

李向红,唐熠,郑传新,等. 一次多种强对流天气过程的雷达回波特征分析[J]. 气象,2010,36(8):61-71.

# 一次多种强对流天气过程的雷达回波特征分析<sup>\*1</sup>

李向红<sup>1,2</sup> 唐熠<sup>1</sup> 郑传新<sup>1</sup> 李垂军<sup>1</sup>

1 广西桂林市气象局, 桂林 541001

2 广西气象减灾研究所, 南宁 530022

**提 要:** 利用桂林的 CINRAD-SB 雷达资料和 NCEP 资料对 2004 年 11 月 9—11 日桂林市中北部连续性暴雨、大暴雨,南部连续局地冰雹龙卷过程进行了分析。结果表明:一强降水超级单体演变成弓形回波导致了 10 日桂林市短时暴雨;一系列线型波动(LEWP)的列车效应造成了 9—11 日桂林北部的暴雨。弓形回波和线形波动前侧都有 V 型缺口,表明有强的西南气流进入上升气流,同时都有后侧 V 型缺口,表明具有强的下沉气流和后侧偏北气流。可用弓形回波提前 20~33 分钟预警短时暴雨。而造成南部恭城附近连续两日的冰雹和龙卷风天气都是由孤立的右移型  $\gamma$  尺度超级单体造成,有三体散射长钉(TBSS)回波特征,可用于提前 15~22 分钟预警大冰雹。对流单体发展成为龙卷单体伴随有下击暴流的气旋性辐散特征,非常临近地面大风出现时间。

**关键词:** 暴雨, 冰雹, 龙卷, 弓形回波, 中气旋, TBSS

## The Analysis of the Radar Echo Features for Many Kinds of Convective Events

LI Xianghong<sup>1,2</sup> TANG Yi<sup>1</sup> ZHENG Chuanxin<sup>1</sup> LI Chuijun<sup>1</sup>

1 Guilin Meteorological Office of Guangxi, Guilin 541001

2 Guangxi Institute of Meteorological Disaster Mitigation, Nanning 530022

**Abstract:** Based on the CINRAD-SB radar data of Guilin and the NCEP data, the event including series torrential rain occurring in north region and series hail storm and tornado occurring in south region between 9 to 11 November 2004 is analyzed. The results show that the flash flood occurring in Guilin City was led by an HP with bow echo. The series torrential rain occurring in north region of Guilin was led by the effect of series LEWP. There were FFNs ahead of bow echo and LEWP, which showed that there was strong southwest wind intruding into the upward current. There was RIN behind the bow echo and the LEWP, which showed that there were strong downdraft winds and the rear northerly wind. The bow echo can be used to issue flash flooding warning ahead of 20 to 33 minutes. The hail storm and tornado events which occurred in south region of Guilin lasting for two days were led by the isolated  $\gamma$ -scale supercells moving rightly. The TBSS feature can be used to issue big hailstorm warning ahead of 15 to 22 minutes. The convective cell developing to tornado was followed by cyclone divergence feature of downburst, it was very close to the time that the damage wind occurred.

**Key words:** torrential rain, hail storm, tornado, bow echo, meso-cyclone, TBSS

\* 广西科学技术厅项目“多普勒雷达结合中尺度数值模式的强对流天气临近预报研究”(桂科自 0728076),“突发性暴雨山洪及灾害的监测与预警系统关键技术研究”(桂科攻 0719005-3-2),国家自然科学基金项目(40865001)联合资助

2009年5月20日收稿; 2010年1月28日收修定稿

第一作者:李向红,主要从事中尺度系统分析和天气雷达应用研究. Email:gllxh99@163.com

## 引言

暴雨、冰雹和大风等强对流天气都是由中小尺度天气系统直接产生的,文献[1-2]对造成各种强对流天气的超级单体的基本结构和发展演变机制进行过深入研究。文献[3-8]对国内外的强对流单体个例,如强降水超级单体弓状回波特征、冰雹单体的 TBSS 特征和下击暴流的气旋性辐散特征等进行过分析。文献[9-10]介绍了国内外利用雷达与模式相结合的临近预报方法。文献[11-15]对暴雨的雷达风场辐合特征进行过反演研究,文献[16-17]对近年我国强对流的典型个例的形成机制及临近预报进行了探讨。桂林的 CINRAD-SB 型雷达具有良好的定量测量回波强度的性能和良好的多普勒测速能力,不但可以探测整个雷达范围内的大范围大气流场,还可以探测中小尺度的超级单体风暴,如  $\gamma$  尺度气旋的发展与移动,为研究造成广西的暴雨和冰雹等强对流天气的中小尺度天气系统提供了丰富的产品。

桂林的气候特点是春夏湿秋冬干,一般而言在秋季常为冷高压控制,秋高气爽。但 2004 年的秋季则是例外,11 月 9—11 日,出现了连续 3 天中北部地区为暴雨、大暴雨,而南部恭城县附近为连续冰雹大风强对流过程。3 天内桂林及以北的 7 个县,出现暴雨以上降水 11 场次,桂林站 10 日 02 时 50 分到 06 时 20 分三个半小时雨量达 127.8 mm,造成城市暴洪;而桂林南部恭城县 9、10 两日都几乎在相同的时间(夜间 19 到 21 时之间)出现了冰雹大风天气。灾情记载:11 月 9 日 20 时 30 分到 21 时,恭城莲花镇遭受历史罕见的特大冰雹袭击,冰雹最大直径有 8 cm 左右;临桂 9 日有 5 个村屯受冰雹袭击,冰雹如拳头大小;9 日平乐县有 4 个村出现雷雨大风、冰雹天气。11 月 10 日 19 时许,恭城县龙虎乡有 5 个村受到暴雨和龙卷风的袭击,持续时间 10 分钟左右,全乡共被龙卷吹倒古樟等大树 100 多株,输电杆被吹倒 7 根,通讯杆被吹倒 18 根,狮子村 300 m<sup>2</sup> 校舍被吹坏,4300 多 m<sup>2</sup> 农户房屋被吹翻,瓦片、水果被吹落大约 8 万斤。本文通过 CINRAD-SB 雷达产品分析了桂林短时暴洪、冰雹和雷雨大风的雷达回波特征,为桂林多种强对流天气的临近预报提供依据。

## 1 天气形势分析

### 1.1 东海高压与西南低涡

2004 年 11 月 8—10 日 500 hPa 东海高压一直稳定控制,中高纬度不断有阶梯槽引导冷空气南下,由于东海高压脊的阻挡,这些短波槽东北移滑出,无法压过 25°N。

9 日,广西 850 hPa 流场和高度场为东海高压后部,西南急流建立,贵州西南风场气旋性曲率加大,切变线建立在芷江以北,850 hPa 的低空急流和北部的切变线配合产生的对流云团造成了 9 日桂林北部的 7 个站中有 6 站出现暴雨以上降水。而南部处于锋前的暖区中,锋前西南气流中发展起来的  $\gamma$  尺度超级单体在傍晚造成了恭城莲花乡的局地冰雹大风。

10 日,对应 850 hPa(图 1)四川气旋性曲率继续发展,在贵州与四川交界发展成一低涡,从低涡中心到华东一带形成一切变线,切变线位于桂林与芷江之间,地面形势与 850 hPa 相似(图略),四川与贵州交界的低涡发展东移,低涡的发展东移使强降水超级单体发展东移,导致桂林铁路沿线中部的灵川、桂林和临桂出现大暴雨,其中桂林出现城市短时暴洪。而南部处于锋前的暖区中,锋前西南气流中发展起来的  $\gamma$  尺度超级单体在傍晚造成了恭城龙虎乡龙卷风。

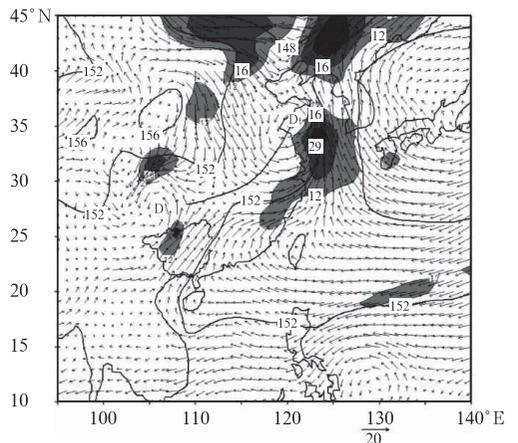


图 1 2004 年 11 月 10 日 02 时 850 hPa 高度场、风矢量场与低空急流区(阴影区)  
Fig. 1 The height field, wind vector field and low-level jet area (shaded areas) of 850 hPa at 02:00 BT 10 November, 2004

11 日,500 hPa(图略)浅槽引导冷平流东移,850 hPa(图略)低涡和低空急流减弱,地面弱冷锋压过桂林,给桂林北部造成了三站暴雨,其中灵川雨量达 108 mm,但切变线仍位于芷江与桂林之间,没有压过桂林,没有切变线和高空槽配合,桂林南部仅出现了小雨。同时由于西南气流的减弱,南部没有再出现局地的强对流天气。

综上所述,从低层到高层的东海高压是此次强对流天气过程得以连续的关键,正是由于东海高压的阻挡作用,使得贵州的西南低涡强烈发展,同时切变线始终维持在芷江与桂林之间,无法压过桂林,使得暴雨连续在中北部发生,而没有压到桂林南部。而南部的局地冰雹、龙卷则是在锋前的暖湿气流中发展起来。

### 1.2 水汽条件

连续暴雨、强对流天气发生期间,水汽供应是充分的,图 2 为 10 日 02 时沿 110°E 的水汽通量的高度-纬度剖面图,可见在桂林(25°N)附近水汽通量达到最大值 25 g · kg<sup>-1</sup>。

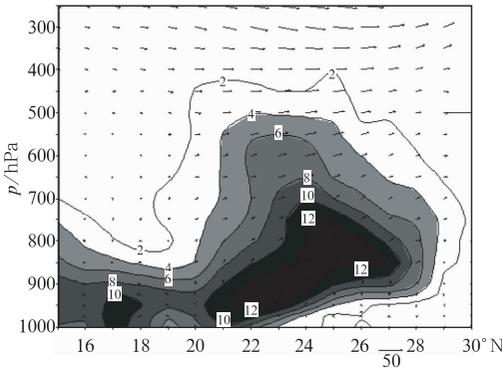


图 2 2004 年 11 月 10 日 02 时沿 110°E 水汽通量高度纬度剖面图(单位:g · kg<sup>-1</sup>)  
Fig. 2 The height-latitude cross-section of vapour flux along 110° E at 02 BT 10 November 2004 (unit:g · kg<sup>-1</sup>)

### 1.3 动力条件

由于西南低涡的逼近,10 日 02 时桂林的垂直速度也达到了最高值,从沿 110°E 垂直速度高度-纬度剖面图(图略)。可见当时 25°N 附近的垂直速度达到了 -0.2 Pa · s<sup>-1</sup>,而在南部和北部都为下沉气流。

### 1.4 CAPE 值及暖云层

分析 9 日 08 时和 20 时桂林探空曲线(图略),

08 时可见桂林站的对流有效位能 CAPE 值为负值,可能是刚下过雨的缘故;但到晚上 20 时探空曲线表明对流有效位能 CAPE 值变为正值,但数据并不大,此时距大暴雨发生有 6 小时 30 分,除了可以解释为探空的时间分辨率太低外,还可以解释为中等强度的 CAPE 值比极端的 CAPE 值更有利于高降水效率的形成,因为极端的 CAPE 使气块加速通过暖云层,减小了形成通过暖云层过程形成的降水时间<sup>[2]</sup>。另外从探空资料也可分析出,抬升凝结高度很低,只有 900 hPa,而融化层(0 °C)高度很高,为 600 hPa,从抬升凝结高度到融化层(0 °C)高度的厚度为暖云层,暖云层较厚,为大暴雨的产生提供了充足的水汽。

### 1.5 从风廓线判断暖平流及暖云层

从风廓线图 3 可看出,大暴雨发生前几个小时低层 1.2 km 以下为东南风,以上转为西南风,风向上存在风随高度的顺转,在热成风假定下,可从单站风廓线计算温度平流<sup>[10]</sup>,

$$-\mathbf{V} \cdot \nabla T \approx -\frac{\bar{p}f}{R_d} \left( \frac{V_1 + V_2}{2} \right) \left( K \frac{V_1 - V_2}{\Delta p} \right) \quad (1)$$

简化结果为

$$-\mathbf{V} \cdot \nabla T \approx -\frac{\bar{p}f}{R_d \Delta p} V_1 V_2 \sin(\theta_1 - \theta_2) \quad (2)$$

其中  $f$  为科氏参数; $R_d$  为空气气体常数。在等压面  $p_1$  和  $p_2$  上( $p_1 > p_2$ ) 风速风向分别为  $(V_1, \theta_1)$  ( $V_2, \theta_2$ )。可见风随高度顺转时有暖平流的存在,它是产生上升运动和水汽辐合的动力条件。低层的东南风持续到 10 日 02 时 30 分,20 分钟后大暴雨开始,这

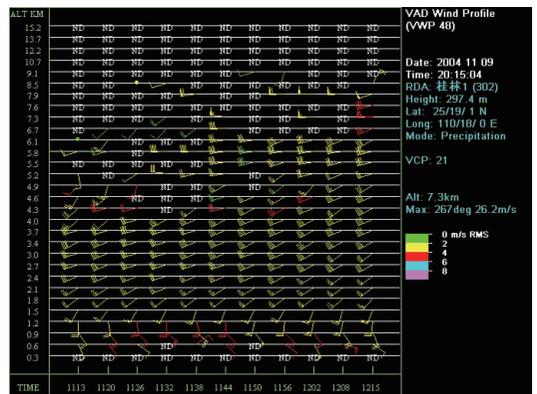


图 3 2004 年 11 月 9 日 19 时 13 分到 20 时 15 分桂林站雷达风廓线图  
Fig. 3 The radar VAD wind profile from 19:13 to 20:15 BT 9 November, 2004

可以作为一个低涡大暴雨的临近预报指标。此后低层为 ND 或被北风取代,可见低层有冷空气的渗入。

另外大暴雨发生前偏南气流是逐渐加厚的,从西南风的时间-高度演变图(图 4)上可看到,在 16 时 32 分,偏南气流只到 1.8 km,到 20 时 27 分增厚到 7.9 km,然而,从 22 时 32 分开始由于高层偏北冷空气的入侵,西南气流的高度下降到 4 km,但维持 2 小时后,西南气流再次增厚,到大暴雨开始时的 02 时 50 分左右,西南气流的厚度为 8.5~9 km,暴雨结束后,西南气流逐渐变薄,暴雨结束时为 6~7 km 左右,结束后 1 小时降为 4 km。西南气流高度很高说明暖云层很厚,根据云的微物理理论,降水系统中的暖云层越厚,越有利于高降水效率的产生。也可认为此次大暴雨为暖区西南气流中的暴雨。

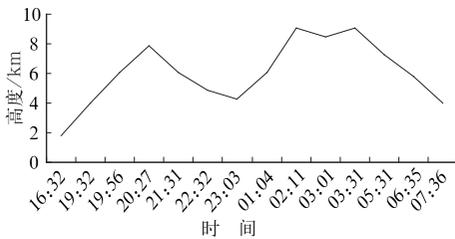


图 4 2004 年 11 月 9 日 16 时 32 分到 10 日 07 时 36 分偏南风时间-高度演变图(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )  
Fig. 4 The time-height profile of southerly winds from 16:32 BT 9 November to 07:36 BT 10 November, 2004 (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

## 2 CINAD-SB 雷达产品分析

### 2.1 风暴的走向

从 2004 年 11 月 9—11 日的新一代雷达产品的演变看来,造成此次多种连续强对流天气的天气系统都为右移型风暴造成,移动的走向如图 5。C 为造成桂林城市暴洪弓状回波移动路径,D 为造成北部县的连续暴雨线形波动(LEWP)移动路径,A 为造成 10 日恭城北部龙卷的孤立超级单体的走向,B 为造成 9 日恭城南部冰雹的孤立超级单体的路径。

### 2.2 弓状回波造成短时暴洪

据桂林气候基准站的雨量自记记录,从 11 月 10 日 02 时 50 分到 06 时 20 分,短短 3 个半小时雨量达到 127.8 mm,导致城市暴洪。10 日暴洪为强降水超级单体<sup>[2-3]</sup>的弓形回波由西向东移动造成,图

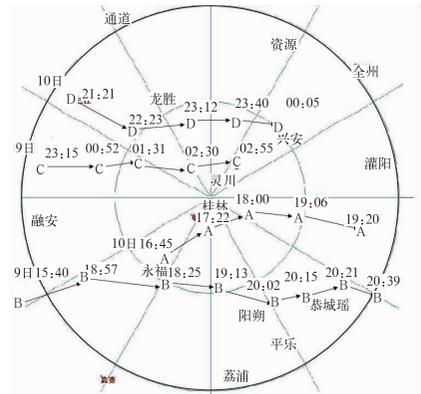


图 5 2004 年 11 月 9—10 日  
风暴单体移动路径图

(A:影响恭城北部龙卷单体,B:影响恭城南部冰雹单体,C:导致桂林暴洪弓状回波,D:导致桂林北部暴雨线形波动)

Fig. 5 The moving course map of storm cells on November 9 and on November 10, 2004

(A: the tornado cell which influenced the north of Gongcheng County; B: the hail cell which influenced the south of Gongcheng County; C: the bow echo which led to flash floods in Guilin City; D: LEWP which led to torrential rain in north region of Guilin)

6 中的 C 为其移动路径,图 6 为 2004 年 11 月 9—10 日  $2.4^\circ$  反射率演变图。从 9 日 23 时起,距桂林 100 多 km 的太平山附近有一东北—西南向的长 110 km、宽十几千米的对流云团组成的对流云带,对应径向速度图有一范围为 15 km 的气旋性涡旋。两小时后对流云团发展东移到距离桂林西面 50 km 处,最强强度发展到 60 dBz。10 日 1 时 31 分(图 6a<sub>1</sub>)对流云团东移到桂林西面 37 km 处,反射率减为 58 dBz,而在高仰角反射率加大,由于上升运动加强而导致反射率因子核心在抬升;在相应的径向速度图(图 6a<sub>2</sub>)上可看到在一大片白色的零速度区中有一点红色与西面的绿色形成辐合,此为中层径向辐合(MARC)<sup>[1]</sup>,为气旋发展初生阶段。到 02 时 11 分(图 6b<sub>1</sub>),对流云团东移发展成弧状回波,反射率的读数仍为 58 dBz,长度有 100 km,对应速度图(图 6b<sub>2</sub>)在相应位置有大片红色和绿色的风向的辐合,为范围约 20 km×20 km 的  $\beta$  中尺度气旋性涡旋,入流比出流大,入流为  $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,出流仅为  $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,中气旋正在发展。02 时 30 分,弓形回波发

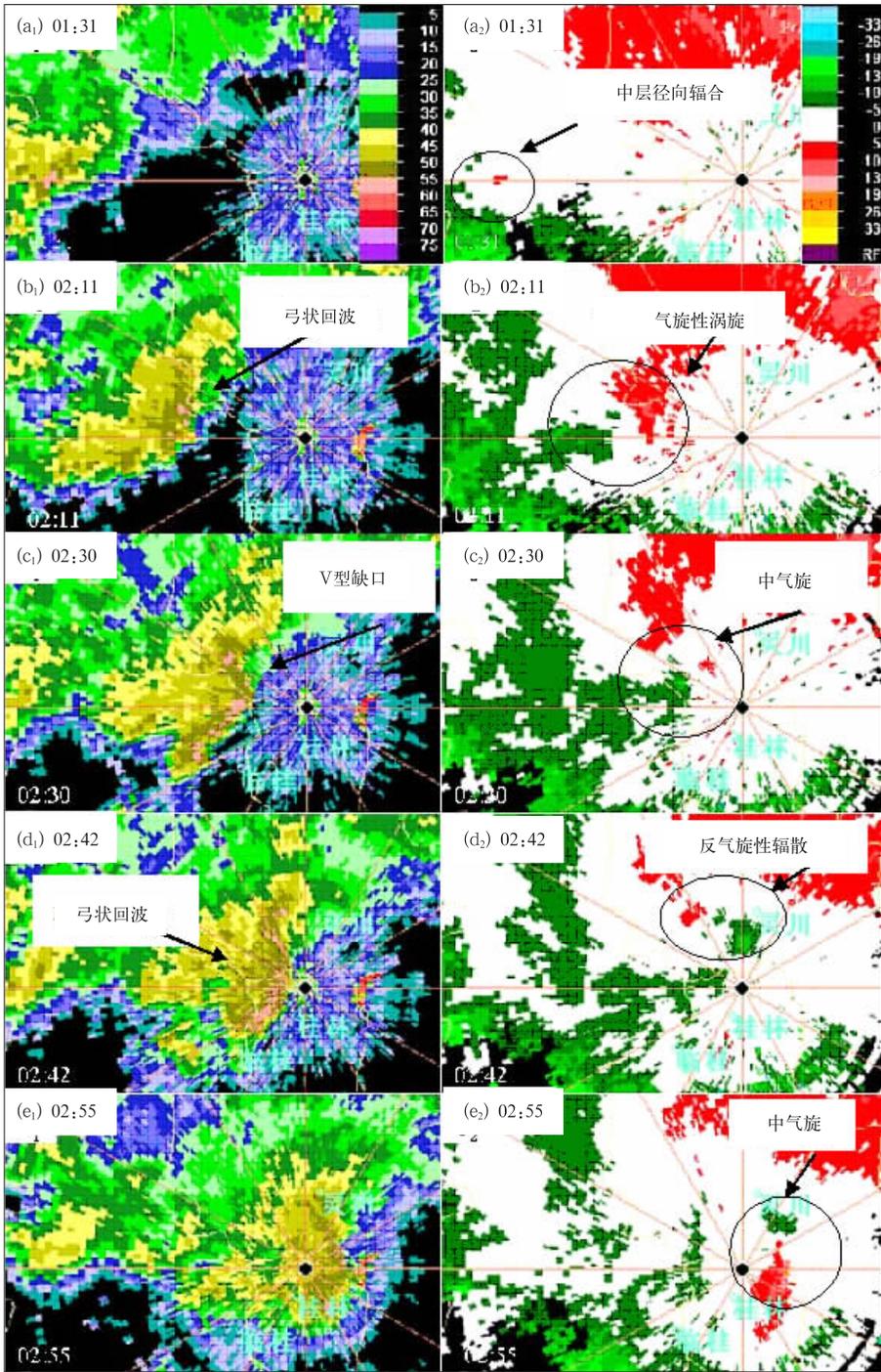


图 6 2004 年 11 月 10 日 2.4°仰角反射率(a<sub>1</sub>、b<sub>1</sub>、c<sub>1</sub>、d<sub>1</sub>、e<sub>1</sub>)和径向速度(a<sub>2</sub>、b<sub>2</sub>、c<sub>2</sub>、d<sub>2</sub>、e<sub>2</sub>)演变(a<sub>1</sub>、a<sub>2</sub> 为 01 时 31 分; b<sub>1</sub>、b<sub>2</sub> 为 02 时 11 分; c<sub>1</sub>、c<sub>2</sub> 为 02 时 30 分; d<sub>1</sub>、d<sub>2</sub> 为 02 时 42 分; e<sub>1</sub>、e<sub>2</sub> 为 02 时 55 分)

Fig. 6 The evolution of reflectivity (a<sub>1</sub>, b<sub>1</sub>, c<sub>1</sub>, d<sub>1</sub>, e<sub>1</sub>) and radial velocity (a<sub>2</sub>, b<sub>2</sub>, c<sub>2</sub>, d<sub>2</sub>, e<sub>2</sub>) along 2.4° elevation 10 November, 2004 (a<sub>1</sub>, a<sub>2</sub> 01:31 BT; b<sub>1</sub>, b<sub>2</sub> 02:11 BT; c<sub>1</sub>, c<sub>2</sub> 02:30 BT; d<sub>1</sub>, d<sub>2</sub> 02:42 BT; e<sub>1</sub>, e<sub>2</sub> 02:55 BT)

展成熟(图 6c<sub>1</sub>),弓状明显,可以看出为“人字型”回波,南部入流为一最强强度为 58 dBz 带状回波,长 20 多 km,有明显的反射率梯度大值区,北部入流较弱,最强强度为 48 dBz,长度大约为十几千米;弓状

回波有明显前侧 V 型缺口位于 306°,表明有强的西南气流进入上升气流,同时还有后侧 V 型缺口,表明强的下沉气流和后侧偏北气流,是强降水超级单体发展到最成熟期;对应径向速度(图 6c<sub>2</sub>),入流比

出流大,入流为  $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,出流仅为  $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,中气旋发展成熟。此后弓形回波继续东移,于 02 时 42 分强度为 58 dBz 的弓状回波移到灵川、桂林和临桂一带(图 6d<sub>1</sub>),在小范围区域反射率强度升到 65 dBz,由于暴雨发生导致反射率的质心在下降,此时灵川西面可看到反气旋性辐散特征(图 6d<sub>2</sub>),可能为灵川西面强暴雨导致下击暴流,仅持续两个体扫。02 时 55 分,弓状回波东移桂林城上空(图 6e<sub>1</sub>),对应的径向速度(图 6e<sub>2</sub>)可看到紧邻桂林东面

中气旋再次发展,从 02 时 50 分开始,桂林市的雨量猛然加大,此后持续 3 个半小时,强降水主要位于弓状回波及后侧压住桂林其间,为典型的强降水超级单体影响。根据地面雨量分析,弓状回波中有三个对流单体产生暴雨,分别影响灵川、桂林和临桂,其中以桂林最为强烈。

桂林短时暴洪雨势加大距离反射率弓状回波锥形出现大概 33 分钟,距离弓状回波成熟相距 20 分钟,相距 20~35 km,反射率达到 58 dBz,可作为临

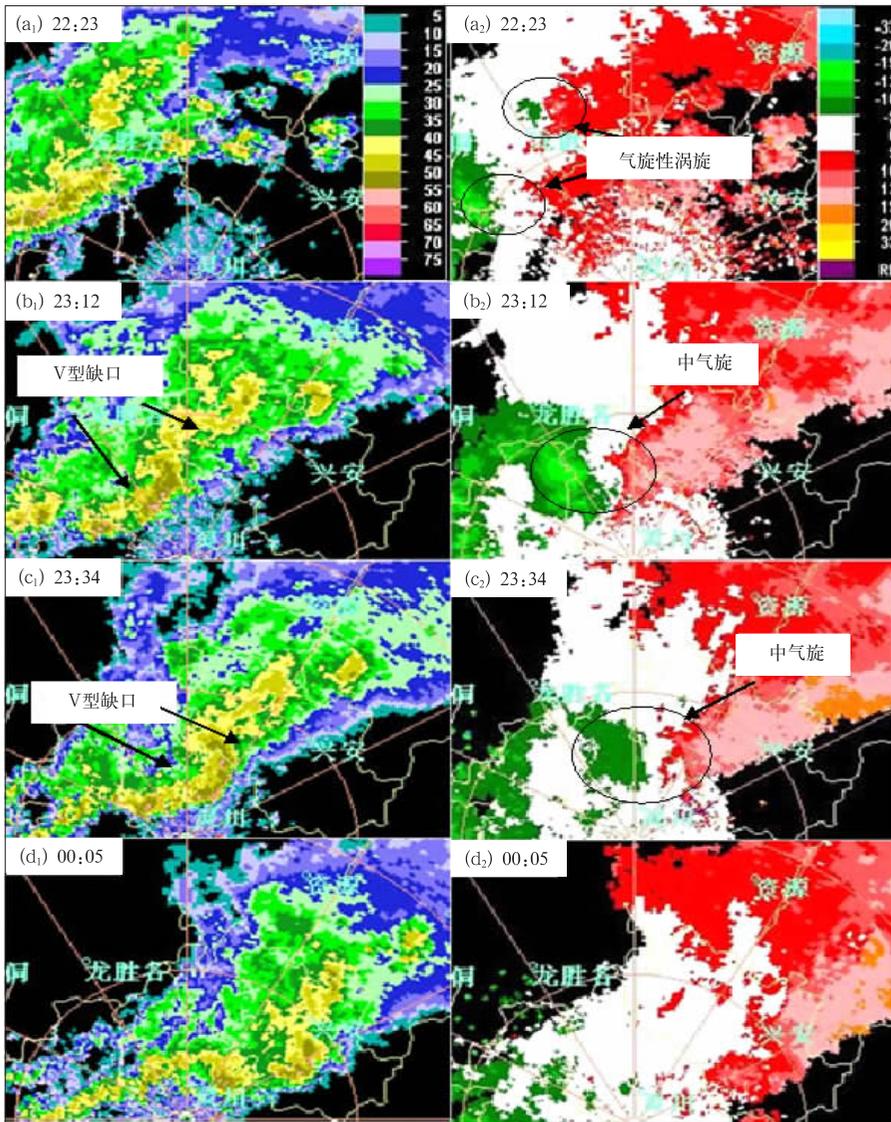


图 7 2004 年 11 月 10 日 22 时 23 分到 11 日 00 时 05 分  $2.4^\circ$  仰角反射率(a<sub>1</sub>、b<sub>1</sub>、c<sub>1</sub>、d<sub>1</sub>)和径向速度(a<sub>2</sub>、b<sub>2</sub>、c<sub>2</sub>、d<sub>2</sub>)演变

(a<sub>1</sub>, a<sub>2</sub> 为 10 日 22 时 23 分, b<sub>1</sub>, b<sub>2</sub> 为 10 日 23 时 12 分,  
c<sub>1</sub>, c<sub>2</sub> 为 10 日 23 时 34 分, d<sub>1</sub>, d<sub>2</sub> 为 11 日 00 时 05 分)

Fig. 7 The evolution of reflectivity (a<sub>1</sub>, b<sub>1</sub>, c<sub>1</sub>, d<sub>1</sub>) and radial velocity (a<sub>2</sub>, b<sub>2</sub>, c<sub>2</sub>, d<sub>2</sub>) along  $2.4^\circ$  elevation from 22:23 BT 10 November to 00:05 BT 11 November, 2004

(a<sub>1</sub>, a<sub>2</sub> 22:23 BT 10 November; b<sub>1</sub>, b<sub>2</sub> 23:12 BT 10 November;  
c<sub>1</sub>, c<sub>2</sub> 23:34 BT 10 November; d<sub>1</sub>, d<sub>2</sub> 00:05 BT 11 November)

近预报的指标。

### 2.3 线型波动(LEWP)的列车效应

桂林北部县的连续暴雨主要是由一系列对流雨带经过造成的,反射率表现为线型波动(LEWP)<sup>[1-2]</sup>由西向东移动,类似于“列车效应<sup>[2]</sup>”。图5中D为影响桂林北部县大暴雨的对流单体移动路径。

从2.4°反射率图可以看到,2004年11月10日20时在桂林北面100多km处的城步苗到西北面的从江,有一东北—西南向的对流云组成的不连续带,此对流云逐渐东移加宽、加强,对应径向速度图入流的速度比出流大,入流仅为 $16\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,出流却有 $29\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,可见当时还没有发展成中气旋。一个半小时后对流云东移到桂林西偏北87 km处,强度发展到58 dBz,对应径向速度图,在相应位置已发展出小尺度气旋,入流比出流大,入流为 $12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,出流仅为 $8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (图略)。回波继续发展东移,于22时23分(图7a<sub>1</sub>)在大坪山处出现了68 dBz的对流单体,两条短带回波有待连接成弓形,对应径向速度图,在相应位置(图7a<sub>2</sub>)有两个气旋性涡旋,大的入流为 $16\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,出流为 $8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,范围 $15\text{ km}\times 15\text{ km}$ ,为 $\beta$ 中尺度气旋初生发展阶段。对流云带继续东移发展,半小时后,强回波逐渐东移发展为弓形回波,由于风暴单体核心抬高,最强强度减为58 dBz,有后部入流V型缺口和前侧V型缺口锥形(图略),弓形回波的后部入流强盛,速度为 $16\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,说明中气旋继续发展。到23时12分,由于受到桂林北部的东北—西南向的越城岭山脉的阻挡,回波加强发展为人字形(图7b<sub>1</sub>),南部有一长100 km、强度为58 dBz强对流单体组成的入流,北部入流回波强度比南部稍弱,长近80 km,此为线型波动(LEWP),正移过青狮潭,线形波动前侧有明显V型缺口和后部入流缺口,为强降水超级单体;此时从径向速度图上可看出,中气旋发展到最强(图7b<sub>2</sub>),有明显的正负速度对,入流旺盛。23时34分(图7c<sub>1</sub>)回波移到桂林北部的溶江、三街、灵川、潭下、五通几个乡,此时线型波动(LEWP)发展最为成熟,有明显的后部入流缺口和前侧入流缺口,同时回波前部有明显的反射率梯度大值区;对应径向速度图(图7c<sub>2</sub>),涡旋东移到塔边乡,但入流有些减弱,结构有些松散。11日00时05分(图7d<sub>1</sub>)回波继续东移,人字形回波破坏,对应径向速度图(图7d<sub>2</sub>)中气旋特征明显减弱,但回波始终没有压过桂林,由于不断有这样的线型

波动(LEWP)东移,形成列车效应,当夜灵川雨量累计为107 mm,为大暴雨。此后不断有线型波动(LEWP)东移到桂林东部的兴安、灌阳一带,造成暴雨。回波基本上都在桂林以北发展东移,没有影响桂林及以南地区,桂林当日雨量仅14 mm。列车效应并不局限于爬线平行于其走向的情况,只要有多个降水云团先后经过同一地点,也会有称为列车效应,导致大的雨量。造成桂林北部县的暴雨的就是此类情况。

### 2.4 冰雹对流超级单体

11月9日的冰雹大风天气涉及恭城、临桂、平乐三个县,都是由西南气流中发展起来的对流单体引起,其中影响恭城、平乐两县冰雹最大直径有8 cm,伴有大风,为孤立对流单体引起,图6中的B为其移动路径。当时的环境风为西南风,单体移动偏离环境风右侧大约40°。

#### 2.4.1 风廓线及双干区

分析08时桂林探空曲线及对流有效位能CAPE很难看出9日下午有发生强对流的可能性,可能冰雹是局部的,离冰雹发生相距12小时,从空间和时间上都相距较远,桂林08时探空没有表征性。从桂林站当日19时13分到20时15分风廓线图(图4)可以看到,风向顺转而且增大,由600 m高的 $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的东南风顺转为4 km高的西南风,风速加大到 $18\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,大气变得很不稳定,有发生强对流天气的潜势<sup>[2]</sup>;另外,从19时20分到19时38分在4.3 km到6.7 km之间有弱的“ND”双干区出现,此后双干区破坏,距离桂林南部恭城的局地大冰雹40多分钟。

#### 2.4.2 冰雹单体演变及TBSS特征

图5为冰雹单体B的移动路径,图8a为冰雹单体的反射率随时间演变曲线。15时40分,在距桂林西南方向130 km的柳城附近(图5)有一弱对流单体生成,强度有45 dBz(图8a);1小时后,对流单体东移到柳城的东偏北方45 km处(228°,96 km)强度发展到62 dBz,范围为 $20\text{ km}^2$ 左右,对应径向速度图出现小块红绿相间的速度对;19时13分对流单体东移到距阳朔西南方大约9 km处(170°,70 km),最强强度有68 dBz(图8a),对应径向速度图为一出流为 $8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,入流为 $16\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的 $\gamma$ 尺度涡旋,尺度为10 km;19时44分对流单体进入平乐境内,由于上升运动发展,对流单体核心上升,20时02分反射率强度下降为63 dBz,对应径向速度图是气

旋性涡旋向东移动到同样位置(图 8a);20 时 08 分,对流单体进入平乐二塘镇,反射率回波开始出现沿径向的“丁字”雏形,上升运动还是很强,中心强度为 63 dBz(图 8a),对应径向速度图相应位置绿色入流范围比红色出流范围大得多,气旋在发展,据实况上报,平乐二塘镇夜间有 4 个村出现雷雨大风冰雹天气,雷电打坏了十多台高频头电视,没有具体时间上报,估计在此时;20 时 15 分,对流单体反射率表现为沿径向的“丁字”形(图 9a<sub>1</sub>),此为“三体散射长钉”(TBSS)<sup>[4-5]</sup>特征,从最强中心到长钉尾端有 18 km,中心强度加强到 68 dBz,可见冰雹单体核心加大。丁字回波于 2.4°和 3.4°仰角发展更旺盛,有 19 km 长,反射率为 68 dBz 的范围在 3.4°仰角最大,可见在风暴中层有回波的悬垂。对应 1.5°仰角径向速度图(图 9a<sub>2</sub>)有相同长度的“丁字”,气旋中心为辐合,出入流都为 12 m · s<sup>-1</sup>,但入流比出流范围

大,强对流单体发展最成熟。此时强对流单体反射率为 43 dBz 的区域到达平乐与恭城的交界,最强中心距莲花镇大约 10 km;20 时 21 分(图 5),强回波(43 dBz)范围影响到恭城莲花镇,单体最强中心仍有 68 dBz(图 8a),TBSS 特征仍存在,但长钉稍短,对应径向速度图涡旋范围扩大,出流长钉存在,气旋中心入流与出流都为 12 m · s<sup>-1</sup>,但出流比前一体扫范围加大,入流与出流之间夹有白色的零速度区,可见气旋变得松散,比前一体扫稍减弱;20 时 39 分,气旋明显东移减弱,单体反射率回波减为 58 dBz,对应径向速度图为沿径向的纯辐散。恭城上报 20 时 30 分之后,恭城莲花镇内有 5 个村出现了大冰雹,冰雹最大直径有 8 cm;而冰雹开始距离“丁字”雏形出现有 22 分钟的提前时间,距离完整的 TBSS 特征出现有 15 分钟。TBSS 可作为大冰雹的临近预警的一个指标。

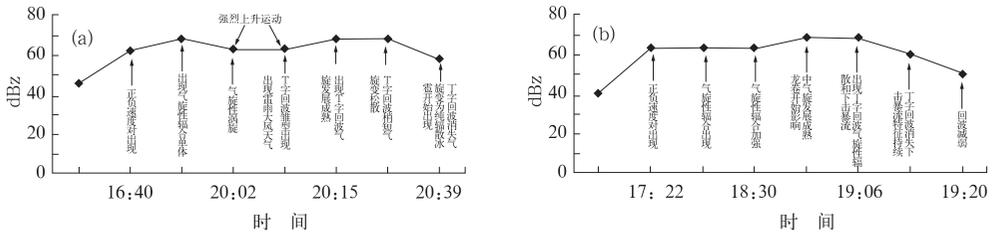


图 8 2004 年 11 月 9 日冰雹单体(a)和 10 日龙卷单体(b)反射率随时间演变图  
 Fig. 8 The reflectivity temporal variation of the hail cell (a) on November 9, 2004 and the temporal variation of the tornado cell (b) on November 10, 2004

这次过程显示 TBSS 是冰雹的充分条件,并不是必要条件。因为临桂上报 9 日有 5 个村屯受冰雹袭击,冰雹如拳头大小,但只看到对流单体在临桂发展,没有发现 TBSS 特征。

此外,从 B 单体 1.5°反射率强度演变中发现冰雹超级单体在发展初期由于强烈上升运动,其反射率核心有一个抬升过程,发展成熟时反射率核心加大,冰雹出现时核心开始下降,冰雹出现离冰雹核心抬升大概 30 分钟,离核心加大大概 15 分钟左右。对于没有 TBSS 特征的单体,可以利用这一点做冰雹单体的临近预报。

图 9a<sub>3</sub> 为对流单体发展初期 19 时 56 分的速度剖面图,可见在 2.8 km 以下低层的入流,而在 8 km 以上有出流,可见在风暴发展初期上升气流从风暴单体前方低层流入,上升,从单体后方高层流出,符合中气旋的发展机理<sup>[6]</sup>。

### 2.5 龙卷与下击暴流

从损害程度判断造成 10 日恭城县龙虎乡 19 时

许 5 个村龙卷风的等级为 F2 级,其间还夹有暴雨。图 5 中 A 为龙卷单体的移动路径,图 8b 为龙卷单体其反射率随时间演变曲线,风暴的移向也是偏离环境风 30°左右。风暴的前期,从 10 日 12 时开始,在距桂林西偏南面的 110 km 的融安不断有对流单体向东移动,对应径向速度图上有小涡旋,范围为 20 km<sup>2</sup>,给临桂造成了强雷雨天气。图 8b 为龙卷单体随时间演变曲线。

16 时 45 分(图 5)在永福新生一小对流单体,强度只有 40 dBz,范围为 7 km × 7 km。此对流单体向东稍偏北方向移动,于 17 时 22 分(图 5)到桂林正南面 34 km 处,最强为 63 dBz(图 8b),此时 1.5°径向速度图上表现为一红绿相间的气旋性涡旋特征,出流为 8 m · s<sup>-1</sup>,入流为 12 m · s<sup>-1</sup>,为气旋性辐合,直径为 7 km,为 γ 尺度超级单体。于 18 时 09 分东移到阳堤北部,强度最强为 63 dBz,范围扩大到 9 km × 9 km,对应径向速度图相应位置,气旋性辐合更明显,出流仍为 8 m · s<sup>-1</sup>,入流 12 m · s<sup>-1</sup>的

范围加大,说明超级单体是发展的;18 时 30 分东移到恭城境内,位于恭城北偏西方 25 km 处,最强强度发展到 63 dBz;到 19 时到达恭城北侧稍偏东近 30 km 处龙虎乡(116°,70 km),气旋再次加强,最强达 68 dBz(图 8b),对应径向速度图气旋东移到相应位置,入流与出流都为  $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,到 19 时 06 分,气旋发展到最强,反射率因子达 68 dBz 的范围扩大,同时表现为丁字形回波(图 9b<sub>1</sub>),从气旋中心到丁字末端有 17 km 左右,对应径向速度图(图 9b<sub>2</sub>)也

有丁字特征,但只出现一个体扫,可能夹有小冰雹。气旋表现为气旋性辐散,出流范围加大,为  $22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,入流范围变小,为  $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,可以判断此时出现了下击暴雨<sup>[6]</sup>。到 19 时 13 分,丁字回波消失,强度减弱为 60 dBz,对应径向速度图,绿色入流区消失,仅剩白色的零速度区,红色出流区为片状,大小为  $22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,19 时 20 分回波继续东移,强度急剧减弱,反射率最强减弱为 50 dBz。

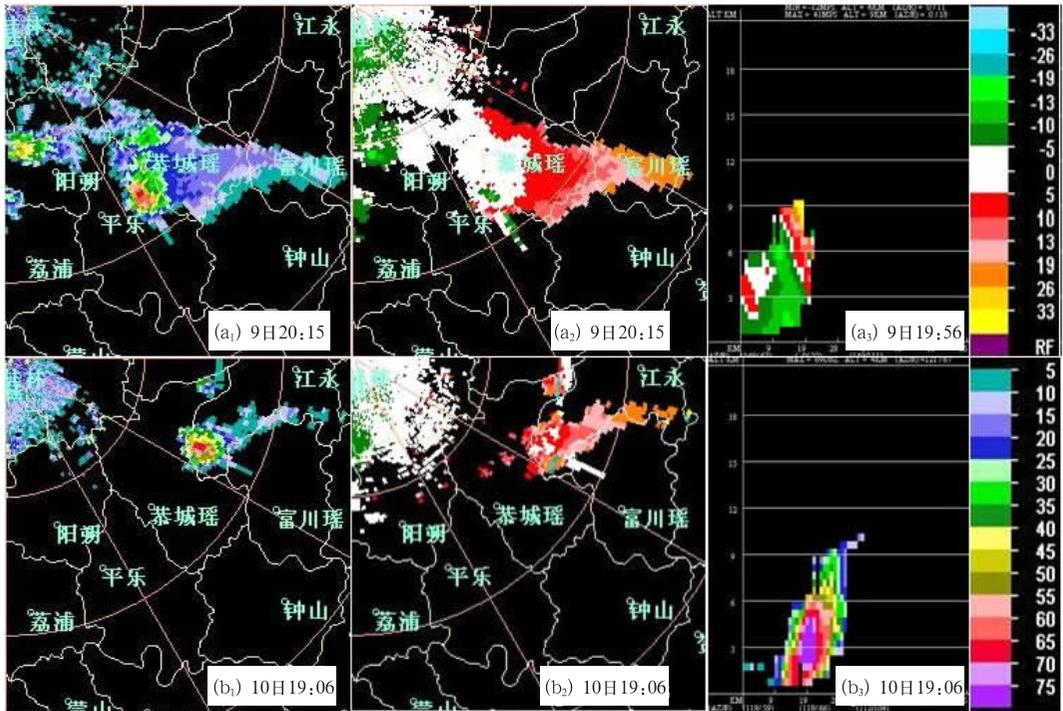


图 9 2004 年 11 月 9 日冰雹单体 1.5°仰角反射率(a<sub>1</sub>)、径向速度(a<sub>2</sub>)、径向速度剖面(a<sub>3</sub>)和 2004 年 11 月 10 日龙卷单体 1.5°仰角反射率(b<sub>1</sub>)、径向速度(b<sub>2</sub>)、反射率剖面(b<sub>3</sub>)产品

Fig. 9 The reflectivity (a<sub>1</sub>), radial velocity (a<sub>2</sub>) on 1.5° elevation, the radial velocity cross section (a<sub>3</sub>) of hail storm cell on November 9, 2004 and the reflectivity (b<sub>1</sub>), radial velocity (b<sub>2</sub>) on 1.5° elevation, reflectivity cross section products (b<sub>3</sub>) of tornado cell on November 10, 2004

图 9b<sub>3</sub> 为 10 日 19 时 06 分的反射率剖面图,可见 75 dBz 强回波区从 6 km 下降到了 2 km,此时正是大风发生时刻,可见反射率核心很低,结合当时低层气旋性辐散特征,可以预计当时龙卷风出现时,可能也出现下击暴雨<sup>[12]</sup>。

### 3 几种对流单体的比较

这次天气过程出现了多种强对流天气,为便于识别,表 1 将对流单体 A、B、C、D 几种参数进行了比较。

表 1 对流单体特征比较  
Table 1 The feature comparison of the convective cells

单体标记	单体类型	中气旋尺度	单体性质	径向速度切变 / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	回波长度 / km	回波强度 / dBz	顶高 / 10 km	VIL / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$	小时累计降水 / mm	特征	主要相伴天气
A	龙卷	$\gamma$ (7 km)	孤立单体	30	15	68	1.2	38	31.7	TBSS	下击暴雨
B	冰雹	$\gamma$ (10 km)	孤立单体	24	25	68	1.0	48	44.4	TBSS	雷雨大风
C	短时暴雨	$\beta$ (20 km)	多单体	24	150	58	0.9	25	38.3	Bone echo	弱下击暴雨
D	暴雨	$\beta$ (15 km)	多单体	24	190	58	0.8	25	35.3	LEWP	雷电

从表中可见,短时暴洪和暴雨是多单体风暴,龙卷和冰雹是孤立单体风暴,所以暴洪和暴雨的影响范围要远大于龙卷和冰雹。

龙卷气旋尺度最小,其次为冰雹,这两者都为  $\gamma$  尺度超级单体。暴雨和短时暴洪的气旋为  $\beta$  尺度气旋,最大为短时暴洪的气旋。径向速度切变最大为龙卷,为  $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。龙卷气旋以最小的尺度拥有最大的径向风切变,那么它的旋转能力也是最大的,可能这也是产生龙卷风的决定性因素。冰雹、短时暴洪和暴雨的径向风切变都为  $24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,但因为冰雹气旋的尺度最小,那么冰雹的旋转能力在这 4 种中气旋中排第二,伴随冰雹往往也会出现大风。

B 超级单体发展到最强时刻,即 TBSS 出现时,出流与入流都也只有  $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  ( $1.5^\circ$  径向速度读数),结构对称;而 A 超级单体发展到最强时刻,风暴的出流速度有  $22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,入流为  $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,为低层气旋性辐散,而且单体减弱后,对应径向速度图,仅剩红色片状出流区,大小为  $22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。所以 A 主要以龙卷风和下击暴流灾情为主,同时由于有一个体扫的 TBSS 特征,VIL 值有  $38 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ,也可能夹有小冰雹,当时夹在暴雨中,不为人知。而 B 超级单不但有三个体扫的 TBSS 特征,而且 VIL 值还达到了  $48 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ,主要灾情为冰雹,同时也伴有雷雨大风。短时暴洪和暴雨的 VIL 值最小,都为  $25 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

顶高与对流发展的强弱也是成正比的,最高为龙卷,依次为冰雹、短时暴洪、暴雨,短时暴洪比暴雨的雨势更急,对流更旺盛,所以短时暴洪的顶高比暴雨更高,同时伴有弱下击暴流。观测发现大冰雹回波顶高达到  $10 \text{ km}$  持续了 25 分钟,提前 15 分钟达到,这可作为大冰雹的预报参数;龙卷顶高达到  $10 \text{ km}$  只有十几分钟,而达到时,龙卷风已经开始了。

1 小时累计降水最大为冰雹,44.4 mm,其次为短时暴洪,最小为龙卷。桂林暴洪三个 1 小时累计雨量(ORP)都达到了 38.3 mm,最大雨量累计都达到了 44.4 mm,与实际雨量基本符合;而 3 小时累计雨量(TRP)为 69.8 mm,比实际雨量偏小。

#### 4 结合数值预报产品做强对流临近预报

可尝试结合数值预报产品判断强降水超级单体的发展趋势和雨量级别,根据 NCEP 资料分析,在

10 日 02 时桂林( $25^\circ\text{N}$ 、 $110^\circ\text{E}$ )附近,垂直速度达到了  $-0.2 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ ;02 时到 08 时 500 hPa 垂直速度场平均场分析,桂林( $25^\circ\text{N}$ 、 $110^\circ\text{E}$ )位于强烈的上升区附近,中心值达到  $-0.35 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ (图略)。那么可以利用 02、05 和 08 时的垂直速度预报判断强降水超级单体的发展趋势,初步得出当桂林站三个时次的垂直速度低于  $-0.2 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ ,同时 05 或 08 时垂直速度值更低,可判断对流发展强烈,有大暴雨发生。其次分析 02 时水汽通量,可见在  $25^\circ\text{N}$  附近水汽通量达到最大值  $2.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 2),02 时到 08 时 850 hPa 的湿度分布(图略)可见桂林位于大的湿度中心附近,中心值达到  $1.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。也可以利用水汽通量数值预报大于  $2.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,有可能 3 小时达到 100 mm 降水。将雷达产品与数值预报产品结合做强对流天气临近预报有待探索。

#### 5 结 论

本文通过 2004 年 11 月 9—11 日桂林市北部罕见的连续 3 天暴雨、大暴雨,南部恭城县附近的连续两天冰雹大风过程的 CINRAD-SB 雷达探测资料分析,得出以下结论:

(1) 桂林市及北部的连续暴雨是由于西南低涡沿切变线东移引起,而南部的连续强对流则是西南暖湿气流中不稳定云团发展造成,由于冷空气弱,切变线始终压不过桂林,所以造成了北部连续暴雨,南部连续强对流天气。A、B 两对流单体分别发生在 9 日和 10 日接近的时间,相同地区,是因这两天形势少变,东海高压稳定,桂林位于高压西侧低值带内,南部位于低空西南急流的右侧(图略),因而它们都为偏右移动的超级单体,具有相似的路径。

(2) 大暴雨发生并不需要很强的 CAPE 值,但需要低层暖平流和深厚的暖云层。

(3) 短时暴洪和暴雨都由  $\beta$  尺度强降水超级单体造成。弓形回波造成了桂林城市暴洪,雨量是一次性的雨强达到,桂林北部暴雨为线型波动(LEWP)的火车效应为特征,系列对流雨团东移,雨量由一次次小的雨强累计而成。

(4) 冰雹、龙卷和下击暴流都是由孤立的  $\gamma$  尺度超级单体东移发展造成。冰雹有 TBSS 特征,气旋的径向风是平衡的;龙卷单体发展的最强时刻,风暴的出流速度高于入流,有短时的气旋性辐散,有反射率的核心下降的特征,为下击暴流的表现。三

体散射(TBSS)长钉特征到大冰雹出现相距 15 到 22 分钟,可用于冰雹的临近预报指标。龙卷也有一个体扫三体散射(TBSS)长钉特征出现,可能有小冰雹。

(5) 桂林雷达风廓线图低层的东南风为 ND 或北风取代后 20 分钟后大暴雨开始,可以作为一个暴雨的预报指标。北部县暴雨开始距离反射率弓状回波锥形出现大概 33 分钟,距离弓状回波成熟相距 20 分钟,相距 25~35 km,反射率达到 58 dBz 以上。在 4~7 km 之间有弱的“ND”双干区出现,当其破坏后 40 分钟有可能在桂林南部出现局地冰雹大风。

(6) 可将雷达产品与数值预报产品相结合做桂林短时暴雨预报,利用垂直速度数值预报判断强降水超级单体的发展趋势,利用水汽通量数值预报判断雨量级别。

## 参考文献

- [1] Charles A, Doswell III. Severe Convective Storms[M]. Published by the American Meteorological Society, 2001:71-90.
- [2] 俞小鼎,姚秀萍,熊廷南,等. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京:气象出版社,2005:90-181.
- [3] 郑媛媛,俞小鼎,方翀,等. 一次典型超级单体风暴的多普勒天气雷达观测分析[J]. 气象学报,2004,50(3):37-40.
- [4] Witt A, and Co-authors. An enhanced hail detection algorithm for the WSR-88D[J]. Wea Forecasting, 1998, 13, 286-303.
- [5] Lemon L R. The radar “Three-Body Scatter Spike”; an operational large-hail signature[J]. Wea Forecasting, 1998, 13, 327-340.
- [6] Fujita T T. The Downburst[M]. SMRP Research Paper 210. Chicago:University of Chicago,1985:1-122.
- [7] 唐小新,廖玉芳. 湖南省永州市 2006 年 4 月 10 日龙卷分析[J]. 气象,2007,33(8):23-28.
- [8] Moller A R et al. The operational recognition of supercell thunderstorm environments and storm structures[J]. Wea Forecasting, 1994, 9:327-347.
- [9] 陈明轩,俞小鼎,潭晓光,等. 对流天气临近预报技术的发展与研究进展[J]. 应用气象学报,2004,15(6):756-760.
- [10] 章国材,矫海燕,李延香,等. 现代天气预报技术和方法[M]. 气象出版社,2007:175-217.
- [11] 肖艳姣,张家国,万蓉,等. 切变线暴雨中尺度系统的多普勒天气雷达资料分析[J]. 气象,2005,31(2):35-37.
- [12] 姚祖庆. 对上海 0185 特大暴雨过程天气形势分析[J]. 气象,2002,28(1):26-29.
- [13] 王彦,吕江津,周海光,等. 暴雨的多普勒天气雷达速度辐合风场特征[J]. 气象,2008,34(3):63-68.
- [14] 牛淑贞,张一平,王国安,等. “海棠”影响河南降水雷达回波与中尺度雨团对比分析[J]. 气象,2006,32(8):30-35.
- [15] 王改利,刘黎平. 多普勒雷达资料在暴雨临近预报中的应用[J]. 气象,2005,31(10):12-16.
- [16] 漆良波,陈雷. 上海局地强对流天气及临近预报要点[J]. 气象,2009,35(9):11-17.
- [17] 廖晓农,于波,卢丽华. 北京雷雨大风气候特征及短时临近预报方法[J]. 气象,2009,35(9):18-28.