

# 基于多普勒天气雷达数据的中层径向辐合自动识别及其与强对流天气的相关性研究\*

王萍 牛智勇†

(天津大学电气与自动化工程学院, 天津 300072)

(2013年7月12日收到; 2013年9月7日收到修改稿)

本文提出了一种从多普勒天气雷达单仰角径向速度图中的正-负速度区域对入手自动识别一类强对流天气的中层径向辐合的方法. 首先, 根据雷达探测机理, 解释了由气流形成的辐合场一定会在径向速度图中形成局部最大正速度区域和局部最大负速度区域的特点, 然后构建正-负速度区域对的识别算法, 通过来自多个单仰角径向速度图的区域对配准和相关信息, 判断雷达径向速度图中是否存在中层径向辐合, 推算辐合的强度、延伸厚度等重要参数, 确定得到最优垂直剖面图的剖切方位. 经对客观存在显著中层径向辐合的384例样本和不存在明显中层径向辐合的356例样本的测试, 本文方法对显著中层径向辐合的识别率达到100%、误识率为0, 与人工方法相比, 本文方法把对中层径向辐合的识别时间从分钟级缩短到秒级, 同时自动给出其强度、高度、厚度、位置等丰富的定量信息和恰当的可视化垂直剖面图. 利用给出的参数信息进行了与强对流天气的相关性研究, 验证了中层径向辐合与对流地面大风的较强相关性, 同时发现, 最强中层径向辐合的高度对区分强冰雹与强降水、中层径向辐合的强度对估计冰雹尺寸具有良好的指示性.

**关键词:** 中层径向辐合识别, 辐合场, 强对流天气, 雷雨大风

**PACS:** 92.40.eg, 92.60.Nv, 92.60.Qx, 92.60.Wc **DOI:** 10.7498/aps.63.019201

## 1 引言

中层径向辐合(mid-altitude radial convergence, MARC)的概念是由Przybylinski于1995提出的, 它被定义为一个集中在对流风暴中层(通常3—9 km)的径向辐合区, 用以反映由前向后的强上升气流和后侧入流急流之间的过渡区. 一般的, 如果在3—7 km的范围内出现25 m/s以上的径向速度差, 则认为MARC特征是显著的<sup>[1,2]</sup>.

气象上, 辐合场的存在往往对于能量积蓄、以致发展形成强对流天气起关键作用<sup>[3,4]</sup>. 1996年, Lemon等在发生灾害大风的超级单体的径向速度图中识别出深厚的辐合区<sup>[5]</sup>, Schmocker研究发现, 利用MARC预报地面大风的提前时间在10—30 min<sup>[2,6]</sup>. 2001年8月5日, 在上海特大暴雨中, 邵

玲玲等发现, 强降水回波的发生、发展以及加强和风场中的局地强辐合区相联系<sup>[7]</sup>. 在此后, 不断地有在暴雨、冰雹、灾害大风等强对流过程的径向速度回波中发现强的中层径向辐合的报道, 并分别获得暴雨中心在径向速度上反映为强烈的辐合<sup>[8]</sup>, 中国的暴雨带多为扰动辐合线两侧气流对峙的结果; 暴雨发生的天气学条件是对流层低层有源源不断的水汽在一地产生辐合<sup>[9]</sup>, 水汽辐合是外面水汽输入与当地水汽输出的综合效果, 对于降水的多寡具有决定性的作用<sup>[10]</sup>, 降水与水汽辐合有同向关系<sup>[11]</sup>, 大气中的降水通常都与气流的辐合上升密切联系<sup>[12]</sup>, 暴雨是辐合系统迅速发展并释放不稳定能量的结果<sup>[13]</sup>, 低层大气的水汽辐合是暴雨系统发生发展的必要条件<sup>[14]</sup>, 中层径向辐合是形成地面大风和冰雹的重要特征<sup>[15]</sup>, MARC可以作为

\* 天津市自然科学基金(批准号: 09JCYBJC07500)、公益性行业(气象)科研专项基金(批准号: GYHY200706004)和中国气象局新一代天气雷达建设软件系统开发及应用项目资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: 710295646@qq.com

预报地面大风等强对流天气的重要因子<sup>[16]</sup>”等重要结论. 总之, 中层径向辐合与强对流天气的相关性研究和大量的观测实例, 使MARC特征在强对流短时临近预报业务中发挥的作用越发重要.

目前的气象业务中, MARC的寻找和定量化描述主要是借助多普勒天气雷达的反射率回波图像和径向速度回波图像人工进行. 即首先在较低仰角的反射率回波图像上观测到对流风暴的强回波, 再以该回波图像提供的信息, 在一个比较适宜的角度获得径向速度垂直剖面图, 以展示和估计MARC, 这个适宜的角度也就自然成为人工寻找MARC的关键.

目前, 确定剖面角度的主流方法是基于经验的准遍历法. 所谓遍历是指沿对流云团中心遍历各个角度, 显然所需工作过于繁琐, 费时耗力, 经验丰富的预报员会依据经验判断出可能出现MARC的角度, 进而降低工作强度, 提高工作效率. 例如, 在满足一定的气象条件下, 只选择径向角度(云团中心与探测雷达的连线方向)及与其垂直的切向角度下的径向速度垂直剖面图来观察MARC. 总之, 人工确定MARC的方法存在以下不足:

- 1) 速度慢, 经验丰富的预报员也要使用1 min到几分钟以上的时间, 而雷达的实时数据是每隔6 min更新一次的;
- 2) 结果受到工作人员经验等多因素制约, 不能确保得到正确的MARC, 不适宜的剖面角度还会漏识MARC;
- 3) 不易展开针对大量历史样本的规模化的相关统计和分析.

本文通过对强对流风暴气流场反映在径向速度图上的特点分析, 归纳出辐合场在多个单仰角径向速度图上的特征, 设计提取该特征的算法, 实现MARC的自动识别, 同时自动计算给出径向速度辐合场的定量参数, 自动给出垂直剖面图, 并展开MARC与强对流天气的相关性研究.

## 2 中层径向辐合在多普勒天气雷达径向速度图上的表现特点

### 2.1 径向速度垂直剖面图上的MARC

通过径向速度垂直剖面图展现MARC, 并对MARC参数做出定量估算, 是气象业务中的经常性做法.

图1(a)是一张1.5°探测仰角下的多普勒天气雷达的反射率回波图像, 图中展现出3个单体,

图1(b)是对应图1(a)的1.5°探测仰角下的多普勒天气雷达的径向速度图, 以图中的白色线段所限定的范围和方向做左侧单体的径向速度回波图的垂直剖面图, 获得图1(c). 图1(c)中, 探测雷达位于左侧, 且离开探测雷达的速度记为正速度, 反之记为负速度. 图1(c)白色标记线右侧速度与左侧速度之差为正值, 最大差值达到37 m/s(+10-(-27)), 大约出现在2—7.5 km, 这就意味着该单体中存在着大约5.5 km厚的径向速度辐合, 且MARC强度达到37 m/s(较小蓝色圆圈标记处).

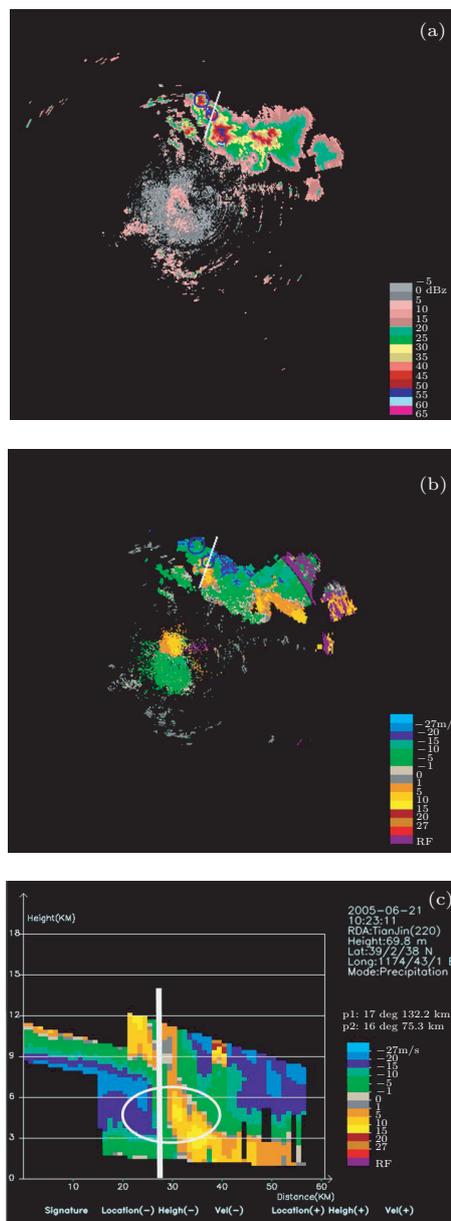


图1 径向速度图中MARC的位置及其径向速度垂直剖面图 (a) 1.5°仰角反射率图; (b) 1.5°仰角速度图; (c)MARC的径向速度垂直剖面图

一般的, 在多普勒天气雷达的径向速度垂直剖面图中, 中层径向辐合总是表现为在中层高度空间中, 存在正、负径向速度的交汇区, 且正速度区一定位于临近探测雷达的一侧.

### 2.2 径向速度图上的MARC

虽然辐合场在径向速度特定垂直剖面图上的特征是明显的, 但剖面图是多普勒基数据的导出产品, 需要靠经验借助基数据形成的反射率图像和径向速度图像多次人工试剖. 实际上, 风暴前端的上升气流和后侧同时存在的下沉气流, 在风垂直切变环境下会发生倾斜, 而非严格的垂直性运动, 从而使雷达能够探测到气流中携带的降水粒子在雷达波束方向上的运动分量, 即所谓的径向速度. 如

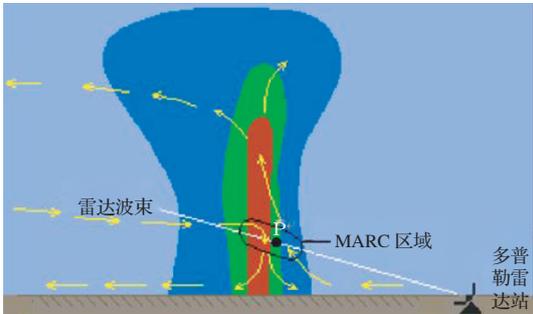


图2 雷达波束探测到对流单体中的上升气流和下沉气流

图2, 多普勒天气雷达波束在与对流单体中的上升气流和下沉气流相遇时, 会在P点右侧探测到沿雷达波束方向向外的径向速度分量(正径向速度), 同时在P点左侧探测到沿波束方向向内的负径向速度, 形成径向辐合现象, 降低仰角, 依然如此. 可见, 导致MARC出现的原因是单体内同时存在着强上升气流和下沉气流, 而具有一定厚度的MARC会在多个仰角的径向速度图上有所反映.

#### 2.2.1 局部上升/下降气流在雷达径向速度图上的图像特点

设图3的点A与点B位于某一上升气流中, 且两点相距较近, 因此假设两点处的气流的实际运动速度矢量相同, 均为  $v$ . 借助图3给出的辅助面和辅助线, 可推出上升气流场中A与B处的实际运动速度在雷达波束方向上的分量如下:

$$v_{AJ} = v'_A \cdot \cos(\gamma - \alpha) = (|v| \cdot \cos \rho) \cdot \cos(\gamma - \alpha), \quad (1)$$

$$v_{BJ} = v'_B \cdot \cos(\gamma' - \alpha) = (|v| \cdot \cos \rho') \cdot \cos(\gamma' - \alpha). \quad (2)$$

图3中, 在探测仰角  $\alpha$  下, 随着探测方位  $\beta$  从  $\beta_A$  转动到  $\beta_B$ , 雷达波束方向更接近于气流的实际运动方向. 因此, 分量  $v_{BJ}$  将大于分量  $v_{AJ}$ .

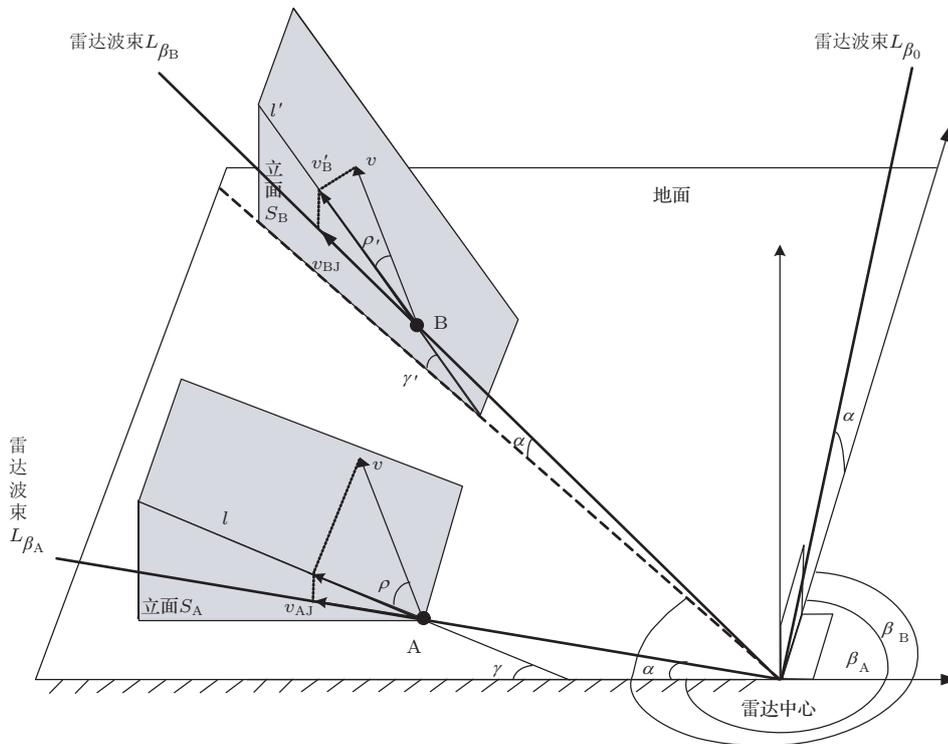


图3 气流的实际运动速度与其多普勒雷达径向速度分量示意

更一般的, 设点  $P_A$  周围气流的方向和强度相同, 由于雷达探测波束角度  $\beta$  的变化, 使得同仰角下探测到的运动矢量的分量  $v_J(\beta)$  因  $\beta$  的不同而不同, 其中, 总是存在一个小区域, 使得经过该小区域的、位于  $\{\beta_0 \pm \Delta\}$  角度区间的波束使  $\cos \rho \cdot \cos(\gamma - \alpha)$  最大或接近最大, 此时

$$v_J(\beta_0 \pm \Delta) = v_{J \max}, \quad (3)$$

其中  $\beta_0$  使  $\cos \rho \cdot \cos(\gamma - \alpha)$  最大,  $\Delta$  是因  $v_J(\beta_0)$  被量化后使  $v_J(\beta_0) = v_J(\beta_0 \pm \Delta)$  而加入的.

也就是说, 对流单体中的强上升气流和下沉入流急流在雷达单一探测仰角下的径向速度图上一定会同时出现局部的最大正速度区和局部的最大负速度区, 两区域的相对关系和相间距离受到实际对流场的约束.

### 2.2.2 局部最大正/负速度区域的相对关系

如前所述, 存在的强上升气流和下沉气流急流导致辐合现象的出现, 反映在雷达径向速度图上时, 正的最大速度区和负的最大速度区共存.

设由辐合场形成的径向速度图上的局部最大正/负速度区域中心到雷达探测中心的距离分别为  $R_+$  和  $R_-$ , 如图 4 所示, 按照正/负径向速度方向的约定, 即负的径向速度指向雷达中心, 正的径向速度的方向与其相反. 那么一定有

$$R_+ < R_-, \quad (4)$$

其中  $\theta$  或等于 0, 或是接近于 0 的较小角度.

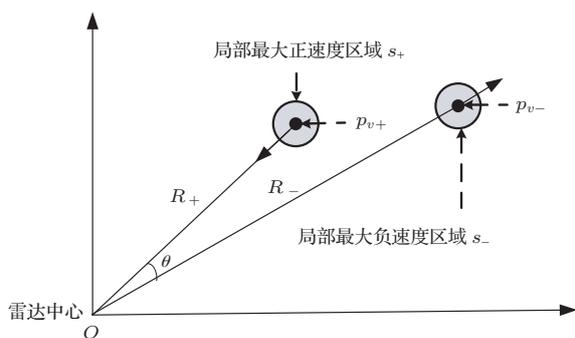


图 4 形成辐合的局部最大正/负速度区域中心关系示意

### 2.2.3 最大正/负速度区域的相对距离

设  $p_{v+}$  为局部最大的正速度区域中心点,  $p_{v-}$  为局部最大的负速度区域中心点,  $d(p_{v+}, p_{v-})$  为正-负速度区域中心的距离,  $\bar{r}(s_+, s_-)$  为正-负速度区域的近似平均半径, 根据  $d(p_{v+}, p_{v-}) - r(s_+, s_-) \leq 7 \text{ km}$  [1], 本文设  $\bar{r}(s_+, s_-) = 3 \text{ km}$ , 即

$$d(p_{v+}, p_{v-}) \leq 10 \text{ km}. \quad (5)$$

### 2.2.4 在径向速度图上确定辐合场的垂直剖面图的剖切方位

按照多普勒天气雷达的探测原理, 在径向速度图上, 局部最大的正速度区域或负速度区域的径向方向应该是最贴合于实际流场的方向, 基于此, 特沿局部最大的正、负速度区域中心连线进行剖切, 以获得展示局部径向辐合场的垂直剖面图, 考虑到风暴气流场中垂直风切变的存在, 会导致强风暴中辐合场方向随高度变化, 因而造成多仰角下的多个正-负速度区域中心连线方向不严格一致. 因此, 建立基于正-负速度区域的垂直剖面图剖切方向的规则如下:

**规则 1** 沿提供最大和较大 MARC 值的正、负速度区域中心连线进行剖切;

**规则 2** 在多个备选方案中, 正/负速度区域中心张开角度最小的区域中心连线被最终选中.

综上所述, 空间辐合流场反应在单仰角的径向速度上, 会同时出现局部的最大正速度小区域和局部的最大负速度小区域, 两个小区域中心相距不远于 10 km, 且正速度区域总是靠近雷达一侧. 借助多探测仰角下的正-负速度区域对, 可以判定显著 MARC 的存在、估算辐合场厚度并自适应地选出展示径向辐合场的垂直剖面图的剖切方位.

## 3 MARC 的自动识别方法

设多普勒天气雷达以 9 个仰角模式探测强对流天气, 以下 3.1—3.4 适合于 9 个仰角下的任何一组探测图像, 每组图像由反射率因子图像和径向速度图像组成.

### 3.1 最大正/负速度区域搜索范围的确定

鉴于强对流天气主体区域的雷达反射率因子一定会超过 40 dBZ 的强度, 而随之存在的中层径向辐合一般会限定在该区域内 [17], 因此仅将反射率图上反射率值大于等于 40 dBZ 的区域取出, 考虑到强对流风暴反射率值可能的高梯度变化和流场的性质, 将此区域外扩 10 km [18] 后用以在径向速度图上圈定搜索局部最大正/负速度区域的范围.

### 3.2 正/负速度区域分割

利用区域生长算法, 在径向速度图的限定范围内, 将满足如下条件的正/负速度区域分割出来:

**条件 1** 区域内径向速度取值一致;

**条件 2** 区域连通且中间不出现空洞;

条件3 区域面积不超过50个像素单位;

条件4 区域速度值大于其周边速度值.

### 3.3 配置正/负速度区域对

1) 将所有分割到的小速度区域  $s_+$  或  $s_-$  由负到正、由小到大排序, 得到  $\{s_-^{m,i_m}\}, \{s_-^{(m-1),i_{(m-1)}}\}, \dots, \{s_-^{1,i_1}\}, \{s_+^{1,j_1}\}, \{s_+^{2,j_2}\}, \dots, \{s_+^{n,j_n}\}$ , 其中  $i_k (k = 1, \dots, m)$  及  $j_l (l = 1, \dots, n)$  表示第  $k$  个负速度取值或第  $l$  个正速度取值的小区域数.

2) 从  $(s_+^{n,1}, s_-^{1,1})$  开始对所有可能的速度区域对进行遍历, 选出满足如下条件的正/负速度区域对.

条件1  $r(s_+) - r(s_-) > R_0$ ;

条件2  $\theta(s_+, s_-) \leq \theta_0$ ;

条件3  $v(s_+) - v(s_-) \geq 10 \text{ m/s}$ ;

条件4  $d(s_+, s_-) \leq 10 \text{ km}$ .

其中, 条件1和条件2是对径向辐合的体现, 条件1与(4)式相一致,  $R_0, \theta_0$  是小的正整数, 例如设定  $R_0 = 2 \text{ km}$ ,  $\theta_0 = 5^\circ$ ; 条件3是依据气旋场最低速度差值<sup>[19]</sup>给定的辐合强度的下限; 条件4是对(5)式的反映.

### 3.4 简约近距离的速度区域对

遍历的配对策略一般会导致结果的冗余, 考虑到一个强核单体中通常仅与一个辐合场相伴, 因此, 若在一个独立的搜索范围内存在2个以上的配置结果, 则仅保留其中辐合性(条件1, 2)和辐合强度(条件3)最强的那一对.

### 3.5 形成辐合场的初步描述

辐合场一般会被雷达的多个探测仰角探测到, 鉴于MARC是在中层定义的, 而对于雷达图像来说, 在径向38—230 km(后者是雷达的有效探测距离)的范围内,  $1.5^\circ$  仰角探测图像中对应的高度范围为1—6 km, 基本位于中层<sup>[20]</sup>, 所以首选  $1.5^\circ$  仰角下得到的正-负速度区域对进行上、下搜索. 设由  $1.5^\circ$  仰角下的正-负速度区域对  $(s_+, s_-)_{1.5^\circ}$  对9个仰角上下垂直搜索, 得到区域对组合  $\{(s_+, s_-)_{\alpha_1}, \dots, (s_+, s_-)_{\alpha_k}, \alpha_1 < \alpha_2 < \dots < \alpha_k, \alpha_1 \geq 0.5^\circ, \alpha_k \leq 19.5^\circ\}$ , 各对的速度差依次为  $\{\Delta v_{\alpha_1}, \dots, \Delta v_{\alpha_k}\}$ , 其中  $\Delta v = v(s_+) - v(s_-)$ , 这时, 当且仅当

$$\Delta V_M = \Delta v_{\alpha_m} = \max_{1 \leq i \leq k} \{\Delta v_{\alpha_i}\} \geq 25 \text{ m/s 且 } k > 2, \quad (6)$$

则认为找到了辐合场.

1) 辐合场的高度及厚度估计.

设区域对  $(s_+, s_-)_{\alpha_1}$  的正和负区域中心的极坐标依次为  $(\beta_{1+}, R_{1+})$  和  $(\beta_{1-}, R_{1-})$ , 区域对  $(s_+, s_-)_{\alpha_k}$  的正和负区域中心的极坐标依次为  $(\beta_{2+}, R_{2+})$  和  $(\beta_{2-}, R_{2-})$ , 则辐合场的最低高度  $H_{\min}$ 、最高高度  $H_{\max}$  及辐合场的厚度  $W$  估计如下:

$$H_{\min} = R_{1+} \cdot \sin \alpha_1, \quad (7)$$

$$H_{\max} = R_{2-} \cdot \sin \alpha_k, \quad (8)$$

$$W = H_{\max} - H_{\min}. \quad (9)$$

2) 辐合场的强度 ( $M_{\text{ARC}}$ ) 估计.

本文用由  $k$  个速度区域对提供的速度差中最大的值作为MARC的估计  $M_{\text{ARC}}$ , 即

$$M_{\text{ARC}} = \max_{1 \leq i \leq k} \{\Delta v_{\alpha_i}\} = \Delta v_{\alpha_m} = \Delta V_M. \quad (10)$$

并将正区域中心  $p_+(\alpha_m)$  和负区域中心  $p_-(\alpha_m)$  间的连线中点高度初步估计为该MARC值所处的高度, 即

$$H_M = \frac{R(\alpha_m, p_+) + R(\alpha_m, p_-)}{2} \cdot \sin \alpha_m. \quad (11)$$

特别需要指出的是, (10)式给出的MARC的估计方法没有加入中层这一约束, 这一条件的放宽是为方便展开径向辐合场的高度及强度与历史上强对流天气关系的研究考虑的.

### 3.6 确定辐合场的垂直剖面图的剖切线

设MARC的强度是借助速度区域对  $(s_+, s_-)_{\alpha_m}$  估计的, 过两个区域中心点形成直线段  $L$  如图5所示, 该直线段被作为获得垂直剖面图的剖切线, 并用  $p_1$  和  $p_2$  限定其剖切范围.

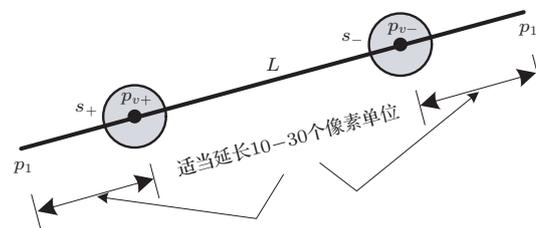


图5 获得垂直剖面图的剖切方向及范围示意

图6给出了通过上述MARC识别方法得到中层径向辐合信息及MARC估值的过程示例, 图6(a)是2005年7月9日天津塘沽雷达  $2.4^\circ$  探测仰角下的反射率图像, 取40 dBZ为阈值, 将相关区

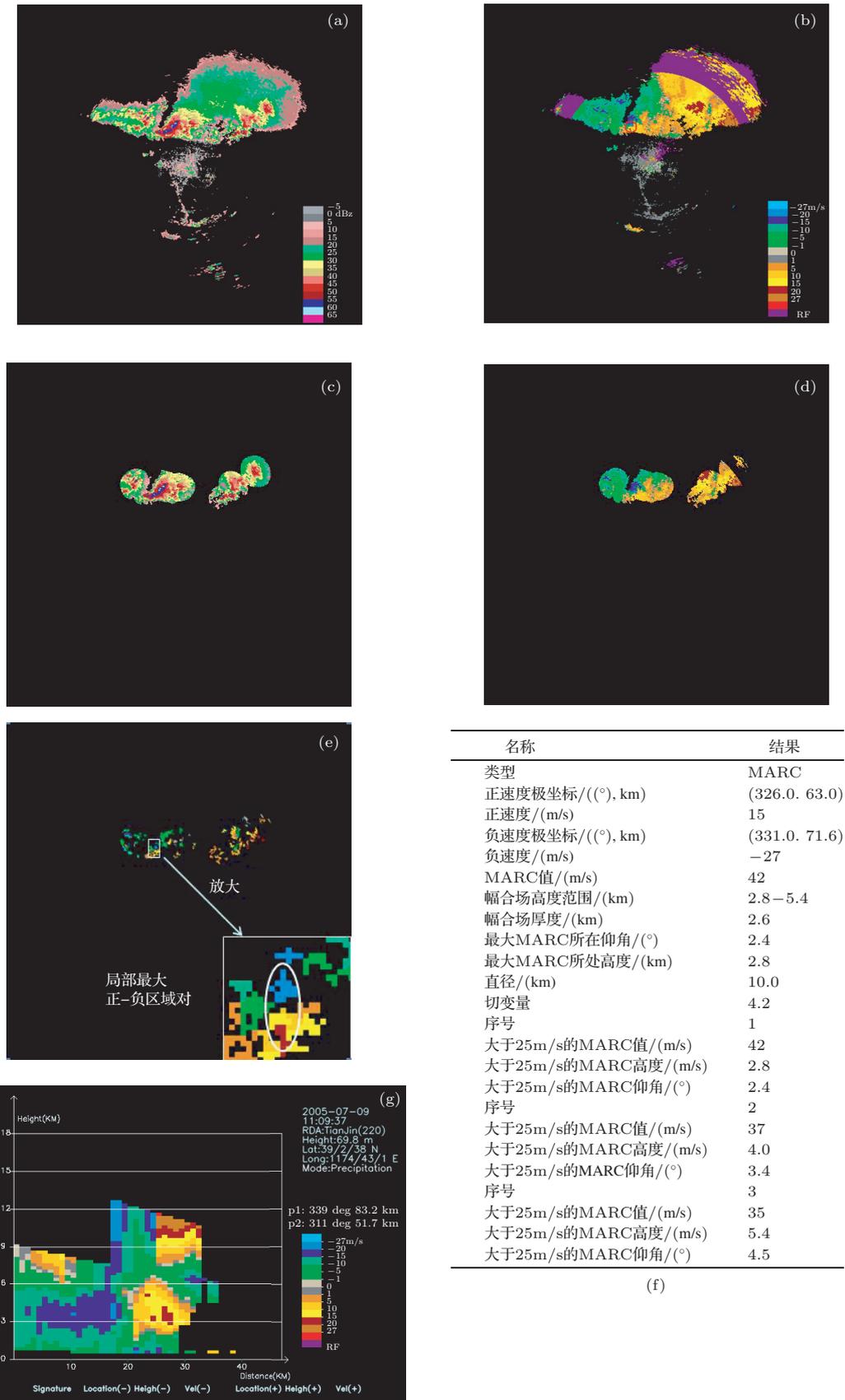


图6 自动识别MARC的过程 (a) 2.4°仰角反射率图; (b) 2.4°仰角径向速度图; (c) 滤除(a)中低反射率值后的结果; (d) 用(c)在(b)上圈定的搜索范围; (e) 对(d)进行区域筛选及区域对的匹配; (f) MARC的相关参数; (g) 展示MARC的剖面图

域外扩 10 km 以后获得局部最大速度区域的搜索范围如图 6(c) 所示, 该搜索范围在同仰角的图 6(b) 示出的径向速度图上圈定出图 6(d) 的结果, 经区域分割后得到图 6(e), 然后配置并简约正-负区域对 (用红色小圈标注在图 6(a) 和 (b) 中). 通过多个仰角下的一组区域对, 得到 MARC 的估计如图 6(f) 所示, 即该 MARC 被三个仰角的回波图探测到, 最大 MARC 值为  $M_{ARC} = 15 - (-27) = 42$  m/s, 位于  $2.4^\circ$  仰角的径向速度图上, 正速度区域中心  $(\beta, r, v_+)_{p_{v+}} = (326^\circ, 63 \text{ km}, 15 \text{ m/s})$ 、负速度区域中心  $(\beta, r, v_-)_{p_{v-}} = (331^\circ, 71.6 \text{ km}, -27 \text{ m/s})$ , 延伸厚度达到  $W = 5.4 - 2.8 = 2.6 \text{ km}$ , 通过与径向呈  $(331^\circ - 326^\circ) = 5^\circ$  夹角的剖切线, 得到图 6(g) 剖面图, 图中, 雷达位于左侧, 中层的辐合场清晰可见, 但其厚度可延伸到  $(6.5 - 2.5) = 4 \text{ km}$ , 这是基于点的厚度计算方案 ((11) 式) 的局限性所致. 因此, (11) 式给出 MARC 厚度是一保守估值, 一般而

言, MARC 的实际厚度大于等于此估值.

### 4 测试与分析

组织天津地区 2005—2011 年期间 30 个含有大风实况的强对流过程的 456 个样本、没有大风实况记录但存在显著 MARC 的 2 个强降水过程的 22 个样本、没有大风实况记录且没有发现存在显著 MARC 的强降水样本 356 个进行自动识别中层径向辐合算法的测试, 测试方案的步骤如下:

1) 对不同类型的强对流天气的单体样本在自动识别中层径向辐合的基础上, 给出相关参数估计和自动剖面图;

2) 对相同的样本, 在自动剖切角度的两侧各旋转  $2^\circ$  以各增加 2 张剖面图, 作为自动获取的剖面图的参照组;

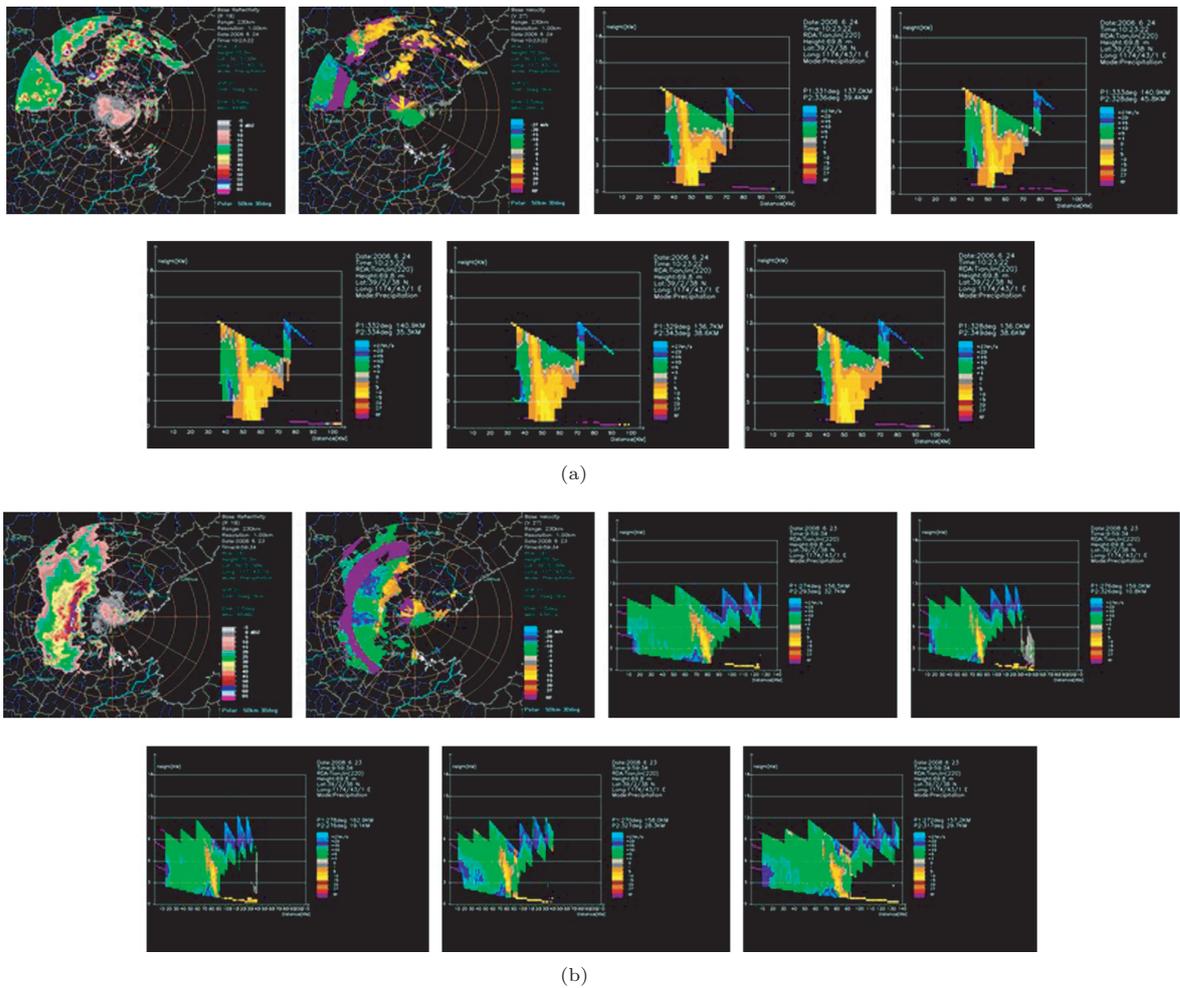


图 7 MARC 值估算准确、剖面角度合适的两组示例 (a) 强冰雹大风类型, 自动剖面图中,  $M_{ARC} = 37$  m/s, 其他相近剖面图  $M_{ARC} \leq 37$  m/s, 自动识别有效, 剖面合适; (b) 强降水大风类型, 自动剖面图中,  $M_{ARC} = 30$  m/s, 其他相近剖面图  $M_{ARC} = 30$  m/s, 自动识别有效, 剖面合适

3) 对通过自动识别算法未识别到MARC的样本, 人工遍历剖切得到剖面图以验证是否确实不存在MARC;

4) 就测试结果进行统计分析.

对MARC的自动识别统计结果如表1所示.

可见, 就检测样本而言, 本文算法获得了理想的MARC击中率和空报率.

从测试样本中选出分别具有强冰雹实况和强

降水实况的样例各1例, 展示其自动垂直剖面图于图7. 图中, 每组图例从左到右依次为1.5°反射率图、1.5°径向速度图、自动剖面图及向其两侧各旋转2°的4张剖面图, 且雷达位于剖面图右侧. 由此表明: 依据本文提出的基于正-负区域对找出的MARC及其对MARC的估算均在自动剖出的剖面图中得到了验证, 展现径向辐合场的效果优良.

表1 对显著性MARC的自动识别结果

	测试样本数	识别出MARC的样本数 (检出率/%, 漏报率(空报率)/%)
有大风实况/其中实际出现MARC	456/362	362(100, 0)
无大风实况/其中实际出现MARC	378/22	22(100, 0)

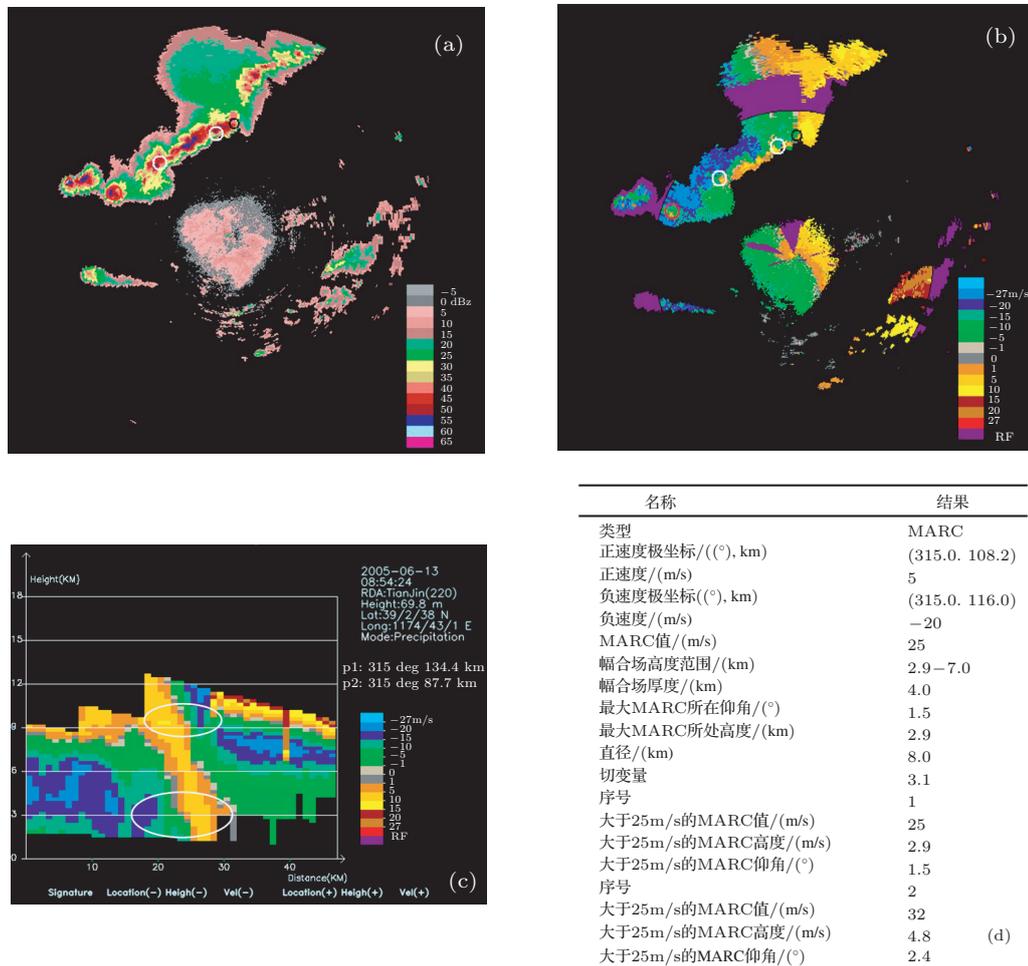


图8 一种剖面角度合适, 但MARC值被低估的强冰雹大风示例 (a) 1.5°仰角反射率图; (b) 1.5°仰角径向速度图; (c)MARC的剖面图; (d)MARC的相关参数

另外, MARC厚度的估算是基于单仰角速度图上的正、负速度区域中心进行的, 因此有被低估的倾向, 就测试样本而言, 经过逐个剖面图与估算结果的对比, 发现被明显低估的比例为3%. 图8是

出现径向辐合场厚度被明显低估的代表性示例. 此例中, 图8(a)和(b)上圆圈标记处是自动识别出来的具有辐合性质的正-负速度区域对, 其中左侧的白色圆圈标记处位于天津地界, 可查到具有雷雨

大风的实况记载, 借助这组区域对得到的径向辐合场从 2.9 km 延伸到 7 km 高度, 其厚度估算值为 4 km, 沿区域中心连线得到剖面图如图 8(c) 所示, 剖面图中, 易看出, 该径向辐合场的高度向上延伸到 10 km 左右, 究其原因, 是因为位于高空的正速度区与其右上方的负速度区的差值更大, 因此被配成了对, 而这个区域对具有辐散性, 因此被简约掉了. 不过, 这正好与风暴低层辐合、高层辐散<sup>[21]</sup>相符合. 如果把  $M_{ARC} = 25 \text{ m/s}$  作为预报大风的阈值, 原则上, 这种径向辐合场厚度被明显低估的现象并不影响对大风的判断.

## 5 MARC 与强对流天气的相关性研究

### 5.1 MARC 与雷雨大风

表 1 中的 456 个样本来自天津地区近 7 年的 30 个雷雨大风过程, 其中的 23 个过程的 362 例样本含有显著性 MARC, 由此可估算出 MARC 与雷雨大风的相关性达到 0.77.

### 5.2 MARC 值的高度信息与大风冰雹和大风暴雨天气的鉴别

就计算出的 MARC 值的高度而言, 发现伴随强降水的大风样本普遍低于伴随强冰雹的大风样本.

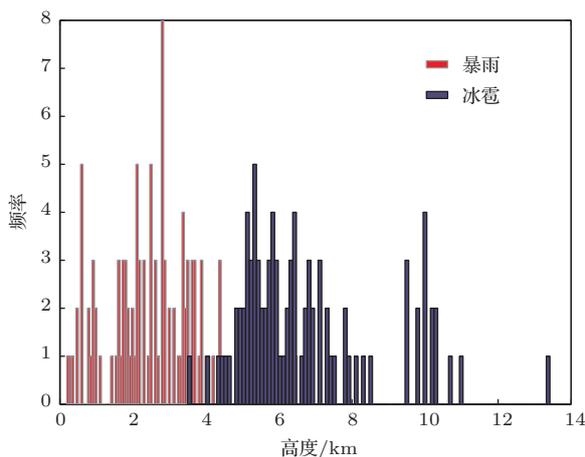


图 9 基于测试样本的 MARC 值高度的分布

图 9 是基于所有测试样本的 MARC 估值高度的分布. 直观地看, MARC 估值的高度对于伴随强降水的大风和伴随强冰雹的大风两类情形明显不

同, 强冰雹的最大 MARC 高度偏高, 强降水的最大 MARC 高度偏低.

设将 MARC 估值的高度作为鉴别强冰雹和强降水的一个特征, 对其进行差异性的统计检验如下:

将强冰雹和强降水视为两个不同的类, 并设它们分别来自两个服从正态分布的总体, 方差相同, 均值分别为  $u_1$  和  $u_2$ , 下面根据表 2 所示测试数据推断由 MARC 估值的高度描述的这两个总体有无显著性差异. 即假设  $u_1 = u_2$ , 使用 (12) 式所示的服从  $t$  分布的统计量展开置信水平  $(1 - \alpha)$  的检验.

$$t = \frac{(\hat{u}_1 - \hat{u}_2)}{\sqrt{\frac{(n_1 - 1)\hat{\sigma}_1^2 + (n_2 - 1)\hat{\sigma}_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \cdot \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}\right)}} \sim t(n_1 + n_2 - 2), \quad (12)$$

式中  $\hat{u}_1, \hat{u}_2$  分别为两类样本的 MARC 估值所处高度的均值估计,  $\hat{\sigma}_1^2, \hat{\sigma}_2^2$  分别为对应的方差估计.

取显著性水平  $\alpha = 0.01$ , 则  $t_{\alpha/2}(n_1 + n_2 - 2) = t_{0.005}(194)$ , 查表得  $t_{0.005}(194) < 2.617$ . 将表 2 数据代入 (12) 式, 算得  $t = 18.12$ , 由于  $t$  远大于  $t_{0.005}(194)$ , 因此推翻原假设, 认为 MARC 估值所处的高度在伴有大风短时强降水和强冰雹之间具有显著性差异.

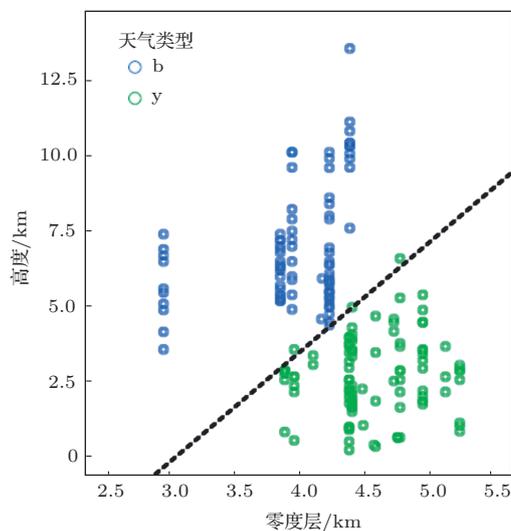


图 10 MARC 值的高度加上零度层高度后在冰雹和暴雨中的分布情况

进一步研究发现, 将 MARC 的高度与每个过程对应的零度层高度相关联, 会发现该指标对大风冰雹天气和大风暴雨天气具有良好的可分性, 如图 10 所示. 图 10 中, 横坐标为零度层高度, 纵坐标为该 MARC 的高度, 单位均为 km. 每个小圆圈对应一个 MARC, 蓝色小圈表示大风冰雹天气中检

测到的MARC, 绿色小圈表示大风暴雨天气中检测到的MARC, 将它们作为训练样本, 可得基于这两次指标的线性分类函数如图中虚线所示. 虚线方

程如下:

$$h = 3.4H_0 - 9.7(\text{km}). \quad (13)$$

表2 测试样本数量及相关统计参数

	存在显著 MARC 的单体数	MARC 估值的高度均值/km	MARC 估值的高度方差/km <sup>2</sup>
伴随强冰雹的大风	$n_1 = 89$	$\hat{u}_1 = 6.748$	$\hat{\sigma}_1^2 = 3.787$
伴随强降水的大风	$n_2 = 107$	$\hat{u}_2 = 2.558$	$\hat{\sigma}_2^2 = 1.61$

### 5.3 冰雹暴雨同时发生时的MARC

基于以上研究结果, 对天津地区同时具有暴雨和冰雹实况的强对流天气雷达基数据进行了MARC参数的统计研究, 结果发现, 暴雨和冰雹同时发生的情况下, 该辐合场会从较低的高度延伸到较高的高度, 例如, 从零度层高度之下到-20零高度之上均出现大于25 m/s的速度差值. 下面举例说明:

在2006年7月5日09:25—10:40(世界时)之间,

天津蓟县发生了24.7 mm的强降水和最大尺寸达25 mm的大冰雹的强对流天气, 经过运行当天的基数据, 在9:11分检测出来MARC, 检测结果如图11所示. 图11(a)为1.5°仰角下的反射率图, (b)为1.5°仰角下的径向速度图, 图中白色圆圈为检测出来的MARC, (c)为按图中白线所限定的范围和方位起自动做出的该MARC的剖面图, 图中蓝色横线为零度层高度, 绿色线为负20度层高度, (d)为自动计算给出的该MARC的参数信息, 可以看到

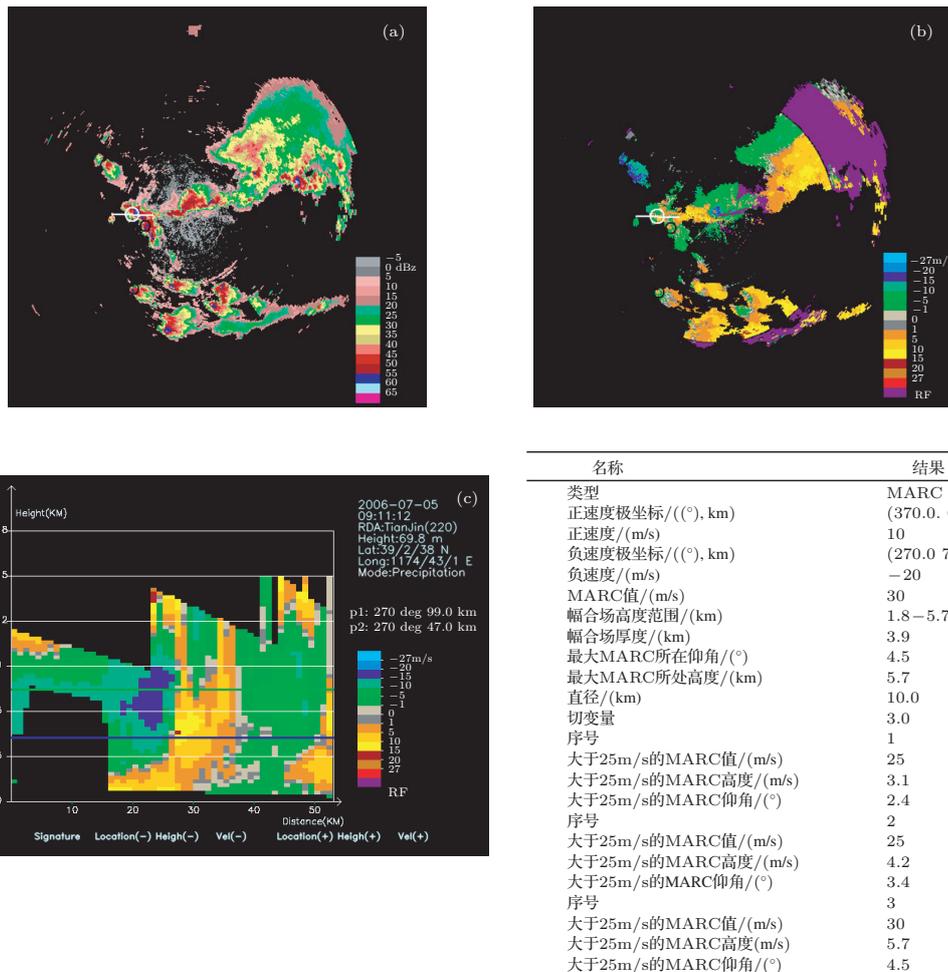


图11 冰雹暴雨同时发生时的MARC结果示例

该MARC在3个仰角下的3.1 km, 4.2 km, 5.7 km高度上均存在25 m/s以上的速度差. 将当日的零度层高度  $H_0 = 4.235$  km代入(13)式, 得

$$\begin{aligned} h &= 3.4H_0 - 9.7(\text{km}) \\ &= 3.4 \times 4.235 - 9.7 \\ &= 4.699 \text{ km}. \end{aligned}$$

因为

$$\min\{3.1 \text{ km}, 4.2 \text{ km}, 5.7 \text{ km}\} < h,$$

且

$$\max\{3.1 \text{ km}, 4.2 \text{ km}, 5.7 \text{ km}\} > h,$$

因此同时出现了强冰雹和强降水特征.

### 5.4 MARC值的大小与最大冰雹尺寸

选取天津地区2005—2012年具有冰雹实况的基数据, 对14个存在MARC的冰雹过程进行了最大MARC值和最大冰雹尺寸的分析研究, 结果发现, 在零度层至零度层以上4 km高度的范围内, 最大MARC值和最大冰雹尺寸存在较强的线性相关, 相关系数为0.933. 拟合直线方程为

$$D = 1.32M - 17.72, \quad (14)$$

式中,  $M$ 为最大MARC值, 单位为m/s,  $D$ 为最大冰雹尺寸(直径), 单位为mm. 图12给出了关于这两个变量的散点图及其拟合直线, 其中, 纵坐标为最大冰雹尺寸, 横坐标为MARC值的大小.

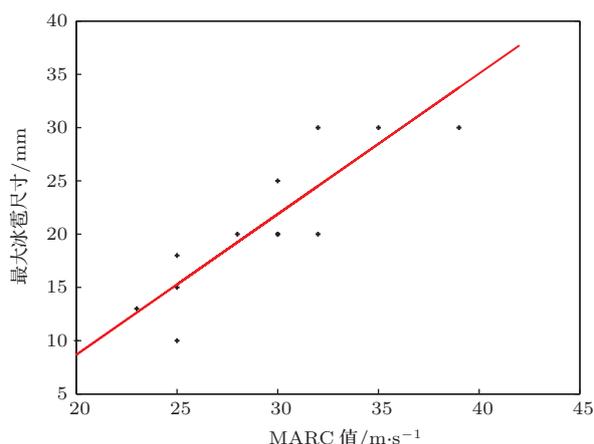


图12 MARC值和冰雹尺寸的关系

对已知非拟合样本进行检验, 发现实报最大冰雹尺寸与基于(14)式估计的最大冰雹尺寸的绝对差小于5 mm. 以图11所示样本为例, 因其在零度

层至零度层以上4 km高度的范围内, 最大MARC值等于30 m/s, 因此算得最大冰雹直径的估值和该估值  $D$  与实报最大冰雹直径的偏差  $e$  如下:

$$\begin{aligned} D &= 1.32 \times 30 - 17.72 = 21.9 \text{ mm}, \\ e &= |21.9 - 25| = 3.1 \text{ mm}. \end{aligned}$$

最后, 对本文算法的运行时效说明如下: 在Inter-core-i3-530CPU/2G内存的硬件环境和windows7的系统环境下, 利用本文算法, 从系统打开基数据到给出MARC的识别参数、在图像上做出识别标记以及示出剖面图, 最高运行时间不超过2 s, 平均运行时间为1.5 s. 如果使用GPU加速, 平均运行时间将小于1 s.

## 6 结 论

及时发现发展过程中强对流天气的MARC, 对即将发生在地面的破坏性大风进行有效识别具有重要意义. 本文从多普勒雷达探测机理出发, 归纳出辐合流场在多个单仰角的径向速度回波图像中的特点, 设计符合这类特点的识别算法, 实现MARC的自动识别及显著MARC值等重要参数的自动估算, 并给出能较准确展示MARC的径向速度剖面图, 用天津地区2005年以来由强对流天气造成的具有大风实况和完整雷达基数据的所有强对流过程对本文算法进行了测试, 结果表明本文方法具有以下优势:

1) 速度快. MARC的自动识别使人工识别所需的分钟级缩短到了秒级, 这对每6 min就有一次雷达基数据的更新来讲, 更能满足业务需求.

2) 击中率高、误识率低. 本文是利用天津地区具有实况的强对流样本进行测试的. 就测试样本而言, 对含有显著性MARC的样本均被击中, 且未出现空报.

3) 能够同时提供MARC的重要参数和展示MARC的剖面图. 其中, 重要参数包括显著性MARC的大小及其所处高度、径向辐合场的厚度等, 就测试样本而言, 能够获得估算准确、效果优良剖面图的比例达到97%.

4) 便于展开大规模的统计研究.MARC的自动、高效、准确的识别, 会有利于协助人们批量处理大量的历史样本, 以发现适于强对流天气识别及其预报的规律性特点. 就天津地区近十年的实况分析, 本文发现, 最大MARC的高度对区分强冰雹和短时强降水具有较强的指示性, 位于零度层以上

4 km 内的最大 MARC 值与最大冰雹尺寸具有较强的线性相关性. 这些将为强冰雹、强降水识别以及冰雹尺寸的估计提供重要依据.

就雷雨大风识别及预警而言, 显著性 MARC 的识别是重要的, 但不是万能的, 众多的研究成果 [22–27] 指出, 多普勒雷达探测到的、造成灾害性大风的强对流还可能会在径向速度图上发现“大风区”、在反射率因子图上是超级单体、弓形回波、有边界层辐合线、其回波移动速度等等. 因此, 需要将显著性 MARC 的识别与这些因素的自动识别结果联合起来, 用以支撑雷雨大风的自动识别与预警, 这是本文后续的工作.

本文所用样本及其天气实况信息均由天津市气象局提供, 在此表示诚挚的谢意.

## 参考文献

- [1] Przybylinski R W 1999 *Weather and Forecasting* **10** 203
- [2] Zhang G C 2011 *Strong convection weather analysis and forecasting* (1st Ed.) (Beijing: China Meteorological Press) p168–169 (in Chinese) [章国材 2011 强对流天气分析与预报第一版 (北京: 气象出版社) 第 168–169 页]
- [3] Ran L K, Zhou Y S, Yang W X 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 099201 (in Chinese) [冉令坤, 周玉淑, 杨文霞 2011 物理学报 **60** 099201]
- [4] Ernani De Lima Nascimento, Droegemeier K K 2006 *Journal of the atmospheric Sciences* **63** 2246
- [5] Lemon L R, Stephen Parker 1996 *the 18th Conference on Severe Local Storms* San Francisco, February 19–23, 1996 p70
- [6] Schmocker G K 1996 *15th Conference on Weather Analysis and Forecasting*, Norfolk, August 19–23, 1996 p306
- [7] Shao L L, Huang Y 2002 *Meteorological Monthly* **28** 47 (in Chinese) [邵玲玲, 黄炎 2002 气象 **28** 47]
- [8] Qi L Y, Nong M S, Wang J 2012 *Meteorological Monthly* **38** 438 (in Chinese) [祈丽燕, 农孟松, 王冀 2012 气象 **38** 438]
- [9] Qian W H, Shan X L, Zhu Y F 2012 *Chinese J. Geophys.* **5** 1513 (in Chinese) [钱维宏, 单晓龙, 朱亚芬 2012 地球物理学报 **5** 1513]
- [10] Zhao R X, Wu G X, Zhang H 2008 *Chinese J. Geophys.* **51** 1670 (in Chinese) [赵瑞霞, 吴国雄, 张宏 2008 地球物理学报 **51** 1670]
- [11] Chen J L, Huang R H 2008 *Chinese J. Geophys.* **51** 352 (in Chinese) [陈际龙, 黄荣辉 2008 地球物理学报 **51** 352]
- [12] Chen Z M, Yang K Q, Wu H Y 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 4362 (in Chinese) [陈志明, 杨康权, 伍红雨 2009 物理学报 **58** 4362]
- [13] Jiang Z, Li X F, Zhou Y S, Gao S T 2012 *Chin. Phys. B* **21** 054215
- [14] Ran L K, Chu Y L 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 8094 (in Chinese) [冉令坤, 楚艳丽 2009 物理学报 **58** 8094]
- [15] Chen G C, Chen Y, Qiao L 2011 *Meteorological Monthly* **37** 871 (in Chinese) [陈贵川, 谌芸, 乔林 2011 气象 **37** 871]
- [16] Klimowski B A, Hjelmfelt M R, Bunkers M J 2004 *Weather and Forecasting* **19** 727
- [17] Yu X D, Yao X P, Xiong T N, Zhou X G, Wu H, Deng S B, Song Y 2006 *Doppler radar principle and business applications* (1st ED.) (Beijing: China Meteorological Press) p48, 118 (in Chinese) [俞小鼎, 姚秀萍, 熊廷南, 周小刚, 吴洪, 邓北胜, 宋燕 2006 多普勒天气雷达原理与业务应用第一版 (北京: 气象出版社) 第 48, 118 页]
- [18] Wang Y, Tang Y, Zhao J X 2009 *Meteorological Monthly* **35** 91 (in Chinese) [王彦, 唐熠, 赵金霞 2009 气象 **35** 91]
- [19] Andra D L 1997 *28th Conf. on Radar meteorology Austin*, October 5–9 1997 p364–365
- [20] Li J X, Ren X X, Jin L J 2008 *Journal of Shanxi Meteorology* **84** 18 (in Chinese) [李军霞, 任晓霞, 晋立军 2008 山西气象 **84** 18]
- [21] Ran L K, Zhou Y S, Yang W X 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 099201 (in Chinese) [冉令坤, 周玉淑, 杨文霞 2011 物理学报 **60** 099201]
- [22] Liao Y F, Yu X D, Tang X X, Zhu J J 2007 *Transactions of Atmospheric Sciences* **4** 433 (in Chinese) [廖玉芳, 俞小鼎, 唐小新, 朱金菊 2007 大气科学学报 **4** 433]
- [23] Jin H Y, Gu S S, Wang S S, Niu L L and Liu W 2008 *Transactions of Atmospheric Sciences* **5** 702 (in Chinese) [金宏忆, 顾松山, 王珊珊, 牛丽莉, 刘伟 2008 大气科学学报 **5** 702]
- [24] Yu X D, Zheng Y Y, Liao Y F 2008 *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* **32** 508 (in Chinese) [俞小鼎, 郑媛媛, 廖玉芳 2008 大气科学 **32** 508]
- [25] Mu X Y, Dang R Q, Chen Q P, Fang D X, Ge W Z 2007 *Journal of Applied Meteorological Science* **18** 42 (in Chinese) [慕熙昱, 党人庆, 陈秋萍, 方德贤, 葛文忠 2007 应用气象学报 **18** 42]
- [26] Chen M X, Yu X D, Tan X G, Wang Y C 2004 *Journal of Applied Meteorological Science* **15** 754 (in Chinese) [陈明轩, 俞小鼎, 谭晓光, 王迎春 2004 应用气象学报 **15** 754]
- [27] Funk T W, Darmofal K E, Kirkpatrick J D 1999 *Weather and Forecasting* **14** 976

# Automatic recognition of mid-altitude radial convergence and study on the relationship between the convergence and strong convective weather based on Doppler weather radar data\*

Wang Ping Niu Zhi-Yong<sup>†</sup>

(School of Electrical and Automation Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

( Received 12 July 2013; revised manuscript received 7 September 2013 )

## Abstract

To identify the mid-altitude radial convergence of a strong convective weather automatically, we propose a method based on recognition of ‘positive-negative velocity region-pairs’ (region-pairs) in a single elevation angle of the Doppler radar radial velocity image. First of all, according to the principle of the radar detection, this paper explains the phenomenon that the convergence field formed by the airflow must produce a local maximum in positive or negative velocity region in the radial velocity image. The algorithms for recognizing these regions and matching the positive-negative pair are then devised. By searching a set of region-pairs with longitudinal extension, which are obtained from the multiple single elevation radial velocity images, we can judge whether there is a mid-altitude radial convergence in the convective storm, and estimate important parameters, such as the strength and extended thickness of the mid-altitude radial convergence. Finally, we determine the position of optimal section and present the cross-sectional view of the mid-altitude radial convergence. We have tested 384 samples with obvious mid-altitude radial convergence and 365 heavy rainfall samples without obvious mid-altitude radial convergence. Experimental results show that the recognition rate of obvious mid-altitude radial convergence is 100% and the false alarm rate is 0. Compared with the manual way by means of the cross-sectional view, the proposed method in this paper can more rapidly recognize the mid-altitude radial convergence (and reduce the recognition time from minutes to seconds). At the same time, it can present a great deal of quantitative information, including the strength, height, thickness, and position of the mid-altitude radial convergence. Furthermore, it shows the cross-sectional view automatically. We can obtain good results from the comparison between the mid-altitude radial convergence and strong convective weather by using the given parameters. We test and verify the strong correlation between the mid-altitude radial convergence and severe surface wind. Moreover, the height of the strongest mid-altitude radial convergence plays an important role in discrimination of strong hail and torrential rain. Also the strength of the mid-altitude radial convergence can be used to estimate the maximum dimensions of the hail.

**Keywords:** mid-altitude radial convergence recognition, convergence field, strong convective weather, thunderstorm gale

**PACS:** 92.40.eg, 92.60.Nv, 92.60.Qx, 92.60.Wc

**DOI:** [10.7498/aps.63.019201](https://doi.org/10.7498/aps.63.019201)

---

\* Project supported by the Natural Science Foundation of Tianjin, China (Grant No.09JCYBJC07500), and the Special Scientific Research Fund of Meteorological Public Welfare Profession of China (Grant No.GYHY200706004).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [710295646@qq.com](mailto:710295646@qq.com)