

祁丽燕,农孟松,王冀. 2009 年 7 月 2—4 日广西暴雨过程的中尺度特征[J]. 气象,2012,38(4):438-447.

# 2009 年 7 月 2—4 日广西暴雨过程 的中尺度特征<sup>\*</sup>

祁丽燕<sup>1</sup> 农孟松<sup>1</sup> 王 冀<sup>2</sup>

1 广西壮族自治区气象台,南宁 530022

2 广西壮族自治区人工影响天气办公室,南宁 530022

**提 要:** 本文运用 NCEP  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  格点资料和多普勒雷达、自动站以及 SWAN 系统等资料,用综合诊断分析方法对 2009 年 7 月 2—4 日广西大范围强降水过程进行成因分析。结果表明:由于冷空气很弱,以渗透的方式影响广西,使地面西南暖低压得以长时间维持,是这次过程持续时间长的主要原因之一;地面辐合线稳定少动,是桂北强对流发展的触发机制,也是产生“列车效应”的主要因子;柳州多普勒雷达基本反射率显示在 7 月 2 日 20 时到 3 日 08 时的“列车效应”使得河池东部和柳州北部出现了特大暴雨,暴雨中心在径向速度上反映为强烈的辐合。此外对 SWAN 产品进行检验和分析,Cotrec 风场对回波的移动有较好的指示作用;TITAN 在预报强回波的移动和强度上有着一定的预报能力;1 小时雨量预报与实况雨量大致相近。

**关键词:** 中尺度辐合线,列车效应,SWAN 系统,暴雨

## Mesoscale Analysis of the 2—4 July 2009 Heavy Rainfall in Guangxi

QI Liyan<sup>1</sup> NONG Mengsong<sup>1</sup> WANG Ji<sup>2</sup>

1 Guangxi Meteorological Observatory, Nanning 530022

2 Guangxi Weather Modification Office, Nanning 530022

**Abstract:** Using the NCEP  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  grid data, Doppler radar data, and products from the SWAN system, this paper analyzes the large-scale heavy precipitation process in Guangxi at 20:00 BT 2 to 20:00 BT 4 July 2009 with a comprehensive diagnostic method. The results show that: The cold air is very weak so as to penetrate into Guangxi, then the southwestern warm low can maintain for a long time, this is one of the main causes for the precipitation lasting for long time. Meanwhile, the surface convergence line is stable, which is the trigger mechanism of strong convection development in northern Guangxi, and is also the main factor for the generation of ‘train effect’. Base reflectivity of Liuzhou Doppler radar showed that the “train effect” made heavy rainfalls occurring in areas east of Hechi and north of Liuzhou during 20:00 BT 2 July to 08:00 BT 3 July 2009, and storm center is reflected as strong convergence in the radial velocity. Besides, the SWAN products were tested and analyzed, the Cotrec winds have a good indication to the echo moving; TITAN techniques have some forecasting capability to the movement and intensity of strong echo; and the one-hour rainfall forecast is generally similar to the live rainfall.

**Key words:** mesoscale convergence line, train effect, SWAN system, heavy rainfall

\* 中国气象局新技术推广项目预报员专项(CMATG2008Y07)、广西科技厅(桂科攻 0993002-1 和桂科攻 0816006-9)和广西青年基金(0991061)共同资助

2011 年 5 月 19 日收稿; 2012 年 2 月 3 日收修定稿

第一作者: 祁丽燕,主要从事天气预报和中尺度灾害性天气研究. Email: qji21s@foxmail.com

## 引言

广西地处华南西部,暴雨是华南区域的主要灾害性天气之一。中国气象科学研究院主持的1998年华南暴雨科学试验<sup>[1]</sup>为暴雨系统中尺度研究提供了新的观测资料,并在中尺度暴雨理论和方法以及中尺度暴雨数值模式系统等方面取得重要的研究成果。杨红梅等<sup>[2]</sup>分析了华南前汛期局地大气气柱水汽总量增减变化特征和增湿方式及其与华南暴雨突发的关系。胡亮等<sup>[3]</sup>对华南地区的连续性暴雨分类,讨论了不同类型持续性暴雨的形成原因。赵玉春等<sup>[4]</sup>分析了南半球冷空气爆发在华南地区暴雨形成中的作用。刘国忠等<sup>[5]</sup>对影响华南地区的西南低涡以及致洪低涡活动进行了系统性的统计研究,建立了影响低涡致洪暴雨天气系统配置及其模式图。闫敬华等<sup>[6]</sup>对华南暴雨试验期一次造成华南沿海特大暴雨的锋面过程进行了高分辨数值模拟,并从不同侧面分析了该中尺度系统的结构特征和成因。

近年来多普勒雷达资料的应用使得观测的尺度无论是在时间上还是空间上都得以大大缩小,对中尺度系统的发生、发展和演变得到了进一步的了解,对暴雨的预报能力也有了较大提高。SWAN系统是基于多普勒雷达资料反演的一个系统,它把多部雷达资料进行整合,使预报员能更为直观地了解中尺度系统的结构,还提供了系统演变的外推,为短时预报提供了依据,能使预报员更为准确地对中尺度系统发展做出判断,但同时它是一个新开发的系统,其预报准确性还有待于检验。

2009年7月1日20时至4日20时,受到高空槽、低涡切变线和西南急流的共同影响,广西出现了一次持续性大范围暴雨天气过程。此过程累计雨量:大于250 mm的有94个乡镇,100~249.9 mm有496个乡镇,50~99.9 mm有412个乡镇;其中位于广西北部的融安县泗维河水库雨量记录达708 mm,是此过程中雨量最大的自动站。

此次降水的时间与空间分布不均匀,暴雨落区主要在广西北部,主要强降雨时段从2日23时开始,中尺度雨团异常活跃,泗维河3日00时的1小时降水量增到100.5 mm,3日01时也有63.8 mm,之后降水强度逐渐减弱,到3日10时又开始增大,而在其南面15 km左右的融安站也经过几次突增和突降,但强度比泗维河的小,可见此次暴雨过程时次之间的降水强度变化很大,两站降雨量的峰值出

现时段又各不相同,表明雨带中有多个更小尺度的雨团在活动,其时空分布都有着明显的中尺度特征。

本文利用NCEP的 $1^\circ \times 1^\circ$ 格点资料和柳州的多普勒雷达资料,从影响系统、动力条件、不稳定机制等方面,对2009年7月2—4日影响广西的暴雨过程的中尺度观测特征与物理机制进行综合分析,探讨其中尺度特征,希望能揭示一些有规律性的特征,进一步提高此类暴雨天气的预报水平;同时运用SWAN系统对这次过程进行预报检验,讨论其在业务应用上的可靠性。

## 1 环流形势分析

7月2日20时(见图1),500 hPa中高纬环流为两槽一脊型,河套地区强盛的华北高压脊形成阻断高压的形势,脊前的东亚槽在 $120^\circ\text{E}$ 附近,槽后的偏北风引导东路冷空气缓慢渗透到桂东北地区,脊后青海到四川一带为西北—东南向的切变,切变西部的西北气流引导西路冷空气南下, $30^\circ\text{N}$ 以南低纬地区的西风带中不断地有小波动移出,副高西脊点从 $105^\circ\text{E}$ 退至 $120^\circ\text{E}$ 以东。中低层西南风较小,华北高压后部的切变线诱发850 hPa低涡生成。广西地面处于西南暖低压中,在贵州与湖南南部有静止锋生成,位于中低层低涡切变和西南风之间的桂东北开始产生强降水。

3日08时至4日20时,华北高压逐渐减弱东移,脊后的切变缓慢南压与西风带的小波动合并成

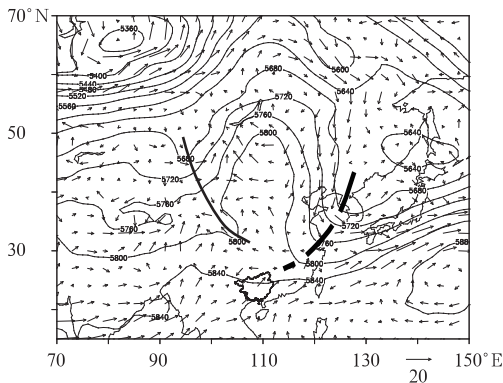


图1 2009年7月2日20时500 hPa高度场与850 hPa风场叠加(单位:gpm)  
(实线为切变线,虚线为槽线)

Fig. 1 Superposition of 500 hPa height and 850 hPa wind field at 20:00 BT 2 July 2009 (unit: gpm)  
(Solid line indicates shear line, dotted line indicates trough line)

南北向的低槽,云贵一带的西北偏北风也转为强劲的偏北风,带动西路弱冷空气源源不断南下影响广西。同时 850 hPa 低涡在广西东北部到贵州东南部滞留;地面静止锋一直维持在桂北到贵州南部之间,两天内产生了全区性的大范围强降水,暴雨中心从桂北逐渐移到桂南。

5 日 08 时后,高压脊减弱消失,副高逐渐西进增强,中低层急流逐渐减弱,地面倒槽西移减弱消失,此次全区性的强降水过程趋于结束。

2 物理量场诊断分析

此次过程降水强度最大范围最广地集中在 3 和 4 日两天,故以下主要对这段时间进行综合诊断分析。

2.1 动力结构与水汽条件

图 2 是 7 月 2 日 20 时沿 110°E 的涡度和散度经向垂直剖面,图 2a 中,23°~27°N 的桂北在 450 hPa 以下的对流层中下层为一致的正涡度区,最大正涡度层位于 700 hPa,涡度中心强度达  $5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。700 hPa 以上正涡度区向北倾斜,在 29°N,600 hPa 出现强度达  $6 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  的强涡度中

心,而对流层上层为一致的负涡度区,最大负涡度层位于 150 hPa,负涡度中心强度为  $-14 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。同时刻的散度垂直剖面图上(图 2b),在 24°~26°N,从地面开始负散度区一直向北倾斜到 400 hPa,之上为正散度区。由准地转理论中的涡度方程<sup>[7]</sup>可知,低(高)层负(正)散度中空气向中心辐合(外辐散),在地转偏向力作用下,产生正(负)涡度,并由连续方程可知必产生上升运动(即次级环流),同时在低(高)层的正(负)涡度区,科氏力由涡旋中心指向外(由外指向中心),必须有向心(向外)的气压梯度力与其平衡,导致气旋中心气压降低(升高),从而负(正)散度得到加强,暴雨中心存在的这种明显的正负涡度柱、负正散度柱的耦合形势有利于低层辐合、高层辐散和垂直运动的发展,从而形成强烈的抽吸作用,对大暴雨的维持和发展起到了重要的作用。

分析水汽通量及水汽通量散度(图略),广西上空水汽来源于南海,在广西中部有一个水汽通量的大值中心,中心值为  $16 \text{ g} \cdot (\text{cm} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})^{-1}$ ,桂东北有个水汽辐合中心。如此充沛的水汽输送和强烈的水汽辐合都给强降水及其维持带来了极其有利的水汽条件。2 日 20 时开始,桂北大面积的强降水开始,暴雨中心与强上升中心和水汽辐合中心有着很

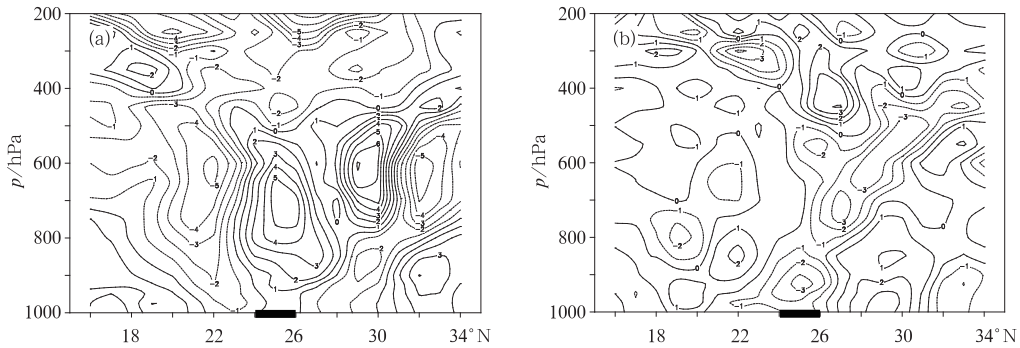


图 2 2009 年 7 月 2 日 20 时沿 110°E 的经向剖面图  
(a)涡度, (b)散度  
(粗线处为暴雨区所在,单位: $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ )  
Fig. 2 The meridional cross sections along 110°E of vorticity (a) and divergence (b) at 20:00 BT 2 July 2009  
(Thick line represents the rainstorm zone, unit:  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ )

好的对应关系。

2.2 不稳定条件

分别对比湿和温度场做沿 110°E 的经向垂直剖面图(图略),发现 2 日 20 时,温度场在 28°N, 800 hPa 附近有个温度槽,它表明冷空气的侵入,对比湿场的分析表明 30°N 以北 800 hPa 以上有干空

气侵入,28°N 以南 850 hPa 以下为高湿区。由于假相当位温可以综合反映大气温度、湿度和气压等特征,对假相当位温进行同样的剖面分析,在 2 日 20 时(图 3a),其形势与比湿相似,在 18°~26°N 800 hPa 以下  $\theta_{se}$  高值区自地面向上伸展,400~700 hPa 之间是副高(此处指 584 dagpm)控制的干热区域,在 26°N 以北 650 hPa 附近有小于 335 K 的

舌状低值区从北向南同时从高层向低层伸展,与广西南部低层的高值区相接,在  $27^{\circ}\text{N}$  附近形成倾斜的  $\theta_{\text{se}}$  密集区,与地面的锋面对应。广西上空 500 hPa 以下  $\frac{\partial \theta_{\text{se}}}{\partial p} > 0$ ,为对流性不稳定层结,500 hPa 以上  $\frac{\partial \theta_{\text{se}}}{\partial p} < 0$ ,为对流性稳定区,同时刻广西大部地区的  $K$  指数都大于  $36^{\circ}\text{C}$ ,最大时有  $41.7^{\circ}\text{C}$ ,表明广西北部上空大部为上干冷、下暖湿,大气具备了较高的潜能,结合上小节动力分析,广西北部上空既有天气尺度的辐合上升运动,又有低层对流不稳定能量释放产生的小尺度上升运动,在它们的共同作用下,广西北部发生了强烈的对流运动,产生了暴雨。到了 3 日 08 时(图 3b),副高向南撤了两个纬度,低层的  $\theta_{\text{se}}$  高值区减弱,舌状低值区则向南向下继续伸

展,335 K 线向下移了 50 hPa,  $\theta_{\text{se}}$  密集区变得更密集,并向南推进了 0.5 个纬距,上升气流比 2 日 20 时的更强,表明北方的干冷空气已经向南部暖湿层侵入,上下层冷暖空气在广西北部相持交汇,干冷空气下沉后卷入上升气流中,暖湿空气被抬升后凝结释放潜热,释放的潜热能又进一步加强上升运动,从而对流加深,使强降水得以维持,雨团均处于锋前暖区的相对最暖区。在  $25^{\circ}\sim 27^{\circ}\text{N}$  有一支气流的强上升中心,由于副高(此处指 584 dagpm)与北边的大陆高压相对峙,这支强上升气流得以维持,这也是此次暴雨持续时间长的主要原因之一。随着 500 hPa 切变带动低层冷空气缓慢南压,副高逐渐南退,此上升气流随之略有南移,强降水位置与其相对应。另外图 3 中可见在雨团的北侧有弱的下沉补偿气流,它的存在使得这支强上升气流得以长时间维持。

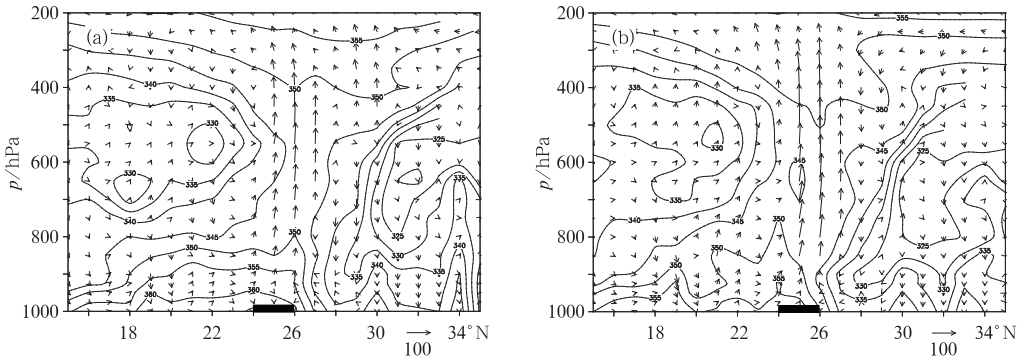


图 3 2009 年 7 月 2 日 20 时(a)和 7 月 3 日 08 时(b)沿  $110^{\circ}\text{E}$  的  $\theta_{\text{se}}$  经向剖面与垂直环流叠加  
(粗线处为暴雨区所在;  $\theta_{\text{se}}:\text{K}, w:10^{-2} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

Fig. 3 The meridional cross sections of  $\theta_{\text{se}}$  along  $110^{\circ}\text{E}$  and vertical velocity at 20:00 BT 2 July (a) and at 08:00 BT 3 July 2009 (b)  
(Thick line represents the rainstorm zone;  $\theta_{\text{se}}:\text{K}, w:10^{-2} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

2.3 T-logp 分析

分析降水发生前 7 月 2 日 08 时河池的探空曲线(图 4),整层都接近饱和,高空风向随高度顺转,为暖平流,深层(0~6 km)垂直风切变为  $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,较小的风切变有利于产生强降水。 $K$  指数为 39,说明大气存在对流不稳定,对流抑制能量为  $88.5 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,有利于能量的累积,对流有效位能(CAPE)为  $1719 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,而中等强度的 CAPE(如  $1500\sim 2000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ )比极端的 CAPE 更有利于高降水效率的形成。抬升凝结高度为 959 m,  $0^{\circ}\text{C}$  层高度为 5362 m,而抬升凝结高度到融化层高度(大致为  $0^{\circ}\text{C}$  层的高度)之间的厚度可以作为暖云层厚度的估计<sup>[8]</sup>,故暖云层厚度大概为 4403 m,由于降水系统中暖云层越厚越有利于高降水效率的产生,四千多

米的暖云层很可能产生较高的降水效率。以上分析

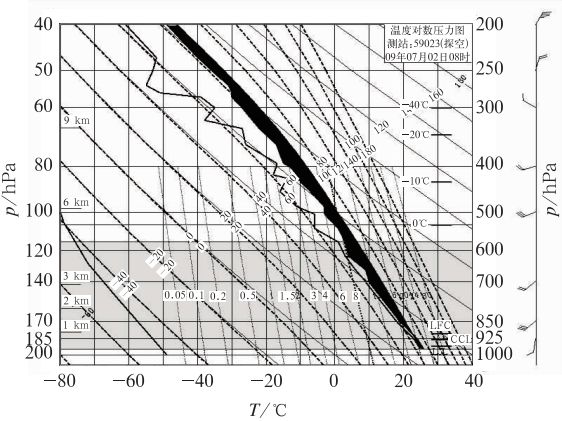


图 4 2009 年 7 月 2 日 08 时河池站探空图  
Fig. 4 Sounding chart at Hechi at 08:00 BT 2 July 2009

都表明河池上空的大气拥有较高的降水效率。而此时实况已开始出现降水,为局地性的强降水。2 日 20 时,探空情况基本不变,对流抑制能量增加为  $159 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,  $K$  指数增为 40,沙氏指数由  $-0.71$  增为  $-3.47$ ,说明对流不稳定增大,能量进一步的累积,700~850 hPa 之间有很弱的风向逆转,表明有弱冷空气侵入,桂北的强降水范围和强度都进一步增大。3 日 08 时,在经过 12 小时的强降水后,河池站探空仍维持暖平流,CAPE 减小到  $1633.9 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,对流抑制能量消失。到了 3 日 20 时,500 hPa 以下均为偏北风,850 hPa 以下风向逆转,冷空气南下渗透,河池附近的强降水基本结束。

3 中尺度对流触发的条件

中尺度系统的发生发展不仅需要高温、高湿和层结不稳定等这些有利的环境条件<sup>[9]</sup>,同时还需要一定的触发条件,包括锋面抬升、低空急流抬升、地形抬升和热力抬升等。2 日 20 时广西处于地面暖区中,850 hPa 西南风较小,而泗维与卡马处于向南开口的喇叭口的顶端,对偏南气流的抬升较为有利。

但是,除地形影响外,应该有更加有利的条件触发中尺度系统的产生和强烈发展,以致于产生了强度如此大的降水。

文献[10]和[11]指出地面风场辐合线可能对中尺度系统的触发和维持起到了重要的作用,孙靖等<sup>[12]</sup>研究表明中尺度切变线触发对流,使对流单体组织化发展,而中尺度辐合可能在对流系统的连续发展过程中有更加直接的触发作用<sup>[13]</sup>。分析地面 10 m 流场看到,在 2 日 14 时(图略),广西全区处于偏南气流中,辐合线还没生成,到了 20 时(图 5a),在  $25^{\circ}\text{N}$  附近的桂林到河池一带,出现了一条由东北风和东南偏南风组成的东西向的中尺度辐合线,在辐合线附近的回波大致呈带状,但大于 45 dBz 的回波范围较小。到 3 日 02 时(图 5b),此辐合线仍在原地维持,并在河池附近形成气旋型弯曲,辐合线东侧带状回波发展强盛,强回波位于低涡偏南与偏东气流的辐合处。3 日 08 时(图 5c),低涡东移到卡马附近,辐合线少动,带状回波主体南压,位于辐合线南侧的偏南气流中,但强回波仍在涡旋中心南侧。到了 14 时(图 5d),低涡中心东南移,辐合带随之南压,桂北的强回波逐渐减弱。从上面分析可以知道,

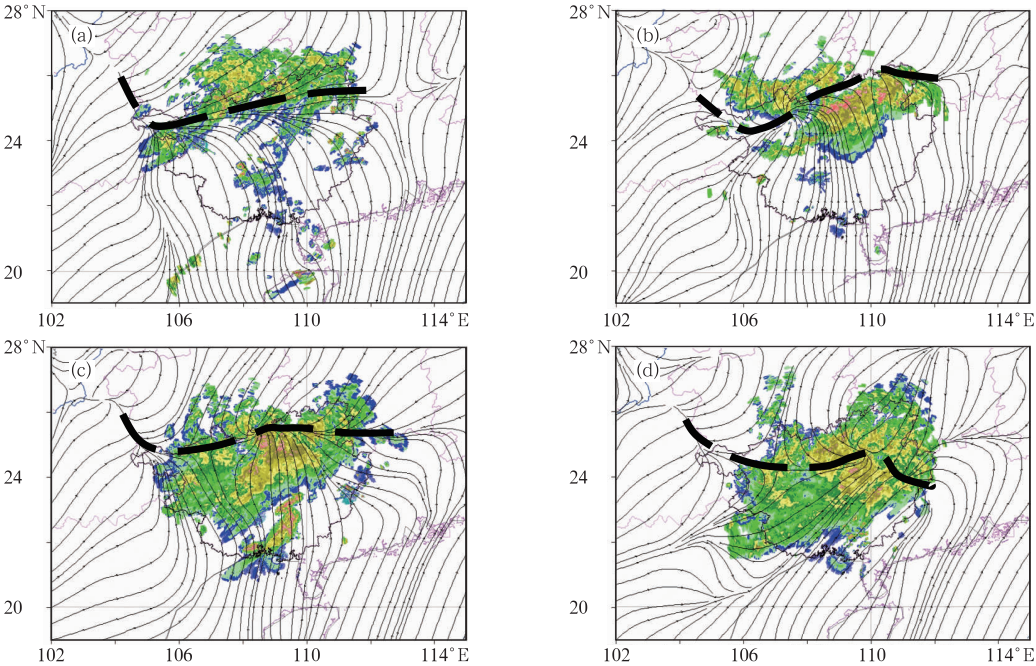


图 5 地面 10 m 流场和广西雷达组合反射率拼图  
(a)2009 年 7 月 2 日 20 时,(b)7 月 3 日 02 时,(c)7 月 3 日 08 时,(d)7 月 3 日 14 时  
(虚线为辐合线)

Fig. 5 Stream fields of the 10 m above ground and combined reflectance  
at 20:00 BT 2 July (a), 02:00 BT 3 July (b), 08:00 BT 3 July (c),  
and 14:00 BT 3 July 2009 (d)  
(Dotted line indicates the convergence line)

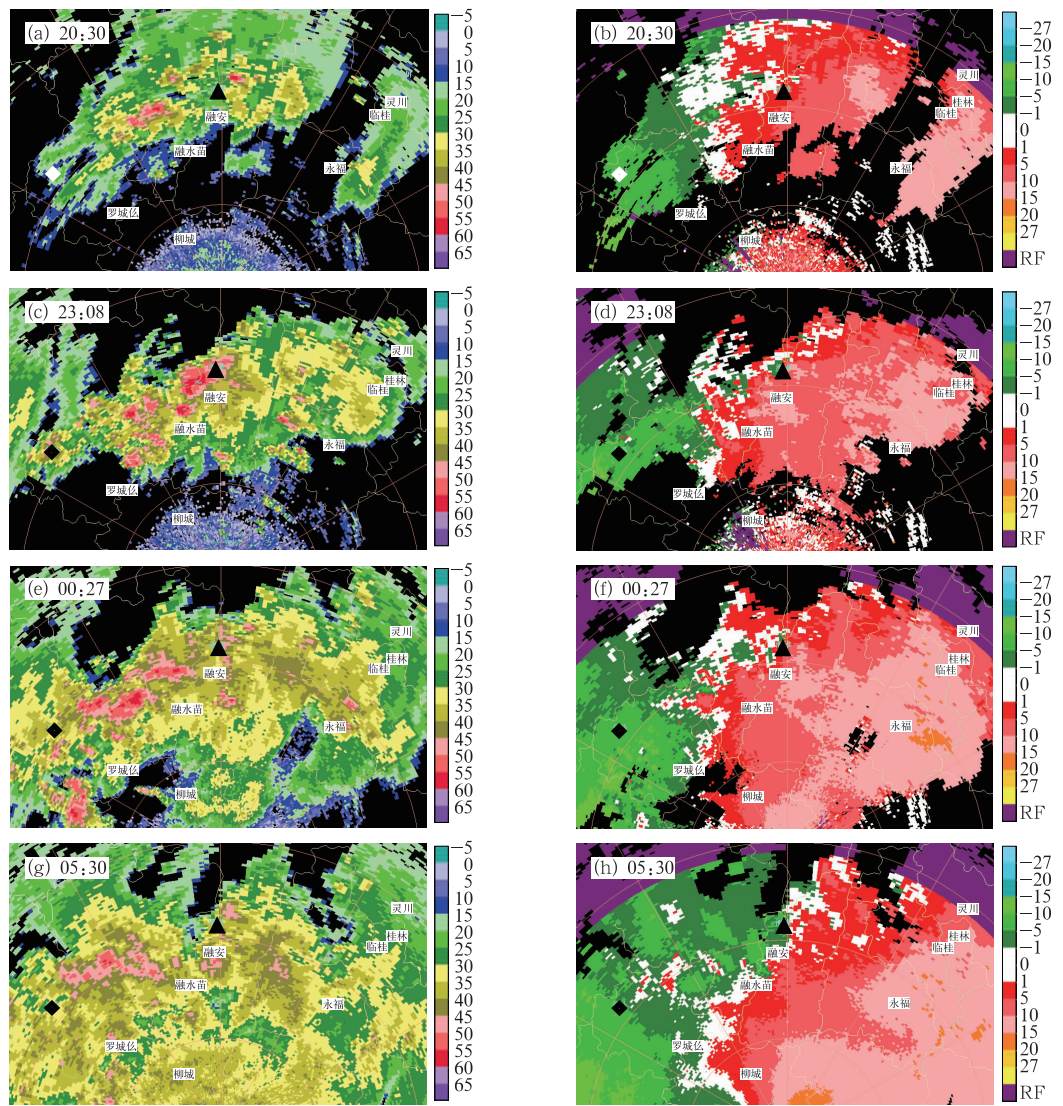


图 6 2009 年 7 月 2 日柳州雷达不同时刻  $2.4^{\circ}$  的基本反射率(a,c,e 和 g,单位: dBz)和径向速度(b,d,f 和 h,单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) (图中三角形代表泗维站, 菱形代表卡马站)

Fig. 6 Echo images at different times for base reflectivity (a,c,e,g, unit: dBz) and radial velocity (b,d,f,h, unit:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) of Liuzhou radar on  $2.4^{\circ}$  (Triangle represents the Siwei Station, diamond represents Kama Station)

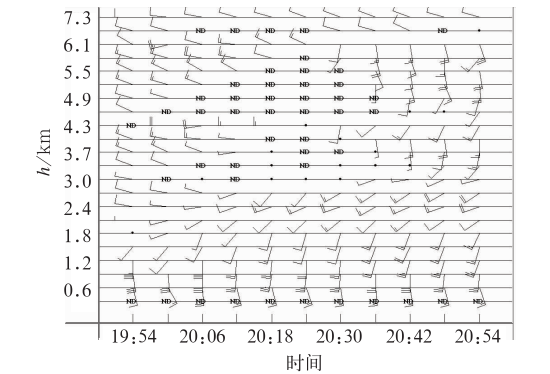


图 7 2009 年 7 月 2 日柳州雷达反演的风廓线  
Fig. 7 Wind profile image of Liuzhou on 2 July 2009

2 日 20 时辐合线形成时,回波开始发展,受到低涡辐合线触发后,局地的潜热能量得到释放,对流发展,加上桂东北强盛的水汽条件,中尺度系统在辐合线上生成、发展强回波,在引导气流的作用下向偏东方向移动,导致了位于辐合线上附近的卡马到泗维一带的雷达回波“列车效应”,因此可以说中尺度辐合线是触发此次强降水的重要中尺度系统。

#### 4 雷达资料分析

从 2 日 20 时到 3 日 08 时为降水强度最大的 12

小时,全区降水量 $\geq 200$  mm 的自动站有 4 站,降水量 $\geq 100$  mm 有 25 站,主要集中在桂北地区,降水量最大的融安泗维河站达 334.4 mm。本文选取了柳州的多普勒雷达,主要对此时段桂北的强降水回波进行分析。

4.1 基本反射率和径向速度

图 6 是柳州雷达 2.4°仰角的径向速度和基本反射率,从图中可以看出,雷达西部东北移向的回波不断地与雷达西北部东南移向的回波碰撞合并,回波整体向东南方向发展,但是在环江到融水一带的地区一直维持有一条东北—西南向的强回波带,前面的强回波单体经过该点减弱后,后面的强降水回波又发展影响该点,也就是出现了“列车效应”。7 月 2 日 20:30(图 6a 和 6b),在雷达站西北偏北 100 km 处,开始形成尺度为 20 km 左右的辐合区,在这片区域附近不断有中尺度辐合辐散和中尺度气旋与反气旋生成与消散,泗维站则处于这片区域的东端。在强度场(PPI)上,辐合区对应的区域是一块状回波,中心强度有 58 dBz。之后不断有回波从雷达的西北方东移南下,21 时逐渐在雷达站西北偏北 100 km 处逐渐形成了一条东北—西南向的辐合线并维持,与其相应位置的 PPI 回波强度则逐渐增强,在卡马与泗维之间形成一条东北—西南向的强回波带,强度基本都在 35~40 dBz 以上,中心强度达 55~60 dBz。到 23:08(图 6c 和 6d),泗维站南边是气流的辐合,东部呈气旋性旋转,其正负速度对有 14 m·s<sup>-1</sup>的差值,北部有弱的气流的辐散,西部是弱的辐散区,对应的 PPI 在泗维站西南侧有一个多单体风暴强烈发展,南部有入流缺口,中心值有 63 dBz。23:39 负速度区减弱向东北移出,同时在雷达的西南方开始不断地有回波往东北方向移动,

并与雷达北部的回波合并,3 日 00:27(图 6e 和 6f),东北移的回波已经与北部的回波接近合并,回波中心强度为 58 dBz,径向速度上表现为正负速度的强烈辐合。从 00:15 起不断的有负速度区东移经过泗维及其附近区域,相应的 PPI 上一直处于强回波中心,辐合线上辐合最强烈的地方即是回波发展最旺盛处。03:30 后,随着东移南下回波增多,辐合线由原来的东北—西南向逐渐转竖,辐合逐渐减弱,带状的强回波也逐渐减弱南压,50~60 dBz 的强回波范围相应地减小。05:00 后已经转竖的辐合带又逐渐转为东北—西南向,05:30 时(图 6g 和 6h),在雷达西北方 100 km 处 PPI 上的大于 45 dBz 的强回波中心在速度图中表现为辐合辐散的共轭体。回波整体(图略)为西南风,零速度线穿过雷达测站,呈“S”型,表明低层有暖平流,而回波呈“牛眼”形态,风速随高度增加,在 1.5~3 km 之间出现极大值为 15~20 m·s<sup>-1</sup>,且一直维持,表明有西南低空急流的存在,负速度范围比正速度区大,表明有风向的辐合,大于 15 m·s<sup>-1</sup>的负速度风速中心比正速度的大,表明有风速的辐合,强降水继续维持,但局地性的强降水减少。随着北方回波南压和西南方回波的合并,15 时后,风速逐渐减弱,低空西南急流消失,并转为偏南风,暖平流与风速风向辐合的特征消失。同时辐合线北侧偏北风减弱而逐渐消失,相应的回波范围减小,降水强度也随之减弱。

4.2 风廓线

低空急流和地面以上至 5 km 以下的风速垂直切变对风暴的影响很大。但由于相邻两次探空资料相隔时间较长,难以捕捉到中小尺度对流系统发生前后的风速大小和风速垂直切变情况,多普勒天气雷达 6 min 一次的 VAD 产品,弥补了探空资料的不足。

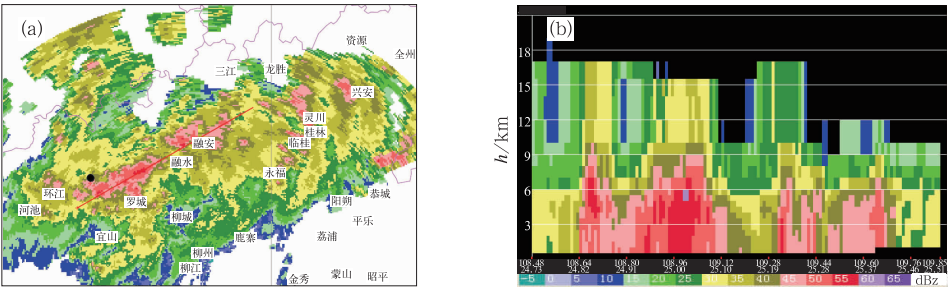


图 8 2009 年 7 月 3 日 01:18 的 3 km 高度 CAPPI(a,单位: dBz)及沿强回波的垂直剖面(b)  
(圆点为卡马水库)  
Fig. 8 The 3 km CAPPI at 01:18 BT 3 July 2009 (a, unit: dBz) and the vertical profile along the strong echo line (b)  
(Circle mdicates the Kama Reserrioir)

柳州站上空 1.2 km 处从 19:29 起出现  $\geq 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的低空偏南风急流,中高层为西北风,9.1 km 以上为偏北风,风向随高度顺转,为暖平流。20:30 后 3.4~6.7 km 转为偏南风,风随高度逆转(见图 7),中高层转为冷平流,低层维持暖平流,这

种不稳定的形势为之后的强降水提供了很好的动力条件。21:07 冷平流下降了 0.3 km,21:43 后逐渐消失,22:50 之后 3.7~6.7 km 转为偏西风,风速逐渐加大到  $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,并且范围向上方扩展,00:03 后 1.8~7.9 km 为一致的西南风,7.9 km 以上为西

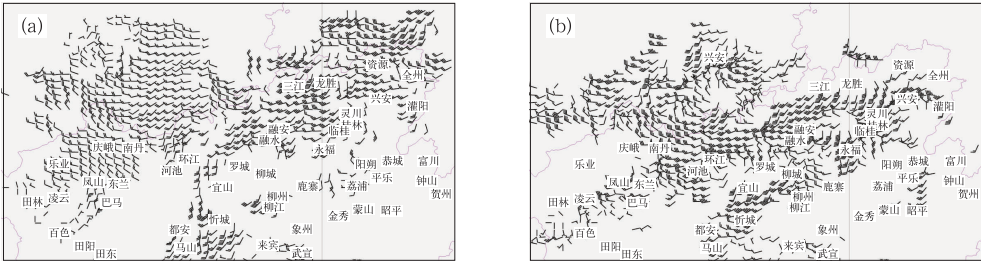


图 9 2009 年 7 月 2 日 21:42(a)与 7 月 3 日 00:00(b)的 Cotrec 风场 (单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

Fig. 9 Cotrec wind fields at 21:42 BT 2 July (a), and at 00:00 BT 3 July 2009 (b) (unit:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

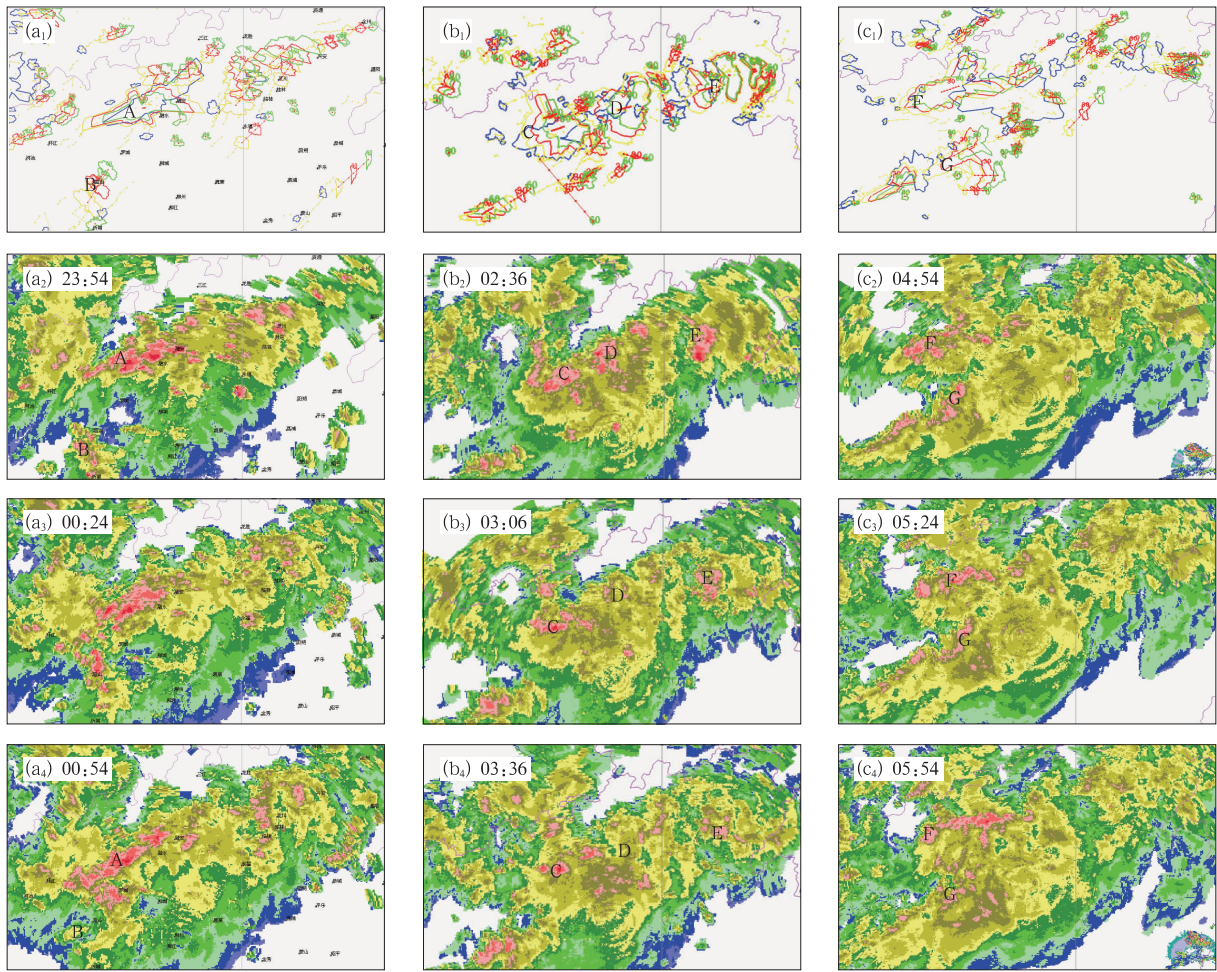


图 10 2009 年 7 月 2 日 23:54(a),3 日 02:36(b)和 3 日 04:54(c)的 TITAN 风暴追踪与其相对应时次及半小时和 1 小时后的组合反射率

Fig. 10 TITAN techniques at 23:54 BT 2 July (a), 00:24 BT 3 July (b), 00:54 BT 3 July 2009 (c), and corresponding combined reflectance at the same time, after half an hour and after an hour

北风,1.8 km 以下为 $\geq 12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的西南偏南风,低层偏西南风急流逐渐加大,到 05:31 后可达到 $18\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,如此强劲的西南急流为降水的持续提供了充分的水汽条件,且稳定的急流对强烈上升运动的维持起到关键作用<sup>[14]</sup>。

4.3 SWAN 系统资料的应用

4.3.1 三维拼图

三维拼图是从单站雷达原始数据中提取反射率因子进行坐标转换后生成按等经纬度间距、高度的反射率数据,在此基础上对多个雷达站的反射率数据进行拼图处理生成的拼图,通过它可以做反射率剖面。7 月 3 日 01:18 3 km 高度 CAPPI(图 8a)可看到在层状云回波中镶嵌了多个积云对流单体,每个单体移过卡马水库都会带来一次强降水,通过强回波中心做垂直剖面(图 8b),45 dBz 以上的强回波位于 8 km 以下,质心较低,判断其属于热带降水型<sup>[8]</sup>,低层最强回波在 45~60 dBz 之间,根据热带降水型的 Z-R 关系: $Z=230R^{1.25}$ ,估计其雨强在 $100\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 左右。

4.3.2 Cotrec 风场分析

Cotrec 风场是对给定时间步长的相邻时刻雷达反射率因子资料,利用交叉相关计算方法得到的雷达反射率因子从前一时刻到后一时刻的移动方向和速度,是雷达回波移动的视风场,风场的默认高度是 3 km。从 7 月 2 日 21:42 的 Cotrec 风场图上(图 9a)可看到,在融安北部为西北风,回波向东南方向移动,在融安南部为西南风,回波向东北方向移动,到了 3 日 00:00(图 9b),东南向的回波已经移至罗城南部,融安南部的东北移向的回波移动速度增大,最大可达 $16\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,说明弱冷空气渗透南下,低层西南急流有所加强,强降水在冷暖空气碰撞处发生。对比相应的组合反射率,两个时次的回波强度相当,但是后一时次的回波面积特别是强回波的面积都要比前一时次有所增加。

4.3.3 风暴追踪

风暴追踪给出了风暴质心的具体位置 and 不同反射率因子阈值识别出的风暴核区的面积,还提供风暴单体过去 1 小时内的历史轨迹和未来 1 小时的预报位置。这里选取了 3 个时次的 TITAN 与实况进

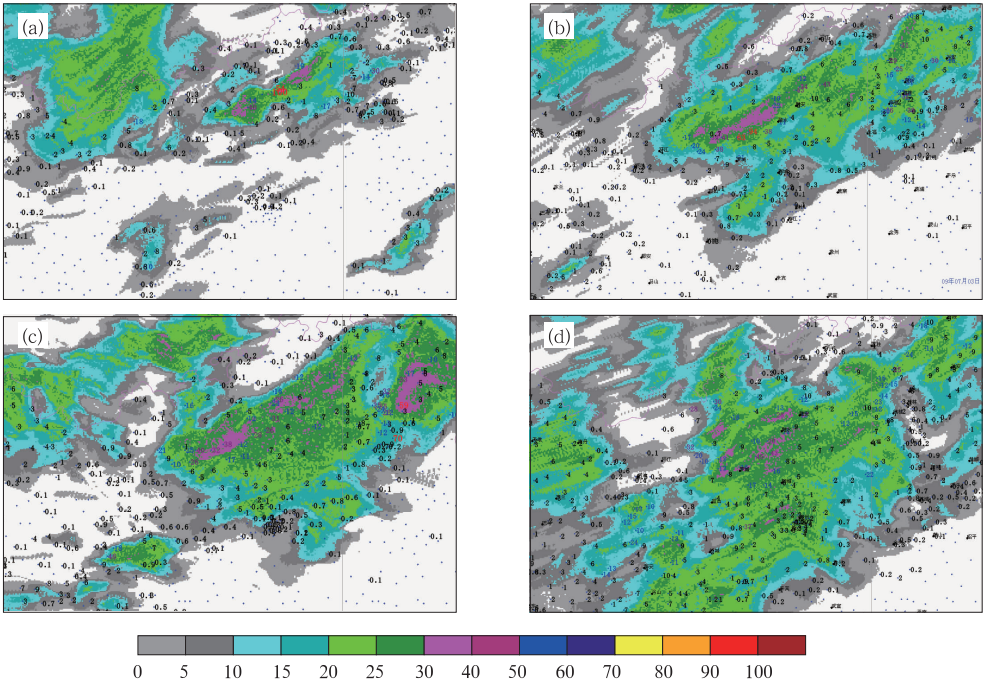


图 11 2009 年 7 月 2 日 22:12(a),3 日 01:00(b),3 日 02:24(c)和 3 日 07:00(d)的 1 小时降水预报与相应的自动站 1 小时雨量叠加(单位: mm)  
Fig. 11 Superposition of 1 hour precipitation forecast at 22:12 BT 2 July (a), 01:00 BT 3 July (b), 02:24 BT 3 July (c), 07:00 BT 3 July 2009 (d) and 1 hour rainfall observed by AWS after an hour (unit: mm)

行对比分析。从7月2日23:54的TITAN图上(图10a)看到,对于融安到罗城北部的风暴(图10a中A处)未来1小时预测是位置基本不移动,强度略减弱,忻城北部的风暴(图10a中B处)向东北方移动,强度略减弱。对比未来半小时和1小时的组合反射率可看到,风暴A有少许的南压,强度略为减弱,风暴B向东北方移动,速度比预测的稍快。3日02:36(图10b),TITAN预测C、D和E三个风暴都是向东北方向移动少许,强度略减弱,从实况可看到未来1小时内,这三个风位置基本不变,在半小时内强度明显减弱,减弱的程度比预报的要偏大。3日04:54(图10c)的TITAN预报风暴F略向东北偏东方向移动,强度基本不变,风暴G向东北方移动,强度减弱,与实况里的两个风暴的变化基本一致。由此可见TITAN预报与实况演变基本相一致,具有一定的风暴预测能力与参考价值。

#### 4.3.4 1小时降水预报

1小时雷达定量降水预报是根据雷达反射率因子 $Z$ 和降水强度 $I$ 的 $Z-I$ 关系,通过雷达扫描的降水回波强度计算雨强,再经过误差校正得到的。图11是不同时次的1小时降水预报同实况1小时降水量的对比,7月2日22:12(图11a)的1小时降水预报,在融安和融水分别有两个35~40 mm的强降水中心,实况在这两个地方都出了强降水,但是北部的强降水位置略偏南,且量级偏大。3日01:00(图11b)预报在融水到罗城北部有35~40 mm,而实况自动站降水在3日01—02时的1小时降水范围和强度与其基本相近,只有在融水西部50 mm以上的强降水没有报出来,大于25 mm的降水预报的范围偏小。3日02:24(图11c)的预报与实况对比也大致相一致,但是在预报桂林的大于30 mm强降水位置比实况偏东。07:00—08:00 1小时(图11d)的实况降水强度有所减小,预报与实况基本一致。总体来说降水预报能力还是不错的,位置和范围与实况基本相近,但是它只对40 mm以下的降水预报准确率较高,大于40 mm的强降水基本报不出来。

## 5 小 结

(1) 这次过程从形势上属于北脊南涡类型,具有强度大、范围广、持续时间较长的特点。500 hPa高压脊稳定在河套地区,使得脊后的西路冷空气能

持续南下,而由于冷空气很弱,只能以渗透的方式影响广西,使得地面的西南暖低压得以长时间的维持,直到副高加强西进,中低层急流逐渐减弱,切变线北退,此次过程才基本结束。

(2) 地面中尺度辐合线是触发中尺度对流的主要因子,它导致了桂北“列车效应”的产生。

(3) 柳州的多普勒雷达基本反射率显示在7月2日20时到3日08时“列车效应”使得河池东部和柳州北部出现了特大暴雨,在速度图上强降水区与强辐合区相互对应。

(4) SWAN的三维拼图能做反射率剖面判断回波质心的高低并估计雨强;Cotrec风场对回波的移动有很好的指示作用;TITAN在预报强回波的移动和强度上有着一定的预报能力;1小时雨量预报与实况雨量大致相近。SWAN系统对短时预报有着很大的应用价值,但还需要更多的个例对其检验。

## 参考文献

- [1] 倪允琪,周秀骥,张人禾,等. 我国南方暴雨的试验与研究[J]. 应用气象学报,2006,17(6):690-704.
- [2] 杨红梅,何平,徐宝祥. 用GPS资料分析华南暴雨的水汽特征[J]. 气象,2002,28(5):17-21.
- [3] 胡亮,何金海,高守亭. 华南持续性暴雨的大尺度降水条件分析[J]. 南京气象学院学报,2007,30(3):345-351.
- [4] 赵玉春,李泽椿,肖子牛. 南半球冷空气爆发对华南连续性暴雨影响的个例分析[J]. 气象,2007,33(3):40-47.
- [5] 刘国忠,丁治英,贾显锋,等. 影响华南地区西南低涡及致洪低涡活动的统计研究[J]. 气象,2007,33(1):45-50.
- [6] 闫敬华,薛纪善. “5.24”华南中尺度暴雨系统结构的数值模拟分析[J]. 热带气象学报,2002,18(4):302-308.
- [7] 朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等. 天气学原理与方法[M]. 北京:气象出版社,2000:35-59.
- [8] 俞小鼎. 强对流天气临近预报[M]. 北京:中国气象局培训中心,2010:81-85.
- [9] 尹洁,郑婧,张瑛,等. 一次梅雨锋特大暴雨过程分析及数值模拟[J]. 气象,2011,37(7):827-837.
- [10] 夏茹娣,赵思雄. 2005年6月广东锋前暖区暴雨 $\beta$ 中尺度系统特征的诊断与模拟研究[J]. 大气科学,2008,33(3):468-488.
- [11] 杨春,湛芸,方之芳,等. “07.6”广西柳州极端暴雨过程的多尺度特征分析[J]. 气象,2009,35(6):54-62.
- [12] 孙靖,王建捷. 北京地区一次引发强降水的中尺度对流系统的组织发展特征及成因探讨[J]. 气象,2010,36(12):19-27.
- [13] 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.
- [14] 张家国,岳阳,牛淑贞,等. 一次长历时特大暴雨多普勒雷达中尺度分析[J]. 气象,2010,36(4):21-26.