

文章编号:1004-9045(2008)01-0042-07

# 一次局地强降水过程的中尺度特征及预报难点分析

祁东平<sup>1</sup>, 周建志<sup>1</sup>, 王珊珊<sup>2</sup>, 范元月<sup>1</sup>, 李芳<sup>1</sup>

(1.湖北省宜昌市气象局, 宜昌 443000; 2.武汉中心气象台, 武汉 430074)

**摘要:** 利用常规气象资料和客观物理量场、卫星云图、多普勒雷达回波产品资料, 对 2007 年 8 月 30 日发生在宜昌市北部的强降水天气过程的中尺度特征和预报难点进行了分析。结果表明: (1)地面中尺度辐合线、中尺度对流云团是造成此次强降水的重要中尺度系统; (2)强降水主要由一中尺度“人”字型雷达回波带稳定少动造成, 回波带中有强对流单体不断新生、合并使强降水得以维持; (3)回波带上出现的逆风区与强降水落区有较好的对应关系, 风切变区面积扩大和切变值增大是强对流回波单体不断发展并在一地维持的主要原因; (4)中低层偏南风到高层偏北风的转变所形成的垂直风切变为强降水的发生提供了动力条件, 同时中低层暖湿平流加强为强对流云团的稳定维持提供了充足的水汽; (5)强对流单体, 强回波短带, 速度资料上的“逆风区”和风切变区等, 可作为判断强降水落区的依据。

**关键词:** 局地强降水; 对流不稳定; 中尺度辐合线; 雷达回波

中图分类号: P458.1\*21.1 文献标识码: A

## 1 引言

长江中下游流域是系统性强降水过程的多发区, 对该地区强降水过程, 国内不少专家学者从机理、成因、影响系统、数值模拟等方面进行了大量的研究。丁一汇<sup>[1]</sup>在研究暴雨和中尺度气象学问题时指出, 暴雨的产生与中尺度系统有着直接关系; 徐双柱等<sup>[2-3]</sup>先后对“98.7”武汉市特大暴雨、长江中游一次大到暴雨过程进行了中尺度分析; 李银娥等<sup>[4]</sup>、宋春远等<sup>[5]</sup>分别对 2004 年 7 月湖北省一次强降水过程和 2005 年 7 月清江流域一次连续性暴雨进行了天气学及多普勒雷达的诊断分析; 施望芝等<sup>[6]</sup>结合 2006 年 7 月 10 日鄂东及武汉一次暴雨过程的空报, 对 T213 数值预报产品中多个物理要素作了诊断分析。然而, 因其所具有的局地性、突发性及活动规律多变等特点, 暴雨预报是一个非常困难的问题, 尤其是对于局地性和突发性强降水的发生、强度、落区和形成机制迄今尚未揭示清楚, 仍然是天气预报中的难点, 还有待于更深入地加以分析研究。

2007 年梅雨期结束后, 鄂西宜昌市辖区从 7 月 28 日至 9 月 1 日局地强对流天气过程频发。这些过程的共同特点是, 突发性强, 雨量分布不均, 强度大, 给实时预报增大了难度。为了揭示长江中游源头地区局地强降水的形成原因, 本文选取当年 8 月 30 日夜间发生在宜昌市北部地区的一次强降水天气过程 (以下简称“07.8”宜昌强降水过程), 利用客观物理量场、卫星云图和多普勒雷达回波产品资料, 探讨了其中尺度

特征, 同时从预报业务与服务工作出发, 分析了其预报难点, 以期今后预报此类强降水的落区, 开展临近、短时预警预报服务提供参考依据。

## 2 雨情与灾情

2007 年 8 月 30 日夜间, 宜昌市出现了一次突发性强降水过程, 强降水范围主要位于该市北部的夷陵区和远安县, 其中 9 个乡镇出现了暴雨或大暴雨, 降水区呈东北—西南向带状分布(图 1)。

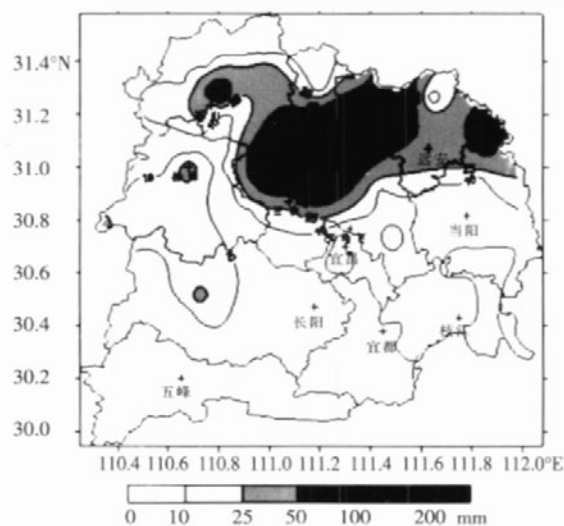


图 1 2007 年 8 月 30 日 20 时至 31 日 20 时降水实况(单位: mm)

其暴雨时段主要集中在 30 日 21 时至 31 日 01 时, 夷陵区下堡坪自动雨量站 3 h 降水量达 185 mm, 远安荷花自动雨量站 1 h 降水高达 92.5 mm。这次降

收稿日期: 2007-11-14; 定稿日期: 2007-12-12

作者简介: 祁东平, 男, 1954 年生, 工程师, 主要从事短期天气预报业务与研究. E-mail: qdp541218@126.com

水强度大、历时短、突发性强，夷陵区和远安县有 9 个乡镇遭强降水袭击，造成 2 人失踪、1 500 余人被转移，农业生产以及交通、电力、通讯等设施严重受损，因灾直接经济损失达 5 700 多万元。

### 3 ‘07.8’宜昌强降水过程的中尺度特征

‘07.8’宜昌强降水过程历时仅 3~4 h，范围不超过 300 km<sup>2</sup>，强度大，具有典型的中尺度特征。有关研究表明<sup>[1,7]</sup>，中尺度对流系统是造成强降水的主要系统。这里，使用单站探空资料，客观物理量场资料，以及卫星云图、多普勒雷达产品资料，分析了‘07.8’宜昌强降水的中尺度特征。

#### 3.1 不稳定层结条件

K<sub>y</sub> 指数是一种可以用来判断降水强度大小的重要物理量<sup>[8]</sup>，K<sub>y</sub> 指数越大，发生强降水的可能性越大<sup>[9]</sup>。从 K<sub>y</sub> 指数场上可见(图略)，30 日 08 时，鄂西北附近有一 K<sub>y</sub> 2 的大值中心；当天 20 时，K<sub>y</sub> 2 的范围扩大并向西南方伸展，且有所加强，在鄂西北至宜昌北部出现 K<sub>y</sub> 值为 3 的中心，‘07.8’宜昌强降水区则位于 K<sub>y</sub> 高值区内。

T-lnP 图是一种能用来直观考察大气稳定性变化状况的工具。朱乾根等<sup>[10]</sup>的研究结果表明，沙氏指数为 -6.7 是发生强雷暴的指标，K 指数为 41 是出现成片雷雨的指标。从宜昌站 T-lnP 图上可见(图略)，30 日 20 时，K 指数为 44，沙氏指数为 -4.2，850 hPa 与 500 hPa 的  $\theta_{se}$  之差为 23.6，这表明宜昌上空呈现上干冷、下暖湿的强不稳定层结，有利于强对流天气发生发展。相应的天气实况是，30 日 21 时，夷陵区北部开始出现雷雨，22 时至次日 00 时夷陵区下堡坪 3 h 降水量为 185 mm，23 时至次日 00 时远安县荷花 1 h 降水量为 92.5 mm。

#### 3.2 地面中尺度流场特征

分析地面流场发现，30 日 20 时，在奉节、宜昌、钟祥至武汉一带有一条“人”字型中尺度辐合线，辐合线西段由西北风和偏南风组成，东段由东北风和偏南风组成，恩施、宜昌、钟祥之间有一稳定维持的气旋式辐合中心，即中尺度低压中心(图 2)；直到 31 日 02 时后，中尺度辐合线从东南方移出宜昌，气旋式环流消失，降水随之减弱。值得一提的是，从雷达观测到的强对流回波和强降水发生的时空分布来看，生命史较长的中尺度雨团一般都产生在地面中尺度辐合线附近的气旋式辐合中心内<sup>[11]</sup>。因此，中尺度辐合线是触发‘07.8’宜昌强降水的重要中尺度系统。

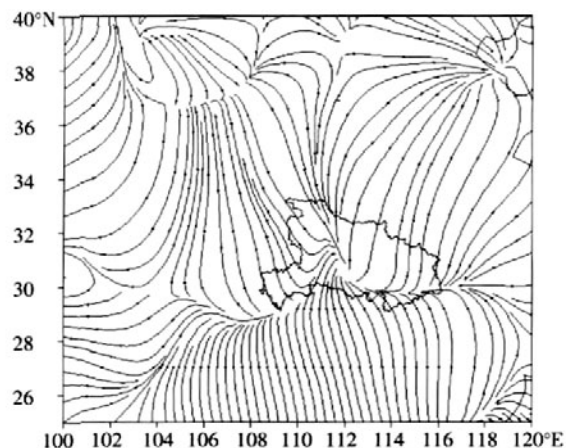


图 2 2007 年 8 月 30 日 20 时地面流场

#### 3.3 动力条件

从 8 月 30 日 20 时的涡度场、散度场可见，暴雨区上空 500-200 hPa 为负涡度区和正散度区，在 200 hPa 层负涡度值最大，为  $-54 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ，在 400 hPa 层正散度值最大，为  $10 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ；700 hPa 以下为正涡度区和负散度区，其最大量值均在 850 hPa，最大正涡度值为

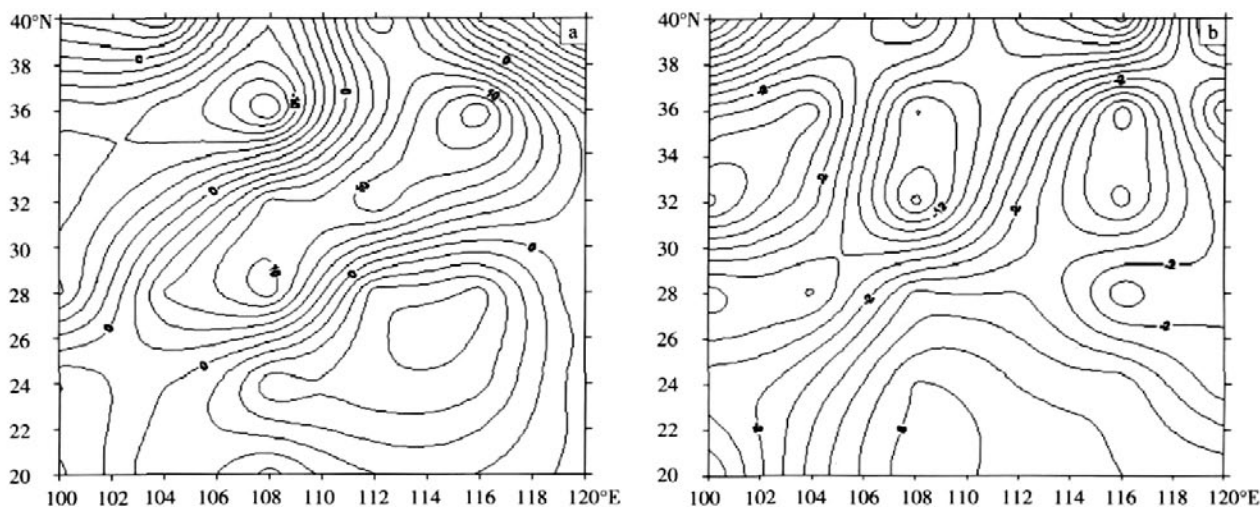


图 3 2007 年 8 月 30 日 20 时 850 hPa 涡度场(a)与散度场(b) (单位:10<sup>-5</sup> s<sup>-1</sup>)

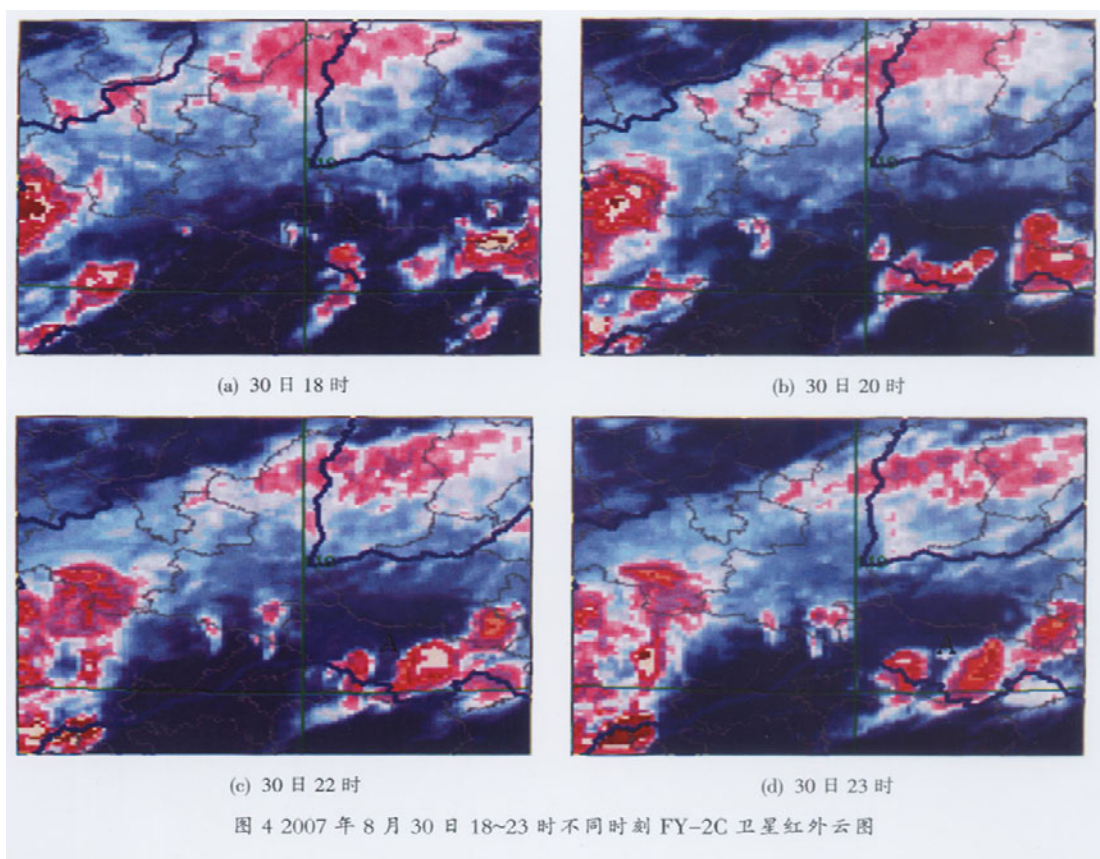
$11 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ (图 3a), 最大负散度值为  $-7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ (图 3b)。涡度场和散度场的这种垂直分布表明, 高层辐散明显强于中低层辐合, 高层辐散形成的抽吸效应有利于低层辐合和对流上升运动加强。

另外, 30 日 20 时, 暴雨区上空上升运动主要发生在 925~400 hPa(图略), 最大速度位于 850~700 hPa 之间, 量值为  $-12 \times 10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ 。通过对垂直速度场的分析, 证实了宜昌暴雨区上空上升运动达到的高度在 400 hPa 附近, 最大上升速度很强, “07.8”宜昌强降水是一次较为典型的强对流天气过程。

### 3.4 卫星云图特征

从 2007 年 8 月 30 日 17 时至 31 日 01 时不同时刻 FY-2C 卫星红外云图上可见, 从 30 日 17 时起, 高空槽云系前部暖区中, 宜昌上空有一对流云团 (A 云团) 形成(图 4a), 水平尺度为  $93 \text{ km} \times 223 \text{ km}$ , 云顶亮温为  $-52$ , 受其影响, 宜昌市城区和夷陵区傍晚出现雷

阵雨; 19~20 时, A 云团有所减弱, 其云顶亮温上升到  $-44$ , 并向东南方移动, 云团由南北向转为东西向, 这时在 A 云团西北部又新生一较小的对流云团(图 4b); 21 时, 新生对流云团并入 A 云团; 22 时, A 云团(图 4c)在宜昌地区上空水平尺度有所减小, 但在原地发展、加强, 云顶亮温降为  $-73$ ; 到 23~24 时, A 云团发展到最强盛, 形成一个“逗点状”中尺度对流云团(图 4d), 其主体云团水平尺度为  $105 \text{ km} \times 120 \text{ km}$ , 结构密实, 云顶亮温达到  $-77$ 。此期间夷陵区、远安县正好处在 A 云团的强中心, 造成 30 日 22 时至次日 00 时夷陵区下堡坪 3 h 降水 185 mm, 23 时至次日 00 时远安县荷花 1 h 降水 92.5 mm。31 日 01 时之后, A 云团很快减弱, 并向东南方移动, 降水随之减弱。A 云团从生成、发展、稳定到减弱, 在宜昌上空停留约 7 h。结果表明, 夷陵区下堡坪、远安县荷花的强降水均由 A 云团直接造成。



### 3.5 雷达回波特征

暴雨是在多种尺度系统相互作用下发生发展的, 中小尺度系统则是其产生的最直接的系统。宜昌多普勒天气雷达(CINRAD/SA)较好地监测到了这次强降水的演变过程。

#### 3.5.1 基本反射率产品分析

(1) 中尺度“人”字型回波带的形成、稳定和发展。

从宜昌 CINRAD/SA 雷达仰角 1.5 反射率因子图上可见, 30 日 20 时 03 分, 测站东北部远安附近有一对流回波生成, 强度达 45 dBz, 并缓慢向北移动; 到 20 时 39 分, 测站北部和西北部下堡坪一带不断有絮状回波生成, 强度 30 dBz, 顶高 6 km, 并向东北方移动, 且与上述对流回波逐渐交汇; 21 时 04 分, “人”字形回波初步形成(图 5)。

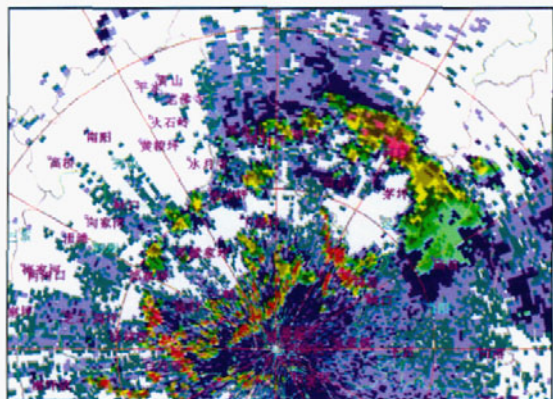


图 5 2007 年 8 月 30 日 21 时 04 分宜昌 CINRAD/SA 雷达 1.5°反射率因子图

21 时 04 分之后，絮状回波带上对流单体不断加强，其强度由 30 dBz 增大到 45 dBz。连续回波动画分析结果表明，在测站西北侧又不断有新的对流回波单体生成，并源源不断地并入絮状回波带，回波带上对流单体缓慢向东北方移动，到 22 时 17 分形成典型的“人”字形回波带(图 6a)，对应着图 4 中的中尺度对流云团。在“人”字型回波稳定期，西南-东北向回波带上对流单体不断增强，回波带不断变宽，到 22 时 35 分已形成长约 100 km、宽 20 km 的西南—东北向中尺度回波带，回波结构密实。回波带中有多处强对流回

波单体发展，这些回波单体彼此结合，到 23 时 05 分在下堡坪、荷花附近形成水平尺度 10~20 km、中心强度 45~50 dBz、顶高 12~15 km 的强对流回波短带(或回波团)，该回波短带的形成正好是两地降水加强之时。“人”字形回波带从形成、稳定到发展在宜昌北部停滞约 4 h，直到 31 日 01 时 30 分，“人”字型回波带减弱东移，其结构变松散，降水随之减弱。

以上分析结果表明，当回波带上有 2 个或 2 个以上强对流回波单体彼此结合成强对流回波短带(或回波团)时，强降水将会产生，强降水回波带长时间维持机制是回波带中不断有强对流单体新生、合并。

(2)回波带上强中心出现具有超级单体风暴特征的“V”字型回波。8 月 30 日 22 时 17 分，从基本反射率图上可见远安县荷花上空强对流回波短带中出现“V”字型缺口(图 6a)，其强度为 45~50 dBz，回波顶高在 8 km 以上。沿 5°方位角对反射率因子作垂直剖面图，到 22 时 35 分(图 6b)，“V”字型回波表现出明显的悬垂回波及弱回波区特征，其强度>50 dBz，相应径向速度图上可见一明显的“逆风区”(图 8 a)，表明风暴中存在很强的上升运动，这是超级单体风暴的主要特征之一；同时，强回波中心垂直液态含水量>35 kg·m<sup>2</sup>(图 6c)，其顶高>15 km(图 6d)，说明对流回波发展极为旺盛。这正是荷花 23~24 时 1 h 降水达 92.5 mm 的原因。

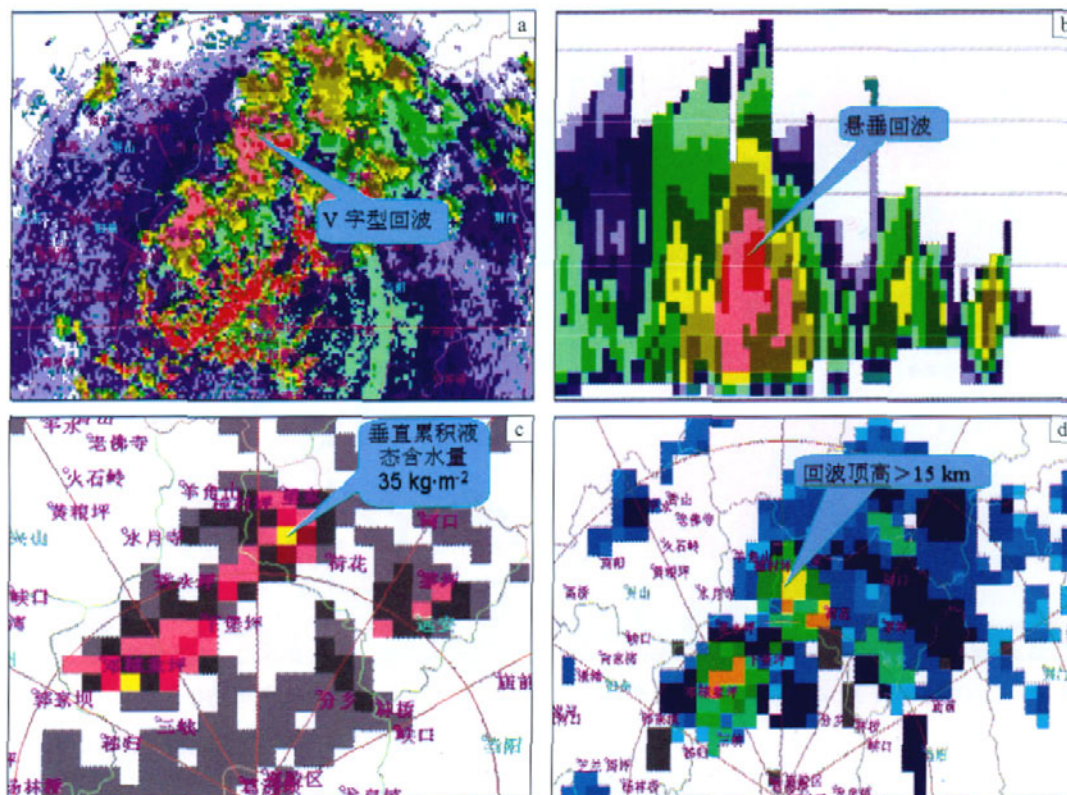


图 6 2007 年 8 月 30 日 22:17 组合反射率因子图(a)与 22:35 分反射率因子剖面(b)、垂直液态水含量(c)、回波顶高(d)

### 3.5.2 基本速度场产品分析

(1)逆风区特征。30日20时45分,测站的东北和西北方分别出现一条西南—东北向、西北—东南向辐合线,到21时10分,两条辐合线相交于距测站11:81 km处,与反射率因子图上的“人”字形回波对应,此时辐合线南侧零速度线呈“S”型(图7)。该辐合线停滞少动,从22时29分到23时05分,西南—东北向回波带上大片正速度区中出现若干个封闭负速度区(图8 a,c),即“逆风区”。该“逆风区”的出现预示强降水的开始,其上有强烈辐合辐散,形成有利于暴雨产生的垂直环流结构,促使带状回波进一步加强发展。“逆风区”在原地维持且其面积不断扩大,这也是强对流回波单体不断发展并在一地维持的主要原因。实况是,“逆风区”位置对应强降水中心,出现时间上也十分吻合。

(2)组合切变特征。逆风区是中尺度辐合辐散共轭系统风场在多普勒雷达速度图上的表现形式,其附近存在强的风切变。宜昌 CINRAD/SA 雷达产品中提供的 87 号组合切变产品可以帮助识别风切变大值区。分析组合切变产品连续演变发现,8月30日22时35分,荷花西北部出现逆风区,在组合切变产品图上有

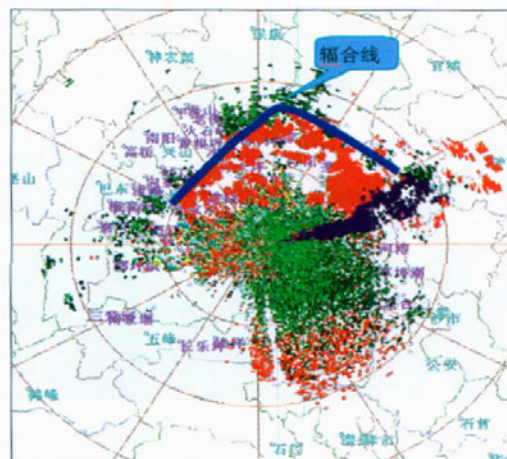


图 7 2007 年 8 月 30 日 21:10 宜昌 CINRAD/SA 雷达径向速度图

明显风切变区与之对应(图 8a,b);该风切变区不断扩大,到23时05分,下堡坪、袁家坪、荷花等地分别出现风切变大值区(图 8 c,d),其切变值 $>40 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ,此时正是下堡坪、袁家坪和荷花降水加强之时。这说明逆风区、风切变区与强降水区有很好的对应关系,风切变值越大,降水越强。

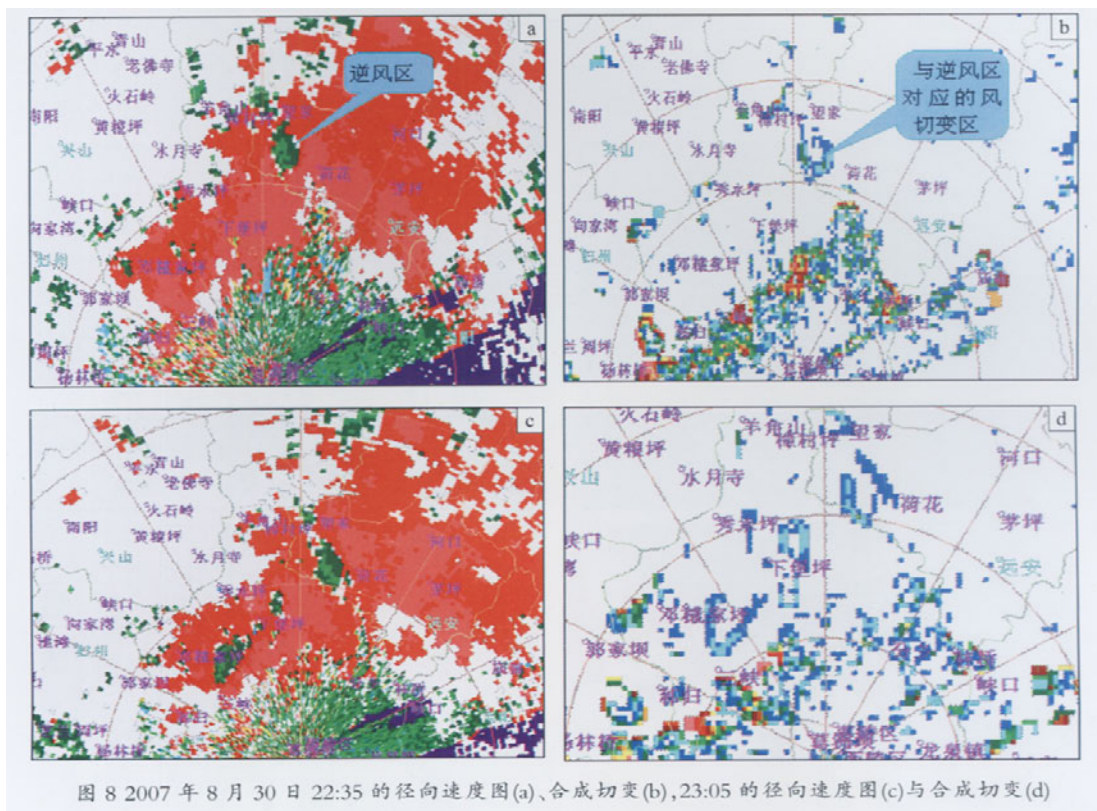


图 8 2007 年 8 月 30 日 22:35 的径向速度图(a)、合成切变(b),23:05 的径向速度图(c)与合成切变(d)

### 3.5.3 风廓线产品特征

吴国雄等<sup>[12]</sup>从运动方程出发,证明了垂直风切变或湿斜压度增长都可引起气旋性涡度增加,从而对强对流天气起到加强和维持作用。由8月30日23时18

分宜昌 CINRAD/SA 雷达风廓线产品可见(图 9),低层为一致的偏南风,风速不断加大,且风随高度顺时针转动,中下层暖湿平流加强,到 4.6 km 以上转为西北风,这种风的垂直结构维持近 4 h。由此可知,中低层

偏南风到高层偏北风的垂直风切变为强降水的发生提供了动力条件;同时,中低层暖湿平流加强为强对流云团的稳定维持提供了充足水汽。

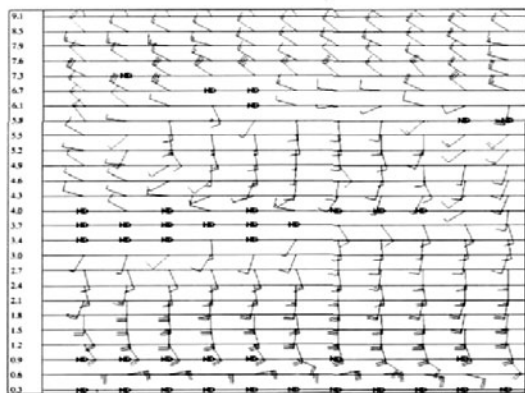


图 9 2007 年 8 月 30 日 23:18 宜昌 CINRAD/SA 雷达风廓线图

#### 4 预报难点分析

宜昌市气象台 2007 年 8 月 30 日 15 时,对外发布全市夜间有中雷阵雨,结果预报量级与实况相比偏差较大。究其原因,主要有三点。

第一,大尺度环流形势不具备强降水条件。8 月 30 日 08 时,大尺度环流形势是,500 hPa 河套到四川盆地有低槽东移,中低层宜昌北部有一东北-西南向切变线,西南暖湿气流很弱;地面为弱暖槽控制,北部有弱冷空气南下。同时,宜昌单站 30 日 08 时 T-lnP 图反映,K 指数为 34,  $\omega_{500-500}$  为 5.4,沙氏指数为 0.0,对流不稳定条件较差。上下层的配置具备一般降水条件,不利于预报强降水。

第二,数值预报产品对这次局地强降水的预报表现较差。在日常天气预报业务中,日本、德国的数值产品对宜昌地区的降水量级预报都是偏大的,而对“07.8”宜昌强降水过程,日本、德国的数值产品以及“天气在线”对该地区降水报得均较小。

第三,“07.8”宜昌强降水过程是一次局地对流性降水过程,具有中尺度特征。从目前的观测站点来看,无论空间或时间上,观测资料时空分辨率都存在局限性,对中小尺度系统难以捕捉。由此,给这种局地性强降水预报带来很大难度。目前,对这类强降水预报只能依靠气象卫星、天气雷达等探测手段和产品,做好临近订正、跟踪和预警服务。

#### 5 结论与讨论

通过对 2007 年 8 月 30 日发生在宜昌市北部地区强降水天气过程中尺度特征、卫星云图、雷达产品、

预报难点的研究分析,得出以下几点结论。

(1)此次强降水具有历时短、分布不均、强度大的中尺度特征。地面中尺度辐合线、中尺度对流云团是造成此次强降水的重要中尺度系统。

(2)整个强降水过程伴随着强对流雷达回波单体的初生、发展、合并和减弱,降水主要由一中尺度“人”字型回波带稳定少动造成。回波带上两个或两个以上强对流回波单体结合成强对流回波短带(或回波团)产生的降水最强,回波带中不断有强对流单体新生、合并使强降水回波带得以长时间维持。另外,回波带上出现“V”字型缺口,悬垂回波及弱回波区特征明显,超级单体风暴回波强度大于 50 dBz,共同造成局部站点 1 h 降水量达 92.5 mm。

(3)基本速度场产品中回波带上出现的逆风区与强降水落区有较好的对应关系,逆风区中辐合辐散强烈,上升运动增强,形成有利于暴雨产生的垂直环流结构,促使带状回波进一步加强发展;风切变区面积扩大,切变值增大,是强对流回波单体不断发展并在一地维持的主要原因。

(4)中低层偏南风到高层偏北风的转变所形成的垂直风切变为强降水的发生提供了动力条件;同时,中低层暖湿平流加强为强对流云团的稳定维持提供了充足水汽。

对于“07.8”宜昌强降水过程,无论是主观预报还是客观预报均预报出,但量级明显偏小,这说明预报此类由中尺度系统所引发的局地暴雨的难度很大,由于观测资料时空分辨率的局限性,仅凭常规观测资料和数值预报产品远远不能满足天气预报业务与服务的需要,必须充分利用气象卫星、雷达等提供的高时空分辨率探测资料进行实时监测和跟踪。尤其是当大尺度系统反映有降水发生而未来产生强降水不明显的情况下,对卫星云图和多普勒雷达探测资料的演变要特别关注,如“人”字型回波上的强对流单体,强回波短带,速度资料上的“逆风区”和风切变区等,都可成为判断强降水落区的依据,据此才能争取提前数小时对其作出准确预报。

#### 参考文献:

- [1] 丁一汇.暴雨和中尺度气象学问题[J].气象学报,1994,52(3):274-283.
- [2] 徐双柱. 98.7“武汉市特大暴雨的中尺度分析[J].气象,2002,28(7):54-57.
- [3] 徐双柱,沈玉伟,王仁乔,等.长江中游一次大到暴雨的中尺度分析[J].气象,2005,31(9):24-29.
- [4] 李银娥,洪国平.对 2004 年 7 月湖北省一次强降水过程的分析[J].湖北气象,2006,25(3):11-14.
- [5] 宋春远,熊传辉,陈亮,等.2005 年 7 月清江流域一次连续性暴雨的中尺度分析[J].暴雨灾害,2007,26(1):63-67.

- [6] 施望芝, 祁东平, 王丽, 等. 一次暴雨空报的诊断分析[J]. 气象, 2007, 33(5): 56-61.
- [7] 毛冬艳, 周雨华, 张芳华, 等. 2005年初夏湖南致洪暴雨中尺度分析[J]. 气象, 2006, 32(3): 63-67.
- [8] 李晓霞, 寿绍文, 张铁军, 等. '8.19'西北东部大到暴雨诊断分析和数值模拟[J]. 气象, 2006, 32(2): 81-86.
- [9] 杨林, 余燕. 黔南区域性强降水的 Q 矢量和 K<sub>v</sub> 指数数值预报诊断业务系统[J]. 广西气象, 2006, 27(增刊 1): 11-12.
- [10] 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. 天气学原理和方法[M]. 北京: 气象出版社, 1992: 441.
- [11] 候瑞钦, 景华, 张迎新, 等. 05.7.23 河北暴雨中尺度分析[J]. 气象, 2005, 32(3): 88-94.
- [12] 吴国雄, 蔡雅萍. 风垂直切变和下滑倾斜涡度发展[J]. 大气科学, 1997, 21(3): 273-281.

## The Forecasting Difficulties and Mesoscale Characteristics of a Local Heavy Precipitation

QI Dong-ping<sup>1</sup>, ZHOU Jian-zhi<sup>1</sup>, WANG Shan-shan<sup>2</sup>, FAN Yuan-yue<sup>1</sup>, LI Fang<sup>1</sup>

(1. Yichang Meteorological bureau of Hubei Province, Yichang 443000;

2. Wuhan Central Meteorological Observatory, Wuhan 430074)

**Abstract:** Based on the conventional observations, satellite cloud images and Doppler radar data, the mesoscale features and forecast keys of a heavy precipitation process occurring over north of Yichang on 30 August 2007 is analyzed. (1) Surface meso-scale convergence line and meso-scale convective cloud cluster are the main mesoscale systems causing the heavy precipitation. (2) The heavy rain is caused by a stability mesoscale vortex zone fixed in the northern part of Yichang with new convective cells and their merging. (3) Upwind area in the echo is coincident with the precipitation center. The extended areas and the enhancement value of the Wind shear caused the echo intensified stability. (4) The vertical shears are the main dynamic factors for the heavy precipitation, the warm and moist air advection in boundary layer provides the abundance vapor. (5) The convective cells, strong echo zone, upwind areas and Shears can be used to judge the rainstorm areas.

**Key words:** Local heavy precipitation; Convective unstable; Mesoscale convective line; Doppler radar