-SA 新一代多普勒天气雷达观测资料,结合天气背景资料,对珠江三角洲地区暖区短时大暴雨过程的发生、发展过程,特别是与系统发展密切相关的中小尺度系统多普勒特征及辐合强度与短时大暴雨的关系进行了详细分析,并对短时大暴雨的形成机制做了有益的探讨。

1 短时大暴雨分析资料的选取及发生的天气背景

1.1 分析资料的选取

本文分析了 2002–2005 年出现的短时大暴雨天气,着重给出了发生在夏季天气的环境场及系统发生发展的中尺度特征之共性(表 1 中个例的特征尤为典型)。鉴于雷达资料及对流性天气的特点,若用常规的天气分析方法对这类天气系统特征做合成分析,可能会抹杀了其特有的基本特征。因此本文对所有短时大暴雨天气环境场、雷达回波特点及系统结构和中小尺度特征做逐个分析后,总结出其共有特征,然后以典型个例加以说明。

表 1 典型个例的基本情况

Table 1 Basic situation of typical example

	强降水发生时间	地点	3h 降水量 /mm	过程总降水量 /mm	降水持续时间 /h	其它天气特征
个例 I	2002 年 5 月 21 日 06 时	广州市区	101.7(荔湾)	118.6	6	大风 29.9m/s
个例 II	2002 年 7 月 20 日 06 时	从化(A区)	126.2(龙潭)	217.5	6	无
		花都(B区)	33.7(花东)			
个例 III	2003 年 05 月 04 日	珠海	131.9(赛车场)	336.1	14	大风 17.1m/s
个例 IV	2003 年 5 月 14 日 17 时	佛山(A区)	127.2(南海)	137.5	6	大风 17.0m/s
		广州市区(B)	114.1(大石)	127.4		
个例 V	2003 年 6 月 11 日 12 时	广州市区	102.6(文冲)	110.4	6	无

1.2 短时大暴雨发生的天气背景

夏季华南地区的天气变化与西南季风的的活动密切相关,在低层常有低空急流出现。短时大暴雨天气发生前,在雨区西南方 700hPa–850hPa 上有低空急流活动,并向此区域输送暖湿空气,利于低层出现条件性不稳定。近地层雨区附近有气旋式扰动存在,并随低空急流向前传播,利于激发对流。在地面,雨区及相邻地区多已出现阵性降水,地面增湿明显,但 25°N 以南无明显冷空气活动,暴雨区远离锋面。雨区上空高空(200hPa)一般为辐散区。

2 引发短时大暴雨天气的中小尺度系统雷达回波演变特点

引发短时大暴雨天气的中小尺度系统雷达回波演变过程主要可分为两大类,一类是回波的走向与移向一致,使得多个单体穿越同一地区,容易造成局地大暴雨,如所选个例 I、II 和 V;另一类是回波从不同方向向辐合区汇聚加强,如个例 IV;个例 II 则二者兼而有之,沿着辐合带,有 5 条回波带经过同一地区。

2.1 回波带的走向与移向一致

多个单体逐次穿越同一地区是造成局地大暴雨的重要原因之一。以个例 I 为例。如图 1 所示,06–09 时(北京时,下同)排列成西南—东北向的回波带,由西南向东北方向移动,分 4 次从广州市偏西地区穿过,造成该地短时大暴雨。

最强的降水是由第 2 次穿越的单体 C 造成的, 每小时的降水量高达 66 mm, 强降水维持时间相对较长; 同时造成了部分地区的局地强风, 最大风速高达 29.9 m/s。单体 C 的强度最强, 达 55 dBz, 50 dBz 的强回波面积最大, 40 km 以上。第 1、3 次强降水主要缘于单体的合并加强, 使得合并后的单体强度增强, 面积扩大, 结构更加密实, 1h 降水量超过 20 mm。第 4 次穿过广州偏西地区的是新生单体, 回波强度弱, 面积小, 降水量较小。

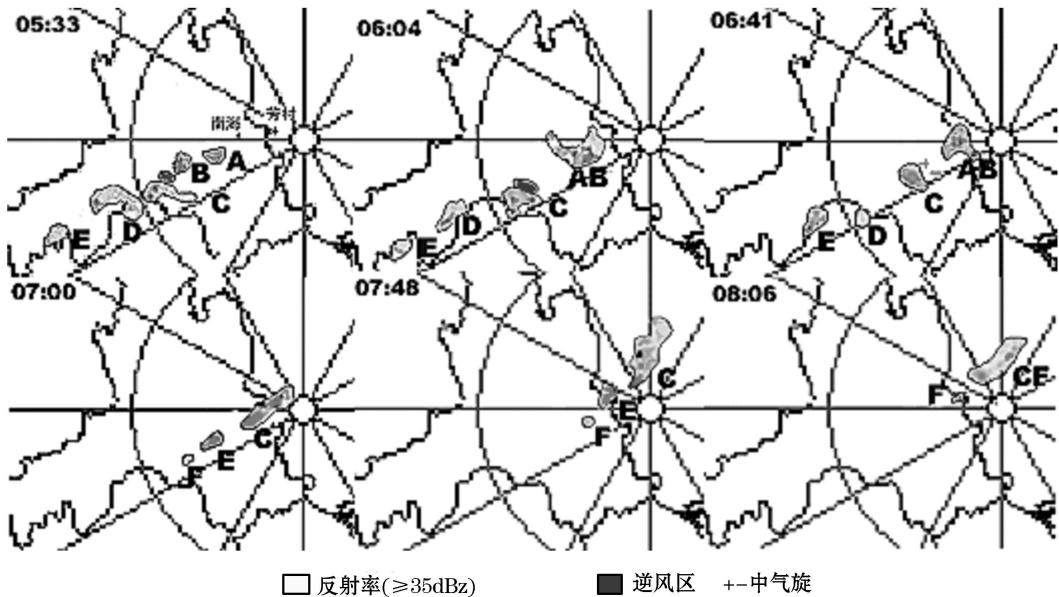


图 1 雷达反射率回波的演变及其与中气旋和逆风区相对位置

Fig 1 Evolution of reflectivity echo and relative location between echo and meso-cyclone/inverse wind area

2.2 辐合短带上的强降水

沿着(或在)辐合短带(两侧)不断新生单体, 并从不同方向向辐合区汇聚加强是辐合短带上强降水最明显的特点。图 2 是个例 IV 强度回波及其对应速度特征的变化过程。

(1) 在辐合短带北侧气旋式扰动最强烈的区域, 沿辐合短带不断有新的回波单体生成, 并随辐合短带东移过程中顺轴向合并加强, 形成强回波带(D);

(2) 辐合短带两侧新生的回波单体(群)(B和C)都朝着辐合短带方向运动, 并不断增长加强;

(3) 强回波带 D、单体 C 和单体 B 东段分别从北、西南、西 3 个方向向辐合短带北侧气旋式扰动最强烈区域合拢, 形成完整的、强度最强的强回波块 BCD, 大于 50 dBz 的强回波近似于椭圆状, 面积约 65 km × 25 km, 并伴有中气旋出现, 造成佛山南海、广州大石一小时降水量达分别达到 84.9 和 76.1 mm 的特强降水。这些现象都表明辐合带北侧, 辐合上升最强, 最有利于单体生成、发展、加强。

(4) 在辐合短带北侧出现了尺度更小的逆风区 n1, 其东移速度比辐合短带快, 在逼近并超越辐合短带的过程中, 逆风区不断增长壮大, 转变成更加激烈的中气旋(MC)。由此表明当小尺度扰动与中尺度辐合带叠加时, 扰动更加剧烈、上升更加强烈, 造成的天气也更加剧烈。

(5) 强单体 BCD 缓慢向南移动, 随着辐合短带的逐渐减弱慢慢分裂减弱, 该中-β 尺度系统维持了 8h 以上。

3 辐合强度和逆风区对短时大暴雨的影响

3.1 逆风区的出现使单体明显增强

当单体进入逆风区后, 对流发展更加旺盛, 维持时间长, 强度和强回波范围迅速扩大。所谓“逆风区”指的是在一大片正速度(或负速度)区中出现的一小块负速度(或正速度)区域, 有零速度圆环或半圆环将二者隔开。”逆风区“的出现, 表明此处存在着明显的风向切变或辐合。有资料证明, 当回波进入逆风区时, 单体周围近地层附近的气流辐合上升, 使得对流发展更加旺盛, 强度往往会迅速增加, 回波范围扩大, 造成更强烈

的降水。因此可以说逆风区是出现强降水的一个重要指标。

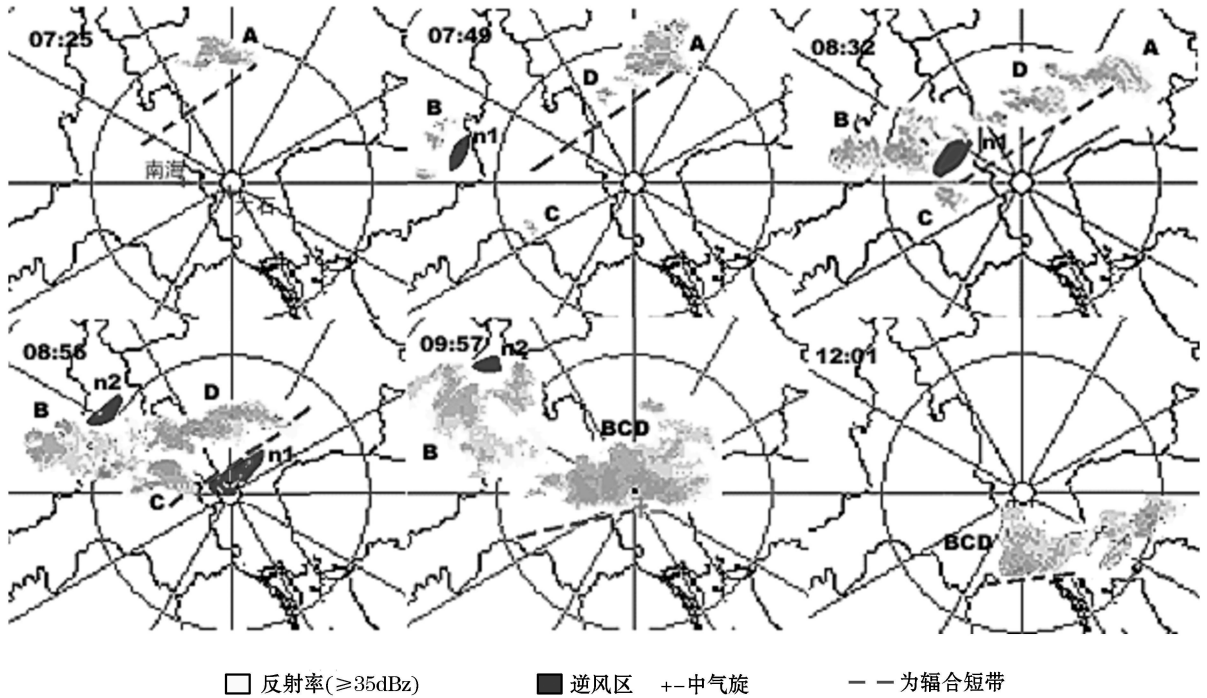


图 2 辐合短带上雷达反射率回波和逆风区的演变及其与中气旋相对位置

Fig 2 Evolution of reflectivity echo near short convergence band and inverse wind area and relative location between echo and meso-cyclone

如图 1 所示, 径向速度图上与单体 C 对应位置前方, 在一大片负速度区中出现了一小块 +5m/s 的速度区, 且被零速度环包围。即“逆风区”, 如图 3(a) 中圆圈所指。单体 C 进入逆风区后, 强烈的辐合上升运动, 不断将低层丰沛的暖湿气流带往中高层, 使得单体 C 内的对流更加旺盛, 单体 C 的强度明显增强, 范围扩大, 尤其是强回波的面积显著增加。逆风区维持了近半小时, 使得单体 C 内的强盛对流也能维持相对长的时间。

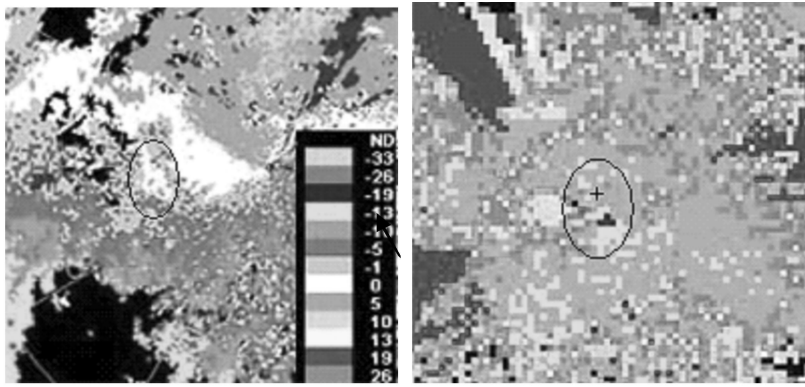
“逆风区”的出现大大提高了对强降水的预测时间。在径向速度图上出现“逆风区”的时间与单体 C 对广州偏西地区造成明显降水的开始时间相比, 大约提前了近 1.5h。

3.2 气旋式辐合与雨强和天气的剧烈程度

局地强降水区在雷达平均径向速度图或相对径向速度图上, 表现为明显的中尺度气旋式辐合区或逆风区, 中尺度气旋式辐合区的强度可达中气旋。当该区有中气旋出现时, 甚至伴有局地强风等强对流天气。

由图 2 和图 3(b) 可见, 当个例 IV 中的数个单体从 3 个方向向逆风区靠拢, 并进入逆风区, 合并发展至最旺盛前, 在相对径向速度图上与椭圆状强回波相对应的前方出现了气旋式辐合速度对, 旋转速度逐渐加强, 最强盛时约为 22.0m/s。这种结构在 2.4° 也可见, 且持续了 3 个体扫时间, 根据中气旋的定义^[7], 可将其认定为中等强度的中气旋。显然, 该中气旋是由逆风区演变而来的。从某种意义上来说, 逆风区也是一种小尺度的强烈辐合。中气旋的出现往往预示着更加强烈天气的发生。事实上, 从此后的多普勒强度图上可以看见, 在单体 C 移向的右侧, 出现了高反射率梯度区和比较宽广的弱回波区, 地面出现了 1h 降水高达 76.1mm 的短时暴雨和强风等很激烈的天气。

为方便分析多普勒特征民雨强的关系, 根据回波强度的变化和降水强度简单地将短时暴雨的生命史划分为发生期、发展期和衰减期。发生期: 回波增长迅速, 降水强度 < 50mm; 发展期: 回波强度 > 50dBz 降水强度 ≥ 50mm; 衰减期: 回波强度 < 50dBz 或减弱较明显, 降水降强度 < 20mm。将不同时期的多普勒特征和雨强列于表 2。从表 2 中可以看到, 个例 II 仅有中尺度气旋式辐合和逆风区, 而个例 I 除上述两种速度特征外, 还有中气旋出现。在降水发生期, 两例中雨强相仿, 并且都有中尺度气旋式辐合区。而在降水发展期, 有中气旋出现的雨强要比没有的大 20%, 并伴有局地强风, 当时地面录得的最大风速为 29.9m/s。



(a) 2002年 5月 20日径向速度图(仰角 0.5° , 圆圈中为逆风区) (b) 2003年 5月 14日径向速度图(仰角 1.5° , 圆圈中为中气旋“+”为雷达站)

图 3 与短时大暴雨密切相关的逆风区和中心气旋

Fig 3 Inverse wind area and meso-cyclone related with short time torrential rains closely

表 2 辐合强度及逆风区与雨强的关系

Table 2 Relationship between convergence intensity/inverse wind area and rain intensity

	发生期		发展期		衰减期	
	最大雨强/($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)	速度特征	最大雨强/($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)	速度特征	最大雨强/($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)	速度特征
个例 I	29	气旋式辐合、 逆风区	66.0	中气旋	3.7	无
个例 II A 区	30.9	气旋式辐合、 逆风区	54.2	气旋式辐合、 逆风区	12.4	无
个例 II B 区	21.2	逆风区		无	10.8	无
个例 III	0.0	无	80.3	中气旋 辐合短带	0.0	无
个例 IVA 区	0.0(南海)	无	84.9	辐合短带、逆风区 中气旋	11.5	无
个例 IV B 区	9.0(大石)	无	76.1	辐合短带 中气旋	0.0	无
个例 V	5.3	无	55.2	辐合短带	1.7	无

由表 2 还可以看出, 有逆风区出现, 并有中尺度气旋式辐合的降水可以维持并发展, 而无中尺度气旋式辐合出现的区域, 仅有短时降水, 但降水不能发展。

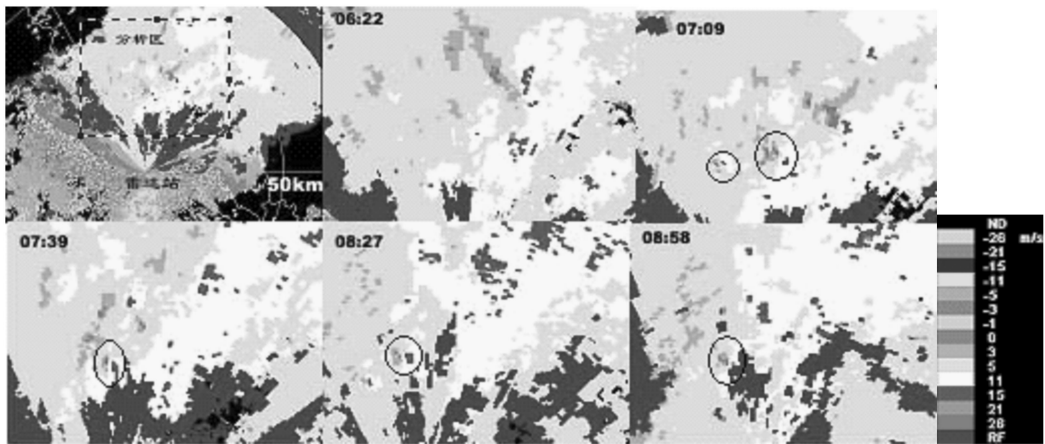
为进一步了解雨强与气旋式辐合强弱之间的关系, 以个例 II 为例计算了发生短时大暴雨时雨区中心附近的平均径向散度, 特征长度取为 4km , 并与同时段的雨区中心降水强度进行比较, 结果如图 4 所示。

由图 4 可以看出, 在发生短时局地大暴雨的 3 个时段内, 06–07 时的降水强度最小, 对应的平均径向散度之和为最大, 即辐合最弱; 而 07–08 时是降水强度最大的时段, 相应的平均径向散度之和为最小, 即辐合最强。因此, 降水强度与平均径向散度成反比关系, 即辐合弱的时段, 降水强度小, 辐合强的时段, 降水强度大。

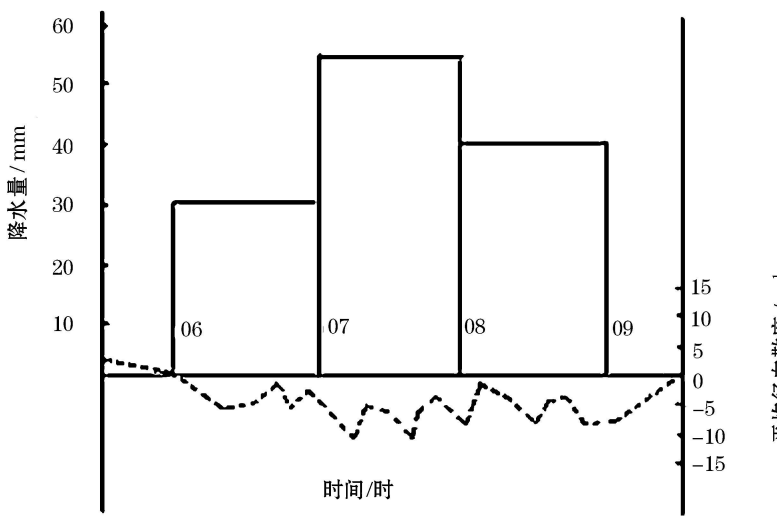
在降水强度强的 2 个时段内, 平均径向散度呈多峰型。相应地, 从平均径向速度图上可以看到, 在此时段内有多数小尺度气旋式辐合速度对生成, 并经过同一地区。每一速度对到达雨区中心附近时, 都使平均径向散度达到峰值。

4 短时大暴雨强天气特征发展的可能机制

短时大暴雨天气中除出现大暴雨外, 还伴有局地强风等, 这类强对流天气除了在适宜的环境场中被触发外, 还须有适当的环流配合, 使其能够发展维持。



(a) 2002年07月20日相对径向速度图(左上图中虚线内为分析区, 其它图中圆圈内为气旋式辐合对)



(b) 平均径向散度与雨区中心降水量的关系

图 4 平均径向散度与雨区中心降水量的关系

Fig 4 Relationship between mean radial divergence and the precipitation at center of rain area

4.1 质量调整对强对流发展的作用

在天气背景分析中,发现雨区及其前方(降水系统移来的方向),高层为辐散区,低层为辐合区,这种配置对于对流的发展是有利的。

用高层散度 D_H 与低层散度之差 D_L 表示的相对辐散场 ΔD , 是表示系统发展的量,它代表整个气柱内高低层间质量的相互补偿,近似地有 $-\omega \propto \Delta D$, 故常以 ΔD 表示中层的垂直运动,可用 ΔD 讨论对流发展。在实际大气中,辐合辐散可能是多层相互交叠的,若各层辐合、辐散之总和表现为辐散,即 $\Delta D > 0$ 则利于对流的发展,也就是通常所说的“抽吸作用”。

图 5 是个例 II 降水发生前相对辐散场 ΔD 和西南低空急流的相互配置及雷达回波的相对位置。在降水发生前,雨区及其前方为 $-\Delta D$ 正值区,19日 20 时 ΔD 的极值达 $4.0 \times 10^{-5} \cdot s^{-1}$,正好对应于发生大暴雨的区域。此时系统正处于发展中,在此区内,对流发生向前移动,如前所述,这种配置利于对流的发展,并促进强对流天气的发生和维持。在降水后期 ΔD 明显减弱,7月 20 日 08 时, ΔD 的极大值仅有 $3.1 \times 10^{-5} \cdot s^{-1}$, 嗣后对流减弱,降水减小至消失,天气结束。由此可知, ΔD 强度变化对系统发展、移动有一定的指示意义,其分布与当时的对流上升运动有一定的对应关系。

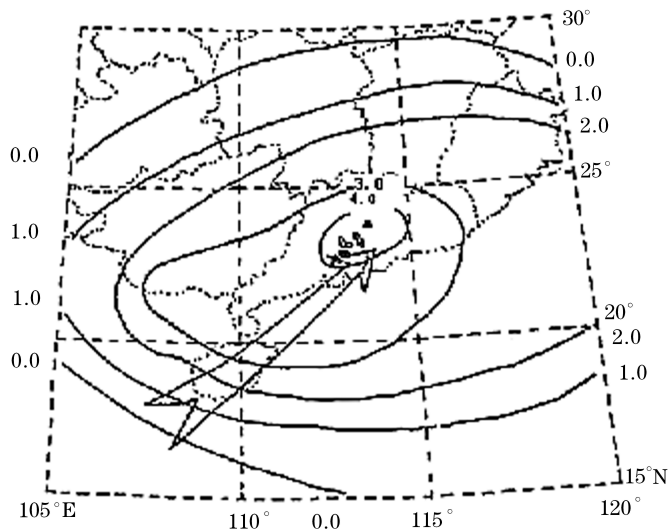


图 5 2002年 7月 20日降水发生前相对辐散场 ΔD 和西南低空急流的相互配置以及雷达回波的相对位置

Fig 5 Collocation between relative divergence field ΔD and south-west low-level jet stream, and relative location of satellite echo before occurrence of precipitation on 2002-07-02

4.2 局地锋生增强对流发展

低层暖湿、高层干冷, 呈条件性不稳定的热力结构, 加上低层的辐合, 利于对流的形成。水汽抬升凝结, 释放潜热, 使对流加强。高层流出的下沉偏冷空气, 携带降水, 使冷空气堆积, 产生局地锋生。由于锋区非地转作用, 使得底层流出气流, 径向分量增加, 增加辐合, 对对流产生正反馈^[8]。因此降水不但没有使单体内部的对流削弱, 反而加强, 使强回波能够维持较长时间。

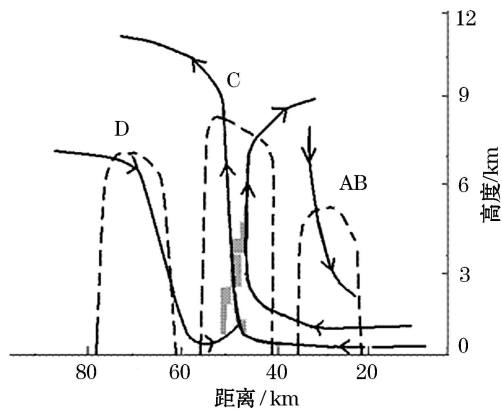


图 6 由同方位基本反射率和径向速度剖面图推导出的局地锋生示意图

图中虚线表示 ≥ 35 dBz 回波廓线, 为 ≥ 50 dBz 的强回波。

Fig 6 Sketch of local frontogenesis deduced by same azimuthal basic reflectivity and radial velocity profile

图 6 是以个例 I 为例, 比较个例 I 中同一时刻的强度剖面 (RCS) 和速度剖面 (VCS) (图略)。RCS 上的强回波位于 60 km 左右, 50 dBz 强回波高度 5 km。但在 VCS 上, 强下沉气流区并非与之位置重叠, 或前或后。云底有明显辐合, 云顶存在着明显辐散。表明降水拖曳的下沉冷空气在强回波单体周围形成局地冷空气堆, 产生局地锋生, 使得强回波单体下部的辐合增强, 是强单体内部对流得以维持的另一个重要原因。

5 结语

本文利用广州 CNRAD-SA 新一代多普勒天气雷达资料, 结合天气形势分析, 研究了华南地区发生的

短时大暴雨天气发生发展的特征。

(1)低空急流使低层明显增湿、增暖,造成低空层结条件不稳定。低空急流的摆动和近地层扰动随着急流向前传播,诱发强对流;而强烈的抽吸作用,使得对流能够维持并加强。

(2)在雷达回波图上表现为多个单体合并加强后,排列成的回波带走向与移向一致,接连从同一地区穿过,造成短时大暴雨。

(3)与强降水相对应的雷达速度图上,表现为逆风区。当单体进入逆风区后,单体内对流发展更加旺盛,强度增加,回波范围扩大,造成更强烈的降水。同时逆风区维持了较长时间,使得单体内的强盛对流也维持了相对长的时间。

(4)发展旺盛单体内,雷达径向速度图上有明显的中尺度气旋式辐合区,其强度可达中气旋,并且有弱中气旋出现的雨强比没有的大 20% 左右,同时伴有强风。因此在局地强降水区,中尺度气旋式辐合的强度与降水区是否出现局地强风等剧烈天气现象密切相关,并决定了降水能否得以维持和发展。

(5)雷达径向速度图上的逆风区和中尺度气旋式辐合都是出现强降水的重要标志。有逆风区出现,并有中尺度气旋式辐合的降水可以维持并发展,而无气旋式辐合出现的区域,仅有短时降水,且降水不能发展。

(6)高层流出的下沉偏冷空气携带降水,使冷空气堆积,局地锋生对对流产生正反馈,使单体内对流加强,强回波能够维持较长时间。

参考文献:

- [1] 倪允琪,周秀骥. 长江中下游梅雨锋暴雨形成机理以及监测与预测理论和方法 [J]. 气象学报, 2004 62(5): 647- 662.
- [2] 陈列,寿绍文,林开平等. 应用多普勒雷达资料反演风场作暴雨中尺度分析. 南京气象学院学报, 2003 26(3): 358- 363.
- [3] 阿·迪·迪阿罗,刘晓阳,毛节泰,等. 卫星雷达联合重构大尺度流域降水场 [J]. 高原气象, 2004, 23(1): 11- 17.
- [4] 伍志方,叶爱芬,胡胜. 中小尺度系统多普勒统计特征 [J]. 热带气象学报, 2004 20(4): 391- 400.
- [5] 伍志方,张春良,张沛源. 一次强对流天气的多普勒特征分析 [J]. 高原气象, 2001 20(2): 202- 207.
- [6] 熊亚丽. 5月 3~ 5日珠江三角洲暖区强降水过程分析 [J]. 广东气象, 2004(2): 30- 34.
- [7] 俞小鼎,姚秀萍,熊廷南,等. 多普勒天气雷达原理与业务应用 [M]. 北京: 气象出版社, 2006.
- [8] 杨明,陈永胜. 梅雨期暴雨的边界层锋生 [M] // 华东中尺度天气试验论文集,总参气象局, 1986 117- 122.