

刘懿枢,马中元,魏鸣,等.一次副热带高压控制下的龙卷雷达回波特征分析[J].沙漠与绿洲气象,2023,17(3):35-43.

doi: 10.12057/j.issn.1002-0799.2023.03.005

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



一次副热带高压控制下的龙卷雷达回波特征分析

刘懿枢^{1,2},马中元^{1*},魏 鸣³,余剑浩²,陈鲍发⁴,李 密²,彭 莎²

(1.江西省气象科学研究所,江西 南昌 330046;2.鹰潭市气象局,江西 鹰潭 335001;

3.南京信息工程大学,江苏 南京 210044;4.景德镇市气象局,江西 景德镇 333000)

摘 要:利用江西 WebGIS 雷达拼图、单部雷达产品、常规天气、自动站和探空等资料,采用雷达气象学、天气学和中尺度分析等方法,对 2020 年 8 月 21 日江西省九江市都昌县出现的一次龙卷过程进行分析,结果表明:(1)龙卷发生在江西副热带高压(简称“副高”)控制下,地面温度锋区和湿度锋区为对流发生提供动力、热力和湿度梯度条件。(1)龙卷发生时,回波合并排列成短带;龙卷发生时,短带回波南端转为向南延伸发展,强回波边缘陡直,呈狭窄短带形态;60 dBZ 强回波中心位于狭窄短带回波后部,都昌县龙卷产生在强回波之中。(3)龙卷回波速度场正负速度对明显,辐合较强,正负速度差值可达 $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;低仰角正速度区面积较大,高仰角正速度面积减小。(4)反射率因子垂直剖面 RCS(Reflectivity Cross Section)图上,强回波顶高在 7 km 以下;径向速度垂直剖面 VCS (Velocity Cross Section)图上,具有速度辐合结构,达到弱切变标准。

关键词:江西;都昌龙卷;雷达回波

中图分类号:P445.1

文献标识码:A

文章编号:1002-0799(2023)03-0035-09

由于龙卷空间尺度小,持续时间短,对其预警预报难度非常大,龙卷风会造成人员伤亡和财产损失,因此,龙卷预报一直是短临预报中的研究重点和预报难点。江西是龙卷多发省份之一,据 1970—2005 年江西、湖北、安徽和河北龙卷调查资料统计结果表明^[1],江西龙卷出现次数在 4 省中最多。国内学者针对龙卷研究较多^[2-13]。龙卷发生在上干冷、下暖湿的条件不稳定环境中,出现在钩状回波内侧弱回波区附近^[2]。风暴单体之间合并和邻近风暴单体之间的

相互作用与龙卷发生时间和位置相关^[3]。龙卷风常由超级单体引发,龙卷运动路径与地面辐合线位置一致^[4-6]。对珠江三角洲地区台风龙卷研究发现,龙卷发生在高层辐散、低层辐合环流背景下,具有钩状回波特征,存在明显的中气旋和 TVS^[7-9]。中等程度有效位能和深层垂直风切变有利于超级单体产生,而大的低层垂直风切变、低的抬升凝结高度和地面阵风锋有利于 F2 级以上强龙卷产生,龙卷出现“S”回波阶段,在中气旋中心有明显的 TVS 特征^[10]。江西龙卷强度在 F0 级别,很少出现 F2 级以上强龙卷,更多的是出现冰雹、雷暴大风和强雷电天气^[11-13]。上述研究从天气尺度、中小尺度、探空等有利环境条件及雷达回波特征上进行分析,表明多数龙卷发生前都具有不稳定环境条件和钩状回波、TVS、中气旋等雷达特征,但对在副高控制天气背景下,江西龙卷雷达回波特征研究较少。

本文主要使用雷达拼图产品、九江 SA 雷达产

收稿日期:2022-06-18;修回日期:2022-10-09

基金项目:国家自然科学基金项目(41675029);中国气象局气象关键技术集成与应用项目(CMAGJ2013M74);中国气象科学研究院开放课题(2012LASWB01);南京雷达气象与强天气开放基金(BJG201205)

作者简介:刘懿枢(1989—),女,工程师,从事天气预报业务和预报技术研究。E-mail: 417413886@qq.com

通信作者:马中元(1954—),男,高级工程师,从事短临天气预报和预报技术研究。E-mail: mazhongyuan1@163.com

品、天气资料、探空数据以及地面自动站等资料,主要研究范围在江西北部(都昌县、德安县)等地。雷达拼图资料来源于江西省气象局江西 WebGIS 雷达拼图平台(2012 年),单部雷达产品资料来源于九江市气象局 SA 天气雷达;天气、探空等资料来源于 MICAPS 平台;自动站数据来源于江西省气象局江西自动站数据显示平台。使用这些资料,对江西副高控制下龙卷雷达回波特征进行分析,以加深对其认识和理解,为龙卷的短临预报预警提供参考依据。

1 天气实况与天气背景

1.1 天气实况

2020 年 8 月 21 日 16 时左右(北京时,下同),江西省九江市都昌县大沙镇龙潭湖湖面惊现罕见的水龙卷。根据建筑物损坏情况,参照 Fujita^[14]提出的龙卷风的分级标准,此次龙卷的强度可定为 F0 级。

8 月 21 日 15—17 时,产生龙卷的强回波单体所经之地共出现 5 站(区域站)短时强降水和 6 站 $\geq 17.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的雷暴大风。位于都昌县以南 40 km 的油墩街镇小时雨强最大,为 31.2 mm/h,位于都昌县以东 40 km 的万户镇和都昌县以南 20 km 的湿地占村出现 9 级大风,风速分别为 22.8、22.6 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

1.2 天气背景

江西副高控制的天气形势具有几个特点:一是 100 hPa 江南受一致的东北风控制,有时向下衍生到 200 hPa;二是 500 hPa 588 dagpm 线越过江西北部,江南风速很小,导致副高控制下的回波系统移动缓慢;三是 850 hPa 及其低层没有低空急流。

2020 年 8 月 21 日 08 时,100 hPa 江西受南亚高压环流东北气流影响,500 hPa 上受 590 dagpm 线控制,以辐散下沉气流为主,850~925 hPa 受偏东气流($2.0\sim 4.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)影响,江西高低层无明显辐散辐合系统配置,受副高控制。12 时都昌县位于副高脊线北侧,近地层至 700 hPa 存在散度辐合区,同时 925~1 000 hPa 存在偏北风与东南风的辐合切变。江西北部出现较大范围分散块状对流回波,对流回波首先在都昌县以东 200 km 左右地面散度辐合区形成并发展,表明近地层切变配合辐合上升运动,共同提供了触发和抬升条件,有利于对流的发生发展。

一般判断龙卷潜势的重要对流参数条件为较大的对流有效位能 CAPE 值、较低的抬升凝结高度 LCL、较大的低层垂直风切变(0~1 km)、较小的对流

抑制 CIN 和较大的风暴相对螺旋度 SHR,其中最重要的 2 个条件分别为抬升凝结高度和 0~1 km 垂直风切变。

龙卷发生前,上游地区南昌站 08 时呈上干下湿特征,风随高度顺转,925 hPa 以下相对湿度在 70%~80%,低层湿度梯度条件一般,500 与 850 hPa 温差为 25 $^{\circ}\text{C}$,表明有弱的条件不稳定环境存在。探空参数统计(表 1),对流有效位能为 $1\,937.9 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$,属于较强对流有效位能,有利于对流发生的能量条件。对流抑制有效位能为 $0 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$,抬升凝结高度为 956.6 m,具有较小的对流抑制和较低的抬升凝结高度,有利于弱龙卷的产生;0~1 km 风矢量差为 $0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,0~6 km 风矢量差为 $3.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,0~6 km 垂直风切变不利于超级单体风暴产生^[15-16]。0~1 km 风垂直切变和风暴相对螺旋度非常小,不利于龙卷的产生。由于龙卷发生于 16:20 左右,从 08 时的探空资料难以预报出 16 时龙卷是否发生,只是具备了有利的环境条件。

表 1 2020 年 8 月 21 日 08 时南昌探空参数

环境 参数	对流有效 位能 $/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1})$	对流抑制 $/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1})$	抬升凝结 高度/m	0~1 km 风矢量差 $/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	0~6 km 风矢量差 $/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	风暴相对 螺旋度 $/(\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2})$
南昌	1 937.9	0	956.6	0	3	0.1

21 日 08—12 时,赣东北最高气温迅速上升,14 时赣东南部地区最高气温达 37.8 $^{\circ}\text{C}$,都昌县以东、景德镇中部、乐平地区出现了明显的冷温中心,与周围形成了显著的温度锋区,景德镇南部以东 100 km 温差接近 10 $^{\circ}\text{C}$,温度梯度很大。16 时乐平地区最高气温继续下降,都昌县至乐平一带存在温度梯度,最大达 7.0 $^{\circ}\text{C}$;17 时后,温度锋区快速消失。

21 日 12—14 时,景德镇中部地区相对湿度迅速增至 90%以上,并一直持续至 18 时,表明龙卷发生前上游地区南昌低层相对湿度大,使得下沉气流中的气块在低层大气被蒸发冷却的可能性小,可以获得较大的正浮力,有利于上升运动的发展^[17-18],14—16 时,都昌县一直处于相对湿度 70%以下的干区,导致都昌县至景德镇中部一带存在明显湿度锋区。

龙卷发生前,江西处在副高控制中,但 700 hPa 散度辐合区和对流有效位能 CAPE 达到 $1\,937.9 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的高值,具备不稳定层结条件;另一方面,在江西北部存在明显温度锋区和湿度锋区,具有较好的热力、动力和湿度梯度条件,有利于对流回波系统的发生、发展、加强和维持。

2 地面温度风场与龙卷回波的叠加

龙卷回波及前期强回波与地面气象要素之间具有怎样的联系?通过对龙卷回波所经之地的周围站点进行分析,发现龙卷形成前后与气温、风速、风向之间存在明显相互关系。

图1为2020年8月21日龙卷发生前后对流回波与空气温度叠加随时间的演变。12时,景德镇中南部至上饶一带已存在温度锋区,在景德镇地区开始出现分散点状回波。13时(图1a),在温度锋区附近,点状回波继续发展成块状对流回波单体。14时(图1b),由于受对流回波影响,景德镇中南部地区气温下降,形成冷温中心,使周围温度梯度进一步加大,块状对流回波继续发展加强,并出现60 dBZ强回波中心。15时(图1c),对流回波发展同时向西南面温度锋区移动。16时(图1d),对流回波单体在都昌县至景德镇温度锋区一带发展合并形成短带回波,回波所经之地的温度随之下降。17—18时(图1e、1f),温度锋区迅速消失,随之短带回波减弱消散。

虽然龙卷影响范围很小,强回波表现为点状强回波,但产生龙卷的雷达回波母体具有中尺度结构,或是回波短带,或是飚线类,或是超级单体。09—13时(图2a,2b,2c,2d),龙卷发生位置周围处于偏北气流中,风速为 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右。13—14时(图2e),受景德镇中部对流回波发展影响,龙卷西南面风速开始增大,由 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 增至 $8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。14—15时(图2f),随着对流回波发展和向西南方移动,强回波达60 dBZ,

风速迅速增大,最大达 $19.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。此时,龙卷发生地,处于偏北风和西南风的风向、风速辐合区,且风速梯度较大。15—16时(图2g),强回波单体在风向、风速辐合区中继续合并,发展壮大,龙卷发生地周围普遍出现6~7级大风,风向开始出现气旋性旋转。16—17时(图2h),短带回波南段向南延伸发展,16:20(图2h雷达回波时间圆圈位置处)龙卷发生,地面气旋性风向辐合区范围缩小,并伴随 $20.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上的大风和强雷电。17—18时(图2i)短带回波分裂消散,地面以偏北气流为主,风速迅速减小。

综上所述,地面气温、风向、风速与回波的发生发展相互影响。温度锋区为对流发生提供动力条件,受对流降水冷却影响,温度锋区进一步加强。受对流影响,龙卷发生地周围产生风向、风速辐合区,随着辐合上升运动增强,进一步促进对流回波的发展。因此,强对流单体为龙卷提供了有利的地面风切变、垂直运动和不稳定能量,使对流单体在2 h内快速发展,有利于龙卷的形成。同时也表明,强对流单体的发展合并与龙卷发生时间和位置有较好的指示意义。

3 龙卷回波特征

3.1 雷达拼图回波特征

2020年8月21日,从都昌龙卷回波廓线动态图(图3)可以看出,产生龙卷的短带回波是由位于都昌县东北方向的单体回波发展合并形成。

15:00(图3a),单体回波稳定少动略向南发展;

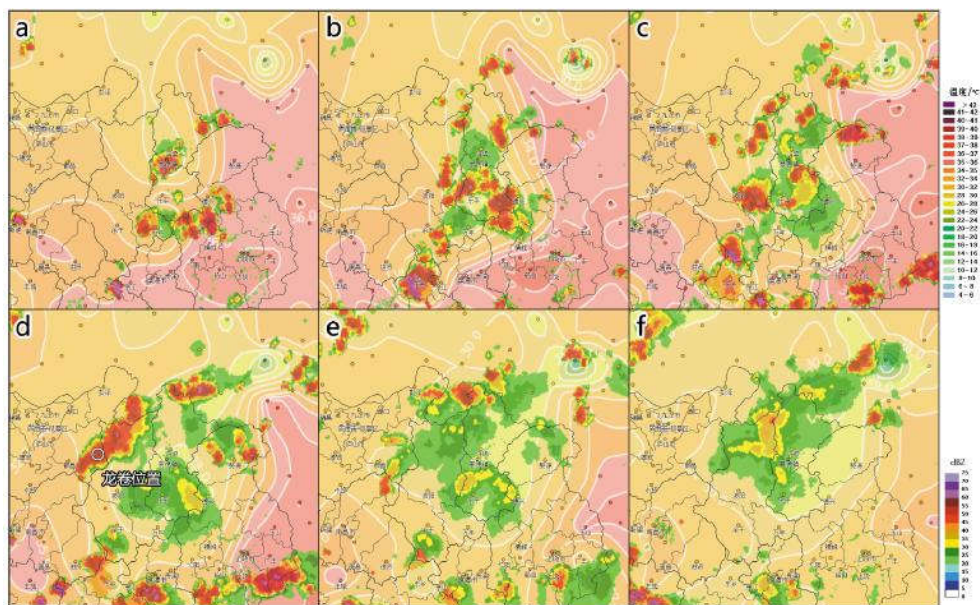


图1 2020年8月21日13—18时江西WebGIS雷达拼图与空气温度叠加图
(a为13时;b为14时;c为15时;d为16时;e为17时;f为18时)

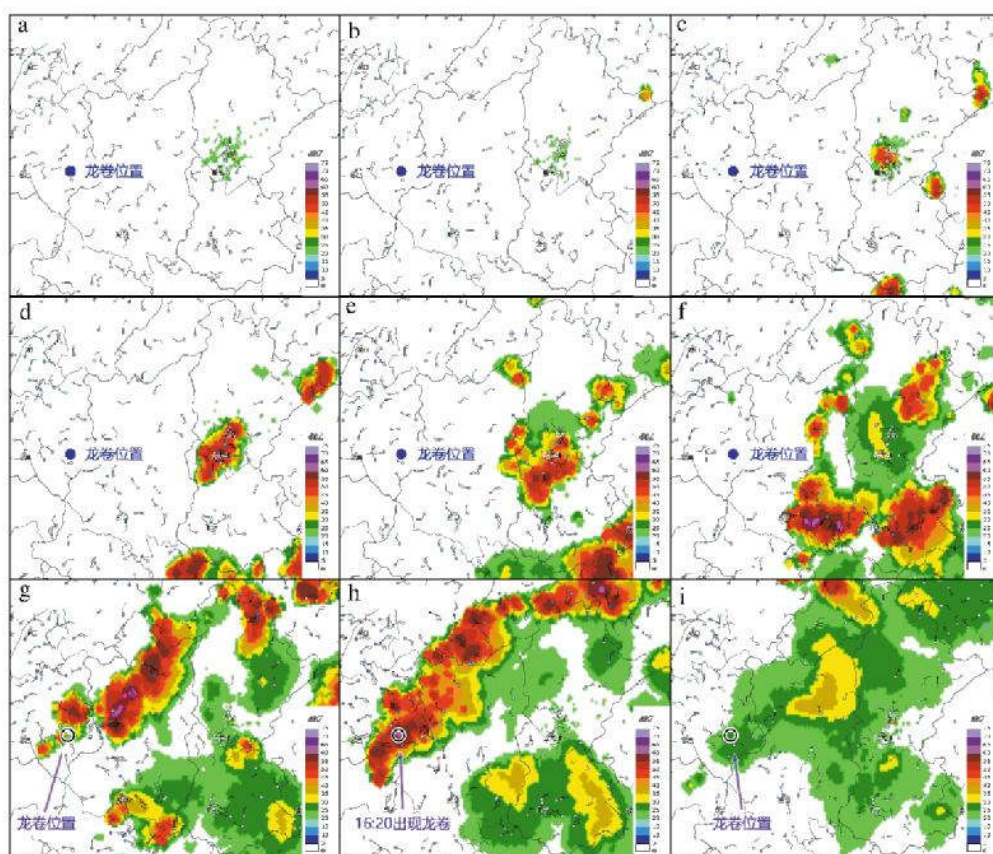


图2 2020年8月21日09—18时江西WebGIS雷达拼图与地面极大风速叠加
(a为09—10时极大风速09:30雷达拼图;b为10—11时极大风速10:30雷达拼图;c为11—12时极大风速11:30雷达拼图;
d为12—13时极大风速12:30雷达拼图;e为13—14时极大风速13:30雷达拼图;f为14—15时极大风速14:30雷达拼图;
g为15—16时极大风速15:30雷达拼图;h为16—17时极大风速16:20雷达拼图;i为17—18时极大风速17:30雷达拼图)

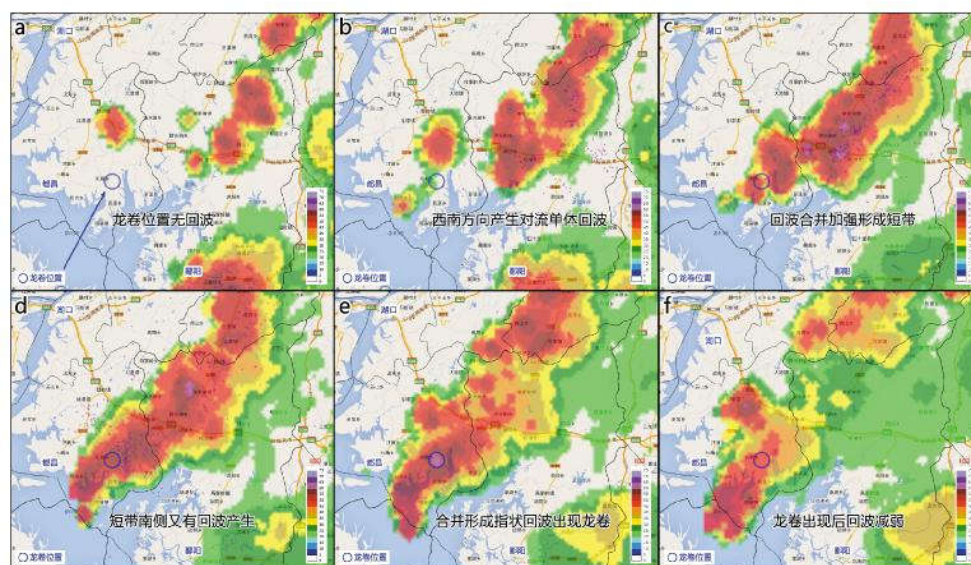


图3 2020年8月21日都昌龙卷江西WebGIS雷达拼图回波动态
(a为15:00;b为15:20;c为15:40;d为16:00;e为16:20;f为16:40)

都昌县东北方向的多对流单体回波组成的短带回波向西南方向移动。15:20(图3b),都昌县东南方有新

生对流单体回波发展, 东北方对流单体回波和短带回波发展旺盛。15:40(图3c), 2个回波单体与回波

短带发展合并^[10,3,16,19-21],形成东北—西南向的强回波短带。16:00(图 3d),回波短带发展旺盛,其南端转为向南延伸发展,其最南端又有新生强回波单体发展;16:20(图 3e),虽然回波短带北部出现分裂,南端回波中出现小尺度的 60 dBZ 以上的强回波中心,此时在都昌县大沙镇龙潭湖出现“水龙卷”。16:40(图 3f),龙卷出现后回波快速减弱消散。

由 14:40—17:00 雷达回波廓线演变(图 4)可知,A、B 回波合并过程和龙卷回波的形成过程,以及 16:20 出现龙卷之后回波分裂和快速减弱过程。

龙卷发生前,回波合并排列成短带是一种表现形式;龙卷发生时,短带回波南端转为向南延伸发展,呈指状,60 dBZ 强回波中心位于指状形回波后部,龙卷在指状形回波后部的强单体中产生。

3.2 九江 SA 雷达产品径向速度场特征

在九江 SA 雷达 16:18 速度场(V)PPI 图上(图 5),龙卷回波组合反射率 CR 并不是很强(图 5a 白色圈内),回波短带强中心只有 55~60 dBZ,结构较紧密。与江西冰雹回波 65~70 dBZ 甚至 75 dBZ 的强度比较(例如:2021 年 3 月 30—31 日江西强冰雹

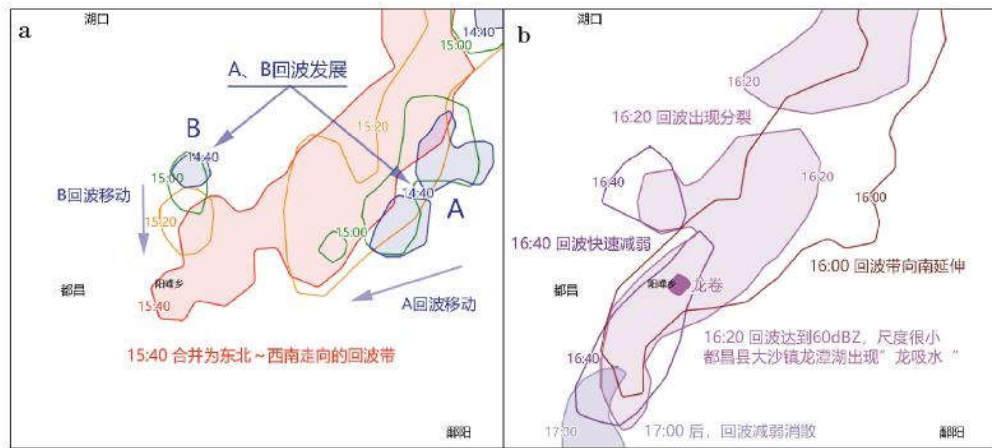


图 4 2020 年 8 月 21 日都昌龙卷回波廓线演变
(a 为 14:40—15:40;b 为 16:00—17:00)

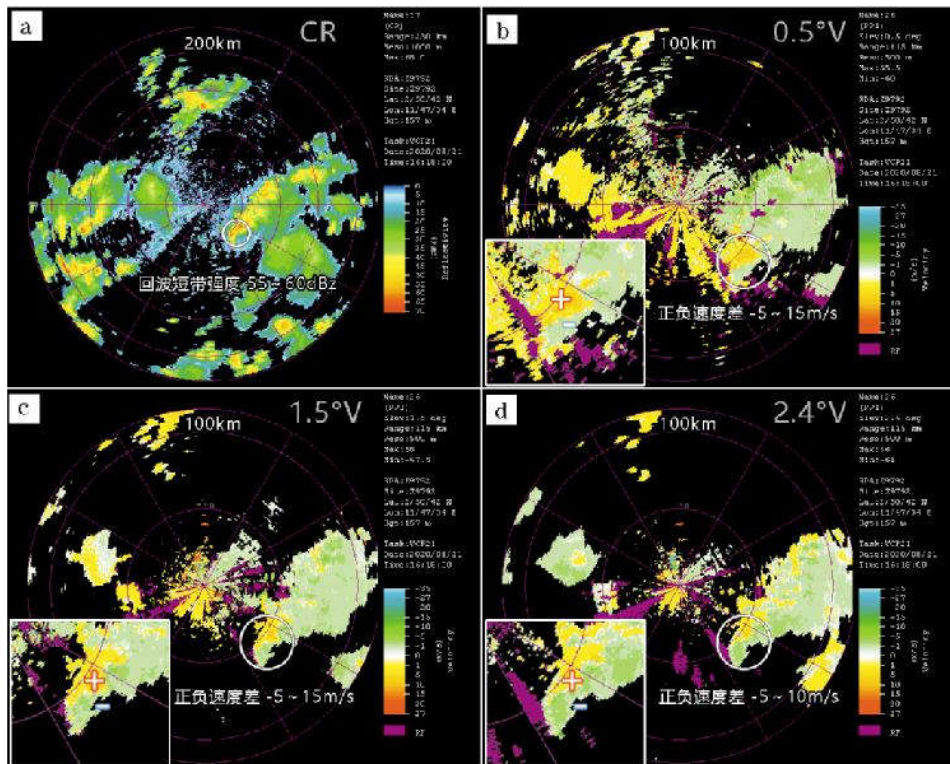


图 5 2020 年 8 月 21 日都昌龙卷 16:18 九江(9792)SA 雷达径向速度 PPI 产品
(a 为组合反射率 CR,单位:dBZ/230 km;b 为 0.5°径向速度;c 为 1.5°径向速度;d 为 2.4°径向速度,单位:($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)/115 km)

过程),这次龙卷回波强度偏弱。

在速度场上,不同仰角速度场的正负速度分布有所不同。0.5°仰角速度场(图 5b),白色圈里正负速度对明显,正速度区里最大值达到 $15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,负速度值为 $-5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,两者相差 $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。由于仰角较低,正速度区面积较大;在正速度区中,出现“点状”正速度大值点,范围约 $1\sim 2 \text{ km}$,表明龙卷回波的尺度很小,相对应的速度区也小。1.5°仰角速度场(图 5c),白色圈里正负速度对明显,但龙卷涡旋特征 TVS (Tornado Vortex Signature) 不是很明显。正速度区里最大值达到 $15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,负速度值为 $-5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,两者相差 $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;由于仰角抬高,正速度区面积开始缩小。2.4°仰角速度场(图 5d),白色圈里正负速度对明显,正速度区里最大值减小为 $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,负速度值 $-5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,两者相差 $15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;仰角抬高,使得正速度区面积更加缩小。

龙卷回波组合反射率 CR 并不是很强,相比较江西冰雹回波的强度要偏弱。龙卷回波速度场正负速度对明显,辐合较强,正负速度差值可达 $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;低仰角正速度区面积较大,高仰角正速度面积减小,并且在低仰角有“点状”正速度大值区存在。

3.3 九江 SA 雷达产品特征

由雷达产品组合反射率 CR (图 6a)可知,16:20,九江雷达范围内存在多条 50 dBZ 强回波短带,大致呈东北—西南走向,其中距离雷达中心以东 50 km 处为产生龙卷的短带回波,短带回波上存在 2 个 $55\sim 60 \text{ dBZ}$ 强回波中心,短带回波南端向南延伸的

呈指状的回波,明显区别于其他回波特征,其回波顶高 ET 和液态含水量 VIL 分别达 15 km 和 $40 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ (图 6b,图 6c),具备强对流天气特征,有利于产生雷暴大风等灾害性天气。

沿径向经过龙卷强回波单体,分别作反射率因子 RCS (图 6d)、径向速度 VCS (图 6e)垂直剖面,可见龙卷回波顶高在 18 km , 55 dBZ 强回波顶高在 6.5 km 以下,回波底高均在 2 km 左右,强回波质心低,底层边缘回波梯度大,有利于出现龙卷、大风等天气。有研究表明:龙卷风属于低位质心的对流系统,与伴随雷暴大风与冰雹的高位质心对流系统有明显的区别^[7]。强回波中心存在速度辐合,最大入流和最大出流中心约 5 km 高度,正负速度约为 $18 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,属于弱切变,速度图上未探测到 TVS,但明显的速度辐合结构,可以作为判断龙卷预警特征信号。

4 龙卷回波雷达拼图结构特征

4.1 雷达拼图垂直剖面结构

雷达拼图上的反射率因子 Z 垂直剖面和组合反射率(CR)产品能较好地反映强对流天气回波的垂直和水平结构(图 7)。14:48(图 7a),都昌龙卷发生前 2 h ,在鄱阳附近就有多个强回波单体发展,回波呈块状结构,强回波中心达 65 dBZ ,回波顶高超过 18 km , 60 dBZ 顶高达 9 km ,对流发展旺盛且深厚,层结条件有利于强对流天气的发生发展。

15:18(图 7b),都昌龙卷出现前 1 h ,多个强回波单体逐渐排列成带状,其中的强单体强度达到 60 dBZ ,

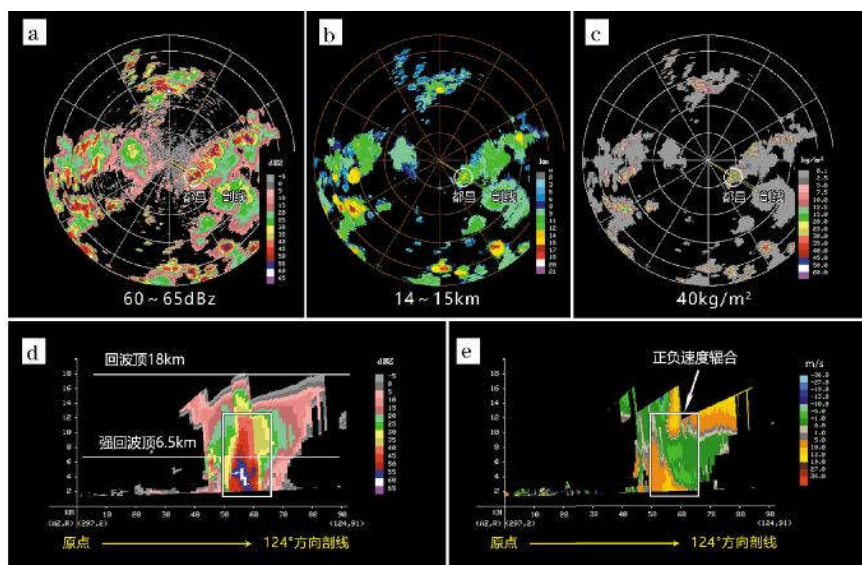


图 6 2020 年 8 月 21 日都昌龙卷 16:20 九江 SA 雷达产品组合图
(a 为组合反射率,单位: dBZ; b 为回波顶高,单位: km; c 为垂直液态含水量,单位: $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$;
d 为沿径向反射率因子垂直剖面,单位: dBZ; e 为沿径向速度垂直剖面,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

对流回波顶高在 13~14 km, 60 dBZ 强回波顶高 3~6 km, 面积不大, 回波处在发展壮大中。

由 16:18 (图 7c) 都昌产生龙卷时沿回波短带 90°切线垂直剖面可知, 都昌龙卷回波短带由多个强回波单体合并、排列形成, 短带上存在多个 50~60 dBZ 强回波, 其中造成都昌龙卷的回波顶高伸展至 18 km 以上, 60 dBZ 强回波在 3~9 km, 回波发展十分旺盛。

由 16:18 (图 7d) 都昌产生龙卷时沿回波短带平行走向垂直剖面可以看到, 回波顶高伸展至 18 km 以上, 60 dBZ 强回波在 2~8 km, 在剖面 40 km 位置上, 出现 4 km 以下的 60 dBZ 强回波, 狭窄低质心强回波就是龙卷接地的表现。

龙卷发生前的强回波和龙卷发生时的强回波具有 3 个特征: 一是对流发展深厚有利于强天气的形

成; 二是 60 dBZ 强回波在 3~6 km; 三是 60 dBZ 强回波表现为 4 km 以下接地的狭窄强回波核。

4.2 两次龙卷个例雷达拼图回波特征对比

网页版或手机版雷达拼图具有快捷、方便、简单等特点, 探测范围比单部雷达要大, 弥补了单部雷达出现的盲区、挡角等不足, 是开展短临预报、监测预警有效手段。从雷达拼图上的回波特征可以识别出冰雹、雷暴大风、短时强降水, 龙卷回波在雷达拼图上也有比较明显的特征。

2017 年 8 月 17 日, 江西处在副高控制下, 500 hPa 588 dagpm 线穿过江西, 环流背景与 2020 年 8 月 21 日都昌龙卷较为相似。12:50, 九江市德安县境内出现龙卷天气, 德安龙卷典型回波雷达拼图 (图 8a、8b) 显示, 龙卷由飚线回波带上超级单体回波引发, 回波强度达到 65~70 dBZ, 龙卷发生时该超级单体迅速移动加强向前凸出, 是飚线回波带出现大风天气的典型特征和形态。对比前后 20 min 回波变化, 飚线回波带强回波前沿线向前凸出, 强度明显增强。

2020 年 8 月 21 日, 江西处在副高控制下, 500 hPa 590 dagpm 线穿越江西, 环流背景与 2017 年 8 月 17 日德安龙卷较为相似。16:20, 九江市都昌县境内出现龙卷天气, 都昌龙卷典型回波雷达拼图上 (图 8c、8d), 短带南端回波边缘强回波梯度大, 龙卷发生时回波梯度进一步加大, 远超强回波中心周围梯度, 55 dBZ 强回波向南伸展, 回波边界陡直, 产生龙卷的对应回波表现为极小尺度的强回波 (达 60~65 dBZ), 这种特殊的回波发展形态和回波结构十分

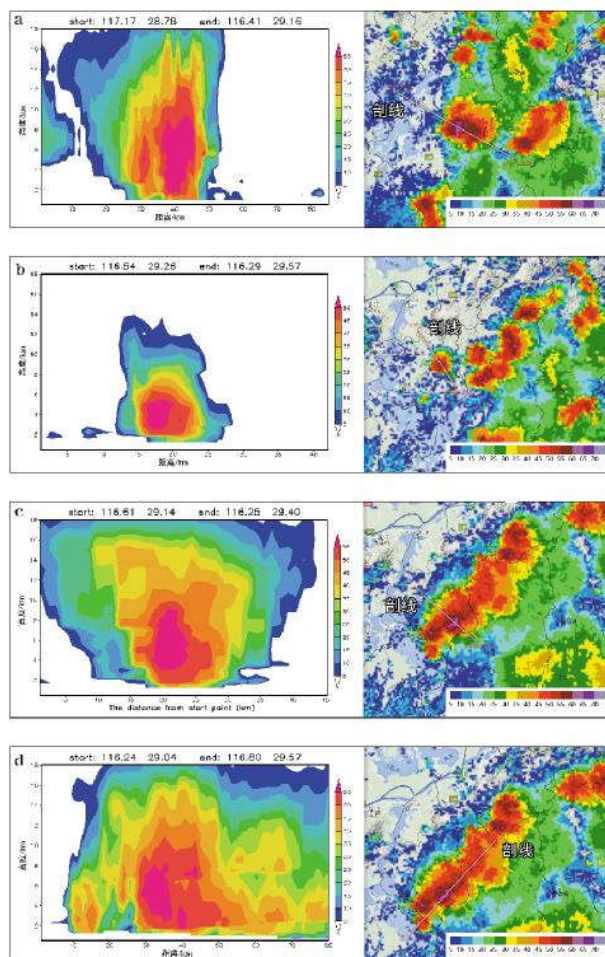


图 7 2020 年 8 月 21 日都昌龙卷组合反射率 CR 和反射率因子 Z 垂直剖面

(a 为 14:48 鄱阳强回波垂直、水平结构; b 为 15:18 都昌龙卷前 1 小时回波垂直、水平结构; c 为 16:18 都昌产生龙卷时沿回波短带 90°切线垂直、水平结构; d 为 16:18 都昌产生龙卷时沿回波短带平行走向垂直、水平结构)

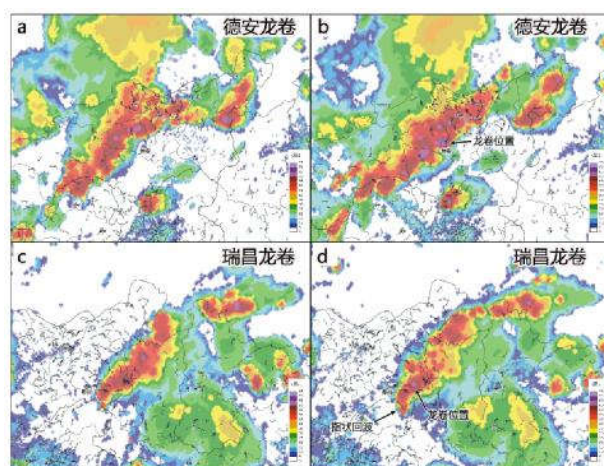


图 8 德安龙卷(a,b)与都昌龙卷(c,d)江西 WebGIS 雷达拼图

(a 为 2017 年 8 月 17 日 12:30; b 为 2017 年 8 月 17 日 12:50; c 为 2020 年 8 月 21 日 16:00; d 为 2020 年 8 月 21 日 16:20)

少见,是否成为龙卷产生的回波标志?还有待更多个例进一步验证。

两次龙卷相同点是:在副高控制相似环流背景下,都是由带状回波上的小尺度强单体造成,回波强度均达 60 dBZ 以上,强回波面积不大。不同点是:(1)都昌龙卷在短带回波强单体中发生;德安龙卷在飢线回波带超级单体中发生。(2)都昌龙卷发生时,短带回波南端向南延伸发展,呈指状,回波的发展和形态比较特殊;德安龙卷发生时,由飢线回波带上超级单体快速发展形成,属于常见的飢线发展形态,无钩状、指状回波特征。(3)都昌龙卷发生时 55 dBZ 强回波梯度加大,回波边界陡直;德安龙卷发生时强回波边界梯度变化不明显。

5 结论与讨论

(1)龙卷发生在 500 hPa 副热带高压控制的辐散下沉气流中,都昌县近地层存在散度辐合区,925~1 000 hPa 存在偏北风与西南风风向辐合,龙卷发生前近地层具有一定触发和抬升运动条件。

(2)地面气温、风向、风速与对流单体之间相互作用,地面温度锋区和湿度锋区为对流发生提供动力、热力和湿度梯度条件,强对流单体回波为龙卷提供了有利的地面风切变、垂直运动和不稳定能量,两者之间相互影响促进龙卷的产生,同时强对流单体的合并发展与龙卷发生时间位置有一定相关。

(3)龙卷回波组合反射率 CR 不强,比江西冰雹回波的强度偏弱。但龙卷回波速度场正负速度对明显,辐合较强,正负速度差值达 $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;低仰角正速度区面积较大,高仰角正速度面积减小,并且在低仰角有“点状”正速度大值区存在。

(4)短带回波上强单体引发的都昌龙卷和飢线回波带上超级单体引发的德安龙卷,其回波强度 CR 都达到 50~60 dBZ,回波顶高 ET 达 11~15 km,垂直液态水含量 VIL 为 $30\sim40 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$;在沿径向垂直剖面图反射率因子上,两个龙卷指标相似,均具有低位质心特点,即强回波顶高都在 7 km 以下;在沿径向垂直剖面图速度场上,都具有速度辐合结构,并且达到弱切变标准。

短带南端回波边缘梯度大,向南伸展,回波边界陡直,在强回波中出现 60 dBZ“点状”回波,具有明显速度辐合和弱切变结构,这种回波形态和特征是否是龙卷产生的标志。2021 年 7 月 7 日 16:40,上饶市铅山县湖坊镇丰产水库出现“龙吸水”现象持续 10 min,雷达拼图回波特征与都昌“龙吸水”雷达拼

图回波很相似,都是具有很强的回波梯度“指状”回波,强回波中出现 60 dBZ“点状”回波结构,值得研讨和更多个例验证。

参考文献:

- [1] 曾辉,马中元,聂秋生.核电站评价区域龙卷风的统计与天气特征分析[J].气象水文海洋仪器,2012,29(2):46-51.
- [2] 陈元昭,俞小鼎,陈训来,等.2015 年 5 月华南一次龙卷过程观测分析[J].应用气象学报,2016,27(3):334-341.
- [3] 朱江山,刘娟,边智.一次龙卷生成中风暴单体合并和涡旋特征的雷达观测研究[J].气象,2015,41(2):182-191.
- [4] 李云艳,郑艳,杨仁勇.一次龙卷天气过程中小尺度特征分析[J].农业灾害研究,2014,4(5):34-37.
- [5] 李兆慧,王东海,麦雪湖,等.2015 年 10 月 4 日佛山龙卷过程的观测分析[J].气象学报,2017,75(2):288-313.
- [6] 朱颖墨,段长春,潘玉洁,单多普勒雷达对一次龙卷过程的观测和分析[J].气象科学,2019,39(3):405-412.
- [7] 黄先香,炎利军,蔡康龙,等.1415 号“海鸥”台风龙卷天气过程分析[J].灾害学,2018,4(4):645-661.
- [8] 黄先香,俞小鼎,炎利军.1804 号台风“艾云尼”龙卷分析[J].气象学报,2019,77(4):645-661.
- [9] 黄先香,俞小鼎,炎利军,等.珠江三角洲台风龙卷的活动及环境条件分析[J].气象,2019,45(6):777-790.
- [10] 俞小鼎,郑媛媛,廖玉芳,等.一次伴有龙卷的强降水超级单体风暴研究[J].大气科学,2008,32(3):508-521.
- [11] 陈鲍发,马中元.江西局地冰雹 WebGIS 雷达拼图回波特征分析[J].气象与环境科学,2019,42(2):104-114.
- [12] 高建平,马中元,吴才明,等.2017 年江西上高雷暴大风雷达回波特征分析[J].沙漠与绿洲气象,2019,13(2):55-62.
- [13] 何文,夏文梅,马中元,等.江西强雷电天气形势场及雷达回波特征分析[J].气象科学,2018,38(5):699-706.
- [14] FUJITA T T. Proposed characterization of tornadoes and hurricanes by area and intensity [D]. SMRP Research Paper. Chicago: University of Chicago, 1971: 42.
- [15] 李彩玲,吴乃庚,王硕甫,等.台风“艾云尼”(2018)外围两次近距离龙卷的环境条件和雷达特征[J].热带气象学报,2019,35(4):446-457.
- [16] 吴才明,马中元,何文,等.2017 年江西副热带高压边缘雷暴大风回波特征[J].气象科学,2019,39(6):797-809.
- [17] 林应,陈铁,张树民,等.海门一次 F1 级龙卷的多普勒天气雷达特征分析[J].气象科学,2011(增 1):126-133.
- [18] 周小刚,王秀明,俞小鼎,等.逾量旋转动能在区分我国龙卷与非龙卷中气旋中的应用[J].高原气象,2012,31(1):137-143.
- [19] 朱义青,胡顺起.山东中西部一次长生命史超级单体雷达回波特征和触发机制分析[J].沙漠与绿洲气象,2021,15(1):54-61.

- [20] 辛玮琦,马中元,罗燕,等.宜丰短时强降水雷达回波特征分析[J].沙漠与绿洲气象,2021,15(2):70–80. 过程的中尺度特征分析 [J]. 沙漠与绿洲气象,2021,15(4):83–91.
- [21] 蔡雄辉,邱学兴,郭婷,等.安徽北部一次局地特大暴雨

Echo Characteristics of Tornado Radar under the Control of a Subtropical High

LIU Yishu^{1,2}, MA Zhongyuan¹, WEI Ming³, YU Jianhao², CHEN Baofa⁴, LI Mi², PENG Sha²
(1. Jiangxi Institute of Meteorological Sciences, Nanchang 330046, China;
2. Yingtian Meteorological Bureau, Yingtian 335001, China;
3. Nanjing University of Information Engineering, Nanjing 210044, China;
4. Jingdezhen Meteorological Bureau, Jingdezhen 333000, China)

Abstract A tornado process in Duchang county, Jiujiang city, Jiangxi province, on August 21, 2020, was analyzed by using the data of Jiangxi WebGIS radar mosaic, single radar products, conventional weather, observation of automatic station, and radio –sounding, and using the methods of radar meteorology, meteorology, and mesoscale analysis. The results show that: (1) Tornadoes occurred under the control of Jiangxi subtropical high. The surface temperature and humidity front provide dynamic, thermal, and humidity gradient conditions for convection. (2) Before the tornado, the echoes were combined and arranged into short bands; When the tornado occurs, the southern end of the short band echo turns to extend southward, and the edge of the strong echo is steep and narrow; The 60 dBZ intense echo center was located behind the little short band echo, and the Duchang tornado was generated in the strong echo. (3) The positive and negative velocity pairs of the tornado echo velocity field were evident, the convergence was strong, and the difference of positive and negative velocity reached $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; The area of positive velocity at low elevation was more significant, and the area of positive velocity at high elevation was smaller. (4) On the RCS (reflectivity cross–section) of the reflectivity factor vertical section, the top height of the strong echo was less than 7 km; The radial velocity vertical section VCS (velocity cross–section) had a velocity convergence structure, reaching the weak shear standard.

Key words Jiangxi; Duchang dragon roll; radar echo