广州短时大暴雨多普勒特征和成因分析

伍志方　易爱民　叶爱芬　张东

(广州中心气象台 ,广州 510080)

摘要　利用广州 CINRAD-SA 新一代天气雷达各种产品 ,对发生在广州市的一次短时大暴雨的多普勒特征进行了详细分析 ,同时分析了该过程的天气特征及其变化 ,探讨了短时大暴雨的成因 。结果表明 :此次短时大暴雨产生于低空急流 、低层辐合 、高层辐散的强抽吸作用的有利环流背景下 ,由多个单体排列成与单体移动方向一致的走向 ,依次穿越同一地区造成的 。强度最强 、强回波维持时间最长的单体同时伴有弱中气旋特征 ,并与强降水发生区域相对应 。逆风区对对流的维持和加强起到了十分重要的作用 。

关键词　新一代天气雷达　短时大暴雨　多普勒特征

引言

近年来大中城市因突发性短时暴雨频发城市内涝 ,社会反响巨大 ,因而受到越来越广泛的关注 。2002 年 5 月 21 日清晨 06 :00 ~ 09 :00(北京时 ,下同) ,正值上学上班的高峰时间 ,广州市区电闪雷鸣 ,大雨如注 ,近百棵大树断枝或连根拔起 。许多民居进水 ,十几条主要道路大水漫街 ,交通严重堵塞 。市区大部分地方 3 h 降水量接近或超过 50 mm(图 1) ,降水量最大的荔湾区 3 h 累计雨量达到 102 mm ,降水强度之大 、突发性之强是近几年罕见的 。但东南部的降水量却只有十几毫米 ,降水分布不均匀 。

暴雨作为主要的自然灾害 ,一直是国内外研究的重点 。薛纪善[1]等对华南夏季大范围持久性特大暴雨进行了比较全面的研究 ,倪允琪等[2]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 。陈列等[3]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 ,伍志方等[4,5]对强降水 、冰雹的各种多普勒特征进行了统计分析 ,还对暴雨预报方法做了研究[6,7] 。本文应用广州 CINRAD-SA 新一代天气雷达各种产品 ,对短时大暴雨的多普勒特征进行了详细分析 ,同时结合环流背景的分析 ,对短时大暴雨的成因进行了探讨 。

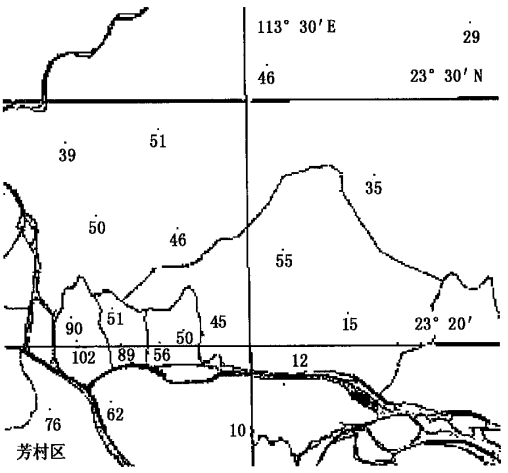

图 1　2002 年 5 月 21 日 06 :00 ~ 09 :00 广州市区降水量分布
(其中粗线为珠江水网 ,细线为行政区界线)

1　短时大暴雨发生的天气形势分析

1 .1　低空急流的变动及其可能影响

在 850 hPa 上 ,2002 年 5 月 20 日 08 :00 中心位

广东省科技厅课题(2003C32607)和广东省气象局重点项目(200301)共同资助

作者简介 :伍志方 ,女 ,1964 年生 ,高级工程师 ,主要从事雷达气象学应用研究和短时预报工作

收稿日期 :2005 年 3 月 28 日 ;定稿日期 :2005 年 7 月 5 日

于湘黔桂交界处的西南涡加强东移,华南地区上空出现了明显的低空急流,急流轴呈西南—东北向,广州位于其前部的辐合区内,增湿明显。20 日 20:00(图 2),急流区继续向东北方向伸展,直达广东省的中西部,暖湿舌亦随急流向东北方向扩展,此形势有利于低层条件性不稳定的加强和扩展;同时珠江三角洲附近西南风与南风的辐合加强,有利于水汽的积聚和上升运动发展。21 日 08:00,急流区向南摆动激发对流。

20 日 20:00 近地层(925 hPa,图略),珠江口附近有一气旋式扰动,随低空急流的伸展向前传播,并有明显的暖湿舌东进,与 850 hPa 的特征一致。随着急流的南压,动量下传,使得低层风速加强。地面图上,华南地区受低压槽控制,自 19 日晨起,广州及邻近地区就出现了阵雨或雷雨天气,部分地区还出现了暴雨。尤其是 20 日 23:00 后,不时有阵雨降落,地面增湿十分明显。

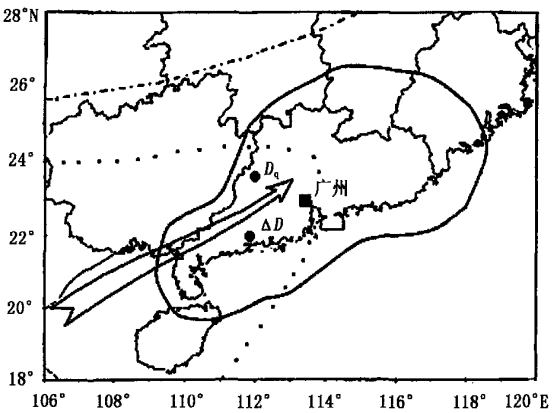

图 2 5 月 20 日 20:00 天气系统与物理量合成分析图(点划线和虚线分别为 850 hPa 的切变线和暖湿舌区,双箭头为 850 hPa 急流轴,实线为相对辐散 ΔD)的正值区,中心位于●ΔD 处,● D_q 为水汽通量辐合,■为广州所在地)

1.2 中高层的形势演变特征

500 hPa 华南地区一直处于弱脊区边缘,副热带高压位于南海北部,南支槽前的西南气流不断增强并发展成为急流。高层 200 hPa 华南处于脊区控制中,随着高空脊北伸,分析区内的高层径向风(北风)分量增强。而低空急流北伸南压,径向风(南风)分量增强。因此 V_{200} - V_{700} 的风矢量差值增大,非热成风加强。

2 短时大暴雨发生的有利条件

2.1 抽吸作用对对流发展的影响

用高层散度与低层散度之差表示的相对辐散 ΔD 是表示系统发展的量,若 ΔD > 0,则有利于对流的发展,也就是通常所说的"抽吸作用"。本文计算了 200 hPa 与 850 hPa 的相对辐散场(图 2),发现在大暴雨发生前的 19 日 20:00,广东全境 ΔD 近于零,无明显的对流性天气发生。20 日 20:00,20°N 以北、110°E 以东,有一较强的 ΔD 正值区自雷州半岛东缘至南岭上空呈西南东北向伸展,中心在 22°N、112°E 处,近 $6.0 \times 10^{-5} s^{-1}$,表明此范围抽吸作用明显。该中心与 850 hPa 低空急流及与低空急流相伴的暖湿区前部基本一致,这种暖湿条件与抽吸作用的有利配合,利于对流发展和维持。在此后的 6 h,即有明显的对流单体生成,并沿急流轴向前移动,在所经地区造成强降水。21 日 20:00,ΔD 在广东全省又呈均匀的近于零的分布,此时降水天气已基本结束。

2.2 水汽的辐合与输送

充沛的水汽是暴雨的必要条件。19 日 850 hPa 在海南岛南侧上空有明显的水汽辐合,广东省中部地区亦有弱水汽辐合,20 日 20:00,自海南岛东侧至广东省中部有一水汽辐合带(图 2),其分布与低空急流前部暖湿区的伸展一致,中心强度增至 2.0×10^4 g/s。这说明暴雨过程发生前,对流层低层确实存在大量水汽,并随急流北伸被有效地输送、积聚,为暴雨的发生提供充足的水汽。21 日 20:00 广州及邻近地区无水汽辐合,强降水结束。

从 5 月 19 日 20:00 至 21 日 10:00 红外云图连续变化(图略)可以看出,大量来自南海上空的暖湿气流源源不断地输送到华南中西部,并随着低空急流的北伸东进水汽输送带也向东移,在华南中北部集聚,使得该地区明显增温增湿,为未来暴雨的发生积累了大量水汽和不稳定能量。但 21 日 11:00 起,大量水汽主要输送到巴士海峡以东洋面的热带扰动云团中,使得广州及其邻近地区的强降水结束。

2.3 季风云团高效率的降水作用

不断有季风云团自北部湾北上影响广东。21 日 02:00,有 2 小块季风云团自北部湾北上(图略),合并后亮温增强,面积扩大,其前进方向亮温梯度明显增大,其后部又新生弱的小云团,形成头大尾小的"蝌蚪"状

云团,位于广州市西南部上空。随后,面积继续扩大,但亮温明显减弱,北上东移至广州东北部。对应雷达演变图(图 3),当亮温最强时的"蝌蚪"状云团位于广州时,单体 C 正伴随着中气旋北移至广州偏西地区,由此可见,单体 C 对流发展十分强盛,伸展高度很高,造成了短时暴雨和强风等剧烈天气。

从垂直累积含水量的变化过程来看(图略),数值不是很大,一直维持在 25 kg/ m^2 左右,表明云中累积含水量不是很大。但是由于西南急流源源不断的水汽输送,使得云中累积含水量能够保持在一个比较稳定的范围内(值),保证了季风云团中不断将云水高效率地转化成雨水,再通过强烈的下沉气流,降落下来。因此单体的降水强度很高。

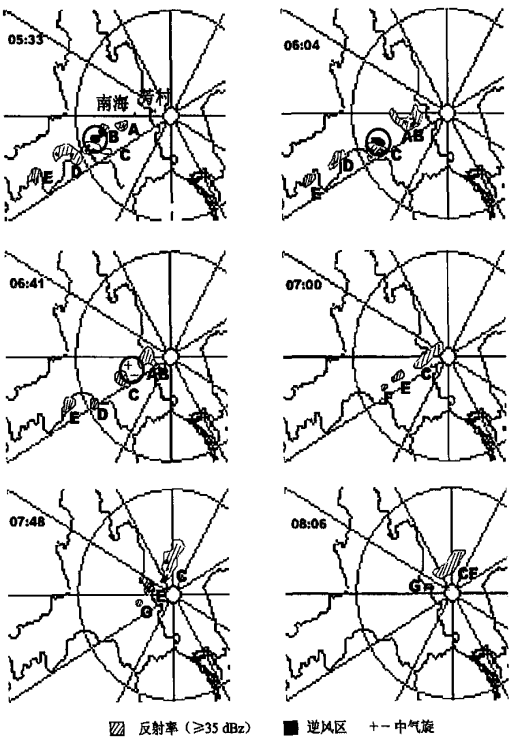

图 3　21 日强度回波和逆风区演变图及中气旋相对位置

2.4　水热条件和不稳定性

20 日 20:00 的 K 指数在广东、广西两省范围内均大于 36,广州市西北约 70 km 的清远更是高达 40 ℃,表明大气层结十分不稳定。从清远的 T - $\ln p$ 图(图略)上看,400 ~ 200 hPa 的温度递减率大于等于 8 ℃/km,地面至 700 hPa 都有西南急流,与此相伴,自北部湾至广西东部、广东中西部地区上空达到或接近饱和($T - T_d \leqslant 3$ ℃),并随急流向前伸展,且该区域内气温也较周边高出 2 ℃以上,南部更大,这种形势十分有利于暴雨天气发生。

3　雷达回波演变及多普勒特征分析

3.1　回波带的走向与移向一致

多个单体合并加强后,接二连三地穿越同一地区是造成这次局地大暴雨的重要原因之一。如图 3 所示,21 日 06:00 ~ 08:00 共有 4 块面积小、强度 50 dBz 以上的单体,排列成西南—东北向的回波带,由西南向东北方向移动,接连从广州市偏西地区的芳村、荔湾等地穿过,造成该地短时大暴雨。

05:33 位于珠江口西侧的一群杂乱无章的小单体在西南急流带中逐渐形成有组织的几个清晰的强回波中心及呈东北—西南向的回波带,带上的强回波单体,除 A 的面积较大外,其余的都较小,造成广州短时局地大暴雨的雏形就此基本形成。

05:57 单体 A 穿过珠江内河道后,断裂成东西两段,东段与其右前方新生的小单体合并后,又重新增强到 50 dBz,并于 06:18 到达广州市西南部的芳村区,成为造成广州市偏西地区大暴雨的第 1 次强降水的回波。

第 3 次强降水的雨强很大,荔湾区每小时降水量高达 66 mm,且强降水维持时间长,这主要是由单体 C 造成的。单体 C 在移动过程中与单体 A 的西段短暂相连后又断开,并在穿越南海附近的珠江内河道时略有加强,但面积很小,移速很慢。07:00 左右开始穿越芳村附近的河道时,其后方又新生一小单体,并合并到 C 中,在缓慢移动中逐渐加强,达 55 dBz,50 dBz 的强回波面积也大大增强,而且 50 dBz 以上的强度保持了 40 min 以上。

07:48 单体 E 和新生单体 F 在穿越内河道时,也合并增强至 50 dBz,成为造成广州强降水的第 3 块强回波。但由于其回波面积小,持续时间不长,因而降水强度和降水量都不大。第 3 次穿过广州偏西地区的也是新生单体,而且回波强度更弱,面积更小,降水量自然也就更少。

21 日 08:00,850 hPa 的低空急流轴线经海南三亚直指广州(图略),强度也从 12 m/s 增大到 16 m/s,与急流相伴的暖湿区也位于华南地区上空。上述回波带就在此急流前部暖湿区内,造成广州地区强降水的多个单体在低空急流前部的暖湿区内发展,并形成强降水回波,而后沿急流轴前移,表明低空急流对强降水回波有正反馈作用。

3.2 逆风区的出现使单体明显增强

第 1 次和第 3 次穿越广州偏西地区的强回波都是两块单体合并加强形成的,但强回波维持时间不长。而单体 C 大于 50 dBz 强度维持的时间最长,增长迅速,究其原因除了吸入小单体、合并增长外,最重要的因素之一就是进入逆风区后,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。

由图 3 可见,05:33 之前单体 C 范围很小,强度较弱。但在 05:33 的径向速度图上,与单体 C 对应的位置前方,在一大片负速度区中出现了一小块 +5 m/s的速度区,且被零速度环包围,即"逆风区"。随后逆风区逐渐增强,至 05:57,逆风区的范围明显扩大。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,尤其是反射率大于 50 dBz 的强回波面积显著增加。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报时效。单体 C 强回波范围明显扩大,强度增强,广州偏西地区约在 07:00 左右开始出现降水,而径向速度图上 05:33 就出现了逆风区,比降水的出现提前了近 1.5 h。

3.3 弱中气旋是强风暴的重要标志

图 4 为 21 日 06:41 的相对径向速度图。由图 3 和图 4 可见,在雷达站西南方向约 25 km 处出现了一对气旋式速度对,核区直径(即最大入流速度(负速度)和最大出流速度(正速度)间的距离)小于 10 km,转动速度(即最大入流速度和最大出流速度绝对值之和的二分之一)约为 19 m/s,这种结构在 3.4°也可见,到 06:53 仍存在。根据中气旋的识别判据[8],可以判定为弱中气旋。中气旋是与对流风暴上升气流紧密相联的小尺度涡旋,往往引发强降水和雷雨大风等强对流天气。本例的中气旋虽然强度不强,垂直伸展范围不高,持续时间也不长。但是即使如此,当单体 C 在移动前部出现中气旋后,在移向的右侧,出现了高反射率梯度区和比较宽广的弱回波区。稍后不久,广州偏西地区 1 h 降水量均超过 20 mm,荔湾区出现 66 mm 的短时暴雨,并伴有 7 级左右的强风等激烈的天气,使此次突发性短时大暴雨过程达到最高潮。

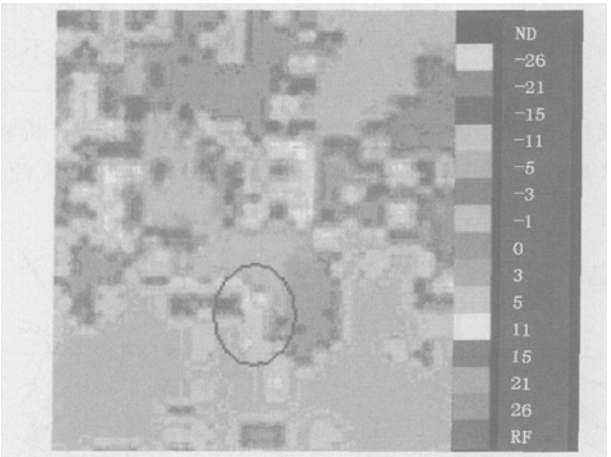

图 4 21 日 06:41 的相对径向速度(m/s)图
(仰角 0.5°,圆圈所指为中气旋)

4 结论

分析表明,本次发生在广州的短时大暴雨是在有利的天气条件下,由多个强对流单体造成的。

(1)低层低空急流对低层明显的增温、增暖作用,使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。而高层辐散、低层辐合的抽吸作用,使得对流能够维持并加强。

(2)多个单体合并加强后,排列成西南—东北向的回波带,由西南向东北方向移动,从广州市偏西地区的芳村、荔湾等地穿过,造成该地短时大暴雨。

(3)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。强度最强、强回波维持时间最长的单体同时伴有弱中气旋特征,弱中气旋是强风暴的重要标志。

(4)季风云团内云水的转化效率高,加上西南急流源源不断的水汽输送,使得云中累积含水量能够保持在一个比较稳定的范围内,强降水维持时间较长。

(5)本文仅对热带地区初夏季节一次短时大暴

雨过程做了初步研究,今后应在搜寻更完整资料的基础上,采用多种方法对此类天气发生发展的特点做进一步深入研究。

参考文献

[1] 薛纪善.1994 年华南夏季特大暴雨研究[M].北京:气象出版社,1999:65-74.

[2] 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.

[3] 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[J].南京气象学院学报,2003,26(3):358-363.

[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] 孙田文,杜继稳,张弘.突发性暴雨中尺度分离对比分析[J].气象科技,2004,32(2):66-70.

[7] 杨煜灿,谢征,王国强.回归诊断在梅雨期大到暴雨预报中的应用[J].气象科技,2004,32(2):81-85.

[8] 俞小鼎.新一代天气雷达讲义(试用)[G].中国气象局培训中心,2000.

Formation Mechanism Analysis of Very-Short-Range Torrential Rains in Guangzhou Based on CINRAD-SA Radar

Wu Zhifang　Yi Aiming　Ye Aifen　Zhang Dong

(Guangzhou Central Meteorological Office, Guangzhou 510080)

Abstract: An overview of the weather conditions associated with the very-short-range torrential rains in Guangzhou is presented, with emphasis on the evolution of environmental and several storm-cell's Doppler characteristics relevant to the forecasting of heavy rains, using data from a new generation Doppler weather radar (CINRAD-SA) in Guangzhou and conventional weather observation networks. The formation mechanisms of the torrential rains are investigated. It is found that this severe rainstorm case occurred in the favorable synoptic conditions with the multi-cell echo band orientated from northeast to southwest, being consistent with its moving direction. The weak mesocyclone features are found in the strongest cell with the longest life time. The "inverse-wind region" played an important role in the development and maintenance of convection.

Key words: CINRAD-SA, very-short-range torrential rain, Doppler characteristic