

# 用双多普勒雷达反演降水系统三维风场试验研究\*

刘黎平

(中国气象科学研究院,北京 100081)

双多普勒雷达是探测云和降水三维风场比较有效的手段,双多普勒雷达同步观测可以获取到散射体两个方向的径向速度资料,这两个方向的风场资料与其他约束条件如质量连续方程结合就可以得到风场的三维结构<sup>[1-3]</sup>,双多普勒雷达已经应用于龙卷、对流云等中尺度风场的探测和分析以及大型活动的气象保障中。

为了研究我国长江流域梅雨锋暴雨的三维中尺度结构,2001 年 6~7 月 973“中国暴雨试验研究”项目在长江中游和下游开展了梅雨锋暴雨的外场试验,在合肥、马鞍山和宜昌、荆州设置了两个双多普勒雷达观测系统,以获取暴雨系统的三维结构,这对于进一步认识梅雨锋暴雨的动力结构,提高暴雨的预报能力有重要意义。本文利用双多普勒雷达资料,分析了 2001 年 7 月 13 日切变线降水过程的三维风场结构及其与回波演变的关系。

## 1 双多普勒雷达资料处理和反演方法

2001 年 6~7 月,973“中国暴雨试验研究”外场试验长江下游的双多普勒雷达系统由设置在合肥的 WSR-98D 型 S 波段多普勒雷达和设置在马鞍山的 3830 型 C 波段多普勒雷达系统构成,两个雷达的距离为 119 km(图 1)。

本文采用的双多普勒雷达直角坐标处理方法与 1980 年 Peter<sup>[4]</sup>的方法近似,本文的反演方法简介如下:

首先进行双多普勒雷达资料的质量控制,包括回波强度、径向速度、回波位置等的对比,进行资料的回波强度和方位的调整。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资料的配对。与“共面法”相比,这种插值方法比较简单。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。

在风场反演过程中,首先假设垂直速度对径向速度的贡献为零,这样利用下式就可以计算水平风场  $U$ 、 $V$  的第一估值:

$$V_{r1} = \frac{U(X - X_{01})}{R_1} + \frac{V(Y - Y_{01})}{R_1} + \frac{(W - V_t)(Z - Z_{01})}{R_1} \quad (1)$$

$$V_{r2} = \frac{U(X - X_{02})}{R_2} + \frac{V(Y - Y_{02})}{R_2} + \frac{(W - V_t)(Z - Z_{02})}{R_2} \quad (2)$$

\* 本研究得到 973“中国暴雨试验研究”项目(G1998040909)的资助。

2002-06-27 收到,2002-10-15 收到修改稿。

$$R_1 = [(X - X_{01})^2 + (Y - Y_{01})^2 + (Z - Z_{01})^2]^{1/2} \quad (3)$$

$$R_2 = [(X - X_{02})^2 + (Y - Y_{02})^2 + (Z - Z_{02})^2]^{1/2} \quad (4)$$

式中:  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  为所反演风场的位置坐标,  $(X_{01}, Y_{01}, Z_{01})$ 、 $(X_{02}, Y_{02}, Z_{02})$  分别为两部多普勒雷达天线的位置。  $V_{r1}$ 、 $V_{r2}$  为两部雷达探测的该点的两个方向的径向速度。  $V_t$  为降水粒子的下落速度, 它可以利用回波强度进行估测:

$$V_t = 3.8 Z^{0.072} \quad (5)$$

然后利用质量连续方程计算垂直速度的第一估值:

$$\frac{\partial W}{\partial z} = - \left| \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} \right| \quad (6)$$

$$W(z = z_0) = 0 \quad (7)$$

最后将  $W$  的第一估值代入式(1) ~ (7) 重新计算  $U$ 、 $V$ 、 $W$ , 直到满足精度。

## 2 结果分析

下面以 2001 年 7 月 13 日发生在合肥、马鞍山双多普勒雷达观测区的一次暴雨过程为例, 分析该双多普勒雷达探测的三维风场的结构及其与回波演变的关系。

### 2.1 天气形式和回波演变

13 日 20:00, 500 hPa 高度上东北到华东沿海有一低槽, 槽后不断有冷空气南下, 850 hPa 上的切变线在安徽和湖北的南部。14 日 08:00 气旋波中心位于苏北淮阴, 长江中下游受其影响。15 日 08:00 500 hPa 低槽继续东移, 中低层切变线南压到南京、安庆、汉口、宜昌一线。这一次降水过程也处于东亚季风减弱期, 雨带从北向南推进, 其间有一次明显的江淮气旋活动。13 日 08:00 ~ 15 日 08:00 安徽省全椒的降水量为 104 mm, 无为降水量为 91 mm, 南京的降水量为 58 mm。从雷达回波演变图上看(图略), 本次过程为由南向北快速移动的东西取向的回波带与在当地维持的回波带合并后产生的降水过程。13 日 15:30 在合肥的南部出现形成了至少 500 km 长的沿东西方向的回波带, 最大回波强度已达 55 dBz。回波带在向北移动的过程中, 后部回波逐渐消退, 前部回波逐渐演变形成块状回波, 18:30 左右在合肥的东方也生成了一条东西方向的回波带, 此回波带基本维持在原地不动, 20:10 左右两条回波带合并, 形成西北-东南方向的强度为 55 dBz 的回波带, 长度为 500 km 左右。下面我们着重分析 19:25 回波合并前和 20:11 回波合并后的风场的三维结构。

### 2.2 双多普勒雷达反演的风场结构

图 2 给出了 13 日 20:11 两条回波合并后的不同高度的水平风场的结构。其中坐标为相对于合肥雷达的位置, 水平坐标的正值表示在合肥雷达的东侧, 垂直坐标的正值表示在雷达的北侧。在这一时刻, 两条雨带已完全合并, 与上一时刻相比, 反演区东侧的回波得到明显的加强。在 2 km 高度上, 东西取向的回波带的最大回波强度为 55 dBz, 在反演区的东侧, 回波带南侧的偏南风 and 北侧的偏北风在回波的北侧形成一条东西向的辐合带, 东侧的辐合带北侧的风很小, 这一辐合带与加强的回波相对应; 在反演区的西侧, 南风直接穿过回波带, 在西南角形成切变线和辐合带。在 4 km 高度上, 回波北侧的气流加强,

使 2 km 上的两条辐合带合并为一条,基本与回波中心重合,回波中心两侧的风场方向大致相反。该辐合带在 4 km 处最强。在 10 km 高度上,回波强度为 40 dBz 的回波中心与辐散带相配合,形成了很强的出流,在这一层北侧的气流变为很强的南风,从垂直结构来看,这是回波中心南侧的南风直接穿过云体,形成上升气流的主体,最后从云的北侧流出。

图 3 给出了风场的垂直结构。从垂直于回波带的垂直剖面结构来看,上升气流主要在强的回波中心。在 2 km 高度上,南风直接穿过云体,3~5 km 上的南风在云中部进入云体,形成上升气流,然后在云顶北侧流出云体。在 6~7 km 高度层,云两侧的风速都很小,然后,两侧的风改变了方向。从沿平行于雨带的垂直剖面的结构来看,在云的成熟期,雨带大部分区域为上升气流,上升气流最强的区域与最强的回波中心很一致。

为了检验反演风场的合理性,我们将以上风场反演结果与天气图进行了比较,分析云的环境场与反演的云体周围场的关系。在 20:11 的降水系统为一条雨带,比较容易与 20:00 的天气图进行比较。850 hPa 切变线南侧为南风,北侧为东风,这与 2 km 高度上反演的风场的南侧和北侧风一致;200 hPa 高度上长江以南的西北风以及北部的西南风,及沿江的辐散区正好与我们反演的 10 km 上的辐散相对应。

### 3 讨论和结论

本文利用 2001 年 973“中国暴雨试验研究”外场试验的合肥-马鞍山的双多普勒雷达资料,分析了一次切变线降水过程的三维风场的中尺度结构,并与回波强度和天气图进行了比较。结果表明:在两个回波带合并时,回波带之间存在与回波带平行的风切变和辐合;在合并后,雨带的下层存在强烈的辐合,上层为辐散,从南侧进入云体的高温高湿气流穿过云体,形成上升气流的主体,最后在上层从北侧流出,上升气流区与强回波区相配合。反演的云边缘的风场方向与降水的环境风场基本一致。虽然,该双多普勒雷达的距离配置不是特别理想,但反演出的风场还比较合理。

### 参考文献

- 1 Lhermitte R M, Miller L J. Doppler radar meteorology for the observation of convective storms. Preprints of 14th Radar Meteorology Conference, Tucson, Amer. Meteor. Soc. 1970. 133~138.
- 2 Doviak R J, Ray P S. Error estimation in wind fields derived from dual-Doppler radar measurement. *J. Applied Meteor.*, 1976, 15: 868~878.
- 3 Testud J, Chong M. Three-dimensional wind field analysis from dual-Doppler radar data, Part I: filtering, interpolating and differentiating the raw data. *J. of Climate and Applied Meteorology*, 1983, 22: 1204~1226.
- 4 Ray P S, Li C, Bumgarner Z W, et al. Single and multiple-Doppler observations of tornadic storms. *Mon. Wea. Rev.*, 1980, 108: 1607~1625.