

# 衡阳暖区暴雨的天气分型和回波特征分析

苏伊伊<sup>1\*</sup>, 旷煜菲<sup>1</sup>, 肖冰霜<sup>1</sup>, 刘丹枫<sup>1</sup>, 邓新林<sup>2</sup>

<sup>1</sup>衡阳市气象局, 湖南 衡阳

<sup>2</sup>株洲市气象局, 湖南 株洲

收稿日期: 2023年2月5日; 录用日期: 2023年3月3日; 发布日期: 2023年3月10日

## 摘要

利用常规地面资料、逐小时自动站降水资料、探空站资料、NCEP/NCAR再分析资料及多普勒雷达资料等对衡阳市2008~2020年的暖区暴雨过程进行收集筛选、统计分析等。研究发现: 2008~2020年衡阳市共计发生12次暖区暴雨过程, 全部为切变型, 包含冷切变型9例及暖切变型3例, 主要影响系统有500 hPa高空低槽、低空急流及地面辐合线; 衡阳暖区暴雨对流性质明显且降水集中在夜晚, 全部发生在4~6月; 具有较大的CAPE (>400 J/kg)及K指数(>36 K), 而CIN (小于50 J/kg)较小, 0°C层高度在4800至5500 m之间; 衡阳暖区暴雨的雷达回波特征有后侧反射率因子梯度增大、后侧入流缺口、弓形回波、速度辐合、大风区、垂直风切大等。

## 关键词

暖区暴雨, 天气形势, 雷达, 衡阳市

# Analysis on the Classification and Echo Feature of Warm-Sector Rainstorm in Hengyang

Yiyi Su<sup>1\*</sup>, Yufei Kuang<sup>1</sup>, Bingshuang Xiao<sup>1</sup>, Danfeng Liu<sup>1</sup>, Xinlin Deng<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Hengyang Meteorological Bureau of Hunan Province, Hengyang Hunan

<sup>2</sup>Zhuzhou Meteorological Bureau of Hunan Province, Zhuzhou Hunan

Received: Feb. 5<sup>th</sup>, 2023; accepted: Mar. 3<sup>rd</sup>, 2023; published: Mar. 10<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

Using the conventional meteorological observation data, the NCEP 1° × 1° reanalysis data from

\*通讯作者。

文章引用: 苏伊伊, 旷煜菲, 肖冰霜, 刘丹枫, 邓新林. 衡阳暖区暴雨的天气分型和回波特征分析[J]. 气候变化研究快报, 2023, 12(2): 316-324. DOI: 10.12677/ccrl.2023.122032

2008 to 2020, hourly automatic station precipitation data, radiosonde station data and Doppler radar data collected, filtrated and statistically analyzed the process of warm-sector rainstorms in Hengyang City from 2008 to 2020. The study found that: in Hengyang City, all told there were 12 warm-sector rainstorms from 2008 to 2020, all for shearline type, including 9 cold shearline type cases and 3 warm shearline type cases. The main impact systems are 500 hPa high altitude trough, low-level jet and surface convergence line. The warm-sector rainstorms in Hengyang are obvious convective and concentrated at night, all of which occur in April to June. They have large CAPE (>400 J/kg) and K index (>36 K), while CIN (less than 50 J/kg) is small, and the height of 0°C layer is between 4800 and 5500 m. The radar echo characteristics of rainstorm in Hengyang warm-sector including the increase of rear reflectance factor gradient, rear inlet notch, bow echo, velocity convergence, strong wind area, large vertical wind cut and so on.

## Keywords

Warm-Sector Rainstorm, Weather Situation, Radar, Hengyang City

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

暖区暴雨是一种主要发生在锋前暖湿气流中的暴雨过程[1][2],具有强度大、降水集中、对流性质明显等特点[3]-[8],决定了它可能带来洪涝、滑坡等次生灾害并对人民生命财产及社会经济造成巨大影响。暖区暴雨在华南地区十分普遍[9][10][11][12]。由于全球和中尺度数值模式对暖区暴雨的预报能力有限,不能提供有用的信息,业务预报中常出现漏报、预报偏小及降水时间偏晚等[13][14],随着最近的业务预报和研究分析不断扩展,相关学者发现,在长江中下游地区许多强降水过程也常发生在暖湿气流中[15][16],其特点与华南暖区暴雨有许多相似之处,其预报着眼点值得进一步深入分析。近年来,学者们对江南地区的暖区暴雨做了统计分析、分类并建立了概念模型,陈玥等[16]在长江中下游地区建立了冷锋型、暖切变型以及副高边缘型3种暖区暴雨天气概念模型,汪玲瑶等[17]给出江南地区暖区暴雨的定义,并将其分为暖切变型、冷锋型、副高型以及强西南急流型四类,田莹等[18]将2008~2018年65次江南暖区暴雨进一步细分为7种类型,并研究了其时空演变特征、环流特征及概念模式。由于暖区暴雨具有明显的对流性,实际预报业务中,对于暖区暴雨这种强对流天气,特别需要以雷达产品为基础的临近预警。唐明晖等[19]分析了2010年6月18~20日湖南省大范围暴雨过程“列车效应”的多普勒雷达特征,认为低质心、高效率的大面积降水回波( $\geq 40$  dBz)是导致暴雨甚至大暴雨的主要原因,刘红武等[20]认为低质心的强回波不断生消发展造成列车效应,配合速度径向剖面可见明显的底层逆风区造成了一次特大暴雨过程,罗辉等[21]将四川盆地暖区暴雨的雷暴群分为初生阶段和成熟阶段,根据不同降水类型成熟前后的雷达回波特征,将雷暴群分为3种类型,并对3类雷暴群质心高度、顶高、最大回波强度等要素进行统计分析。

衡阳市地处长江中下游地区,近年来暖区暴雨频发,但对其研究匮乏导致本地预报员对其预报效果较差。因此,本课题通过利用常规地面资料和逐小时自动站降水资料、探空站资料、NCEP/NCAR再分析资料及多普勒雷达资料分析衡阳暖区暴雨的时间特征和降水性质、大尺度环流背景及各种中尺度物理量场特征,绘制不同类型的暖区暴雨模型概念图,初步探讨暖区暴雨形成的原因,以期提高对衡阳暖区

暴雨的认识;选取近年来衡阳市内有雷达资料的典型暖区暴雨过程进行分析,总结其雷达回波特征,以期在今后的工作中为预报员对暖区暴雨的预报预警提供一定的理论依据,寻找衡阳暖区暴雨的短临预报预警着眼点。

## 2. 资料

通过常规地面资料及 NCEP 再分析资料,参照前期学者对江南暖区暴雨定义[18] [19],本文将发生时未受明显冷空气或变性冷高压脊控制(即地面无锋面存在,或降水区位于地面锋面或低层切变线南侧 200 km 以外)的暴雨(24 h (08 时一次日 08 时,北京时,下同)累积降水达到 50 mm 以上)定义为暖区暴雨。依照标准从 2008~2020 年衡阳的暴雨过程中筛选出 12 次衡阳暖区暴雨,降水站数以国家级气象站进行统计。从 12 次过程的实况高空观测资料和 NCEP 再分析资料分析可知,影响暖区暴雨的主要天气和次天气系统有 500 hPa 高空低槽、低空(700 或 850 hPa,下同)切变、低空急流、超低空(925 hPa)急流、地面辐合线等。雷达资料来自衡阳、长沙两部多普勒天气雷达,包括基本反射率因子 R、径向速度 V、回波顶 ET、垂直积分液态水含量 VIL 及垂直风廓线 VWP 五种产品。

## 3. 衡阳暖区暴雨的统计特征

### 3.1. 对流性

衡阳市暖区暴雨呈现明显的对流性,12 次暖区暴雨中仅有一次未达到短时强降水标准(小时雨强  $\geq 20$  mm/h),6 次暖区暴雨出现了单站降水强度  $\geq 50$  mm/h 的情况,发生在 5~6 月。

### 3.2. 降水集中(夜雨特征)

通过统计分析发现,衡阳暖区暴雨过程降水时段集中,且呈现明显的夜雨特征。据统计,12 次暖区暴雨中有 11 次(91.7%)在夜间(20~次日 08 时)发生了短时强降水,仅有 3 次在午后至傍晚发生了短时强降水。其中又在次日后半夜(02~08 时)发生了 8 次,占比 67%。

### 3.3. 季节性

衡阳暖区暴雨表现出了明显的月际变化特征。据统计,衡阳暖区暴雨全部发生在 4~6 月,其中 6 月出现了 8 例,占衡阳市暖区暴雨总数的 75%,呈现非常明显的单峰型,5 月出现 3 例,由此可知衡阳暖区暴雨的季节性特征明显,多发于初夏和晚春,6 月要格外警惕暖区暴雨的发生。

### 3.4. 物理量特征分析

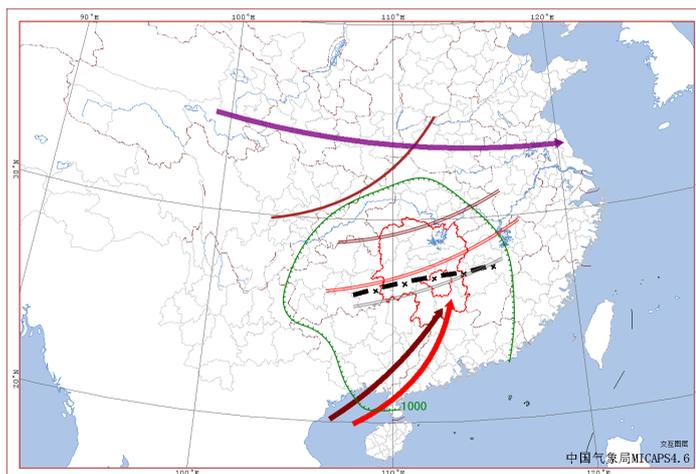
由于个例数偏少,3 种类型物理量值差别不明显,对 12 次暖区暴雨过程中与中尺度对流关联密切的物理量特征进行统计分析,都表现有明显的统计意义阈值,具体的物理量特征如下:较明显的 CAPE ( $>400$  J/kg); 小的 CIN (小于 50 J/kg); 较大的 K 指数( $>36$  K)以及  $0^{\circ}\text{C}$ 层高度在 4800 至 5500 m 之间。根据上述统计阈值分析可知,暖区暴雨与冰雹的物理量特征阈值还是有较明显的差别,当探空图上可见很大的 CAPE 值( $>1000$  J/kg)和 4 km 左右的  $0^{\circ}\text{C}$ 层高度时往往优先考虑出现冰雹而不是短时强降水。

## 4. 环流特征及概念模型

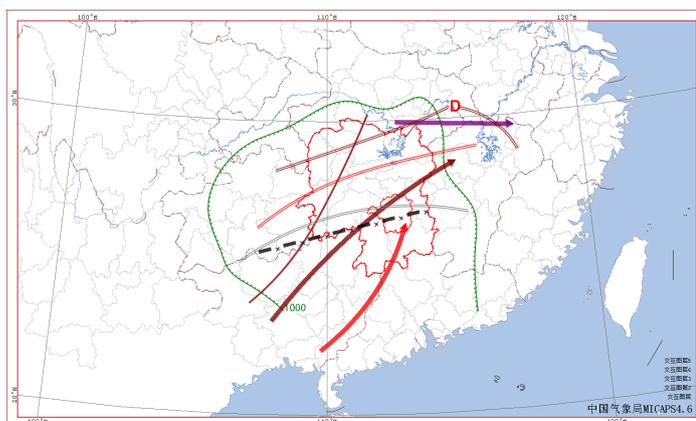
沿袭前期学者对江南暖区暴雨定义,2008~2020 年共筛选出衡阳暖区暴雨 12 例,通过其天气形势进行分析,发现影响衡阳暖区暴雨的主要天气和次天气系统有高空低槽、低空切变、低空急流、地面辐合线等。采用主要影响系统作为分类依据,根据暴雨发生时各个影响系统距离暴雨区中心的距离判断主要影响系统,发现衡阳暖区暴雨均为切变型,即主要影响系统为低空切变线,此类暖区暴雨通常发生在低

层(700~850 hPa)切变线(冷/暖)东侧或南侧(100~300 km)的暖湿气流里,常伴随有低空急流。由于以上两种切变线结构上存在差异,且造成暴雨的机制也不相同,因此将切变型暖区暴雨分为冷切变型和暖切变型,分别为 10 例及 2 例,占比 83.3%和 16.7%。而根据前期学者对江南暖区暴雨的细分[19],将 2011 年 6 月 6 日发生的一次冷切变型暖区暴雨定为副高和切变相互作用型,其主要影响系统包括副高和切变线,两者共同作用导致暖区暴雨发生,低层也伴有西南急流(700~850 hPa)。

在前期分析基础上,利用中尺度天气分析技术规范[22]对三类暖区暴雨(冷切变型、暖切变型、副高和冷切相互作用型)的系统配置关系及中尺度关键条件进行分析并绘制三种类型的暖区暴雨模型概念图,统计发现:衡阳 12 次暖区暴雨均在 500 hPa 高空低槽及的影响下;75%的暖区暴雨伴随着 700 hPa 急流,有 50%伴随 850 hPa 急流,有 50% (6 次)暖区暴雨过程同时伴有 700 及 850 hPa 的低空急流,其中 5 次出现了大暴雨(逐小时自动站降水资料),即多层西南急流的存在是降水强度大、持续时间长且易出现极端性的重要原因;12 次暖区暴雨均有地面辐合线的存在,即地面辐合线是影响衡阳暖区暴雨的极重要的触发条件,它的抬升作用可以使得不稳定能量条件得到释放,触发降水;有 2 次暖区暴雨发生时配合有高层 200 hPa 的辐散场,高层辐散、低层辐合的配置有利于强天气的发生发展;4 次配合了高空急流,高、低层的急流耦合有利于形成范围小、强度大的局地强降水。

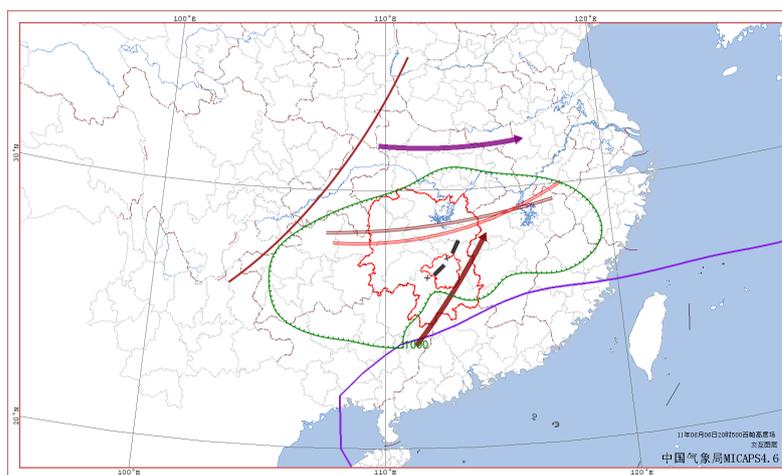


**Figure 1.** Conceptual model of warm-sector rainstorms of Cold shearline type in Hengyang  
**图 1.** 衡阳冷切变型暖区暴雨系统配置



**Figure 2.** Conceptual model of warm-sector rainstorms of Warm shearline type in Hengyang  
**图 2.** 衡阳暖切变型暖区暴雨系统配置

从一次典型的冷切型暖区暴雨系统配置来看(如图 1), 中层 500 百帕有东北冷涡, 其南侧有低槽影响, 东北低涡南侧低槽对江南地区的暖区暴雨作用显著[19], 为衡阳暖区暴雨的发生提供了好的动力条件, 同时可带来大量的暖湿气流及涡度平流。暴雨发生时有低层(700~850 百帕)冷式切变线, 即偏北风与西南风的辐合, 常对应冷锋。低层伴有 700 及 850 hPa 的低空急流, 暴雨区距离切变线 100~300 km, 强降水区发生在切变线南侧与低层西南急流北侧的暖湿气流里, 往往配合低槽显著湿区。冷锋前侧暖湿急流上空对应有 200 百帕高空急流, 明显的高、低空急流耦合配合边界层(925 百帕)及地面的辐合线触发作用, 易促使不稳定能量释放, 触发局地性强、对流性大的暖区暴雨。暖切型暖区暴雨(如图 2)高低空配置与冷切型类似, 暴雨区发生在低层切变南侧的西南急流出口区, 与高空急流右侧的分流区叠加促使大气不稳定性增强, 有利于暖区暴雨的释放, 其与冷切型暖区暴雨的差别主要在于暖式切变线主要是东南风与西南风的辐合, 对应地面暖锋。据统计, 衡阳冷、暖切变型暖区暴雨在降水特征、时间分布上无明显差异。



**Figure 3.** Conceptual model of warm-sector rainstorms of interaction between cold shearline and subtropical high (SH) type in Hengyang

**图 3.** 衡阳副高与冷切相互作用型暖区暴雨系统配置

如图 3 所示, 当切变线与副高共同作用形成暖区暴雨时, 副热带高压脊线一般位于 20°N 左右, 且 5880 gpm 线穿过江南地区, 降水往往发生在副高西北侧的西南气流中, 中层东北低涡南侧低槽东移南下与副高形成对峙, 低涡后部冷空气较强, 低层有冷式切变, 衡阳处在冷锋前侧的 700 hPa 西南急流中, 西南急流为暖区暴雨的发生带来了大量水汽和热量, 高空急流出口区与低层西南急流的耦合配合地面辐合线的触发, 易生成局地暖区暴雨。

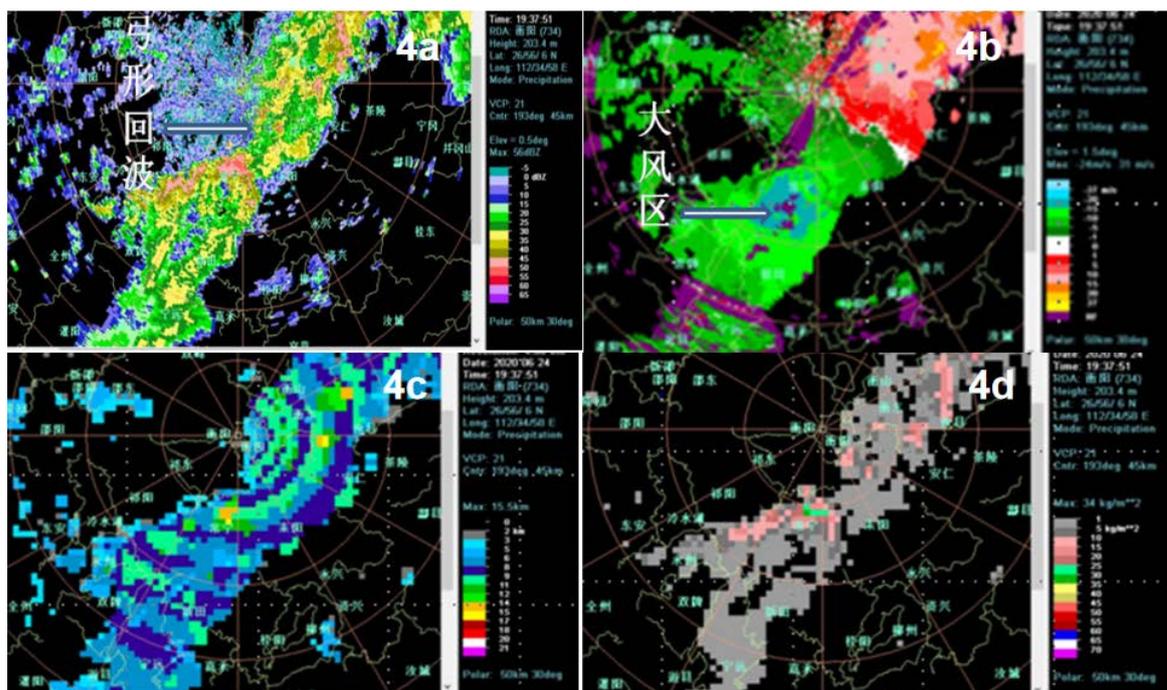
## 5. 雷达回波特征

针对江南暖区暴雨过程, 前期学者的研究主要以大尺度环流背景及中尺度环流条件为主, 很少有针对暖区暴雨的雷达回波特征及识别进行研究, 这主要是由于雷达资料短缺导致的。但由于暖区暴雨对流性、局地性强, 往往伴有短时强降水, 在实际预报业务中, 特别需要以雷达产品为基础的临近预警。因此, 本文利用衡阳可获取的多普勒雷达资料, 对 2020 年 6 月一次典型衡阳暖区暴雨进行雷达回波特征分析, 雷达 PUP 产品包括了: 基本反射率 R、径向速度 V、回波顶 ET、垂直积分液态水含量 VIL 及垂直风廓线 VWP 共 5 种。两次暖区暴雨过程皆以 20 mm·h<sup>-1</sup> 降水站数的突增为时间节点, 对暖区暴雨回波进行分类, 短时强降水站数突增前定义为暖区暴雨的初生阶段, 其后为成熟阶段。

2020 年 6 月 24 日~25 日, 衡阳发生一次暖区暴雨过程, 24 小时累计降水量超过 100 毫米的站点有 7

个,其中常宁国家站累计雨量达 129.5 毫米,最大小时雨强为 52.7 毫米。结合降水实况对本次衡阳暖区暴雨过程的雷达回波特征进行分析:25 日 02 时 08 分(0.5°仰角)有多个多单体回波在衡阳境内发展,在常宁市内的多单体回波结构较松散,水平范围较小呈条形、边缘破碎无明显边界,其最大反射率因子在 50 dBZ 左右,对流多单体后侧反射率因子梯度较小。配合 0.5°仰角的径向速度场可见此时低层速度场由与环境场一致的西南风控制,对流多单体持续发展、加强,其南侧不断有新的对流多单体补充进来,逐渐与东北方向的其他对流多单体合并加强;ET 产品中显示强回波高度发展至 12 km,垂直液态水含量为 15~20 kg/m<sup>2</sup>。此时常宁市的强降水过程在初生阶段。

02:50(图略)永州双牌、新田境内有一多单体回波 B 向常宁方向移动发展,与常宁境内的多单体回波 A 有连接趋势,对流多单体 B 最大反射率因子达 55 dBZ,径向速度场上(1.5°仰角)有风速 > 15 m/s 的区域,其后侧有入流,使其移速比对流多单体 A 快,两者在移动过程中逐渐与东北方向其他对流多单体合并成线状多单体,共同向东北方向移动,在暴雨区生消,形成了列车效应。03 时 37 分在 0.5°仰角基本反射率图上(如图 4(a))可见一线状多单体雷暴具有明显的弓形回波结构,后侧入流缺口回波明显,此时线状多单体雷暴后侧反射率因子梯度较大。1.5°仰角基本速度图上(如图 4(b))后侧入流急流达到了 20 m/s,维持了 6 个体扫,符合大风区的标准,推动系统中心内部的对流单体快速向前运动。强回波高度发展至 15 km(如图 4(c)),垂直液态水含量(如图 4(d))发展至 25~30 kg/m<sup>2</sup>。结合降水实况可知,03~04 时常宁站小时雨强达 52.7 毫米,即此时为本次暖区暴雨的成熟阶段。04 时 40 分后,最强回波中心逐渐向移出常宁境内。



**Figure 4.** Hengyang Doppler weather radar image at 3:37 of 25 June 2020; (a) The composite reflectivity at 0.5° elevation; (b) The radial velocity at 1.5° elevation; (c) Echo top (ET); (d) Vertical liquid water (VIL)

**图 4.** 2020 年 6 月 25 日 03 时 37 分多普勒雷达回波图像。(a) 0.5°仰角基本反射率 R; (b) 1.5°仰角基本速度 V; (c) 回波顶高 ET; (d) 垂直液态水含量 VIL

随着强回波的移出,05:01 常宁境内以较弱的积雨云和层状云混合降水回波为主,回波结构松散,后侧入流缺口消失。速度场上大风区消失,为弱的西南风控制。最大回波顶高和垂直液态水含量值均大幅

下降。风廓线雷达能直接探测垂直速度随高度的分布,如图5所示,在对流发生前(02:38)3 Km左右的高度有明显的西南风加强,对应850百帕及700百帕有西南急流,使得水汽和动力聚集。低空西南急流的维持和加强与大范围短时强降水有较好配合,低层的西南急流一直维持到强对流多单体将移出常宁时(04:01)逐渐趋于减弱。此外,短时强降水发生前和发生过程中均出现垂直风切变明显增大现象,02:38后0~3 km垂直风切变达12 m/s,在雷暴成熟阶段瞬时0~6 km垂直风切变(03:31)达18 m/s,这往往是发生超级单体风暴或大范围强多单体风暴的典型特征。而在对流发生前及发生时,0~6 Km逐渐由西南风转为西风,风向随高度顺时针旋转说明此时有暖平流存在,为暖区暴雨区提供能量支撑。整层高度场上都没有冷平流,这也是暖区暴雨的典型特征之一。

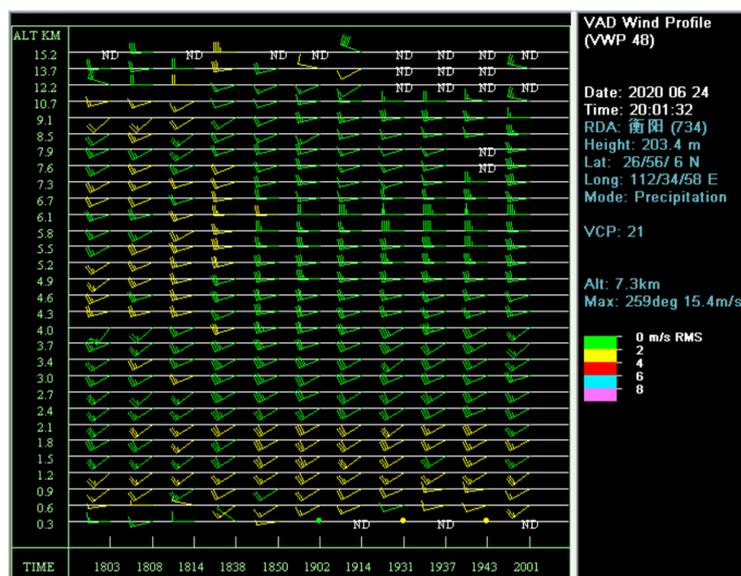


Figure 5. Radar profile about 3:00 25 June  
图5. 6月25日03时前后的垂直风廓线图

对这次衡阳暖区暴雨的雷达回波特征进行总结分析:

1) 在低层反射率因子图上,雷暴的初生阶段和成熟阶段的最大反射率因子值差距不大,在50 dBZ左右。差异主要体现在回波的形态特征上:多单体雷暴后侧反射率因子梯度增大、后侧入流缺口、回波结构变得紧实、弓形回波等特征往往是雷暴走向成熟阶段的标志特征,后续发生短时强降水几率大。

2) 雷暴的初生阶段在低仰角基本速度图上往往表现的与环境风场风向一致,但在成熟阶段常常有中低层速度辐合和大风区出现,促使雷暴进一步发展加强。

3) 雷暴的初生阶段及成熟阶段在回波顶高ET和垂直液态水含量VIL产品中特征差异表现不明显,造成短时强降水的雷暴回波顶高可发展至14 km左右,垂直液态水含量在 $25 \text{ kg/m}^2$ 以上。

4) 在一次典型暖区暴雨的垂直风廓线图上往往可见对流发生前低层西南急流的出现或加强、低层暖平流的存在以及较大的垂直风切变等明显特征。

## 6. 结论与讨论

### 6.1. 结论

利用探空资料、地面观测资料、NCEP/NCAR再分析资料和多普勒雷达资料对2008~2020年共计12次衡阳暖区暴雨进行统计分析,得到以下结论:

1) 衡阳 12 次暖区暴雨过程全部为切变型, 包含冷切变型 9 例及暖切变型 3 例, 其中冷切型中有一次是冷切与副高共同作用造成暴雨。影响衡阳暖区暴雨最主要影响系统是 500 hPa 高空低槽、低空急流及地面辐合线, 暴雨区往往在 500 百帕低槽前、低空急流北侧与切变南侧 100~300 Km 重叠区域, 地面辐合线附近。

2) 衡阳暖区暴雨出现了明显的月际及日变化特征: 所有衡阳暖区暴雨全部发生在 4~6 月, 呈现以 6 月为峰值的明显单峰特征, 初夏需警惕暖区暴雨多发; 日变化特征主要体现在暖区暴雨具有明显的对流特征, 短时强降水集中在夜晚(尤其是后半夜 02~08 时)。

3) 衡阳暖区暴雨普遍具有较大的 CAPE (>400 J/kg)及 K 指数(>36 K), 而 CIN (小于 50 J/kg)较小, 0°C 层高度在 4800 至 5500 m 之间。

4) 衡阳暖区暴雨的初生和成熟阶段在最大反射率因子、回波顶高 ET 和垂直液态水含量 VIL 值上差距较小, 差异主要体现在: 成熟阶段雷达回波图上可见后侧反射率因子梯度增大、后侧入流缺口、典型弓形回波、速度辐合区、大风区、垂直风切加大、西南急流加强等特征。

## 6.2. 讨论

为了进一步加深对衡阳地区暴雨天气的了解, 提高衡阳地区暴雨预报的准确率, 提出以下待研究的科学问题:

1) 地形也是影响暴雨发生发展的一个重要因素, 研究起来较为复杂, 值得关注。下一步将结合地形完善衡阳暖区暴雨的空间特征。

2) 由于资料限制, 筛选出的个例数偏少且雷达资料应用少, 后续将不断补充个例库, 将多普勒雷达资料广泛用于暖区暴雨的预报预警中。

## 基金项目

湖南省气象局预报员专项(XQKJ21C004), 湖南省气象局预报员专项(XQKJ20C007), 衡阳市气象局科研项目(HYXQKJ20B002)。

## 参考文献

- [1] 黄士松, 李真光, 包澄澜, 等. 华南前汛期暴雨[M]. 广州: 广东科技出版社, 1986.
- [2] Jiang, Z.N., Zhang, D.L., Xia, R.D., *et al.* (2017) Diurnal Variations of Presummer Rainfall over Southern China. *Journal of Climate*, **30**, 755-773. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0666.1>
- [3] 慕建利, 王建捷, 李泽椿. 2005 年 6 月华南特大连续性暴雨的环境条件和中尺度扰动分析[J]. 气象学报, 2008, 66(3): 437-451.
- [4] 赵玉春, 李泽椿, 肖子牛. 华南锋面与暖区暴雨个例对比分析[J]. 气象科技, 2008, 36(1): 47-54.
- [5] 刘淑媛, 孙健, 王洪庆, 等. 香港特大暴雨  $\beta$  中尺度线状对流三维结构研究[J]. 大气科学, 2007, 31(2): 353-363.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 曹亚平, 林中庆, 祁秀香, 等. 广州南沙区一次暖区暴雨过程分析[J]. 广东气象, 2011, 33(5): 13-16.
- [9] 丁治英, 刘彩虹, 沈新勇. 2005-2008 年 5、6 月华南暖区暴雨与高、低空急流和南亚高压关系的统计分析[J]. 热带气象学报, 2011, 27(3): 307-316.
- [10] 陈翔翔, 丁治英, 刘彩虹, 等, 2012. 2000-2009 年 5、6 月华南暖区暴雨形成系统统计分析[J]. 热带气象学报, 2011, 28(5): 707-718.
- [11] 何立富, 陈涛, 孔期. 华南暖区暴雨研究进展[J]. 应用气象学报, 2016, 27(5): 559-569.
- [12] 刘瑞鑫, 孙建华, 傅慎明. 不同类型华南暖区暴雨过程的环流特征[J]. 气候与环境研究, 2021, 26(4): 359-373.

- 
- [13] 陈云辉, 金米娜, 许爱华. 江西省一次短历时暖区暴雨中尺度结构及发生维持机制分析[J]. 气象与减灾研究, 2015, 38(3): 26-34.
- [14] 陈娟, 许彬, 郑婧, 等. 非常规探测资料在江西一次暖区暴雨过程分析中的应用[J]. 气象与减灾研究, 2015, 38(4): 20-29.
- [15] 高守亭, 周玉淑, 冉令坤. 我国暴雨形成机理及预报方法研究进展[J]. 大气科学, 2018, 42(4): 833-846.
- [16] 智协飞, 董甫, 张玲, 等. 基于不同微物理过程的广西沿海南风型暖区暴雨的数值模拟研究[J]. 大气科学学报, 2020, 43(5): 867-879.
- [17] 陈玥, 谌芸, 陈涛, 等. 长江中下游地区暖区暴雨特征分析[J]. 气象, 2016, 42(6): 724-731.
- [18] 汪玲瑶, 进芸, 肖天贵, 等. 夏季江南地区暖区暴雨的统计分析[J]. 气象, 2018, 44(6): 771-780.
- [19] 田莹, 叶成志, 姚蓉. 2008-2018年江南展区暴雨特征[J]. 大气科学学报, 2022, 45(1): 51-64.
- [20] 唐明晖, 李巧媛, 丁小剑, 等. “6.19”湖南大范围暴雨中“列车效应”的多普勒雷达特征[J]. 暴雨灾害, 2012, 31(4): 313-320.
- [21] 罗辉, 肖递祥, 匡秋明, 等. 四川盆地暖区暴雨的雷达回波特征及分类识别[J]. 应用气象学报, 2020, 31(4): 460-470.
- [22] 张小玲, 张涛, 刘鑫华, 等. 中尺度天气的高空地面综合图分析[J]. 气象, 2010, 36(7): 143-150.