

WSR-81S 数字化雷达对暴雨监测的 分析研究^{*}

徐双柱 邓秋华

(武汉中心气象台, 武汉 430074)

摘 要 利用武汉 WSR-81S 数字化雷达回波资料结合卫星云图和地面中尺度观测资料, 分析了 1987~1994 年 4~9 月份发生在雷达有效探测范围内的所有暴雨过程。揭示了云图上不同种类暴雨云团下的数字化雷达回波模式。根据暴雨雷达回波和地面中尺度系统的统计事实, 分析了数字化雷达回波的动态运动与地面中尺度系统活动的关系。

关键词 数字化雷达 暴雨 中尺度系统

1 引言

暴雨是中尺度现象^[1]。自 70 年代末以来, 世界各国围绕着观测和预报中尺度天气现象的系统研究和试验计划纷纷提出并赋予实施, 给人们提供了区别于常规大气探测系统的全新中尺度观测和处理系统, 其中有著名的 FRONTIERS 系统和 PROFS 系统^[2,3]。以探测大气云雨现象为主的气象卫星和天气雷达是目前业务上监测象暴雨、强对流等中尺度现象的主要工具^[4]。但是通过卫星和雷达所获得的有关大气状况的信息是不同的。武汉区域中心自 1986 年引进美国 10 cm 强功能的数字化雷达系统 (WSR-81S), 1987 年投入业务运行以来, 对监测和预报长江中游地区的暴雨等灾害性天气起到了重要的作用。本文从 1987 年以来收集的武汉数字化雷达 WSR-81S 的回波资料分析卫星云图上暴雨云团在数字化雷达上的表现形式及其演变特征, 以及用数字化雷达回波分析暴雨所对应的中尺度系统的活动。

2 资料和方法

本文使用的资料以 1987~1994 年 4~9 月份的武汉数字化雷达 WSR-81S 回波资料为主, 结合日本 GMS 卫星红外云图资料及湖北省 69 个地面气象观测资料。武汉数字化雷达回波资料主要是 Column Maximum 产品。

按照湖北省暴雨标准定义, 将湖北省划分为 5 个区域 (鄂西北、鄂西南、江汉平原、鄂东北、鄂东南), 按 08~08 时 (北京时) 雨量, 其中 3 个区域 (江汉平原、鄂东北、鄂东南) 有一个区域出现两站 ≥ 50 mm 的降水算一次暴雨日。在 WSR-81S 有效

1996-07-27 收到, 1997-02-04 收到修改稿

^{*} 本文研究得到 85-906-08-02 课题的资助

监测范围内(一般认为半径为 300~400 km 区域),在“八五”攻关加密观测的 1993~1994 年,以及有雷达资料的 1987~1992 年 4~9 月雷达可获取资料共计暴雨日有 149 个。本文以上述资料为基础,对长江中游地区暴雨的数字化雷达回波特征进行系统统计和中尺度分析。

3 暴雨云团在数字化雷达上的演变模式

长江中游地区的暴雨在卫星云图上一般表现为四种形式^[5]:①带状形云带中的暴雨云团;② α 中尺度暴雨云团;③中尺度对流复合体(MCC);④涡旋云团。武汉数字化雷达的显著特点是,可连续跟踪暴雨云团,回波图象层次清晰,还能进行回波彩色动画显示。因此数字化雷达能够完整记录暴雨云团的发生、发展演变特征。武汉数字化雷达 WSR-81S 在监测长江中游暴雨云团中对应地表现为主要有四种类型回波模式:①带状回波;②混合回波;③复合体回波;④螺旋回波。通过对 1987~1994 年 4~9 月收集的 96 个暴雨回波过程统计结果表明,这四种暴雨回波模式所占的比例分别为 20.8%、46.9%、11.5%和 14.5%。

3.1 带状回波

带状回波由两部分组成:回波带前缘由对流单体组成的长条形强回波带以及与其相连的较宽(约 100~150 km 宽)的均匀回波带。长条形强回波带强度在 35 dBZ 以上,均匀回波带的强度在 30 dBZ 以下。

带状回波是带状形云带中的暴雨云团在数字化雷达上的主要表现形式。它们通常是中等或弱的冷空气活动相联系。带状云团表现为短轴在 250 km 以下的积雨云团紧密相连呈一完整的带状。下面以 1987 年 8 月 19 日暴雨过程为例概述带状回波的生成和演变(图 1,见图版 I)

1987 年 8 月 19 日 08 时在云图上可见二支云系(图略):南支槽云系、冷锋云带。南支槽云系位于 110°E 以西,冷锋云带的前界在 33°N 附近。南支槽云系与冷锋云带交接处有一云团,即川东低涡云团,处于消亡阶段,在其前部 14 时开始有新的尺度较小的对流云团出现。在暖区中有小尺度对流云团出现形成一条对流云带。13 时 30 分武汉西北 200~300 km 宜昌、远安、钟祥附近分别有对流单体回波 R、C、I,它与川东云团的前部对流云相对应,以后西南不断有对流单体回波出现。与暖区中的对流云团对应的回波表现为,在武汉东南 100~200 km 出现较强的对流单体组成的强回波带,强度大于 45 dBZ,高达 15~16 km。它指示着冷锋前部的暖湿空气十分不稳定。

17 时川东低涡云团前端的新生小尺度云团发展成为带状云团。暖区中的对流云团向东扩散减弱。雷达回波上表现为带状云团对应的回波向东北方移动。由于西南方初生回波单体不断出现,新生单体在不断运动中于 18 时形成一条带状回波。回波带上存在相对强回波集中区,回波强度达 45 dBZ。强降水从形成带状回波开始,并发生在相对强回波集中区上。

18~22 时,带状回波强度维持不变,整个回波带向东移动,移速小于 30 km/h。20 时云图上带状云团的南侧不断有对流云团新生。这与雷达回波的西南回波单体输送源是一致的。在带状回波发展维持阶段发生了强降水,枝江 18~19 时降水 63.7 mm,

天门 20~21 时降水 33.5 mm。

从 22 时开始回波带前缘的对流窄回波开始收缩,西南无强单体输送。带状云团开始分离、扩大并变得松散。对应回波出现断裂,带状回波减弱消亡。

在 Column Maximum 产品的垂直结构图(图 4a)上可以看出,在地面冷锋前沿,由于强烈的抬升,带状回波中的相对强回波集中区,对应着发展旺盛的积雨云,回波高度 13~14 km,大于 45 dBZ 的强回波在 8 km 以下,相对强回波集中区之间的间隔约 100~150 km。相对强回波集中区对应着辐合上升气流,而两个相对强回波集中区之间为弱回波区,对应辐散区,表现为下沉气流。这种上升和下沉气流耦是带状回波暴雨产生的主要机制。

3.2 混合回波

混合回波是由大面积的层状云降水回波和许多对流云降水回波混合组成。混合回波有三种表现形式:混合回波团、混合回波带和“人”字形混合回波带。混合回波团是指直径 200~300 km 由混合降水回波组成的团状结构回波,强度普遍在 30 dBZ 以下,强回波中心在 45 dBZ 以上,回波高度 8 km 左右,少数对流回波可达 10~12 km。混合回波带是指宽度较宽在 150 km 以上,长度较带状回波短的混合型降水回波。

混合回波是 α 中尺度暴雨云团在数字化雷达上的主要表现形式。 α 中尺度暴雨云团是指在云图上尺度较大呈圆形或椭圆形,相对比较独立的单一积雨云团。它常与天气图上的低涡东移相联系。分析表明,一个 α 中尺度云团中可以是一个也可以有两个以上的混合回波团或带。如果回波团或带两两合并叠加,将会造成剧烈的降水。混合回波的强回波中心与云团的移向有一种相关性。一般东移的云团表现为强回波位于混合回波右后方,而从西南上来的朝东北方向移动的云团的强回波在右前方。在著名的“91.7”梅雨期连续暴雨中,经常是混合回波团与混合回波带相互交替的过程。其中在强烈持续性区域暴雨中,可见回波带的波动。由平直回波带发展成最大幅度波动需要 3 h 左右,由最大幅度波动减弱成平直回波带需要 4 h 左右,强降水就发生在这两段时间内。波动回波带存在波动源,波动源位于宜昌以东的荆州地区中部和南部。大别山地形的阻挡作用产生的扰动也促进波动回波带的发生。连续回波动画分析表明,波动回波带是回波团或短带叠加合并的结果西南或南部的新生回波不断两两合并或辐合叠加。

混合回波是由散乱的层状云降水回波和对流单体回波经过弥合而成。回波连续动画显示有时可以看出次天气尺度的涡旋。如 1991 年 7 月 5 日 22 时 30 分在长江中游有两个混合回波团 W 和 N,它对应着是一个 α 中尺度云团:一个在汉口附近 W,另一个在宜昌附近 N,两个混合回波团之间是无回波区。东面的回波团的强度要强得多而且是向东北方向移动的,而西面的回波团弱一些,移动是朝东南方向移动的。与次天气尺度低涡相配合就是位于涡的前部和尾部。这种两个回波团相向运动往往是次天气尺度低涡沿切变线东移。分析表明,有些时候两个回波是同向运动。这种情况则是次天气尺度涡旋沿切变线向东北方向运动的结果。

在 Column Maximum 产品的垂直结构图上(图 2,见图版 II),可以看出,混合回波在 0°C 层附近(约 5~6 km)存在强回波核。层状云顶部是不平坦的,表明由多层层状云组成的回波厚度不同,每个强核与层状云暖区中的强回波对应。混合回波中的对流回波高度不高,普遍在 8~9 km。

3.3 复合体回波

复合体回波表现为由积雨云组成的块状强回波。其短轴尺度超过 30 km 以上, 强度很强, 在 45 dBZ 以上, 垂直回波高度在 14~15 km 以上。它是盛夏季节局地突发性暴雨的典型回波形式。

复合体回波是中尺度对流复合体(又称对流云团)在数字化雷达回波上的主要表现形式。对流云团常发生在暖区的十分不稳定区中。在副高外围, 中低层切变线近于垂直的强烈辐合产生对流云团。

1990 年 8 月 14 日夜, 湖北省远安县城镇发生了湖北省有史以来降水强度最大的一场局地特大暴雨。14 日 19 时~15 日 01 时的 6 h 降水量达 400 mm。如图 3 (见图版 III 所示, 17 时 30 分红外云图上鄂北出现多个对流云团, 其中远安县西北部对流云团尺度最大, 在对流云团前沿存在不连续条状对流回波带。17 时 30 分~20 时 30 分, 连续动画发现, 在对流云团中, β 中尺度云体强核呈反气旋式转动合并成 α 中尺度的对流云团时对流回波与云团强核配合一致, 强回波复合体位于云团强核中心。21 时 30 分与西南气流对应的积云带与 α 中尺度对流云团的西边界汇合, 汇合处有对流回波单体出现。21 时 30 分~00 时 30 分卫星云图动画显示表明, α 中尺度云团呈气旋式转动, 云团的 TBB 温度梯度最大曾达到 $-15^{\circ}\text{C}/10\text{ km}$ 。西南气流与云团汇合处的对流单体回波不断地辐合于云团中心处的强回波复合体中。WSR-81S 数字化雷达回波 10 min 周期的连续动画回波演变表明, 云团中心对应的复合强单体每隔 0.5 h 进行一次分裂、合并

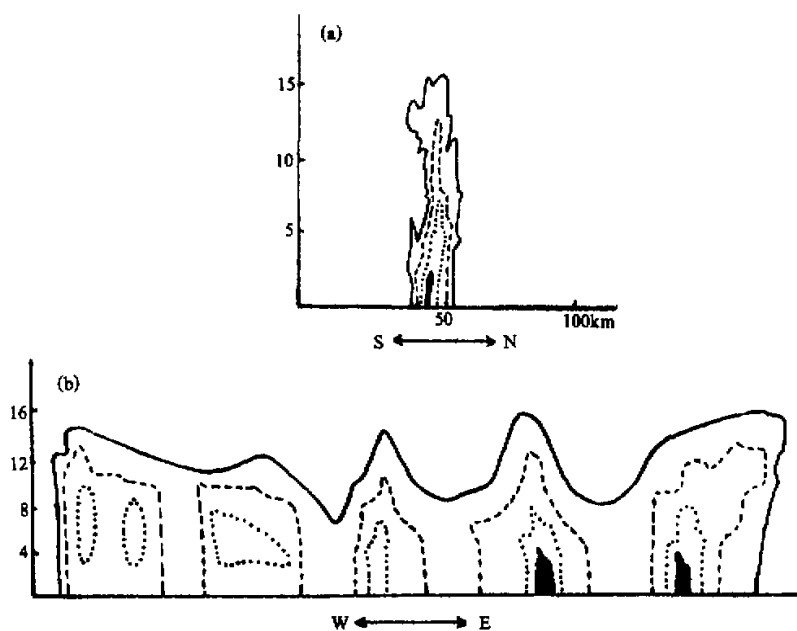


图4 暴雨回波垂直剖面图

实线表示大于 20 dBZ, 划线表示大于 30 dBZ, 点线表示大于 45 dBZ, 实心表示大于 60 dBZ

(a) 1990 年 8 月 14 日 22 时 10 分南北向 RHI; (b) 1987 年 8 月 19 日 20 时 Column Maximum 东西向

调整过程。在合并过程中,一般是由西部或西南部的对流单体向其汇合,使得远安县上空长时间稳定维持一个强复合体,因而强降水稳定维持。

在 RHI 图上(图 4b)可以看出辐合体南侧为柱状强回波,大于 45 dBZ 的回波在 7 km 以下,它表明中低空为剧烈的上升运动,是由于辐合线南侧的暖湿空气强烈辐合造成的。在 12 km 以上为向南伸展的卷云砧,表明高层为强烈的辐散。

3.4 螺旋回波

螺旋回波表现为相对于环流中心南北准对称的中尺度螺旋带状结构,强回波位于螺旋中心南侧或东南侧的螺旋臂上。它是深入内陆台风的典型回波形式。

螺旋回波是涡旋云团在数字化雷达回波上的主要表现形式。云图上表现为绕中心点呈涡旋式强弱相间的云带。如图 5(见图版 IV)所示,1988 年 8 月 8~9 日,湖北省受 8807 号台风影响发生了一次暴雨过程。8 日 21 时 40 分台风螺旋回波进入鄂东北,整个回波形状呈逗点状,在螺旋中心东南侧存在强回波,它也是螺旋回波南侧几条螺旋带的辐合处。卫星云图上 9 日 0 时可见涡旋云带在鄂皖交界处,其中东北—西南向带比较明显。从 23 时开始回波的外围带减弱,内臂螺带取而代之,整个回波向西移动,即强回波的运动是气旋运动与西移的合成,约 2~3 h 螺带内臂回波完成一次取代外臂回波的过程。23~01, 02~04, 04~07 时即为内臂回波取代外臂回波的时段。随着台风低压向内陆深入,回波气旋性渐渐变弱,内臂螺带消失,云图上表现为一条弧带,以后又渐渐变为混合回波带并维持了好几个小时。台风云团消散后在其西南方的宜昌东北出现弧状云线。9 日 22 时在弧状云线上激发新的对流云团,对应雷达回波上,20 时 30 分在宜昌东侧有分散弱回波 23 时 30 分,有两个强对流单体合并发展西移,宜昌的暴雨开始。

螺旋回波是台风低压涡旋云团的主要表现形式。暴雨云团产生于几条台风涡旋云带的汇合处分析表明,深入内陆的台风低压回波开始因为台风低压的强度比较强呈气旋结构。随着台风低压西行减弱,螺旋回波减弱消散后,台风低压环流依然存在,如果有西来冷空气或低槽的加入,降水将会再度加强,其后面的回波演变形式与混合回波或复合体回波一致。

4 暴雨回波的中尺度系统

武汉数字化雷达 WSR-81S 有许多特长,其中 9 幅回波动画显示提供了清晰的雷达回波运动情况。雷达回波的运动表现为中尺度系统的活动。分析表明,中尺度系统的活动明显地受地形的影响。

4.1 初始回波源地与准常定的中尺度系统

初始回波是指在一次暴雨过程中,雷达监测首次发现的降水回波。统计结果表明,长江中游暴雨发生前,存在以下几个初始回波源地(图略):①大洪山与桐柏山之间,②幕阜山与大别山之间,③鄂西山地与江汉平原之间的斜坡式过渡带。地面风矢量中尺度分析表明,长江中游地区由于特定地形影响作用,存在着一些准静止的中尺度辐合系统。这些中尺度辐合系统先于暴雨而存在,它们出现后较少变化。准常定中尺度辐合系统有中尺度辐合线和中尺度涡旋两种形式。准常定辐合线常形成两地,一是大别山与幕

阜山之间, 另一个是大别山与大洪山之间。准常定的中尺度涡旋形成于两个地方: 一个是大别山南侧, 另一个是鄂西山地与江汉平原之间的斜坡式过渡带。由此可见, 初始回波源地正好是准常定中尺度辐合系统产生的地方。它们之间有良好的对应关系。计算表明, 这些中尺度地面辐合系统的量级为 10^{-5} s^{-1} 。它们可以触发对流, 产生对流单体回波。但这些对流单体回波很少直接产生暴雨。当大尺度天气系统东移、南压的过程中, 与准常定中尺度辐合系统交汇或合并时, 交汇处辐合加强可达 10^{-4} s^{-1} 量级。雷达回波上表现为回波合并加强, 对应暴雨开始。研究表明^[6], 准常定的中尺度系统存在明显的有规律日变化。它们是因为地形、地貌热力差异和动力作用造成的。

4.2 回波的辐合、合并与移动性中尺度辐合系统

暴雨的发生和加强在数字化雷达回波上表现为相同性质回波或不同性质回波的辐合、合并。分析表明, 暴雨雷达回波辐合、合并方式有以下几种方式: ①追赶式合并, 它表现为前面的回波少动或不动, 而后面的回波快速向前移动, 后面的回波赶上前面的回波产生回波合并。这种形式在带状回波形成中较为常见。②汇合式合并, 它表现为分散的回波朝同一地方汇集, 在汇集过程中回波两两合并, 有时连续动画可见回波呈气旋式辐合。这种形式在复合体回波中较为常见。③交叉式合并, 它表现为两个以上的回波带或团因为分布走向不同, 而同时朝某一方向运动产生的交结, 经常所见的“人”字形回波就是其表现形式之一。

地面中尺度分析表明, 回波辐合、合并与移动性的中尺度辐合系统相联系。长江中游移动性的中尺度辐合系统有下列几种形式^[7]: ①暖式切变线, ②冷式切变线, ③东风切变线, ④涡旋, ⑤东风气流汇合线, ⑥北风气流汇合线 (图 6)。移动性的中尺度辐合系统是在暴雨发生后形成的。其生成演变过程可概述为, 暴雨发生后, 地面对应存在下沉辐散气流, 暴雨前侧的辐散出流与背景场气流相汇合形成新的中尺度辐合系统。新的中尺度系统重新组织对流, 对流单体组织合并后, 形成新的暴雨区。暴雨回波的辐合、合并就是上述两个以上的移动性中尺度辐合系统交结和合并的结果。因此, 数字化雷达回波的汇合、合并运动其实反映着中尺度系统的活动情况。

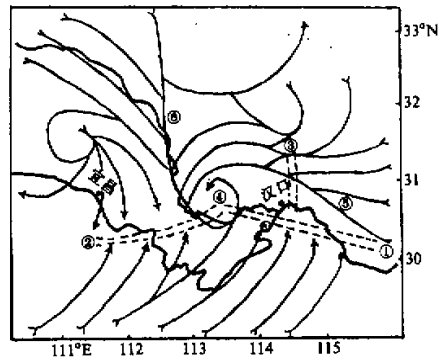


图 6 移动性地面中尺度系统示意图

①暖式切变线, ②冷式切变线, ③东风切变线,
④涡旋, ⑤东风气流汇合线, ⑥北风气流汇合线

5 结束语

通过以上分析可以得出以下几点结论:

(1) WSR-81S 数字化雷达能够比较准确地监视云图上发生在长江中游地区暴雨云团的演变。回波与云团两者之间存在一定的差异, 暴雨云团是在一定的大尺度背景条件

下产生的, 数字化雷达回波反映出的是云团中的中尺度现象的组织 and 运动情况。

(2) 长江中游地区暴雨云团对应应有 4 种形式的回波演变模式。它们分别是不同种天气系统组合的结果。统计结果表明, 长江中游暴雨回波较多地以混合回波形式出现。这是暴雨与强对流天气差别之所在。

(3) 从垂直结构图上看, 带状回波表现为上升和下沉气流耦; 混合回波存在 0℃ 层附近的强回波核; 辐合体回波表现为中低层强烈辐合和高层辐散。

(4) 带状回波演变的生命史为 10 h, 强回波发展维持只有 3~4 h。混合回波的生命史为 7~12 h。复合体回波的生命史为 6 h 左右。螺旋回波需要注意的是当螺旋回波减弱消散后, 西面如有低值系统的并入, 暴雨再度发生。

(5) 雷达回波的动画显示反映出回波中尺度系统活动。它们与地面中尺度辐合系统有较好的相关性。暴雨初始回波源地对应由地形影响造成的准常定的辐合系统。暴雨回波在演变中, 表现最多的是回波的辐合、合并。它们对应反映的是两个以上的移动性中尺度辐合系统交汇、合并的结果。

致谢: 本文得到袁恩国、李鸿洲、李玉兰研究员的指导, 特此致谢。

参 考 文 献

- 1 陶诗言等, 1980, 中国之暴雨, 北京: 科学出版社。
- 2 Browning, K. A. 1979, The FRONTIERS Plan: A strategy for using radar and satellite imagery for very short-range precipitation forecasting, *Met. Mag.*, **108**, 161~184.
- 3 Bearn, D. W, Macdonald A. E, 1982, *Designing a Very Short-Range Forecasting, Nowcasting*, Academic Press.
- 4 金鸿祥、杨金政, 1994, 长江中游暴雨监测预报系统的设计和结构, *气象*, No.8, 17~21.
- 5 徐双柱, 1990, 暴雨数字化云图与回波特征的比较, *湖北气象*, No.2, 7~10.
- 6 周军等, 1990, 湖北省地形风日变化的特征及其数值模拟, 长江中上游灾害性天气监测预报研究文集, 南京气象学院学报, **11**, No.4, 24~29.
- 7 王登炎、徐双柱, 1985, 长江中游夏季暴雨雷达回波分析, *湖北气象*, No.4, 24~29.

A Study of Torrential Rain Observations by WSR-81S Digitized Radar

Xu Shuangzhu and Deng Qiuhua

(Wuhan Central Weather Service, Wuhan 430074)

Abstract With Wuhan digitized radar (WSR-81S) echo data and satellite images and mesoscale surface observations obtained from April–September of 1987~1994, all heavy rain occurrences within effective range of radar observations are analyzed. The digitized radar echo patterns under different heavy cloud clusters are revealed. Based on statistical facts about heavy radar echo and mesoscale surface system, the relationship between digitized radar echo developments and mesoscale surface system and that between digitized radar echo developments and mesoscale surface system activities are analyzed.

Key words digitized radar torrential rain mesoscale system

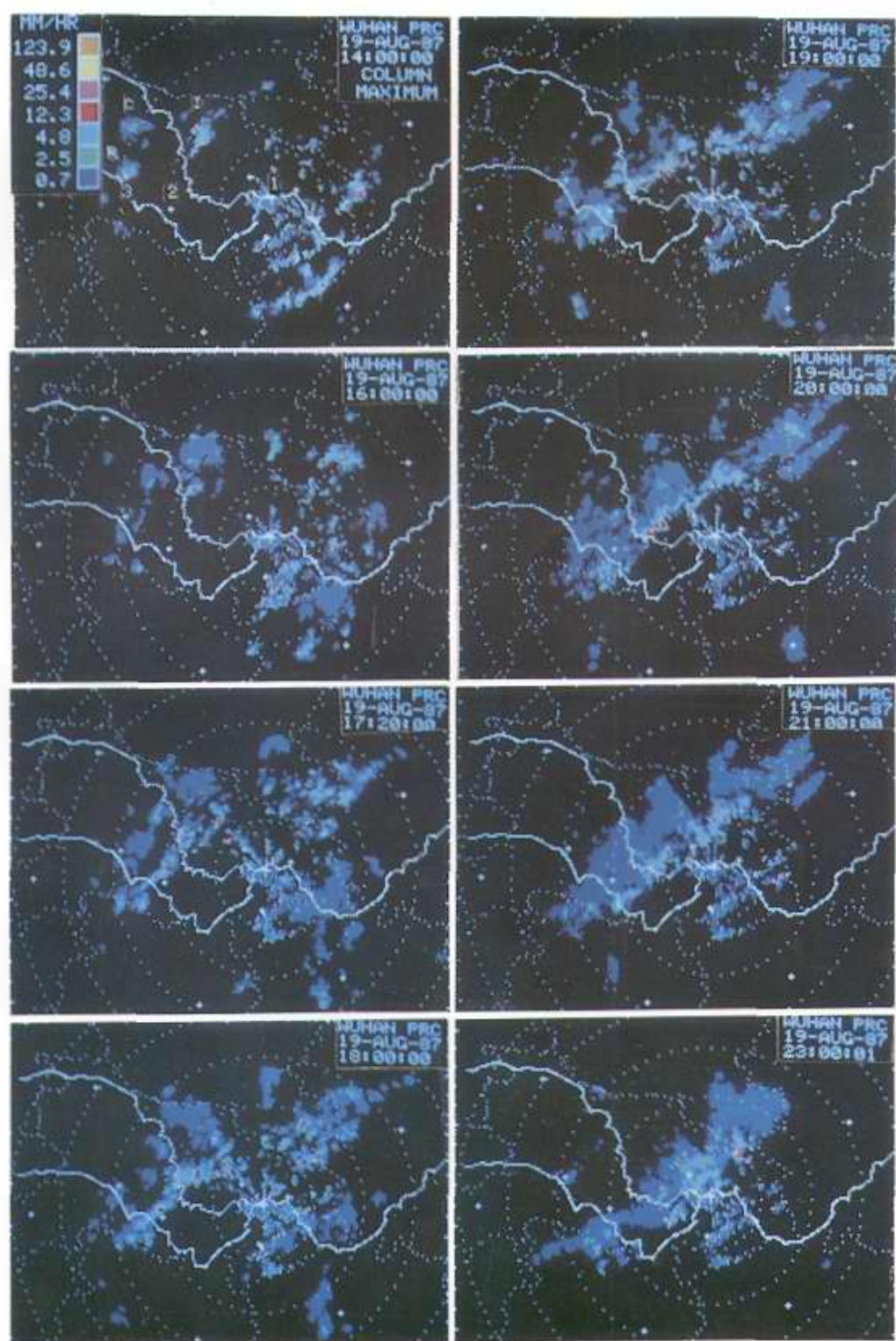


图 1 1987 年 8 月 19 日 14 时~23 时雷达回波演变图
左上图中“1”为武汉,“2”为荆州,“3”为宜昌

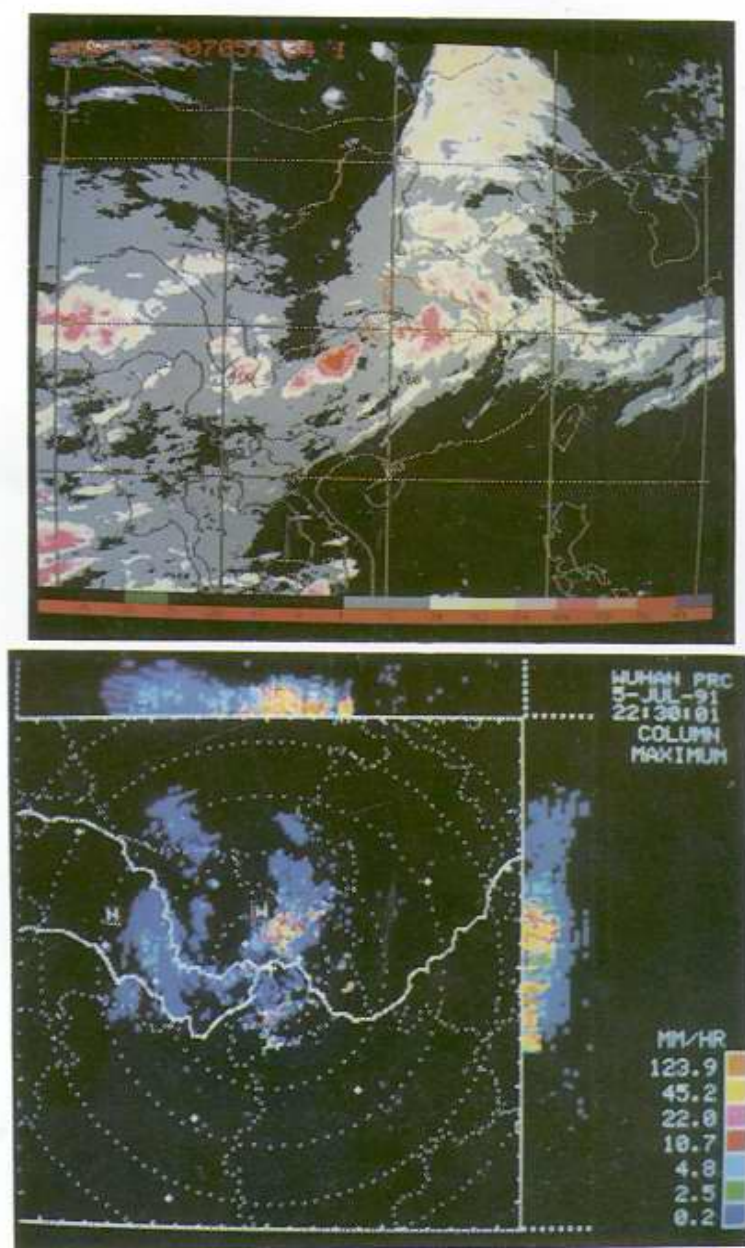


图2 1991年7月5日22时30分云图与回波图
回波图上方为东西向剖面图, 右边点线每隔一点为2 km

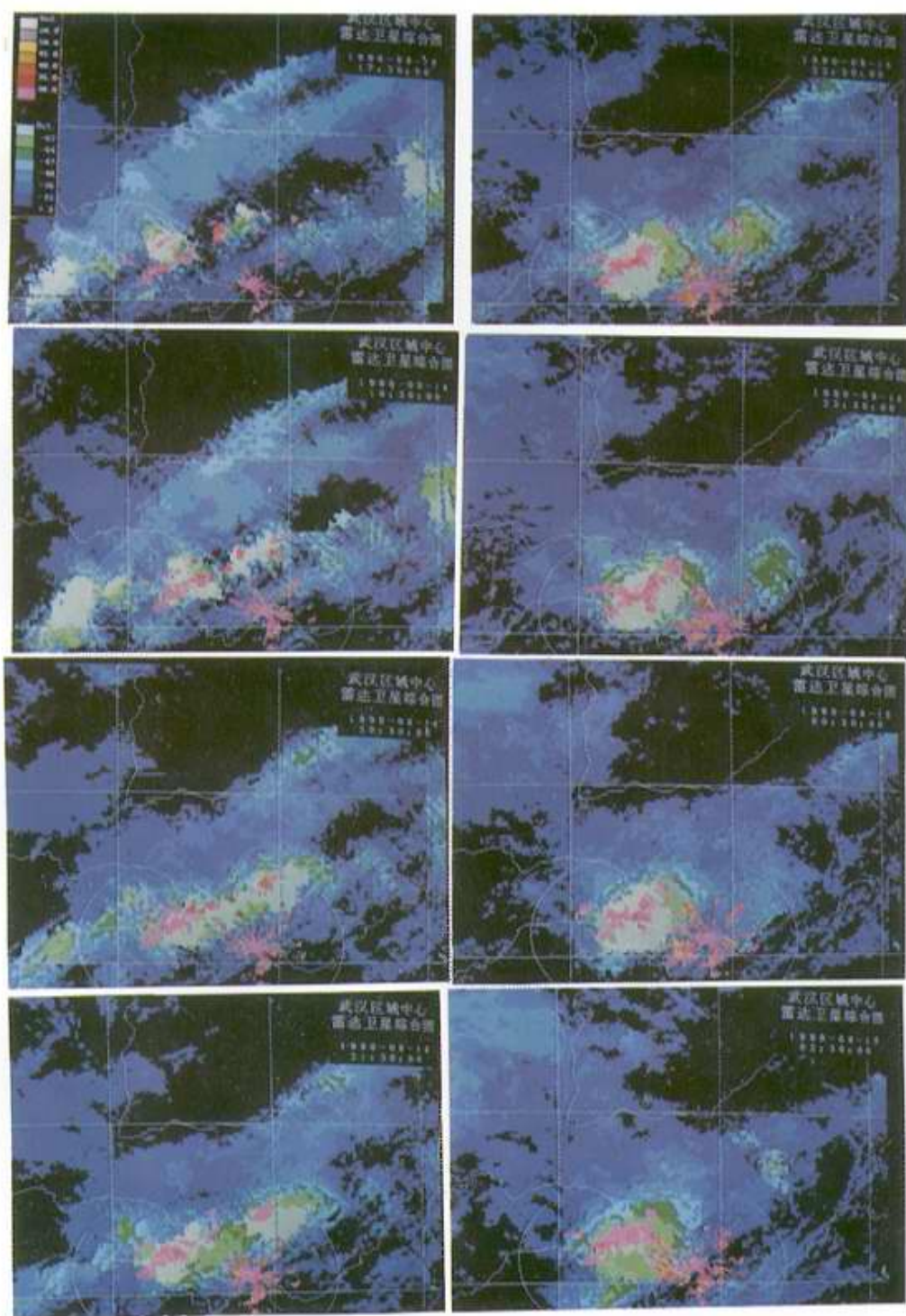


图3 1990年8月14~15日云图与圆波叠加图

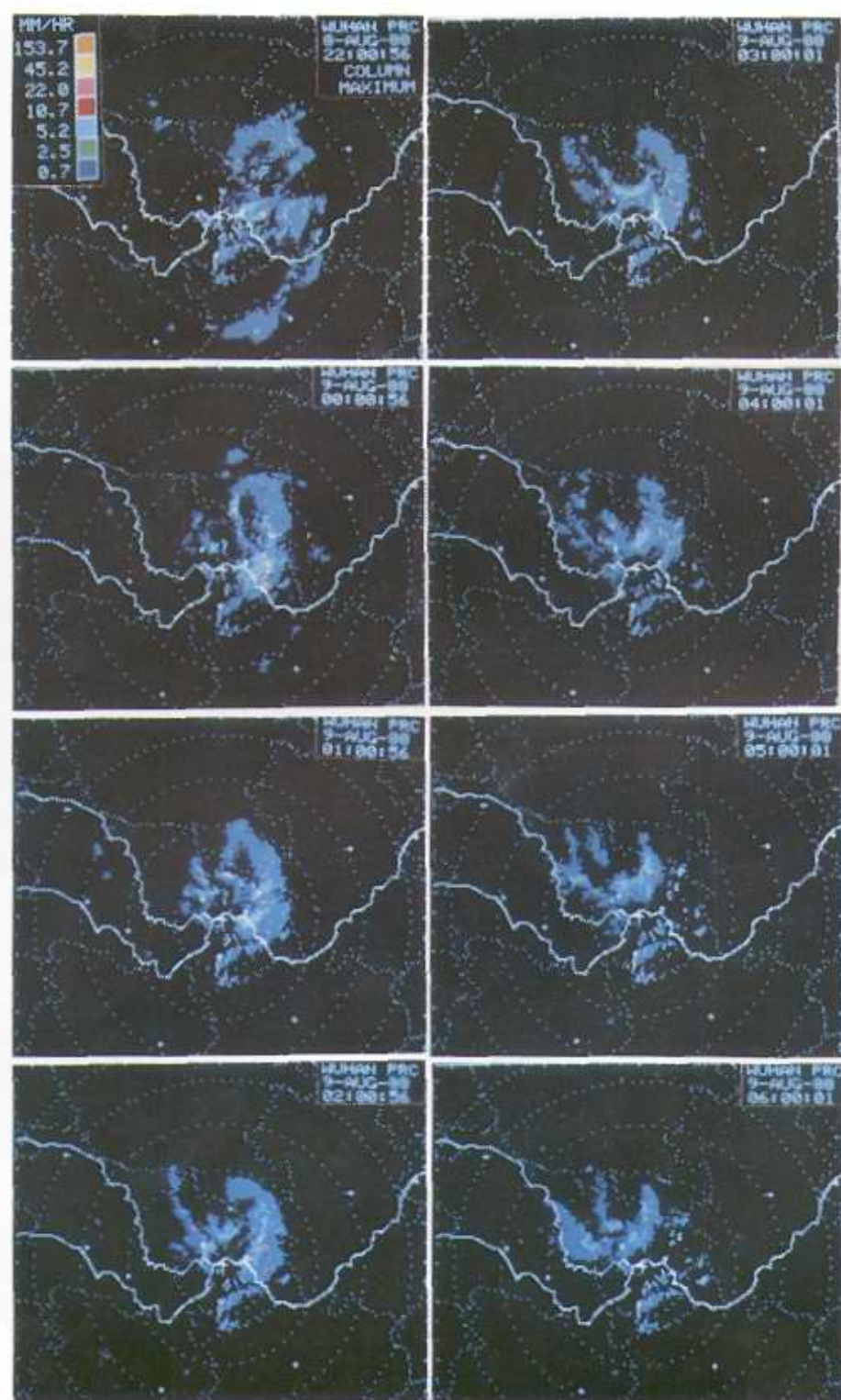


图 5 1988 年 8 月 8~9 日低波演变图