

文章编号: 2096-1618(2023)04-0459-08

景德镇一次雷暴回波“崩塌”现象与强风关系的分析

陈鲍发^{1,2}, 马中元³, 王立志¹, 黄龙飞², 蔡俊峰², 李燕玲²

(1. 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029; 2. 景德镇市气象局, 江西 景德镇 333000; 3. 江西省气象科学研究所, 南昌 330046)

摘要:为了解雷暴回波形成强风的原因,使用自动气象站数据、雷达拼图组合反射率(CR)产品、新一代天气雷达(CINRAD-SA)、雷达产品生成子程序(PUP)和景德镇 TWP3 型边界层风廓线雷达等资料,采用天气学、雷达气象学等方法,对 2017 年 8 月 20 日雷暴回波的特征进行分析,结果表明:(1)赣东北强风过程的影响系统为西太副热带高压(北部边缘),500 hPa前倾槽、湿度锋、850 hPa切变线,地面有辐合线等。(2)景德镇附近不断有对流回波新生、发展、合并,组合反射率(CR)强度达到65 dBZ,60 dBZ强回波面积增大 $\geq 100 \text{ km}^2$,回波处于最强盛时刻,但没有出现大风。(3)温度锋区和湿度锋区对雷暴回波的影响主要表现在新生对流回波、回波快速发展和回波异常活跃上。(4)强风往往产生于雷暴回波最强盛至快速减弱时刻,CR 回波强度 60 ~ 65 dBZ减弱为 55 ~ 60 dBZ,55 dBZ回波面积快速减小且分散;回波顶高(ET)从18 km降到15 km;垂直积分液体水含量(VIL)从50 kg/m^2 降到30 kg/m^2 ;这些变化在两个体扫时间内快速完成,故称为“崩塌”现象。(5)反射率因子垂直剖面 RCS 上,CR 回波强度从 60 dBZ降到55 dBZ,55 dBZ回波面积迅速减小;径向速度垂直剖面(VCS)上,强回波区由正负速度对、低层辐合、高层辐散迅速转变为负速度区;地面开始出现强风。研究结果对局地雷暴大风或强风天气的预警监测有指导意义。

关键词:回波合并;温湿锋区;“崩塌”现象;回波面积;负速度区

中图分类号:P446

文献标志码:A

doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2023.04.013

0 引言

雷暴大风指风力等级在 8 级以上,强风指风力等级在 6 级以上。一些建筑物、人口密集的地方,6 级以上强风足以形成风灾。如何及时监测预警强风,强风出现时雷达回波有何不同,回波特征分析十分重要。2017 年 8 月 20 日,景德镇市出现一次强风过程(风速最大 16.9 m/s,距离雷暴大风 $\geq 17.2 \text{ m/s}$ 相差 0.3 m/s),虽然风速没有达到雷暴大风量级,但回波发展演变的特征十分清晰,对了解雷暴回波产生大风天气有启示。

对产生雷暴大风和强风的天气形势、雷达回波特征等进行了许多研究,取得颇多研究成果。如 Browning 等^[1-2]首先提出超级单体雷达回波结构,并指出超级单体具有深厚持久的中气旋结构^[3],是经典超级单体(classic supercell),主要产生冰雹、龙卷、雷暴大风等强天气。低层强暖湿平流、中层干空气、地面增温、低层增湿形成了“上干冷、下暖湿”异常不稳定层

结^[4];强垂直温度梯度结合中低层高湿度是强对流天气发生的重要条件^[5];中国中东部强天气形势主要有:冷平流强迫类、暖平流强迫类、斜压锋生类、准正压类、高架对流类等 5 种基本类别^[6]。华东地区雷暴大风 3 种云型:团状云型强雷暴大风的 CAPE 值大,低层高湿,中层干且环境温度直减率大;线状云型雷暴大风其热力参数值均较团状云型小,但低层和深层垂直风切变大,整层均较干;不规则云型雷暴大风则低层高温高湿,环境风垂直切变较小^[7-8]。副热带高压边缘强对流云型、斜压扰动云系尾部强对流云型、地面倒槽中 MCS、东风波(热带低压倒槽)、冷锋前强对流云带、冷锋前部的 MCC、高空低槽后强对流云型、热带气旋及其外围飚线云带云型,这 8 种云型特征是构成江西强对流天气的典型云型^[9]。出现雷暴大风的回波主要有“弓”状回波带、超级单体、回波短带、阵风锋等形式,带状回波居多^[10-11]。反射率因子核心的逐渐降低并伴随云底以上的速度辐合的多普勒雷达回波特征,可以用来提前数分钟预警下击暴流的发生^[12]。地形复杂,冷空气南下、山谷风活动、河谷狭管效应及下垫面摩擦力共同作用,导致大风天气的发生^[13]。江西雷暴大风天气主要发生在春季和夏季,春季以飚线回波带为主,常造成较大范围的雷暴大风、冰雹等天气,一些发生在早春的高架雷暴也可以导致大风天气^[14]。

收稿日期:2022-05-26

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项资助项目(A类-XDA19040202)、国家自然科学基金资助项目(41975001)、江西省气象局 2020 年面上资助项目(JX2020M05)、江西省气象局 2021 年预报员专项资助项目(JX2021Y02)

通信作者:马中元. E-mail: mazhongyuan1@163.com

江西有3类大风天气:雷暴大风(强风)、冷空气大风和无降水致灾大风(暖区脉冲大风)^[15-16]。在雷达拼图上叠加风暴跟踪信息 STI(storm tracking information)有利于分析雷暴回波的移动,尤其是当多部雷达 STI 重叠时,STI 密集指向区可信度相比单部雷达 STI 更可靠^[17]。这些成果为研究提供了参考依据。

本文使用自动气象站数据、雷达拼图 CR 产品、景德镇 SA 雷达 PUP 产品和 TWP3 型边界层风廓线雷达等资料,对2017年8月20日雷暴回波特征进行分析,试图为雷暴大风(强风)回波的识别、更好地开展雷暴大风(强风)天气的监测预警总结经验。

1 数据来源、天气实况与天气背景

1.1 数据来源

曲线要素资料来源于江西省自动气象站数据,特殊天气现象来源于江西省强天气监测数据平台,雷达拼图数据来源于江西 WebGIS 雷达拼图 CR 产品;单部 SA 雷达 PUP 产品数据来源于景德镇天气雷达;风廓线雷达数据来源于景德镇 TWP3 型边界层风廓线雷达;闪电资料来源于江西省雷电监测平台。本文使用

北京时间(BJT)。

1.2 天气实况

风力等级表根据平地上离地10 m处风速值大小制定。在一般情况下以0~12级共13个级别表示,但在特殊情况下存在13级以上的风力等级,如龙卷风。强风是指10.8~13.8 m/s的6级大风。本文所指的强风泛指6级以上的大风。

2017年8月20日18-19时,景德镇市珠山区莲花塘自动气象站记录到16.9 m/s强风(图1a),这种在副高边缘产生的强风,容易形成雷暴大风(≥ 17.2 m/s)天气^[18-20];景德镇市珠山区莲花塘自动气象站记录到33.5 mm/h的短时强降水(图1b),其他乡镇降水在30 mm/h以下,但有多多个区域站出现超短时强降水^[21-24](图略)。由于景德镇市北部出现降水回波系统,在降水冷却的影响下,景德镇市北部与南部之间形成温度锋区(图1c),锋区强度景德镇市(32.2℃)与三龙镇(24.9℃)锋区强度达到7.3℃/30 km。景德镇市在湿度场上出现“干区”(dry area)或“干点”(图1d),这种湿度场配置在其他个例中很少出现,可能与景德镇市城区地形等因素相关。

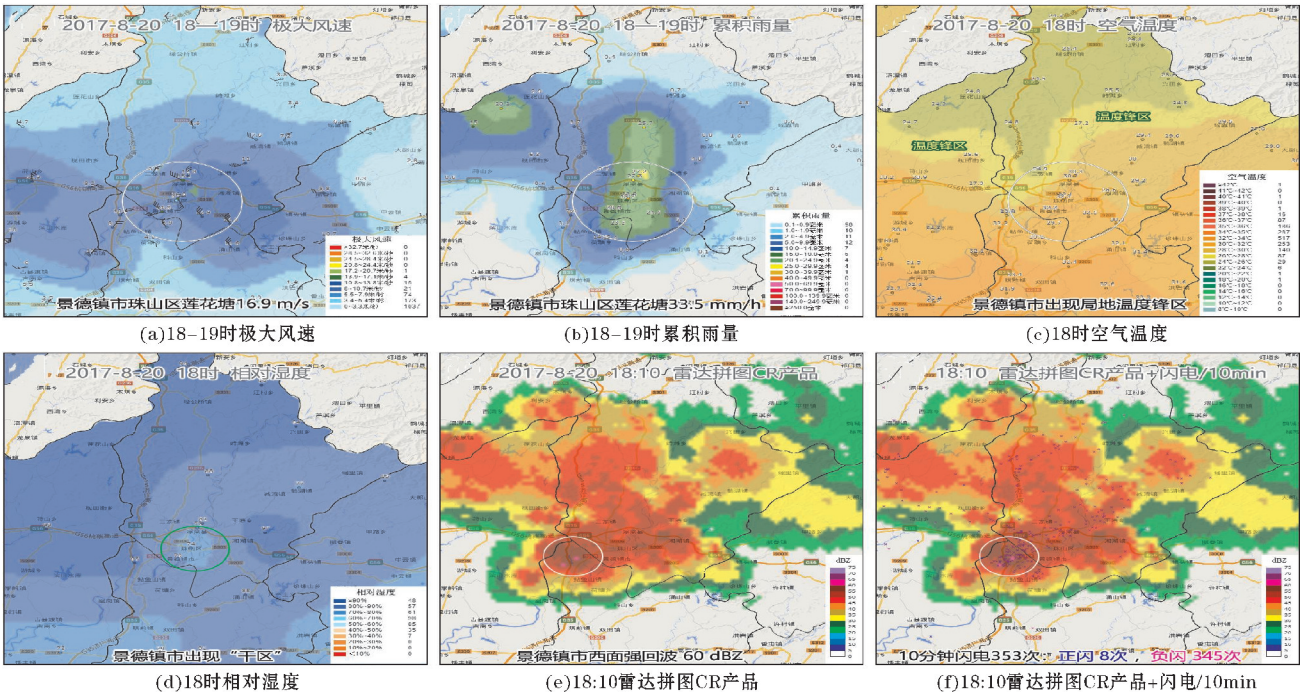


图1 2017年8月20日景德镇市强风过程要素分布图

雷达拼图上,60 dBZ强回波中心分布在景德镇市西面(图1e),即将影响景德镇市,同时,强回波中心有较高密度(353次/10 min)的强雷电分布(图1f)。强雷电是江西8月盛夏副高边缘主要的灾害之一^[25-26]。

由此可见,2017年8月20日18-19时,景德镇市主要以6~7级强风和强雷电天气为主(表1),虽然强风等级没有达到8级标准,但强风发生在城市附近,人口密度较大,建筑物较多,十分容易出现风灾天气。

表1 景德镇市 2017 年 8 月 20 日 18–19 时 ≥ 12 m/s 极大风速和 19 时 ≥ 30 mm/h 短时强降水统计表

县/区	站名	站号	站点 类型	极大风速/ (m/s)	19 时降水/ (mm/h)	经度/°E	纬度/°N	海拔高 度/m	大风 时间	风向
珠山区	莲花塘	J3018	区域站	16.9	33.5	117.2036	29.3058	70.0	18:10	158
浮梁县	浮梁	58524	国家站	15.1	27.3	117.2153	29.3617	87.3	18:04	301
昌江区	吕蒙乡	J3047	区域站	14.5	20.6	117.1672	29.2661	63.0	18:10	244
昌江区	官庄村	J3044	区域站	13.6	21.5	117.1692	29.2653	45.0	18:06	318
珠山区	三宝	J3019	区域站	12.9	24.5	117.2592	29.2506	69.0	18:19	333
浮梁县	浮梁镇	J3003	区域站	12.8	27.2	117.2267	29.3750	57.4	18:07	352
浮梁县	寿安镇	J3030	区域站	12.5	5.1	117.3231	29.2292	62.0	18:29	335

1.3 天气背景概况

2017 年 8 月 20 日 08 时(图略),江西处在副热带高压北部边缘,588 dagpm线穿过江西中部^[27],500 hPa 低槽移过赣东北,赣东北地区为槽后西北气流控制,700 hPa切变线位于安徽中部经鄂东南至湖南北部,为明显前倾槽结构。850 hPa赣北为西南气流控制,在赣东北至浙江中部有12 m/s低空西南急流,前倾槽后的西北气流叠加在低层西南急流之上,形成对流不稳定结构。20 时(图略),低槽继续东移,赣北处槽后西北气流之中,500 hPa南昌与安庆之间的湿度差异明显,温度露点差相差26 ℃,形成明显的湿度锋区,且南昌、赣州气温降至−5 ℃,为区域性冷中心,与850 hPa的气温差达27 ℃~29 ℃,对流不稳定加剧。同时,250 hPa 高空为强辐散,850 hPa赣北形成东–西走向的切变线。地面午后赣东北有明显的辐合线形成,此时 CAPE 值高达3314 J/kg,K 指数45 ℃、SI 指数−5.88 ℃。在辐合线的辐合抬升作用下,对流发展壮大,造成赣东北明显的强对流天气。

由此可见,西太副热带高压(北部边缘)、500 hPa 前倾槽、湿度锋、850 hPa切变线、地面辐合线等是影响景德镇市强风过程的主要天气系统。

2 回波系统演变

17:10(图 2a),上饶市鄱阳县北部回波带呈东–西走向,CR 强度55 dBZ,鄱阳县莲花乡出现67.6 mm/h 短时强降水,但没有出现大风天气。在浮梁县西北侧和景德镇市西侧有对流回波 A 和 B 发展。17:20 (图 2b),回波带有所南压,A 回波发展壮大,CR 强度达到55 dBZ;B 回波也有所发展。17:30(图 2c),AB 回波进一步发展,回波开始合并,回波边缘开始连接,CR 强度达到55 dBZ,A 回波局部出现60 dBZ回波点。17:40(图 2d),AB 回波合并在一起,CR 强度进一步发

展,最强回波达到60 dBZ;回波合并使得南侧 B 回波快速发展。17:50(图 2e),AB 回波合并后,强回波中心位于南面回波发展旺盛,CR 强度达到65 dBZ,60 dBZ强回波面积扩大到100 km²,这是 AB 回波合并后发展最强盛的时刻。18:00(图 2f),AB 回波 CR 强度快速减弱为55 dBZ,60 dBZ强回波中心剩下几个小点,18:04 浮梁出现15.1 m/s 强风(表 1),18:04–18:29,景德镇市有 7 站次出现 ≥ 12.5 m/s 的强风(图 2g,h),18:30(图 2i),AB 回波迅速减弱,CR 强度 ≤ 55 dBZ,强风停止。

从雷达拼图上可以看出,景德镇北部回波和南部回波是在同一个卷云罩中的复合体回波系统(图略);在黑体亮温 TBB 云图上表现为 MCS 云图特征(图略),回波单体的初生、发展、增强、合并等过程,都在复合体内完成。

由此可见,16:43–17:43 景德镇北部东–西走向的回波带在逐渐南压,强度变化不明显,景德镇市附近不断有对流回波新生、发展、合并,17:43 回波合并成短带回波,CR 强度达到65 dBZ,60 dBZ强回波面积增大 ≥ 100 km²,回波处于最强盛时刻。

3 中尺度温度和湿度锋区

中尺度温度或湿度锋区是指在水平100 km距离内,温度差距 ≥ 6 ℃/100 km,湿度差距 $\geq 30\%$ /100 km 的区域。在江西,这个区域的温度和湿度条件有利于对流运动的产生和发展^[28],一些新生单体容易在锋区中产生,一些回波系统移入锋区得到进一步加强。当然,回波的产生和发展还与其他条件相关。Sun 等^[29]认为,飚线也可通过边界层与天气尺度气流相互作用产生的温度梯度差异而激发,这有些类似海陆风的生成。边界层模拟对流演变和重力波处理方案等方面的研究^[30–32],都证实了锋区对雷暴回波的影响。

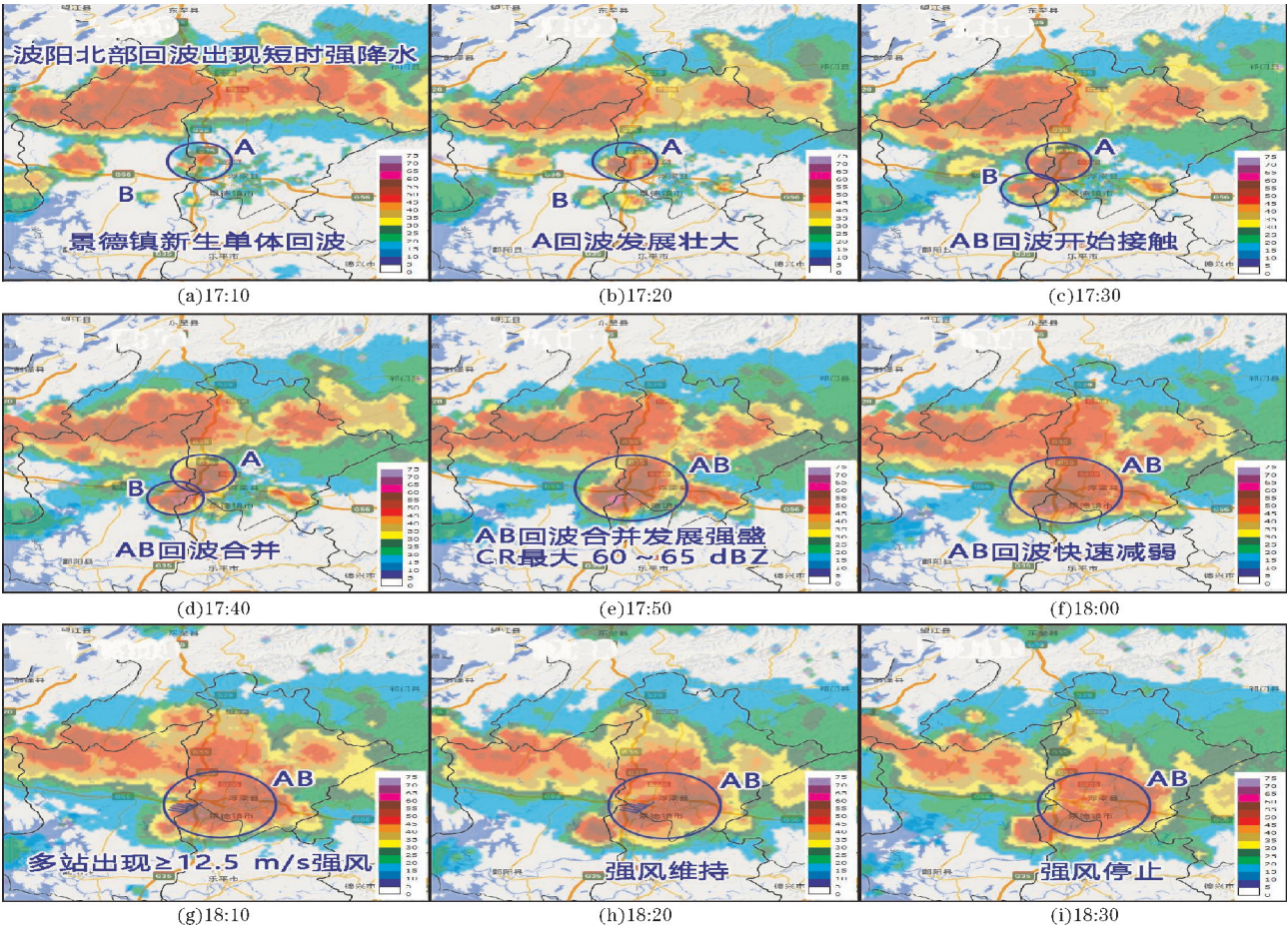


图2 2017年8月20日17:10–18:30 雷达拼图回波系统演变(dBZ初值15)

江西中尺度温度或湿度锋区的水平尺度较小,主要形成方式是由中尺度回波系统产生降水,地面降水冷却与周边较高温度或较干湿度之间构成。如2021年5月10日产生的锋区就属于这一种方式^[33],温度和湿度锋区强度分别在10.2℃/100 km和43%/100 km。由于中尺度锋区尺度小,局地性明显,故还称为局地锋区。

本次过程的局地温度锋区较明显。15时,景德镇市温度维持在32℃~35℃(图3a1);17时,景德镇市浮梁县经公桥镇温度25.7℃,与乐平市镇口镇35.5℃差距达9.8℃/100 km(图3a2),表明温度锋区条件具备;19时,温度锋区逐渐南压至景德镇以南(图3a3)。温度锋区为新生对流回波和促使回波快速发展起到了重要的影响。

在雷达拼图上,14:30景德镇市境内没有对流回波发展(图3b1)。16:30,北部对流回波带移入景德镇市北部(图3b2),降水冷却是形成锋区的主要原因。18:30北部回波带与南面对流回波合并(图3b3),锋区的左右有利于对流回波带的发展。

相对湿度图上,15时,景德镇市在60%~80%。

17时,景德镇北部受到回波带降水的影响,地面相对湿度迅速上升到99%,但景德镇城区附近相对湿度只有61%~68%,为“干点”现象(图3c2)。单体回波在景德镇城区附近新生、发展时,回波快速合并、猛烈发展是否与“干点”构成的湿度锋区有关,值得探讨。19时,景德镇市相对湿度升达99%(图3c3)。

由此可见,温度锋区和湿度锋区是由于降水回波系统的影响而形成的,锋区与回波系统关系密切^[34];同时,锋区对雷暴回波的新生、发展、加强与合并等影响十分明显,因此,实践中要注意锋区的产生和锋区强度,当有新生对流回波、回波快速发展和回波异常活跃时,一般都伴有锋区的存在。

4 雷暴回波“崩塌”现象特征

回波“崩塌”现象(echo “collapse” phenomenon)是指回波强度 ≥ 60 dBZ和60dBZ强回波面积 ≥ 100 km²时,回波强度和面积快速下降且产生强风的时刻。这是雷暴回波产生雷暴大风或强风的一种回波演变方式。

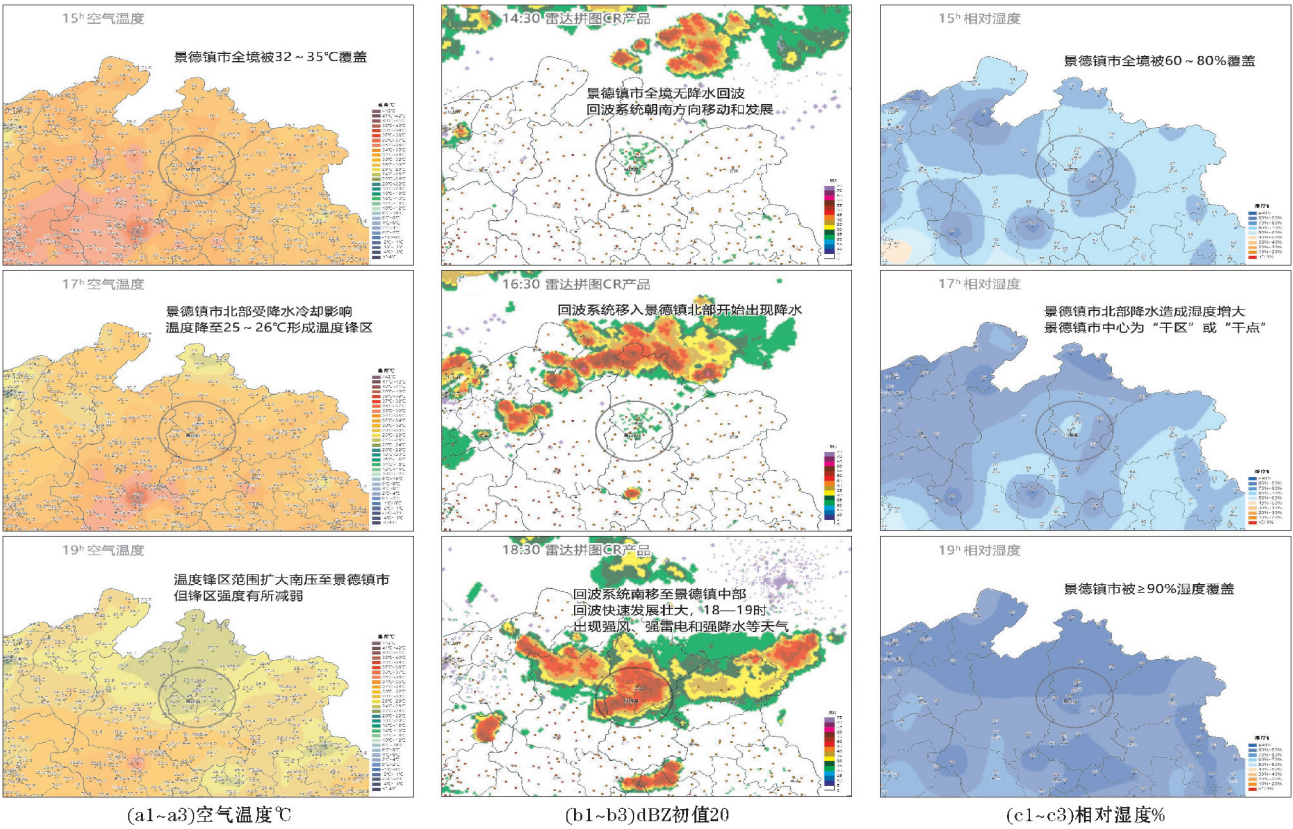


图3 2017年8月20日 中尺度温度锋区、雷达拼图、湿度锋区实况图

4.1 强单体回波 PPI 特征

强单体回波 PPI 特征主要表现在组合反射率 CR

(combined reflectance)、回波顶高 ET(echo top height) 和垂直积分液态水含量 VIL(vertical integration of liquid water content)图上。

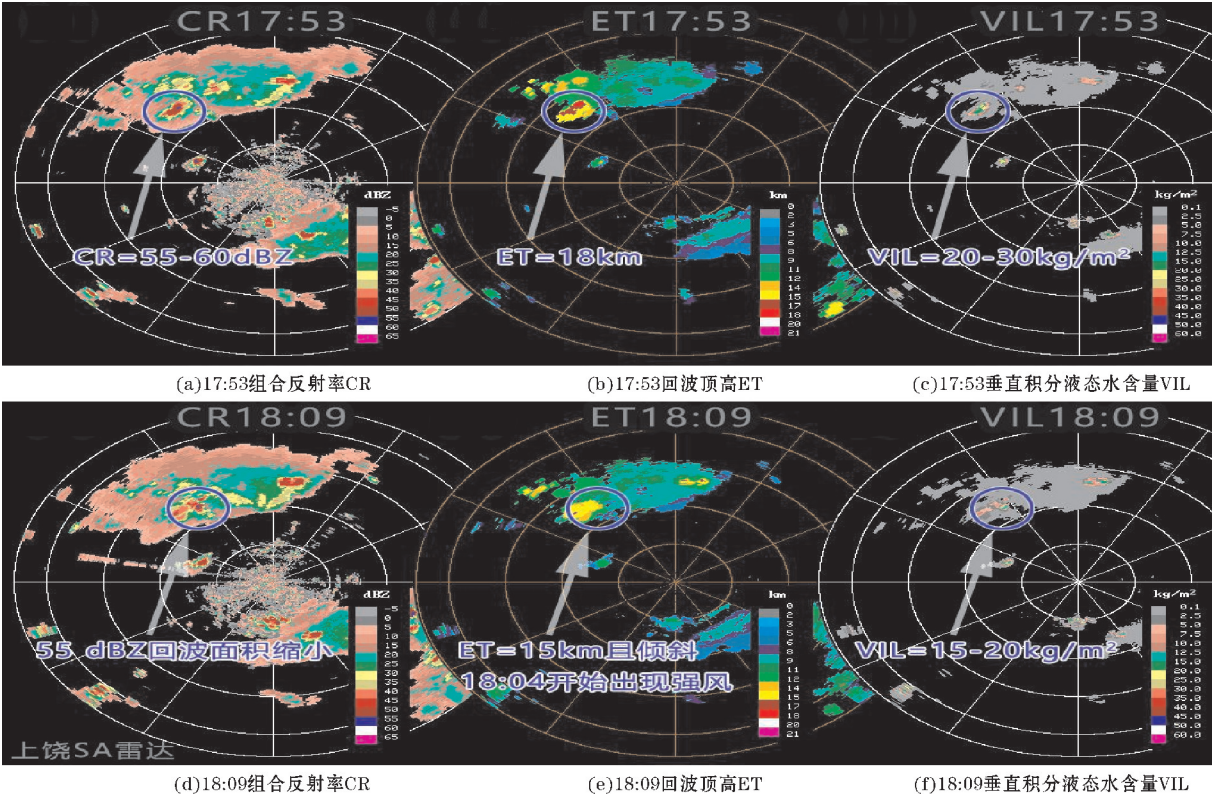


图4 2017年8月20日 上饶SA雷达17:53与18:09 CR、ET、VIL回波特征

上饶 SA 雷达 17:43 CR 强度 55 ~ 60 dBZ, 55 dBZ 回波面积较大(图 4a), ET 达到 18 km(图 4b), VIL 在 20 ~ 30 kg/m²(图 4c)。18:09 CR 强度 55 ~ 60 dBZ, 虽然强度没有变化, 但 55 dBZ 回波面积迅速缩小且分散(图 4d), CR 强回波中心 ET 下降到 15 km 且出现明显倾斜(图 4e), VIL 下降到 10 ~ 15 kg/m², 与 CR 强回波中心重叠(图 4f)。(注: 上饶雷达距离雷暴回波较远, 地球曲率影响看不到最强回波所致)。

由此可见, 产生强风的回波特征主要体现在 CR 回波强度 60 ~ 65 dBZ 减弱为 55 ~ 60 dBZ, 且 55 dBZ 回波面积明显减小、分散; ET 从 18 km 降到 15 km; VIL 从 50 kg/m² 降到 30 kg/m²; 这些回波特征在两个个体扫时间内快速完成, 故称为“崩塌”现象。

4.2 强单体回波 RHI 特征

强单体回波 RHI 特征主要表现在反射率因子垂直剖面 RCS(reflectivity cross section)和径向速度垂直剖面 VCS(velocity cross section)图上。

上饶 SA 雷达 17:43 反射率因子垂直剖面 RCS(图略), 强回波悬挂在 8 ~ 12 km, 55 dBZ 回波面积较大并有 60 dBZ 强回波点; 径向速度垂直剖面 VCS(图略), 强回波区为正负速度对辐散区, 由于回波与雷达距离达 120 km, 受地球曲率影响, 表明高层有辐散。18:09 反射率因子垂直剖面 RCS(图略), 强回波明显减弱, 回波中心最强回波为 50 dBZ; 径向速度垂直剖面 VCS 上(图略), 回波区为一致的负速度区, 最大负速度达到 -19 m/s。

景德镇 SA 雷达 17:43 反射率因子垂直剖面 RCS(图略), 受到静椎区影响, 强回波区上半部分被切掉, 下半部分 CR 回波强度达到 60 dBZ, 55 dBZ 回波面积较大; 径向速度垂直剖面 VCS(图略), 强回波区为正负速度对辐合区, 表明低层有明显辐合。18:07 反射率因子垂直剖面 RCS(图略), 强回波明显减弱, 55 dBZ 回波面积明显减小, 径向速度垂直剖面 VCS(图略), 回波区为一致的负速度区, 最大负速度达到 -13 m/s。18:04 景德镇开始出现大风。

由此可见, 反射率因子垂直剖面 RCS 上, 17:43 ~ 18:09, CR 回波强度从 60 dBZ 降到 55 dBZ, 55 dBZ 回波面积迅速减小; 径向速度垂直剖面 VCS 上, 强回波区由正负速度对、低层辐合、高层辐散迅速转变为负速度区, 地面从 18:04 开始出现强风。

4.3 风廓线雷达探测的低层风场变化

景德镇 TWP3 型边界层风廓线雷达探测的低层(0.1 ~ 1.8 km), 17:45 ~ 18:00 低层为辐合区, 偏东气

流与西北气流辐合, 0.8 ~ 1.1 km 出现风向风速混乱层; 1.5 ~ 1.8 km 出现风向风速辐散层(图 5a)。从景德镇 SA 雷达 17:43 径向速度垂直剖面 VCS(图 5b)上, 低层出现正负速度对, 18:05 ~ 18:20 地面出现强风天气现象。从景德镇 SA 雷达 18:07 径向速度垂直剖面 VCS(图 5c)上, 低层出现一致的负速度区, SA 雷达负速度区对应风廓线雷达强风区。

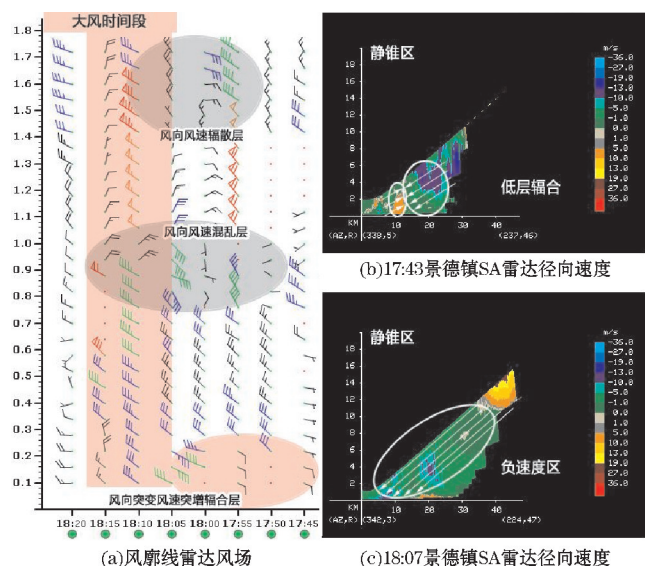


图5 2017年8月20日景德镇TWP3型边界层风廓线雷达探测的风场变化

由此可见, 5 min 观测间隔的风廓线雷达风场, 揭示了雷暴回波强盛期和减弱期的风场变化, 前为风场辐合过程, 后为强风过程。雷暴回波出现“崩塌”现象后, 风廓线雷达记录了风场的演变过程。

5 结论与讨论

本文对 2017 年 8 月 20 日雷暴回波特征进行分析, 得到以下结论:

(1) 2017 年 8 月 20 日 18 ~ 19 时, 景德镇市出现 6 ~ 7 级强风和强雷电天气。主要天气系统为副热带高压北部边缘, 500 hPa 前倾槽、湿度锋区、“上冷下暖”层结、850 hPa 切变线, 地面有辐合线等。

(2) 景德镇西侧有对流回波新生、发展、合并形成短带回波, CR 强度达到 65 dBZ, 60 dBZ 强回波面积增大 ≥ 100 km², 回波处在强盛时刻, 但没有出现大风。温度锋区和湿度锋区是由于降水回波系统的影响而形成的, 锋区对雷暴回波的新生、发展、加强与合并等影响十分明显。

(3) 产生强风的回波特征主要体现在 55 dBZ 回波面积快速减小, ET 从 18 km 快速降到 15 km, VIL 从 50 kg/m² 快速降到 30 kg/m², 这些回波特征在两个体

扫时间内快速完成,故称为“崩塌”现象。

(4)反射率因子垂直剖面 RCS 上,CR 回波强度从 60 dBZ 下降到 55 dBZ,且 55 dBZ 回波面积迅速减小;径向速度垂直剖面 VCS 上,强回波区由正负速度对、低层辐合、高层辐散迅速转变为负速度区。5 min 观测间隔的风廓线雷达风场,揭示了雷暴回波强盛期和减弱期的风场变化。

雷暴回波出现快速减弱特征时,往往是能量释放的过程。雷暴回波“崩塌”现象,为使用组合反射率 CR、回波面积变化、反射率因子垂直剖面 RCS、径向速度垂直剖面 VCS 等产品,识别雷暴回波能否产生强风或雷暴大风天气有所帮助。夏季,副高边缘雷暴回波有时发展十分旺盛,回波强度 CR、强回波面积可以达到春季冰雹的指标,如 CR 达到 65 dBZ,强回波面积 $\geq 100 \text{ km}^2$ 等^[35],但并没有冰雹出现,更多的是出现强雷电、强风等天气。相同的 CR 强回波特征,不同季节,出现强天气各不相同,春季由于零度层偏低,更容易出现冰雹,夏季则以强雷电、强风为主。

参考文献:

- [1] Browning K A, Donaldson R J. Airflow and structure of a tor-nadic storm[J]. J Atmos Sci, 1963, 20: 533-545.
- [2] Browning K A. Airflow and precipitation trajectories with in severe local storms which travel to the right of the winds[J]. J Atmos Sci, 1964, 21: 634-639.
- [3] Browning K A. The structure and mechanisms of hailstorms[J]. Amer Meteor Soc Monog, 1978, 38: 1-36.
- [4] 陈云辉,许爱华,许彬,等. 江西一次极端雷暴大风过程的中尺度特征与成因分析[J]. 暴雨灾害, 2019, 38(2): 126-134.
- [5] 许爱华,詹丰兴,刘晓晖,等. 强垂直温度梯度条件下强对流天气分析与潜势预报[J]. 气象科技, 2006, 34(4): 376-380.
- [6] 许爱华,孙继松,许东蓓,等. 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, 2014, 40(4): 400-411.
- [7] 费海燕,王秀明,周小刚,等. 中国强雷暴大风的气候特征和环境参数分析[J]. 气象, 2016, 42(12): 1513-1521.
- [8] 陈元昭,俞小鼎,陈训来. 珠江三角洲地区重大短时强降水的基本流型与环境参量特征[J]. 气象, 2016, 42(2): 144-155.
- [9] 许爱华,马中元,叶小峰. 江西 8 种强对流天气形势与云型特征分析[J]. 气象, 2011, 37(10): 1185-1195.
- [10] 王福侠,俞小鼎,裴宇杰,等. 河北省雷暴大风的雷达回波特征及预报关键点[J]. 应用气象学报, 2016, 27(3): 342-351.
- [11] 王秀明,周小刚,俞小鼎. 雷暴大风环境特征及其对风暴结构影响的对比研究[J]. 气象学报, 2013, 71(5): 839-852.
- [12] 俞小鼎,张爱民,郑媛媛,等. 一次系列下击暴流事件的多普勒天气雷达分析[J]. 应用气象学报, 2006, 17(4): 385-393.
- [13] 张煜婷,王霄,雷建,等. 白鹤滩水电站冬春季两次极端强风天气的对比分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2017, 11(4): 39-47.
- [14] 刘懿枢,马中元,刘强,等. 2019 年江西早春一次高架对流过程分析[J]. 内蒙古气象, 2021, 42(1): 18-23.
- [15] 马中元,叶小峰,张瑛,等. 江西三类致灾大风天气活动与回波特征分析[J]. 气象, 2011, 37(9): 1108-1117.
- [16] 马中元,许爱华,贺志明,等. 九江地区一次无降水致灾大风天气过程分析[J]. 气象与减灾研究, 2009, 32(3): 52-56.
- [17] 陈鲍发,马中元,徐芬,等. 天气雷达风暴跟踪信息拼图技术设计与应用[J]. 气象科学, 2020, 40(6): 838-848.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 洪丽霞,马中元,陈鲍发,等. “7. 11”江西副高边缘雷暴大风回波特征分析[J]. 中低纬山地气象, 2021, 45(5): 30-36.
- [21] 苏俐敏,马中元,钱焕荣,等. 宜春短时强降水的单站要素统计和分析[J]. 气象水文海洋仪器, 2013, 30(1): 62-65.
- [22] 苏俐敏,夏文梅,马中元,等. 2012 年江西宜春四类短时强降水特征分析[J]. 气象科学, 2014, 34(6): 700-708.
- [23] 辛玮琦,马中元,谌云,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.

- [24] 桂园园, 马中元, 齐永胜, 等. 2017 年鹰潭市城区暴雨天气与回波特征分析[J]. 自然灾害学报, 2020, 29(3): 63–75.
- [25] 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.
- [26] 马中元, 许爱华, 陈云辉, 等. 江西省灾害性强雷电雷达回波特征[J]. 自然灾害学报, 2009, 18(5): 16–23.
- [27] 夏文梅, 马中元, 慕瑞琪, 等. 江西副高边缘雷暴大风雷达拼图回波特征分析[J]. 大气科学学报, 2021, 44(5): 717–726.
- [28] 马中元, 苏俐敏, 谌芸, 等. 一次强飚线及飚前中小尺度系统特征分析[J]. 气象, 2014, 40(8): 916–929.
- [29] Sun W Y, Ogura Y. Boundary-layer forcing as a possible trigger to a squall line formation[J]. J. Atmos. Sci. 1979, 36: 235–254.
- [30] Sun W Y, Ogura Y. Modeling the evolution of the convection planetary boundary layer[J]. J. Atmos. Sci. 1980, 36: 1558–1572.
- [31] Stull R B. Integral scales for the nocturnal boundary layer. Part I: empirical depth relationships[J]. J. Clim. Appl. Meteorol. 1983, 22: 673–686.
- [32] Sun W Y. A forward-backward time integration scheme to treat internal gravity waves[J]. Mon. Weather Rev. 2009, 108: 402–407.
- [33] 夏文梅, 马中元, 陈爆发, 等. 中尺度湿度和温度锋区对局地冰雹回波的影响[J]. 大气科学学报, 2022.
- [34] 马中元, 张瑛, 马晓琳, 等. 江西对流风暴触发系统与形成机制的探讨[J]. 自然灾害学报, 2009, 19(3): 19–26.
- [35] 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.

Analysis of Echo Characteristics of Strong Wind Caused by “Collapse” Phenomenon of a Thunderstorm Echo

CHEN Baofa^{1,2,3}, MA Zhongyuan³, WANG Lizhi¹, HUANG Longfei², CAI Junfeng², LI Yanling²

(1. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2. Jingdezhen Meteorological Bureau, Jingdezhen, Jiangxi 333000, China; 3. Jiangxi Institute of Meteorological Sciences, Nanchang 330046, China)

Abstract: In order to understand the cause of thunderstorm echo forming strong wind, the characteristics of thunderstorm echo on August 20, 2017 were analyzed using the data of automatic weather station, radar composite reflectivity mosaic (CR) product, new generation weather radar (CINRAD-SA), PUP product and TWP3 boundary layer wind profile radar in Jingdezhen, etc. The results show that: (1) the influence system of the strong wind process in Northeast Jiangxi is the Western Pacific subtropical high (northern edge), 500 hPa forward trough, humidity front, 850 hPa shear line, convergence line on the ground, etc. (2) Convection echoes are constantly emerging, developing and merging near Jingdezhen. The composite reflectivity (CR) intensity reaches 65 dBZ, and the area of 60 dBZ strong echo increases $\geq 100 \text{ km}^2$. The echo is at its peak, but there is no strong wind. (3) The influence of temperature front and humidity front on thunderstorm echo is mainly manifested in the newborn convection echo, the rapid development of echo and the abnormal activity of echo. (4) Strong winds often occur from the time when thunderstorm echo is strongest to the time when it weakens rapidly. At this time, CR echo intensity of 60–65 dBZ weakens to 55–60 dBZ, and the echo area of 55 dBZ rapidly decreases and disperses; Echo top height (ET) drops from 18 km to 15 km; Vertical integrated liquid water content (VIL) decreased from 50 kg/m^2 to 30 kg/m^2 . These changes occur and disappear rapidly within the scanning time of two individuals, so they are called “collapse” phenomenon. (5) On the RCS of the reflectivity factor vertical profile, the CR echo intensity decreases from 60 dBZ to 55 dBZ, and the echo area with 55 dBZ CR decreases rapidly; on the radial velocity vertical cross-section (VCS), the strong echo region rapidly changes from positive and negative velocity pairs, low-level convergence and high-level divergence to negative velocity region; strong winds began to appear on the ground. The results of the study have guiding significance for the early warning and monitoring of thunderstorm or strong wind weather.

Keywords: echo merging; warm and humid front area; “collapse” phenomenon; echo area; Negative velocity region