# 多普勒天气雷达速度 PPI 图散度分布信息提取

### 徐 芬<sup>1</sup> 夏文梅<sup>1</sup> 吴 蕾<sup>2</sup> 吴林林<sup>3</sup>

(1. 江苏省气象科学研究所,南京 210008;2. 中国气象局大气探测技术中心; 3. 安徽省气象台)

提 要:根据大面积降水回波径向速度 PPI 图像产品辐合辐散特征,提出采用中值 滤波法来剔除噪声污染和用逐点数据对称法来削弱回波缺失和距离折叠引起的误 差。在考虑了降水粒子下落速度的情况下,采用模糊定位法来提取速度图中风速性 散度特征,用直方图形式表征风向性散度特征。最后通过比较分析,说明了提取方法 可较好的表征 PPI 速度图中的散度信息,计算散度所表征的动力学特征与大面积降 水过程有较好的对应关系。

关键词:多普勒天气雷达 逐点数据对称法 模糊定位法 辐合辐散特征

## Extraction of Divergence Information from Velocity PPI Charts of Doppler Weather Radar

Xu Fen<sup>1</sup> Xia Wenmei<sup>1</sup> Wu Lei<sup>2</sup> Wu Linlin<sup>3</sup>

(1. Jiangsu Institute of Meteorological Sciences , Nanjing 210008;
2. Atmospheric Observation Technology Center; 3. Anhui Provincial Meteorological Observatory)

**Abstract**: Based on divergence characteristics in weather radar velocity PPI charts, a divergence information extracting technique is suggested. The median filtering method is used to eliminate noise contamination and one by one data symmetry technique is used to reduce the errors because of echo lacking or range folding. Considering the effect of raindrop descending speeds, fuzzy searching method is adopted for extracting wind speed determined divergence feature and histogram is used for wind direction determined divergence feature. Comparative results show that abstracting method is effective and can well display the divergence information. There is a good corresponding relationship between atmospheric dynamics features showed by the divergence and large-scale precipitation process.

**Key Words:** Doppler weather radar one by one data symmetry method fuzzy searching technique divergence characteristics

基金项目:国家自然科学基金 40665001 项目资助.

收稿日期: 2006年7月17日; 修定稿日期: 2007年8月10日

炙

#### 引 言

大面积降水的产生、维持和消散往往和中 低层的大尺度辐合辐散结构配置有关,中低层 辐合,高层辐散,有利于降水产生(或维持),中 低层辐散,高层辐合(散),不利于降水发展。 有经验的预报员或人影工作人员,往往能根据 多普勒天气雷达各仰角径向速度 PPI 图像中 的辐合辐散特征,定性地判断出各高度层的大 气辐合辐散状况,从而帮助做出短时天气预 报。若能提取出这些散度信息特征提供给预 报人员使用,将会大大减少主观人为因素。高 时间分辨率的散度信息提取也可作为一个有 较高预报价值的短时预报因子。

为了能从径向速度图像中定性、定量地 得到大气的辐合辐散结构,人们对单多普勒 径向速度 PPI 的各种图像特征做了大量的 研究分析工作。Wood 等<sup>[1-2]</sup>给出了许多风 场特征的示意图,有利于从实测径向速度 PPI图像中判断出相应的真实风场结构,但 其数值模拟的风场相对简单。夏文梅等[3]研 究了迭加风场的多普勒速度图像,通过数值 模拟,提出大尺度辐合辐散运动与冷暖平流 结合的一些图像特征,可以直观地帮助预报 员识别、判断和分析这些迭加风场。但其数 值模拟当中,没有区分风向性和风速性的辐 合辐散特征,也没有考虑粒子下落速度 V<sub>f</sub> 对散度的影响。上述研究工作对大气的辐合 辐散场和冷暖平流场大多为定性分析,未能 实现计算机对这些特征的自动识别,在实际 业务应用过程中有一定的局限性。

对径向速度资料进行定量化应用方面,目前主要有基于 VAD 技术的垂直风廓线 (VWP)产品,但是,该产品仅能提供平均风向风速随高度的变化,没有散度信息。在 VAD 方法中,因为V<sub>f</sub>实际上为雷达有效照射体积 内平均大气垂直速度 w 和雨滴在静止大气中 平均下落末速度 w。之和,因此,当雷达高仰 角探测时,V<sub>f</sub> 对径向速度 V<sub>r</sub> 的贡献不可忽略,由于 V<sub>f</sub> 的不确定及在水平方向的不均匀性,将导致利用 VAD 方法求得的水平散度有较大的误差,只有当雷达低仰角扫描或有效照射体积中粒子的垂直速度 V<sub>f</sub> 已知时,才能得到不同高度上的水平风向、风速、散度和形变等物理量的垂直结构<sup>[4]</sup>。另外,当雷达回波某一方向的缺口大于 30 度,或者总的回波缺口大于 60 度时,将导致用 VAD 技术无法提取散度值,或者提取得到的散度值误差较大。胡志群等<sup>[5]</sup>采用改善的 EVAD 技术<sup>[6]</sup>,利用修正的Gram-Schmidt 算法来计算大气平均散度,但是该方法只能提供散度值,对速度图像中辐合辐散的特征未作进一步提取。

本文根据径向速度 PPI 图像呈现出的 辐合辐散特征,提出用中值滤波法来剔除噪 声污染,用逐点数据对称法来削弱回波缺失 和距离折叠引起的误差。在上述数据质量控 制后,考虑了降水粒子下落速度,采用模糊定 位法来提取速度图中风速性散度特征,用直 方图形式表征风向性散度特征,并定量得到 大尺度天气系统的散度值。通过实例,把采 用提取方法提取出的辐合辐散特征信息与同 仰角的速度 PPI 图像进行了对比分析。结 果表明,提取方法可较为准确地识别速度图 像 PPI 上的散度特征。最后的个例分析也 表明由本文方法计算出的散度随时间与高度 的变化基本能够反映出整个降水过程的典型 动力学特征。本文的提取方法操作简单,识 别率高,易于业务使用,在实际业务应用中, 有广泛的应用价值。

#### 1 散度信息提取原理

1.1 大面积降水回波 PPI 速度图风向性辐 合辐散信息特征

多普勒速度图像分析与应用中,大尺度 运动往往是冷暖平流与大尺度辐合辐散运动 的复合风场,因此相应的多普勒径向速度分 布特征与纯粹的冷暖平流及纯粹的大尺度辐 合辐散运动相应的多普勒径向速度分布特征 有着明显的差异。夏文梅等<sup>[3]</sup>将大面积降水 的多普勒径向速度特征分成以下4种类型: (1)暖平流与风向性辐合的结合;(2)冷平 流与风向性辐合的结合;(3)暖平流与风向 性辐散的结合;(4)冷平流与风向性辐散的

结合。这4种风场叠加后在图像上呈现出的 共同特征是零速度线在显示中心一侧弯曲程 度加大,而在另一侧弯曲程度减小。

当零速度线弯向正速度区的程度大于弯 向负速度区的程度,即是风向性辐合;相反, 当零速度线弯向正速度区的程度小于弯向负 速度区的程度,即是风向性辐散。如图 1a 和 图 1b。



图 1 大面积降水回波 PPI 速度图风向性辐合辐散信息特征 a.风向性辐合 b.风向性辐散 c.风速性辐合 d.风速性辐散

1.2 大面积降水回波 PPI 速度图风速性辐合辐散信息特征

大面积降水回波 PPI 速度图中不仅包 含有风向性辐合辐散信息,还有风速性辐合 辐散信息特征,并且根据正负径向速度中心 位置、面积、中心值配置不同呈现3种特征:

(1)正负速度中心距离不同。当负速度 中心离雷达站的距离小于正速度中心离雷达 站的距离,说明低层辐合,高层辐散;相反,当 负速度中心离雷达站的距离大于正速度中心 离雷达站的距离,说明低层辐散,高层辐合。

(2)正负速度中心区域面积不同。当负速度中心区域面积大于正速度中心区域面积,辐合;相反,当负速度中心面积小于正速度中心面积,辐散。

(3) 正负速度中心值不同。当负速度中心 的绝对值大于正速度中心值,辐合;相反,当负 速度中心的绝对值小于正速度中心值,辐散。

1.3 散度值计算

根据本文方法适用大尺度风场的假设条

件和散度定义可知,散度是风场在 x 轴方向 和 y 轴方向的变化量之和,某一距离段径线 上的正负速度之和正是风场在该段径线上变 化量的体现,某一距离段多根径线上的正负 速度之和则是该面上的平均散度。由图 1 可 以看出,辐合辐散信息由风速性和风向性辐 合辐散共同提供,因此可以用以下公式来表 示:

$$d = \frac{\sum_{i=1}^{n} V_{i-} + \sum_{i=1}^{m} V_{i+}}{(n+m) \cdot R}$$
(1)

其中:n表示指定距离段内负速度个数,m表示指定距离段内正速度个数,R代表指定距 离段内平均斜距。

由于使用的雷达基数据为体积扫描基数 据,因此用公式(1)计算出的平均散度不仅代 表距离段 R 范围内的散度情况,还代表了该 距离段所在高度内的平均散度。例如计算 2.4 度仰角下 50~100km 距离圈范围内的 平均散度,该散度不仅代表 50~100kmPPI 范围内的散度,还代表了高度在 2.9~4. 1km 高度内的平均散度。 1.4 降水粒子下落速度对散度的影响

降水粒子下落速度  $V_f$  实际上为雷达有 效照射体积内平均大气垂直速度 w 和雨滴 在静止大气中平均下落末速度  $w_0$  之和,当 雷达低仰角探测时下落速度在雷达径向上的 投影可忽略不计,但当雷达高仰角探测时,  $V_f$  对径向速度  $V_f$  的贡献不可忽略,为了让 散度计算结果在各仰角层均可信,必须剔除 掉  $V_f$  在散度上造成的误差。

根据经验公式  $w_0 = 3.8Z^{0.072}$  (m • s<sup>-1</sup>), 通过雷达回波强度值来计算出下落速度,由 于本文使用的雷达基数据的雷达回波强度值 (1°×1km)和速度值(1°×0.25km)分辨率不 一样,在计算中将 4 个连续的速度距离库的 数值减去这 4 个距离库最大距离所对应的强 度值计算出的垂直速度作为该点真实径向速 度值。

#### 2 辐合辐散特征提取方法及步骤

为了有效提取径向速度 PPI 图像中的 辐合辐散特征,根据上述特征,采用不同的提 取方法或是表示方法来进行特征提取。

2.1 风向性散度特征表示方法

风向性辐合辐散特征的表现是正负速度 面积的大小,当正速度面积大于负速度面积, 则是风向性辐散;反之风向性辐合。根据这 一特点,用直方图的表现形式来表示面积大 小,直观简洁。如图 2(见彩页)所示。其中 直方图的色标与图 3(见彩页)速度色标一 致,直方图的大小代表该速度等级所占总数 的百分比,黑色为回波缺失和距离折叠的数 据个数所占百分比。

2.2 风速性散度特征提取方法及步骤

风速性辐合辐散特征主要是正负速度中

心的配置,只要能提取正负速度中心的大小、 中心区域面积、中心区距离即可判断风速性 辐合辐散。中心值大小的确定可以根据雷达 速度图像色标设置;中心区域面积大小的确 定只要知道了中心数值,在图2中即可体现 出来;距离的定位采用了模糊定位法,由于速 度图像分布较为复杂,常常是正负速度区域 交叉错乱分布,给准确定位速度中心带来了 一定困难,但是只要能确定正负速度中心距 离的相对远近,就能知道辐合辐散,而对距离 数值的准确性要求不高,因此提出用模糊定 位的方法,只要大致定位正负速度中心的距 离即可,模糊定位法具体方法步骤如下:

(1) 定正负速度色标等级(本文设置同 CINRAD/SA 雷达设置方案)。计算每个速 度等级数值个数所占总数的百分比。

(2)负速度等级绝对值最大的等级开始 逐等级计算,当第一次某速度等级的百分比 超过2%时,则认为该等级是负速度中心等 级,那些未超过2%的负速度等级认为是负 大值的零散点,不足以代表负速度中心;正速 度中心等级确定同上。指标2%的得出基于 对多幅速度图像中心的识别,作为参数可灵 活调整。

(3)定正负速度中心等级后,逐径向计算中心等级的数值个数,用所含最多个数的径向所在方位角作为该速度中心的方位角。

(4)(3)中确定的径线上符合速度中心 等级的第 n/2 个数据所在的距离库所代表的 斜距作为该速度中心的距离(n 代表该径线 上符合速度中心等级的个数)。

#### 3 个例分析

#### 3.1 资料来源

雷达资料取自连云港市雷达站 2005 年 7月10日0—12时(世界时)之间的大面积 降水雷达体扫基数据。对13个小时的520 幅速度图像做识别率统计分析表明0.5度仰 角的速度图像的散度特征识别效果不好,而 1.5°和2.4°的仰角速度图像识别率较高,统 计识别率达84.6%。由于篇幅有限,本文只 列出降水发展初期2.4度仰角的一幅速度产 品进行比较分析。

#### 3.2 质量控制

低仰角近距离范围内的径向速度受到噪 声污染,地物阻挡等原因造成的回波缺失, 148km范围内经常出现大片的距离折叠区 域等影响,给计算工作带来了较大的误差。 因此数据在进入计算前需要进行质量控制, 采用中值滤波法来剔除噪声污染,用逐点数 据对称法来减弱回波缺失和距离折叠引起的 误差。

由于多普勒天气雷达基数据存在缺测现 象,我国部分省市使用的 CINRAD/SA 雷达 低仰角的速度数据中几乎都存在较大片的距 离折叠(图像中表现紫色区域),另外低仰角 受地形阻挡影响也容易造成数据缺失。速度 回波的不完整给提取散度特征带来了一定影 响。为了减小这种影响,本文提出用逐点数 据对称法作为削弱距离折叠和回波缺失的质 量控制方法。经过该法处理后的速度数据较 客观地反映了真实场。逐点数据对称法具体 如下:

计算时每根速度径线逐距离库进行查

找,若某距离库数据缺失或是距离折叠,则相 对应位置180度处的径线相应距离库数据也 记为数据缺失或是距离折叠标志,这样做虽 然损失了部分有效数据,使得计算散度偏小, 但是有效避免了因为数据缺失或是距离折叠 的原因遮住了正(负)速度真实场,而削弱了 该处在散度上的贡献。

#### 3.3 特征提取效果及对比分析

为了与预报员看图习惯一致,本文选用 了 2.4 度 0~50km、50~75km、75~115km 的距离圈段,大致对应于平均高度 1.5km、 3km、5.5km(850hPa、700hPa、500hPa)。

图 3 的速度产品每个距离圈代表 25km, 最外圈为 15km,总距离为 115km。

图 3 中 0~50km 距离圈段内零速度线 弯向正速度区的程度小于弯向负速度区的程 度,呈风向性辐合,在图 2a 中也有所体现,负 速度区的总体个数要多于正速度区的个数; 在该距离段内正速度中心为 5~10m • s<sup>-1</sup>的 色标,负速度中心为-5~10m • s<sup>-1</sup>的色标, 正负速度中心数值一样,但是正速度中心区 面积远远大于负速度中心区,正负速度中心区 距离远近不明显,大致呈风速性辐散。图 3a 中正负速度中心区面积表现正确,表 1 中 0 ~50km 栏中正负速度中心距离的客观提取 与主观判断有所出入,但是都说明了风速性 辐散这一特征。

	$0 \sim 50  \mathrm{km}$		$50 \sim 75  \mathrm{km}$		$75 \sim 115  \mathrm{km}$	
_	提取信息	主观判断	提取信息	主观判断	提取信息	主观判断
正速度中心距离/km	28	30	71	72	96	103
负速度中心距离/km	27	21	70	71	97	99
散度值 $/10^{-4} s^{-1}$	0.25	ND	-0.43	ND	-0.84	ND

表 1 2005 年 7 月 9 日 23 时 23 秒速度 PPI 图像不同距离圈段散度特征提取对比

图 3 中 50~75km 距离圈段内很明显负 速度面积远远大于正速度面积,呈风向性辐 合,在图 2b 中也有很好的对应;并且负速度 中心值大于正速度中心值,与正速度中心等 级对应的负速度等级面积也大于正速度中心 区,但是正负速度中心区距离不好判断,总体 呈风速性辐合,这些特征在图 2b 和表 1 中 50~75km 一栏对应一致。 图 3 中 75~115km 距离圈段内很明显 呈现风速性和风向性辐合,在图 2c 和表 1 的 75~115km 栏中提取特征相一致,但是正负 速度中心距离有一定偏差。

总的来看散度提取特征与主观分析较为 一致,散度值计算结果也代表了辐合辐散程 度。这种信息提供可以给预报员有一个直观 客观的中低层大气状况,给准确制作短时预 报提供了更多可靠的信息。

3.4 降水过程分析

2005 年 7 月 10 日白天,江苏省淮北地 区出现了入汛以来一次范围最广、强度最大 的区域性大暴雨过程,共有 20 个市县出现暴雨,7 个市县达大暴雨。连云港市 17 个自动雨量站中,有 9 站达大暴雨,5 站暴雨,最大雨强达到 52.4mm • h<sup>-1</sup>。文中所计算的雨量站数据为连云港雷达站 50km 范围内自动雨量站雨量的平均值。

采用本文提出的散度计算方法绘制了当 时连云港雷达站上空的散度场,见图 4。

在降水初期雨势较弱(9日23时至10日3时),低层为较弱的辐散层,中层辐合,并 且辐合程度逐步加深,高层也是辐合区,但是 辐合程度逐步减弱。



图 4 2005 年 7 月 10 日连云港地区大暴雨过程散度曲线及雨强

降水发展中期(10日3-6时),低层大 气从辐散调整到辐合,辐合程度逐步加强,中 层仍旧为辐合层,辐合程度略微减弱,高层从 辐合转为辐散,辐散程度较弱。在此期间雨 势逐步加大。

降水发展旺盛期(10 日 6—11 时),雨强 持续 4 个小时在 20mm • h<sup>-1</sup>以上,相对应的 散度场为低层辐合,辐合程度进一步加强;8 时左右辐合值达最大,此时对应了降水最大 值;中层辐合进一步减弱,在 10—11 时呈辐 散,但辐散很弱;高层辐散区辐散进一步加 强,8 时辐散值达最大,此时也对应了降水最 大值。

随后,中低层辐合很快减弱,高层辐散层 也趋于瓦解,降水停止。在降水快要停止时, 由于回波的减少,可用于计算的速度数据急 剧减少,导致 5km 距离圈段的数据不可靠, 见图 4 中 5km 曲线末端用 0 表示(根据统计 回波缺失超过计算总数 50%时,计算结果不 可靠),遮挡了高空的散度变化特征。这也是 本文散度值计算的缺点。

综上所述,由本文方法计算出的散度随 时间与高度的变化基本能够反映出整个降水 过程的典型动力学特征:降水刚开始时,低层 辐散,中高层辐合,随后低层辐合加强,高层 出现辐散层,降水强度加大。较强降水时低 层辐合加强,中层出现无辐散区,高层辐散也 加强,高层几乎为辐散气流控制,这种低层强 辐合、中高层辐散的抽吸作用促进了上升运 动发展,导致降水增强;随着低层辐合减弱, 中层辐合的稳定出现,高层辐散层瓦解,降水 强度趋于减弱。此次过程的诊断分析结果与 朱敏华采用的文献[5,7]提出的用改善的

#### 4 结 论

本文根据大面积降水回波径向速度 PPI 图像产品辐合辐散特征,提出采用中值滤波 法来剔除噪声污染和用逐点数据对称法来削 弱回波缺失和距离折叠引起的误差。考虑了 降水粒子下落速度的情况,订正了散度计算 结果。采用模糊定位法来提取速度图中风速 性散度特征,用直方图形式表征风向性散度 特征。使用结果表明:

EVAD 技术计算的散度值诊断结果一致。

(1)特征提取对比分析发现,提取方法 可较好的表征 PPI 速度图中的散度信息。

(2)个例分析说明计算的散度所表征的 动力学特征与大面积降水过程有较好的对应 关系。

(3)特征提取方法操作简单,识别特征 直观方便,易于预报员使用,大大降低了预报 员浏览雷达速度图像的时间,在实际业务应 用中,可以作为 VAD、速度 PPI 等速度产品 的一种补充,有广泛的应用价值。

(4) 速度数据缺失较多的情况下,散度

值可靠性降低,一般情况下回波缺失超过总数 50%时,计算散度不可靠,本方法不适用。

**致谢:**本工作得到中国气象科学研究院胡志 群博士的大力帮助,在此表示感谢。

#### 参考文献

- [1] Wood VT. Brown R A. Single Doppler Velocity Signature Interpretation of nondivergent environmental winds[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1986, 3(1):114-128.
- [2] Wood VT. Brown R A. Effects of Radar Proximity on Single-Doppler Velocity Signatures of Axisymmetric Rotation and Divergence[J]. Mon. Wea. Rev., 1992,120:2798-2807.
- [3] 夏文梅,张亚萍,王凌震,等.复合风场的单多普勒速 度特征[J]. 气象科学,2003,23(2):209-216.
- [4] 胡明宝,高太长,汤达章.多普勒天气雷达资料分析与应用[M].北京:解放军出版社,2000.62-140.
- [5] 胡志群,汤达章,梁明珠,等.用改善的 EVAD 技术和 变分法计算大气垂直速度[J].南京气象学院学报, 2005,28(3):344-350.
- [6] Thomas M, Srivastava R C. An improved version of the extended velocity-azimuth display analysis of single-Doppler radar data [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1991, 8(4): 453-456.
- [7] 朱敏华. 一次大暴雨 CINRAD/SA 资料分析[C]. 2005年江苏省汛期新一代天气雷达应用技术研讨 会.

徐 芬等:多普勒天气雷达速度PPI图散度分布信息提取

