

模糊逻辑法在双线偏振雷达识别 降水粒子相态中的研究

曹俊武^{1, 2, 3} 刘黎平² 葛润生²

1 南京信息工程大学, 南京 210044

2 中国气象局气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

3 安徽四创电子股份有限公司, 合肥 230088

摘 要 根据不同相态降水粒子的散射和空间取向等特征建立了基本形式为不对称的 T 型函数的模糊逻辑识别的隶属函数, 完善了该识别方法的流程, 并利用美国 KOUN 雷达的观测资料, 详细讨论了利用双线偏振雷达观测资料识别降水粒子相态的方法, 并对其在实际业务运用中的合理性和可行性进行分析探讨。通过分析, 作者认为: (1) 利用模糊逻辑方法处理双线偏振雷达测量到的偏振参数, 可以识别降水区域的降水粒子相态, 反映降水区域的相态结构, 识别的结果基本合理, 但还需要资料作进一步的研究。(2) 从实际资料的分析结果来看, 虽然利用模糊逻辑法识别降水粒子相态得到的结果比较粗, 没有明确的数据特征值, 但是它基本上能反映各种降水粒子的相态结构, 其识别的结果对目前日常的天气预报参考和人工影响天气的作业指挥和效果评估来说还是符合可用的。为中国国内未来的双线偏振雷达业务运行提供参考和帮助。(3) 根据有限的观测资料分析表明, 降水区域中出现 60 dBZ 以上的回波强度, 并不一定就会出现冰雹, 还有可能是大粒子的液态降水。综合考虑双线偏振雷达的测量参数, 可以得到更合理的结果。

关键词 模糊逻辑 双线偏振雷达 降水粒子的相态结构 隶属函数

文章编号 1006-9895(2005)05-0827-10

中图分类号 P406

文献标识码 A

A Study of Fuzzy Logic Method in Classification of Hydrometeors Based on Polarimetric Radar Measurement

CAO Jun-Wu^{1, 2, 3}, LIU Li-Ping², and GE Run-Sheng²

1 Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

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

3 Anhui Sun-Create Electronics Limited Company, Hefei 230088

Abstract The polarimetric radar measurements are sensitive to the types, shapes, and sizes distribution. It is a useful remote sensing tool for the study of hydrometeor classification. A fuzzy logic system for classification of hydrometeor type based on polarimetric radar measurements is described. First, the membership function of fuzzy logic method is constructed according to the feasibility of scattering and orientation of different kinds of hydrometeors, and the asymmetric trapezoidal membership function is chosen as the form of the membership functions. Then, the method of classification of hydrometeors based on polarimetric radar measurement is discussed in detail by using KOUN radar observation data. The feasibility and rationality of its application in operation are also analyzed. The main conclusions are got as follows: (1) Fuzzy logic method based on polarimetric radar data can be used in hydro-

收稿日期 2004-07-26, 2005-02-22 收修定稿

基金项目 科技部科研院所技术开发研究专项“双线偏振雷达气象产品生成软件系统研制”

作者简介 曹俊武, 男, 1971 年出生, 高工, 在读博士, 目前主要从事气象雷达终端开发和气象产品算法的研究。E-mail: caojunwu@sun-create.com

meteors classification, and the results are basically reasonable based on two case studies. It can reveal the development course of weather system, and classify hydrometeor types, but still need be further studied. (2) Although the classification result is coarse and has no definite value, it still can be used to initialize meso-scale numerical weather prediction models, offer reference to daily weather forecast and evaluate the results of artificial weather modification. It can provide reference in the polarimetric radar operation of China. (3) It may be not hail but big rain drops although the value of reflectivity is larger than 60 dBZ based on data analysis.

Key words fuzzy logic, dual linear polarimetric radar, hydrometeor type, membership function

1 引言

电子和计算机技术的发展使得天气雷达测量回波信号的能力有较明显的提高,新一代天气雷达回波信号功率的估测精度可控制在 -1 dB 到 $+1\text{ dB}$ ^[1]以内。但回波信号功率测量精度的提高,不等于说对降水强度估测精度的提高以及对降水质点相态估测的准确,实际测量也证明了这一点,其原因是降水质点的分布和相态之间的差异。尽管有统计上的特点,但对某次的观测其测量结果并不相符,尤其是降水质点的直径超过瑞利散射的条件、降水质点的扁平结构,以及出现固态降水粒子时,这些都大大影响了天气雷达定量测量降水和识别降水质点相态的能力。双线偏振雷达是改善测量强降水及判断降水质点相态的一种新方法,有可能改善对强降水的强度以及对降水粒子质点相态的估测。在这方面国内外都进行了不少的研究和分析,这些工作主要包括两个方面:(1)对降水粒子的形状、密度和谱分布做出假设,得出它们参量的特性,然后结合实际的雷达测量资料进行降水粒子的相态识别^[2~6]。(2)在大量观测试验的基础上,建立各种降水粒子类型的偏振参量的范围,然后采用不同的处理方法来进行降水粒子的相态识别^[7~11]。但是这些工作主要是建立在降水质点谱分布的基础上,采用统计分析的方法,在评价强降水的估测上有明显的改善,但是不能保证有高的估测精度,其原因是因为降水质点谱分布随机性和取样的方向性以及质点取样性不全一致。

随着我国新一代多普勒雷达系统组网正在进行并将逐步投入业务运行,许多雷达生产厂家都致力于在多普勒天气雷达基础上升级双线偏振功能研究,双线偏振多普勒雷达在气象、水文、航空领域的应用越来越有现实意义。目前,我国自行研制的用于组网的C波段C型号的中国新一代天气雷达(CIN-

RAD/CC)已经完成其双线偏振功能的多普勒雷达改造,即将进行外场试验状态。中国组网雷达中的S波段A型号的新一代天气雷达(CINRAD/SA)是美国WSR-88D(Weather Surveillance Radar-1988 Doppler)的改进型产品,具有和WSR-88D雷达基本相同的功能,目前WSR-88D在美国已经成功地完成其具有双线偏振功能的KOUN雷达的改造。本文将讨论利用模糊逻辑法识别降水粒子相态(Fuzzy logic Hydrometeor Classification,简称FHC)的可行性和合理性,给出了FHC的具体流程过程,并借用美国KOUN雷达的观测资料,对其在实际应用的过程中进行分析和完善,为我国未来的双线偏振雷达业务运行提供参考依据和帮助。

2 FHC方法介绍

模糊逻辑法最早是由Zadeh^[12]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(有关该方法的详细情况参阅文献^[13])。本文在构建具体FHC的体系结构时,用 Z_H (雷达水平反射率因子)、 Z_{DR} (差分反射率因子)、 K_{DP} (差传播相移)、 ρ_{HV} (零滞后互相关系数)这4个双线偏振雷达的测量参数作为输入变量,采用了基本形式为梯形函数的隶属函数系来对4个雷达测量参数进行模糊化,在构造各自的隶属函数参考了Straka^[14]给出的参数门限值,输出变量是降水粒子类型(C),FHC对C的推断是基于4个输入变量的各自的规则基。表1列出了可以区分的10类降水粒子相态。

FHC最大的特点是不追求具体的降水粒子类型的量值,而是将回波信号分为各种等级,根据宽松的分级原则,可以求得较为合适的结果,具有较强的扩充性和兼容性。这种方法不受统计公式的影响,识别结果是不同类型的降水粒子相态,其结果可用于日常的天气预报参考和人工影响天气的作业

表 1 FHC 系统的输出类型

Table 1 Output of the FHC system

降水粒子类型 Hydrometeor type	输出结果 Output C
毛毛雨 Drizzle (DR)	1
雨 Rain (RA)	2
干雪 Dry Snow (DS)	3
干冰 Dry Crystal (DC)	4
湿雪 Wet Snow (WS)	5
干霰 Dry Graupel (DG)	6
湿霰 Wet Graupel (WG)	7
小冰雹 Small Hail (SH)	8
大冰雹 LarGe hail (LG)	9
雨+雹 Rain / Hail (HR)	10

指挥和效果评估。

3 FHC 的流程设计

在设计 FHC 的流程之前，首先要分析双线偏振雷达的观测资料。

3.1 双线偏振多普勒雷达的测量参数及其特征

传统的双线性偏振多普勒雷达，能得到的雷达偏振参数包括雷达水平反射率因子(Z_H)、差分反射率因子(Z_{DR})、差传播相移(K_{DP})、零滞后互相关系数(ρ_{HV})等，其定义分别如下：

$$Z_{HH} = 10^6 \frac{\lambda^4}{\pi^5} \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^{-2} \int \sigma_{HH} N(D) dD, \quad (1)$$

$$Z_{VV} = 10^6 \frac{\lambda^4}{\pi^5} \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^{-2} \int \sigma_{VV} N(D) dD, \quad (2)$$

$$Z_{DR} = 10 \lg \left(\frac{Z_{HH}}{Z_{VV}} \right), \quad (3)$$

$$Z_H = 10 \lg(Z_{HH}), \quad (4)$$

$$K_{DP} = \text{Re}(k_H - k_V) \frac{180}{\pi}, \quad (5)$$

其中， λ 是雷达波长， m 为粒子的复折射系数， $N(D)$ 为粒子的谱分布函数， σ_{HH} 为粒子对水平偏振波的后向散射截面， σ_{VV} 为粒子对垂直偏振波的后向散射截面， Z_{HH} 为水平偏振波的水平雷达反射率因子， Z_{VV} 为垂直偏振波的垂直雷达反射率因子， k_H 、 k_V 分别为水平和垂直偏振波的传播常数， Re 表示取复数的实部。具体的介绍如下。

3.1.1 水平反射率因子 Z_H

雷达测量到的水平反射率因子 Z_H 应该是雷达测量波束空间内的所有相态粒子的 Z_H 总和：

$$Z_H = 10 \lg(Z_{HHr} + Z_{HHs} + Z_{HHc} + Z_{HHsh} + \cdots), \quad (6)$$

其中， Z_{HHr} 、 Z_{HHs} 、 Z_{HHc} 、 Z_{HHsh} 分别是雨、雪花、霰粒、小冰雹的水平(HH)偏振雷达反射率因子， $\cdots$ 表示其他降水粒子的水平(HH)偏振雷达反射率因子。从水平反射率因子来看，粒子的尺寸大小和粒子数量的多少是决定 Z_H 值的主要因素。

3.1.2 差分反射率因子 Z_{DR}

差分反射率因子定义为水平偏振反射率与垂直偏振反射率之比，主要表征粒子的空间取向和长短轴之比，在各种降水粒子并存的空间，其总的 Z_{DR} 值受较多因素的制约：

$$Z_{DR} = 10 \lg \left(\frac{Z_{HHr} + Z_{HHs} + Z_{HHc} + Z_{HHsh} + \cdots}{Z_{V Vr} + Z_{V Vs} + Z_{V Vc} + Z_{V Vsh} + \cdots} \right), \quad (7)$$

其中， Z_{HHr} 、 Z_{HHs} 、 Z_{HHc} 、 Z_{HHsh} 的说明同上， $Z_{V Vr}$ 、 $Z_{V Vs}$ 、 $Z_{V Vc}$ 、 $Z_{V Vsh}$ 分别是雨、雪花、霰粒、小冰雹的垂直(VV)偏振雷达反射率因子，省略号表示其他降水粒子的水平(HH)和垂直(VV)偏振雷达反射率因子。从 Z_{DR} 的特性来看，粒子的形状和空间取向以及下落运动是决定其 Z_{DR} 值的主要因素，而与降水区内粒子的数量无关。各种降水粒子的 Z_{DR} 特性主要有：(1)雨区的 Z_{DR} 大于 0 dB，且雨滴越大， Z_{DR} 越大。(2)结构松软的冰相降水粒子(如雪花、湿霾等)的 Z_{DR} 绝对值比较小，结构紧密的冰相粒子(如冰晶、干霰等)的 Z_{DR} 绝对值比较大。(3)尺寸较小冰雹的 Z_{DR} 与其形状、大小、空间取向以及下落运动等有关，一般来说，其 Z_{DR} 值趋于 0 dB，而对于尺寸较大的冰雹，由于其在下落过程中保持自由降落状态，其 Z_{DR} 值一般小于 0 dB。(4)冰雹的外覆水膜可以改变其 Z_{DR} 的值。

3.1.3 差传播相移 K_{DP}

差传播相移 K_{DP} 是由降水粒子的前向散射的相位差异造成的，它表示粒子对雷达波传播速度或相位的影响，由下式估计：

$$K_{DP} = \frac{1}{2} \frac{\Phi_{dp}(r_{n+1}) - \Phi_{dp}(r_n)}{r_{n+1} - r_n}, \quad (8)$$

其中， $\Phi_{dp}(r_n)$ 和 $\Phi_{dp}(r_{n+1})$ 分别为在降水区内相邻距离 r_n 和 r_{n+1} 处测得的双程传播相位差。液态降水是影响 K_{DP} 的主要因素，降雨强度越大，其对应的 K_{DP} 就越大，固态降水产生的 K_{DP} 很小。在混合相态的降水粒子中， K_{DP} 主要是由液态降水产生的，而 Z_{DR} 的产生却是两者共同作用的结果，这点在识别降水粒子相态中至关重要。

3.1.4 零滞后互相关系数 ρ_{HV}

零滞后互相关系数 ρ_{HV} 定义为水平偏振回波信号与垂直偏振回波信号的零滞后互相关系数的幅值,反映了水平和垂直偏振波的后向散射特征的相关性。从 ρ_{HV} 的特性来看,粒子的形状和空间取向以及降水粒子的数量是影响其值的主要因素。

各种降水粒子的 ρ_{HV} 特性主要有:(1)冰雹的 ρ_{HV} 值一般在 0.90~0.95 之间,而在大的湿雹区(米散射区),其值要小于 0.90。(2)液态降水的 ρ_{HV} 值除了在冰水混合区以外,一般要大于 0.95,甚至能达到 0.99。(3)在冰水混合区,由于冰雹在下落过程中的翻转摆动,使得返回的水平和垂直偏振信号的相关性较差,会使 ρ_{HV} 降低到 0.9 以下,甚至在一些共振散射区, ρ_{HV} 值会下落到 0.5 以下。

3.2 FHC 的流程

要进行降水粒子的相态识别,首先要利用隶属函数对 4 个雷达测量参数进行模糊化,系统中每个输入参数都有 10 个隶属函数,分别对应于即将识别出的 10 类降水粒子产品。模糊化以后,使用规则基进行规则推断,然后进行集成和退模糊,将集成的结果转化成单一的降水粒子类型。

3.2.1 模糊化和隶属函数

模糊化是将输入的雷达测量参数以隶属函数的方式转换成模糊基,每一个测量参数针对待识别的 10 类降水粒子类型建立了 10 个模糊基。每个模糊基可以用隶属函数 MBF_{ij} 来表示,其中,下标 i 表

示输入的雷达观测参数, j 表示可识别的降水粒子类型。隶属函数的形式有多种,我们分别选取了 β 型函数和不对称的梯形 T 型函数作为隶属函数的基本形式进行了对比分析试验,结果发现两者得到的结果基本相同。这里,我们选取不对称的梯形 T 型函数作为隶属函数的基本形式,该函数形状由 4 个参数决定(图 1):左起始点值 X_1 ,左区间点值 X_2 ,右区间点值 X_3 ,右结束点值 X_4 ,是一个关于区间 $[X_2, X_3]$ 取值的函数 [式(9)]。

$$T(x, X_1, X_2, X_3, X_4) = \begin{cases} 0, & x < X_1, \\ \frac{x - X_1}{X_2 - X_1}, & X_1 \leq x < X_2, \\ 1, & X_2 \leq x < X_3, \\ \frac{X_4 - x}{X_4 - X_3}, & X_3 \leq x < X_4, \\ 0, & x \geq X_4. \end{cases}$$

(9)

不同的隶属函数 MBF_{ij} , 分别对应不同的参数值,如何确定 T 函数的系数 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 , 是决定 FHC 识别结果的关键。根据 3.1 节的分析结果,表 2 给出了表 1 中 10 类降水粒子相态极化测量参数的门限值,并以此参数门限值来构造各自的隶属函数。事实上,模糊逻辑法本身具有的模糊性,这些系数本身的细小变化是不足以影响到最终的识别结果的。至于这些系数的设置对 FHC 的识别结果的影响以及各个偏振参数对其识别结果的灵敏度,这里不再过多分析,我们将在另文给予讨论。

表 2 10 类水凝物的成员函数参数设置
Table 2 Membership function values of polarimetric variables for 10 types of hydrometeors

		DR	RA	DS	DC	WS	DG	WG	SH	LG	HR
$T(Z_{\text{H}})$	X_1/dBZ	0	23	0	0	0	38	39	48	53	45
	X_2/dBZ	0	27	0	0	0	40	42	50	56	50
	X_3/dBZ	22	58	35	25	43	50	54	60	70	70
	X_4/dBZ	28	63	41	32	46	52	56	62	70	70
$T(Z_{\text{DR}})$	X_1/dB	-0.2	0.1	-0.2	-0.3	-0.3	-0.6	-0.8	-0.6	-2	-1.2
	X_2/dB	0.2	0.6	0.2	0.2	0.2	-0.4	-0.4	-0.4	-2	-0.8
	X_3/dB	0.8	3.8	0.5	5	2.6	0.8	2.6	0.4	-0.8	0.8
	X_4/dB	1.2	4.3	0.7	5	3.2	1.2	3.2	0.6	-0.2	1.2
$T(K_{\text{DP}})$	$X_1/(\text{^\circ}) \cdot \text{km}^{-1}$	-0.3	-0.4	-0.1	0.3	-0.2	-0.8	-0.4	-0.8	-1.2	-0.8
	$X_2/(\text{^\circ}) \cdot \text{km}^{-1}$	0	0.2	0.2	0.5	0.3	-0.4	0	-0.5	-0.8	0.2
	$X_3/(\text{^\circ}) \cdot \text{km}^{-1}$	0	12	0.5	1.5	2.0	0.4	2.0	0.5	0.8	12
	$X_4/(\text{^\circ}) \cdot \text{km}^{-1}$	0.3	12	0.8	1.8	2.3	0.8	2.2	0.8	1.2	12
$T(\rho_{\text{HV}})$	X_1	0.96	0.92	0.92	0.90	0.75	0.92	0.90	0.90	0.92	0.82
	X_2	0.98	0.97	0.97	0.96	0.84	0.97	0.97	0.97	0.97	0.92
	X_3	1	1	1	1	0.93	1	1	1	1	1
	X_4	1	1	1	1	0.98	1	1	1	1	1

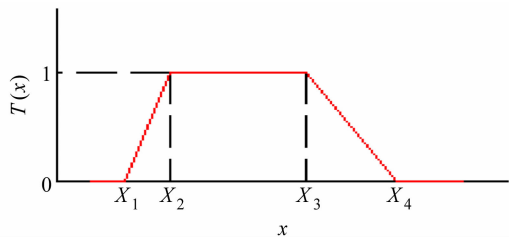


图 1 不对称的 T 型隶属函数形式
Fig. 1 Asymmetric Trapezoidal membership function

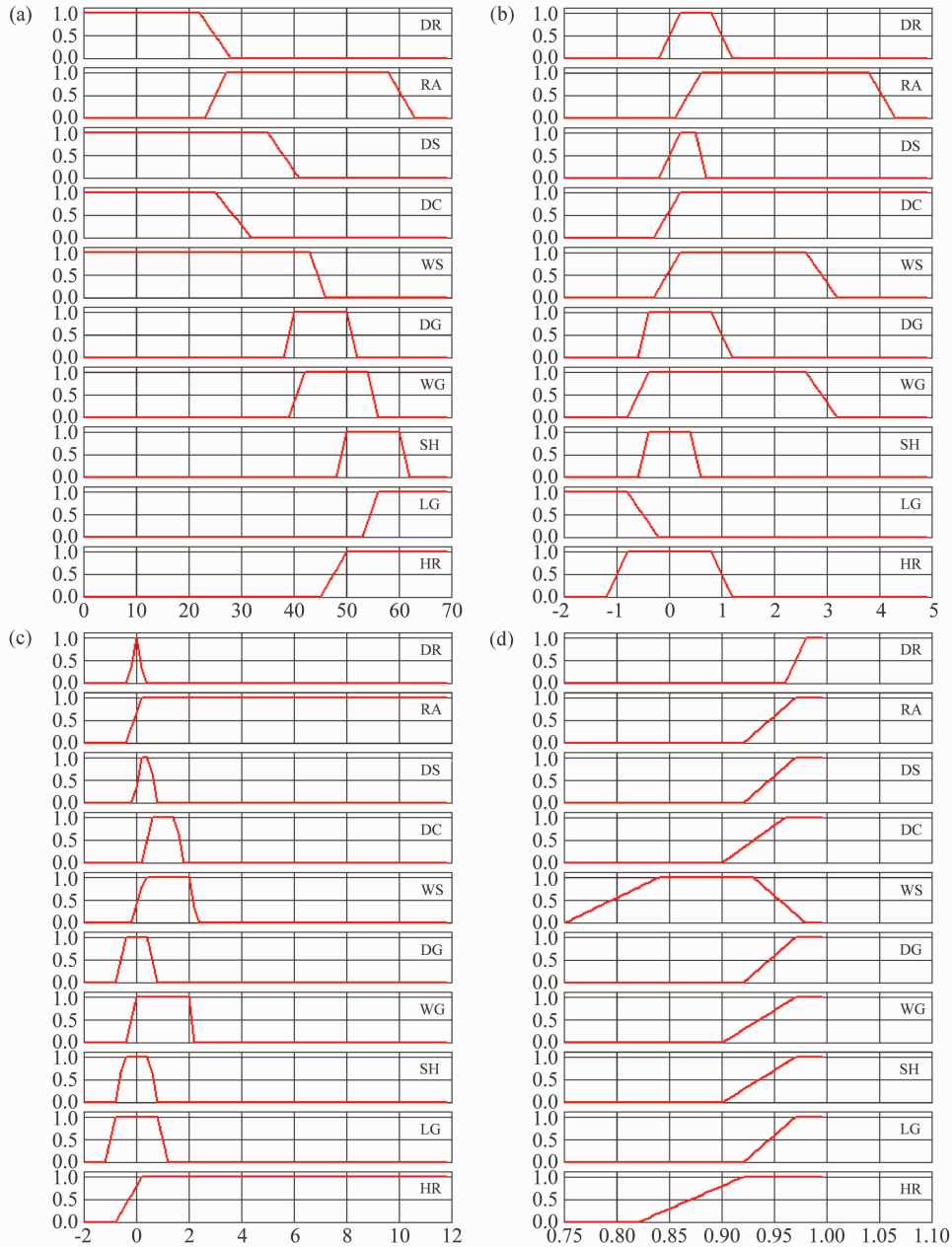


图 2 基于 T 函数的双偏振测量参数的各自模糊基设置：(a) Z_H (单位：dBZ)；(b) Z_{DR} (单位：dB)；(c) K_{DP} [单位： $(^{\circ}) \cdot \text{km}^{-1}$]；(d) ρ_{HV} 。横坐标表示各偏振参数的测量值，纵坐标为相应的隶属函数值
Fig. 2 Fuzzy setting based on T function for polarimetric measurements；(a) Z_H (units：dBZ)；(b) Z_{DR} (units：dB)；(c) K_{DP} [units： $(^{\circ}) \cdot \text{km}^{-1}$]；(d) ρ_{HV} . X-axis: values of each polarimetric radar measurement, Y-axis: membership function

图 2 分别给出了采用上述基于 T 函数形状构建的 4 个双偏振测量 Z_H 、 Z_{DR} 、 K_{DP} 、 ρ_{HV} 的共计 40 个隶属函数, 分别对应各自测量参数的 10 个模糊基。在模糊逻辑系统中, 用模糊基的隶属函数值代替实际测量值的替代值进行作为系统的识别工作。

假设雷达测量的参数之间是完全相互独立的, 那么对所有的模糊基来说完全可以用一维的隶属函数来表示, 多维隶属函数可以用来表示组合逻辑基。

3.2.2 规则推断

前面已经分析过, 降水粒子相态识别问题主要集中在模糊系统中的隶属函数和规则的构建上, 降水粒子分类的规则可以用逻辑语言描述如下:

IF(Z_H IS MBF_{1j} AND Z_{DR} IS MBF_{2j} AND K_{DP} IS MBF_{3j} AND ρ_{HV} IS MBF_{4j})

THEN Hydrometeor Class IS J

其中, $j=1, 2, \dots, 10$, 对应表 1 中的 10 类降水粒子类型。因此 j 类降水粒子的强度(R_j)可以由下式表示(P_{ij} 表示第 i 个参数对 j 类降水粒子的贡献强度):

$$R_j = \prod_{i=1}^4 P_{ij} \text{ 或 } R_j = \sum_{i=1}^4 A_i P_{ij}. \quad (10)$$

在利用贡献度相加的方法来计算各相态的降水粒子强度(R_j)的时候, 我们采用了非等权重的方法[式(10)], 其中系数 A_i 表示第 i 个偏振参数对 R_j 的权重系数, 由于 ρ_{HV} 受本身数据特性的影响, 其权重系数最低, 而 K_{DP} 资料是经过处理后得到的, 因此它的权重系数要略低于其他原始采集的资料(Z_H 和 Z_{DR})。在这里选取: $A_{Z_H} = A_{Z_{DR}} = 1$, $A_{K_{DP}} = 0.8$, $A_{\rho_{HV}} = 0.5$ 。

3.2.3 集成

从各个独立的规则推断中得到的结论采用最大集成法进行集成, 最大集成法仅把最大真值的结果作为最终结果, 即: $C = \max R_j$ 。

3.2.4 退模糊

FHC 获取的最终结果就是寻找上述最大规则强度对应的索引值。

4 个例分析

本文所讨论的个例是由美国 S 波段 KOUN 所获取的两次过程: (1)2003 年 5 月 10 日的一次强风

暴单体过程; (2)2003 年 2 月 23 日的一次大范围降雪过程。美国 S 波段 KOUN 雷达是在 WSR-88D 雷达的基础上增加双偏振功能后升级而来的, 它采用的是同时收/发水平和垂直偏振波的方案。需要说明的是, 尽管利用 RHI 扫描资料可以更好地观测到天气系统过程的空间垂直结构, 但是由于 KOUN 雷达不支持 RHI 的天线扫描方式, 所以我们只能利用 PPI 扫描资料进行相态识别方法的处理。

4.1 2003 年 5 月 10 日的一次强风暴单体过程

根据当时的天气实况资料, 这次过程自 KOUN 雷达测站的东南方向向东偏北方向移动。在位于 KOUN 雷达的东部地区有很强的龙卷对流单体出现, 在 1903 UTC 左右, 这些对流单体产生了很强的冰雹^[15]。图 3 给出了 1903 UTC 左右的 PPI(Plan Position Indicator)图, 雷达观测仰角是 0.5° , 最大观测距离是 300 km, 每个距离圈的长度是 60 km, 每个径向射线为 30° , 雷达位置位于半圆的圆心处。所有资料已经过预处理, 其中 K_{DP} 的资料是经过对 Φ_{dp} 处理得到的, 处理的方法是: 当对应距离库点 $Z_H > 40$ dBZ 时, K_{DP} 的值是由前后各 4 个点(共 9 个库)的双程传播相位 Φ_{dp} 资料平滑得到(KOUN 雷达的距离库是 256 m, 9 个库的长度约为 2.3 km); 当对应点 $Z_H < 40$ dBZ 时, K_{DP} 的值是由前后各 12 个点(共 25 个库)的 Φ_{dp} 资料平滑得到(平滑距离约为 6.4 km), 这样处理得到的好处是可以减少观测资料扰动产生的误差, 同时对于强的回波区, 采用较短的平滑距离, 可以减少受周围弱回波区的影响, 保持强回波区的特征。这也是造成 K_{DP} 的回波轮廓与其他三个要素之间稍有差别的原因(见图 3c)。

由图 3a 的回波图上可以明显看到一个强回波中心, 中心位于方位 93° 、距离 130 km 处, 中心最大强度达到 70 dBZ 以上。而在图 3b~d 相应的位置, 在最强 Z_H 的中心位置都有 $Z_{DR} < 1$ dB 和 $K_{DP} > 1^\circ/\text{km}$ 区, 同时对应的 ρ_{HV} 出现一个相对的低值区, 明显低于周围其他区域的 ρ_{HV} 值。其特征符合冰雹出现的现象, 表明该地区已经出现冰雹, 并且冰雹已经降落地面(该区位置离地面的高度大约 1 km)。美国国家强风暴实验室(National Severe Storm Laboratory, 简称 NSSL)提供的地面资料情况也证实了这一点^[15]。图 4 是利用模糊逻辑法识别的

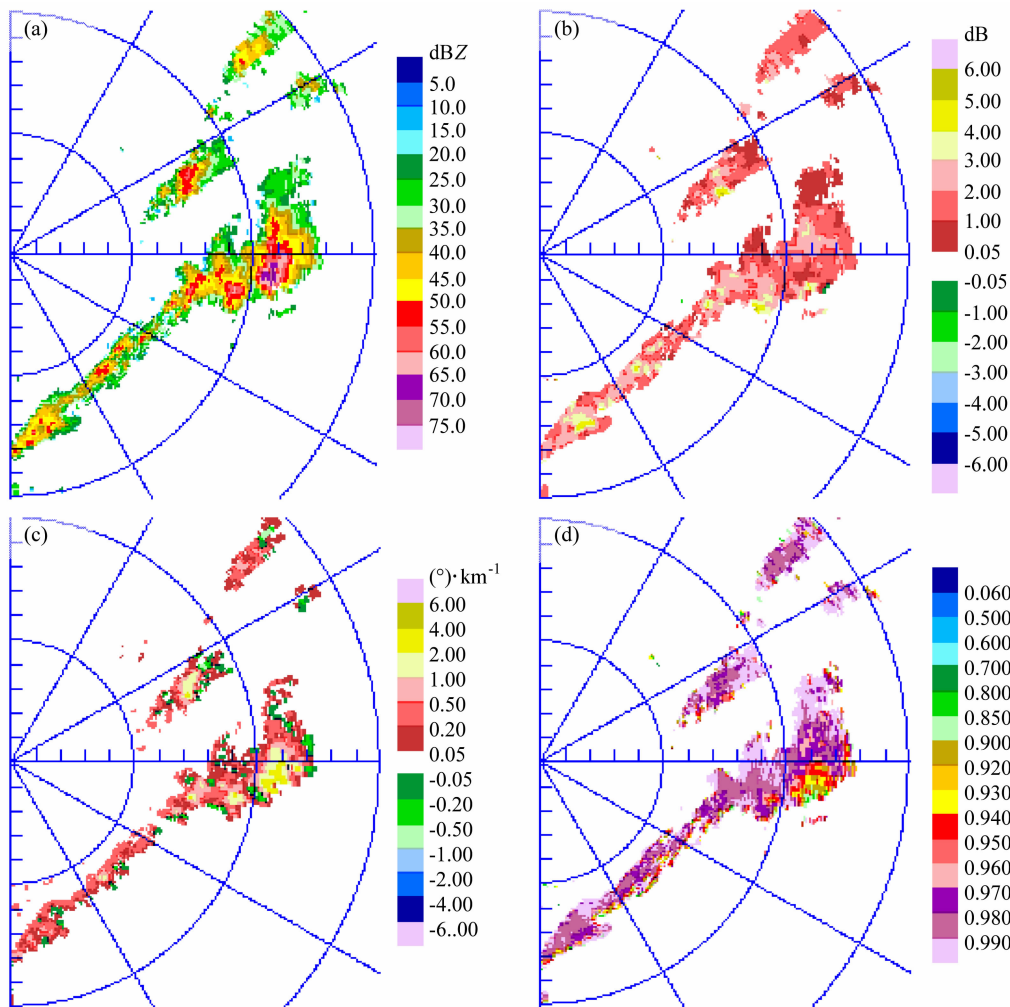


图 3 2003 年 5 月 10 日 0903 UTC 位于俄克拉荷马州 (Oklahoma) 的一次强龙卷风过程的回波图 (雷达位于半圆的中心位置): (a) Z_H (单位: dBZ); (b) Z_{DR} (单位: dB); (c) K_{DP} [单位: $(^{\circ}) \cdot \text{km}^{-1}$]; (d) ρ_{HV}

Fig. 3 PPI images of the Oklahoma tornado at 0903 UTC 10 May 2003; (a) Z_H (units: dBZ); (b) Z_{DR} (units: dB); (c) K_{DP} [units: $(^{\circ}) \cdot \text{km}^{-1}$]; (d) ρ_{HV} . Radar is located at the central point of half circle

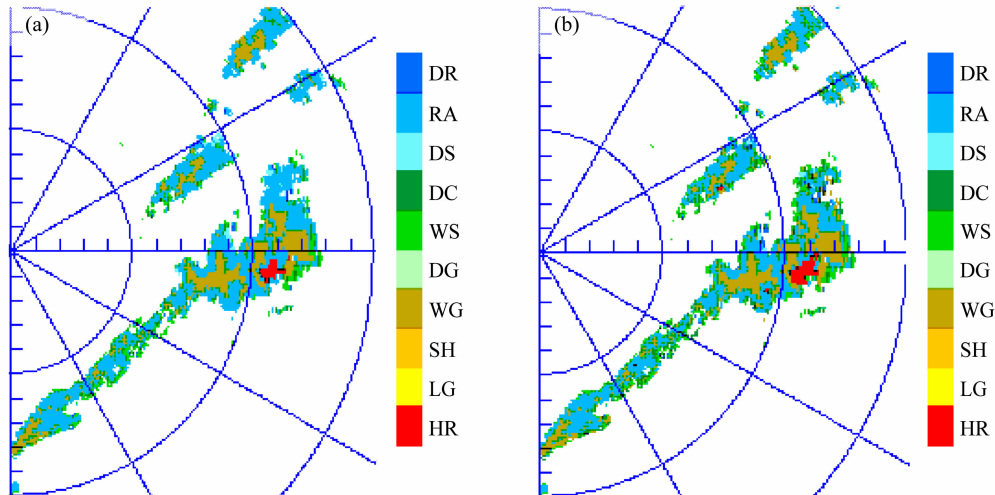


图 4 两种不同规则推断方法得到 0903 UTC 的结果: (a) P_{ij} 相乘; (b) P_{ij} 相加

Fig. 4 Classification results at 0903 UTC by (a) P_{ij} multiplicative inference rules and (b) P_{ij} additive inference rules

降水回波区的相态结构(a 为贡献强度相乘, b 为贡献强度相加), 从图上可以看出, 方位在 $75^{\circ}\sim 110^{\circ}$ 之间的主要回波区可分为两块以湿霰为中心的大范围回波区(以 120 km 径向圈为界): 在第一块(120 km 径向圈以外)回波的西南区(图像中的左下方)有一个明显的冰雹和液态水的混合区, 对应着图 3 中的相应区域(Z_H 为大于 65 dBZ 的紫色高值区, $Z_{DR}<2$ dB, $K_{DP}>2^{\circ}/\text{km}$, ρ_{HV} 为小于 0.95 的相对低值区), 表明该区域的 Z_H 很大和 Z_{DR} 、 ρ_{HV} 较小是由于固态降水特性的大冰雹引起的, 而 K_{DP} 较大的原因更多的是由于该区域的液态降水引起的。湿霰在结构上可以看做是冰和水混合构成的, 相对于纯冰雹来说, 其密度要小得多, 而比起液态水来说, 其密度又要大于纯液态的水, 因此, 其 Z_H 值相对较大(一般在 45~55 dBZ 之间, 高于纯液态降水的, 但又低于固态粒子降水), 而 Z_{DR} 和 K_{DP} 又相对要低于纯液态的降水值, 表现出介于冰水之间的散射特性。值得注意的是, 在第二块回波区(方位在 $75^{\circ}\sim 110^{\circ}$ 之间, 距离在 120 km 径向圈以内的大片回波区)的东南方(图 3 a 的右下方)的突起部分, 从相态识别的结果图上并没有看到想像中对应的大范围冰雹区, 而是纯液态的降水区(图 4a), 虽然在该区域出现了较强的 Z_H 值($Z_H>50$ dBZ, 最大的达到 65 dBZ, 见图 3a)。通过分析其他测量参数可以发现, 在该区的 Z_{DR} 值和 K_{DP} 值相对较大, 大部分都分别达到了 3 dB 和 $2^{\circ}/\text{km}$ 以上, 而且其 ρ_{HV} 值也较高, 大于 0.98, 表明这些地方的降水粒子表现为扁平状态, 且扁率较大, 是尺寸较大的大雨滴, 因此表现为降雨相态, 这也是同图 4 显示的结果相吻合的。

约 13 分钟后(1916 UTC), 上述两块单体趋向于合二为一, 回波区移动到雷达站的正东位置, 中心位置位于方位 90° 、距离 146 km 处, 单体合并导致降水云体加强, 中心强度有所加强, 范围有所加大(图略)。强中心区的冰水混合相态特征更加明显, 与前一个冰水混合区相比, Z_H 值有所增加, 并且大值范围有所扩大, 同时对应区域的 Z_{DR} 值减小, 出现一个低于 1 dB 的中心, 而且强中心区域的 ρ_{HV} 值增大, 这些现象都表明在冰水混合区中, 固态冰相降水增加, 地面降雹加大, 系统处于旺盛发展时期。图 5 是根据利用上述时刻的四个要素资料采用模糊逻辑法得到的降水粒子的相态结构, 从图 5 可

以发现, 相比图 4 的结果来说, 湿霰区的范围减小, 降水混合区的范围增大, 表明在单体合并过程中, 回波加强, 导致降雹产生, 降水粒子的相态结构发生变化。

4.2 2003 年 2 月 23 日的一次大范围降雪过程

2003 年 2 月 23 日, 在 KOUN 雷达测站的北部地区有一次范围很大的降雪过程, 部分地区的降雪厚度达到了 50 cm, KOUN 雷达真实地观测了这次过程。图 6 给出了这次过程的某一时刻雷达测量到的偏振参数 Z_H (a)、 Z_{DR} (b)、 K_{DP} (c)、 ρ_{HV} (d) 的 PPI 回波图, 雷达观测仰角是 0.1° , 其他的雷达参数同图 3。

从图 6 可以看出, 在四张原始数据回波图上可以看到三个相对较强回波区, 分别位于东北偏北 200 km、东北 70 km、西北偏北 120 km 处, 其中东北偏北 200 km 处呈现一条明显的相对较强的带状回波区, 中心最大回波强度达到 30 dBZ 左右, 整个雷达探测到的有回波的地方回波强度绝大部分都在 5~30 dBZ 之间(图 6a)。而在图 6b~d 相应的位置, 基本上都可以看到与之相对应的较强回波区位置(需要说明的是相对于其他三幅图来说, 图 6c 的 K_{DP} 分布特征稍有区别, 这是由于资料预处理的原因导致)。整个空间 Z_{DR} 值在 0.5~1.5 dB 之间, K_{DP} 的范围在 $-0.5\sim 0.3^{\circ}/\text{km}$ 之间, ρ_{HV} 值变化区间从 0.5 到 0.99。 K_{DP} 为负且其绝对值很小, 以及小的 Z_{DR} 正值, 表明有弱降水存在, 而 K_{DP} 和 Z_{DR} 为正的小值, 意味着存在结构松散的固态降水粒子。这些都是和图 7 的识别结果相一致的。图 7 显示的是利用模糊逻辑法得到的水凝物相态的识别结果。从结果可以看出, 在上述区域都出现了固态的降雪区(干雪), 在这些降雪区的边缘存在着很弱的降水区(毛毛雨), 这是一个典型的干雪过程。

上述两次过程的 FHC 结果是利用不同规则推断方法得到的: 左边为各要素的贡献度相乘得到, 右边为各要素的贡献度相加得到。在利用贡献程度相加方法时, 我们采用的是非等权重系数的方法(各要素的贡献度相乘的方法, 本身就是等权重系数的), 得到的识别结果与等权重系数的结果存在一定的差异, 反映了各偏振参数的权重系数的影响。因此, 如何选择合理的权重系数比, 得到更加合理的结果, 是需要大量的观测资料来进行分析的, 是需要研究的另一个内容。

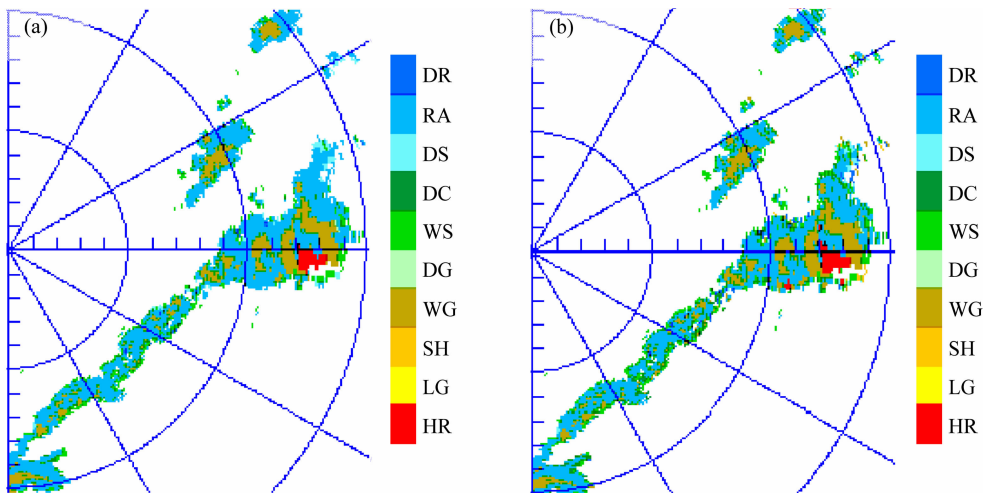


图 5 两种不同规则推断方法得到 1916 UTC 的结果:(a) P_{ij} 相乘; (b) P_{ij} 相加

Fig. 5 Classification results at 1916 UTC by (a) P_{ij} multiplicative inference rules and (b) P_{ij} additive inference rules

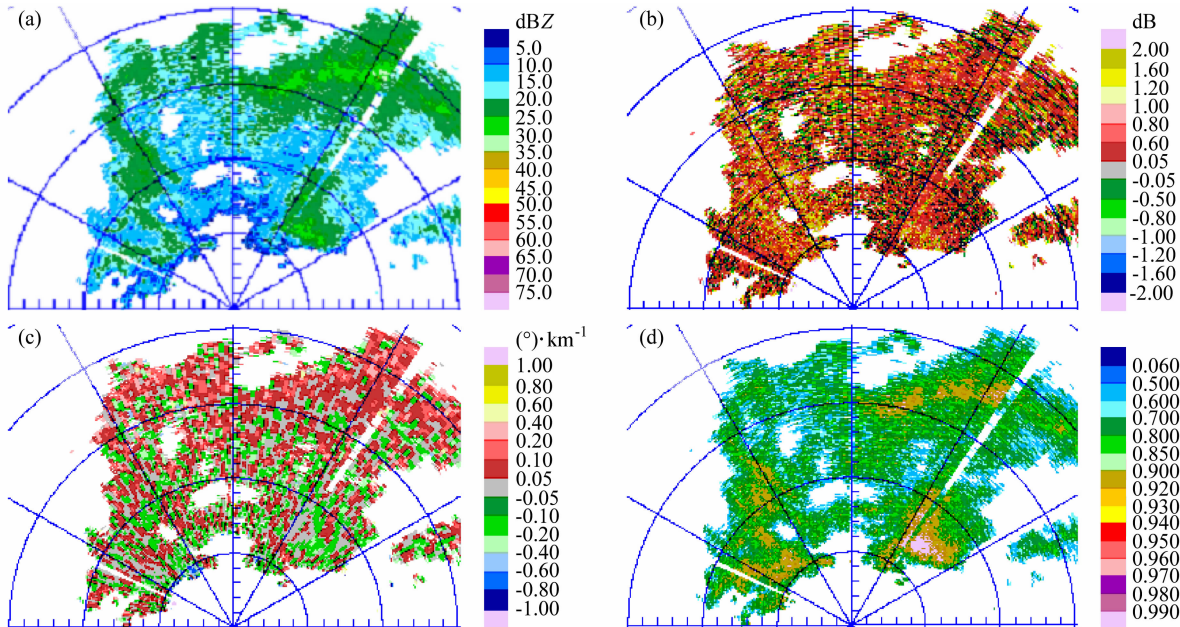


图 6 2003 年 2 月 23 日 1431UTC, 位于 Oklahoma 州的一次降雪过程的回波图 (雷达位于半圆的中心位置): (a) Z_H (单位: dBZ); (b) Z_{DR} (单位: dB); (c) K_{DP} [单位: $(^{\circ}) \cdot km^{-1}$]; (d) ρ_{HV}

Fig. 6 PPI images of the Oklahoma snow at 1431 UTC 23 Feb 2003: (a) Z_H (units: dBZ); (b) Z_{DR} (units: dB); (c) K_{DP} [units: $(^{\circ}) \cdot km^{-1}$]; (d) ρ_{HV} . Radar is located at the central point of half circle

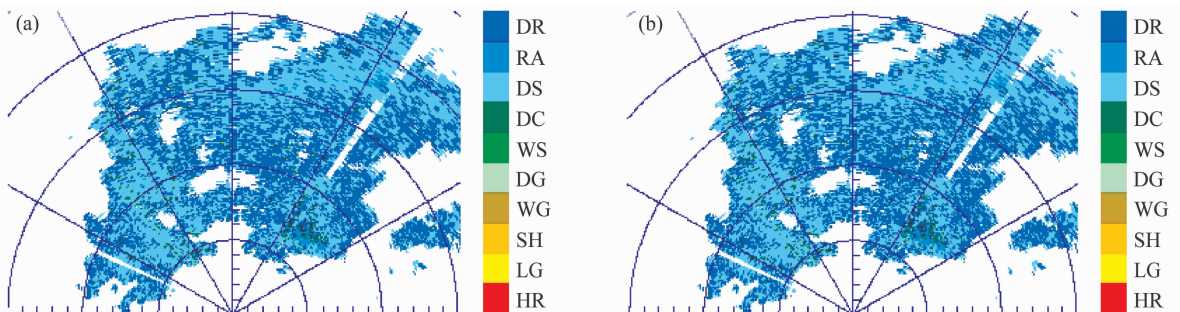


图 7 两种不同规则推断方法得到 1431 UTC 的结果: (a) P_{ij} 相乘; (b) P_{ij} 相加

Fig. 7 Classification results at 1431 UTC by (a) P_{ij} multiplicative inference rules and (b) P_{ij} additive inference rules

5 结论与讨论

通过上述讨论和资料分析结果,我们可以得到以下几点结论:

(1) 降水质点中,大粒子的吸收和变形及质点的相态变化是影响天气雷达观测强降水和粒子相态的主要原因,采用双偏振技术可以改善对变形粒子的探测,而 FHC 是一种方便易行的识别降水粒子相态的方法。通过对一次降雹和降雪过程的资料分析,我们认为利用 FHC 方法识别的结果基本合理,基本上能揭示天气系统的发展过程,反映降水区域的相态结构,但是还需要资料来做进一步的研究和验证。这种方法有望在我国未来双线偏振雷达业务中使用。

(2) 从实际资料的分析结果来看,虽然利用 FHC 方法得到结果比较粗,没有明确的数据特征值,但是它基本上能反映各种降水粒子的相态,其识别的结果对目前日常的天气预报参考和人工影响天气的作业指挥和效果评估来说还是符合可用的。

(3) 根据有限的观测资料分析表明,降水区域中出现 60 dBZ 以上的回波强度,并不一定就会出现冰雹,还有可能是大粒子的液态降水。综合考虑双线偏振雷达的测量参数,可以得到更合理的结果。

遗憾的是,由于雷达资料的限制,在方法本身的构建过程中,我们还不能有效地分析到底是一个怎样的权重系数比才是最佳的,这也是今后需要研究的方向。另外,本工作还有其他需要改进之处,如对各种参数的模糊基设置还比较简单,实际的模糊基形式差别较大,而且不同相态粒子对应的雷达参量肯定是不尽相同的,因此,不同的模糊基设置可能会导致不同的结论。鉴于此,我们希望在未来的工作中,能得到更多的资料,包括雷达观测资料和地面实测资料,对这些资料进行分析处理建立适合我国实际情况的各种完善基,并在此基础上得到更加合理和准确的降水粒子相态结构,应用于实际的气象服务中去,更好地为社会经济建设服务。

参考文献(References)

[1] 刘志澄,李柏,翟武全. 新一代天气雷达系统环境及运行管理. 北京:气象出版社,2002. 78pp
Liu Zhicheng, Li Bai, Zhai Wuquan. *The System Environment and Run Management of China New Generation Radar* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2002. 78pp

[2] Bringi V N, Seliga T A, Aydin K. Hail detection with a differential reflectivity radar. *Science*, 1984, **225**: 1145~1147
[3] Hall P M, Goddard J W F, Cherry S M. Identification of hydrometeors and other targets by dual-polarization radar. *Radiation Sci.*, 1984, **19**: 132~140
[4] Bringi V N, Vivekanandan J, Tuttle J D. Multiparameter radar measurements in Colorado convective storms, Part II: Hail detection studies. *J. Atmos. Sci.*, 1986, **43**: 2564~2577
[5] Aydin K, Zhao Y, Seliga T A. A differential reflectivity radar hail measurement technique: Observations during the Denver hailstorm of 13 June 1984. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 1990, **7**: 104~113
[6] Bringi V N, Chandrasekar V. *Polarimetric Doppler Weather Radar*. Cambridge University Press, 2001
[7] Hail M P, Goddard J W F, Cherry S M. Identification of hydrometeors and other targets by Dual-polarization radar. *Radiation Sci.*, 1984, **19**: 132~140
[8] 刘黎平. 不同相态的模式雹块对 5.6 cm 雷达波散射及衰减特性的研究. 高原气象, 1991, **10**(1): 26~33
Liu Liping. The study of different phase hail model to the scatter and attenuation characteristic of 5.6 cm radar echo. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 1991, **10**(1): 26~33
[9] 刘黎平, 钱永甫, 王致君. 用双线偏振雷达研究云内降水粒子相态及尺度的空间分布. 气象学报, 1996, **54**(5): 590~598
Liu Liping, Qian Yongfu, Wang Zhijun. The study of special distribution of phase and size of hydrometeors in cloud by dual linear polarization radar. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1996, **54**(5): 590~598
[10] Hubert J, Bringi V N. CSU-CHILL polarimetric radar measurement from a severe hailstorm in eastern Colorado. *J. Appl. Meteor.*, 1998, **37**: 453~454
[11] 刘黎平. 双线偏振多普勒天气雷达估测混合区降雨和降雹方法的理论研究. 大气科学, 2002, **26**(6): 761~772
Liu Liping. A theoretical study of estimations rain and hail rates in mixed-phase areas with dual linear polarization radar. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2002, **26**(6): 761~772
[12] Zadeh L A. Fuzzy algorithms. *Info. & Ctl.*, 1968, **12**: 94~102
[13] Liu Hongping, Chandrasekar 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
[14] Straka M J, Zrnic D S. An algorithm to deduce hydrometeor types and contents from multi-parameter radar data. 26th Conference on Radar Meteorology. 1993, **17**: 513~515
[15] Zrnic D, Burgess D. Observation and Classification of Echoes with the Polarimetric WSR-88D Radar. Report of National Server Storms Laboratory, Norman, Oklahoma, 2003, 19~26 (<http://www.nssl.noaa.com>)