

一次混合云暴雨过程风场中尺度结构的双多普勒雷达观测研究*

刘黎平¹⁾ 邵爱梅²⁾ 葛润生¹⁾ 梁海河¹⁾

1) (中国气象科学研究院, 北京 100081)

2) (兰州大学大气科学系, 兰州 730000)

摘要 利用国家重点基础研究发展规划项目“我国重大气象灾害形成机理和预测理论研究”2002年外场试验首次获取到的双多普勒雷达资料,研究了7月22~23日在长江中游的宜昌、荆州区域暴雨回波和风场的中尺度结构及演变过程。结果表明:本次暴雨是混合云降水所致,在层状云降雨区内有许多对流单体,这些对流单体常以带状结构组成回波群,对流云的回波强度和风场有明显的中尺度结构,与周围的层状云有很大差别。西南气流和东风形成的中尺度切变和辐合是造成强对流降水的主要原因,风场的中尺度结构主要发生在4 km以下的中下层。在对流回波周围,经常有中尺度切变、涡旋、辐合和辐散存在,这些风场的中尺度结构与对流云的演变有密切的关系,对强降水的发生和维持有重要影响。此项工作为分析中尺度暴雨的形成和演变机理提供了依据。

关键词: 双多普勒雷达; 暴雨; 风场; 中尺度

文章编号 1006-9895 (2004) 02-0278-07 **中图分类号** P458.2 **文献标识码** A

1 引言

暴雨是我国夏季主要气象灾害,据国家民政部门的统计,近十年来我国大陆平均每年因洪涝灾害造成的经济损失近2000亿元,约占国民生产总值的3%~6%。1998年发生在长江流域及松花江和嫩江流域的特大洪涝灾害造成的经济损失超过2600亿元,死亡人数超过3000人。长江流域的暴雨特别是梅雨锋暴雨一直是气象学家研究的热点之一,而中尺度对流系统是产生暴雨的重要原因。我国和日本对暴雨特别是梅雨锋的研究已有多年的历史了,这些研究包括梅雨锋的形成和维持、环流特征、梅雨锋的温度和风场的特征、中尺度扰动等,尤其对梅雨锋天气学研究比较多。1998年长江流域特大暴雨发生后,暴雨的研究又成为气象研究的一大热门,陶诗言等^[1]研究了1998年长江流域特大暴雨发生的气候背景和大尺度环流条件,黄荣辉等^[2]分析了这次过程的特征及成因。贝耐芳等^[3]研究了1998年7月20~22日特大暴雨的中尺度特征,结果表明: β 中尺度系统是造成暴雨的重要原因,对流层中低层水汽的大量辐合和对流不稳定对暴雨的发生是很重要的。孙建华等^[4]用数值模拟的方法分析了华南地区1994年6月12~13日暴雨过程的 β 中尺度系统,在低层西南、东南和北风三支气流产生了

很强的辐合，在高层存在辐散。雷恒池等^[5]利用三维云模式研究了 1998 年武汉特大暴雨小尺度动力特征。在暴雨的雷达观测和研究方面，20 世纪 80 年代开展了梅雨锋暴雨的云物理研究，包括利用常规天气雷达开展的梅雨锋云系宏观特征的研究^[6~8]。1999 年在淮河流域开展了淮河流域试验，利用日方的三部 X 波段多普勒雷达开展了该地区降水的三维结构的特征、暴雨的发生与风场的关系等研究^{[9]①②③}，受雷达探测范围 (64 km) 的限制，该研究仅仅限于暴雨局部小尺度风场结构的研究。张沛源等^[10]就双多普勒雷达系统反演风场的可靠性进行了深入的研究，分析了两部雷达观测的时间和空间的非一致性、雷达波在大气中传播、雷达定位等对双线偏振雷达反演风场的影响，并提出了解决的方法。刘黎平等^[11]研究了双多普勒雷达观测技术和质量控制等问题，提出了进行资料订正的方法。

尽管，我们在暴雨研究方面做了很多工作，用数值模拟等方法得到了很多有关暴雨内部风场的结构，但由于缺少时空分辨率很高的资料特别是多普勒雷达资料等原因，迄今为止，我们还不真正了解长江流域中小尺度暴雨系统动力结构，在风场的何种结构条件下才能造成局地强暴雨？风场中小尺度结构和降水的关系如何？而这些问题对进一步认识暴雨的发生和发展的机理至关重要。双多普勒雷达是目前探测风场中小尺度结构最有效和可靠的手段，已被国外广泛应用于灾害性天气中尺度观测和研究中^[12]。为了研究长江流域梅雨锋暴雨的中尺度结构，2001~2002 年国家重点基础研究发展规划项目“我国重大气象灾害形成机理和预测理论研究”在长江流域开展了梅雨锋中尺度暴雨的外场试验，以梅雨锋内 β 中尺度暴雨为主要观测对象，并兼顾 γ 中尺度系统，获取第一手高时空分辨率的 β 中尺度强暴雨系统发生、发展、成熟、消亡整个发展过程的大气压、温、湿、风、含水量等要素的三维结构、演变和降水分布的完整资料，以便利用这些探测资料分析研究中尺度强暴雨系统的四维结构以及发展演变规律，提高暴雨的预测能力。除地面、高空观测在时间上加密外，中国气象科学家首次利用国产多普勒雷达，以安徽合肥、马鞍山和无为三部多普勒雷达构成了两个双多普勒雷达同步观测系统，在湖北建立了宜昌和荆州双多普勒雷达观测系统，对暴雨的中尺度风场结构进行观测。本文就是利用宜昌—荆州双多普勒雷达资料分析 2002 年 7 月 22~23 日的一次混合云暴雨系统的中尺度结构特别是风场结构。

2 双多普勒雷达观测系统和风场反演方法简介

设在宜昌的我国新一代 S 波段多普勒天气雷达 (WSR-98D) 和荆州的可移动式 C 波段多普勒雷达 (3830J) 构成了长江中游双多普勒雷达观测系统，两部雷达相距 96 km

① Ge Wenzhong, Zhang Weiping, and Dang Renqing, A study on the Non-uniform structure of Meiyu front Precipitation by Use of radar field data, The third GAME-HUBEX workshop on meso-scale systems in Meiyu/Baiyu front and its hydrological cycle, Kunming, 2001, 50~53.

② Geng B., A convective rainband developed in association with rear inflow in Meiyu front. The third GAME-HUBEX workshop on meso-scale systems in Meiyu/Baiyu front and its hydrological cycle, Kunming, 2001, 66~69.

③ Zhao Bolin and T. Takeda, Huaihe River Basin Experiment (GEWEX/HUBEX), Beijing University, 1998, 24pp.

[图 1 (见图版 D)]。在同步观测时, WSR-98D 采用 14 层的 VCP11 观测模式进行连续体积扫描观测, 每个体扫的时间平均为 5.6 min, 仰角在 0.5° 到 19.5° 内变化。3830J 也采用与 VCP11 相同的层数和仰角的体扫模式进行连续观测, 但体扫时间为 5 min 或 6 min。在进行第一次同步时, 两部雷达观测人员规定第一个体扫开始时间, 两部雷达同时开始体扫, 由于两部雷达完成一个体扫的时间不严格一致, 这样做了几个体扫后, 两部雷达的开始时间就不一致了, 为此观察规范规定: 每 1 小时两部雷达进行 1 次同步设置。在风场反演时, 我们也尽量选择时间一致的体扫进行风场反演。

在利用双多普勒雷达反演三维风场时, 首先对两部雷达资料进行回波位置、回波强度和径向速度对比等质量控制, 并进行退速度模糊处理, 然后将以球坐标方式表示的多普勒雷达的原始资料(回波强度和径向速度)用双线性方法插值到水平格距为 1 km, 垂直格距为 0.5 km 的直角坐标上, 根据两部雷达的相对位置进行格点资料的配对。这样, 在双多普勒雷达共同覆盖区的格点上就有两个雷达同步观测的径向速度和回波强度四个量。利用两部雷达几乎同时探测的两个径向速度和质量连续方程相联立, 并考虑降水粒子的下落速度的影响, 并在一定的边界条件的假设下就可以计算得到三维风场。本文采用的双多普勒雷达直角坐标处理方法与 1980 年 Peter 等^[13]的方法近似, 该方法被用来分析冰雹云的动力与微物理结构的关系^[12]。

3 暴雨风场的中尺度特征

3.1 暴雨过程背景场分析

受高空低槽的影响, 2002 年 7 月 22~24 日宜昌和荆州双多普勒雷达观测区普降暴雨, 局地大暴雨。图 2 (见图版 D) 为 7 月 22 日 08 时~23 日 08:00 (北京时, 下同) 降雨量的分布图, 湖北省 24 小时雨量有 6 个站超过 100 mm, 其中荆州 148.7 mm、枝城 114.2 mm、五峰 110.3 mm。靠近湖北的湖南省石门站过程总降水量为 238 mm, 22 日降水量为 107 mm, 并伴有闪电。从卫星云图(图略)上看, 从长江流域一直延伸到日本均有明显的降水, 影响双多普勒雷达观测区的降水系统主要从湘西北部发展的对流云团而来。从 500 hPa 天气图来看, 暴雨区北侧为一高空槽, 长江中下游地区受槽前西南气流的影响, 700 和 800 的暖式切变线有所北抬, 位于江苏南部、安徽南部到湖南南部 [图 3 (见图版 D)]。

3.2 回波结构特征

从宜昌和荆州这两部多普勒雷达回波来看, 本次暴雨过程为混合云降水, 在层状云中镶嵌着对流云, 对流云的分布比较复杂, 其回波强度、尺度和形状在不同时间和空间均有所不同, 图 4 (见图版 D) 为典型的回波水平分布结构。对流云团有团状回波, 但大部分呈带状回波, 且平行于回波移动方向, 最大回波强度为 50 dBZ, 尺度在 10~50 km 范围内; 从垂直结构显示来看, 最大回波顶高 (10 dBZ) 一般为 12 km, 最大回波强度首先在 5~6 km 高度上产生, 然后向下发展。层状云的回波结构变化平滑, 回波强度与对流云有较大差别, 5~6 km 高度上“零度层亮带”现象很明显。

7 月 22 日 11:08, 降水系统前部刚刚移入雷达观测系统时, 回波的形状为东西取向的弓状回波。宜昌南部的降水系统可分为两个对流回波群, 这两个回波群被一

西南—东北取向的弱回波区分隔，降水系统自西南向东北方向移动；三个小时后，左侧的回波群逐渐演变为层状云，而右侧的回波群在后部的一块对流云得到迅速发展后，逐步演变为平行于回波移动方向的对流云带，长度 150 km，然后开始减弱，15:00 左右，变成结构松散的团状回波，这是一个很典型的“后生”回波个例 (Back-building)。同时，在宜昌雷达的东南方向又产生了一对流回波群，强度约 50 dBZ。22:00 左右，双多普勒雷达最佳风场反演区出现一很典型的平行于降水系统移动方向的回波带，带状回波维持近 1 小时，后逐渐变为块状回波。23 日 01:00 左右，回波带为西南—东北方向，平行于回波移动方向，在其中又存在尺度更小但强度很大的 3 个条状回波，最长的尺度为 50 km，在荆州和宜昌之间形成了很强的降水。

从整个过程的回波特征来看，对流云周围层状云的强度为 25~30 dBZ。从垂直显示来看，最大回波顶高 (10 dBZ) 一般为 10 km，最大回波强度在 5~6 km。对流云的回波强度要比层状云的大，但回波顶高差异不大。下面分析这次过程风场的中尺度结构及其与回波演变的关系。

3.3 中尺度风场结构

为了资料处理及其选取反演区域的方便，我们以宜昌雷达为坐标原点，X 轴指向正东方向，Y 轴指向正北方向，以下的回波和风场图均以该坐标为参照。首先，我们分析回波前沿一个很典型的“后生回波”的风场结构，图 5 (见图版 I) 给出了 11:25 宜昌雷达东南侧一块回波 2 km 高度上的回波强度、水平风场和散度的水平结构，其中背景颜色为回波强度。这是一条几乎与降水回波移动方向平行的回波带，长度在 100 km 左右，最大回波强度为 50 dBZ，在该回波带的西侧的弱回波区将这一回波带和另一回波带分开。从风场结构来看，该回波带的东南侧为较强的西南风，最大风速为 8 m s^{-1} ，西北侧为弱的东风，风速很小，该强回波带正好处在这两股气流形成的切变线上，该切变线在强回波区产生辐合，在强回波的西侧形成辐散。另外，比较 2 km 和 3 km 的辐散场可以看到，2 km 的辐合辐散共存，辐散区比较大，3 km 上的辐合强度与 2 km 的差不多，但辐散已经不太清楚了。这一切变线在 4 km 上还比较明显，而且回波带西北侧的风速很小，在 5 km 高度上，两侧的风场为西南风或南风，7 km 高度上风场已经比较均匀，基本为西南风，风速为 15 m s^{-1} 左右，但在强回波区存在一个比较明显的辐散区。

下面分析这一回波带风场和回波的垂直结构，图 6 (见图版 II) 给出了东西方向剖面的风场和回波强度的垂直结构。从东西方向剖面来看，回波顶高为 11 km，强回波区为一上升气流，最大上升速度为 2 m s^{-1} 。强回波的西侧为下沉气流，这一下沉气流正好与弱回波相对应，同时弱回波的西侧的另一强回波为上升气流，这是另一回波带的边缘。两条回波带有各自相当独立的风场结构，但不同回波带之间又相互影响，这种气流结构能够维持对流云形成长时间降水。从南北向的垂直剖面来看：西南风是形成上升气流的主要原因。

我们连续分析了从 11:42 到 12:31 的回波演变情况，在向东北移动的过程中，风场的结构变化不大，但回波逐渐增强，并逐渐在这一回波区的东南侧又形成了一块回波，这一新生回波在老回波的后面刚出现时 (11:19)，是一个约 10 km 长的回波块，经过 70 min 的发展，到 12:31 已成为 50 km 长的条状回波，强度为 55 dBZ，取

向也平行于回波的移动方向。图 7 (见图版 II) 是 12:08 老回波和“后生”新回波的水平风场图。值得注意的是: 这个图的区域与 11:25 相比向南移动了 10 km, 这样才能看到“后生”新回波的回波强度和风场结构。“后生”回波西侧为西南风, 东侧为南风, 这样就形成了强烈的辐合, 使得这一回波发展很快。

从以上回波分析可以看出: 中尺度切变线上的辐合是形成强回波的主要原因, 强回波的上升气流主要有西南风产生, 在这种情况下, 在回波带的后侧容易发展形成新的回波。

21:53, 在宜昌雷达东北侧也形成一条西南—东北取向的回波带, 长度至少为 100 km。从 2 km 高度上的水平风场来看 [图 8 (见图版 II)], 与 11:25 那条回波带相比, 其东南侧的风场变化不大, 但西北侧风场的方向变为东北风, 而且两块弱回波的风场基本相同, 这一切变线更加明显。辐合带与回波带相对应, 但有点偏东南。很有意思的是: 在 3 km 高度上, 回波带上端的那块回波的风场方向向逆时针方向偏转, 下端的风场方向向顺时针偏转, 到 5 km 高度上, 整个风场几乎全部变为西南风。图 9 (见图版 II) 为风场的垂直结构。

从 23 日 01:00 开始, 在宜昌和荆州之间形成了一条约 200 km 长平行于移动方向的回波带, 但在回波带中, 又有尺度不等的回波团和条状回波, 结构比较复杂。下面我们分析 03:05 时的一块回波。图 10 (见图版 II) 给出了 2 km 高度上的风场结构和散度场, 从图中可以看出: 这一回波为弓状回波, 位于西南风和东北风形成的切变区内, 2 km 高度上的辐合区也呈弓形, 基本与强回波位置对应, 但有点偏西, 使这一区域的回波得到加强发展。辐散区主要位于强回波的东侧。但这一时次的东风比较弱, 到 3 km, 风场已基本为西南风。从以上几个时次风场来看, 西南风有加强的趋势。

4 讨论

以上, 我们分析了 7 月 22~23 日暴雨过程雷达回波的结构和用双多普勒雷达反演的三维风场结构, 风场水平和垂直结构与回波强度及其演变匹配得比较好, 用双多普勒雷达资料反演的风场结构基本是合理的。从这次混合云暴雨过程的回波强度的空间分布和风场的结构来看, 在比较均匀的弱的层状云中镶嵌着较强的对流云, 层状云的“零度层亮带”比较明显, 对流云经常以回波带的形式组织起来, 对流云和周围的层状云的回波强度和风场有很大差异。回波群有其相对独立的风场结构, 在中下层发生的中尺度辐合、辐散和涡旋对混合云中对流云的发展是很重要的。但与纯对流云相比, 混合云中的对流云的生存时间比较长, 但上升气流不强, 因进入对流云的是饱和空气, 增加了凝结, 从而释放更多的潜热, 导致上升气流的加强来促进对流云的发展, 同时对流云与周围空气交换引起的水分蒸发显著减小。另外, 由于风垂直切变的存在, 使成熟的对流云的上升气流和下沉气流分开, 避免了对流云的过早的衰减。

应该指出的是: 由于这两部多普勒雷达间隔比较远, 无法得到 1.5 km 以下风场结构, 而且在风场的算法中, 要假设最低层的垂直风速为零, 这对于很接近地面高度来说是可以的, 但在这两部雷达配置下, 对垂直风场的计算会带来一定的误差。垂直风场的误差在大部分区域对水平风场影响不大。另外, 这两部配对的双多普勒雷达雷达

型号不同, 宜昌雷达是 S 波段, 荆州雷达为 C 波段。但两部雷达的波瓣宽度基本一致, 体积扫描的层数和对应的仰角完全一样, 这样就最大限度保证了取样体积的一致性。

5 结论

通过对这次暴雨过程回波强度和风场的中尺度信息的分析, 得到如下结论:

(1) 这次暴雨过程为混合性降水, 在层状云中镶嵌着对流云, 回波强度和风场分布在空间上不均匀。对流云块的分布比较复杂, 但大部分为回波带结构, 强度在 45~50 dBZ, 高度为 10~12 km, 层状云的回波强度在 30 dBZ 左右, “零度层亮带” 比较明显。混合云内层状云和对流云不论是回波强度还是风场结构都有很大差异。

(2) 本次过程 7 km 以上风场比较均匀, 为较强的西南风; 强回波区往往在较强的西南风和弱的东风或东北风形成的切变区, 中尺度切变、辐合和辐散现象大都发生在 3~4 km 高度以下, 不同回波团之间风场存在相互作用, 上升气流和下沉气流通常发生在云的不同部位。这些中尺度结构对混合云中对流云的发展很重要。

(3) 最大回波强度一般出现在 5~6 km 高度上, 然后向上和向下发展。这种现象可能与零度层亮带现象和 3~4 km 高度上的辐合有关。

(4) 不同回波群和大部分对流回波块有自己独立气流结构, 回波群和回波块之间往往存在切变。

致谢: 感谢湖北省气象局、宜昌市气象局和荆州市气象局参加“973”中国暴雨外场试验人员付出辛勤的劳动, 为本研究提供了双多普勒雷达和地面加密资料。

参 考 文 献

- 1 陶诗言、张庆云、张顺利, 1998 年长江流域洪涝灾害的气候背景和大尺度环流条件, 气候与环境研究, 1998, **3** (4), 290~299.
- 2 黄荣辉、徐予红、王鹏飞等, 1998 年长江流域特大洪涝特征及其成因探讨, 气候与环境研究, 1998, **3** (4), 300~313.
- 3 贝耐芳、赵思雄, 1998 年“二度梅”期间突发强暴雨系统的中尺度分析, 大气科学, 2002, **26** (4), 526~540.
- 4 孙建华、赵思雄, 华南“94 6”特大暴雨的中尺度对流系统及其环境场的研究, 大气科学, 2002, **26** (4), 541~557.
- 5 雷恒池、王宏、胡朝霞等, 1998 年 7 月 21 日武汉暴雨小尺度动力特征的数值模拟研究, 大气科学, 2002, **26**, 647~662.
- 6 黄美元、洪延超, 梅雨锋云系中层状云结构和降水的不均匀性, 气象学报, 1984, **42** (1), 23~30.
- 7 洪延超、黄美元、吴玉霞等, 梅雨锋云系中尺度系统的回波结构及其与暴雨的关系, 气象学报, 1987, **45** (1), 56~64.
- 8 黄美元、徐华英, 云和降水物理, 北京: 科学出版社, 1999, 268~290.
- 9 Geng, B., K. Tsuboki et al., Relationship between middle-level inflow and organization of mesoscale convective system, International GAME/HUBEX Workshop, Sapporo, Japan, 2000, 65~68.
- 10 张沛源、周海光、胡绍萍, 双多普勒雷达风场探测的可靠性研究, 应用气象学报, 2002, **13**, 485~496.
- 11 刘黎平、张沛源、梁海河等, 双多普勒雷达风场反演的误差分析和资料的质量控制, 应用气象学报, 2003,

- 14 (1), 17~29.
- 12 Hubbert, J., V. N. Bringi, and L. D. Carey, CSU-CHILL polarimetric radar measurements from a severe hail storm in Eastern Colorado, *J. Appl. Meteor.*, 1998, **37**, 749~775.
- 13 Ray Peter., S. C. Li. Ziegler, W. Bumgarner, single and multiple-Doppler observations of tornadic storms, *Mon. Wea. Rev.*, 1980, **108**, 1607~1625.

A Study of Mesoscale Wind Structures in Heavy Rainfall System of Merging Cloud with Dual-Doppler Radar

Liu Liping¹⁾, Shao Aimei²⁾, Ge Rensheng¹⁾, and Liang Haihe¹⁾

1) (*Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081*)

2) (*Department of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000*)

Abstract The Dual Doppler radar data observed by the National Key Program for Developing Basic Sciences “Research on the Formation Mechanism and Prediction Theory of Hazardous Weather over China” in 2002 are used to analyze the mesoscale structures of reflectivity and wind in the heavy rainfall system from July 22 to July 23 in middle reach of the Yangtze River over Yichang and Jingzhou region. The results show that the heavy rainfall is cause by merging cloud process. The convective clouds, which often organized in band shape, are developed within stratus cloud. The wind and reflectivity in convective cloud have obvious mesoscale structures which are different with that in stratus. The wind shear and convergence below the height of 4 km cause the heavy rainfall. The convective rainfall is often related with mesoscale wind shear, vortex, convergence and divergence.

Key words: dual doppler; heavy rainfall; wind field; meso scale