

# 静止锋附近中尺度流场运动学特征

戴铁丕 陈明<sup>①</sup> 梁汉明 陈钟荣

(南京气象学院, 210035)

## 提 要

利用多普勒天气雷达收集到的资料,分析了江淮流域大暴雨后期静止锋附近风场的中尺度结构特征。结果表明:静止锋附近的近地面层为冷平流,再往上为暖平流。低层吹东北风,随着高度增大,风速减小。在2km高度附近,风速最小,以后转为西南风。分析还发现,在低层可能存在垂直环流和辐散,其上则为辐合。

**关键词:** 多普勒天气雷达 径向速度 风场 暴雨

## 引 言

用天气学理论和天气雷达资料分析暴雨形成机制的论著很多<sup>[1-3]</sup>,但使用的多为天气图和常规雷达资料,后者仅有一个回波强度信息量,难以预报回波复杂的移动规律。若用天气图或中小尺度风场资料作回波外推预报,由于与雷达回波资料时空上常不同步,限制了预报精度。

多普勒天气雷达是一种很有效的大气探测工具,它比常规天气雷达有着明显优势,能同时探测到回波强度和流场资料,在时空上取样完全同步。因此可以较客观地分析出回波移动规律。

Browning 和 Wexler<sup>[4]</sup>及张沛源等<sup>[5]</sup>利用多普勒天气雷达资料分析了风场的运动学特征,文献[6]则讨论了多普勒天气雷达资料在气象上的应用。但在国内利用天气多普勒雷达资料反演风场运动学特征,特别是分析暴雨系统中尺度流场结构特征尚未见到公开报导。本文利用1991年7月11日江淮流域大暴雨后期探测到的多普勒天气雷达径向速度资料,利用VAD技术和谐波分析方法反演得到风场,及相应时间回波等资料,分析暴雨形

成、维持、移出南京地区的过程。

## 1 资料和处理

### 1.1 资料

多普勒天气雷达资料:取用1991年7月11日07时到19时13个时次的径向速度和回波强度图片资料。

探空资料:用1991年7月11日08时探空资料,获取1—5km高空的风资料。

天气图资料:选用1991年7月11—13日08时和14时的地面天气图及相应时次的850、700、500hPa高空天气图。

降水实况资料:选取1991年7月11日逐时降水量资料,详见附表。

附表 南京地区1991年7月10日21时—11日20时逐时降水量(R)

时间	R/mm	时间	R/mm	时间	R/mm	时间	R/mm
21时	0.1	3时	2.9	9时	2.9	15时	0.5
22时	1.0	4时	6.0	10时	5.5	16时	0.2
23时	2.4	5时	3.6	11时	4.8	17时	0.2
24时	3.3	6时	13.7	12时	4.7	18时	0.1
1时	13.5	7时	17.5	13时	3.1	19时	0.1
2时	6.7	8时	8.4	14时	2.7	20时	0

### 1.2 径向速度预处理

由多普勒雷达探测原理可知,当多普勒雷达的收发谱线相重叠时会产生测速模糊,

<sup>①</sup> 现在海南省气象局

从而造成测速误差。为此在实际工作中必须据最大不模糊速度  $V_n$  和雷达测得的径向速度  $V_m$  来求得目标物实际径向速度  $V_r$ 。具体计算公式为：

$$V_r = V_m \pm 2NV_n$$

式中  $N$  称为 Nyquist 数, 取值为  $0, \pm 1, \pm 2, \dots$ 。为了利用下文提到的 VAD 技术计算得到水平风向、风速和进行流线分析, 还把实际径向速度图片资料人工描绘成径向速度场资料。

### 1.3 精度

为了考察多普勒天气雷达探测资料精度, 本文把由雷达探测得到的风场垂直剖面资料与相应时间由探空得到的风场垂直廓线资料进行比较。图1为1991年7月11日07时用两种探测方法在  $240^\circ-60^\circ$  方位的垂直剖面上的水平风矢量图。图中沿中心垂直方向的风的风矢由探空资料得到, 其它的风资料为单部多普勒雷达探测资料, 利用下面提到的式(4)~(9)得到, 箭头所示为风向。由图可见, 由雷达得到的风垂直剖面与探空观测资料较为一致, 说明由多普勒雷达测得的风场资料具有一定精度。

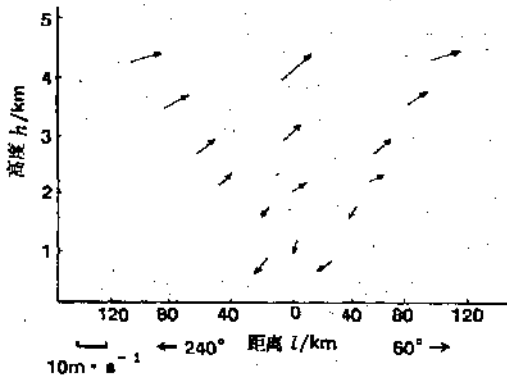


图1 水平风垂直剖面图  
沿中心垂直方向的由探空资料得到,  
其它的风资料均由单部多普勒探测资料导出

## 2 原理和计算公式

单部多普勒天气雷达通过 VAD 技术可以测量大范围降水区中的风场运动学特征。

VAD 技术即速度-方位显示法, 即雷达天线以某一固定仰角作方位扫描, 并把在某一距离和方位上探测到的降水粒子的径向速度  $V_r(\beta)$  记录并显示出来。径向速度<sup>[7]</sup>, 即实际风速在雷达波束上的投影, 计算式为:

$$V_r(\beta) = -V_h(\beta)\cos(\beta - \beta_0) \cos\alpha + V_f(\beta)\sin\alpha \quad (1)$$

当流场均匀, 即  $V_h(\beta) = \text{常数}$ ,  $V_f(\beta) = 0$  时, 由式(1)知道  $V_r(\beta)$  随方位角  $\beta$  作余弦变化, 式中  $\alpha, \beta_0, V_f$  分别代表雷达天线仰角、风的来向与正北之间夹角、粒子平均下落速度。因为当雷达天线指向水平风速来向时, 径向速度达极大值, 而当雷达天线指向水平风速去向时, 径向速度为最小值, 故由式(1)很容易推得水平风速和粒子平均下落速度为

$$\bar{V}_h = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{2 \cos\alpha} \quad (2)$$

$$V_f = \frac{V_{\max} + V_{\min}}{2 \sin\alpha} \quad (3)$$

式(2)、(3)是在水平流场均匀情况下导出的公式, 对于不均匀流场, 若假定水平风为线性风场, 对 VAD 探测得到的资料进行谐波分析, 可得到更多的水平风场信息<sup>[4][7]</sup>, 计算式为

$$\text{水平辐散} \quad \text{div} \vec{V}_h = -\frac{a_0}{r \cos\alpha} + \frac{2V_{f0} \text{tg}\alpha}{r} \quad (4)$$

$$\text{水平风速} \quad V_h = (a_1^2 + b_1^2)^{1/2} / \cos\alpha \quad (5)$$

水平风向

$$\beta_0 = \begin{cases} \frac{\pi}{2} - \text{tg}^{-1} \frac{a_1}{b_1} & (b_1 < 0) \\ \frac{3\pi}{2} - \text{tg}^{-1} \frac{a_1}{b_1} & (b_1 > 0) \end{cases} \quad (6)$$

水平风形变

$$\text{Def} \vec{V}_h = -2(a_2^2 + b_2^2)^{1/2} / r \cos\alpha \quad (7)$$

形变轴取向角

$$r = \begin{cases} \frac{\pi}{4} - \frac{1}{2} \operatorname{tg}^{-1} \frac{a_2}{b_2} & (b_2 < 0) \\ \frac{3\pi}{4} - \frac{1}{2} \operatorname{tg}^{-1} \frac{a_2}{b_2} & (b_2 > 0) \end{cases} \quad (8)$$

上述各式中  $a_0, a_1, a_2, b_1, b_2$  为傅氏系数, 可用反演法求得, 若雷达每隔  $10^\circ$  方位角测量一个  $V_r(\beta)$  值, 则扫描一周后可得 36 个  $V_r(\beta)$  值, 则傅氏系数可由下式确定

$$\begin{cases} a_0 = \frac{1}{18} \sum_{i=1}^{36} V_{ri} \\ a_n = \frac{1}{18} \sum_{i=1}^{36} V_{ri} \sin n\beta_i \\ b_n = \frac{1}{18} \sum_{i=1}^{36} V_{ri} \cos n\beta_i \end{cases} \quad (9)$$

式中  $n=1, 2$ , 下标  $i$  为取值序列。

### 3 暴雨区中尺度流场运动学特征

对这场暴雨天气多普勒雷达每小时一次探测收集到了一些流场和回波强度资料, 经分析发现引发这场暴雨的中尺度流场具有下述特征。

3.1 按照多普勒雷达零径向速度线和正、负径向速度线分布特征, 可以分析出南京地区附近高低空流场特征。图 2a 是雷达天线探测仰角为  $2.5^\circ$  时的径向速度分布图, 由图可见, 7 时有两条零径向速度线, 一条呈闭合曲线, 位于南京西南方  $40\text{km}$  附近。由于实际风向与零径向速度线垂直和趋近区 (+), 即粒子向雷达站方向运动, 远离区 (-), 即粒子离开雷达站方向运动, 加上 PPI 显示不同距离反映不同高度, 因此该闭合曲线说明测站附近  $1500\text{--}2000\text{m}$  高度附近明显存在风向切变并可能有垂直环流存在。另一条在南京东北方, 呈 NW—SE 走向, 与前述分析同样理由, 即可认为在距测站  $40\text{km}$  左右的低空为东北风, 后文计算表明, 约在  $0.8\text{km}$  高度上, 风速达  $10\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 即出现了超低空急流。另外由于图 2 西南方  $100\text{km}$  以外为趋近区 (+), 即粒子向雷达站方向运动, 因此可判断高空吹西

南风。众所周知, 低空急流是向暴雨区输送水汽的主要通道, 低空急流的形成与维持有利于暴雨的水汽供应, 加上垂直环流促使上升气流存在, 把低层湿热不稳定能量带到高空, 这一切使南京地区暴雨得到较长时间维持。

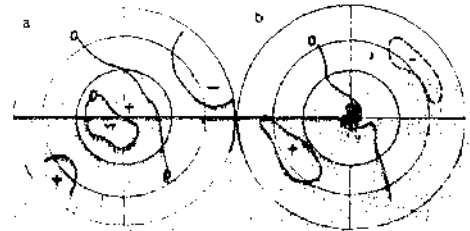


图2 1991年7月11日07时多普勒径向速度图

a. 仰角  $2.5^\circ$ , 距离每圈  $20\text{km}$

b. 仰角  $5^\circ$ , 距离每圈  $20\text{km}$

3.2 分析探测仰角  $5^\circ$  的 07 时多普勒速度分布图可见 (图 2b), 低层为东北风, 高层为西南风, 即基本气流方向随高度增加顺转。表明高空存在暖平流, 这与第一点分析是一致的。正是由于暖平流的存在, 整个气层增温抬升, 促使上升气流增强。低层由于东北气流侵入而出现了冷平流, 水平风的垂直切变在  $2.0\text{--}2.2\text{km}$  之间, 说明这一层内上下有动量交换, 这种交换过程很可能激发起波动, 引起前方降水的波动, 这些对暴雨有重要作用。

3.3 据多普勒径向速度资料, 在一定假定条件下, 利用 VAD 即速度方位显示探测技术, 固定取样距离, 改变天线仰角探测, 再进行谐波分析可以得到水平风向、风速垂直分布资料。图 4 即为 1991 年 7 月 11 日江淮大暴雨后期用 VAD 方法得到的不同时间的风向风速垂直廓线。

由图可见, 在 13 时以前 (图 3b),  $2\text{km}$  以下风向为东北风,  $2\text{km}$  以上风向迅速顺转为西南风, 与此同时, 在图 3a 风速垂直剖面图上, 低层吹东北风, 随高度增加风速增大, 在  $800\text{m}$  左右高度上风速达最大, 约  $10\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 再往上, 风速迅速减小到  $1\text{--}2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 尔后又转变为西南风且随高度增大, 风速猛增。实际

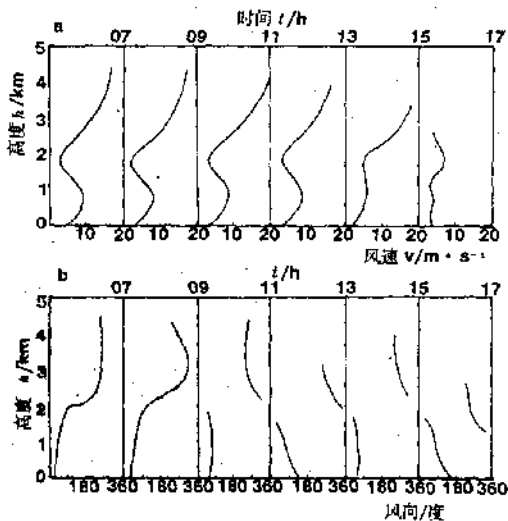


图3 风向、风速垂直廓线随时间变化

上,这种风场垂直分布是典型的逆切变形势。在这种天气条件下,暴雨区好象锁在一个固定位置,从回波场整体上讲,它准静止不动,于是大雨倾盆而下。13时以后这种逆切变天气条件变化,风向开始逆转,由东风转为北风,弱冷空气南下,回波带南压,暴雨中心向南移动。

3.4 暴雨区在近地面层通常存在辐散区,再往上则为辐合,为此利用 VAD 探测技术和谐波分析方法,式(4),(9),计算了散度场,图4即为散度时间-高度剖面图。式(4)中粒子平均下落速度  $V_f$  值是采用历史上大量对流性降水雨滴谱资料,利用末速度和水滴直径  $D$  统计关系式  $V_f(D) = \alpha D^\beta$  得到的。

由图可见,11时以前2km 以下为强辐散区,最大值达  $1.5 \times 10^{-4} s^{-1}$ ,而3km 以上则为

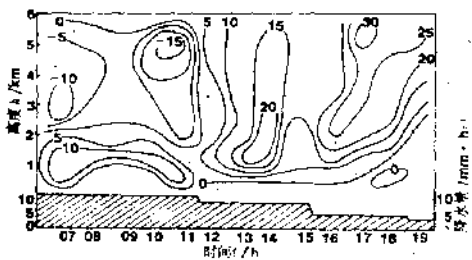


图4 散度时间-高度剖面图

辐合区。11时以后这种散度场分布形势变化,从低层到高层均出现辐散,这种散度场垂直分布特征,与文献[4]得到的结果很相近,近地面层出现辐散是由降水拖曳气流引起的。

3.5 降水时间长是产生暴雨的重要条件。在我们这个例子里,同时分析回波场和流场(图5)。

由图5a 可以发现,这场暴雨是由一条宽度达200余 km 弥合型絮状回波带,且由多个强回波中心产生的,由于静止锋走向与700hPa 高空风基本一致,所以回波大多是沿着静止锋东移的,即回波移向与回波带走向夹角很小,因而这条回波带维持的时间相当长。在一个个强回波中心东移过程中,南京附近接连产生暴雨。

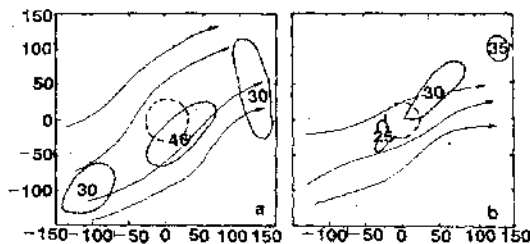


图5 流线和回波强度图  
a. 07时, b. 13时

3.6 带状回波形成暴雨,常和流场辐合中心(低压区)相配合。7月11日08时低压中心在南京西南方的黄山附近,从多普勒雷达回波强度图片资料可看到这个低压中心是回波产生源地。一个强回波在该地生成,沿静止锋东移后,这个地方又产生新生回波,这一发生源从08时至11时始终维持,南京地区附近这段时间接连下暴雨。11时后发生源东移,13时(图5b)回波带宽度已由原来(07时)的200km 变成100km,回波强度也明显减弱。随之暴雨减弱。

3.7 根据多普勒速度定义可知,0—180°轴向上的多普勒风速,就是实际风速在南北方向的分量。由不同距离处的多普勒速度就可

以得到径向风速随高度分布(图略)。由图可见,2km以下气流从北向南流动,有利于冷空气南下。2km—5km之间气流从南向北流动,说明冷空气首先是从低层侵入的。

#### 4 小结

4.1 静止锋附近存在明显的中尺度结构。近地面层为冷平流,再往上为暖平流,水平风的垂直切变在2km附近。

4.2 回波单体移向与回波带走向大体一致,逆切变、垂直环流、超低空急流、低层辐散、高层辐合有利于暴雨发展、维持。

4.3 由零径向速度线和径向速度正、负中心分布特征可以定性分析流场运动学特征,不失为一种好方法。

4.4 VAD谐波分析方法是获取雷达站周围流场运动学特征较好的方法,但必须注意适用的限制条件,当流场结构不准静止时,不能应用,因此使用该法要小心谨慎。

4.5 利用零径向速度线和正、负径向速度线分布特征反演得到的流场结构与用VAD探

测技术和谐波分析方法得到流场运动学特征两者比较一致。另外与同一时次探空资料得到的风垂直剖面又大致符合。因此用多普勒雷达探测到的流场资料是可以信赖的。

**致谢:**在完成该文过程中得到张培昌教授、汤达章教授、刘晓扬工程师帮助,特此感谢。

#### 参考文献

- 1 朱乾根,暴雨维持和传播的机制分析.南京气象学院学报,1978,8.
- 2 杨培才等,北京地区对流性暴雨回波特征的分析,大气科学,Vol. 2, No. 2, 1978.
- 3 杜秉玉,梅雨期暴雨的雷达回波特征,南京气象学院学报,1985, No. 3.
- 4 Browning, K. A. R. Wenler. The determination of kinematic properties of a wind field using doppler radar, J. Appl. met. Vol. 7 P105—113, 1968.
- 5 张沛源等,槽线附近的中尺度结构特征——多普勒天气雷达风场资料分析,气象,1991, 17(4).
- 6 汤达章等,单部多普勒雷达在气象中的应用,气象教学与科技,1986, 2.
- 7 张培昌,戴铁丕,杜秉玉,汤达章,雷达气象学,北京:气象出版社,1988.

## The Mesoscale Characteristics of Kinematics of a Wind Field near the Stationary Front

Dai Tiepi Chen Ming Liang Hanming Chen Zhongrong

(Nanjing Institute of Meteorology)

#### Abstract

The characteristics of mesoscale structures of a wind field near the stationary front in the period of rainstorm in the Jianghuai area is analysed based on the wind data of doppler radar in Nanjing Institute of Meteorology. Results indicate that there is a cold advection in the surface layer and a warm advection at the higher level near the stationary front. At low-layer wind direction is Northeast, wind speed decreased with the altitude. At the 2.0 km level wind speed reaches to the minimum and wind direction shifts to southwest, we find that vertical circulation and divergence exist at the low-level and convergence at the higher level.

**Key Words:** weather doppler radar radial speed wind field rainstorm