

文章编号: 2096-1618(2022)03-0290-12

台风“苗柏”影响下局地强降水精细化垂直结构特征观测分析

谷欣蕊¹, 罗亚丽², 肖天贵¹, 吴翀², 郑栋²

(1. 成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都 610225; 2. 中国气象科学研究院, 北京 100081)

摘要:为研究珠三角地区强降水的云微物理特征,利用广州双偏振雷达观测数据、地面自动站降水资料、广州低频电场探测阵列探测的闪电脉冲放电事件资料及 ERA5 再分析资料,分析 2017 年 6 月 12-13 日台风“苗柏”影响下珠三角地区三处(A、B、C)局地短时强降水的精细化垂直结构特征。结果表明:珠三角内陆 A、B 区域的强降水由一条快速移动的东北—西南中尺度带状强回波的北段和中段产生,海岸线上 C 区域的强降水由一个稳定维持的准静止团状对流体产生;溶解层以下,3 个区域的 Z_{DR} 、 K_{DP} 随着高度降低逐渐增大,表明其暖雨过程很活跃;3 个区域 40 dBz 回波伸展至 9 km 左右,4.5 ~ 7 km 处霰粒子占有类型水凝物的面积比例均大于 40%,5 ~ 13 km 高度均出现闪电,表明冰相和混合相云微物理过程对强降水也有重要贡献;相比 A 和 B, C 区域溶解层以下 Z_{Hh} 频次峰值的 Z_{Hh} 值更大,近地面极端累积降水量更大,低层较大的雨滴和较高的含水量均更多,闪电脉冲放电事件频次峰值的高度也更高。这不仅由于 C 区域具有更丰富的水汽、更低的抬升凝结高度和自由对流高度,也与其对流体的团状形态和稳定少动有关。

关键词:大气科学;中尺度气象学;强降水;双偏振雷达;珠三角;暖雨过程;冰相过程

中图分类号: P458.1+21

文献标志码: A

doi: 10.16836/j.cnki.jcuit.2022.03.009

0 引言

华南是中国年平均降雨量最大、暴雨频次最高的地区^[1-3],其中,位于广东沿海的珠三角城市群地区是华南地区经济与人口中心,其东南侧与南海相连,其余三面山脉环绕,受东亚夏季风、台风、海陆风、地形等影响,强降水频发,且快速城市化以来短时强降水发生频次升高^[4]。强降水预报难度大,并且易引发城市内涝、山体滑坡等灾害,因此,有必要深入认识强降水形成的机理,为提高预报水平提供科学支撑。

产生强降水的云微物理过程及其与对流尺度动力过程的关系是大气科学研究的热点和难点。国内外学者最近发现强降水主要由暖雨过程造成,极端强降水与极端深对流的相关性并不高。Sohn 等^[5]研究发现韩国半岛强降水更多地与暖云(低云)而不是深对流云相联系,朝鲜半岛夏季大部分降水(约占总量的 90%)与回波顶高不到 8 km 的相对较低的云层有关;Song 等^[6]将朝鲜半岛的强降水分为暖云降水和冷云降水,指出暖云降水的持续时间更长,与当地的洪涝灾害的发生关系更为密切;Hamada 等^[7]利用 11 年 TRMM PR 资料研究发现热带和副热带极端降水和极端对流之间相关性很弱,大多数极端降雨事件的特征

是雷达反射率较大,但没有发展到极高的高度,即极端降雨率不是极其深厚的对流产生;Gingrey 等^[8]进一步利用美国东南地区 28 部 WSR-88D 双偏振雷达数据与 TRMM 观测数据进行匹配分析,其结论与 Hamada 等的研究一致;杨忠林等^[9]研究江淮梅雨期对流降水中 R 类(降水最强的 1%)和 H 类(对流发展高度最高的 1%)这两类极端对流降水系统的微物理特征,也发现梅雨期降水强度与对流发展的高度相关较弱;Luo 等^[10]和 Li 等^[11]研究 2017 年 5 月 7 日广州破纪录特大暴雨过程的两个主要对流体,发现产生此次事件最大小时降水($219 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$)的对流体以活跃的暖雨过程为主,而冰相和混合相微物理过程在另一个对流体(最大小时降水 $121 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$)内比较强盛。

也有研究表明冰相和混合相云微物理过程对华南、尤其是珠三角城市群地区强降水的贡献不可忽略。Luo 等^[12]统计分析华南和江淮季风期降水和对流的特征,发现中尺度对流系统(MCS)是最主要的降水制造者,在华南降水活跃期 MCS 最大雷达反射率因子的前 10% 垂直廓线中有霰和小冰雹存在;吴翀^[13]分析广东一次飑线过程的云微物理特征,发现在对流发展旺盛阶段出现了由过冷水滴与冰晶碰冻增长形成的霰和冰雹;Xia 等^[14]和 Zheng 等^[15]统计 6 年闪电气候特征发现珠三角城市群内陆地区为闪电密度高值中心,表明其混合相云微物理过程比较活跃。

可见,珠三角城市群地区不同天气系统影响下强降水的云微物理过程及相关的对流强度仍然不十分清楚,而定量描述对流精细结构及云微物理特征对模式的改进等气象应用非常重要。故本文利用广州双偏振雷达和地面自动站降水及低频电场探测阵列探测的闪电脉冲放电事件资料,研究2017年2号台风“苗柏”影响下珠江三角洲地区3个区域(图1)局地强降水精细化垂直结构特征。

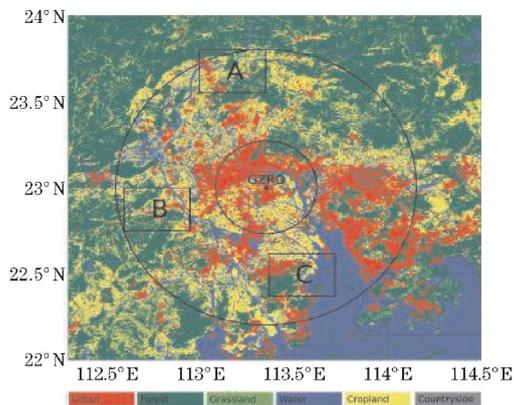


图1 2015年广东土地利用类型分布及A、B、C 3个区域

1 资料

利用广州S波段双偏振雷达(GZRD, 23.004°N, 113.355°E)逐6 min观测资料、地面自动气象站逐5 min降水资料,逐10 min广州低频电场探测阵列(low-frequency E-field detection array, LFEDA)探测的闪电脉冲放电事件资料及逐小时ERA5再分析资料,研究此次过程强降水的垂直结构特征。图2显示了广州雷达、地面自动站及LFEDA的分布,黑色三角表示广州雷达位置,黑色的点表示环带内共617个雨量站,2个圆以雷达为中心、半径分别为30 km和85 km,3个框表示A、B、C 3个区域的位置,红色三角表示LFEDA的9个子站位置,灰色阴影表示地形高度。

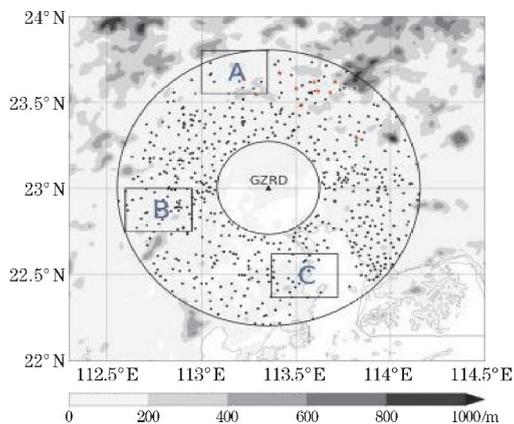


图2 广州雷达(GZRD)及距离雷达30~85 km环带内地面自动站和LFEDA的分布

广州S波段双偏振雷达观测半径为230 km,主要采用VCP21的体扫模式,每个体扫包含9个仰角,时间为6 min。该雷达采用双发双收的工作模式,可以获得多种与降水云微物理特征相关的变量,包括反射率因子 Z_H 、差分反射率因子 Z_{DR} 和差分相移传播率 K_{DP} 等。其中, Z_H 与降水粒子的大小和浓度有关,与粒子直径的6次方成正比, Z_H 越大,降水粒子越大; Z_{DR} 可以反映降水粒子的形状和空间取向等信息,当 $Z_{DR} \approx 0$ 时,降水粒子近似球形, $Z_{DR} > 0$ 时,降水粒子呈扁椭球形, $Z_{DR} < 0$,降水粒子呈竖向椭球形; K_{DP} 主要与降水粒子的形状和数浓度有关,能够反映液态水含量的大小, K_{DP} 越大,含水量越大。

对广州雷达原始观测数据资料进行质量控制^[13],首先去除地物和晴空回波、径向干扰、距离折叠、零速度线等杂波,随后对噪声和标定误差的影响予以质控,并用滤波后的双偏振参量对 Z_H 和 Z_{DR} 做衰减订正处理,最后对于质控后的数据,一方面运用多种检验方法(包括干雪法、数据自一致性检验等)确定误差已经基本去除,另一方面计算数据质量系数,将误差和气象回波混叠的情况定量分析。对质控后的基数据运用径向和方位上的最近邻居和垂直线性内插法,插值到以雷达为中心的笛卡儿坐标系中,得到水平和垂直分辨率分别为250 m和500 m的格点数据。

运用美国业务系统中最新使用的基于衰减率 A_H 的降水强度估算方法^[16-18],生成雷达最低层扫描仰角的降水反演产品,也插值到与基数据相同的经纬度格点;运用基于美国业务使用的水凝物识别算法(HCA),通过统计分析,优化算法参数,使其适用于广州雷达,生成降水相态识别产品并插值到与基数据相同的经纬度格点,同时也验证该相态识别算法的合理性^[19]。降水相态识别结果分为10种类型:地物或异常传播(GC/AP);晴空回波(BS);干雪(DS);湿雪(WS);冰晶(CR);霰(GR);大滴(BD);雨(RA);大雨(HR);雨夹雹(RH)。考虑雷达静锥区探测盲区,且随着距离增大雷达观测数据的垂直分辨率降低,因此,选取以广州雷达为中心、半径30~85 km(以下简称环带)的观测数据,分析强降水的精细垂直结构。距离广州雷30 km和85 km,0.5°仰角扫描观测距离海平面大约是500 m和1200 m,在此范围内无明显的地形阻挡,并且资料的垂直分辨率较高、垂直覆盖较完整,能够较有效地观测降水的垂直结构。

LFEDA^[20]由中国气象科学研究院于2014年开始

在广州地区建设,由9个子站组成探测网络,子站的电场变化探头采用传统的闪电快电场变化测量仪,电场波形数据的采样长度为1 ms,采样率为10 MSa/s,分辨率为12位。LFEDA主要观测闪电放电过程中产生的快速电场变化脉冲信号,可以实现脉冲放电事件的高精度三维定位,具备对全部类型闪电(云闪、地闪)放电过程进行三维定位的能力。

ERA5再分析资料水平分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,垂直方向从1000~1 hPa,共37层,时间分辨率为1 h。

2 地面降水与对流演变

2017年第2号台风“苗柏”在6月11日14时(本文时间均为当地时,LST)左右于南海生成,12日23时左右在深圳大鹏半岛登陆,登陆时台风强度为热带风暴级,之后继续向北东北方向移动,强度逐渐减弱,于6月13日11时在广东省的东北部(河源市和平县境内)减弱为热带低压,此次过程造成了广东省珠江三角洲地区、粤东部分地区大到暴雨。选取珠江三角洲

城市群地区A、B、C3个区域雷达组合反射率大于55 dBz的连续时段,研究此次过程中局地强降水的精细垂直结构。其中,A、B区域强降水发生在台风登陆前约9 h,两区域位于海上台风中心($114.8^\circ \text{E}, 21^\circ \text{N}$)的西北方向,相距台风中心大约300 km,A区域2017年6月12日13:48–14:06、B区域2017年6月12日14:00–14:36有带状强回波快速扫过,强回波的反射率均超过55 dBz(图3a),各自维持了大约20 min和40 min;C区域强降水则发生在台风登陆后约11 h,即6月13日10:00–11:00,海岸线附近的C区域位于台风中心($115^\circ \text{E}, 24.3^\circ \text{N}$)西南方向,距台风中心大约250 km,受台风外围螺旋雨带影响,近乎团状的强回波在C区域稳定维持近1 h,雷达反射率高达61 dBz(图3b)。图3中黑色圆点表示3个区域研究时段平均降水率超过 $20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的站点位置。在相应时段(表1),3个区域地面自动站均观测到短时强降水,最大5 min降水率分别为 $62.4 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $92.4 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $139.2 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

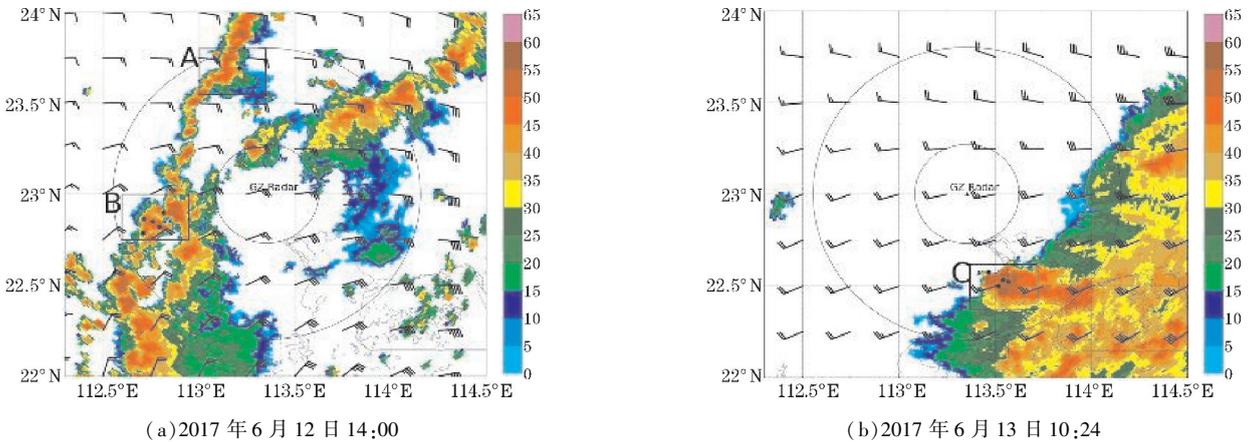


图3 广州雷达组合反射率(阴影)、850 hPa 风场(风矢,一个长杆代表 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)及A、B、C 3 区域位置分布图

表1 A、B、C 3 个区域的研究时段

区域	研究时段
A	2017年6月12日13:48–14:06
B	2017年6月12日14:00–14:36
C	2017年6月13日10:00–11:00

6月12日10时,即“苗柏”台风登陆前约13 h,台风中心位于($115.1^\circ \text{E}, 20.5^\circ \text{N}$),并以 $20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的速度朝北、西北方向靠近广东地区,珠三角地区对流层低层受台风北部偏东气流控制。此时,多个对流体出现在香港附近,大致呈东北—西南排列(图4a)。10:00–14:00 对流增强发展,逐渐组织成为两个准线状的

中尺度对流系统(MCS)(图4a~c),其中一个MCS呈准南北向分布,长度约230 km,A、B区域分别出现在此MCS的北段、中段,距离广州雷达分别约80 km、60 km(图4c),850 hPa相当位温高达 $350 \sim 352 \text{ K}$ (图4e),这显然与台风环流输送海上的暖湿空气有关。6月13日10时,即台风“苗柏”登陆后约11 h,台风中心位于广东东北部($115^\circ \text{E}, 24.3^\circ \text{N}$),珠三角地区对流层低层受台风西南象限的西南气流影响(图4d),850 hPa相当位温达 $348 \sim 350 \text{ K}$ (图4f),C区域准静止的 γ 中尺度对流系统稳定少动,此MCS是登陆的台风“苗柏”外围螺旋雨带的一部分。

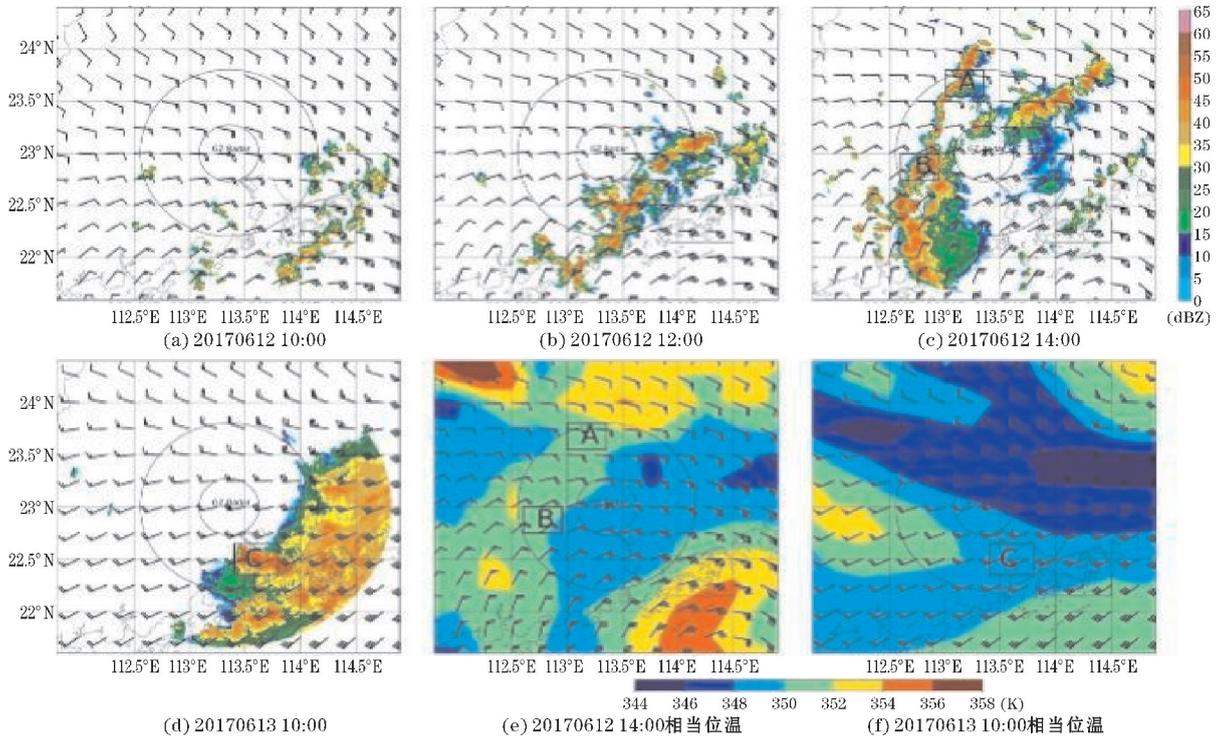


图 4 “苗柏”登陆前后,3 个区域 850 hPa 风场、组合反射率和相当位温分布图

由图 5 逐 6 min 雷达反射率分布图可以更清楚地看出 A、B、C 区域对流的水平形态和演变过程,其中 (a1) ~ (a4) 表示 A 区域, (b1) ~ (b7) 表示 B 区域, (c1) ~ (c9) 表示 C 区域,黑框表示 A、B、C 三个区域的范围,黑色五角星表示 ERA5 格点的位置,两个圆以广州雷达为中心,半径为 30 km 和 85 km。如图 5(a1) ~ (a4), A 区域时段,产生短时强降水的对流系统维持准线状的水平形态,强回波 (>40 dBz) 区域的宽度约 10 km,最大反射率为 56 dBz,以速度 35 km · h⁻¹ 朝西移动;如图 5(b1) ~ (b7) 所示, B 区域时段,早期存在多个对流体,较为零散、形状较不规则,由于其向西移动的速度不相同,发生合并、连接,逐渐组织成为一个条状的强回波区,其宽度大约 20 km,最大反射率为

57 dBz。分析时段平均降水率超过 20 mm · h⁻¹ (表 2) 的地面自动站,在 A 区域仅一站 (36.9 mm · h⁻¹),而 B 区域共 5 站,其中最高为 53.1 mm · h⁻¹。

6 月 13 日 10 时, C 区域产生强降水的对流系统呈准团状, 50 ~ 55 dBz 的长度约 10 ~ 15 km (图 5c1), 10:06 在西侧新生一个对流体,它迅速发展,于 10:24 与团状对流体合并 (图 5c2 ~ c5)。10:00-11:00 强回波一直停留在海岸线附近,最大反射率维持在 55 dBz 以上 (图 5c1 ~ c9)。C 区域有 4 个地面自动站 10:00-11:00 1 h 累积降水超过 20 mm · h⁻¹, 其中,中山市南朗镇 G2043 站 (22.532 °N, 113.541 °E) 高达 103.6 mm, 中山市南朗镇 G2052 站 (22.523 °N, 113.567 °E) 高达 101.4 mm, 远远超过区域 A、B 的记录 (表 2)。

表 2 A、B、C 区域研究时段内地面自动站观测平均降水率

区域	时段	站号	纬度/°N	经度/°E	平均降水率/(mm · h ⁻¹)
A	13:45-14:05	G2704	23.667	113.2	36.9
		G2215	22.821	112.794	37.7
B	14:00-14:35	G7032	22.863	112.714	39.8
		G7027	22.852	112.759	35.1
		G7021	22.899	112.817	40.5
		G7026	22.789	112.712	53.1
		G2052	22.523	113.567	101.4
C	10:00-11:00	G2005	22.5	113.517	58.9
		G2043	22.532	113.541	103.6
		G2023	22.577	113.465	25.1

仅列出大于 20 mm · h⁻¹ 的站。

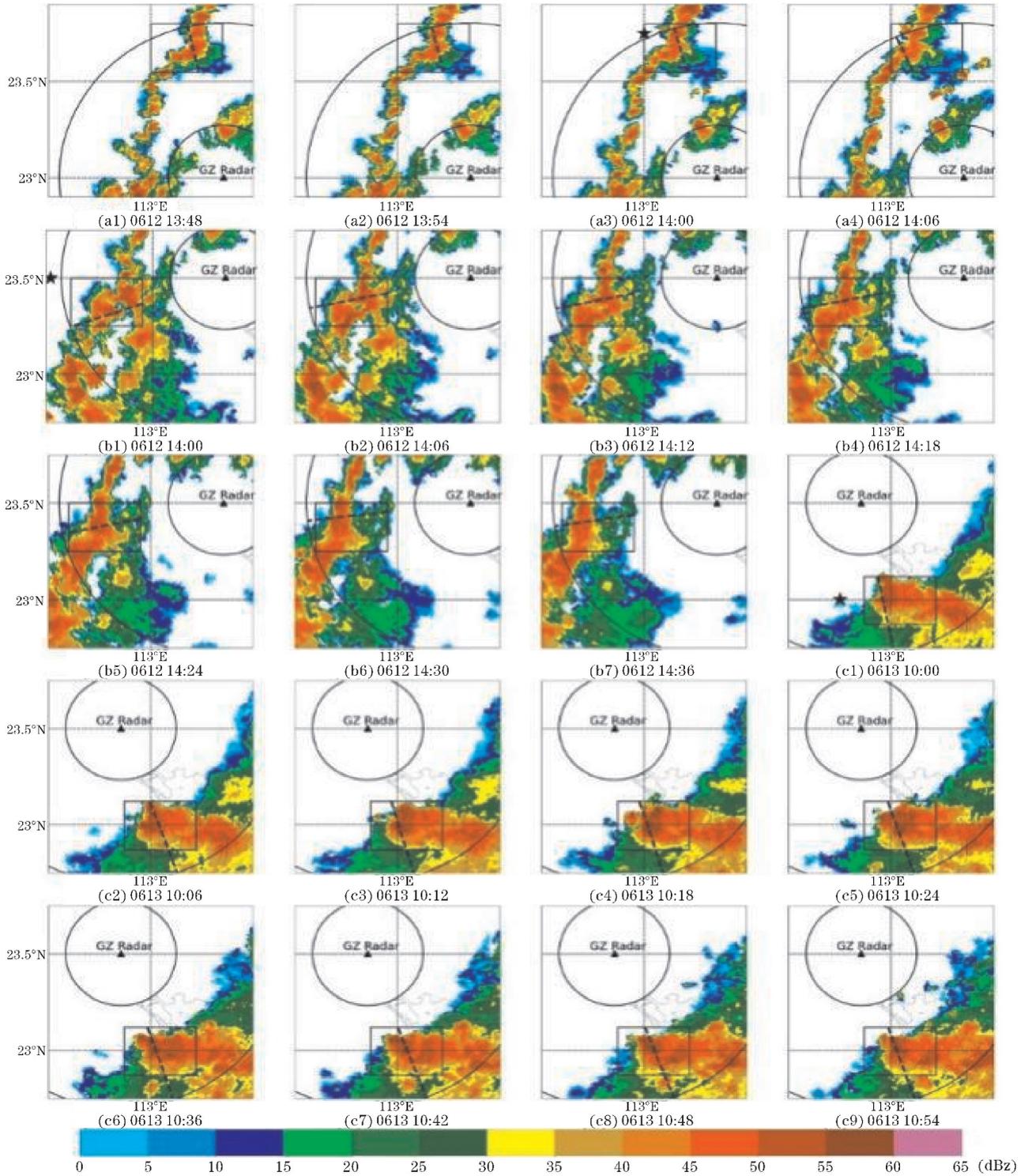


图5 3个区域研究时段内逐6 min 雷达组合反射率时间演变图

图6显示A、B、C区域分析时段逐6 min雷达最低扫描仰角观测反演的强对流(1 km高度雷达反射率 >40 dBz)降水率(图中矩形盒中间的横线表示降水率的中值,上下两根横线分别表示第75%、25%值,矩形盒外上下两条短横线分别表示所选取的样本第90%、10%的值,黑色空心圆表示大于第90%的值),各区域降水率的中值都超过了 $20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,第90百分位数都超过了 $70 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,而35年(1981–2015年)华南地区

地面自动站观测的小时降水率第99.9百分位数为 $60 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ^[21],可见3个区域都产生了极端强的短时降水率。与A区域相比,B、C区域的中值和第75百分位的瞬时降水率更高,且出现少数超过 $120 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的瞬时降水率,这可能与B、C区域对流核的水平尺度相对较大有关。而C区域地面自动站观测到最为极端的累积降水量,这主要是由区域内对流体稳定少动的特征决定的。

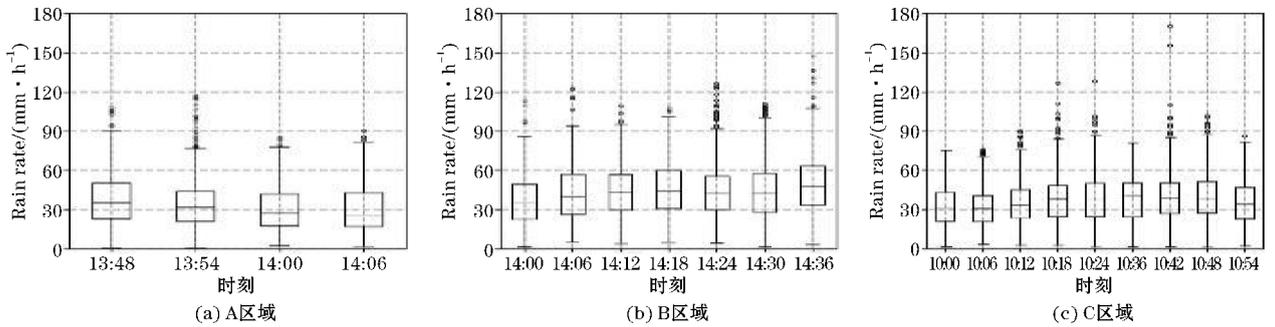


图6 双偏振雷达反演强对流(1 km 高度反射率>40 dBz)降水率的盒须图

3 强降水精细化垂直结构特征

如前所述,在台风“苗柏”的影响下,珠三角地区 A、B、C 区域分别在 2017 年 6 月 12 日 13:48-14:06、2017 年 6 月 12 日 14:00-14:36、2017 年 6 月 13 日 10:00-10:54 有强降水对流发展。分别选取各自区域时段组合反射率的最大值点,过该点朝着广州雷达方向做垂直剖面,3 个区域-20 °C、-10 °C、0 °C 温度线的高度由 ERA5 资料算出。图 7 给出了 A 区域 13:48-14:06 逐 6 min 的垂直剖面图,剖面位置如图 5(a1)~(a4)中黑色虚线所

示,3 条水平的黑线表示 0 °C、-10 °C、-20 °C 的高度位置,横坐标表示相对于广州雷达的距离。可以看到, Z_H 、 Z_{DR} 和 K_{DP} 的大值区位置互相对应, Z_H 大值(50 ~ 55 dBz,即对流核)伸展至 5 km(0 °C 温度线下方约 200 m),40 dBz 伸展至 7 km(-10 °C 温度线的位置),此对流核内 Z_{DR} 值多在 2 ~ 3 dB,雨滴直径约为 1.85 ~ 2.75 mm, K_{DP} 值多为 2.0 °/km ~ 2.5 °/km,表明液态水含量较高,水凝物分类算法识别出对流核低层多为大雨滴。对流核上部,4 ~ 8 km 识别出霰,最高伸展至 11 km 左右,超过 -20 °C 温度线(大约位于 9 km),这表明对流核内的冰相和混合相云微物理过程比较强盛。

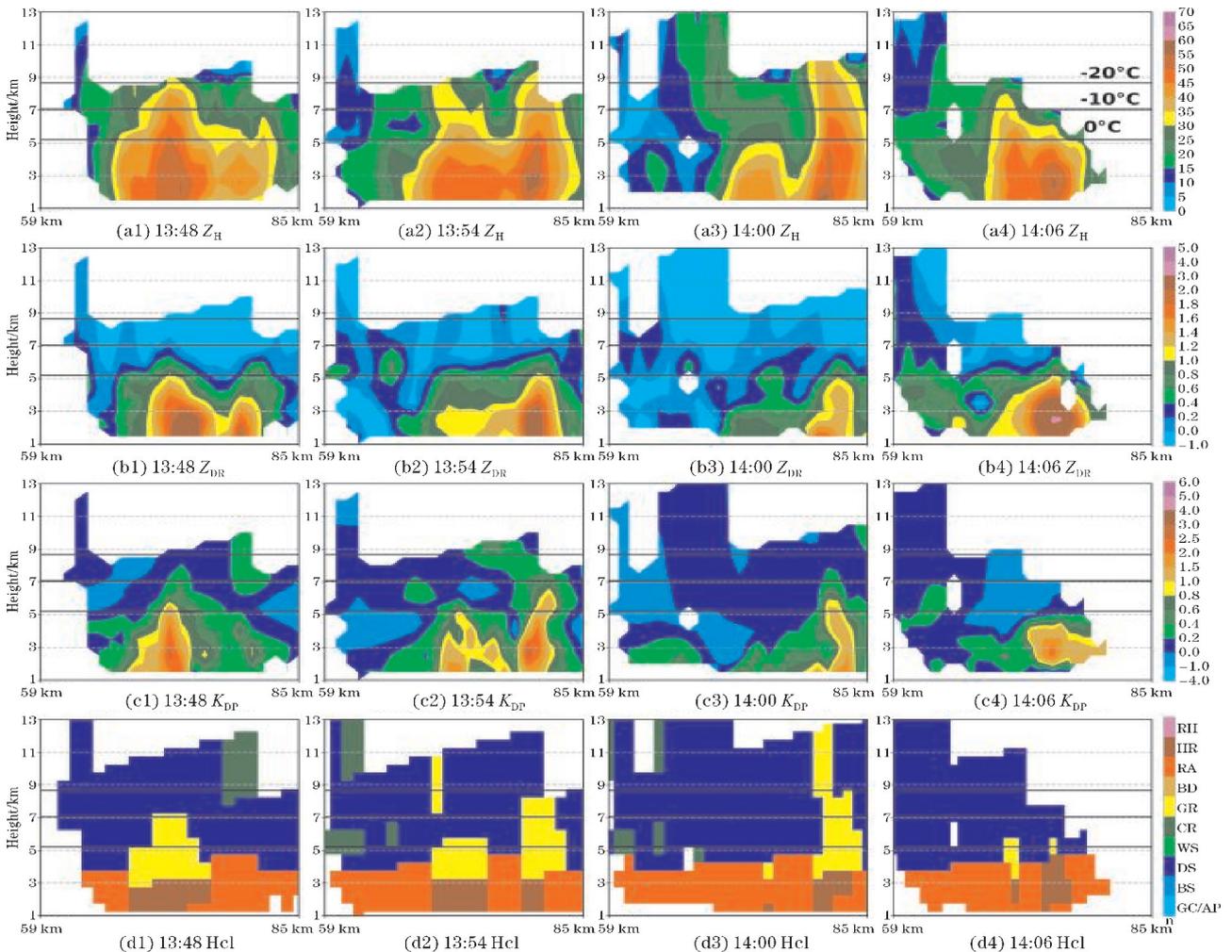


图7 A 区域 2017 年 6 月 12 日 13:48-14:06 逐 6 min 沿最大组合反射率方向的垂直剖面图

图8为B区域内14:00-14:36部分时次垂直剖面,剖面位置如图5(b1)~(b7)中黑色虚线所示,3条水平的黑线表示0℃、-10℃、-20℃的高度位置,横坐标表示相对于广州雷达的距离,图9同图8但为C区域10:00-10:54部分时次垂直剖面,剖面位置如图5(c1)~(c9)中黑色虚线所示。与A区域类似,B区域5 km以下, Z_H 、 Z_{DR} 和 K_{DP} 的大值区位置互相对应,但是,B区域对流核的面积比A区域更大,低层 Z_{DR} 值高达3~4 dB, K_{DP}

值也高达 $3^\circ/\text{km} \sim 4^\circ/\text{km}$,表明更大的雨滴和更高的含水量;对流核上方4~9 km高度也识别出霰粒子,且多数时刻40 dBz伸展到大约9 km,略高于A区域。相比A和B区域,C区域(图9) Z_{DR} 大值(3~4 dB)和 K_{DP} 大值的面积均更大,对流核区低层 K_{DP} 值也更大(最大达 $6^\circ/\text{km}$),表明更多的大雨滴和更高的含水量;C区域对流核区4~9 km高度也存在霰粒子,40 dBz伸展至7 km及以上,10:36-10:54最高达9 km。

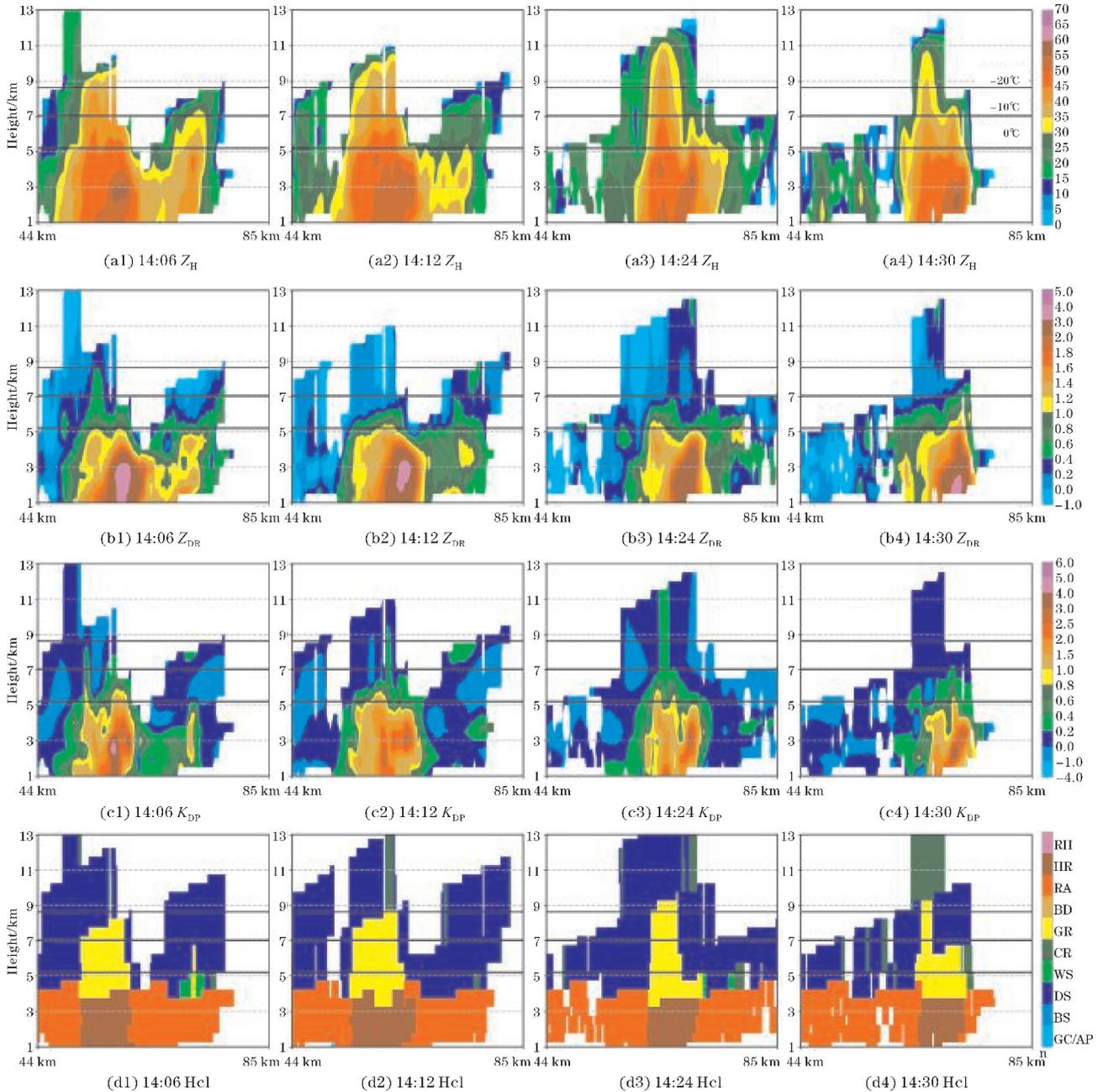


图8 B区域2017年6月12日14:00-14:36部分时次沿最大组合反射率方向的垂直剖面图

图10(a)为A、B、C区域研究时段内霰粒子占比的垂直廓线。3个区域均呈现单峰垂直结构,但是峰值出现的高度不同,分别位于4.5 km、5.0 km、

5.5 km,峰值大小略有差别,分别为78%、89%、85%。峰值以上3区域廓线的变化有明显区别,A区域霰粒子占比迅速降低,7.5 km降至18%,8.5 km降至4%;

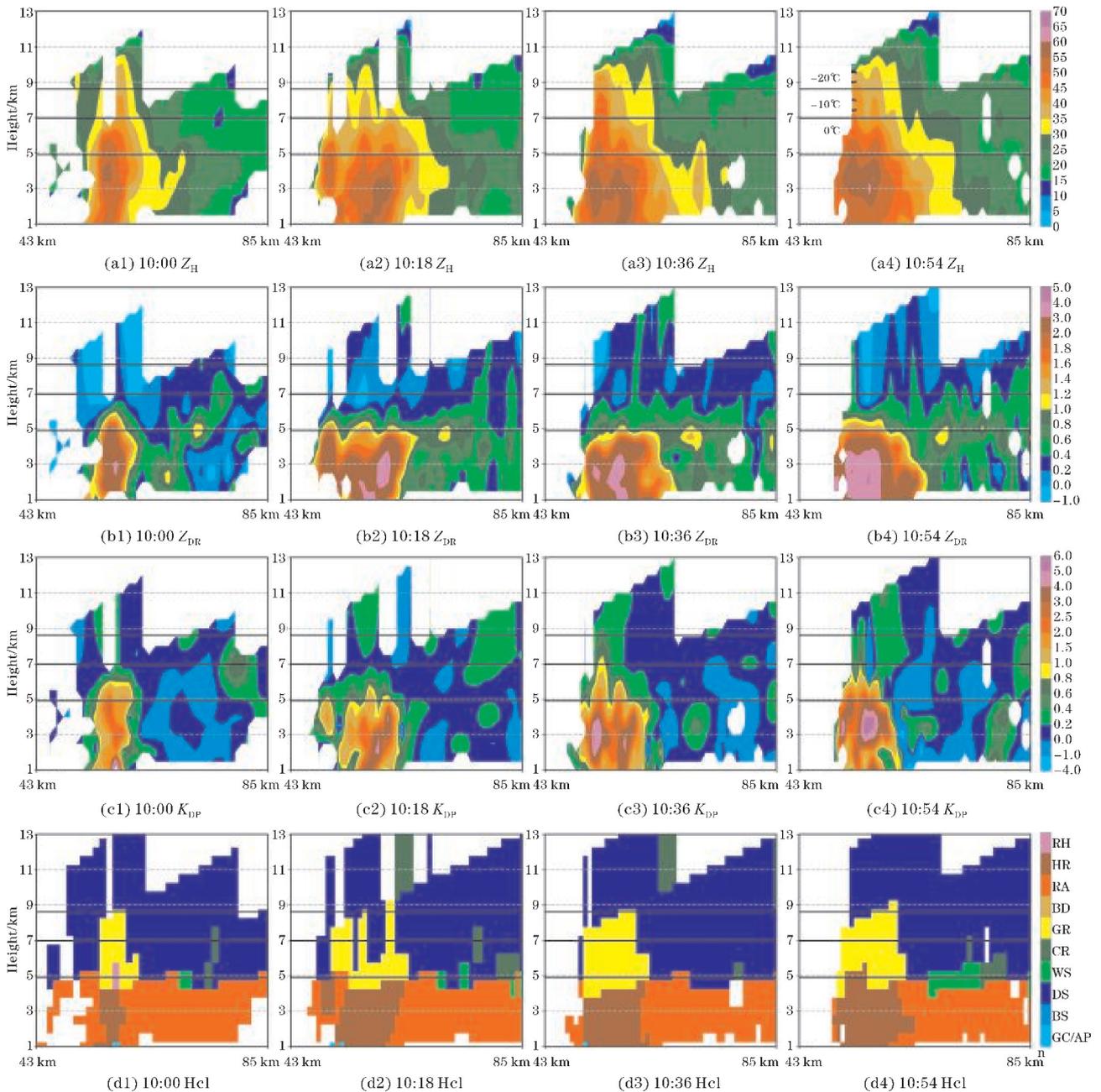
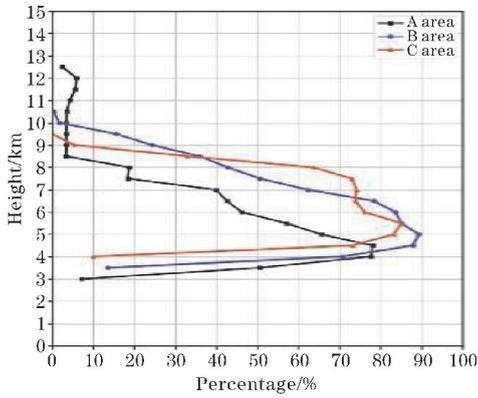


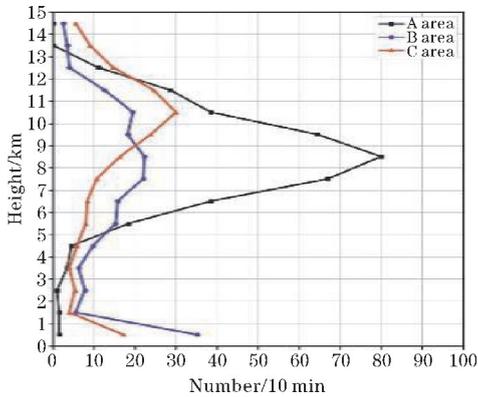
图9 C区域2017年6月13日10:00-10:54部分时次沿最大组合反射率方向的垂直剖面图

B区域在6.5 km仍有78%,再往上才迅速降低;C区域在7.5 km占比仍然高达73%,再往上迅速降低。3个区域的峰值以下的霰粒子占比均迅速降低,分别在3.0 km、3.5 km、4.0 km降低至10%左右,表明霰粒子融化对形成大雨滴有一定贡献,即淞附过程对3个区域的短时强降水有一定的贡献。这些特征大致与图10(b)所示的闪电脉冲放电事件频数的垂直分布主要特征定性一致(闪电探测时段A区域:2017年6月12日13:50-14:10;B区域2017年6月12日14:00-14:40;C区域2017年6月13日10:00-11:00)。3个区域在研究时段内均发生了闪电,且都主要集中在5

~13 km高度,C区域峰值的高度最高(10~11 km),可能对应的上升气流更强,将冰晶、霰等冰相粒子带到较高的高度,摩擦碰撞发生闪电现象,而A区域峰值以上降低最迅速。值得注意的是,闪电脉冲放电事件频数的探测效率与距离LFEDA子站的远近、云的面积、雷暴活跃程度等有关。子站的中心位置位于(23.62°N,113.58°E),A、B、C区域距离子站中心位置分别为50 km、100 km、115 km。观测到A区域的闪电脉冲放电事件频数最大,可能与其距离子站中心位置最近有关,而2 km以下的频数对应着地闪的回击过程。



(a) 霏粒子占比随高度垂直分布



(b) 平均每 10 min 闪电脉冲放电事件频数随高度垂直分布

图 10 A、B、C 区域研究时段内霏粒子占比和闪电脉冲放电事件频数随高度的分布图

图 11 给出了 3 个区域雷达观测量(Z_H, Z_{DR}, K_{DP})—高度联合概率密度分布。3 条水平的黑线表示 $0\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $-10\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $-20\text{ }^\circ\text{C}$ 的高度位置。可以看到,溶解层(约 5 km)以下,A 区域 Z_H 集中在 $40\sim 50\text{ dBz}$, Z_{DR} 集中在 1 dB 左右,最大达 3 dB(对应的雨滴直径约 2.75 mm), K_{DP} 高频区位于 $0\text{ }^\circ/\text{km}\sim 1\text{ }^\circ/\text{km}$; B 区域 Z_H 主要在 $45\sim 50\text{ dBz}$, Z_{DR} 集中在 $1\sim 2\text{ dB}$,最大达 3.4 dB(对应雨滴直径约 3.0 mm), K_{DP} 高频区位于 $1\text{ }^\circ/\text{km}\sim 1.5\text{ }^\circ/\text{km}$; C 区域 Z_H 频次峰值位于 $48\sim 54\text{ dBz}$, Z_{DR} 于 $1\sim 3\text{ dB}$ 较均匀地分布,最大达 3.8 dB(对应雨滴直径约 3.39 mm), K_{DP} 分布最宽广,相对高频出现在 $0.5\text{ }^\circ/\text{km}\sim 2.2\text{ }^\circ/\text{km}$ 。3 个区域对比,A、B、C 区域 Z_H 频次峰值对应的 Z_H 值逐渐增大(45 dBz、48 dBz 和 50 dBz),这与水凝物分类判断为大雨滴(图 7~9)相一致, Z_{DR} 、 K_{DP} 极端值($>3\text{ dB}$ 、 $>3\text{ }^\circ/\text{km}$)的发生频次也逐渐升高,表明大雨滴和高含水量的发生频次在 C 区域最高、A 区域最低,与反演的瞬时降水率对比结果(图 6)定性一致。越靠近地面,3 个区域的 Z_{DR} 、 K_{DP} 表现出增大趋势,显示暖雨过程十分强盛,尤其是 C 区域,对发生强降水起着重要作用。5~9 km 同高度相比,A、B、C 3 个区域 Z_H 的频次峰值逐渐向高值区移动,

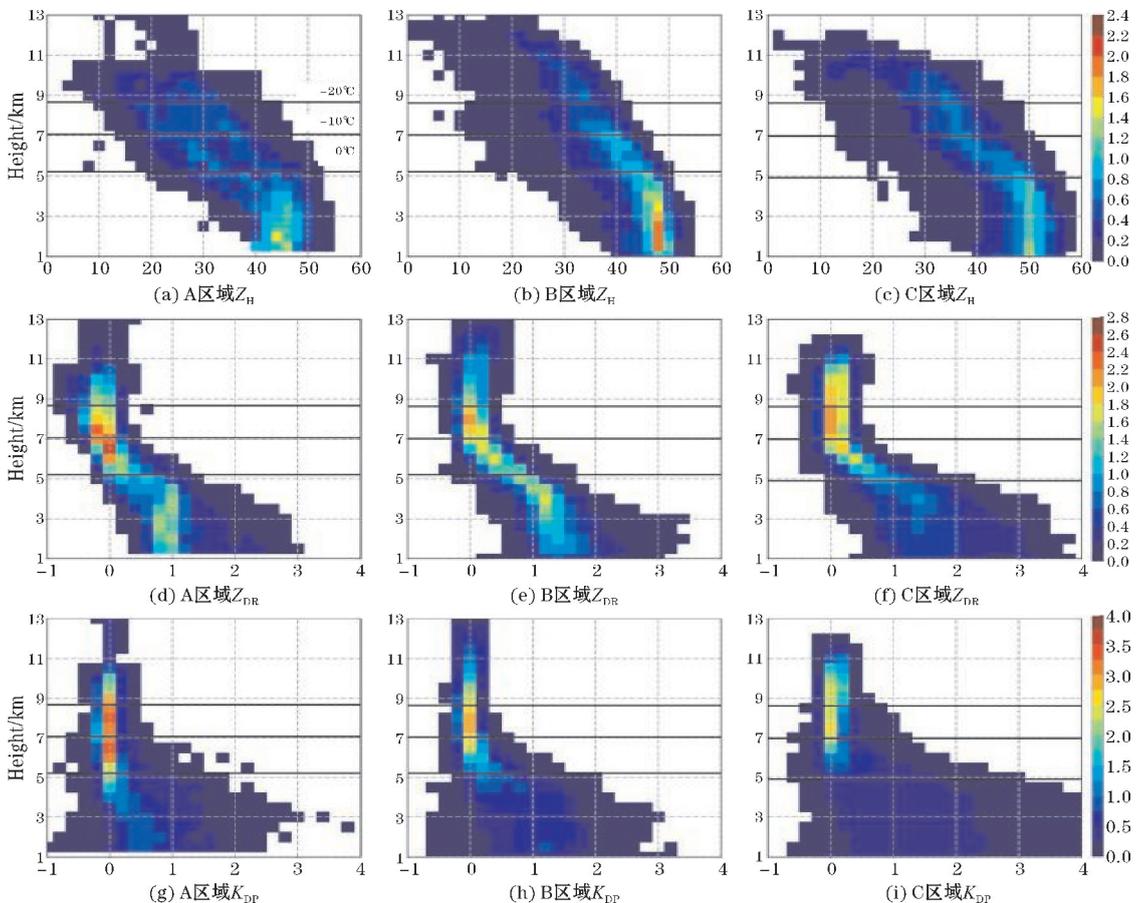


图 11 A、B、C 区域研究时段内以组合反射率最大值为中心,长、宽各 10 km、高 15 km 的正方体内双偏振量 Z_H, Z_{DR}, K_{DP} —高度联合概率密度分布图

且 A 和 B 区域较接近,如 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 高度, B、C 区域的频次峰值大致位于 $35\sim 40\text{ dBz}$, $<30\text{ dBz}$ 的频次显著偏低,而 A 区域的频次在 $20\sim 40\text{ dBz}$ 分布比较均匀,表明 3 区域的对流均比较强(与图 10 定性吻合),但是 A 区域对流的强度相对 B 和 C 区域偏弱。

分别选取最靠近 3 个区域的 ERA5 网格点,位置见图 5(a3)、(b1)、(c1) 中五角星。用最靠近该格点的 4 个地面自动站的平均温度订正该网格点 1000 hPa 的温度值,而 1000~900 hPa 的温度用线性插值得到,订正后的温湿廓线如图 12 所示。同时给出的还有 0~500 m 平均的抬升凝结高度(LCL)、自由对流高度

(LFC)、对流有效位能(CAPE)、对流抑制能量(CIN)、可降水量(PW)。3 个区域的 CAPE 均比较大,分别为 2076 J/kg 、 1884 J/kg 、 1904 J/kg ,能够支持强盛的对流活动;CIN 均较弱(0 J/kg 、 0 J/kg 、 9 J/kg),容易触发对流;PW 都超过 50 mm ,尤其 C 区域最高(57 mm 、 58 mm 、 65 mm),有利于发生强降水;A、B 的 LCL 和 LFC 明显高于 C 区域,大约距地面 1.4 km 和 1.3 km ,C 区域仅 323 m 和 816 m ,表明 C 区域的暖云层更厚,结合更丰富的水汽条件,C 区域更有利于发生活跃的暖雨过程。

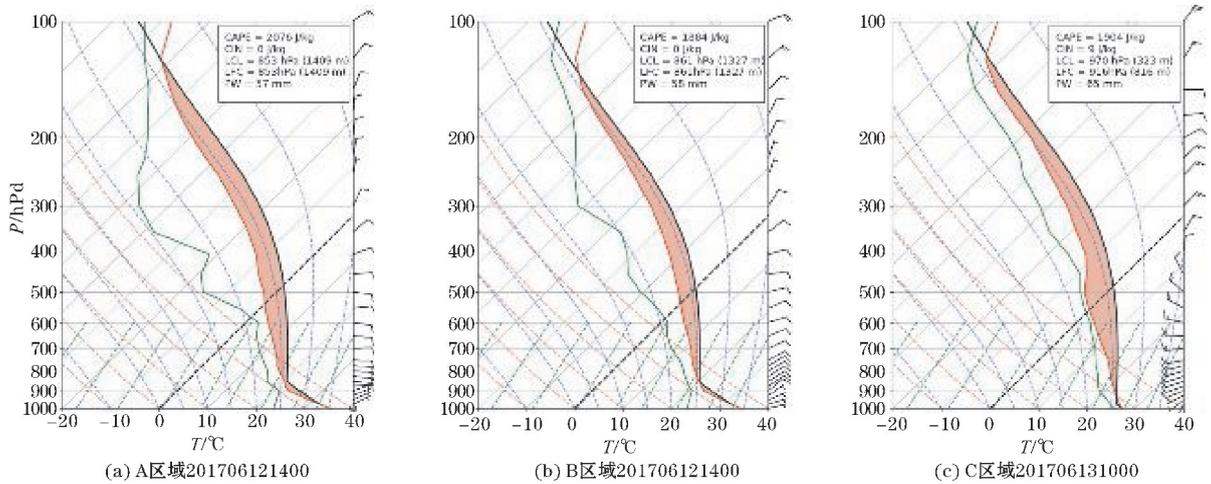


图 12 A、B、C 3 个区域 skew T-log P 图

4 结论

利用广州双偏振雷达 6 min 、百米级分辨率资料、地面自动气象站 5 min 分辨率降水资料、广州低频电场探测阵列(LFEDA) 10 min 、三维闪电脉冲放电事件资料及 ERA5 再分析资料,分析 2017 年 6 月 12–13 日台风“苗柏”影响下珠江三角洲地区 3 处局地短时强降水的精细化垂直结构特征,主要结论如下:

(1) 3 个区域均发生 55 dBz 以上的强回波,持续时间约 20 min 、 40 min 、 60 min ,其中,影响珠三角内陆 A、B 区域的带状 MCS 呈东北—西南分布,A 区域位于 MCS 的北段,移动迅速 $35\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$,B 区域位于 MCS 的中段;影响海岸线上 C 区域的 γ 中尺度流体呈团状,稳定少动。3 个区域均产生了强降水,地面自动站至少一站观测到时间平均降水率大于 $20\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$,雷达反演逐 6 min 强对流降水率的第 90 百分位数均超过了 $70\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 。

(2) 溶解层(约 5 km) 以下,3 个区域均存在大雨

滴和高含水量,越靠近地面,3 个区域的 Z_{DR} 、 K_{DP} 表现出增大趋势,表明暖雨过程十分强盛;3 个区域 40 dBz 回波可伸展至 9 km 左右高度, $4.5\sim 7\text{ km}$ 处霰粒子占所有类型水凝物的面积比例均大于 40% , $5\sim 13\text{ km}$ 高度均出现闪电,表明冰相和混合相云微物理过程对强降水也有着重要贡献。这些结果与以往分析多年闪电观测数据发现珠三角城市群地区是闪电高频中心的结论定性吻合。

(3) 相比 A 和 B,C 区域溶解层以下 Z_{H} 频次峰值的 Z_{H} 值更大,近地面极端累积降水量更大,低层较大的雨滴和较高的含水量均更多,闪电脉冲放电事件频次峰值的高度也更高,这是由于其环境大气拥有更丰富的水汽、更低的抬升凝结高度和自由对流高度,也与其对流体的团状形态和稳定少动有关。

参考文献:

- [1] 包澄澜. 华南前汛期暴雨研究的进展[J]. 海洋学报(中文版),1986(1):31–40.

- [2] 黄士松. 华南前汛期暴雨[M]. 广州: 广东科技出版社, 1986.
- [3] 陶诗言. 中国之暴雨[M]. 北京: 科学出版社, 1980.
- [4] Wu M, Luo Y, Chen F, et al. Observed Link of Extreme Hourly Precipitation Changes to Urbanization over Coastal South China[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2019, 58(8): 1799–1819.
- [5] Sohn B J, Ryu G H, Song H J, et al. Characteristic Features of Warm-Type Rain Producing Heavy Rainfall over the Korean Peninsula Inferred from TRMM Measurements [J]. *Monthly Weather Review*, 2013, 141(11): 3873–3888.
- [6] Song H J, Sohn B J. Two Heavy Rainfall Types over the Korean Peninsula in the Humid East Asian Summer Environment: A Satellite Observation Study [J]. *Monthly Weather Review*, 2014, 143(1): 363–382.
- [7] Hamada A, Takayabu Y N, Liu C, et al. Weak linkage between the heaviest rainfall and tallest storms [J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 6213.
- [8] Gingrey, Alexandria, Varble, et al. Relationships between Extreme Rain Rates and Convective Intensities from the Perspectives of TRMM and WSR-88D Radars [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2018, 57(6): 1353–1369.
- [9] 杨忠林, 赵坤, 徐坤, 等. 江淮梅雨期极端对流微物理特征的双偏振雷达观测研究[J]. *气象学报*, 2019, 77(1): 58–72.
- [10] Luo Y L, Xia R D, Johnny C L. Characteristics, physical mechanisms, and prediction of pre-summer rainfall over South China: Research progress during 2008–2019 [J]. *Journal of Meteor Soc of Japan*, 2020, 98: 19–42.
- [11] Li M, Luo Y, Zhang D L, et al. Analysis of a Record-Breaking Rainfall Event Associated With a Monsoon Coastal Megacity of South China Using Multisource Data [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2020(99): 1–11.
- [12] Luo Y, Wang H, Zhang R, et al. Comparison of Rainfall Characteristics and Convective Properties of Monsoon Precipitation Systems over South China and the Yangtze and Huai River Basin [J]. *Journal of Climate*, 2013, 26(1): 110–132.
- [13] 吴翀. 双偏振雷达的资料质量分析, 相态识别及组网应用[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2018.
- [14] Xia R, Zhang D, Wang B. A 6-yr Cloud-to-Ground Lightning Climatology and its Relationship to Rainfall over Central and Eastern China [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2015, 54(12): 2443–2460.
- [15] Zheng D, Zhang Y, Meng Q, et al. Climatology of lightning activity in South China and its relationships to precipitation and convective available potential energy [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2016, 33(3): 365–376.
- [16] RyZhkov A, Diederich M, Zhang P, et al. Potential utilization of specific attenuation for rainfall estimation, mitigation of partial beam blockage, and radar networking [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2014, 31(3): 599–619.
- [17] Kumjian M R. Principles and Applications of Dual-Polarization Weather Radar. Part I: Description of the Polarimetric Radar Variables [J]. *Journal of Operational Meteorology*, 2013, 1(19): 226–242.
- [18] Kumjian M R. Principles and Applications of Dual-Polarization Weather Radar. Part II: Warm- and Cold-Season Applications [J]. *Journal of Operational Meteorology*, 2013, 1(20): 243–264.
- [19] Wu C, Liu L, Wei M, et al. Statistics-based optimization of the polarimetric radar hydrometeor classification algorithm and its application for a squall line in South China [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2018, 35(3): 296–316.
- [20] Shi D D, D Zheng, Zhang Y, et al. Low-frequency E-field Detection Array (LFEDA)——Construction and preliminary results [J]. *Science China*, 2017, 60(10): 1896–1908.
- [21] Luo Y, Wu M, Ren F, et al. Synoptic Situations of Extreme Hourly Precipitation over China [J]. *Journal of Climate*, 2016, 29(24): 8703–8719.

Observational Analysis of the Fine-scale Vertical Structure of Localized Heavy Precipitation Associated with Typhoon “Merbok”

GU Xinrui¹, LUO Yali², XIAO Tiangui¹, WU Chong², ZHENG Dong²

(1. College of Atmosphere Science, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to study the cloud microphysical characteristics of heavy precipitation in the Pearl River Delta region, the Guangzhou dual-polarization radar (dual-POL) observations, precipitation data from automatic weather stations (AWSs), lightning pulse discharge events data obtained by the Guangzhou Low-frequency E-field Detection Array (LFEDA), and ERA5 reanalysis data were used to analyze the fine-scale vertical structure of three localized short-term heavy rainfall regions (A, B, C) in the Pearl River Delta under the influence of Typhoon “Merbok” on June 12–13, 2017. Major findings are as follows. The heavy rainfall in the inland A and B, respectively, are produced by the northern and middle portions of a fast moving, northeast-southwest oriented mesoscale rainband, and in the coastal C by a quasi-stationary circular convective element. Below the melting layer (at approximately 5 km height), Z_{DR} and K_{DP} in the three regions gradually increase toward the ground, indicating active warm rain processes. Meanwhile, the strong reflectivities (> 40 dBZ) extend up to about 9 km, with graupel accounting for more than 40% of the hydrometeor area at 4.5–7 km and lightning mostly at 5–13 km height in the three regions, indicating significant contribution of ice- and mixed-phase microphysical processes to the heavy rainfall production. Compared to A and B, precipitation in C has the modes of Z_H below the melting layer at higher values, larger extreme rainfall accumulation, more occurrences of both large raindrops and high liquid water content. The lightning pulse discharge event frequency in C peaks at about 10–11 km, which is higher than those of A and B (8–9 km). Such differences are attributed to more abundant moisture, lower lifting condensation level and level of free convection in C, and also related to the circular shape and quasi-stationary feature of the convective element in C.

Keywords: atmospheric science; mesoscale meteorology; heavy precipitation; dual-polarization radar; the Pearl River Delta; warm rain process; ice phase process