

于明慧,刘黎平,吴翀,等,2019. 利用相控阵及双偏振雷达对 2016 年 6 月 3 日华南一次强对流过程的分析[J]. 气象,45(3): 330-344. Yu M H, Liu L P, Wu C, et al, 2019. Analysis of severe convective process in South China on 3 June 2016 using phased-array and dual-polarization radar[J]. Meteor Mon, 45(3): 330-344(in Chinese).

## 利用相控阵及双偏振雷达对 2016 年 6 月 3 日 华南一次强对流过程的分析\*

于明慧<sup>1</sup> 刘黎平<sup>1</sup> 吴 翀<sup>1</sup> 肖艳娇<sup>2</sup>

1 中国气象科学研究院,北京 100081

2 中国气象局武汉暴雨研究所,武汉 430074

**提 要:** 本文结合 X 波段相控阵雷达(XPAR)和 S 波段双偏振天气雷达(SPOL)及地面和探空观测资料,分析了 2016 年 6 月 3 日发生在华南的一次超级单体中小尺度特征,结果表明:(1)SPOL 的多普勒参量和双偏振参量可以观测到超级单体的强度、速度和相态分布,超级单体的入流和出流影响钩状回波的形成。(2)XPAR 可以获取时空分辨率远高于 SPOL 的观测资料,可以弥补 SPOL 仰角层严重不足的缺陷,观测到超级单体完整的垂直结构,可更精确地描述超级单体的短时演变。(3)超级单体钩状回波附近给地面带来了降温、大风和强降水,超级单体经过地区均有明显降温和风区。研究结果证明相控阵雷达和双偏振雷达对认识对流单体中小尺度系统的发展演变有较大帮助。

**关键词:** 相控阵天气雷达,双偏振天气雷达,相态识别,对流单体精细结构

**中图分类号:** P458

**文献标志码:** A

**DOI:** 10. 7519/j. issn. 1000-0526. 2019. 03. 004

## Analysis of Severe Convective Process in South China on 3 June 2016 Using Phased-Array and Dual-Polarization Radar

YU Minghui<sup>1</sup> LIU Liping<sup>1</sup> WU Chong<sup>1</sup> XIAO Yanjiao<sup>2</sup>

1 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

2 Institute of Heavy Rain, CMA, Wuhan 430074

**Abstract:** Based on the X-band phased-array Doppler radar, S-band dual-polarization radar (SPOL) and conventional surface and upper-air data, we analyzed the characteristics of a severe convective process in South China that happened on 3 June 2016. The results are summarized as follows. (1) The intensity, velocity and phase distribution of supercells can be observed by Doppler parameters and dual-polarization parameters of SPOL. The formation of hook echo is affected by the influx and outflow of supercells. (2) XPAR can obtain spatio-temporal resolution much higher than observation data of SPOL, which can make up for the serious shortage of elevation layer. The complete vertical structure of super cells can be observed and the short-term evolution of supercells can be more accurately described. (3) Hypercubes near the hook echo brought cooling temperature, strong winds and heavy precipitation to the surface, and the areas with the supercells passing through had significant drop in temperature and strong winds. The results show that phased-array radar and dual-polarization radar are more helpful to understand the evolution of supercells.

\* 国家重点研发计划(2018YFC1507401)和国家自然科学基金项目(41675023)共同资助

2018 年 2 月 14 日收稿; 2018 年 5 月 16 日收修定稿

第一作者:于明慧,主要从事雷达气象研究. Email:moxiao20120@163.com

**Key words:** phased-array Doppler radar, dual-polarization radar, phase identification, fine structure of convection cell

## 引言

强对流过程中的龙卷、下击暴流、冰雹和大风等中小尺度系统尺度小,生消迅速,伴随的强烈的大风和降雹等严重威胁人民生命和财产安全,是产生局地气象灾害的重要原因。广东是气象灾害影响大省,其中雷雨大风、冰雹等灾害频发,威胁人民生命财产安全,提高对流系统的监测能力,早期发现产生大风的先兆,提前发出大风预警是提高防灾减灾能力的重要方面。而对于生消迅速的中小尺度强对流系统(如龙卷、冰雹、下击暴流、中尺度涡旋等),新一代天气雷达的观测模式扫描周期偏长、垂直方向的分辨率比较差,对与大风有关的对流系统内部的龙卷涡旋特征、中气旋、上升和下沉气流、中尺度辐合等结构和演变的观测能力有限,也无法直接获取到降水系统的粒子相态,影响了对上述中小尺度强对流系统的监测预警能力以及对其形成机理认识。

相控阵和双偏振天气雷达是当今气象雷达领域的重要方向和热点,均能显著提升雷达探测的精度及信息量,是可能广泛应用的下一代天气雷达技术。早在2003年,美国将其退役的“宙斯盾”雷达改装为二维相控阵天气雷达试验平台(Zrníc et al, 2007; Heinselman et al, 2008),用于相控阵天气雷达技术及其扫描方式的试验,并专门发展了一维相扫体制的可移式的X波段相控阵天气雷达,用于龙卷、超级对流单体、线状回波过程的快速扫描(Bluestein et al, 2010)。通过与WSR-88D雷达的对比,相控阵天气雷达能够更好和更准确探测快速变化的天气系统,对于强对流过程的分析 and 预警非常有用(Rasmussen et al, 2000; Zrníc et al, 2007; Heinselman et al, 2008)。中国也开展了相控阵和双偏振技术的研究。2007年,中国气象科学研究院与中国电子科技集团14所合作在军用相控阵雷达的基础上进行气象通道改造,研制了我国首部S波段一维有源相控阵天气雷达原理样机(张志强和刘黎平, 2011)。2009年,中国气象局气象探测中心牵头组织的863计划“机载气象雷达云雨探测应用系统”项目,将军用X波段二维机载相控阵雷达改造为天气雷达,验证了新型机载雷达系统对天气目标的探测能力(吴

翀等, 2014)。2012年,中国气象科学研究院专门研发了用于强对流观测的车载X波段相控阵天气雷达系统。该雷达是中国第一部有源相控阵天气雷达,为中国开展中小尺度强对流天气现象的观测研究提供了条件。2013—2014年,XPART先后在广东鹤山、安徽定远、四川甘孜进行了测试,调试并解决了雷达在观测中出现的一系列问题(吴翀等, 2014; 刘黎平等, 2015),并验证了观测数据在中尺度结构分析中的作用(刘黎平等, 2014)。

在超级单体和强对流天气研究方面, Browning (1977)将超级单体重新定义为具有中气旋的对流单体, Lemon and Doswell III (1979)提出至今仍被广泛应用的超级单体概念模型。随着观测数据的增多,超级单体又分为弱降水超级单体、经典超级单体和强降水超级单体(Møller et al, 1994)。超级单体具有钩状回波、中高层回波悬垂、中气旋和小尺度强切变等特征(郑艳等, 2017)。俞小鼎等(2008)采用多普勒雷达数据分析了中等强度的对流有效位能和较大的深层垂直风切变有利于超级单体产生。吴海英等(2017)利用多普勒雷达资料分析了长生命史超级单体风暴伴随有一定延伸厚度的中气旋,风暴发展强盛阶段中层旋转最为明显。陈秋萍等(2015)利用新一代天气雷达资料分析了强风暴的中气旋强度、风暴生命史等存在差异与产生风暴的环境条件如垂直风切变、垂直涡度等存在差异密切相关。覃靖等(2017)利用天气雷达(SB)分析得出可用VIL值明显跃增提前20 min预警冰雹。张劲梅和莫伟强(2013)利用多普勒天气雷达分析了龙卷、冰雹、大风等强对流风暴的发展、加强与近地面边界层中小尺度辐合系统加强有密切关系,出现冰雹、大风前20多分钟,对流单体风暴已发展成为具有典型特征的超级单体强风暴。陈元昭等(2016)和黄先香等(2018)利用多普勒雷达等数据分析了几次龙卷天气过程。利用X波段双极化雷达对强对流云进行相态识别,其冰雹粒子可以从地面延伸到接近云顶处。降雹过程的固态粒子主要为冰雹和霰,冰雹区附近有一层薄雨区(刘亚男等, 2012)。超级单体风暴是导致雷暴大风风力强、出现区域局地性强和灾情严重的主要原因(张涛等, 2012)。中尺度辐合线是触发强对流天气的因子之一(沈杭锋等, 2016; 许新田

等,2012)。陈涛等(2013)、农孟松等(2014)、梁俊平和张一平(2015)对飏线天气过程中的环境条件和对流发展机制及天气成因进行了分析研究。郑媛媛等(2011)、许爱华等(2011;2014)对强对流天气进行了总结分类。李晓敏等(2017)利用 X 波段双偏振雷达建立了雷暴单体发展模型。王易等(2018)利用新一代天气雷达对中气旋产品特征进行了统计分析。

2016 年夏季,中国气象科学研究院将 X 波段相控阵天气雷达部署在广东佛山,针对华南暴雨中的强对流系统进行观测。广东省作为中国气象局与省政府合作共建气象现代化的试点省,其范围内的 S 波段新一代天气雷达已全部升级为双偏振天气雷达,其观测的高精度偏振信息将作为相控阵雷达的有效补充。相控阵天气雷达具有高时空分辨率的探测能力,可以快速获取对流过程中小尺度结构,探测强对流系统内部的精细结构。本论文以此为主要观测手段,结合双线偏振天气雷达对强对流系统进行粒子相态识别,通过多种数据的综合分析,研究华南强对流系统内部的动力和相态特征的演变,进一步提高对中小尺度强对流系统的监测预警能力以及对其形成机理的认识。

## 1 资料来源和方法

本次观测是华南强降水协同观测试验的一部分,本文使用的观测设备有:(1)架设在广东佛山的广东省农业气象试验站(23.15°N、113.03°E)的 X 波段相控阵天气雷达(XPAR),可以获取 5~70 km 内回波和径向速度的快速演变以及 40 层仰角的垂直结构。(2)位于广州市(23.00°N、113.35°E)的 S 波段双偏振雷达(SPOL),可以扫描 230 km 半径的回波强度以及偏振参量,可以提供对流过程的整体宏观结构,且 S 波段雷达几乎无衰减。(3)广东清远每天 4 次的加密探空资料可用于分析对流发生发展的热力和动力条件。(4)试验区内还有 28 个有人工观测的国家级地面站以及约 1000 个自动气象站,均记录了 5 分钟级的气温、气压、温度、湿度、风向、风速等基本气象要素数据,可用于对流过程地面特征分析。(5)利用欧洲中心的再分析数据,分析对流过程天气背景。

XPAR 作为中国目前唯一的有源相控阵天气雷达,其性能主要指标见表 1。本次外场试验期间,XPAR 使用了快速观测模式,在该观测模式下,雷

达发射 1 个 4°展宽宽波束并同时以 4 个均匀分布的 1°窄波束接收,在以 4°俯仰为间隔的 10 个波位完成扫描后可得到与精细测量分布一致的 40 层扫描资料,一个扫描周期的所需时间为 2.5 min。在该模式下雷达扫描的精细程度高于警戒搜索模式而低于精细测量模式,扫描时间高于精细测量,能够获得最均衡的时空分辨率。表 1 同时还列出了 SPOL 的关键参数,其中 SPOL 采用常规抛物面天线,以 VPPI 方式水平扫描获取 9 层观测数据,是中国首批业务化的双偏振天气雷达,能够提供降水粒子的形状和相态信息。SPOL 完成一个体扫的时间为 6 min,相比之下 XPOL 的时空分辨率更高。不过 XPAR 在大范围降水中易衰减,不模糊速度也较小,容易发生速度模糊。

表 1 XPAR 和 SPOL 的主要技术参数

Table 1 Main technical parameters of XPAR and SPOL

Parameter	XPAR	SPOL
天线形式	一维阵列天线 精细: 46(发射) 44.4(接收)	抛物面天线
天线增益/dB	快速: 37.8(发射) 44.4(接收)	收发增益均 >45
频率/MHz	9370	2700
波瓣宽度	≤1°	≤1°
峰值功率/kW	1	≥650
距离库长/m	37.5	250
探测范围/km	70(探测盲区 5 km)	230
扫描策略	精细: 单波束 VRHI 扫描 快速: 4 波束 VRHI 扫描 仰角分布: 以 1°间隔扫描 0.5°~39.5°	VPPI 扫描 仰角分布: VCP21D
扫描用时	精细: 150 s 90°方位 快速: 150 s 360°方位	360 s
$V_{\max}/m \cdot s^{-1}$	28.8	27.28~31.78
观测量	多普勒参量	双偏振参量

差示反射率因子(ZDR)和相关系数(CC)是双偏振雷达非常重要的参量,为了将双偏振参量与具体相态联系起来,本文使用了吴翀等(2014)提出的相态识别方法。该方法基于美国业务运行的 HCA 算法,使用  $Z$ 、 $ZDR$ 、 $CC$ 、 $K_{DP}$ 、反射率因子的标准差  $[SD(Z)]$ 、差传播相移的标准差  $[SD(\Phi_{DP})]$  作为输入,通过模糊逻辑运算、权重值计算、显著性水平检验、0℃层识别、降水类型识别、经验阈值检查等步骤后得到十种类型的相态粒子,包括:地物或异常传播(GC/AP)、生物回波(BS)、干雪(DS)、湿雪(WS)、

冰晶(CR)、霰(GR)、大滴(BD)、雨(RA)、大雨(HR)、雨夹雹(RH)。考虑到 SPOL 和 WSR-88D 的硬件差异以及华南区域降水滴谱的不同,使用统计方法修改了 HCA 算法的  $Z$ 、 $ZDR$ 、 $CC$  和  $SD(\Phi_{DP})$  的隶属函数和显著性水平检验阈值,以确保识别结果的可靠性。

## 2 超级单体产生的天气背景分析

基于 ERA-interim 再分析资料得到的 2016 年 6 月 3 日 08 和 14 时(北京时)的主要大尺度环境背景如图 1。对流系统发生位置位于对流层低层

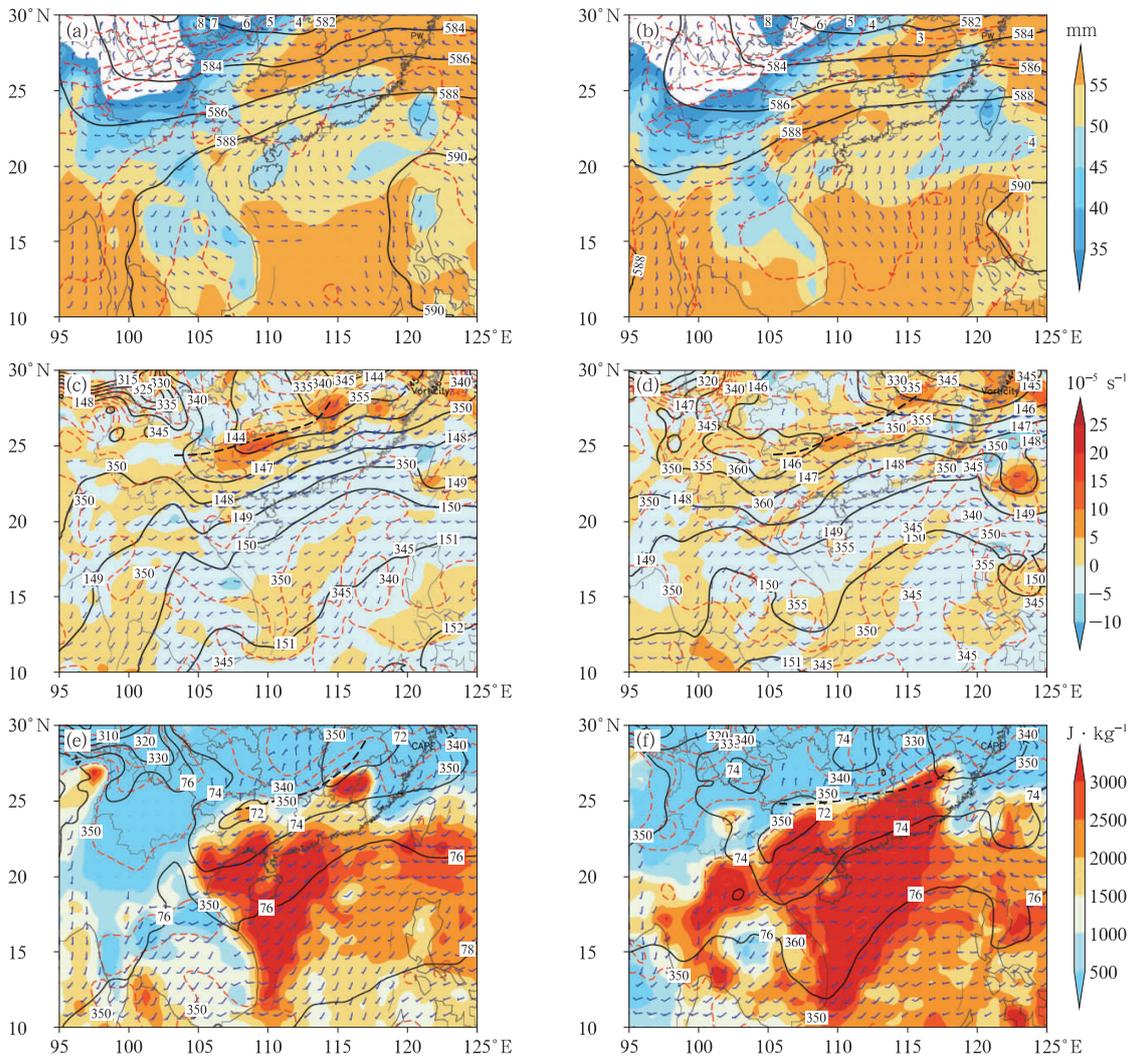


图 1 基于 ERA-interim 再分析资料得到的 2016 年 6 月 3 日 08 时(a,c,e), 14 时(b,d,f) 500、850 和 925 hPa 大尺度天气背景

(a,b)500 hPa 位势高度(黑色实线,单位:dagpm),温度(红色虚线,等值线间隔 1℃),可降水量 PW(填色)和水平风场;(c,d)850 hPa 位势高度(黑色实线,单位:dagpm),相当位温(红色虚线,等值线间隔 5 K),涡度(填色)和水平风场;(e,f)925 hPa 位势高度(黑色实线,单位:dagpm),对流有效位能 CAPE(填色)和水平风场(水平风标的一个长杆代表  $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;黑色粗虚线:切变线)

Fig. 1 500 hPa, 850 hPa and 925 hPa large-scale weather background based on ERA-interim reanalysis data at 08:00 BT (a, c, e) and 14:00 BT (b, d, f) 3 June 2016

(a, b) 500 hPa geopotential height (black solid line, unit: dagpm), temperature (red dashed line, contour with interval of 1℃), precipitation PW (coloring) and horizontal wind field; (c, d) 850 hPa geopotential height (black solid line, unit: dagpm), equivalent temperature (red dashed line, contour with interval of 5 K), vorticity (coloring) and horizontal wind field; (e, f) 925 hPa geopotential height (black solid line, unit: dagpm), CAPE (coloring) and horizontal wind field (A long rod represents  $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ; black dotted line: shear line)

(850 和 925 hPa)切变线(24°~28°N)南侧约 200 km 外的高相当位温( $\theta_e > 340$  K)暖湿西南气流内, 850 hPa 位势高度上对流系统左后侧存在一条风速  $> 12.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的风带, 整个对流过程中切变线以北的冷空气没有直接影响对流系统。另外对流区附近行星边界层内有暖平流, 为对流单体的维持和发展提供不稳定能量。对流层中层, 对流系统位于 500 hPa 槽前方西风气流中, 14 时西风较前一个时刻增强(风速  $> 15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ), 副热带高压偏北偏西。

图 2 是清远探空站在 08 和 14 时的  $T\text{-log}p$  图。08 时该对流单体还未生成, 低层大气接近饱和, 对流抑制能量(CIN)很小(为  $0 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), 抬升凝结高度(LCL)(为 427 m)较小, 从探空曲线可以判断自由对流高度(LFC)在 630 hPa, 大约在 4 km 高度。同时对流有效位能(CAPE)和可降水量(PW)都较高, 分别为  $3689 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$  和 54 mm, 说明环境大气的不稳定条件和水汽条件均有利于对流单体的发生和发展。到 14 时, 大气低层接近干热递减率, CIN 为  $0 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ , CAPE 增大至  $5299 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 因为在计算 CAPE 和 CIN 时做了非常理想化假定, 对 CAPE 通常估计过高, 而对 CIN 估计过低, CIN 为 0 并不意味着对流可以自由产生, 而较小的 CIN 和较高的 CAPE 表明, 在一定的触发机制下可以触发对流。PW 更大, 为 58 mm, 湿层更加深厚, 表明环境大气更加有利于对流发展。

结合清远探空的风速变化以及 850 hPa 再分析资料可以确认低空急流的存在, 对流单体发生发展

于低空急流的右前方。08 时, 急流轴位于约 2 km, 最大风速为  $18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 最大低层垂直切变(0~2 km)为  $13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 水平风随高度顺转。14 时, 急流轴升高至 3 km, 最大风速为  $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 最大低层垂直切变(0~3 km)为  $17.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

综合上述分析表明环境大气的热力条件十分有利于对流的发生发展。但是具备有利的热力条件的区域并不局限于对流系统发展区域, 因此对流的发生发展的位置以及时间必然和低空急流以及更小尺度的因素有关。

### 3 超级单体的特征分析

#### 3.1 对流演变过程

6 月 3 日 14:24 左右, SPOL 西方偏北有孤立的多单体生成, 初生的对流单体水平尺度仅为 10 km, 最大回波强度低于 45 dBz, 从 SPOL 西偏北约 170 km 的位置向东偏南方向不断发展。15:36 对流单体相互靠拢, 对流层低层出现辐合, 15:54 在距离 SPOL 大约 123 km 处靠拢的多对流单体前部回波强度增大, 对流层低层出现明显的辐合, 但还没有达到中气旋标准, 向东移动速度加快, 分裂形成新的对流单体。16:06 对流层低层  $0.5^\circ$  仰角径向速度图中距 SPOL 约 117 km 处出现辐合(图 3b), 最大正负速度差值为  $28.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 远大于  $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 达到中气旋标准, 而在  $1.5^\circ$  仰角的径向速度图中均为

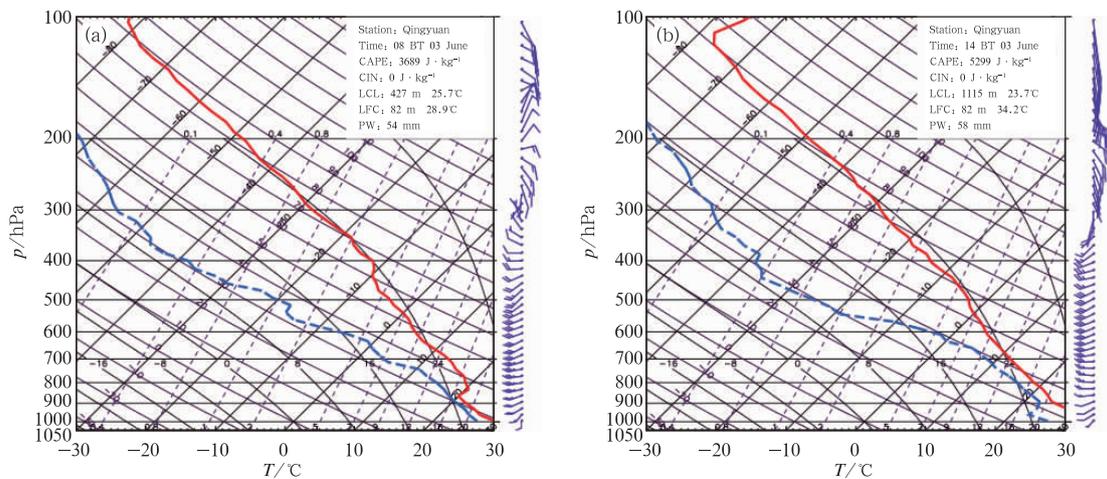


图 2 2016 年 6 月 3 日 08 时(a)和 14 时(b)清远探空站  $T\text{-log}p$  图

(红色线: 大气层结温度, 蓝色线: 大气层结露点温度)

Fig. 2 The  $T\text{-log}p$  diagram of Qingyuan Station at 08:00 BT (a) and 14:00 BT (b) 3 June 2016

(red line: temperature of atmospheric stratification, blue line: dew point temperature of atmospheric stratification)

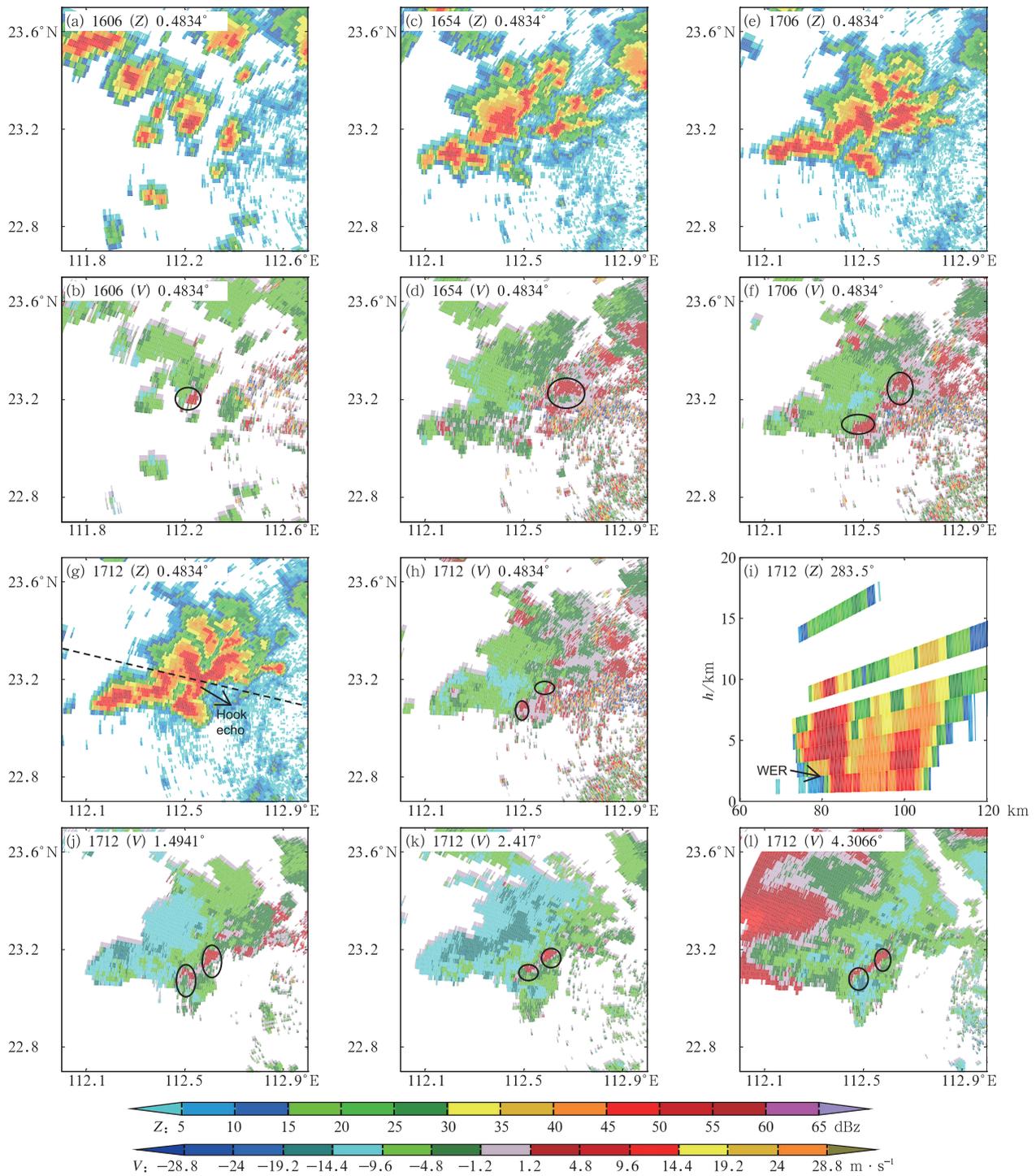


图 3 2016 年 6 月 3 日广州 SPOL 16:06(a,b),16:54(c,d)和 17:06(e,f)各时刻雷达 0.5°仰角回波强度(a,c,e)及径向速度(b,d,f);17:12 回波强度(g)、各仰角径向速度(h,j,k,l)及沿虚线的垂直剖面图(i)  
(图中圆圈:中气旋,箭头:钩状回波和弱回波位置,虚线:剖面图方位)

Fig. 3 The SPOL radar echo intensity (a, c, e) and radial velocity (b, d, f) at 0.5° elevation angle at 16:06 BT (a, b), 16:54 BT (c, d) and 17:06 BT (e, f); echo intensity (g), radial velocity at each elevation (h, j, k, l), and vertical section along the dashed line (i) at 17:12 BT 3 June 2016 in Guangzhou (circles; mesocyclones, arrows; positions of the hook echo and the weak echo, and dashed line: orientation of the cross-section)

负速度区,不满足中气旋标准,中气旋的垂直延伸高度很低。此时对流层低层被识别为大雨,周围分布着雨和大滴,而在其对应的  $1.5^\circ$  仰角上则被识别为大雨,周围被霰包围,此状态一直延伸到  $6.0^\circ$  仰角上,相态识别均为霰,大雨相态已经消失。该对流单体逐渐增强到 16:24 左右增强到最强, $0.5^\circ$  仰角最大回波强度达到 55 dBz。与此同时,对流单体的前方、西南方以及东南方都有新的对流单体生成。在 16:54 对流层低层的多对流单体相互靠拢(图 3c, 3d),对流层低层  $0.5^\circ$  仰角存在中气旋,在  $1.5^\circ$  仰角达到最大旋转速度  $12.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,垂直延伸到  $2.4^\circ$  仰角;在此中气旋左下方  $1.5^\circ$  仰角出现另一中气旋垂直延伸到  $4.3^\circ$  仰角。在对流层低层  $0.5^\circ$  仰角零星出现冰雹,其周围被大雨包围,在  $2.4^\circ$  仰角范围增加且其周围出现霰,冰雹延伸到  $6.0^\circ$  仰角,霰延伸到  $9.9^\circ$  仰角。在 17:06 存在多个对流单体(图 3e, 3f),其  $0.5^\circ$  仰角存在两个中气旋,左侧中气旋在  $3.3^\circ$  仰角消失,右侧中气旋延伸到  $4.3^\circ$  仰角,相态识别与上一时次类似。在 17:12 左右,多个对流单体再次合并形成长约 60 km 的中尺度对流系统(图 3g, 3h, 3j, 3k, 3l),距离雷达约 75~110 km(图 3i)。对流层低层右侧的对流单体出现钩状回波结构,从径向速度图中可知  $0.5^\circ \sim 4.3^\circ$  仰角均存在中气旋,最大转动速度(最大入流速度与最大出流速度绝对值之和的二分之一)出现在  $2.4^\circ$  仰角,为  $13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。在沿图 3g 中虚线的垂直剖面图(图 3i)中,可以看到弱回波区的存在,此对流单体达到超级单体标准。在超级单体的低层有分散的冰雹,冰雹周围是大雨,直到  $3.3^\circ$  仰角冰雹被霰包围,并延伸到  $6.0^\circ$  仰角。与超级单体并排的左下方的对流单体,在  $0.5^\circ \sim 4.3^\circ$  仰角的径向速度图中也存在中气旋。

在 17:18 对流层低层依然存在两个并排的对流单体(图 4a, 4b),对流单体中心距离雷达 SPOL 大约在 88 km,左侧的对流单体的后侧出现突起,对应的对流层低层的中气旋范围较大,最大正负速度差达到  $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,且此中气旋呈气旋性辐合,在  $2.5^\circ$  仰角达到最大转动速度  $17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,到  $3.3^\circ$  仰角时中气旋消失。在相态识别中, $0.5^\circ$  仰角强回波区对应的为大雨,大雨周围是雨和分散的大滴,在突出部分出现冰雹,距离地面高度约 1 km,在  $1.5^\circ$  仰角上突出部分周围则被大滴包围,在  $2.5^\circ$  仰角上则有大范围的冰雹和霰,冰雹在靠近雷达一侧与大雨相态

相邻,远离雷达一侧则被霰包围,其上仰角则都表现为冰雹和霰,在  $9.9^\circ$  仰角上冰雹消失,霰依然存在。而右侧的超级单体的钩状回波结构已有所收缩,对应的中气旋面积较小,但其一直延伸到  $4.3^\circ$  仰角高度上达到最大转动速度  $12.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。其  $0.5^\circ$  仰角相态识别结果和左侧的对流单体类似,在钩状回波处有冰雹。在 17:24(图 4c~4f),右侧超级单体的底层钩状回波结构已经消失,对流层低层的中气旋也消失,在  $1.5^\circ \sim 4.3^\circ$  仰角中气旋存在。左侧对流单体底层形成明显的超级单体钩状回波结构,且在不断加强,钩状回波的位置对应速度径向图中存在直径范围约 10 km 的中气旋,到  $1.5^\circ$  仰角达到最大转动速度  $13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,在沿图中虚线(图 4c)的垂直剖面图(图 4f)中,有弱回波区存在,此对流单体达到超级单体标准。此时,该超级单体整层最大回波强度大于 60 dBz,超级单体强回波区低层有分散的冰雹,冰雹周围是大雨,在弱回波区及超级单体后侧为大滴,在  $2.4^\circ$  仰角上大范围的冰雹和霰出现并延伸到  $6.0^\circ$  仰角。在 17:48(图 4h),仍可见超级单体的钩状回波和中气旋( $1.5^\circ$  仰角),但中气旋已经明显衰弱,且此时超级单体距离雷达 SPOL 大约 78 km,考虑到其与雷达 SPOL 的距离更近,超级单体的回波强度也已经降低。此时紧邻钩状回波的区域出现了强回波区(图 4g),ZDR(图 4i)和 CC(图 4j)明显比周围回波小,可见 SPOL 的底层具有冰雹的双偏振参量特征,之后该超级单体的钩状回波一直持续到 17:54 消散,中气旋已经完全消失,超级单体减弱为对流单体,到 18 时,对流层底层完全是辐散(图 4k),对流单体已经开始分裂成多对流单体,随后在 18:00—18:24 多对流单体继续分裂消亡。

### 3.2 超级单体结构及相态分析

如前所述,两个超级单体分别在 17:12 和 17:24 达到成熟阶段,图 5a, 5b 展示了左侧超级单体底层出现钩状回波的前一时刻 17:18 的 SPOL  $0.5^\circ$  仰角水平和垂直结构。在 17:18,超级单体位于 SPOL 西偏北 80~90 km 范围内,前进方向右后侧出现突出部分,其水平尺度达到 4 km,该区域的回波结构较为平整,部分区域回波大于 45 dBz,最大值大于 55 dBz, ZDR 和 CC 较高,均符合降雨的特征。在突出部的前方存在中气旋的正负速度对。中气旋的正速度区对应了超级单体前部的低层入流,负速度区对应了超级单体后部的下沉气流,入流和出流相遇

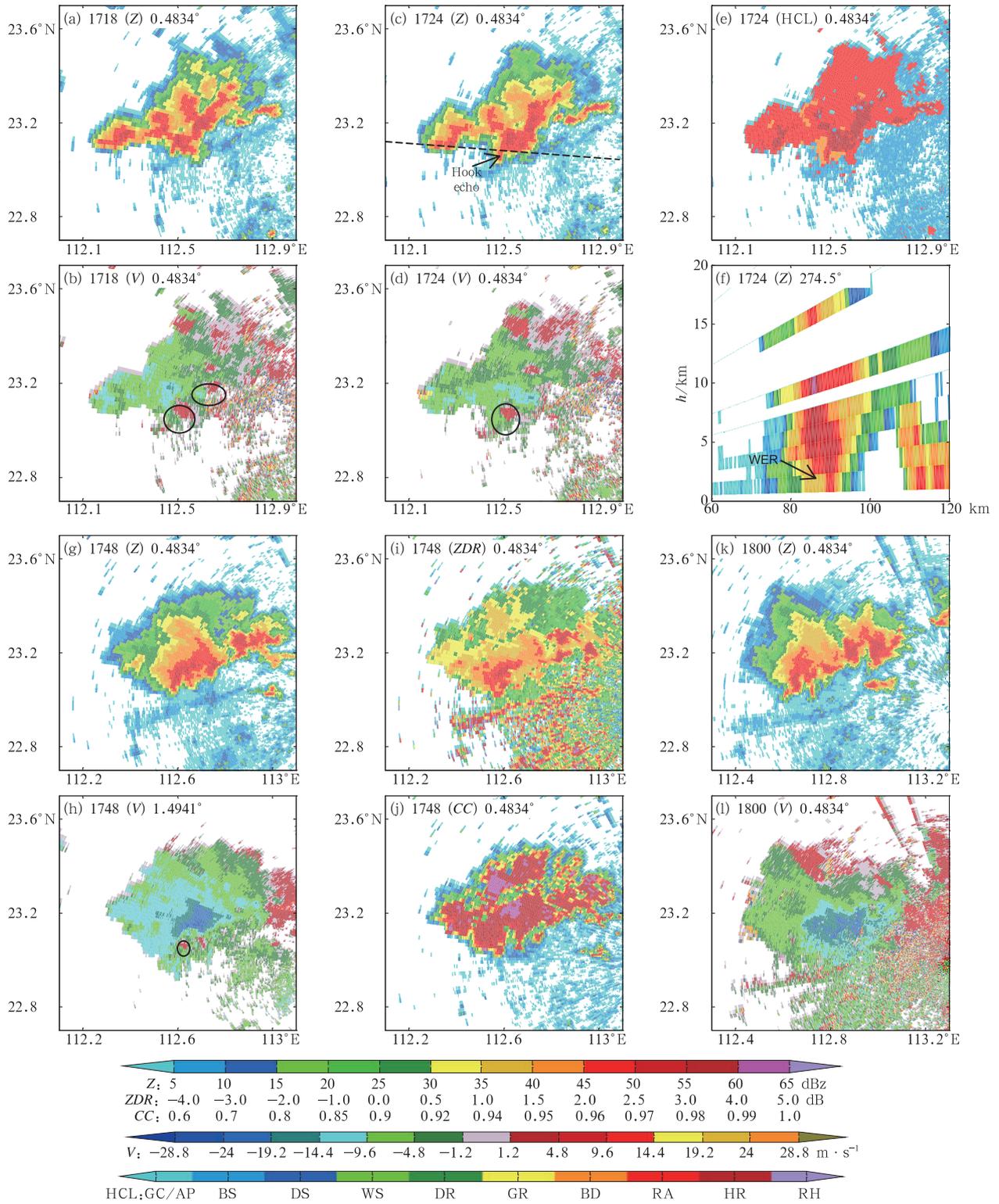


图 4 2016 年 6 月 3 日广州 SPOL 17:18(a,b),17:24(c,d,e,f),17:48(g,h,i,j) 和 18:00(k,l)

各时刻雷达回波强度(a,c,g,k)及径向速度(b,d,h,l);17:24 相态识别(e)及

沿虚线的垂直剖面(f);17:48 时 ZDR(i)及相关系数(j)

(圆圈:中气旋,箭头:钩状回波和弱回波位置,虚线:剖面图方位)

Fig. 4 The SPOL radar echo (a, c, g, k) and radial velocity (b, d, h, l) at 17:18 BT (a, b), 17:24 BT (c, d, e, f), 17:48 BT (g, h, i, j) and 18:00 BT (k, l); (e) phase identification and (f) vertical section along dashed line at 17:24 BT; (i) ZDR and (j) correlation coefficient in Guangzhou at 17:48 BT 3 June 2016

(circles: mesocyclones, arrows: positions of the hook echo and the weak echo, dashed line: orientation of the cross-section)

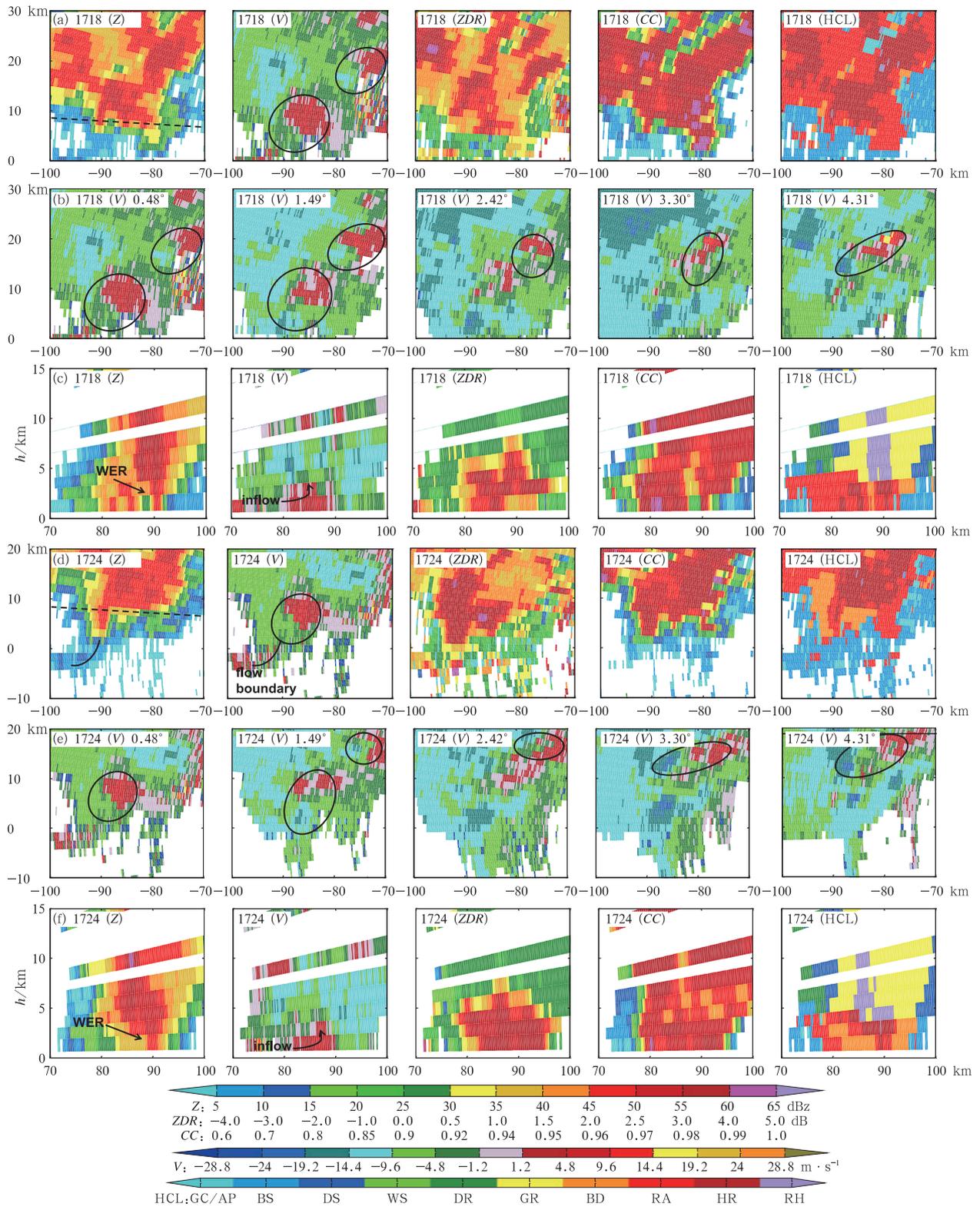


图 5 2016 年 6 月 3 日 17:18(a,b,c)和 17:24(d,e,f)广州 SPOL 的 Z,V,ZDR,CC 的水平 and 垂直结构 (a,d)0.5°仰角水平结构,(b,e)0.5°~4.3°的径向速度图,(c,f)沿虚线方向垂直结构 (圆圈:中气旋,箭头:钩状回波、弱回波和入流位置,虚线:剖面图方位)

Fig. 5 Horizontal and vertical structures of Z, V, ZDR, CC of SPOL in Guangzhou at 17:18 BT (a, b, c) and 17:24 BT (d, e, f) 3 June 2016

(a, d) horizontal structure at 0.5° elevation, (b, e) radial velocity elevation angle at 0.5°~4.3°, (c, f) vertical structure diagram along dashed line (circles; mesocyclones, arrows; positions of the hook echo, weak echo and inflow, dotted line; the orientation of the cross-section)

产生的浅而窄的出流边界清晰可见,在径向速度图上表现为辐合。对于中气旋的所在区域 1.3 km 高度(0.5°仰角)上,由于上升气流非常强、难以出现降水粒子, $Z < 25$  dBz, $ZDR$  在  $-1 \sim 1$  dB、 $CC < 0.85$ ,近似于地物回波的偏振参量特征。在 HCL 相态识别分布中可以看出,两个超级单体的钩状回波附近对流层低层 0.5°仰角有冰雹产生。由图 5b 的 0.5°~4.3°仰角的水平结构中可看出,在 0.5°~1.5°仰角有明显的中气旋,随着高度的上升,中气旋的水平尺度和转动速度也变的更大,但在 5 km 高度(仰角 3.3°)以上,由于环境场西风较强( $> 15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ),径向速度图中中气旋区域正速度部分明显减小,到 6 km 高度(仰角 4.3°)时,径向速度图中大部分区域为负速度值,环境场的西风是主要原因。而对于右侧超级单体的中气旋,则可以在 0.5°~4.3°仰角的径向速度图中清晰地识别出来,且中气旋的转速更大。在沿虚线方向的垂直剖面(图 5c)中,对左侧超级单体的垂直结构进行分析,底层暖湿入流伴随中层径向辐合形成的上升气流达到 4 km 以上高度,上升气流处的反射率因子较周围弱,形成了明显的弱回波区,虽然弱回波区域内的回波强度值较小,但是对应的  $CC$  值较大( $> 0.98$ ),且超级单体底部的  $ZDR$  值较大,达到 3.0 dB 以上。弱回波区上方存在悬垂回波,该区域回波强度值较大,最大值达 60 dBz 以上。在回波的中低层,相态识别为大滴、中雨到暴雨,3 km 高度以上存在霰和冰雹,冰雹区位于超级单体上方的悬垂结构中,其周围被霰包围。

17:24,超级单体位于雷达 SPOL 西偏北方向 76~90 km 范围内,该超级单体的回波范围进一步扩大,0.5°仰角最大回波强度 $> 55$  dBz,中气旋的水平尺度和转动速度继续加强,对应了超级单体底部入流和出流进一步增强,上一时刻的突出部分继续增强,并且在入流和出流的共同作用下逐渐弯曲,形成钩状回波(图 5d)。在 0.5°仰角的雷达回波及径向速度图中,入流和出流相遇产生的浅而窄的出流边界清晰可见(图 5d 中弧线)。由图 5e 的 0.5°~4.3°仰角的径向速度水平结构可看出,超级单体的中气旋从低层一直延伸到对流层中上部,依然是在 0.5°和 1.5°仰角表现最清晰,随着高度的上升,中气旋的水平尺度和转动速度也变得更大,但在 5 km 高度(仰角 3.3°)以上,径向速度图中中气旋区域正速度部分明显减小,到 6 km 高度(仰角 4.3°)时,径向速度图中大部分区域表现为负速度,和前一时刻

超级单体的中气旋表现类似。在沿虚线的垂直剖面中(图 5f),低层入流加强,底层暖湿气流一直扩展达到 3 km 高度,低层的入流以及上升气流给超级单体带来持续发展的动力,弱回波区的范围继续增加, $ZDR$  值较前一时刻明显增强,在相态识别中,该区域被识别为了大滴,这与水汽在超级单体上升气流中快速凝结形成过大的冷水滴的物理现象有关。弱回波区前方的悬垂回波继续增强,且最大回波强度达到 70 dBz,垂直延伸高度非常高,达到 8 km,比前一时刻的高度有所增加,其对应的  $ZDR$  值在  $-0.5 \sim 0.5$  dB、 $CC$  在 0.94~0.96,相比周围区域  $CC$  较小,符合球形冰雹的  $ZDR$  接近 0 dB、且表面包裹水膜使相关系数降低的物理特征。在悬垂回波上方、高于 10 km 的高度, $ZDR$  仍然接近于 0 dB,但回波强度 $< 45$  dBz、 $CC > 0.97$ ,对应了霰的偏振参量特征。在悬垂回波区域大约 3 km 高度以上,存在冰雹和霰,且冰雹的位置较上一时刻向前倾,在悬垂回波中发展。

### 3.3 超级单体的地面特征分析

图 6 给出了 17:00、17:24 和 17:54 自动气象站 2 min 平均风、1 h 累积雨量和 35 min 变温的观测结果,并叠加了该时刻 SPOL 的 0.5°仰角径向速度和 HCA 相态识别结果的水平分布。

17 时(图 6a),超级单体处于发展阶段并向东偏南方向移动,其东南侧区域大部分为入流区,地面入流区的温度在 31~36℃,平均速度为 3~4  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,最大速度达到 6.8  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,有  $-1.1 \sim -0.3$ ℃的变温。在 HCA 相态识别的大雨区,自动站观测到的 1 h 累计降水不超过 1 mm(图 6b),可见在超级单体的发展阶段,地面没有观测到大风和强降水的出现。到 17:24 超级单体达到成熟阶段,超级单体前侧的入流区最大风速达到 11.4  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,变温达到  $-8.1$ ℃,后侧的下沉气流区对应的风速也增加,最大达到 6.9  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,有  $-1.0 \sim 6.4$ ℃的变温,出流区的平均风速为 3.5  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,变温在  $-1.0 \sim -0.3$ ℃,由此可见,冷池的范围和强度随超级单体的发展而增加(图 6c)。最强降水出现在中气旋附近的大雨和大滴区,累计降水达到了 8.4 mm,可见在超级单体成熟阶段,入流和出流都明显增强,地面出现了较为明显的降温,强降水和大风天气,均出现在中气旋附近(图 6d)。到 17:54(图 6e,6f),超级单体钩状回波消失,超级单体消散,超级单体经过的区域均有

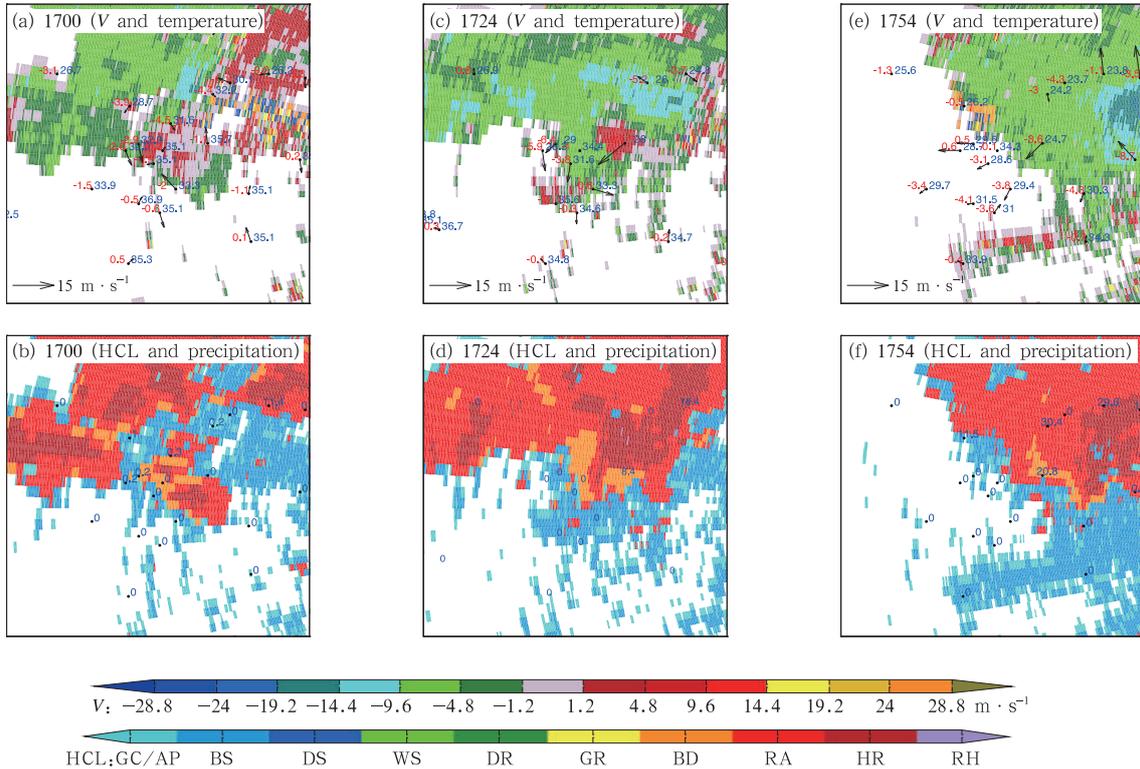


图 6 2016 年 6 月 3 日 17:00(a, b), 17:24(c, d) 和 17:54(e, f) 自动气象站 2 min 平均风、温度(蓝色数值, 单位:  $^{\circ}\text{C}$ ) 和 35 min 变温(红色数值, 单位:  $^{\circ}\text{C}$ ) 的水平分布图叠加 SPOL 的  $0.5^{\circ}$  仰角径向速度(a, c, e), 和 1 h 累积雨量(数值, 单位: mm) 叠加相态识别结果(b, d, f)

Fig. 6 Horizontal distribution of the 2 min mean wind, temperature (blue number, unit:  $^{\circ}\text{C}$ ) and 35 min variable temperature (red number, unit:  $^{\circ}\text{C}$ ) from automatic weather station overlaid to the SPOL radial velocity (a, c, e), and 1 h precipitation (number, unit: mm) overlaid to phase identification results (b, d, f) at  $0.5^{\circ}$  elevation at 17:00 BT (a, b), 17:24 BT (c, d) and 17:54 BT (e, f) 3 June 2016

明显的降温, 最强的变温达到  $-4.1^{\circ}\text{C}$ , 地面观测到的最大风速为  $7.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 比上一时段风速略有减小, 1 h 累计降水增加, 但是 10 min 累计降水不足 1 mm。在此阶段, 超级单体的降水强度明显减弱, 风区的风速有所减弱。

### 3.4 超级单体精细结构的短时变化

由于 SPOL 数据的垂直分辨率只有 9 层, 且完成一个体扫需要 6 min, 难以观测到底层回波是如何增强和消散的。而 XPAR 的时空分辨率都要高于 SPOL, 由于观测的缺失, XPAR 在 17:34 开始有观测数据, 图 7 给出了 17:34—17:41 时 XPAR 观测到的超级单体演变的过程及对应时刻与 SPOL 的对比。

从 XPAR 回波强度和径向速度图(图 7)上可以看出, 在 17:34 已经有明显的钩状回波, 对流层低层

的中气旋明显, 入流区和后部下沉区面积相当, 在垂直剖面图中可以观测到弱回波区及其上方的悬垂回波, 入流区的低层对应着明显的上升气流。之后中气旋依然明显, 钩状回波持续发展, 但入流区逐渐减弱, 被下沉气流区占据, 在 17:41 的垂直结构中可以看出, 超级单体的回波强度有所减弱, 回波上方的悬垂结构范围减小, 回波顶高明显降低, 而低层入流区对应的上升气流也明显减弱, 被下沉气流代替。对比 SPOL 可以看出, XPAR 的时空分辨率较高, 可以观测到更短时间内的超级单体的结构变化, 且由于其  $37.5 \text{ m}$  的距离库长和 40 层仰角的数据, 可以观测到超级单体更为精细完整的水平垂直结构, 弥补了 SPOL 仰角层严重不足的缺陷。但是由于 XPAR 的波长较短, 在强回波区后出现了明显的衰减, 同时灵敏度也不如 SPOL, 难以观测到 10 dBz 以下的弱回波。

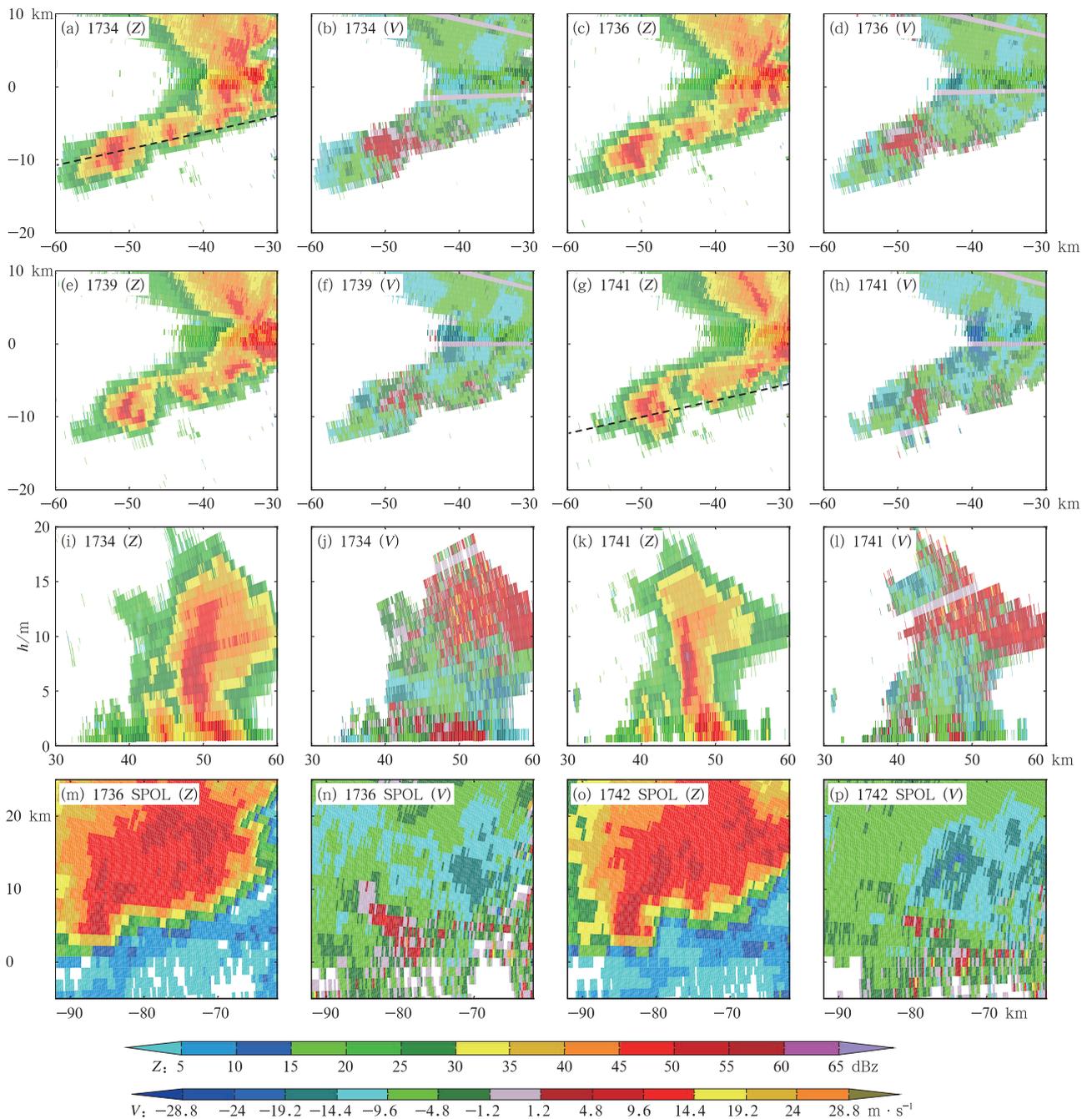


图 7 2016 年 6 月 3 日佛山相控阵雷达 17:34—17:42 的 0.5° 仰角回波强度(a,c,e,g)、  
径向速度(b,d,f,h)、沿虚线方向的垂直剖面的回波强度(i,k)和径向速度(j,l)及  
对应时刻 SPOL 的 0.5° 仰角回波强度(m,o)和径向速度(n,p)

Fig. 7 Echo intensity (a, c, e, g), radial velocity (b, d, f, h) at 0.5° elevation of XPAR in 17:34—17:41;  
echo intensity (i, k), radial velocity (j, l) of vertical cross-section along the dashed line direction  
and echo intensity (m, o) and radial velocity (n, p) at the corresponding time of SPOL in Foshan on 3 June 2016

图 8 为 XPAR 观测到的超级单体的消散过程及与 SPOL 对应时刻的对比。在 17:41, 图 7g, 7h 的水平结构中, 钩状回波依然明显, 入流及中气旋依旧存在, 且回波面积只比后部下沉气流稍小。而到

了 17:46, 图 8a, 8b 的水平结构中, 超级单体钩状回波结构虽然还存在, 但其中的中气旋几乎已经消失, 对应的对流风暴失去超级单体特性。随着超级单体的消亡, 入流逐渐消失, 而后部下沉气流对应的出流

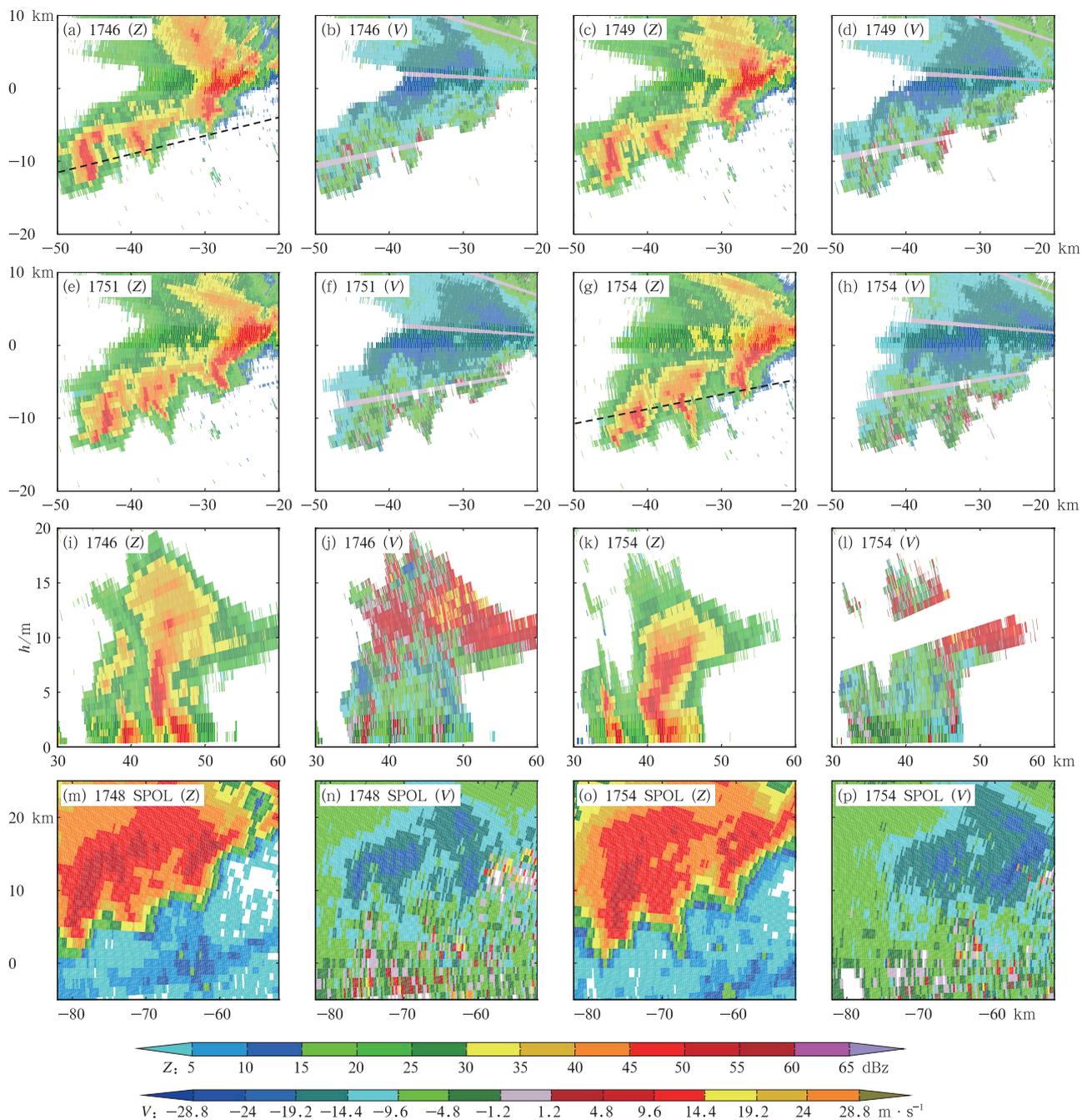


图 8 同图 7, 但为 17:46—17:51

Fig. 8 Same as Fig. 7, but for the period from 17:46 BT to 17:51 BT

逐渐增加, 出流的范围逐渐向入流一侧扩展, 从 17:49—17:51, 增强的出流使得超级单体右侧后部分裂出一部分, 到 17:51 入流已基本消失, 失去了入流支持, 钩状回波中心向内凹陷的结构也无法维持, 在 3 min 内便随出流快速向东推进, 超级单体进一步分裂, 17:54 钩状回波彻底消失。

## 4 结 论

利用 S 波段双偏振雷达、X 波段相控阵雷达、业务雷达以及地面和探空的观测资料, 详细分析了 2016 年 6 月 3 日发生在华南的一次超级单体中小

尺度特征。包含了超级单体产生的天气背景、对流演变、钩状回波的双偏振参量分布、地面特征分析、钩状回波增强及消散的短时变化等,结果表明:

(1) 此次强对流过程发生在500 hPa槽前、850 hPa切变线南侧;低空急流和低层暖湿气流增强了大气层结的条件不稳定性,环境大气的不稳定条件和水汽条件均有利于对流单体的发生和发展。但是具备有利的热力条件的区域并不局限于对流系统发展区域,对流的发生发展的位置以及时间必然和低空急流以及更小尺度的因素有关。

(2) SPOL的多普勒参量和双偏振参量可以观测到超级单体的强度、速度和相态分布,超级单体的入流和出流影响了钩状回波的形成,HCA的相态识别结果可以较好地描述超级单体内部的微物理分布特征。

(3) XPAR可以获取时空分辨率远高于SPOL的观测资料,可以弥补SPOL仰角层严重不足的缺陷,观测到超级单体完整的垂直结构,可更精确地描述超级单体的短时演变,但是XPAR衰减非常严重,强回波后的区域几乎观测不到,且灵敏度不如SPOL,难以观测到10 dBz以下的弱回波。

(4) 在超级单体生成过程中,中气旋的强弱对应了超级单体的发展和消散,延伸高度高,旋转速度大的中气旋更有利于超级单体的维持发展;对流层中层最先出现冰雹,并向上下延伸,在超级单体低层钩状回波结构出现前15~20 min左右,对流层低层中气旋后侧出现冰雹,在钩状回波形成后,冰雹主要分布在钩状回波和强回波区域,在中高层,冰雹主要在超级单体的悬垂回波区增长,在超级单体消散前,对流层中层的冰雹已经消失。

(5) 超级单体钩状回波附近给地面带来了降温、大风和强降水,强降水和大风出现在中气旋附近,在强降水区中有降雹,而下沉气流区则没有明显的强降水,超级单体经过地区均有明显降温和风区。

**致谢:**感谢中国气象科学研究院吴翀博士在相态识别方面提供的帮助,感谢中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室提供的办公条件。ERA-interim资料从欧洲中期天气预报中心网站下载。

## 参考文献

陈秋萍,陈齐川,冯晋勤,等,2015.“2012.4.11”两个强降雹超级单体特征分析[J].气象,41(1):25-33. Chen Q P, Chen Q C, Feng J Q, et al, 2015. Analysis of two severe hail supercell storms on 11 April 2012[J]. Meteor Mon, 41(1): 25-33(in Chinese).

陈涛,代刊,张芳华,2013.一次华北飑线天气过程中环境条件与对流发展机制研究[J].气象,39(8):945-954. Chen T, Dai K, Zhang F H, 2013. Study on ambient condition and initialization mechanism of convection in a severe squall line storm event in North China[J]. Meteor Mon, 39(8): 945-954(in Chinese).

陈元昭,俞小鼎,陈训来,等,2016.2015年5月华南一次龙卷过程观测分析[J].应用气象学报,27(3):334-341. Chen Y Z, Yu X D, Chen X L, et al, 2016. A tornado in South China in May 2015 [J]. J Appl Meteor Sci, 27(3): 334-341(in Chinese).

黄先香,俞小鼎,炎利军,等,2018.广东两次台风龙卷的环境背景和雷达回波对比[J].应用气象学报,29(1):70-83. Huang X X, Yu X D, Yan L J, et al, 2018. Contrastive analysis of two intense typhoon-tornado cases with synoptic and Doppler weather radar data in Guangdong[J]. J Appl Meteor Sci, 29(1): 70-83(in Chinese).

李晓敏,周筠珺,肖辉,等,2017.基于X波段双偏振雷达对雷暴单体中水成物粒子演变特征的研究[J].大气科学,41(6):1246-1263. Li X M, Zhou Y J, Xiao H, et al, 2017. Research on the evolution characteristics of hydrometeors in a thunderstorm cell with X-band dual-polarimetric radar[J]. Chin J Atmos Sci, 41(6): 1246-1263(in Chinese).

梁俊平,张一平,2015.2013年8月河南三次西南气流型强对流天气分析[J].气象,41(11):1328-1340. Liang J P, Zhang Y P, 2015. Analysis on three severe convective weather events of southwest flow type in Henan August 2013[J]. Meteor Mon, 41(11): 1328-1340(in Chinese).

刘黎平,吴翀,汪旭东,等,2015.X波段一维扫描有源相控阵天气雷达测试定标方法[J].应用气象学报,26(2):129-140. Liu L P, Wu C, Wang X D, et al, 2015. Test and calibration methods for X band active phased array weather radar[J]. J Appl Meteor Sci, 26(2): 129-140(in Chinese).

刘黎平,吴林林,吴翀,等,2014.X波段相控阵天气雷达对流过程观测外场试验及初步结果分析[J].大气科学,38(6):1079-1094. Liu L P, Wu L L, Wu C, et al, 2014. Field experiment on convective precipitation by X-band phased-array radar and preliminary results[J]. Chin J Atmos Sci, 38(6): 1079-1094(in Chinese).

刘亚男,肖辉,姚振东,等,2012.X波段双极化雷达对云中水凝物粒子的相态识别[J].气候与环境研究,17(6):925-936. Liu Y N, Xiao H, Yao Z D, et al, 2012. Analyses of hydrometeor identification based on X-Band polarimetric radar[J]. Climatic Environ Res, 17(6): 925-936(in Chinese).

农孟松,翟丽萍,屈梅芳,等,2014.广西一次飑线大风天气的成因和预警分析[J].气象,40(12):1491-1499. Nong M S, Zhai L P, Qu M F, et al, 2014. Study on initialization mechanism and alert of gale in squall line storm event[J]. Meteor Mon, 40(12): 1491-1499(in Chinese).

沈杭锋,张红蕾,高天赤,等,2016.浙江盛夏一次强对流天气的特征及其成因分析[J].气象,42(9):1105-1113. Shen H F, Zhang H L, Gao T C, et al, 2016. Study on features and formation of one severe convection process during midsummer in Zhejiang Province[J]. Meteor Mon, 42(9): 1105-1113(in Chinese).

- 覃靖,潘海,刘蕾,2017.柳州“4·09”致灾冰雹的超级单体风暴过程分析[J].气象,43(6):745-755. Qin J, Pan H, Liu L, 2017. Analysis of supercell storm leading to disastrous hail in Liuzhou on 9 April 2016[J]. Meteor Mon, 43(6):745-755(in Chinese).
- 王易,郑媛媛,孙康远,等,2018.南京雷达中气旋产品特征值统计分析[J].气象学报,76(2):266-278. Wang Y, Zheng Y Y, Sun K Y, et al, 2018. A statistical analysis of characteristics of mesocyclone products from Nanjing Radar[J]. Acta Meteor Sin, 76(2):266-278(in Chinese).
- 吴翀,刘黎平,汪旭东,等,2014.相控阵雷达扫描方式对回波强度测量的影响[J].应用气象学报,25(4):406-414. Wu C, Liu L P, Wang X D, et al, 2014. The measurement influence of reflectivity factor caused by scanning mode from phased array radar[J]. J Appl Meteor Sci, 25(4):406-414(in Chinese).
- 吴海英,陈海山,刘梅,等,2017.长生命史超级单体结构特征与形成维持机制[J].气象,43(2):141-150. Wu H Y, Chen H S, Liu M, et al, 2017. Structure characteristics, formation and maintenance mechanism of supercell with long life cycle[J]. Meteor Mon, 43(2):141-150(in Chinese).
- 许爱华,马中元,叶小峰,2011.江西8种强对流天气形势与云型特征分析[J].气象,37(10):1185-1195. Xu A H, Ma Z Y, Ye X F, 2011. Eight kinds of strong convective weather situations and related cloud type characteristics in Jiangxi[J]. Meteor Mon, 37(10):1185-1195(in Chinese).
- 许爱华,孙继松,许东蓓,等,2014.中国中东部强对流天气的天气形势分类和基本要素配置特征[J].气象,40(4):400-411. Xu A H, Sun J S, Xu D B, et al, 2014. Basic synoptic situation classification and element character of severe convection in China[J]. Meteor Mon, 40(4):400-411(in Chinese).
- 许新田,刘瑞芳,郭大梅,等,2012.陕西一次持续性强对流天气过程的成因分析[J].气象,38(5):533-542. Xu X T, Liu R F, Guo D M, et al, 2012. Cause analysis of a continuous severe convective weather in Shaanxi[J]. Meteor Mon, 38(5):533-542(in Chinese).
- 俞小鼎,郑媛媛,廖玉芳,等,2008.一次伴随强烈龙卷的强降水超级单体风暴研究[J].大气科学,32(3):508-522. Yu X D, Zheng Y Y, Liao Y F, et al, 2008. Observational investigation of a tornadic heavy precipitation supercell storm[J]. Chin J Atmos Sci, 32(3):508-522(in Chinese).
- 张劲梅,莫伟强,2013.2013年3月20日广东东莞罕见龙卷冰雹特征及成因分析[J].暴雨灾害,32(4):330-337. Zhang J M, Mo W Q, 2013. Analysis of a rare hail-producing tornado event on 20 March 2013 in Dongguan, Guangdong Province[J]. Torrential Rain Disasters, 32(4):330-337(in Chinese).
- 张涛,方翀,朱文剑,等,2012.2011年4月17日广东强对流天气过程分析[J].气象,38(7):814-818. Zhang T, Fang C, Zhu W J, et al, 2012. Analysis of the 17 April 2011 severe convective weather in Guangdong[J]. Meteor Mon, 38(7):814-818(in Chinese).
- 张志强,刘黎平,2011.相控阵技术在天气雷达中的初步应用[J].高原气象,30(4):1102-1107. Zhang Z Q, Liu L P, 2011. Preliminary application of phased array technology in weather radar[J]. Plateau Meteor, 30(4):1102-1107(in Chinese).
- 郑艳,俞小鼎,任福民,等,2017.海南一次超级单体引发的强烈龙卷过程观测分析[J].气象,43(6):675-685. Zheng Y, Yu X D, Ren F M, et al, 2017. Analysis on a severe tornado process in Hainan triggered by supercell[J]. Meteor Mon, 43(6):675-685(in Chinese).
- 郑媛媛,姚晨,郝莹,等,2011.不同类型大尺度环流背景下强对流天气的短时临近预报预警研究[J].气象,37(7):795-801. Zheng Y Y, Yao C, Hao Y, et al, 2011. The short time forecasting and early warning research on severe convective weather under different types of large scale circulation background[J]. Meteor Mon, 37(7):795-801(in Chinese).
- Bluestein H B, French M M, PopStefanija I, et al, 2010. A mobile, phased-array Doppler radar for the study of severe convective storms; the MWR-05XP[J]. Bull Amer Meteor Soc, 91(5):579-600.
- Browning K A, 1977. The structure and mechanisms of hailstorms [J]. Meteor Monogr, 38:1-36.
- Heinselman P L, Priegnitz D L, Manross K L, et al, 2008. Rapid sampling of severe storms by the national weather radar testbed phased array radar[J]. Wea Forecasting, 23(5):808-824.
- Lemon L R, Doswell III C A, 1979. Severe thunderstorm evolution and mesocyclone structure as related to tornadogenesis[J]. Mon Wea Rev, 107(9):1184-1197.
- Moller A R, Doswell III C A, Foster M P, et al, 1994. The operational recognition of supercell thunderstorm environments and storm structures[J]. Wea Forecasting, 9(3):327-347.
- Rasmussen E N, Richardson S, Straka J M, et al, 2000. The association of significant tornadoes with a baroclinic boundary on 2 June 1995[J]. Mon Wea Rev, 128(1):174-191.
- Zrnec D S, Kimpel J F, Forsyth D E, et al, 2007. Agile-beam phased array radar for weather observations[J]. Bull Amer Meteor Soc, 88(11):1753-1766.