

文章编号: 1000-2022(2003) 03-0358-06

## 应用单多普勒雷达资料反演风场作暴雨中尺度分析

陈 列, 寿绍文, 林开平, 李 柏

(南京气象学院 大气科学系, 江苏 南京 210044)

**摘 要:** 针对 2002 年 6 月 23 日发生在安徽西部的一次暴雨过程, 以有限的探空资料作为大尺度背景场, 应用合肥 CINRAD-98D 多普勒雷达资料, 通过准四维变分分析方法进行反演, 获得了不易被常规探测到的中小尺度三维风场, 由此分析了引起强降水的中尺度天气系统。指出暴雨中心位于风速切变的下方, 同时上空也伴随辐合中心, 以及正涡度极大值。分析结果表明, 变分法是一种较为准确的从雷达资料中提取三维风场的方法。利用雷达资料反映中尺度天气系统, 同时又加入大尺度的背景场作为基础, 两者相互弥补, 能较真实地反映实际天气状况。在气象预报中有效地应用多普勒雷达资料, 有助于研究更为细致的中小尺度天气系统结构, 而且也可为中小尺度数值预报模式提供准确的初始场。

**关键词:** 中尺度暴雨; 多普勒雷达资料反演; 变分法

**中图分类号:** P458.2      **文献标识码:** A

暴雨通常是在一定大尺度背景下, 由中尺度天气系统直接引起的。在现代气象预报中, 大尺度流场(如中纬度气旋)可以通过使用常规无线电探空网、地面测站网以及卫星探测等手段进行测定, 并可用大尺度数值预报模式对其较好地预报。但是对中小尺度天气系统的观测还比较困难, 主要是缺乏时空密度足够大的中尺度观测网和观测手段。多普勒天气雷达是最有用的大气探测工具之一, 它能进行回波强度和径向风速的测量, 且具有较高时空解析能力, 是目前唯一能观测小尺度涡流四维结构的设备。然而, 多普勒雷达的探测并不能直接测量到三维风场, 必须通过对多普勒雷达观测资料的反演才能获得可供分析的风场。为了能获得一个更为完整、更能被人理解和便于分析的大气结构, 也为了给风暴的数值模拟提供理想的初始场, 了解完整的风场是十分必要的。因此, 如何将多普勒雷达探测资料转化成数值预报初始场的研究任务便摆在人们面前。近几年来, 已经发展了一系列的技术, 试图由单多普勒雷达观测资料来反演完整的三维风场, 这些方法为在数值预报初始场中使用多普勒雷达观测资料奠定了基础。

用常规探空网资料分析 2002 年 6 月 23 日发生在安徽西部霍山等地的一次中尺度暴雨过程时发现, 暴雨中心附近并无明显的中尺度系统, 因此难以确切地解释中尺度暴雨中心的成

收稿日期: 2002-11-25; 改回日期: 2003-02-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(40075009); 国家自然科学基金项目(40205008); 科学技术部社会公益研究专项资金项目(37020)

作者简介: 陈 列(1977-), 男, 浙江绍兴人, 硕士生, 研究方向: 中尺度天气动力学。

因。为此,试图利用合肥CINRAD-98D多普勒雷达资料来反演出风场特征,从而对暴雨的中尺度发生发展过程进行探讨。结果表明,用变分法可以较为准确地从雷达资料中提取三维风场。它能很好地反映中尺度天气系统,十分清晰地显示出暴雨中心与风速切变、辐合中心,以及正涡度极大值的密切关系。初步体会到由多普勒雷达资料反演风场,在暴雨和中尺度天气分析与数值预报中的令人鼓舞的应用前景。

## 1 暴雨过程实例分析

### 1.1 暴雨过程概况及大形势背景

2002年6月23日,江淮地区进入梅雨季节,当日长江、淮河流域普降大雨,主要降水中心位于安徽西部、河南南部、湖北东部以及湖南大部,特别是商城、霍山、桑植三地23日24h降水量都大于100mm。从23日20时500hPa高空天气形势(图1)来看,长江流域的上空分布着长短不一的槽线,特别值得注意的是位于114°E和109°E的两条槽线。两个降水中心分别位于它们的前方,这表明大尺度的天气形势有利于降水的形成。

### 1.2 中尺度暴雨分布和局地天气形势

根据降水中心商城(115.38°E, 31.80°N)、霍山(116.33°E, 31.40°N)以及合肥雷达站(117.14°E, 31.52°N)的具体地理位置分布,选取115.1~117.1°E、30.0~33.0°N,南北方向约300km、东西方向约200km的中尺度范围,来研究产生局地强降水的天气形势。图2是中尺度范围的降水量分布,并标出了此范围内降水大于40mm各个站点的具体位置。分析了23日20时由常规高空观测资料所得的850hPa面上的风速,发现风速线线条平滑,反映不出与降水有直接关系的天气形势。另外流线、散度、涡度的分布也有与之类似的结果(图略)。

总之,可以从常规资料中大体了解到形成降水的天气背景,但在相同的背景条件下,为什么商城、霍山有暴雨形成,就很难从以上的资料中找到答案,只有借助多普勒雷达的探测特性,对中小尺度范围进行研究,才能从中了解到更为细致的天气系统。下面利用多普勒雷达资料,反演出中尺度范围风场,配合大尺度天气形势背景,再来研究商城、霍山两地产生暴雨的原因。

## 2 用多普勒雷达资料反演风场的方法及资料选取

### 2.1 反演方法

本文采用准四维变分分析方法<sup>[1-2]</sup>。由于雷达资料一般在球坐标网格上给出,反演后的风

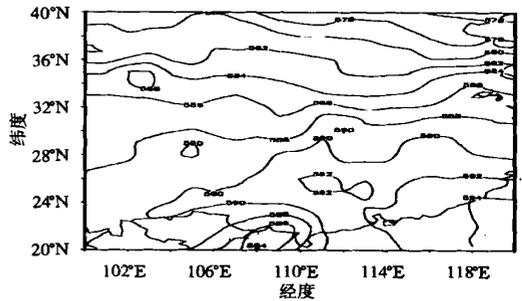


图1 23日20时500hPa位势高度分布

Fig. 1 The distribution of 500 hPa geopotential height at 20:00 June 23

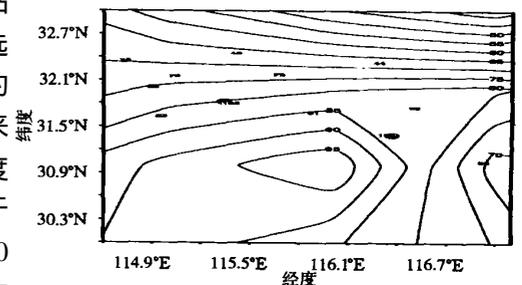


图2 23日24h中尺度范围降水量分布  
(·表示降水中心商城、霍山)

Fig. 2 The distribution of 24-hour meso-scale rainfall on June 23 (Dots denote Shangcheng and Huoshan centers of rainfall respectively)

速分量  $u$ 、 $v$ 、 $w$  还须插值到直角坐标上去, 在远离雷达的地区, 相邻两个资料点的切向距离较大, 但径向速度不是一个标量, 插值间距较大是不适宜的。而这种方法可以直接获取直角坐标系中格点上的风速, 避开了将观测资料由球坐标网格向直角坐标网格的插值分析过程以及由此而产生的问题。但当计算网格较小时, 许多网格体内没有观测值, 分析的结果会有不连续现象。为了解决这一问题, 先用粗网格(格距扩大 2 倍)作分析, 然后再缩小格距。另外, 当实际风与径向方向垂直时, 雷达不能测量到实际风的大小, 为此加入了背景风场, 以弥补雷达探测的不足。

具体做法如下: 假设待反演的直角坐标网格上的 3 个风分量为  $u$ 、 $v$ 、 $w$ , 使如下定义的目标泛函  $J$  取极小值

$$J(u, v, w) = \sum_{m=1}^M p_1 [R(u, v, w) - v_r^{\text{obs}}]_m^2 + \sum_{i,j,k} [p_2 B_{i,j,k}^2 + p_3 C_{i,j,k}^2 + p_4 E_{i,j,k}^2 + p_5 (\nabla \cdot V)_{i,j,k}^2 + p_6 \zeta_{i,j,k} + p_7 S_{i,j,k}^2] \quad (1)$$

$$\text{令 } J_1^2 = \sum_{m=1}^M [R(u, v, w) - v_r^{\text{obs}}]_m^2 \quad (2)$$

其中:  $v_r^{\text{obs}}$  是雷达观测速度,  $R(u, v, w)$  是反演计算后得到的雷达测点处的总风速, 它分两步获得: (1) 由直角坐标网格点上的  $u$ 、 $v$ 、 $w$  用线性内插计算该网格体包含的测点  $m$  处的  $u_m$ 、 $v_m$ 、 $w_m$ , 具体算法是找到第  $m$  个雷达测点所处的网格体, 利用该网格体包含的 8 个格点的  $u$ 、 $v$ 、 $w$  作线性内插; (2) 由  $u_m$ 、 $v_m$ 、 $w_m$  的平方和开平方后合成  $R(u, v, w)$ 。显然, 目标函数第一部分的含义是要求反演的风矢量场插值计算的径向风速与观测值尽量接近, 同时也直接获得了直角坐标上的三维风速。令

$$J_b^2 = B^2 = (u - u_b)^2 + (v - v_b)^2 + \mu(w - w_b)^2 \quad (3)$$

下标为  $b$  的量表示预先给出的背景场(获取方法在下文具体说明),  $\mu$  是权重系数, 取 10.0(增加垂直风速的比重)。令

$$J_c = C = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} - qw \quad (4)$$

(4) 式是质量守恒方程,  $q = -\frac{\partial \rho}{\partial z}$ , 对标准大气  $q = 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ 。令

$$J_E = E = \left(\frac{\partial v_r}{\partial r}\right)^{\text{obs}} + \frac{\partial w_r}{\partial x} + \frac{\partial v_r}{\partial y} + \frac{\partial v_r}{\partial z} - \frac{v\hat{\phi} + v\hat{\theta}}{r} \quad (5)$$

(5) 式是径向分量的动量守恒方程, 并运用了三维无辐散假设。令

$$J_s = \nabla \cdot V = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \quad (6)$$

(6) 式是水平散度的垂直分量。令

$$J_6 = \zeta = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \quad (7)$$

(7) 式是水平涡度的垂直分量。  $S^2 = S_u^2 + S_v^2 + S_w^2$ , 令

$$J_{su} = S_u = u^{i+1,j,k} + u^{i-1,j,k} + u^{i,j+1,k} + u^{i,j-1,k} + u^{i,j,k+1} + u^{i,j,k-1} - 6u^{i,j,k} \quad (8)$$

$S$  是对  $u$ 、 $v$ 、 $w$  的三维平滑量,  $S_v^2$  和  $S_w^2$  也有类似公式。

在目标函数中的各个  $P$  ( $n=1 \sim 7$ ) 分别是权重系数, 按各项的方差估计值的倒数给出。将目标函数分别对  $u$ 、 $v$ 、 $w$  求导, 并且  $u$ 、 $v$ 、 $w$  相互独立, 得到各自的梯度, 分别如下

$$\left(\frac{\partial J_1^2}{\partial u}\right)_{i,j,k} = 2s_1s_2s_3 \frac{x}{r} [R(u, v, w) - v_r^{\text{obs}}]_{m_0} \quad (9)$$

其中  $s_1, s_2, s_3$  分别是格点  $(i, j, k)$  与该处网格体内测点在  $x, y, z$  方向的距离差值除以网格距得到的比值。

$$\left(\frac{\partial J_b^2}{\partial u}\right)_{i,j,k} = 2(u - u_b), \quad (10)$$

$$\left(\frac{\partial J_c^2}{\partial u}\right)_{i,j,k} = -2\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial z} - q \frac{\partial w}{\partial x}\right), \quad (11)$$

$$\left(\frac{\partial J_E^2}{\partial u}\right)_{i,j,k} = 2J_E \left[ \frac{x}{r} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) - \frac{2}{r} (u - v_r \frac{x}{r}) \right]. \quad (12)$$

为了计算精确, (11)、(12) 式用到了 1970 年由 Sasaki<sup>[13]</sup> 提出的公式  $\alpha \nabla \beta = -\beta \nabla \alpha$ , 这样避免使 (11) 式直接为零, 同时也提高了 (12) 式的精度, 这样有助于加快收敛速度。(12) 式中的  $v_r$  由  $(i, j, k)$  格点上  $u, v, w$  风速合成,  $x, r$  是已知量, 由每个格点的具体坐标值决定。

$$\left(\frac{\partial J_5^2}{\partial u}\right)_{i,j,k} = 0, \quad \left(\frac{\partial J_6^2}{\partial u}\right)_{i,j,k} = 0, \quad (13)$$

$$\left(\frac{\partial J_{su}^2}{\partial u}\right)_{i,j,k} = -12J_{su}. \quad (14)$$

同理对  $v, w$  求偏导, 也有类似的方程获得。记  $\text{grad}J_u, \text{grad}J_v, \text{grad}J_w$  分别是目标函数 (1) 式对  $u, v, w$  求偏导的结果, 然后本文利用最优化方法和共轭方程理论, 进行如下迭代运算

$$u^1 = u^0 + \alpha^1 d^1, \quad d^1 = -\text{grad}J_u^0,$$

$$u^{k+1} = u^k + \alpha^{k+1} d^{k+1}, \quad d^{k+1} = -\text{grad}J_u^k + \beta^{k+1} d^k, \quad k = 1, 2, \dots, n_0$$

其中:  $\beta^{k+1} = \frac{|\text{grad}J_u^k|^2}{|\text{grad}J_u^{k-1}|^2}$ ,  $\alpha^n$  是最优步长。为了方便计算, 令  $\alpha^n = 0.3$ 。 $v, w$  也有相同的迭代。

这样每计算一次梯度, 进行一次迭代, 获得一个新的速度场, 再计算目标函数  $J$ , 然后又计算一次梯度, 进行一次迭代, 获得更新的速度场, 按照以上步骤不断重复, 直到目标函数  $J$  的值足够小, 就停止迭代输出最终的速度场。

## 2.2 资料选取

根据选取的中尺度范围, 定义以下直角坐标系内网格体: 原点位于合肥雷达站 (117.14 E, 31.52 N), 水平方向格距为 5 km, 向南取 30 个格点, 向北取 30 个格点, 向西取 40 个格点; 垂直方向格距 0.5 km, 向上取 6 层, 共有  $41 \times 61 \times 6$  个格点 (三维网格体结构)。

首先选取背景场资料, 利用 23 日 20 时的常规探空资料, 经过 MICAPS 系统的处理, 得到  $p$  坐标面上等距离的格点风场资料, 运用二元三点插值得到细网格点上的风速。具体做法是:

选取最靠近插值点的 9 个格点, 然后用公式  $z(x, y) = \sum_{i=p_j}^{p+2} \sum_{k=q}^{q+2} \sum_{l=q}^{q+2} \left( \frac{x - x_k}{x^i - x^k} \right) \left( \frac{y - y_l}{y^j - y^l} \right) z_{ij}$  计

算插值点处的函数近似值, 再对垂直方向运用一元三点插值。具体做法是: 选取最靠近插值点的三个结点, 用抛物插值公式计算插值点上的函数值, 得到直角坐标系各个网格点上的风速。

其次选取 23 日 20 时合肥 CINRAD-98D 多普勒雷达资料, 根据强降水的具体位置, 取方位角  $180.0^\circ \sim 360.0^\circ$  (以  $y$  轴为正北方向, 顺时针旋转, 间隔约为  $1.0^\circ$ ), 仰角  $0.62^\circ \sim 19.24^\circ$  (间隔不等) 共 7 层 (仰角大于  $5^\circ$  时, 计算出水平径向风速; 小于  $5^\circ$  时则直接近似取雷达径向风速), 径向风速库长 250 m, 探测半径 230 km。这样本文就不考虑垂直风速影响, 即认为垂直风速为

零。

反演时,考虑到背景场较为粗略,所以目标函数  $J$  中令  $P_1 = 1.0$ 、 $P_2 = 0.01$ ,这样做是为了使反演值尽量接近雷达探测值,计算梯度时令  $P_1 = 0.1$ 、 $P_2 = 0.01$ ,这样做使风速缓慢接近真值,虽减慢了收敛速度但可以提高精度。

### 3 反演的中尺度三维风场分析

根据反演的风场,通过计算选取接近 850 hPa 等压面,高度约 1 500 m 处的风场,得到如下几张图(图 3)。图 3a 是反演的 23 日 20 时 1 500 m 高度的风速分布,强降水中心位于风速切变最大的区域和低空急流(最大风速达到 12 m/s 以上)的左侧;图 3b 是反演的 23 日 20 时 1 500 m 高度的流线分布,强降水中心北侧有西北气流的干冷空气输送,南侧有西南气流的暖湿空气输送,两股气流的汇合带正好处在强降水中心的上空;图 3c 是反演的 23 日 20 时 1 500 m 高度的散度分布,强降水中心和辐合中心虽然对应的不是很好,但强降水中心还是处在辐合带中,说明存在上升气流,降水条件极为有利;图 3d 是反演的 23 日 20 时 1 500 m 高度的涡度分布,强降水中心的位置也正是正涡度中心,在流场图中虽然没有明显的气旋或涡旋存在,但从计算的涡度可以看出,强降水中心上空的气旋结构还是很明显的。从反演获得的风场,通过计算可以看出,正是由于各种中尺度天气系统的存在,才导致形成强降水中心,而这些天气形势(如风速切变带、风场辐合区、正涡度中心区)由于尺度较小,在大尺度常规探测中都被平滑掉了,现在利用多普勒雷达观测资料,重新体现了中小尺度强降水的中尺度特征。

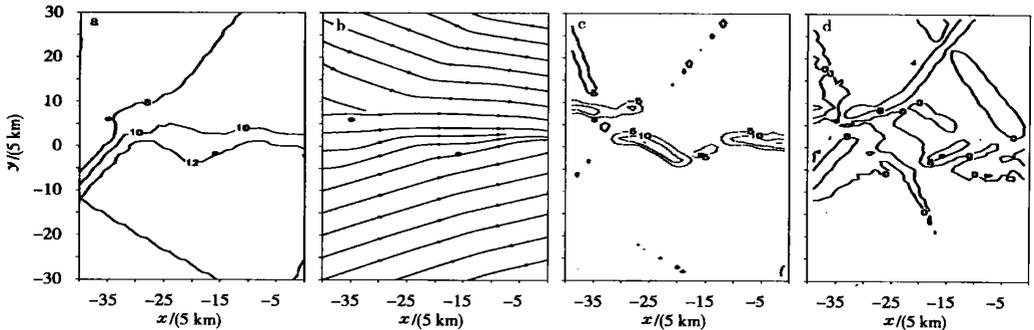


图 3 反演后 23 日 20 时 1 500 m 高度上的风速(a)、流线(b)、散度(c)、涡度(d)分布  
(·表示降水中心商城、霍山,坐标原点是雷达站合肥,每 5 km 取一个格点)

Fig. 3 The distribution of retrieved wind speed(a), streamline(b), divergence(c) and vorticity(d) at 1 500 m at 20:00 June 23 (Dots denote Shangcheng and Huoshan centers of rainfall respectively. The coordinate is centered at radar site in Hefei and the grid-space is taken as 5 km)

### 4 结 论

本文用有限的探空资料作为大尺度背景场,利用多普勒雷达资料,通过准四维变分分析方法进行反演,获得了不易被常规资料探测到的中小尺度三维风场,由此分析了引起小范围强降水的天气系统。指出强降水中心位于风速切变最大的区域和低空急流的左侧;强降水中心北侧有西北气流的干冷空气输送,南侧有西南气流的暖湿空气输送,两股气流的汇合带正好处在强降水中心的上空;强降水中心处在辐合上升区中;强降水中心上空有明显的气旋结构。由此可见,正是由于各种中尺度天气特征的存在,才导致形成强降水中心。而这些中尺度天气特征在

大尺度常规资料分析中都不能被发现,利用多普勒雷达观测资料,才将它们显现出来。因此在气象预报中有效地应用多普勒雷达资料,有助于研究更为细致的中小尺度天气系统结构,而且也可对中小尺度数值预报模式提供准确的初始场。

### 参考文献:

- [1] 邱崇践,余金香.多普勒雷达资料对中尺度系统短期预报的改进[J].气象学报,2000,58(2):244-249.
- [2] 邱崇践.由单多普勒雷达探测资料反演风矢量的变分方法[J].兰州大学学报,1999,35(3):183-187.
- [3] Sasaki. Some basic formalisms in numerical variational analysis[J]. Mon Wea Rev, 1970, 98(12): 875-883.

## Meso-scale Rainstorm Analysis by Using Retrieved Wind Field from Single Doppler Radar

CHEN Lie, SHOU Shao-wen, LIN Kai-ping, LI Bai

(Department of Atmospheric Sciences, NIM, Nanjing 210044, China)

**Abstract:** Studied is a rainstorm event, which occurs in the west of Anhui Province on June 23, 2002. By taking the finite sonde data as large-scale background field, the 3-D small and meso-scale wind field, which is very difficult to be acquired by regular sonde data, are retrieved in use of quasi-4-D variation analysis together with the aid of CINRAD-98D Doppler radar data in Hefei. Then the meso-scale weather system inducing strong precipitation is investigated. It is pointed out that the rainstorm center is under the wind shear, above which convergence center and the maximum positive vorticity exist. Results show that the variation method is an efficient way to retrieve 3-D wind field data from Doppler radar data. Using the radar data to reflect the meso-scale synoptic system and taking large-scale background fields into consideration, the method embodies the practical weather very well through the mutual implementing between them. The effective application of Doppler radar data into weather forecast is very helpful to explore the more detailed structure of meso-scale synoptic system and provide more exact initial field for meso-scale numerical forecast model.

**Key words:** meso-scale rainstorm; retrieval of Doppler radar data; adjoint method