

伍志方, 曾沁, 吴乃庚, 等. 广州“5.7”高空槽后和“5.14”槽前大暴雨过程对比分析[J]. 气象, 2011, 37(7): 838-846.

# 广州“5.7”高空槽后和“5.14”槽前 大暴雨过程对比分析<sup>\*1</sup>

伍志方 曾沁 吴乃庚 叶爱芬 李怀宇 庞古乾

广州中心气象台, 广州 510080

**提 要:** 利用常规观测资料和雷达资料, 对广州 2010 年 5 月 7 日槽后大暴雨和 2010 年 5 月 14 日槽前大暴雨过程进行对比分析。结果表明:“5.7”大暴雨主要受 500 hPa 高空槽后西北气流和 850 hPa 切变线的共同作用, 与典型的华南前汛期暴雨形势不同的是槽后冷空气叠加在低层暖湿气流上, 对层结不稳定起到增幅作用;“5.14”大暴雨过程主要受高空槽前的西南气流、切变线和地面弱冷空气共同影响。两次大暴雨过程都是由带有超级单体的飑线引发的, 前者飑线长度更长, 强回波范围更大, 超级单体更多, 降水强度和累积降水量更大; 飑线维持和发展的机制不同, 前者通过补充合并两广交界处不断新生对流单体, 后者则是通过吸收合并其移动前方沿近地层辐合带新生单体, 得以维持和发展。

**关键词:** 大暴雨, 高空槽, 飑线, 超级单体

## Contrast Analysis of Two Torrential Rain Processes Under the 7 May Post-Trough and the 14 May Prior-Trough in 2010 in Guangzhou

WU Zhifang ZENG Qin WU Naigeng YE Aifen LI Huaiyu PANG Guqian

Guangzhou Central Meteorological Observatory, Guangzhou 510080

**Abstract:** The routine observational data, the NCEP  $1^{\circ} \times 1^{\circ} 6$  h analyzed data and Doppler radar information were used in comparing two heavy rain processes under the post-trough on 7 May and the prior-trough at 500 hPa on 14 May 2010 in Guangzhou. The results show that the 7 May torrential rain was caused by the shear line at 850 hPa and the northwesterly air flow after the trough at 500 hPa, which increased stratification instability when it moved over the warm and wet air mass at low levels, this differs from the traditional circulation during the pre-summer flood season in South China. The “14 May” torrential rain happened under the influences of the southwesterly air flow before the trough at 500 hPa, the shear line at 850 hPa and the cold-air injection on the ground surface. The squall line affected these two processes, in which the former had longer squall line, the larger area of the strong echo in squall line, more super cells and stronger rain intensity and higher total precipitation. The mechanisms of maintaining and development of the squall line in two processes were different in that, the former relied on the supplement and merging the new cell from the border of Guangdong and Guangxi, and the latter depended on absorbing and merging the new cell ahead of it or along the convergence zone on the ground surface.

**Key words:** torrential rain, trough, squall line, super cell

\* 国家自然科学基金(410750040)、广东省科技厅项目(200907)、广东省气象局项目(201008)和广东气象局首批科技创新团队-2 共同资助。

2011 年 1 月 8 日收稿; 2011 年 4 月 25 日收修定稿

第一作者: 伍志方, 主要从事雷达气象应用和短时/临近预报. Email: zhifang\_wu@tom.com

## 引言

华南前汛期(4—6月)冷空气逐渐减弱,西南季风加强,华南常常出现暴雨,甚至特大暴雨。为了弄清华南前汛期暴雨的特征和成因,国内和省内的气象工作者开展了大量分析研究工作。20世纪70年代和90年代开展的华南前汛期暴雨试验,获得了一批宝贵的资料,揭示出这类暴雨的大尺度环流特征和中尺度系统的演变特征及数值模拟<sup>[1-7]</sup>,广东省内专家在分析研究大量个例的基础上<sup>[8-9]</sup>,总结出了前汛期暴雨的三种主要环流形势<sup>[10]</sup>。近年来对几次大范围、持续性大暴雨的水汽输送、动力和热力结构等进行了大量深入的分析研究。何立富等<sup>[11]</sup>、熊文兵等<sup>[12]</sup>分别对05.6华南持续性暴雨过程期间冷空气影响、高低空急流耦合、大尺度水汽输送特征等进行深入分析,指出700 hPa中纬度冷空气的明显南侵对暴雨过程有重要贡献,高低空急流耦合的正反馈机制是华南暴雨异常的重要原因之一。林良勋等<sup>[13]</sup>分析指出2008年罕见龙舟水期间,每一强降水期与一次西风槽影响相联系,高空急流和低层切变线的南压过程配合一次强降水的发生。随着卫星、雷达等非常规资料的应用,逐渐开展了对前汛期暴雨中小尺度对流系统形成和发展的原因和演变特征的分析研究<sup>[14-15]</sup>。蒙伟光等<sup>[16]</sup>研究发现,对称不稳定可能是暴雨和中尺度对流系统发生发展的一种重要机制,MCS的发生发展是冷暖空气交汇的结果。张晓美等<sup>[17]</sup>、张晓惠等<sup>[18]</sup>对于地面低压倒槽及西南低空急流左侧的暴雨分析发现,暖区暴雨区斜压特征不明显,与典型华南前汛期暴雨区上空对应为南亚高压东侧向外辐散的类型不同,该暖区暴雨位于入海南亚高压西侧的偏东和偏南气流的辐散区下方。罗建英等<sup>[19]</sup>认为低空急流核以接力振荡形式快速东传导致了暖区不仅降雨量大,而且雨强比锋区降水强。

目前华南暴雨分析研究偏重于大范围、持续性大暴雨,对于主要由中小尺度对流系统引发的突发性、短时大暴雨的分析研究偏少,而对高空槽后西北气流中发生的大暴雨研究则更少;因其与典型的华南前汛期暴雨环流形势不同,且发生暴雨的概率较小;同时数值模式对这种突发性、短时暴雨的预报能力有限,因此容易引起预报员的忽视,造成实际预报结果的不尽人意。

本文主要对2010年5月7日和14日两种不同

环流形势造成的广州市两次大暴雨过程的热力、水汽、动力等环境条件和雷达特征进行了对比分析,可为前汛期华南暴雨短时和短期预报提供一些参考。

## 1 两次暴雨过程的特点和资料

2010年5月7日夜间广州地区出现了入汛以来最强降水过程,雨强和雨量都超过或接近历史记录。从五山观测站的降水记录可见(图1),降水起止时间为7日00—06时(北京时,下同),仅持续了6小时;但1小时降水量高达99.1 mm,24小时降水量213 mm,呈单峰型;东部还出现了8~11级的瞬时雷雨大风。“5.7”大暴雨具有“降水强度强、降水时间集中,造成影响大”的特点。

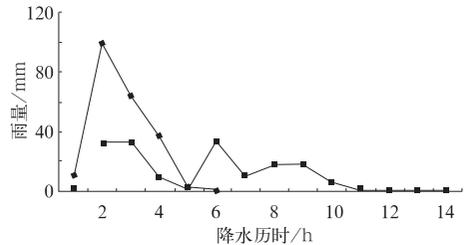


图1 广州五山观测站两次大暴雨过程雨量-时间分布

其中—◆—表示“5.7”雨量分布,  
—■—表示“5.14”雨量分布

Fig. 1 Distribution of precipitation recorded by Wushan Observation Station for two torrential rain processes in Guangzhou  
—◆— and —■— separately represent distributions of precipitation in 7 May process and 14 May process

5月14日傍晚至15日夜间大暴雨再次降临以广州为中心的大城市群,五山观测站降雨量163 mm。降水起止时间为14日18时至15日08时(图1),持续了14小时,出现了3个降水峰值,前两个均为32.6 mm左右,分别出现在14日19—21时和14日23时至15日00时;第一个峰值持续了两小时的短时强降水,第三个峰值仅为17.9 mm,持续了两小时后缓慢减弱停止。“5.14”大暴雨具有“降水时间长,影响范围大,分段降水”的特点。

两次大暴雨过程都对整个广州地区造成了严重影响,从降水强度、降水量和持续时间来看,“5.7”大暴雨比“5.14”大暴雨强度更强,降水量更大,降水更

集中,造成的损失和影响也更大。

本文所用的资料主要有常规高空和地面观测资料、区域加密气象站观测资料、多普勒天气雷达等非常规观测资料和 NCEP  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 再分析资料。

## 2 环流形势对比分析

### 2.1 “5.7”暴雨过程环流形势特征

2010年5月5—7日500 hPa亚欧中高纬环流维持着两槽一脊型(图2a和2b),高压脊位于乌拉尔山地区,呈西北—东南向,其位置和形态均与前汛期典型的华南暴雨期的两槽一脊型有明显差异。脊前西北气流不断有小槽下滑补充到位于黄海至东海的东亚沿海槽中。印度半岛有一南支槽,青藏高原东部为中纬度高压脊,印度槽缓慢东移同时不断分裂短波,与北支锋区的低槽同位相叠加,加强中纬度锋区,于6日08时移入粤北影响广东。同时,6日08时西北太平洋副热带高压(以下简称副高)加强西伸,与青藏高原东部中纬度高压脊合并,我国中纬度地区环流经向度加大,致使合并的中纬度低槽加

深,移速加快,利于在广东上空形成前倾形势。另外,副高的加强西伸,不仅使华南的高度场升高,而且加强了华南上空的锋区强度,副高脊线位于  $15^{\circ}\text{N}$ 附近,有利于华南地区增温增湿,利于对流系统的生成。850 hPa前期(3—4日)西南风强盛,经华南到达黄河流域;5日开始随着高空槽东移,切变线逐渐南压,6日08时到达湘赣南部,广东北部雨势加强。6日20时随着切变线进一步南压进入粤北山区,中北部地区对流发展并逐渐南移,6日夜间珠江三角洲地区雨势猛烈。7日08时之后随着高空槽的进一步东移出海,850 hPa切变线由东北风与西南风切变转为弱的西南风与东南风切变,并回退到湖南、江西一带。地面气压场上,前期5月1—4日华南持续了多天的高温高湿天气,4—5日西南低槽和华北气旋发展,二者连成一线呈东北—西南向,低槽区后有冷空气逐渐南压。6日白天,随着华北气旋出海,整个低槽区东移南压,华南处在低槽区中。6日20时冷锋位于广西北部,广东北部处在槽后脊前。7日08时后随着华北气旋进一步东移出海和冷高压脊加强,华北气旋和西南低槽区已完全分离,地面低槽对广东的影响趋于结束。

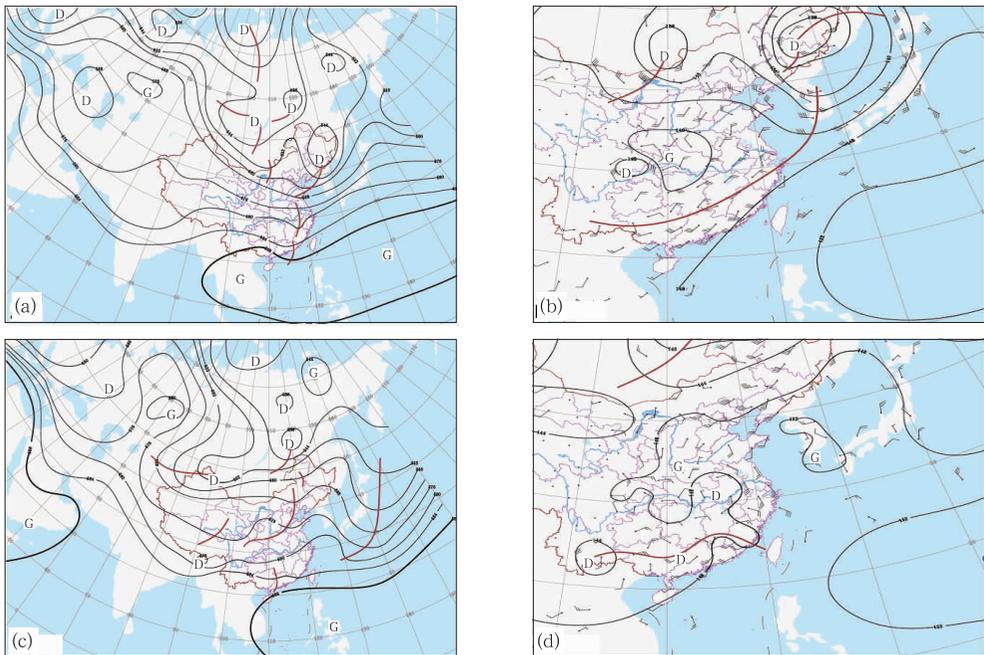


图2 2010年5月6日和5月14日20时的500 hPa,850 hPa天气形势图

(a)和(b)分别是5月6日20时500 hPa和850 hPa天气形势图;

(c)和(d)分别是5月14日20时500 hPa和850 hPa天气形势图

Fig. 2 Synoptic charts on 500 hPa and 850 hPa at 20:00 BT, May 6 and May 14, 2010  
(a) and (b) are synoptic charts separately on 500 hPa and 850 hPa at 20:00 BT, May 6,  
(c) and (d) are synoptic charts separately on 500 hPa and 850 hPa at 20:00 BT, May 14, 2010

## 2.2 “5.14”暴雨过程环流形势特征

500 hPa 高度形势场上,14 日 08 时至 15 日 08 时我国新疆到渤海的中高纬为大范围移动型西风槽活动区,呈现为两脊一槽型。阻高前部切断低压不断分裂出的西风槽和东亚脊的阻挡作用,造成西风槽下滑南下,并入加强南支波动,是广东省暴雨过程的典型形势(图 2c 和 2d)。14 日 08 时华南受较强的高空槽前西南气流控制,20 时高空槽底抵达广东省西部,15 日 08 时高空槽东移过境,广东上空转一致的偏西北流场,对流活动明显减弱。850 hPa 风场上,广东受明显的切变线影响。14 日 08 时切变线南压至粤北地区,切变南侧西南风风速较大达  $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以上;其后切变线一直在广东中北部地区维持,但切变线南侧西南风逐渐减弱,14 日 20 时西南风减弱到  $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以下。15 日随着高空槽东移减弱,切变线回退到江西、湖南中部。地面气压场上,13 日夜间开始北方弱冷空气自东路南下,14 日广东受锋面低槽影响,中北部对流发展明显。15 日 08 时之后随着冷高压东移出海,华南转受弱脊控制,降水过程结束。

## 2.3 “5.7”和“5.14”暴雨过程环流形势对比

从上面的分析可以看出,虽然两场暴雨过程中强降水都主要集中在夜间,引发暴雨过程的形势特征和影响系统完全不同。“5.7”大暴雨过程主要受 500 hPa 高空槽、850 hPa 切变线以及低层弱冷空气影响,但与典型的华南前汛期暴雨形势不同,此次过程中广东处于 500 hPa 的高空槽后西北气流中,且

切变线与地面弱冷空气前锋均在南岭以北地区。此种形势下按以往归纳的经验,广州地区出现强降水的概率较小。实际上由于前期广州地区温度较高,低层西南风水汽输送较强,低层暖湿不稳定能量较明显;低层暖湿不稳定情况下配合中层西北气流的干冷空气下传,并伴有近地面弱冷空气入侵,对激发不稳定能量释放可能反而起到增强作用<sup>[20-21]</sup>。有关 500 hPa 高空槽后西北气流控制下,广东出现暴雨的分析研究今后仍需结合更多的个例和各个层次垂直结构特点进行进一步深入探讨。

“5.14”暴雨过程主要受 500 hPa 高空槽前的西南气流控制,850 hPa 切变线位于南岭附近,地面弱冷锋南压到广东中北部,符合典型的华南前汛期暴雨形势特征。在这种形势下降水主要集中在切变线南侧和冷锋附近的广东中北部地区,广州的南湖也出现全省最大雨量。

## 3 环境条件对比分析

### 3.1 不稳定条件

由于广州本地没有探空站,因此使用广州市西北部相距 60 km 左右的清远探空站的实测资料对这两次大暴雨过程的大气层结状况(图 3)进行对比分析,并查算平衡高度等要素值列于表 1 中。5 月 6 日 08 时(图 3a)600 hPa 以上干冷,600 hPa 以下暖湿,整个层结呈现出上干下湿状态,十分不稳定;平衡高度(EL)伸展到 200 hPa 以上,表明对流可发展的顶高很高;5 月 14 日 08 时(图 3b)层结也呈现出

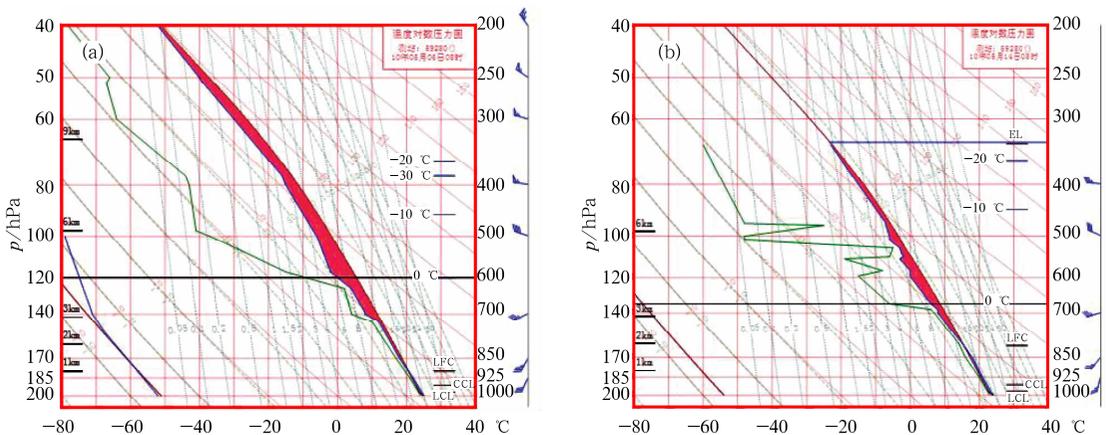


图 3 2010 年 5 月 6 日 08 时(a)和 5 月 14 日 08 时(b)清远站探空曲线图(T-logp)

Fig. 3 The T-logp charts of upper-air sounding from Qingyuan Station at 08:00 BT May 6 (a) and May 14 (b), 2010

上干下湿的不稳定状态,700 hPa 为干冷湿热的分界线,湿层厚度比前者薄,700 hPa 的干冷层也较前者弱,表明对流的强烈程度可能不如“5.7”大暴雨;尤其是平衡高度明显比“5.7”大暴雨的低得多,只伸展到大约 330 hPa,表明对流可发展的顶高不如“5.7”大暴雨的高,从雷达回波顶高图(图略)可得到证实;08 时 0℃层高度也比“5.7”大暴雨低,即暖区降水厚度更薄;抬升凝结高度(LCL)和云凝结高度(CCL)都相差不大,即对流云底的高度相差不大。08 时自由对流高度(LFC)“5.7”大暴雨比“5.14”大暴雨的低,对流有效位能(CAPE)(表 1)前者比后者大得多,表明“5.7”大暴雨比“5.14”大暴雨更不稳定,初期更易出现对流单体。

表 1 5 月 6 日和 14 日根据清远站探空资料计算的稳定度、垂直切变值和根据 NCEP 资料计算的涡度、散度、垂直速度  
Table 1 The physical and vertical shear values calculated by sounding data from Qingyuan Station and the vorticity, divergence, vertical velocity by NCEP data on May 6 and May 14, 2010

日期	EL/hPa	CAPE/ J · kg <sup>-1</sup>	500 hPa 涡度/ 10 <sup>-5</sup> s <sup>-1</sup>	850 hPa 垂直速度/ 10 <sup>-3</sup> hPa · s <sup>-1</sup>	垂直切变/ 10 <sup>-3</sup> s <sup>-1</sup>			散度/ 10 <sup>-6</sup> s <sup>-1</sup>	
					0~1 km	0~3 km	0~6 km	850 hPa	200 hPa
5 月 06 日	192	1156	1.2	-8.0	9.0	4.3	3.1	-6.0	3.0
5 月 14 日	334	468	1.5	-5.0	8.4	4.1	1.7	-2.0	5.0

下沉气流,甚至龙卷的可能性也大得多<sup>[22]</sup>。事实证明“5.7”大暴雨时东部出现了高达 24 m · s<sup>-1</sup> 的瞬时风速,而“5.14”基本上没有出现雷雨大风,以短时强降水为主。

### 3.3 动力条件

利用 NCEP 再分析资料计算了 5 月 6 日和 14 日的 500 hPa 涡度、850 hPa 和 200 hPa 散度以及 850 hPa 垂直速度,并将广州地区两次大暴雨发生前的上述物理量值列于表 1 中。从表 1 可以看出,两次大暴雨过程的 500 hPa 涡度相差不大,表明两次大暴雨过程气流旋转程度相当;对于散度,虽然低层(850 hPa)散度“5.7”大暴雨高于“5.14”的,但高层(200 hPa)散度前者小于后者,高低层散度差二者相当,表明抽吸作用在两次大暴雨过程中差别不大;然而“5.7”大暴雨的垂直速度明显高于“5.14”的,表明前者对流发展得更加旺盛,在雷达特征分析中也得到证实。

### 3.4 地面温度平流在两次大暴雨中的作用

通过分析低层温度平流可知(图 4a 和 4b),中纬度地区冷平流的南下影响与两次暴雨过程密切相

### 3.2 垂直切变

利用大暴雨发生前最近时次的清远探空站实测探空资料,即 5 月 6 日 20 时和 5 月 14 日 08 时,计算广州地区 0~1 km、0~3 km 和 0~6 km 的垂直切变,并列于表 1。由表 1 可见,两次大暴雨过程中低层的垂直风切变都比较大,但相差不大,0~1 km 和 0~3 km 大约在  $(9.0 \sim 8.4) \times 10^{-3}$  和  $(4.3 \sim 4.1) \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ，“5.7”大暴雨略大一点;然而中高层 0~6 km 的垂直切变则相差很大,由于“5.7”大暴雨时槽后强西北气流,使 0~6 km 垂直切变高达  $3.1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ,比“5.14”大暴雨高出近 1 倍,表明“5.7”大暴雨对流强度要比“5.14”强烈得多,出现强

关。“5.7”大暴雨过程中冷平流较强,但位置相对较北(25°N 附近)，“5.14”冷平流则南下到广东中南部,东北冷平流与南海上西南暖湿气流在广东交汇对触发低层的不稳定能量有着重要的作用。相比较而言,东北冷平流对“5.14”大暴雨过程的贡献更大些,其中第二个降水峰值正是冷平流过境过程中,在锋面前沿不断触发新生小对流单体,一些被并入飑线中,使飑线得以维持和发展,其中一个对流单体发展成超级单体,直接造成广州第二个降水高峰。

### 3.5 水汽条件

从两次暴雨过程的水汽通量散度分布(图 4c 和 4d)可见,南海夏季风尚未爆发,副热带高压稳定控制中南半岛和南海上空,低层较强南—西南气流使得孟加拉湾和南海向华南地区的水汽输送比较显著。尤其是“5.7”大暴雨(图 4c),西南急流将孟加拉湾和南海北部两支水汽源源不断地输送并积聚在广东中部和北部,广州上空的水汽通量散度 6 日 14 时超过  $-9 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ;20—02 时(图略)又有一水汽通量散度中心自西向东移动到广州上空,高含水量的云团也被输送到广州上空,加上更强的垂直风切变和层结不稳定,使得“5.7”大暴雨期间

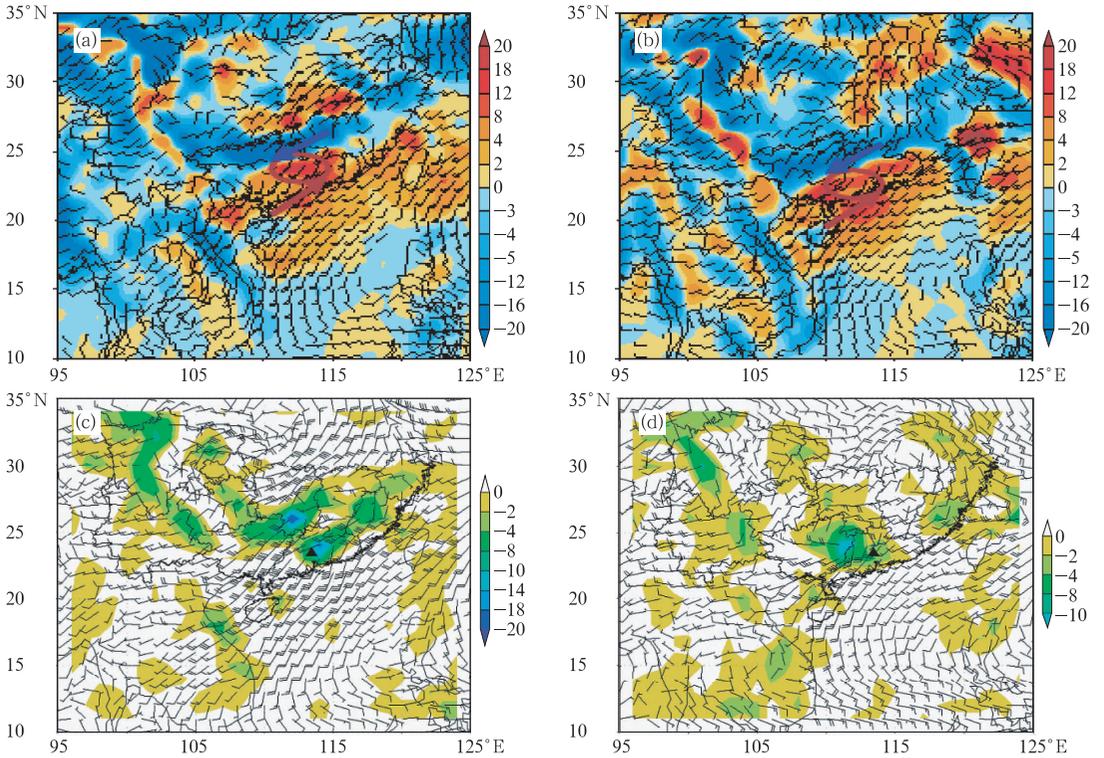


图 4 2010 年 5 月 6 日 20 时(a)和 5 月 14 日 20 时(b)925 hPa 水平风场(风杆)和温度平流(填色)分布以及 6 日 14 时(c)和 14 日 14 时(b)850 hPa 水汽通量散度分布(单位: $g \cdot cm^{-1} \cdot hPa^{-1} \cdot s^{-1}$ )  
 Fig. 4 Horizontal wind field (wind vector) and temperature advection (colour) (a and b) on 925 hPa, and water vapour flux divergence on 850 hPa (c and d) at (a) 20:00 BT May 6, (b) 20:00 BT May 14, (c) 14:00 BT May 6, and (d) 14:00 BT May 14, 2010 (unit:  $g \cdot cm^{-1} \cdot hPa^{-1} \cdot s^{-1}$ )

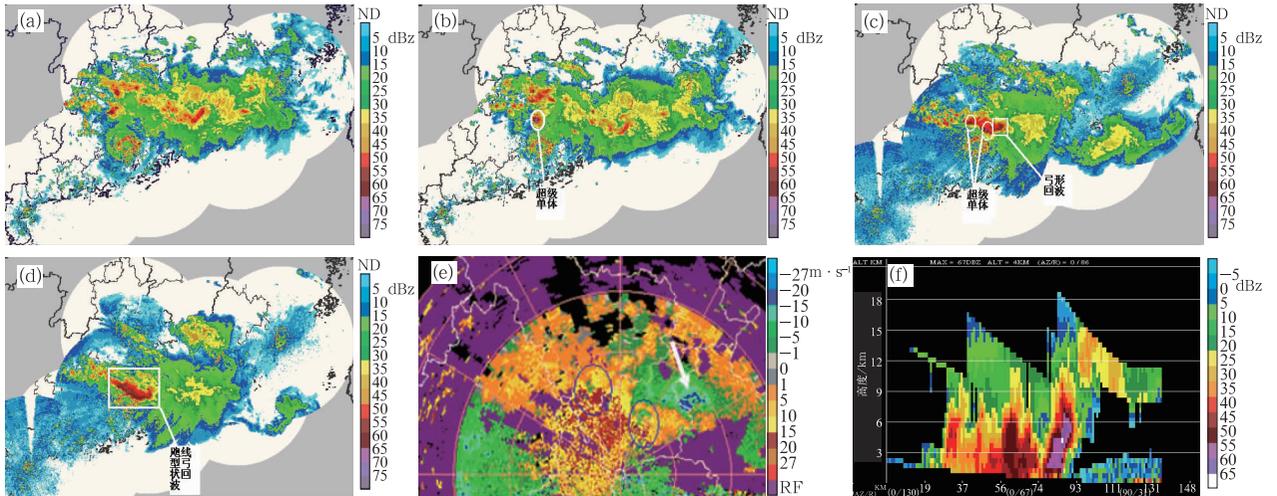


图 5 “5.7”大暴雨过程雷达回波演变、径向速度和反射率垂直剖面图  
 (a) 5 月 6 日 18 时; (b) 5 月 6 日 19 时; (c) 5 月 6 日 22 时 30 分; (d) 5 月 7 日 00 时 30 分;  
 (e) 5 月 6 日 22 时 30 分; (f) 5 月 6 日 22 时 30 分  
 其中(a)~(d)为广东省雷达 1.5°仰角反射率拼图,图中圆圈所圈为超级单体,矩形所圈为弓形回波;(e)为广州  
 雷达 1.5°仰角径向速度图,图中圆圈所圈为中气旋,箭头所指为后侧强入流;(f)为广州雷达反射率垂直剖面图  
 Fig. 5 Evolution of echo and velocity features in the 7 May process  
 (a) 18:00 BT, May 6; (b) 19:00 BT, May 6; (c) 22:30 BT, May 6; (d) 00:30 BT, May 7;  
 (e) 22:30 BT, May 6; (f) 22:30 BT, May 6

(a), (b), (c) and (d) are reflectivity mosaics in Guangdong Province with 1.5° elevation, in which the circle indicates the super-cell and the rectangle indicates bow-echo, and (e) is radial velocity map with 1.5° elevation from Guangzhou Radar, in which the circles indicate the mesocyclone and arrow indicates rear-inflow, and (f) is cross section map from Guangzhou Radar

云团降水效率更高,降水强度更大。“5.14”大暴雨过程中一直有水汽输送并在广州上空积聚,14日14时(图4d)水汽通量散度中心位于广州西侧,广州上空的水汽通量散度为 $-5 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 20—02时强降雨发生期间,水汽通量散度中心移至广州上空,达到 $-9 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ,所以尽管西南急流不如“5.7”大暴雨强盛,但由于始终处于风向暖式切变南侧的较强西南气流中或局地涡旋中心,而且始终只有一个水汽辐合中心,因而水汽更容易积聚在广州上空。然而正如3.1和3.2节所

讨论的,由于“5.14”大暴雨期间高层垂直风切变小得多、层结不稳定也小得多,使得云团的降水效率更低,持续时间更长。

### 4 雷达特征对比分析

#### 4.1 “5.7”大暴雨过程的雷达特征

如雷达回波特征图(图5)所示,18时(图5a)起,一些对流小单体在两广交界附近出现,并向东北

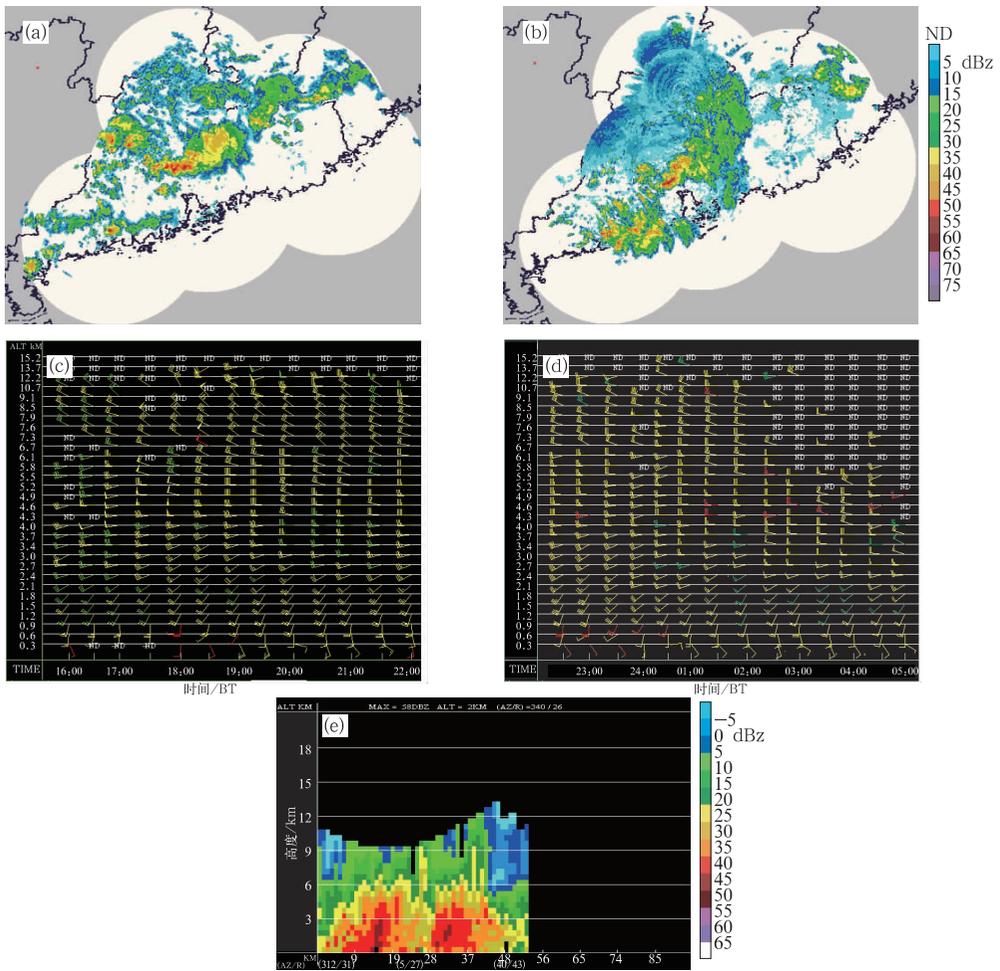


图 6 “5.14”大暴雨过程的雷达回波演变、垂直风廓线和广州雷达反射率垂直剖面图

(a) 5月14日18时; (b) 5月15日00时; (c) 5月14日16—22时;

(d) 5月14日22时30分至15日05时; (e) 5月14日18时48分

其中(a)和(b)为广东省雷达1.5°仰角反射率拼图,(c)和(d)为广州雷达风廓线产品,

(e)为广州雷达反射率垂直剖面图

Fig. 6 Evolution of echo and vertical wind profile in the 14 May process

(a) 18:00 BT, May 14; (b) 00:00 BT, May 15; (c) from 16:00 to 22:00 BT, May 14;

(d) from 22:30 BT, May 14 to 05:00 BT, May 15; (e) 18:48 BT, May 14

(a) and (b) are reflectivity mosaics in Guangdong Province with 1.5° elevation, (c) and (d) are vertical wind profiles from Guangzhou Radar, and (e) is cross section map from Guangzhou Radar

方向移动;19时(图5b)与韶关南部大暴雨的中尺度对流系统(MCS)残余合并, $\beta$ 中尺度飑线初具规模。此后新的小对流单体不断在两广交界处生成,并向偏东方向移动融入飑线,使飑线不断加强;同时飑线上不断有小对流单体强烈发展成为超级单体,其中一个超级单体则演变成弓形回波短带,因此22时30分(图5c)在一条飑线上出现了两个超级单体、一个弓形回波短带。由于弓形回波短带后侧强烈入流<sup>[23]</sup>,使得位于飑线东侧的弓形回波移动速度明显加快,5月7日00时30分形成飑线型弓形回波(图5d),造成东莞、增城附近强雷雨大风和强降水;随后飑线继续南下,逐渐减弱出海。

当飑线型回波发展到最旺盛时,对东侧超级单体回波沿入流方向穿过强中心做反射率垂直剖面图(图5f),可以看到单体发展非常旺盛,强上升气流使回波顶高伸展到18 km,50 dBz 顶高亦达到了8.5 km,远远高于0℃层高度,有大量冰粒子和过冷水滴共存,强回波( $\geq 65$  dBz)高悬在4.5 km处;回波呈倾斜并已显现出有界弱回波区结构,回波顶位于有界弱回波区之上,呈现出经典超级单体结构。由于高层冰、水粒子强重力拖曳作用及潜热冷却对下沉气流的作用<sup>[24]</sup>,造成“5.7”大暴雨中除强降水外还出现了雷雨大风。

#### 4.2 “5.14”大暴雨过程的雷达特征

从前面五山观测站的降水分布已知,5月14日大暴雨过程出现了3个峰值,第三个峰值未达到短时强降水的标准(即:1小时降水量达到或超过20 mm),而第一、二个峰值均为短时强降水,分别出现在14日19:00—21:00(图6a)和14日23:00至15日00:00(图6b)。第一个峰值出现前18时,在广州市北部约50 km处出现了 $\beta$ 中尺度的辐合带,使其附近飑线西侧的对流单体在南下途中发展得更加强烈,形成微型超级单体,19时经过广州时产生了第一个短时强降水峰值;第二个峰值出现前,浅薄的弱锋面已到达广州北部约80 km处,沿锋面前沿西侧不断有新的小对流单体生成,并迅速发展成超级单体,随锋面过境广州时(23:30),造成广州市第二个短时强降水峰值。因此,第一个短时强降水峰值主要由飑线西侧的微型强降水(HP)型超级单体造成,第二个则为锋面过境时锋面上的微型强降水(HP)型超级单体造成的。

对广州雷达风廓线产品进行仔细分析,可进一

步发现第一和第二个降水峰值与中空波动密切相关。广州出现强降水期间及其前后,6 km以上的高空一直维持西北风。4~6 km的中层则明显可见两次波动影响,16—17时(图6c)低层为 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右的偏南气流,风向随高度逐渐顺转,在6 km高度转为西南偏西风,风速增大到 $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。17时30分在5~6 km处转为弱北风,第一个波动开始过境,但地面到4 km处维持南到西南气流和垂直风切变强度,造成了第一个降水峰值。20时3~4 km处的西南偏西风转偏西风,表明低层输送暖流气流的强度有所减弱,降水强度随之减弱。但14日22时至15日00时(图6d)4~6 km高度又重新转为西南偏西气流,迎来第二个降水高峰。01时4~6 km高度再次转为偏西气流,雨强相应减小。03时3~4 km高度由西南偏南气流转为偏西气流,同时3 km以下西南气流减小到 $4\sim 6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,表明低层输送暖湿气流的能力大大减弱,降水接近尾声。

当飑线回波发展最旺盛时,穿过飑线上最强回波单体做垂直剖面(图6e),回波高度13 km,明显低于“5.7”暴雨的回波顶高,回波强度也低于“5.7”暴雨,只有50 dBz,且强回波顶高仅3 km,位于0℃层以下,主要由液态水组成。回波单体略有倾斜,回波顶高偏向于强回波中心右侧,呈现出多单体强风暴结构。由于强回波主体高度较低,雨滴的重力拖曳作用较小,不利于地面出现雷雨大风,而是以降水为主。

#### 4.3 两次暴雨过程雷达特征对比

“5.7”和“5.14”大暴雨过程虽然都是由飑线过程引发的,但是飑线的强度、范围及移动方向等存在较大差异。

相同点:“5.7”和“5.14”大暴雨过程中,飑线移动方向与飑线的走向近似一致,造成两次过程的累积降水量都较大;两次大暴雨过程的飑线中都有超级单体。

不同点:(1)与“5.14”大暴雨过程相比,“5.7”大暴雨飑线长度明显更长,强回波范围明显更大,使得降水强度前者比后者大。(2)“5.7”大暴雨飑线中镶嵌的超级单体更多,且出现了弓形回波,“5.7”大暴雨过程中更容易伴随产生强烈的雷暴大风。(3)“5.7”大暴雨飑线通过两广交界处不断新生对流单体,补充合并进入主飑线回波中,使得飑线得以维持和发展;“5.14”大暴雨的飑线则是通过吸收合

并其移动前方、沿近地层辐合带新生单体,得以维持和发展。(4)“5.14”大暴雨期间中空两次波动分别造成了两个短时强降水峰值。(5)“5.7”大暴雨飑线上的回波单体发展得更旺盛,结构更倾斜,回波顶高、强回波顶高均高于“5.14”的回波单体。

## 5 小 结

(1) 广州 5 月上中旬两次大暴雨过程 500 hPa 环流形势截然不同,“5.7”大暴雨主要受 500 hPa 高空槽后西北气流、850 hPa 切变线以及低层弱冷空气影响造成的,与典型的华南前汛期暴雨形势不同,槽后冷空气叠加在低层暖湿不稳定层结上,对层结不稳定起到增幅作用;“5.14”大暴雨过程主要是由 500 hPa 高空槽前的西南气流、850 hPa 切变线和地面弱冷锋南压造成的,具备典型华南前汛期暴雨形势特征。

(2) 东北冷平流对“5.14”大暴雨过程的贡献更大些,其中第二个降水峰值正是冷平流过境过程中,锋面附近一个超级单体直接造成广州第二个降水高峰。

(3) 两次大暴雨过程低层到中高层的垂直风切变都比较大,但中低层相差不大,而“5.7”大暴雨由于槽后强西北气流使得中高层垂直风切变比“5.14”大暴雨高出近 1 倍,促使“5.7”飑线既造成了降水强度更强和累积降水量更大的大暴雨,而且还引发了东部强雷雨大风,“5.14”飑线仅产生了相对弱一些的大暴雨。

(4) “5.7”和“5.14”大暴雨过程虽然都是由带有超级单体的飑线过程引发的,但“5.7”大暴雨飑线长度明显更长,强回波范围明显更大,飑线中的超级单体更多,回波和强回波顶高都更高,结构更倾斜,降水强度也更大。

(5) “5.7”大暴雨飑线通过补充合并两广交界处不断新生对流单体,使得飑线得以维持和发展;“5.14”大暴雨的飑线则是通过吸收合并其移动前方、沿近地层辐合带新生的单体,得以维持和发展,中空两次波动分别引发了两个短时强降水峰值。

**致谢:** 本文得到金荣花研究员的指导和广州中心气象台短期科同事的帮助,在此表示深深的谢意!

## 参 考 文 献

- 科技出版社,1986.
- [2] 诸葛秀华,赵思雄,刘苏红.1979年6月9号—11号华南前汛期暴雨的数值试验//华南前汛期暴雨文集[M].北京:气象出版社,1981:202-204.
- [3] 李真光,梁必骥,包澄澜.华南前汛期暴雨的成因与预报问题//华南前汛期暴雨文集[M].北京:气象出版社,1981:1-8.
- [4] 周秀骥,薛纪善,陶祖钰,等.98'华南暴雨科学试验研究[M].北京:气象出版社,2003:218.
- [5] 陈红,赵思雄.第一次全球大气研究计划试验期间华南前汛期暴雨过程及其环流特征的诊断研究[J].大气科学,2000,24(2):238-252.
- [6] 陈红,赵思雄.海峡两岸及邻近地区暴雨试验(HUAMEX)期间暴雨过程及环流特征研究[J].大气科学,2004,28(1):32-47.
- [7] 薛纪善.1994年华南特大暴雨研究[M].北京:气象出版社,1999.
- [8] 汪永铭,苏百兴,常越.1998年试验期间华南暴雨的系统配置和环流特点[J].热带气象学报,2000,16(2):123-130.
- [9] 练江帆,梁必骥.“94.6”与“94.7”华南致洪暴雨的对比分析[J].中山大学学报(自然科学版),1999,38(4):102-106.
- [10] 林良勋,冯业荣,黄忠,等.广东省天气预报技术手册[M].北京:气象出版社,2006:86-119.
- [11] 何立富,周庆亮,陈涛,等.“05.6”华南特大暴雨过程大尺度水汽输送特征[J].气象与减灾研究,2009,16(1):10-16.
- [12] 熊文兵,李江南,姚才,等.“05·6”华南持续性暴雨的成因分析[J].热带气象学报,2007,23(1):90-97.
- [13] 林良勋,吴乃庚,黄忠,等.广东2008年罕见“龙舟水”特点及成因诊断分析[J].气象,2009,35(4):43-50.
- [14] 伍志方,叶爱芬,胡胜,等.中小尺度天气的多普勒统计特征[J].热带气象学报,2004,20(4):391-400.
- [15] 伍志方,曾沁,叶爱芬,等.珠江三角洲短时大暴雨的多普勒特征及成因[J].自然灾害学报,2009,18(5):119-126.
- [16] 蒙伟光,王安宇,李江南,等.2004年5月华南暴雨中尺度对流系统的形成及湿位涡分析[J].大气科学,2004,28(3):330-341.
- [17] 张晓美,蒙伟光,张艳霞,等.华南暖区暴雨中尺度对流系统的分析[J].热带气象学报,2009,25(5):551-560.
- [18] 张晓惠,倪允琪.华南前汛期锋面对流系统与暖区对流系统的个例分析与对比研究[J].气象学报,2009,67(1):108-121.
- [19] 罗建英,廖胜石,黄归兰,等.广西前汛期锋前暖区暴雨过程的模拟与分析[J].气象,2009,35(10):50-57.
- [20] 尹洁,吴静,曹晓岗,等.一次冷锋南侧对流性暴雨诊断分析[J].气象,2009,35(11):39-47.
- [21] 尤红,肖子牛,王曼.2008年“7.02”滇中大暴雨的成因诊断与数值模拟[J].气象,2010,36(3):7-16.
- [22] 张德林,马雷鸣.“0730”上海强对流天气个例的中尺度观测分析及数值模拟[J].气象,2010,36(3):62-69.
- [23] 李向红,唐熠,郑传新.一次多种强对流天气过程的雷达回波特征分析[J].气象,2010,36(8):61-71.
- [24] 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,2006:130-176.
- [1] 《华南前汛期暴雨》编写组.华南前汛期暴雨[M].广州:广东