

张家国,王珏,黄治勇,等. 几类区域性暴雨雷达回波模型[J]. 气象,2011,37(3):285-290.

几类区域性暴雨雷达回波模型^{*}

张家国 王 珏 黄治勇 周金莲 王仁乔

武汉中心气象台, 武汉 430074

提 要: 以 2007—2008 年湖北省暴雨过程为研究对象,按区域性暴雨过程的定义,通过分析地面雨量资料筛选出 32 次区域性暴雨过程。在对比分析多普勒天气雷达反射率因子回波形态、结构、暴雨落区以及主要影响天气系统的基础上,概括了湖北省区域性暴雨雷达回波模型。结果表明:典型区域性暴雨雷达回波形态有逗点状暴雨回波、涡旋状暴雨回波、涡带结合型暴雨回波和带状暴雨回波等 4 类,它们分别与锋面上中尺度气旋波扰动、川东低涡系统的发展、低涡发展与梅雨锋结合和气旋波上准静止锋面切变线的形成等紧密相关。

关键词: 区域性暴雨, 雷达回波形态, 中尺度天气系统

Several Kinds of Regional Rainstorm Radar Echo Models

ZHANG Jianguo WANG Jue HUANG Zhiyong ZHOU Jinlian WANG Renqiao

Wuhan Central Meteorological Observatory, Wuhan 430074

Abstract: Rainstorm processes in Hubei Province from years 2007 to 2008 are selected to study the characteristics of the radar echoes. First, thirty-two regional rainstorm processes are determined according to the rainfall data analysis. Then, by analyzing the Doppler radar reflectivity echo shapes, structures and so on, the four kinds of regional rainstorm radar echo models in Hubei Province are induced. Moreover, the rainstorm region and the major impact system's synoptic characteristics of each kind of rainstorm echo are comparatively analyzed. The results show that, the four kinds of regional rainstorm radar echo models are the comma-shaped, the whirl-shaped, the complex vortex-belt shaped and the band-shaped, and they are closely related to the meso- α -scale cyclone wave disturbance on the front surface, the development of the low vortex systems in eastern Sichuan Province, the combination of the Meiyu-front and the low vortex system, and the formation of quasi-stationary front shear line on the cyclone waves, etc.

Key words: regional rainstorm, radar echo shapes, mesoscale system

引 言

强天气短临预报方法一般有外推预报法、中尺度数值预报法和概念模型等三类方法^[1]。外推预报法由于假定系统稳定,预报时效较短,准确率也不是很高。中尺度数值预报方法在我国处于发展阶段,未来对提升短临预报的时效和精度具有重要的意义。概念模型法是日常短临预报业务采用的方法,如产生强对流天气的弓状回波、钩状回波和飑线回

波概念模型,产生暴雨天气的涡旋回波、带状回波概念模型等。这些概念模型主要基于雷达回波的形态、结构特征,长期以来为预报员采用。

20 世纪 80 年代以来,有关暴雨的雷达回波形态、结构特征的研究较多。杜秉玉等^[2]用常规数字天气雷达研究了湘中强对流天气和梅雨锋的雷达回波特征,结果表明:产生暴雨的中尺度对流回波系统主要有中尺度对流回波带、雷暴群(弥合型回波)和多条回波带等。项经魁、徐双柱等^[3-4]从回波形态、运动等方面做了分析研究,总结了暴雨回波的一些

* 武汉区域气象中心科技发展基金项目“灾害性暴雨多普勒雷达观测研究”(QY-Z-200904)和中国气象局“中尺度分析业务示范”业务建设项目共同资助

2010 年 2 月 10 日收稿; 2010 年 6 月 13 日收修定稿

第一作者:张家国,主要从事雷达探测分析研究工作. Email:wuhanzhangjianguo@sohu.com

形态和运动特征。胡伯威等^[5]曾利用武汉 WSR-81S 数字化雷达资料分析了湖北省暴雨回波特征和演变规律,并认为暴雨的雷达回波结构形态与它的次天气尺度系统背景密切相关。也有较多关于暴雨雷达回波形态、结构案例研究^[6-16]。上述研究多基于单部雷达观测资料,受观测范围限制,对形态结构特征的认识还不全面。近年来,随着我国新一代多普勒天气雷达以及雷达网在业务中的应用,对暴雨回波诸多形态特征又有许多新的认识,很有必要进行系统性的分析和总结。

同气象卫星云图类似,从多普勒天气雷达观测的反射率因子中可以获得 α 、 β 、 γ 等各种中尺度天气系统演变的信息。湖北省夏季多低涡、梅雨锋切变线暴雨天气过程,这些暴雨过程次天气尺度系统的强迫作用明显,暴雨过程具有区域性、长历时和降水强度大等特点。因此,总结湖北省 α 中尺度的雷达反射率因子形态、结构特征和演变规律对暴雨短时预报具有重要意义,这不仅有助于了解与之相联系的次天气尺度系统的发生发展的趋势,也有利于从日常天气图、数值预报结果方面分析回波系统演变的机理,克服简单外推法的缺陷。以区域性暴雨为研究对象,利用武汉长江中游短时天气预报业务系统的雷达网组合反射率因子拼图资料、湖北省气象站降水资料结合常规天气图资料,在综合分析基础上,对回波形态、结构特征及其影响系统进行了系统性总结,概括了湖北省几类区域性暴雨雷达回波模型。

1 区域性暴雨过程定义

区域性暴雨定义为:在湖北省 5 个气候分区中(鄂西北、鄂西南、江汉平原、鄂东北、鄂东南),按 08—08 时雨量,若某一分区内连续 3 小时累计雨量大于 50 mm 的站在 3 个以上就定义为一次区域性暴雨过程。选取 2007—2008 年 42 次湖北省暴雨过程作为研究对象,通过对湖北省气象站雨量资料分析,确定了满足条件的 32 个暴雨过程(表略),约占暴雨过程总数 76%。这些过程具有降水强度较大、持续时间较长、范围较大的特点,这里称之为区域对流性暴雨过程。剩下的基本上是以层状云降水为主和局地对流性降水的暴雨过程。

2 4 类区域性暴雨雷达回波

利用雷达反射率因子拼图、常规天气图和气象站雨量等资料,分析了每个暴雨过程的雷达回波形

态、结构特征、暴雨落区和主要影响系统,通过对比、归纳的办法,总结了 4 类湖北省区域性暴雨雷达回波模型:逗点状、涡旋状、涡带结合型和带状回波,模型包括回波形态、结构、移动、强度等特征和暴雨落区及主要影响天气系统等方面(图 1)。统计还表明,在 32 个暴雨个例中,逗点状、涡旋状、涡带结合型和带状回波分别有 7、9、5 和 5 例,占 81.3%;无明显特征 6 例,占 18.7%。

2.1 逗点状暴雨回波

逗点状暴雨回波由逗点头部的涡旋回波和逗点尾侧的带状回波两部分构成。其中,涡旋回波部分由多条气旋性对流回波带形成,或者由具有气旋性涡旋纹理结构的混合性降水回波形成;带状回波是从涡旋回波中心附近向西南侧延伸对流性带状回波(有时在回波带上还镶嵌着多个更小尺度的涡旋簇)。另外,在涡旋回波后部有明显的冷空气侵入特征。该类回波的水平尺度约 400 km,时间尺度约 10 小时。

分析发现,7 次逗点状暴雨回波有 6 次与锋面(冷锋或梅雨锋)上的 α 中尺度气旋波发展有关。因此,产生逗点状暴雨回波的典型天气系统为 α 中尺度气旋波类(参见图 1a)。而涡旋回波、长带状对流回波分别与气旋波的暖锋和冷锋相对应。

逗点状暴雨回波结构演变有明显的三个阶段:与锋面触发对应的带状对流回波发展阶段,与锋面上气旋波发展对应的逗点状回波阶段,锋后冷空气侵入气旋波内并切断暖湿空气输送后的消亡阶段。

逗点状暴雨回波一般随锋面向偏南或偏东方向移动,平均回波强度在 40 dBz 以上,移动速度慢,有利于暴雨的产生,强降水中心多出现在逗点涡旋附近。春季因冷锋对流回波带移动较快,多带来短时强降水和雷雨大风天气;在梅雨期,当冷锋南下遇副热带高压阻挡时,冷锋对流回波带会演变为带状暴雨回波,见 2.4 节。

以 2008 年 5 月 3 日的武汉附近大暴雨过程来说明逗点状暴雨回波各个阶段主要特征。5 月 3 日 17:30,在鄂西南、江汉平原一带,雷达观测到有一条长度约 350 km 的强对流回波带(A~B),它位于低层冷式切变线附近;同时,B 处有波动出现,但涡旋结构特征还不明显(图 2a)。随着回波带东移,B 处波动的不断加强,到 20:30,B 处波动在汉口附近已发展为由几条对流回波带和层状云混合性降水回波形成的气旋性涡旋回波,连同原有的对流回波带一起构成逗点状回波形态(图 2b)。由图 1a 看出,其形

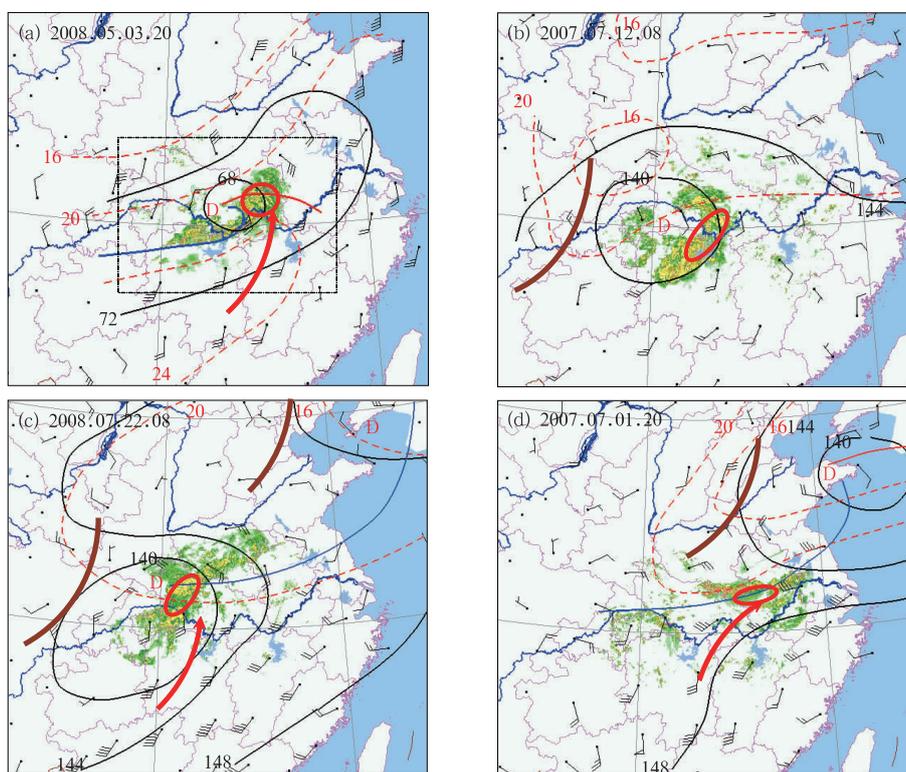


图 1 雷达反射率因子与天气图(925 或 850 hPa)的叠加
(a)逗点状暴雨回波,(b)涡旋状暴雨回波,(c)涡带型暴雨回波,(d)带状暴雨回波
蓝色线:冷锋切变线;红色线:暖锋切变线;红色箭头:最大风速轴线;
棕色线:500 hPa 槽线,红色圈:暴雨落区,长方形框:雷达拼图范围

Fig. 1 The overlaying charts of the radar reflectivity and synoptic chart (925 or 850 hPa) for (a) the comma-shaped rainstorm echo, (b) the whirl-shaped rainstorm echo, (c) the complex vortex-belt shaped rainstorm echo, and (d) the band-shaped rainstorm echo
The blue line is the cold front shear and the red line is the warm front shear. The red arrow shows the maximum wind speed axis and the brown line shows the trough at 500 hPa. The red circle is the rainstorm area and the rectangular frame shows the range of radar mosaic

成是由锋面上的一个 α 中尺度气旋波发展产生的,涡旋回波位于气旋波中心附近,对流回波带位于冷锋附近。另外,由冷空气侵入到气旋波中心时形成的弱回波特征十分明显,说明逗点状回波已经发展到成熟阶段(图 2b)。此时,在涡旋回波附近开始出现持续性强降水,在带状回波附近有雷雨大风和局部的强降水发生。23:00 以后,弱回波范围变大,甚至出现了一片晴空区,这是冷空气不断卷入到气旋波中心结果;同时,涡旋回波强度减弱,并与带状对流回波部分断开,逗点状暴雨回波开始进入衰亡(图 2c)。冷空气不断卷入,导致南部暖湿空气输送被切断,气旋波扰动减弱,是逗点状暴雨回波消亡的原因。

2.2 涡旋状暴雨回波

涡旋状暴雨回波以往有过研究^[17]。分析表明,其结构表现为由对流单体、对流回波等组成的气旋式涡旋回波,呈对称或非对称涡旋结构,水平尺度约 400 km,时间尺度约 11 小时。有时在大的母涡旋回

波结构中包含有几个子涡旋回波。这类回波的强降水多发生在涡旋状回波的东侧、南侧和涡旋头部。一般涡旋状暴雨回波向偏东北方向移动,移动速度较慢,平均回波强度在 40 dBz 以上。

涡旋状暴雨回波结构演变有三个阶段:一是以分散性对流群或团状混合性降水回波为主要特征的发展阶段;二是以对流回波带的气旋性涡旋结构为主要特征的成熟阶段;三是以回波强度减弱、涡旋中心弱回波范围扩大、螺旋回波带消失等为主要特征的消亡阶段,消亡的原因可能是干冷空气不断侵入到低涡中心的缘故。

对 9 次涡旋状暴雨回波过程分析发现,有 8 次影响天气系统为川东低涡发展类。500 hPa 南支槽或高原槽东移,高空槽前正涡度平流是低层低涡扰动发展、东移的原因。

图 3 是 2007 年 7 月 12 日雷达网观测到涡旋状暴雨回波的演变过程。02:30,在宜昌南部和常德一带有大片分散性的对流回波产生(图 3a);之后,对流

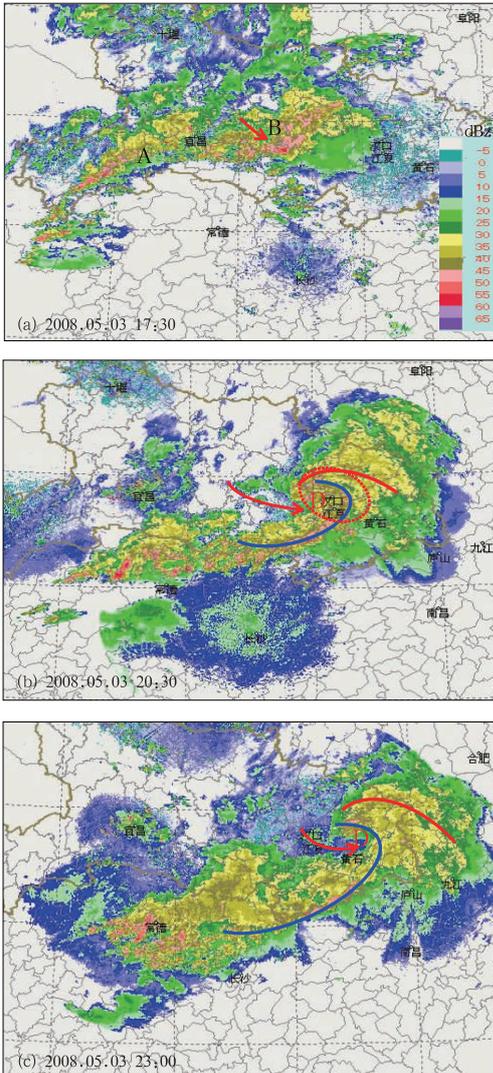


图 2 逗点状暴雨回波演变过程
 (a) 发展阶段, (b) 成熟阶段, (c) 减弱阶段
 A~B 为带状对流回波, D 为涡旋中心,
 蓝线:冷锋,红线:暖锋,红箭头:冷空气侵入,
 红色椭圆虚线:暴雨中心(下同)
 Fig. 2 The evolution of the comma-shaped
 rainstorm echo at (a) development phase, (b)
 maturity phase, and (c) weakening phase
 The A-B is the band-shaped convective echo and
 the D shows the vortex center. The blue line shows
 the cold front and the red line shows the warm
 front. The red arrow shows the cold air invading
 and the red ellipse dashed shows the rainstorm
 center (The following is the same)

回波逐渐加强,09:30,演变为尺度约 400 km 的涡旋状回波,螺旋回波带结构十分清楚(图 3b,黑色虚线示意),说明涡旋状回波发展到成熟阶段。在涡旋回波向北移动的过程中,其东南侧的多条螺旋回波带相继扫过江汉平原、鄂东北,导致该地区多站出现大暴雨、局部特大暴雨天气。分析发现,该涡旋状暴雨回波的发展与 500 hPa 南支槽东移时湘鄂交界处低层低涡系统的发展有密切关系(图 1b)。14:30,

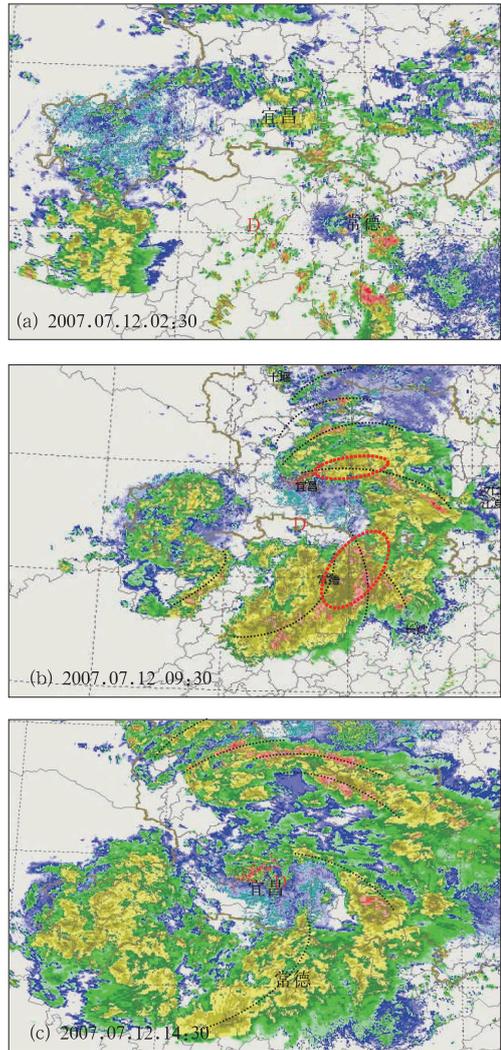


图 3 涡旋状暴雨回波的演变过程
 (a) 发展阶段, (b) 成熟阶段, (c) 减弱阶段
 黑色虚线表示螺旋回波带, D 为涡旋中心
 Fig. 3 The evolution of the whirl-shaped
 rainstorm echo at (a) development phase,
 (b) maturity phase, and (c) weakening phase
 The black dashed shows the whirl echo
 band and the D shows the vortex center.

回波强度减弱,涡旋中心弱回波范围扩大,涡旋状回波进入消亡阶段,仅在其北部螺旋回波带还比较清楚(图 3c)。需指出的是,图 3b 中涡旋回波南侧的螺旋回波带在单部雷达上多表现为“多条平行带回波”,事实上,它是涡旋回波结构的一部分。

2.3 涡带结合型暴雨回波

涡带结合型暴雨回波是涡旋状回波与准静止的带状回波相结合的一种回波结构形态。其结合有两种形式:一是在低涡发展的过程中,涡旋回波中心距离带状回波较远,但气旋性螺旋对流回波带已经和带状回波结合;另一种是涡旋回波中心沿带状回波

的移动。在结合部位因回波加强、少动产生暴雨。

涡带结合型暴雨回波带状回波部分一般移动缓慢,相对稳定,当涡旋回波沿带轴向移动时降水强度会随之加强。当涡旋回波进入前述消亡阶段时,涡带型暴雨回波开始减弱。

分析发现,5次涡带结合型暴雨回波形成的典型天气系统均属梅雨锋西段低涡发展和梅雨锋结合类,其中涡旋回波、带状回波分别与低涡、梅雨锋切变线天气系统相联系。回波形态较好地反映了次天气尺度的西南涡及其与梅雨锋切变线系统间的相互作用^[10]。

2008年7月22日湖北襄樊的特大暴雨过程属于这一类。受西南低涡和梅雨锋切变线的共同影响,22日鄂西北襄樊市区出现了超过历史降水纪录的特大暴雨,最大降水24小时达到300mm以上,其中在22日07—14时,7个小时降雨量达230mm。由图1c可清晰看出,襄樊特大暴雨与两个降水回波系统有关,一是与梅雨锋切变线相关联的从安徽延伸到鄂西北的带状回波系统,二是与鄂西南地区发展北移的低涡相关联的涡旋降水回波系统,在两个降水系统的结合处,由于锋生加强、地形影响等导致襄樊地区持续性强降水^[10]。在两个回波系统没有合并之前(22日02:30),切变线附近降水强度一直较弱,降水带较宽,以层状云降水为主,襄樊处在切变线回波西端;低涡降水回波表现为团状,主体远在鄂西南(图4a)。22日08:00低涡降水回波加强,并出现明显螺旋回波带结构,同时,切变线回波带变窄,强度加强(图4b)。随后,低涡螺旋回波带向北发展与带状切变线降水回波汇合,在汇合处不断有降水回波发展,并向北移动影响襄樊地区,导致襄樊地区7个小时的持续性强降水。14:00以后,因涡后干冷空气的侵入,涡旋回波后部弱回波范围逐渐扩大,襄樊一带降水强度减弱(图4c)。

2.4 带状暴雨回波

带状暴雨回波由对流单体回波、对流回波短带和层状云降水回波组成,带上的对流单体回波等沿带状回波的长轴方向移动,或者移动方向与长轴夹角较小,因多个对流单体经历同一地方而产生持续性强降水^[18-19]。

在5个带状暴雨回波例子中,有4例发生于气旋波冷锋段上,1例发生于低层切变线或辐合线上。所以,该类典型天气系统也属气旋波类。气旋波上的冷锋与其他天气系统的配合对准静止带状暴雨回波的形成十分重要。对湖北省而言,气旋波在华北

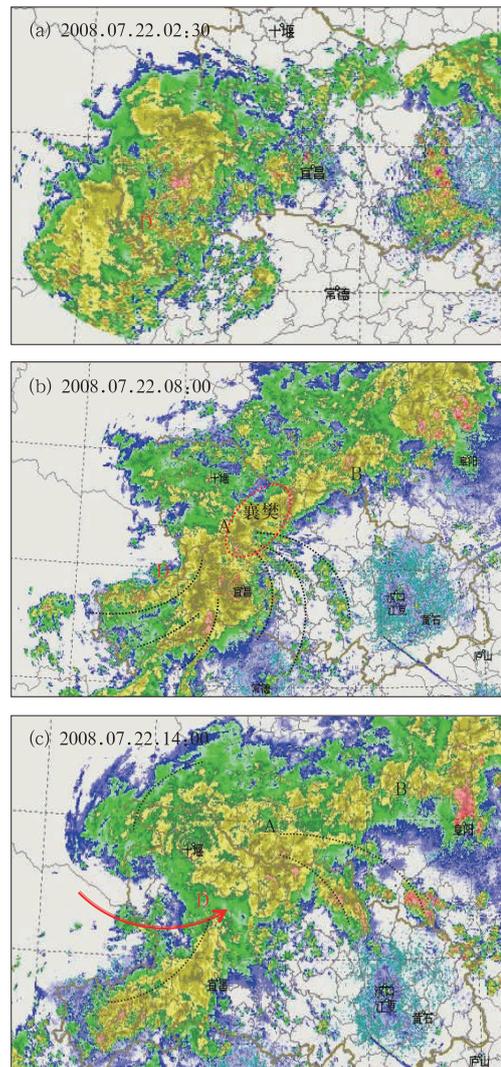


图4 涡带结合型暴雨回波的演变过程
(a) 发展阶段, (b) 成熟阶段, (c) 减弱阶段
黑色虚线示意螺旋回波带, D为涡旋回波中心,
A~B为切变线附近的带状回波

Fig. 4 The evolution of the complex vortex-belt shaped rainstorm echo at (a) development phase, (b) maturity phase, and (c) weakening phase
The black dashed lines show the whirl echo band.
D shows the vortex center and A-B shows the band-shaped echo near the shear

或江淮地区发展过程中,冷锋北段随气旋波东移较快,南段遇副热带高压受阻移动较慢,因此,南北向的锋面切变线常转向为近东—西或西南—东北向的锋面切变线。此时,对流回波带上的单体受副热带高压西北侧西南气流引导为主,沿带的轴向移动显著,易产生降水的列车效应。当有低空急流和锋面共同影响时,暴雨中心位于低空急流和静止锋切变线交汇点附近^[7]。

2007年6月30日至7月1日,随着中层500 hPa低槽快速东移,低层低值系统在江淮地区加深形成气旋波。6月30日20时,江淮气旋加深导致地面冷空气南下,南下的冷空气与副热带高压西北侧的西南暖湿气流相遇在鄂豫皖交界处形成东北—西南向的锋面切变线。冷锋南段因副热带高压阻挡移动较慢,北段随气旋波东移较快,7月1日20时演变为近东—西向的锋面切变线(图1d)。雷达观测与之相对应,在鄂豫皖交界处有一条东西向对流回波带A~B,强度45~55 dBz,长度350 km(图5)。由于锋面系统向南移动缓慢,引导气流是西南暖湿气流,对流单体向东东南移动,与东西向的对流回波带之间的夹角很小,单体移动的列车效应导致鄂东北出现2~3小时的持续性强降水。暴雨中心位于锋面切变线与低空急流交汇处附近(见图1d)。

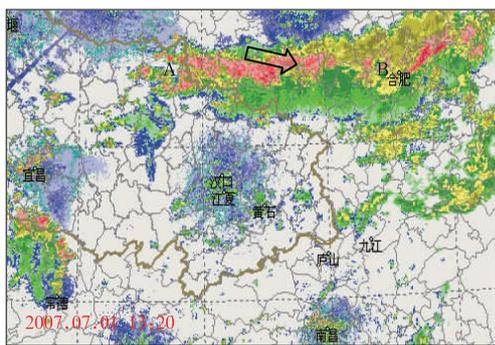


图5 带状暴雨回波形态和移动
A~B为冷锋对流回波带,箭头代表回波移动方向
Fig. 5 The shape and motion of the
band-shaped rainstorm echo
A-B is the band-shaped echo near the cold front,
and the arrow shows the moving direction of echo

3 结 论

以区域性暴雨为研究对象,通过对32次区域性暴雨天气过程的回波形态、结构和主要影响天气系统的对比分析,概括出湖北省4类具有典型形态、结构特征的区域性暴雨雷达回波模型:逗点状、涡旋状、涡带结合型和带状回波。逗点状回波由逗点头部的涡旋回波和逗点尾侧的对流回波带构成,有明显的冷空气侵入特征,逗点状回波是锋面上 α 中尺度气旋波发展的结果。涡旋回波由对流回波带、层状云降水回波等组成的气旋性涡旋状回波,它与南支槽东移过程中低层低涡发展有密切关系。涡带结合型回波是涡旋状回波与准静止的带状回波相结合

的一种暴雨回波,与低涡在梅雨锋西段发展和梅雨锋锋生有关。带状回波由对流单体回波、对流回波短带和层状云降水回波组成,对流回波沿带状回波轴向移动,因多个对流回波经历同一地方而产生持续性强降水,它多发生于气旋波冷锋段上,冷锋遇副热带高压阻挡移动减缓对准静止带状回波的形成十分重要,暴雨中心位于锋面切变线与副热带高压西北侧低空急流结合部位。

参考文献

- [1] 陈明轩,俞小鼎,谭晓光,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):754-766.
- [2] 杜秉玉. 湘中地区4—6月对流性暴雨的雷达回波特征[J]. 南京气象学院学报,1979,2(1):61-67.
- [3] 项经魁. 武汉数字化天气雷达回波特征和短时预报应用[J]. 南京气象学院学报,1990,13(4):586-591.
- [4] 徐双柱,邓秋华. WSR-81S数字化雷达对暴雨监测的分析研究[J]. 大气科学,1998,22(5):798-804.
- [5] 胡伯威,房春花,万玉发,等. 湖北省春、夏季暴雨中尺度对流回波系统初探[J]. 南京气象学院学报,1990,13(4):485-491.
- [6] 张家国,王珏,周金莲. 暴雨多普勒雷达回波特征分析和临近预警[J]. 暴雨灾害,2008,27(4):326-329.
- [7] 张家国,吴翠红,王珏,等. 一次冷锋大暴雨过程的多普勒雷达观测分析[J]. 应用气象学报,2006,17(2):224-231.
- [8] 张家国,廖移山. “98.7”鄂东连续特大暴雨的中尺度分析[J]. 气象科学,2001,21(2):169-177.
- [9] 徐双柱. “90.8”远安特大暴雨的中尺度分析[J]. 气象,2006,18(2):26-29.
- [10] 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.
- [11] 郑媛媛,张小玲,朱红芳,等. 2007年7月8日特大暴雨过程的中尺度特征[J]. 气象,2009,35(2):3-7.
- [12] 黄小玉,姚蓉,叶成志,等. 梅雨锋引发的“03.7”特大暴雨雷达回波分析[J]. 气象,2008,34(8):45-50.
- [13] 冯晋勤,童以长,罗小金. 一次 β 中尺度局地大暴雨对流系统的雷达回波特征[J]. 气象,2008,34(10):50-59.
- [14] 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.
- [15] 张德林,马雷鸣. “0730”上海强对流天气个例的中尺度观测分析及数值模拟[J]. 气象,2010,36(3):62-69.
- [16] 姚晨,张雪晨,毛冬艳. 滁州地区不同类型特大暴雨过程的对比分析[J]. 气象,2010,36(11):18-25.
- [17] 张培昌,杜秉玉,戴铁坯. 雷达气象学[M]. 北京:气象出版社,2001:437-440.
- [18] Charles A Doswell III, Harold E Brooks and Robert A Maddox. Flash flood forecasting: An ingredients-based methodology[J]. Mon Wea Rev, 1996,11:561-571.
- [19] 俞小鼎,姚秀萍,熊延南,等. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京:气象出版社,2005:174-175.