

三维雷达反射率资料用于层状云和对流云的识别研究

肖艳姣^{1, 2, 3} 刘黎平¹

1 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

2 中国气象局武汉暴雨研究所, 武汉 430074

3 南京信息工程大学, 南京 210044

摘 要 基于层状云和对流云的雷达反射率分布的三维形态特征, 提出了识别层状云和对流云的 6 个候选识别参数, 它们分别是: 组合反射率及其水平梯度, 反射率因子等于 35 dBZ 的回波顶高及其水平梯度、垂直累积液态水含量及其密度。通过分析候选识别参数分布图和选取的反射率垂直剖面图, 用人机交互方式挑选“真实的”层状云和对流云区, 统计这 6 个候选识别参数分布的概率密度特征; 最后确定把分布概率密度更集中的组合反射率水平梯度、35 dBZ 的回波顶高的水平梯度和垂直累积液态水含量密度作为识别参数, 利用模糊逻辑法进行层状云和对流云的识别。用三个个例进行了识别试验, 并把用模糊逻辑法识别的结果与用改进的巅峰值法识别的结果进行了比较, 结果表明: 用模糊逻辑法和改进的巅峰值法都能合理地识别大部分层状云和对流云; 由于改进的巅峰值法只考虑了反射率分布的二维形态特征, 它容易把对流核的外围识别成层状云, 把厚实的层状云识别成对流云, 而考虑了反射率分布的三维形态特征的模糊逻辑法在这两个方面有很大改善。

关键词 雷达反射率 层状云和对流云识别 模糊逻辑法

文章编号 1006-9895 (2007) 04-0645-10

中图分类号 P426.5

文献标识码 A

Identification of Stratiform and Convective Cloud Using 3D Radar Reflectivity Data

XIAO Yan-Jiao^{1, 2, 3} and LIU Li-Ping¹

1 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

2 Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

3 Institute of Heavy Rain, China Meteorological Administration, Wuhan 430074

Abstract An automatic algorithm for the partitioning of radar reflectivity into convective and stratiform rain classifications has been developed and tested using volume scan radar reflectivity data from the Guangzhou and Fuzhou Doppler weather surveillance Radar. Based on the differences of radar reflectivity distribution morphology between convective and stratiform rain, six preparative reflectivity-morphological parameters are presented, which are composite reflectivity and its horizontal gradient, echo top height associated with 35 dBZ reflectivity and its horizontal gradient, vertically integrated liquid water content and its density. To arrive at a set of skillful separation parameters, the probability densities of the six separation attributes from “true” stratiform and convective rain are obtained. Ideally, the statistics should come from a large sample in a site- and seasonality-specific manner, but large sample estimation of parameter statistics is not operationally viable. So the approach taken here is to estimate the parameter statistics from a small but very informative sample. Such a sample should contain, at least, a precipitation event with widespread, well-developed and clearly distinguishable areas of convective and stratiform precipitation. This paper uses the representative squall line on 22 March 2005 and mixed precipitation with bright band enhance-

ment on 23 June 2005 at Guangzhou. Areas of ‘true’ stratiform and convective precipitation are identified by analyzing images of six preparative parameters and selective vertical cross section of reflectivity in man-machine interaction manner. Results show that the densities of the horizontal gradient of composite reflectivity, the horizontal gradient of echo top height associated with 35 dBZ reflectivity and the density of vertically integrated liquid water content which are identified as the ultimate stratiform and convective cloud separation parameters are more concentrative than those of composite reflectivity, echo top height associated with 35 dBZ reflectivity and vertically integrated liquid water content, and the cross parts exist in the probability density function graphs of stratiform and convective cloud separation parameters. It is not very desirable to select a single set of thresholds for stratiform and convective cloud separation which could not possibly work well consistently and reliably for all sites, all seasons, and under varying conditions of radar calibration accuracy. Therefore, the fuzzy logic method is used for stratiform and convective cloud separation. The membership function of the fuzzy logic method is constructed according to the probability density features of the ultimate stratiform and convective cloud separation parameters, and the asymmetric trapezoidal membership function is chosen as the form of the membership functions. Three cases from Guangzhou and Fuzhou Doppler weather surveillance Radar are studied using the fuzzy logic method and the advanced maxima method. Results show that both the methods can separate most stratiform and convective rain. Because of using only the two-dimensional reflectivity morphology feature, the advanced maxima method has two main sources of misclassification: convective classification being assigned to heavy stratiform rain, and stratiform classification being assigned to the periphery of convective cores. By applying information based on the three-dimensional hydrometeor field inferred from radar reflectivity, the fuzzy logic method improves the performance of echo classification by correcting two main error sources of the advanced maxima method. Heavy stratiform rain and the periphery of convective cores are both classified correctly by the fuzzy logic method.

Key words radar reflectivity, stratiform and convective cloud separation, the fuzzy logic method

1 引言

自从天气雷达诞生以来,用雷达定量测量降水就一直是其不变的主题之一。用雷达定量测量降水有许多误差源,例如,所选 $Z-R$ 关系不合适、与距离有关的雷达波束偏高和反射率垂直廓线的不均匀性等^[1-4]。由于层状云和对流云降水的滴谱分布不一样^[5],所适用的 $Z-R$ 关系也不一样,所以层状云和对流云降水的识别可以改进雷达定量测量降水精度。在混合型降水的情况下,对流云和层状云之间的反射率分布形态差异很大^[6],用未经云分类的平均反射率垂直廓线去订正远距离处的降水估算将会产生与融化层高度有关的不真实的偏大或偏小的降水估计。此外,识别对流云和层状云降水还有另外二个作用:(1) 由于层状云和对流云的生消变化以及移动速度不一样,层状云和对流云的识别有助于改进临近天气预报;(2) 中尺度对流系统中的对流云和层状云对大气中的热量变化都有贡献^[7],只是程度不同而已。大尺度数值模拟已经表明,大气对透热加热的垂直分布是敏感的^[8],已知这种敏感性,就有必要把来自中尺度对流系统中的加热精确

地分成来自对流云的部分和来自层状云的部分,而这可以通过对降水云进行分类来完成。

关于用雷达资料识别层状云和对流云,国内外已做了很多工作。早期的识别层状云和对流云降水的方法是用雨量计资料做的^[9],只要降水率超过给定的背景阈值就被认为是对流云降水,这种技术被称为 Background-Exceedence Technique (BET)。BET 技术一般能确定对流云降水核心。1984 年,Churchill 等^[10]用雷达反射率资料把 BET 技术扩展到二维,首先用雷达反射率因子阈值来确定对流核,然后给对流核一个固定的影响半径以确定对流云的面积。1995 年,Steiner 等^[11]指出 Churchill 方法^[10]中固定一个影响半径是不充分的,他们把影响半径改为反射率因子的函数,此外把反射率因子阈值也改为局地平均的背景反射率因子的函数。这种方法本质上还是 BET 技术,但他们把它称为巅峰值法。潘江等^[12]选用面积复杂度、强度梯度、强中心强度和面积因子来自动识别对流性降水回波、层状云降水回波和混合性降水回波。DeMott 等^[13]通过在雷达体扫资料的每个高度上都使用 BET 技术把 Steiner 的巅峰值法^[11]扩展到三维,分类一直

延伸到回波顶。他们认为只在低层对降水进行分类, 会把随高度强烈倾斜的对流云降水错误分类。Rosenfeld 等也基于三维反射率场进行降水云分类^[14], 但是他们的的方法不同于 BET, 而是利用窗口概率匹配法^[15]对小区域的降水云进行分类。Biggerstaff 等^[16]对 Steiner 的算法^[11]进行检验, 发现了两个主要的错误分类, 其一是把很厚的层状云分成了对流云; 其二是把对流核的外围分成了层状云。为此, 他们对 Steiner 的算法^[11]进行了改进, 把反射率垂直廓线特征加入到该方法中。Biggerstaff 的方法^[16]用到了来自雷达体扫资料以外的 0℃等温线所在的高度资料, 而且可识别的半径范围只有 140 km。

本文的目的是基于层状云和对流云的雷达反射率分布的三维形态特征^[17], 提出相关的候选识别参数, 统计其分布的概率密度特征, 然后选择效果好的识别参数, 使用模糊逻辑法^[18, 19]来识别层状云和对流云。在确定识别参数时, 假设只有体扫反射率资料可用。来自探空、地面观测和(或)数值模式输出的 0℃等温线所在高度也许可用, 这样的信息也许真的有助于用反射率体扫资料来估计亮带高度, 但是, 要实时客观使用这些信息是很困难的。正因为这个原因, 本文不要求从其它资料源中获得 0℃等温线所在高度。

2 资料来源

本文所用资料来源于 2005 年广州和福州新一代天气雷达的原始体扫资料, 广州和福州雷达型号都是 CINRAD-SA 型, 收集的资料采取的扫描方式是 VCP21, 即 6 分钟扫描 9 个仰角 (0.5°, 1.5°, 2.4°, 3.4°, 4.3°, 6.0°, 9.9°, 14.6°, 19.5°)。本文只用到了其中的反射率资料, 资料以极坐标方式排列。

3 层状云和对流云的识别

3.1 候选识别参数的提出

层状云和对流云具有不同的雷达反射率三维形态特征。层状云降水是由大范围的垂直上升运动引起的, 垂直速度由天气尺度强迫产生。雷达探测层状云降水时表现为比较弱的反射率因子, 相当小的水平反射率梯度, 比较薄的垂直厚度, 顶部比较平整, 常出现零度层亮带(如果地面降水是液态)。

而对流性降水几乎是由大气不稳定导致的 1~10 m/s 量级的空气垂直运动引起的。雷达探测对流性降水时表现为强的反射率因子, 大的水平反射率梯度, 大的垂直厚度, 顶部不平整。这些形态特征在识别层状云-对流云降水中具有显著的作用。基于这些特征, 我们提出以下 6 个候选识别参数, 它们分别是:

(1) 组合反射率 (Composite Reflectivity, 表示为 Z_{CR} , 也称为垂直最大反射率);

(2) 反射率因子等于 35 dBZ 的回波顶高 (Echo Top, 表示为 H_{ET});

(3) 垂直累积液态水含量 (Vertically Integrated Liquid Water Content, 表示为 M_{VIL});

(4) 组合反射率的水平梯度 (Horizontal gradient of CR, 表示为 G_{CR});

(5) 反射率因子等于 35 dBZ 的回波顶高的水平梯度 (Horizontal gradient of ET, 表示为 G_{ET});

(6) 垂直累积液态水含量密度 (Density of VIL, 表示为 D_{VIL})。

在前人已做过的用雷达资料进行云分类的工作中, 很多都是使用等高平面位置显示 (Constant Altitude Plan Position Indicator, 简称 CAPPI) 资料。本文考虑用 Z_{CR} 而不是 3 km 高度的 CAPPI 作为候选识别参数的原因有二个: 一是 3 km 高度的 CAPPI 的覆盖半径有限; 二是仅用 3 km 高度的 CAPPI 不能考虑所有发展阶段的对流云。而考虑用 Z_{CR} 作为候选识别参数就可避免这二个问题, 不管对流云位于哪个发展阶段, 它都位于 Z_{CR} 的高值区。回波顶高一般是指 18 dBZ 的回波顶高, 本文考虑用 35 dBZ 而不是 18 dBZ 的回波顶高作为候选识别参数的原因是: (1) 由于雷达扫描策略的影响, 18 dBZ 的回波顶高可能不能被探测到, 从而会引起不真实的回波顶高及其水平梯度; (2) 对流云的组合反射率几乎都大于 35 dBZ, 选用 35 dBZ 的回波顶高不会去掉对流云格点; (3) 层状云的 35 dBZ 的回波顶高仍然比对流云的平整的多, 即其水平梯度比对流云的小得多。选取 M_{VIL} 作为候选识别参数的原因是: M_{VIL} 被定义为雷达能探测到的大气单位面积柱体内的可降水质量之和, 它是在假定反射率因子完全由液态水散射得到的情况下求得的。尽管它并不是真正意义上的液态水含量, 但降水粒子浓度大的区域, M_{VIL} 值一定大; 液态水含

量大的区域, M_{VIL} 值一定大。层状云的回波强度与高度一般都小于对流云的, 因而其 M_{VIL} 一般也小于对流云的。考虑把 G_{CR} 、 G_{ET} 作为候选识别参数是因为层状云和对流云的反射率和回波顶水平梯度的差异。考虑把 D_{VIL} 作为候选识别参数是因为 M_{VIL} 会受到离雷达的距离以及季节的影响, 而 D_{VIL} 可以减轻这两方面的影响。

3.2 候选识别参数的计算

Z_{CR} 、 H_{ET} 、 M_{VIL} 和 D_{VIL} 的计算首先是在极坐标系下的每个方位-斜距库上进行的, 分辨率为 $1^\circ \times 1 \text{ km}$, 范围为 230 km。然后把极坐标下的资料内插到直角坐标系下的网格上, 格点分辨率为 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 。计算 G_{CR} 、 G_{ET} 用的是直角坐标系下的格点 Z_{CR} 和 H_{ET} 资料。

(1) Z_{CR} 是用体积扫描获取的回波强度数据, 在每个方位-斜距库上, 对所有仰角的反射率因子进行比较, 挑选出最大的反射率因子。

(2) H_{ET} 是在 $\geq 35 \text{ dBZ}$ 的反射率因子被探测到时, 以最高仰角为基础的回波顶高度, 计算步骤为:

① 在方位-斜距库 (a, r) 上, 从最高仰角向下搜索第一个 $\geq 35 \text{ dBZ}$ 的仰角 e_1 ;

② 用仰角 e_1 以及其上面相邻仰角 e_2 的反射率因子 Z_1 和 Z_2 作为权重对 e_1 、 e_2 进行线性内插, 得到 35 dBZ 的反射率因子所对应的仰角 e , 计算公式如下:

$$e = w_1 \times e_2 + w_2 \times e_1, \quad (1)$$

其中, $w_1 = (Z_1 - 35) / (Z_1 - Z_2)$, $w_2 = 1 - w_1$, Z_1 和 Z_2 的单位为 dBZ 。

③ 用标准大气折射时的雷达测高公式计算点 (a, r, e) 所对应的高度 H_{ET} :

$$H_{\text{ET}} = h + r \sin e + \frac{r^2 \cos^2 e}{2R_e}, \quad (2)$$

其中, h 为雷达站海拔高度, R_e 为等效地球半径。

(3) M_{VIL} 定义为雷达能探测到的大气单位面积柱体内的可降水质量之和, 它是在假定反射率因子是完全由液态水散射得到的情况下, 由反射率因子数据转换成的等价液态水质量, 其计算公式是:

$$M_{\text{VIL}} = \sum 3.44 \times 10^{-6} \times \left(\frac{Z_i + Z_{i+1}}{2} \right)^{4/7} \Delta h_i, \quad (3)$$

其中, M_{VIL} 的单位为 kg/m^2 , Z_i 和 Z_{i+1} 分别是某个斜距-方位库上相邻仰角上的反射率因子, 单位为

mm^6/m^3 ; Δh_i 是这两个反射率因子所在处之间的厚度, 单位为 m 。在计算过程中我们不考虑强度小于 5 dBZ 而高度超过 5 dBZ 的回波顶高的反射率因子。

(4) G_{CR} 定义为 Z_{CR} 在 x 方向和 y 方向上一定范围以内的梯度中选出的一个大值, 其计算公式为

$$G_{\text{CR}} = \max \left(\left| \lg \frac{Z_{i+n} - Z_{i-n}}{2n} \right|, \left| \lg \frac{Z_{j+n} - Z_{j-n}}{2n} \right| \right), \quad (4)$$

其中, Z 表示 Z_{CR} , 单位为 mm^6/m^3 , i 代表 x 方向的第 i 个格点, j 代表 y 方向的第 j 个格点, n 代表格点数。 G_{CR} 的单位为 dB/km 。通过计算发现, G_{CR} 对 n 的取值大小具有敏感性, 当 $n=2$ 时, 层状云与对流云的 G_{CR} 差异最明显。

(5) G_{ET} 定义为 H_{ET} 在 x 方向和 y 方向上一定范围以内的梯度中的大值, 其计算公式为

$$G_{\text{ET}} = \max \left(\left| \frac{H_{i+n} - H_{i-n}}{2n} \right|, \left| \frac{H_{j+n} - H_{j-n}}{2n} \right| \right), \quad (5)$$

其中, H 表示 H_{ET} , i 代表 x 方向的第 i 个格点, j 代表 y 方向的第 j 个格点, n 代表格点数, 在本文中 $n=2$, G_{ET} 的单位是 km/km 。

(6) D_{VIL} 定义为 M_{VIL} 与雷达探测到的降水云的厚度之比, 其计算公式为

$$D_{\text{VIL}} = \frac{M_{\text{VIL}}}{H_t - H_b}, \quad (6)$$

其中, H_t 、 H_b 分别是雷达探测到的降水云的顶部和底部, 单位都是 km , 降水云的顶部是指雷达探测到的 5 dBZ 的回波顶高, D_{VIL} 的单位是 g/m^3 。

图 1 和图 2 分别给出了广州雷达观测的 2005 年 3 月 22 日 0251 UTC 和 2005 年 6 月 23 日 0007 UTC 的这 6 个候选识别参数的分布图。从图 1 和图 2 中可看出层状云和对流云的这 6 个候选识别参数都有一定差异, 对于所有的识别参数来说, 普遍都是对流云的大于层状云的。但是对于浅对流或强对流的边缘和厚实的层状云或有亮带增强的层状云来说, 候选识别参数值的大小不存在明显的门限。例如, 从图 1a 中可看出, 对流带边缘的 Z_{CR} (黄色) 和其后面层状云区的 Z_{CR} (黄色) 差不多; 从图 1c 中可看出, 对流带边缘的 H_{ET} 甚至比其后面层状云区的 H_{ET} 还低。因此, 我们需要用大量个例来统计这些候选识别参数分布的概率密度特征。

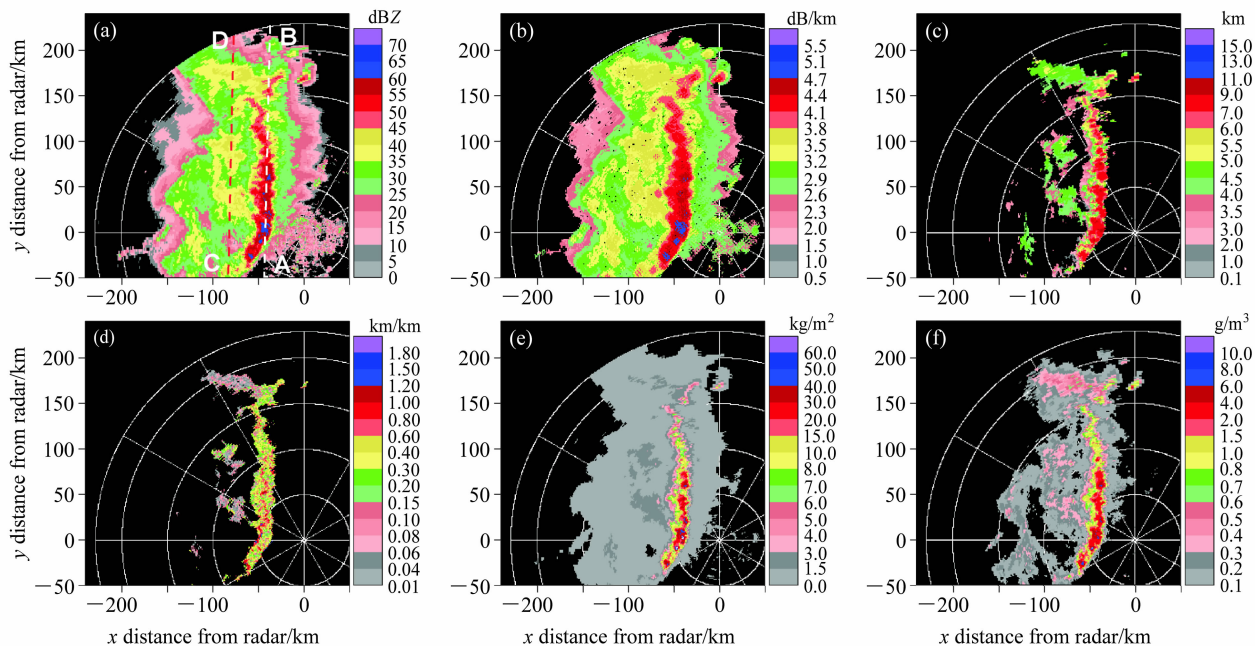


图 1 2005 年 3 月 22 日 0251 UTC 广州雷达观测的 6 个候选识别参数分布图: (a) Z_{CR} ; (b) G_{CR} ; (c) H_{ET} ; (d) G_{ET} ; (e) M_{VIL} ; (f) D_{VIL} .

Fig. 1 Distribution images of six separation parameters derived from Guangzhou radar at 0251 UTC 22 Mar 2005: (a) Z_{CR} ; (b) G_{CR} ; (c) H_{ET} ; (d) G_{ET} ; (e) M_{VIL} ; (f) D_{VIL} .

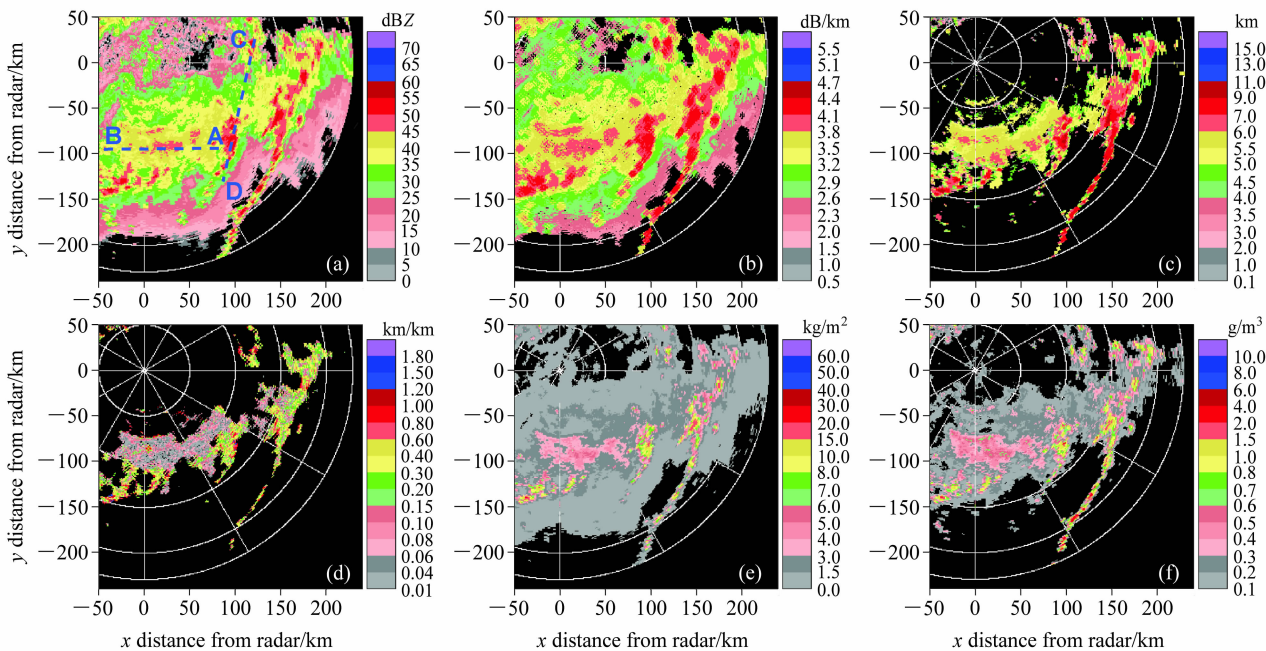


图 2 同图 1, 但为 2005 年 6 月 23 日 0007 UTC

Fig. 2 Same as Fig. 1, but at 0007 UTC 23 Jun 2005

3.3 候选识别参数的统计特征

理想的统计特征应该来自大量样本, 并且要求有真实的对流云和层状云区, 这在实际操作过程中比较困难。为此, 有气象学者提出, 可以选取少的

但是所包含信息却很丰富的样本来统计“真实”层状云和对流云的识别参数的分布特征, 这样的样本至少应该包括一个大范围的、有组织的、能容易区分层状云和对流云降水区的降水事件。在这里, 我

们选取了广州雷达观测的一个典型的有大范围尾迹层状云降水区的飑线过程, 资料时段为 3 月 22 日 0251~0320 UTC。此外, 还选取了一个有明显亮带增强的混合云降水过程, 资料时段为 6 月 23 日 0007~0107 UTC。对每个体扫资料, 首先通过 6 个候选识别参数分布图和选取的反射率垂直剖面图从视觉上确定层状云和对流云区, 给出能容易被区分的层状云和对流云的识别参数阈值。然后, 用人机交互方式选取“真实”的层状云和对流云区域, 步骤为: 首先用鼠标在图像区勾出容易与对流云混淆的层状云区, 然后用识别参数阈值把剩下的回波区分为层状云区和对流云区。由于不同的降水过程和不同的降水发展阶段, 层状云和对流云的候选参数值的大小会有变化, 因而, 每个体扫使用的识别参数阈值可能不一样。例如, 对于第一个例子的第一个时次(图 1), 首先用鼠标在 H_{ET} 图上勾出对流带后面的层状云区, 对于余下的回波区, 把 $Z_{CR} > 35$ 并且 $G_{CR} > 3.9$ 的像素点当成对流云, 剩下的为层状云。对于第二个例子的第一个时次(图 2), 首先用鼠标在 Z_{CR} 图上勾出有亮带增强的层状云区, 对于余下的回波区, 把 $H_{ET} > 6.0$ 并且 $G_{CR} > 3.8$ 的像素点当成对流云, 剩下的为层状云。之后, 用这两个天气过程中所选降水时段的所有“真实”的层状云和对流云区来分别统计 6 个候选识别参数的分布概率。图 3 给出了它们的分布概率密度图, 从图中可看出, 对于 6 个候选识别参数来说, 对流云的都普遍大于层状云的; 层状云和对流云的这 6 个识别参数的分布概率密度曲线都有相互交叉的一部分; G_{CR} 、 G_{ET} 和 D_{VIL} 的分布概率密度比 Z_{CR} 、 H_{ET} 和

M_{VIL} 的更集中。

3.4 识别方法

由于层状云和对流云的候选识别参数的分布概率密度曲线都有相互交叉的一部分, 如果选取一组固定的参数阈值肯定不能适用于各种情况下的层状云和对流云的识别, 因此, 我们提出使用模糊逻辑法^[19](Fuzzy Logic Method, 简称 FLM) 来实现层状云和对流云的识别。模糊逻辑法的最大特点是不追求云类型的具体的识别参数量值, 而是将识别参数分为各种等级, 根据宽松的分级原则, 求得较为合适的结果, 具有较强的扩充性和兼容性。模糊逻辑法最早是由 Zadeh^[20] 在 1965 年提出的, 传统的模糊逻辑法包括四个过程: 模糊化、规则推断、集成和退模糊^[21]。由于 G_{CR} 、 G_{ET} 和 D_{VIL} 的分布概率密度比 Z_{CR} 、 H_{ET} 和 M_{VIL} 的更集中, 本文在构建具体的体系结构时只用 Z_{CR} 、 H_{ET} 和 M_{VIL} 这 3 个识别参数作为输入变量, 输出变量是云的类型。我们采用基本形式为梯形函数的隶属函数系对这 3 个识别参数进行模糊化, 该函数的表达式如下:

$$T(x, x_1, x_2) = \begin{cases} 1, & x \leq x_1, \\ (x_2 - x)/(x_2 - x_1), & x_1 < x \leq x_2, \\ 0, & x > x_2. \end{cases} \quad (7)$$

在构造层状云和对流云的隶属函数时, 使用的参考门限值来自图 3 中的各识别参数分布的概率密度, 对于 G_{CR} , $x_1 = 3.7$, $x_2 = 4.2$; 对于 G_{ET} , $x_1 = 0.1$, $x_2 = 0.5$; 对于 D_{VIL} , $x_1 = 0.2$, $x_2 = 0.7$ 。模糊化是将输入变量以隶属函数的方式转换成模糊基, 图 4 给出了基于梯形函数构建的 3 个识别参数

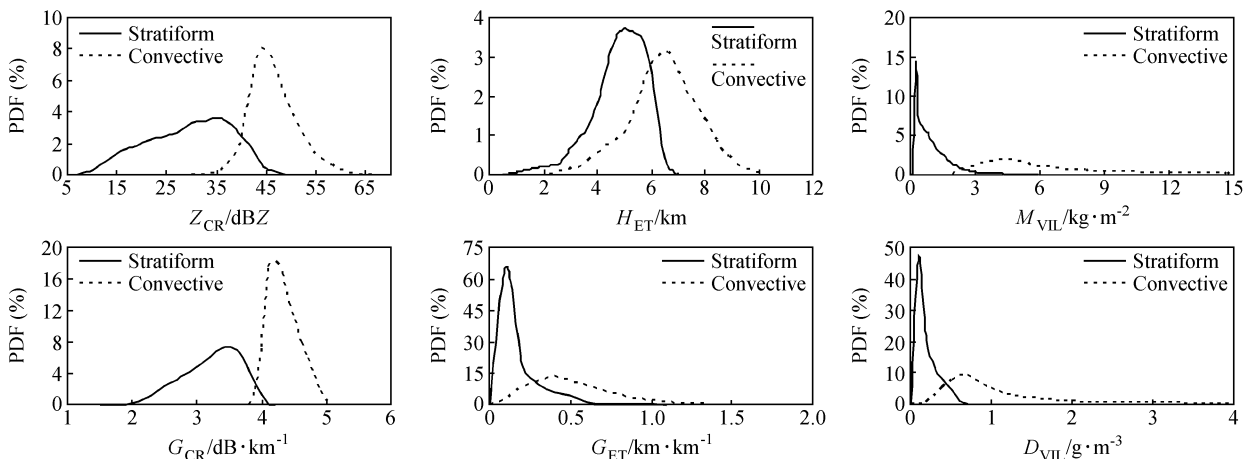


图 3 层状云和对流云的 6 个候选识别参数的分布概率密度 (PDF)

Fig. 3 Probability density function (PDF) of six separation parameters for the stratiform cloud and convective cloud

的隶属函数对应的层状云的模糊基。规则推断相当于求雷达观测值是层状云或对流云的条件概率，表达式为

$$P_i = \sum_{j=1}^n \omega_j P_{ij},$$

其中， i 代表云类型， j 代表输入变量， n 是输入变量的个数， P_{ij} 是第 j 个输入变量对第 i 类云的贡

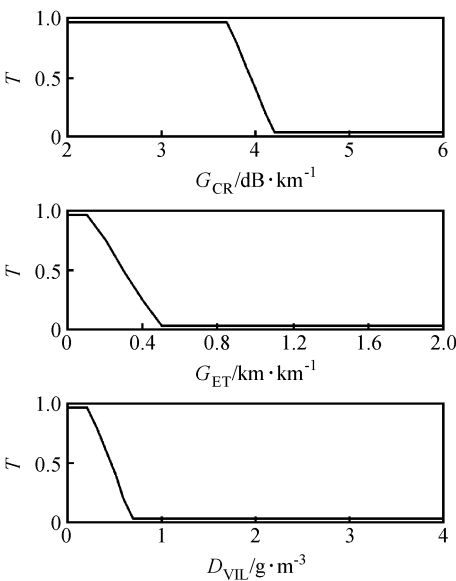


图 4 基于 T 函数的识别参数的模糊基设置
Fig. 4 Fuzzy setting based on T function for the separation parameters

献，它等于相应的隶属函数值， ω_j 是给第 j 个输入变量的权重，并且有

$$\sum_{j=1}^n \omega_j = 1.$$

这里，取 $\omega_{G_{CR}} = 0.4$ ， $\omega_{D_{VIL}} = \omega_{G_{ET}} = 0.3$ 。由于本文只把云分成层状云和对流云两类，我们只需要求雷达观测值是层状云的条件概率 P_1 ，如果 $P_1 \geq 0.5$ 就被归为层状云，如果 $P_1 < 0.5$ 就被归为对流云。

3.5 识别结果及分析

我们对广州雷达观测的 2005 年 3 月 22 日 0251 UTC、2005 年 6 月 23 日 0007 UTC 和福州雷达观测的 2005 年 3 月 28 日 1548 UTC 的层状云和对流云的识别结果进行了分析，三个个例都使用上一节给出的模糊基设置。

2005 年 3 月 22 日的天气过程是一个典型的具有尾迹层状云区的飑线^[22]过程，从图 1a 可看出飑线前部有轮廓鲜明的对流带，对流带中回波单体结构紧密，边界清晰，回波强度强。在对流带后面有大片尾迹层状云区，回波呈弥散状分布，中等强度。图 5a 和图 5b 给出了图 1a 中的两条虚线对应的反射率垂直剖面图。从图 5a 可看出对流带中的回波单体呈柱状结构，回波顶起伏不平；而图 5b 中的回波结构较均匀，顶部较平整，垂直厚度不大，具有典型的层状云垂直结构特征。

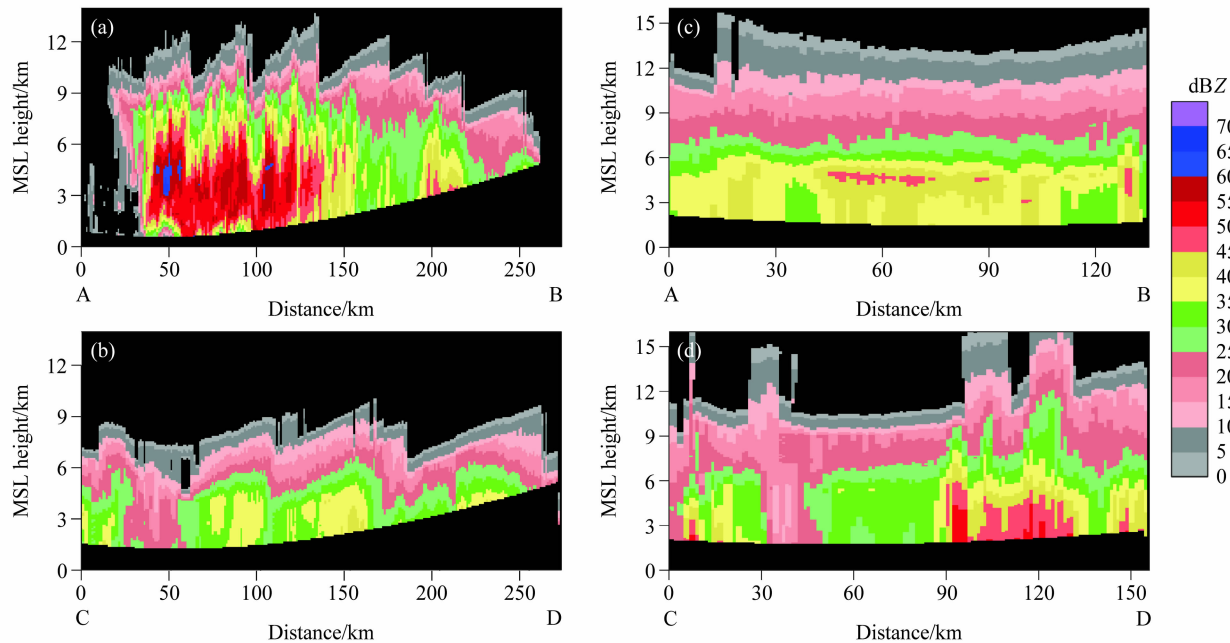


图 5 图 1a 中虚线 AB (a)、CD (b) 及图 2a 中虚线 AB (c)、CD (d) 对应的反射率垂直剖面
Fig. 5 Vertical cross sections of reflectivity along dashed lines AB (a) and CD (b) in Fig. 1a and AB (c) and CD (d) in Fig. 2a

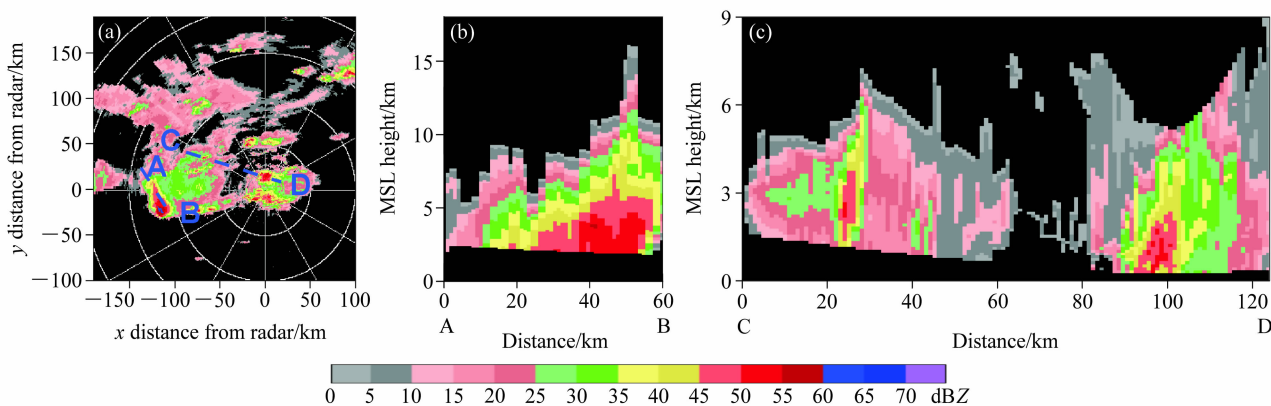


图 6 梅州雷达 2005 年 3 月 28 日 1548 UTC 的 Z_{CR} (a) 及其中虚线 AB (b) 和 CD (c) 所对应的反射率垂直剖面
Fig. 6 Z_{CR} distribution (a) and vertical cross sections of reflectivity along dashed lines AB (b) and CD (c) in (a) derived from Meizhou radar at 1548 UTC 28 Mar 2005

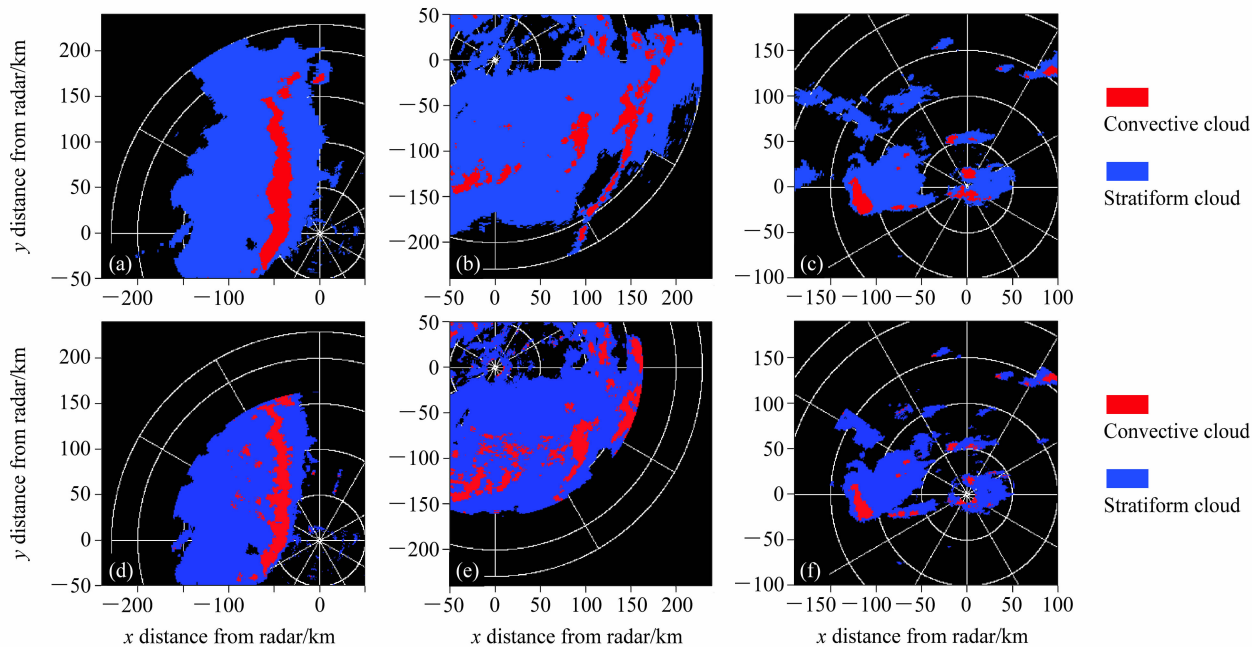


图 7 用模糊逻辑法 (a、b、c) 和改进的巅峰值法 (d、e、f) 识别层状云和对流云的结果: (a、d) 2005 年 3 月 22 日 0251 UTC; (b、e) 2005 年 6 月 23 日 0007 UTC; (c、f) 2005 年 3 月 28 日 1548 UTC
Fig. 7 Separation results of stratiform and convective cloud by the fuzzy logic method (a, b, c) and the advanced maxima method (d, e, f): (a, d) 0251 UTC 22 Mar 2005; (b, e) 0007 UTC 23 Jun 2005; (c, f) 1548 UTC 28 Mar 2005

2005 年 6 月 23 日的天气过程是一个典型的混合云降水过程,从图 2a 可看出,大范围降水回波中夹有一个个结实的团块。图 5c 和图 5d 给出了图 2a 中二条虚线对应的反射率垂直剖面图。从图 5c 可看出回波结构均匀,顶部非常平整,垂直厚度比较大,在 4~5 km 之间有明显的亮带增强,说明该区域是厚实的层状云区。从图 5d 中可看出这条线所在处是层状云中夹着一些对流云,对流高度不是很

高。

2005 年 3 月 28 日的天气过程以强对流天气为主,图 6 给出了 1548UTC 的组合反射率及其两条虚线所对应的反射率垂直剖面,从图中可看出大片弱回波中夹有多个对流单体。

图 7a、图 7b 和图 7c 给出了用模糊逻辑法得到的 3 个例子的识别结果,从图 7a 中可看出飚线前部的对流带和后部的大范围层状云区被很好地识别

出来;从图 7b 和 7c 中可看出大范围的混合云降水中的层状云与对流云也被合理的识别,比较图 7b 和图 2a,可看出零度层亮带增强区也几乎被正确地归为层状云。由于福州的个例资料没有用于识别参数的分布特征统计,这个例子中层状云和对流云的合理识别说明了根据图 3 中识别参数的分布概率密度设置的模糊基是有代表性的。

为了说明本识别方法的有效性和合理性,我们也用改进的巅峰值法对这三个个例进行了层状云和对流云的识别,所做的改进是把用巅峰值法得到的识别结果进行修正,即把反射率水平梯度 $> 3.5 \text{ dB/km}$ 并且反射率因子 $\geq 40 \text{ dBZ}$ 的层状云重新归为对流云,把反射率水平梯度 $\leq 3.5 \text{ dB/km}$ 并且反射率因子 $< 40 \text{ dBZ}$ 的对流云重新归为层状云。图 7d、图 7e 和图 7f 给出了用改进的巅峰值法得到的 3 个例子的识别结果,从图中可看出该方法也基本上识别了大部分层状云和对流云,由于巅峰值法是在 3 km 高度的 CAPPI 上进行的,它的识别范围比用模糊逻辑法识别的范围小。比较图 7d 和图 7a,发现图 7d 中的对流带宽度比图 7a 中的要窄一些,对流带后面有一些厚实的层状云被归为对流云;比较图 7e 和图 7b,发现在图 7e 中,有亮带增强的层状云被错误归为对流云的区域比图 7b 中的多;比较图 7f 和图 7c,也发现图 7f 中的对流云范围比图 7c 中的略少一些。这是因为改进的巅峰值法只考虑了反射率分布的二维水平形态特征而没有考虑其垂直形态特征,对于对流核的外围和厚实的层状云,它们的反射率二维形态特征没有明显差异,所以容易被错误分类,即把很厚的层状云当成了对流云;把对流核的外围当成了层状云。这与 Biggerstaff 等^[16]发现的用巅峰值法出现的两个主要错误分类的结论是一致的,而考虑了反射率三维形态特征的模糊逻辑法在这两个方面有很大改善。

4 结论

本文基于层状云和对流云的雷达反射率分布的三维形态特征,提出了识别层状云和对流云的 6 个候选识别参数 (Z_{CR} 、 H_{ET} 、 M_{VIL} 、 G_{CR} 、 G_{ET} 和 D_{VIL}),并用广州新一代天气雷达观测的二个典型个例的体扫资料统计了这些参数的分布概率特征,最后确定分布概率密度更集中的 G_{CR} 、 G_{ET} 和 D_{VIL} 作为模糊逻辑法的输入变量进行层状云和对流云的

识别。使用广州雷达和福州雷达观测的三个例子进行了层状云和对流云的识别试验,并把识别结果与用改进的巅峰值法得到的识别结果进行了比较,结果发现:

(1) 对于 6 个候选识别参数来说,对流云的都普遍大于层状云的,但是层状云和对流云的这 6 个识别参数的分布概率密度曲线都有相互交叉部分,如果选取一组固定的参数阈值不适用于各种情况下的层状云和对流云的识别,因此提出使用模糊逻辑法进行层状云和对流云的识别;

(2) G_{CR} 、 G_{ET} 和 D_{VIL} 的分布概率密度比 Z_{CR} 、 H_{ET} 、 M_{VIL} 的更集中,因而被确定为最后的识别参数;

(3) 用模糊逻辑法和改进的巅峰值法都能合理地识别大部分层状云和对流云;但是由于改进的巅峰值法只考虑了反射率分布的二维形态特征,它容易把对流核的外围识别成层状云,把厚实的层状云识别成对流云,而考虑了反射率分布三维形态特征的模糊逻辑法在这两个方面有很大改善。

参考文献 (References)

- [1] Koistinen J. Operational correction of radar rainfall errors due to vertical profile of reflectivity. Preprints, 25th Radar Meteorology Conf., Paris, France, Amer. Meteor. Soc., 1991. 91~96
- [2] Fabry F, Austin G L, Tees D. The accuracy of rainfall estimates by radar as a function of range. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1992, **118**: 435~453
- [3] Andrieu H, Creutin J D. Identification of vertical profile of radar reflectivity for hydrological applications using an inverse method. Part I: Formulation. *J. Appl. Meteor.*, 1995, **34**: 225~239
- [4] Smith J A, Seo D J, Baeck M L, et al. An intercomparison study of NEXRAD precipitation estimates. *Water Resour. Res.*, 1996, **32**: 2035~2045
- [5] 刘红燕,雷恒池. 基于地面雨滴谱资料分析层状云和对流降水的特征. *大气科学*, 2006, **30** (4): 693~702
Liu Hongyan, Lei Hengchi. Characteristics of rain from stratiform versus convective cloud based on the surface rain-drop data. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2006, **30** (4): 693~702
- [6] 何会中,程明虎,周凤仙. 0302 号(鲸鱼)台风降水和水粒子空间分布的三维结构特征. *大气科学*, 2006, **30** (3): 491~503
He Huizhong, Cheng Minghu, Zhou Fengxian. 3D structure of rain and cloud hydrometeors for typhoon Kujira (0302).

- Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2006, **30** (3): 491~503
- [7] Houze R A Jr. Observed structure of mesoscale convective systems and implications for large-scale heating. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1989, **115**: 425~461
- [8] DeMaria M. Linear response of a stratified tropical atmosphere to convective forcing. *J. Atmos. Sci.*, 1985, **42**: 1944~1959
- [9] Austin P M, Houze R A Jr. Analysis of the structure of precipitation patterns in New England. *J. Appl. Meteor.*, 1972, **11**: 926~935
- [10] Churchill D D, Houze R A Jr. Development and structure of winter monsoon cloud clusters on 10 December 1978. *J. Atmos. Sci.*, 1984, **41**: 933~960
- [11] Steiner M, Houze R A Jr, Yuter S E. Climatological characterization of three-dimensional storm structure from operational radar and rain gauge data. *J. Appl. Meteor.*, 1995, **34**: 1978~2007
- [12] 潘江, 张培昌. 不同类型降水回波的自动识别方法. 南京气象学院学报, 1999, **22** (3): 398~402
Pan Jiang, Zhang Peichang. Recognition of precipitation echo types. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 1999, **22** (3): 398~402
- [13] DeMott C A, Cifelli R, Rutledge S A. An improved method for partitioning radar data into convective and stratiform components. Preprints, 27th Conf. on Radar Meteorology, Vail, CO, Amer. Meteor. Soc., 1995, 233~236
- [14] Rosenfeld D, Amitai E, Wolff D B. Classification of rain regimes by the three-dimensional properties of reflectivity fields. *J. Appl. Meteor.*, 1995, **34**: 198~211
- [15] Rosenfeld D, Wolff D B, Amitai E. The window probability matching method for rainfall measurements with radar. *J. Appl. Meteor.*, 1994, **33**: 682~693
- [16] Biggerstaff M I, Listenmaa A. An improved scheme for convective/stratiform echo classification using radar reflectivity. *J. Appl. Meteor.*, 2000, **39**: 2129~2150
- [17] 张培昌, 杜秉玉, 戴铁丕. 雷达气象学. 北京: 气象出版社, 2001. 314~324
Zhang Peichang, Du Bingyu, Dai Tiepi. *Radar Meteorology* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2001. 314~324
- [18] Liu Hongping, Chandrasehar V. Classification of hydrometeor based on polarimetric radar measurements: Development of fuzzy logic and neuro-fuzzy systems, and in situ verification. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 2000, **17**: 140~164
- [19] 曹俊武, 刘黎平, 葛润生. 模糊逻辑法在双线偏振雷达识别降水粒子相态中的研究. 大气科学, 2005, **29** (15): 827~836
Cao Junwu, Liu Liping, Ge Runsheng. A study of fuzzy logic method in classification of hydrometeors based on polarimetric radar measurement. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2005, **29** (15): 827~836
- [20] Zadeh L A. Fuzzy sets. *Info. & Ctl.*, 1965, **8** (3): 338~353
- [21] Zadeh L A. Fuzzy algorithms. *Info. & Ctl.*, 1968, **12**: 94~102
- [22] Houze R A Jr. Mesoscale convective systems. *Rev. Geophys.*, 2004, **42**: 1~43