

陈晓辉,曹俊武,胡志群,等. 车载 X 波段双线偏振多普勒天气雷达及其数据处理系统[J]. 气象,2010,36(8):116-125.

# 车载 X 波段双线偏振多普勒 天气雷达及其数据处理系统<sup>\*1</sup>

陈晓辉<sup>1</sup> 曹俊武<sup>1</sup> 胡志群<sup>2</sup> 肖艳娇<sup>3</sup> 汪旭东<sup>1</sup>

1 安徽四创电子股份有限公司, 合肥 230088

2 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

3 中国气象局武汉暴雨研究所, 武汉 430074

**提 要:** 文章介绍了车载 X 波段双线偏振多普勒天气雷达及其数据处理系统, 并对其资料质量和应用问题进行了分析和讨论。该雷达采用的单发双收的工作机制, 实现对  $Z_H$ 、 $Z_{DR}$ 、 $\Phi_{DP}$ 、 $K_{DP}$ 、 $\rho_{HV}(0)$  以及  $L_{DR}$  等参数的探测。这些信息反映了云和降水粒子的范围、大小和运动变化等特征, 是研究云和降水特别是灾害性天气的形成机制及其物理过程变化的有效工具。基于该雷达的数据处理系统是在利用这些测量参数的基础上, 可以实现降水处理和降水粒子相态识别功能, 为用户提供有效的气象服务。

**关键词:** 车载 X 波段双线偏振多普勒天气雷达, 数据处理系统, 降水估测, 相态识别

## X-Band Polarimetric Doppler Radar on Wheel and Its Data Processing System

CHEN Xiaohui<sup>1</sup> CAO Junwu<sup>1</sup> HU Zhiqun<sup>2</sup> XIAO Yanjiao<sup>3</sup> WANG Xudong<sup>1</sup>

1 Anhui Sun-Create Electronics Co., Ltd., Hefei 230088

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

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

**Abstract:** The polarimetric radar is a useful remote sensing tool for the study of hydrometeor classification and rainfall measurement which is sensitive to the types, shapes, and size distribution of rain drops. X-band radars have additional advantages that make them a convenient tool and an appropriate choice for some practical applications. They are well suited to uses where transportability and fine-scale observations are important, such as in hydro-meteorological studies across moderately sized complex terrain watersheds and urban basins. Anhui Sun-Create Electronics Limited Company has developed a state-of-the-science X-band polarimetric doppler radar on wheel based on the alternative transmission and simultaneous receiving of horizontal and vertical polarization wavelength technology in 2005, termed XPDRW. It provides such measurements as the radar reflectivity  $Z_H$ , velocity ( $V$ ), spectrum width ( $W$ ), differential reflectivity  $Z_{DR}$ , propagation differential phase shift  $\Phi_{DP}$ , specific differential phase shift  $K_{DP}$ , correlation coefficient  $\rho_{hv}(0)$ , and linear depolarization  $L_{DR}$ , which are useful for the research of cloud and precipitation physics as well as the mechanism and development of disastrous weathers. This paper report: 1) the technical status and data processing system; 2) the data quality and its detection ability of XPDRW; and 3) the ability of rainfall measurement and hydrometeor classification of XPDRW. Applications are put on data collected during a series of experiments which were conducted from spring of 2006 until summer 2008.

The results show that: 1) XPDRW is an actual multi-parameter radar, which will provide a new kind

\* 国家自然科学基金(40975013)和灾害天气国家重点实验室开放课题(2009LASW-B05)

2009年2月24日收稿; 2009年11月23日收修定稿

第一作者:陈晓辉,主要从事气象雷达总体设计技术研究. Email:chenxiaohui@sun-create.com

of equipment for the development and application of polarization radar in China; 2) the features of radar observations after corrected are similar to those from foreign polarimetric radars, indicating that the XPDRW observations are reasonable and suitable for future study; 3) rainfall measurement algorithm based on XPDRW data can over-estimate the heavy rain versus the traditional  $Z-R$  relations, which has an advantage in practical operation; (4) fuzzy logic method based on XPDRW data can be used in hydrometeor classification, and the results are basically reasonable based on case studies. It can reveal the development course of weather system, and classify hydrometeor types, but still need to be further studied.

**Key words:** X-band polarimetric doppler radar on wheel (XPDRW), data processing system, rainfall measurement, hydrometeor classification

## 引 言

天气雷达是以云和降水为观测对象的,其重要作用之一就是在灾害性天气的监测和预警中,实时估测强降水系统的降水强度。雷达探测到的目标后向散射回波和雷达的发射波相比,既有幅度大小的变化,也有相位信息的变化,这些变化反映了目标的差异,而且对不同偏振状态的电磁波,这种变化是不一致的。常规天气雷达和多普勒天气雷达只利用了单偏振(常用的偏振方式是水平偏振)下的幅度信息(回波强度),推导雷达的反射率因子,并在此基础上进行降水强度反演。而在对流性降水中,常常混有固态降水粒子,因此会给常规天气雷达估测降水带来很大的误差。多普勒天气雷达除回波强度之外,还可以探测到降水系统的速度和谱宽分布,从而了解其热力学和动力学结构,但它们识别降水和降雹的能力同样也是有限的。偏振天气雷达具有测量不同偏振方向上回波功率的功能<sup>[1]</sup>。它可以交替发射或同时发射两种偏振波,并接收两个偏振方向的回波信号,除可获取降水系统的水平偏振方向上的回波强度( $Z_H$ )、径向速度( $V$ )、速度谱宽( $W$ )外,还可以探测到差分反射率因子( $Z_{DR}$ )、差传播相移( $\Phi_{DP}$ )、比差分相移( $K_{DP}$ )、退偏振因子 $L_{DR}$ 、相关系数 $\rho_{HV}(0)$ 等参量。对这些参数进行分析、反演,可以判断降水粒子的形状、尺寸大小、相态分布、空间取向以及降水类型等更为具体的信息。具有双偏振功能的多普勒雷达系统使探测混合区不同相态降水的比例以及区分不同降水粒子的类型成为可能。正是由于这种雷达的先进性和广泛的用途,所以发展多普勒偏振雷达具有非常重要的意义。

双偏振天气雷达在其发展过程中形成多种制式。从技术实现角度来说,线偏振在技术上实现比

较容易,所以发展很快。而线偏振雷达又分为水平和垂直偏振波交替发射和同时发射两种:(1)交替发射同时接收模式(下称单发双收):用单个发射机发射,通过极化转换开关实现脉间水平垂直极化方式的转换,用两个接收机同时接收共极化与正交极化的回波分量。(2)同时发射同时接收模式(下称同发同收):双发射机或单发射机加功分器的工作方式,同时发射斜 $45^\circ$ 或 $135^\circ$ 的电磁波,用双通道接收机同时接收水平和垂直极化的回波信号。采用同发同收方式的多普勒偏振雷达,具有测量参数精度高( $Z_{DR}$ 、 $\Phi_{DP}$ 、 $K_{DP}$ 、 $\rho_{HV}(0)$ 不受多普勒效应的影响)、同精度下采样时间短(更适合对对流云的观测)、结构简单和系统隔离度高(不需要高速大功率开关)等优点<sup>[2]</sup>,但它也有不能测量 $L_{DR}$ 参数、系统起伏比较大等缺点。另外,同发同收方式虽然有数据量增加1倍的好处,却必须是两个通道参数的相互处理,无法避免馈线和接收机幅相一致性造成测量精度的误差<sup>[3]</sup>。单发双收方式的多普勒偏振雷达,可以测量到 $L_{DR}$ 参数。同时,采用单发双收的最大好处是实现共极化接收和交叉极化接收,避免了通道幅相一致性引起的误差。

目前国内外对双偏振雷达的研究大都集中在S和C波段上,这些也是许多国家的业务运行雷达,波长长的雷达在测量中到大雨上是有明显优势的,这些也被目前的研究证实<sup>[4-5]</sup>。而X波段雷达比S、C波段雷达有着更好的探测分辨率,可以更加细微地提供云、雨滴、冰雹等水凝物的微物理过程信息,同时X波段雷达由于其天线体积小、移动方便、造价低廉等特点,可作为新一代天气雷达网的有效补充,广泛应用于暴雨和冰雹等灾害性天气过程监测、预警、人工影响天气作业指挥和效果评估、水库和城市管理、航空管理等,在云和降水的遥感遥测、短时天气预报、冰雹、暴雨、雷击等灾害性天气防治

方面有着巨大的应用潜力。对 X 波段双偏振雷达的研究也逐渐成为目前雷达生产厂家和气象学家们关注的热点之一。2005 年安徽四创电子股份有限公司(下简称四创公司)成功地研制出了基于单发双收制式的车载 X 波段双偏振多普勒天气雷达。

## 1 单发双收式车载 X 波段双偏振多普勒天气雷达

四创公司研制的车载 X 波段双通道双线偏振多普勒天气雷达(下简称 XPDRW: X-band Polarimetric Doppler weather Radar on Wheel)采用交替发射同时接收、脉间变极化的工作方式,同时接收回波的两个正交极化分量,实现对  $Z_H$ 、 $Z_{DR}$ 、 $\Phi_{DP}$ 、 $K_{DP}$  以及  $\rho_{HV}(0)$  和  $L_{DR}$  等参数的探测。雷达整机由一个高稳定度的晶体振荡器作为全机基准信号源,频率源合成的 RF 激励脉冲信号送到发射机中,经天馈系统发射出去。在天馈系统中,发射信号由波导送入环流器和馈源喇叭之间的极化转换电路,受极化

控制信号控制,极化器将改变发射的极化方式,以达到在脉间交替发射水平和垂直极化电磁波。发射出去的电磁波在空中遇到降水粒子会产生后向散射,天线接收回波信号的两个正交极化分量,接收回来的两路正交的回波信号一路由主通道高功率铰链经环流器、T/R 开关送回,另一路正交回波信号经一低功率铰链送入。两路接收机分别接受共极化和正交极化回波信号,进行放大、滤波、A/D 变化等处理后送入信号处理系统。信号处理选用高速可编程通用芯片,通过高速局域网与用户终端相连,将信息传送给终端系统进行实时显示和二次处理。该终端不仅要显示单偏振多普勒处理结果还要显示和分析处理双线偏振各参数。另外,雷达还保留了单偏振工作模式,在单偏振模式下,雷达发射水平极化的电磁波,接收水平极化的回波分量,发射和接收的极化方式在脉间保持不变,可以测量降水回波的强度、速度和谱宽参数等。所有的设备都安装在一辆拖车上,可以方便移动。表 1 给出了该雷达的部分主要参数<sup>[4]</sup>。

表 1 XPDRW 主要性能指标  
Table 1 Main Performance of XPDRW

序号	项目	参数	序号	项目	参数
	天线系统			接收机	
1	形状	圆抛物面	15	通道数	2
2	直径	2.4 m	16	最小可测功率	-110 dBm(1 $\mu$ s) -107 dBm(0.5 $\mu$ s)
3	波瓣宽度	1.0°	17	噪声系数	3.0 dB
4	增益	>44 dB	18	接收波的偏振状态	与发射波同偏振和正交偏振
5	雷达波的偏振状态	水平、垂直	19	动态范围	>90 dB
6	天线方向性	水平/垂直极化波束主轴方向差 < 0.1°	20	带宽	2.2 MHz、1.1 MHz
7	极化器插损	≤1.0 dB(垂直/水平)		可观测量	
8	相位延迟	<1°	21	$Z_H$	1 dB <sup>①</sup>
9	极化转换速率	脉间转换	22	水平偏振反射率因子的信噪比	1 dB <sup>①</sup>
10	线性极化隔离度	≤-40 dB	23	平均径向速度 V 和速度谱宽 W	1 m · s <sup>-1</sup> ①
	发射机		24	$Z_{DR}$	0.2 dB <sup>①</sup>
11	工作频率	9360 MHz	25	$\rho_{HV}(0)$	0.01 <sup>①</sup>
12	峰值功率	≥50 kW	26	$\Phi_{DP}$	1° <sup>①</sup>
13	脉冲宽度	1 $\mu$ s、0.5 $\mu$ s	27	$L_{DR}$	0.2 dB <sup>①</sup>
14	脉冲重复频率	300~2000 Hz			

注:①是指可观测量的测量精度

## 2 观测试验

雷达研制成功后,分别在 2006—2008 年在安徽合肥、湖北黄石、湖南衡阳以及广州珠海等地进行了多次降水观测试验,取得了大量的有意义的探测资料。图 1 是该雷达在 2008 年 5 月在珠海国家气候气象站观测到的对流云强降水的  $R_{HI}$  探测资料图。强

降水由于受表面张力的作用一般呈扁平型分布,其长轴在水平方向,且降水强度越大,则降水粒子越扁平,所以当  $Z_H$  强时,其对应的  $Z_{DR}$  和  $K_{DP}$  也大(图 1b 和图 1c)。而当出现冰雹的时候,由于冰雹粒子在下降过程中呈翻滚状态,没有规则的取向分布,所以其  $Z_{DR}$  和  $K_{DP}$  值都接近于 0。因此可以根据强降水和降雹的碰撞参数特征来区分是固态降雹还是液态降雨,这也是双偏振体制雷达的一个重要的用途。

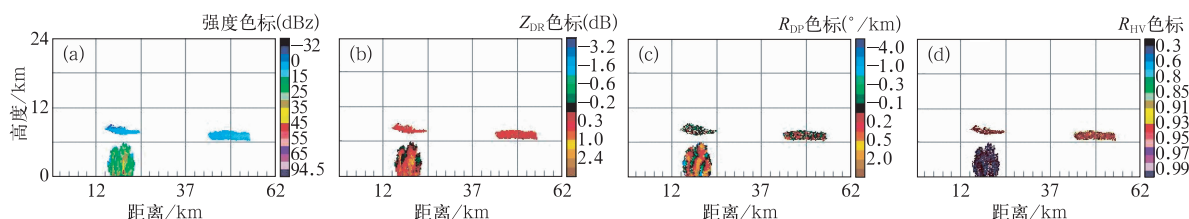


图 1 2008 年 5 月 25 日 12:24 XPDRW 在珠海观象站观测到的一次对流云降水的回波图像

Fig. 1 Image of convective cloud precipitation observed with XPDRW at Zhuhai Station of Guangdong Province at 12:24 BT 25 May 2008

图 2 是该雷达对一次层状云降水的 RHI 偏振参数和多普勒参数资料。其中图 2a 为偏振信息,它有 4 幅小图,分别为差分反射率( $Z_{DR}$ ,图 2a<sub>1</sub>)、比差分相移( $K_{DP}$ ,图 2a<sub>2</sub>)、线性退偏振比( $L_{DR}$ ,图 2a<sub>3</sub>)和相关系数( $R_{HV}$ ,图 2a<sub>4</sub>)。图 2b 为多普勒信息,也是 4 幅小图,分别为回波强度( $Z_H$ ,图 2b<sub>1</sub>)、回波功率(dB,图 2b<sub>2</sub>)、平均径向速度( $V$ ,图 2b<sub>3</sub>)和速度谱宽( $W$ ,图 2b<sub>4</sub>)。由图上可以看出,雷达测量参数的多

普勒信息清楚,其大小和一般的层状云降水的风场变化范围相吻合,表明单发双收的偏振工作方式虽然在数据量上会减少一半,但是其对风场信息探测还是基本上能反映出降水云体的速度场信息。 $Z_{DR}$ 、 $K_{DP}$ 与回波强度的对应关系很好,这也是用它们测量降雨有较高精度的原因。而由  $Z_{DR}$ 、 $L_{DR}$ 、 $\rho_{HV}$ (0)等偏振参数的高显图上显示的零度层亮带清晰可见。

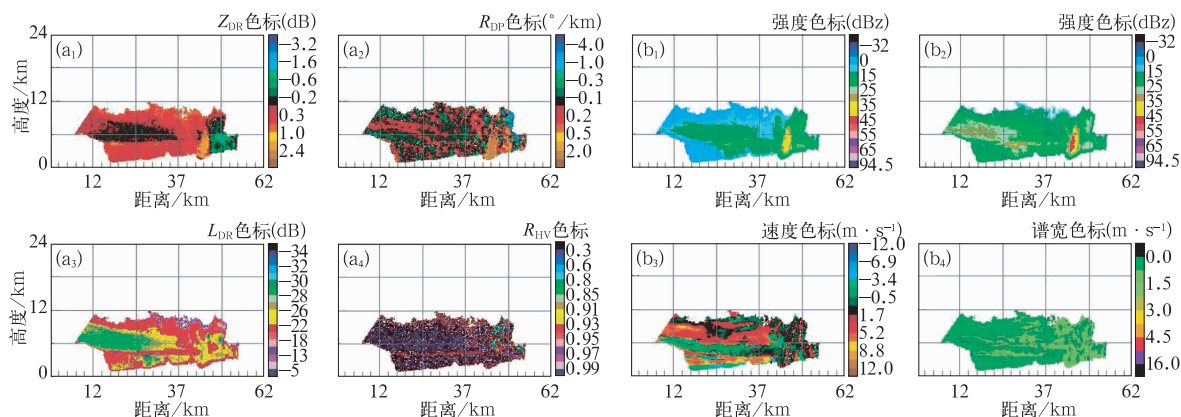


图 2 2008 年 5 月 25 日 10:48XPDRW 在珠海观象站观测到的一次层状云降水的回波图像

Fig. 2 Image of stratiform cloud precipitation observed with XPDRW at Zhuhai Station of Guangdong Province at 10:48 BT 25 May 2008

需要说明的是,在图 1 和图 2 的  $Z_{DR}$  大值区后面,中等回波强度区( $Z_H$  约在 25 dBz 左右)内有一片  $Z_{DR}$  接近为零的负值区域,这是不符合降水粒子的参数特征的。我们对此的解释是它可能是因为雷达波经过正的大  $Z_{DR}$  回波区,降水粒子对水平偏振雷达波的衰减要大于垂直偏振波,而使后面的  $Z_{DR}$  测量值变小。这也说明了对于 X 波段雷达来说,雷达波的衰减问题是不可忽略的。相对于 C 和 S 波段来说,波束衰减问题对 X 波段的雷达就更为突出,不可避免地对降水产生很大的影响。如何合理有效地针对 X 波段双偏振雷达的参数进行衰减订

正,还需要进行更多的研究。

### 3 XPDRW 资料衰减订正方法

雷达波信号的衰减问题是影响 X 波段应用的一个重要因素,在进行降水估测时,受衰减影响,会引起较大的误差。一般的衰减订正方法是根据衰减与降水关系的经验公式,利用降水量的大小去调整反射率因子值,再反推衰减大小。但是由于  $Z-R$  关系本身的误差就很大,所以这种方法是极不稳定的。利用双偏振雷达的探测资料进行降水的衰减订正,

科学家们对此进行了广泛的研究。

XPDRW 是在前人的研究基础上,利用  $K_{DP}$  进行衰减订正的。其基本思路是:在由非球形粒子组成的雨区中,衰减率  $A_H$ 、差分衰减率  $A_{DP}$  ( $A_{DP} = A_H - A_V$ ,  $A_H$ 、 $A_V$  分别为水平与垂直偏振波在降水区中的衰减率)能够线性地表示为<sup>[7]</sup>:

$$A_H = a_1 K_{DP} \quad A_{DP} = a_2 K_{DP} \quad (1)$$

从而  $Z_H$ 、 $Z_{DR}$  可由下式进行订正:

$$\begin{aligned} Z_{He}(r) &= Z_{Ha}(r) + 2 \int_0^r A_H(s) ds \\ Z_{DRe}(r) &= Z_{DRa}(r) + 2 \int_0^r A_{DP}(s) ds \end{aligned} \quad (2)$$

其中  $Z_{Ha}(r)$ 、 $Z_{He}(r)$  分别为订正前后的水平反射率因子(单位:dBz),  $Z_{DRa}(r)$ 、 $Z_{DRe}(r)$  分别为订正前后的差分反射率因子(单位:dB),  $r$  为距离雷达中心的距离(单位:km)。在实际资料处理中,将式(1)分别代入式(2),得到:

$$\begin{aligned} Z_{He}(r) &= Z_{Ha}(r) + 2a_1 \cdot BW \sum_{k=1}^{nr} K_{DP}(k) \\ Z_{DRe}(r) &= Z_{DRa}(r) + 2a_2 \cdot BW \sum_{k=1}^{nr} K_{DP}(k) \end{aligned} \quad (3)$$

其中  $BW$  为库长(单位:km)。由于 XPDRW 雷达直接保存了差传播相移值,所以本文直接用经过质量控制后的  $\Phi_{DP}$  进行  $Z_H$  和  $Z_{DR}$  衰减订正:

$$\begin{aligned} \Delta Z_{He}(r) &= 2a_1 \cdot \Delta R \sum_{k=0}^N K_{DP}(k) \\ &= a_1 [\Phi_{DP}(k) - \Phi_{DP}(0)] \\ \Delta Z_{DRe}(k) &= 2a_2 \cdot \Delta R \sum_{k=0}^N K_{DP}(k) \\ &= a_2 [\Phi_{DP}(k) - \Phi_{DP}(0)] \end{aligned} \quad (4)$$

在实际的应用过程中,取系数  $a_1 \approx 0.25 \text{ dB}/^\circ$ ,  $a_2 \approx 0.034 \text{ dB}/^\circ$ <sup>[7]</sup>。初始差分传播相移  $\Phi_{DP}(0)$  的确定是通过沿径向寻找 2 km 以外的第一个连续 1 km 的相关系数都大于 0.9 的段,然后取该段所有  $\Phi_{DP}$  的平均值作为  $\Phi_{DP}(0)$ 。由于离雷达 2 km 以内的差分相移观测值不稳定,即使是在有降水回波的情况下抖动也非常大,所以从 2 km 开始往外寻找径向上的初始差分传播相移<sup>[8]</sup>。

由大气引起的衰减问题,除测云雷达外,在 S、C 波段,甚至于包括 X 波段资料处理中通常被忽略。氧气和水汽是主要的吸收雷达信号、引起衰减的气体成分。XPDRW 的处理中,采用的是 Ulaby 的吸收模式来计算双程气体衰减:因为大气引起的衰减随着距离单调增加,X 波段信号衰减作为距离  $r$ (单位:km)的一个函数,由下式可以简单地近似得到双程反射率的衰减订正:

$$\Delta Z_H^g(r) \approx 0.030 r^{0.96} \quad (5)$$

其中  $\Delta Z_H^g(r)$  代表大气在距离  $r$  处引起的水平反射率衰减,单位:dBz。

图 3 给出了 XPDRW 雷达探测到的一次降水过程衰减订正前后的结果比较。由图上可以比较明显地看出,在未经衰减订正的  $Z_{DR}$  回波图上,在强回波中心的后面,出现了部分回波强度较强、而  $Z_{DR}$  为负值的降水区域,这明显是由于降水衰减引起的,经过衰减订正后,该区域的  $Z_{DR}$  为正值(图 3d)。同时经过衰减订正后的  $Z_H$  和  $Z_{DR}$  强度增加比较明显,显示了衰减订正的效果。

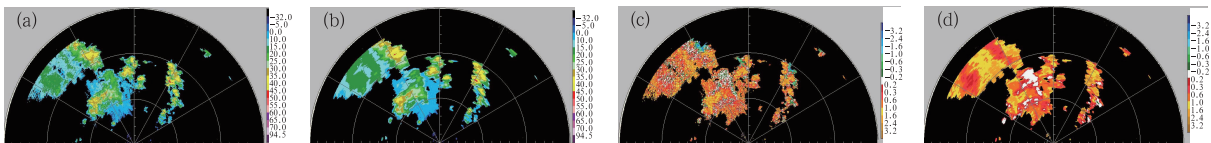


图 3 衰减订正前后的  $Z_H$  与  $Z_{DR}$  回波图像

(a) 实测(未经衰减订正的)  $Z_H$ ; (b) 经衰减订正后的  $Z_H$ ; (c) 实测(未经衰减订正的)  $Z_{DR}$ ; (d) 经衰减订正后的  $Z_{DR}$

Fig. 3 Image of  $Z_H$  and  $Z_{DR}$  :

(a)  $Z_{H\text{uncorrected}}$ ; (b)  $Z_H$  after attenuation corrected; (c)  $Z_{DR\text{uncorrected}}$ ; and (d)  $Z_{DR}$  after attenuation corrected

#### 4 XPDRW 资料质量分析

虽然双偏振雷达被认为是探测和研究降水粒子相态结构的一种有效手段并且取得了较多的研究成果,但是对于某一特定的双线偏振雷达,要进行其资

料质量分析和预处理以评价其探测性能仍然是一个具有相当工作量的难题。我们以 2008 年 5 月 25 日雷达测量到的一次降水过程为例,通过分析其  $Z_H - Z_{DR}$  以及  $Z_H - K_{DP}$  资料的一致性来说明 XPDRW 探测资料的质量情况。图 4 给出了 XPDRW 对本次过程探测获取的原始资料经预处理后得到的  $Z_H -$



$Z_{DR}$  (图 4a) 以及  $Z_H - K_{DP}$  (图 4b) 散点图。其中对  $Z_{DR}$  的预处理主要包括剔除噪声点、滑动平均以及衰减订正等过程,对  $Z_{DR}$  的衰减订正采用的是  $Z_{DR} - \Phi_{DP}$  的订正方法<sup>[9]</sup>,订正系数取  $0.032 \text{ dB}/^\circ$ 。而  $K_{DP}$  是在对  $\Phi_{DP}$  进行 FIR 滤波<sup>[10]</sup>的基础上、再通过最小二乘法处理得到的。处理的方法是:当对应距离库点  $Z_H > 40 \text{ dBz}$  时,  $K_{DP}$  的值是由前后各 6 个点(共 13 个库)的双程传播相位  $\Phi_{DP}$  平滑得到(XPDRW 的距离库是  $75 \text{ m}$ , 13 个库的长度约为  $1 \text{ km}$ ); 当对应点  $Z_H < 40 \text{ dBz}$  时,  $K_{DP}$  的值是由前后各 12 个点(共 25 个库)的  $\Phi_{DP}$  平滑得到,平滑距离约为  $2 \text{ km}$ , 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<sup>[11-12]</sup>。从图 4 可以看出,在  $Z_H$  值相对较小( $< 15 \text{ dBz}$ )的区域,其  $Z_{DR}$  和  $K_{DP}$  值都比较小,在 0 值附近摆动。此后随着  $Z_H$  的值增加( $15 \sim 40 \text{ dBz}$ ),经过订正后的  $Z_{DR}$  在这个区域内的值范围在  $0.2 \text{ dB}$  到  $1.2 \text{ dB}$  之间,  $K_{DP}$  的值在  $0$  到  $1^\circ/\text{km}$  范围内,且随着  $Z_H$  的增大,  $Z_{DR}$  和  $K_{DP}$  呈明显的上升变化趋势,这种偏振参数的变化特性同 Ryzhkov 等<sup>[12]</sup>的研究成果一致,说明经过订正后的雷达资料对降水粒子的特性反映是有效合理的,比较符合实际情况,可以进行后续的进一步分析。同一雷达探测到的其他过程资料分析结果也可以得到相同的结论(图略)。

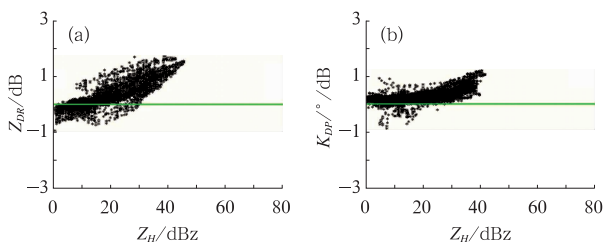


图 4 XPDRW 观测到的一次降水过程原始资料的  $Z_H - Z_{DR}$  (a) 和  $Z_H - K_{DP}$  (b) 散点图

Fig. 4 Scatter plots of  $Z - Z_{DR}$  (a) and  $Z - K_{DP}$  (b) for a precipitation case observed with XPDRW

## 5 数据处理系统软件

双偏振多普勒天气雷达在解决气象业务上的一系列问题上具有很大的潜力,主要表现在:提高定量降水的测量精度、可以用于识别降水回波和非降水回波、从降水中识别各种降水粒子的相态以及区分冬季风暴的降水类型等,而从目前的研究情况来看,

提高定量降水的测量精度和识别降水粒子类型是目前开展工作最多的两个方面。在 XPDRW 提供的数据处理系统软件中,分别采用了不同的办法实现了这方面的功能。

### 5.1 定量降水估测方法

从偏振参数的特性来说,  $Z_{DR}$  反映了降水粒子对不同偏振方向雷达波后向散射的性质的差异,反映出滴谱中大小降水粒子比例的变化,能够较精确地反映雨滴谱的变化<sup>[13]</sup>; 而  $K_{DP}$  则是非球形粒子对不同偏振方向雷达波传播相位或传播速度差异的度量,几乎和雨强  $R$  呈线性关系,而且对雨滴谱(DSD)变化相对来说不敏感,更能适应雨滴谱中  $N_0$  参数的变化<sup>[14-15]</sup>。因此充分利用双线偏振多普勒雷达的各种测量参数,可以有效地提高降水的估测精度。但是利用不同的偏振参数估算降水强度的方法差异很大。

利用双线偏振雷达各种的不同参量进行组合,可以得到不同的测雨方法及测雨效果,总体来说,大致有以下几种方法估测降水的方法<sup>[16-19]</sup>:

方法 1 [ $R(Z_h)$  方法]:

$$R_1 = a_1 Z_h^{b_1}$$

方法 2 [ $R(Z_h, Z_{DR})$  方法]:

$$R_2 = a_2 Z_h^{b_2} Z_{DR}^{c_2}$$

方法 3 [ $R(K_{DP})$  方法]:

$$R_3 = a_3 K_{DP}^{b_3}$$

方法 4 [ $R(Z_h, Z_{DR}, K_{DP})$  方法]:

$$R_4 = a_4 Z_h^{b_4} Z_{DR}^{c_4} K_{DP}^{d_4}$$

其中,  $R_1, R_2, R_3, R_4$  分别表示运用 4 种方法计算得出的雨强(单位:  $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ), 上面的各公式中  $Z_h$  的单位为  $\text{mm}^6 \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $Z_{DR}$  的单位为  $\text{dB}$ ,  $K_{DP}$  的单位为  $^\circ/\text{km}$ 。需要注意的是: 雷达测量的反射率因子  $Z_H$  ( $\text{dBz}$ ) 与上面给出公式中的  $Z_h$  ( $\text{mm}^6 \cdot \text{m}^{-3}$ ) 是不相同的,需进行转换,其转换关系为:  $Z_H = 10 \log Z_h$ 。  $a_1, a_2, a_3, a_4, b_1, b_2, b_3, c_2, c_4, d_4$  为可调参数,对于不同的波段、不同的降雨类型,各个参数的值是不完全相同的<sup>[16]</sup>。

方法 1 只利用  $Z_H$  一个参数来估测降水的,这种关系是在假定雨滴形状呈球形分布的情况下得到的。当降水强度较小时,这种假设是成立的,但是当降水强度较大时,降水估测误差就会随着降水强度增加而迅速增大,且降雨强度越大,估测结果误差就

越大。方法 2 利用了  $Z_H$  和  $Z_{DR}$  两个参量,该方法对滴谱分布变化敏感性不明显,利用双参数( $Z_H$ 、 $Z_{DR}$ )的方法提高了强降水的估测精度;方法 3 直接利用  $K_{DP}$  来估测降水,由于  $K_{DP}$  能够反映出非球形雨滴的扁平状况,且受衰减的影响小,因此在强降水测量方面对测量精度有很大提高,同时该方法对雨滴谱变化较不敏感,在探测云体内微物理结构方面有较大的潜力,缺点是对  $K_{DP}$  本身资料的精确测量有一定的难度;方法 4 是联合了  $Z_H$ 、 $Z_{DR}$  和  $K_{DP}$  来反演降水,由于  $K_{DP}$  能提高雷达探测效果,且液态水对它的贡献最大;而引入参量  $Z_{DR}$  可以比较明显改善了常规雷达反演强降水过大的现象,因此从理论上来说,这种测量降水的方法对于任何降水类型都能得到相对精确的探测结果的观点。但是  $Z_{DR}$  和  $K_{DP}$  的系统误差和随机误差可能会影响这一方法的探测效果,尤其当  $Z_H$  值比较小的时候<sup>[20]</sup>。

根据上面的分析,在利用 XPDRW 的观测数据进行估测降水时,我们采用组合的降水算法:当降水强度较小时,由于此时  $Z_{DR}$  和  $K_{DP}$  值较小,较易产生测量误差,用  $Z_{DR}$  和  $K_{DP}$  反而会导致较大的降水估测偏差,利用方法 1 估测降水就是一个很好的选择。当降水强度较大时,由于雨滴在下落过程中受空气阻力而变为扁平状,方法 1 估测误差随着降水强度增加而迅速增大,而此时  $Z_{DR}$  和  $K_{DP}$  值较大,充分利用  $Z_{DR}$  和  $K_{DP}$  可以使降水估测精度得到提高。针对降水强度大的情况下,应根据  $Z_{DR}$  和  $K_{DP}$  的值不同而采用不同的方法。图 5 给出了 XPDRW 利用组合算法进行降水估测时的具体算法流程(在实际的计算中,取  $P_1=20$  dBz,  $P_2=0.3^\circ/\text{km}$ ,  $P_3=1$  dB)。

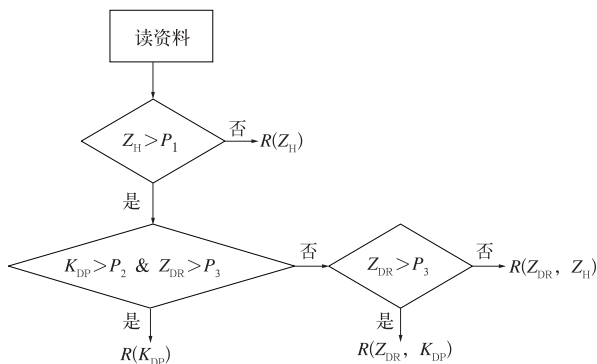


图 5 XPDRW 进行降水估测算法的流程图

Fig. 5 Flow chart of rain estimation algorithm with XPDRW

图 6 给出了采用方法 1 和组合算法估算得到的结果比较,由图可见,在弱降水区( $Z_H < 20$  dBz), 两

者估算得到的结果是相同的,而在降水强度较大的地方,采用组合算法得到的估算结果要明显高于方法 1 得到的结果,且降水强度越大,高估的值也越大。这在业务应用过程中是有现实意义的,因为对强降水的高估有利于提前做好防汛抗灾的准备。

## 5.2 降水粒子相态的识别方法

双偏振功能的多普勒雷达可以探测到与降水粒子类型、形状和分布以及下落运动等要素密切相关的偏振参数,从而可以得到降水粒子微物理结构的额外信息,因此使得探测混合区降水粒子的相态成分成为可能,但如何估测降水粒子的相态是双线偏振雷达应用研究中的一个比较活跃的、同时也是比较复杂的研究课题。

XPDRW 采用模糊逻辑的方法来构建利用双线偏振多普勒雷达的观测参数识别降水粒子相态的识别模式<sup>[21]</sup>。其基本原理就是将双线偏振多普勒雷达观测参数矩阵  $\mathbf{X}$  通过一定的转换方式转换为降水粒子类型矩阵  $\mathbf{Y}$ 。在实际的处理中,我们采用不对称的梯形函数作为隶属函数的基本形式,建立其  $\mathbf{X}$  和  $\mathbf{Y}$  之间的关系。用  $Z_H$ 、 $Z_{DR}$ 、 $K_{DP}$  和  $\rho_{HV}(0)$  这 4 个参数作为输入变量,根据各种降水粒子对应的偏振量的取值范围确定隶属函数,对 4 个雷达测量参数来进行模糊化,在构造各自的隶属函数参考了给出的参数门限值,输出变量是降水粒子类型,该方法对降水粒子类型的推断是基于 4 个输入变量的各自规则基<sup>[20-21]</sup>。在此基础上,根据季节的不同,将降水回波识别为:弱回波(W-E)、小雨(L-R)、大雨(H-R)、小冰雹(S-H)、大冰雹(L-H)和冰水混合物(H/R)(夏季)以及弱回波(W-E)、小雨(L-R)、大雨(H-R)、雪(SNOW)、冰雹(HAIL)和冰水混合物(H/R)(冬季)几种类型。图 7 为 2008 年 5 月 26 日 17:39 的一次大范围降水过程双线偏振雷达观测的结果和识别结果的对比(雷达的观测仰角为  $3.7^\circ$ , 距离量程为 75 km, 每个径向圈的距离为 25 km)。从识别的结果图上可以看出,在回波强度大和  $K_{DP}$  高值区对应的降水类型为大雨(雷达站的东南方向, 径向距离 30~40 km 处),这与实际的降水参数特征是相符合的。而在弱降水回波边缘位置,常常会出现一些弱回波(W-E)的误判,这可能是我们对于小雨和弱回波之间的隶属函数的设置还不能完全符合两者的特征,有待改进和完善,但总体来说这并不影响用户对降水系统的判断分析。分析其他过程的

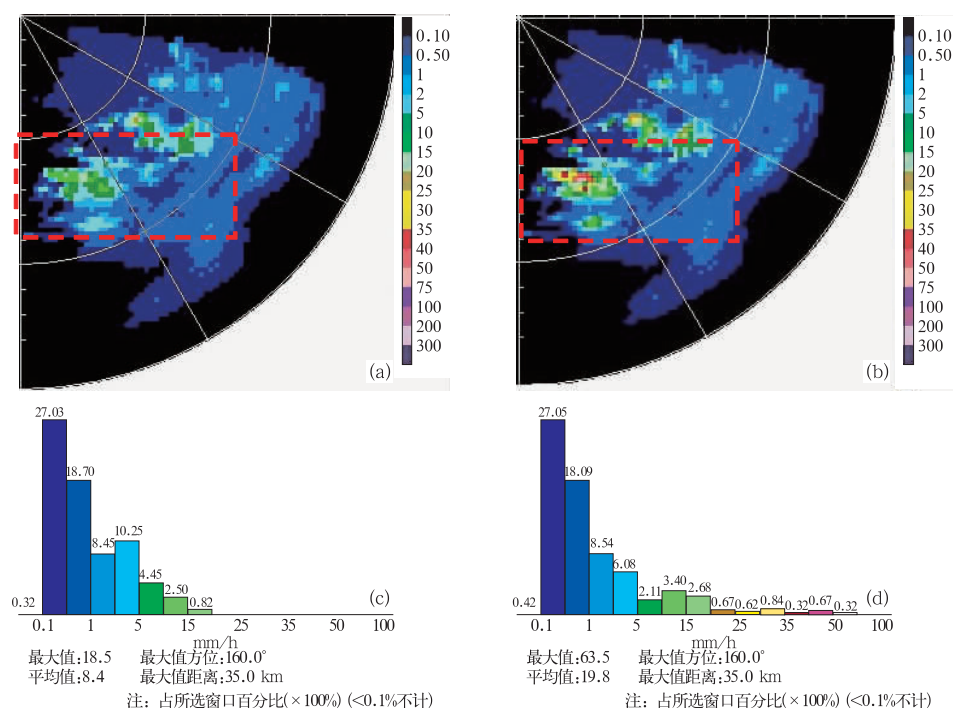


图 6 两种估测降水方法的比较

(a) 为利用方法 1 估算得到的降水分布图, 计算中取  $a_1=200, b_1=1.6$ , (b) 为采用组合算法得到的降水分布图, (c) 和 (d) 分别是上面两图中红线区域内的降水分布直方图

Fig. 6 Comparison of two rain-estimation methods

(a) result from method 1 with  $a_1=200$  and  $b_1=1.6$ ; (b) result from combination algorithm; (c) and (d) are the precipitation distribution histogram of areas enclosed by the red line on the top correspondings

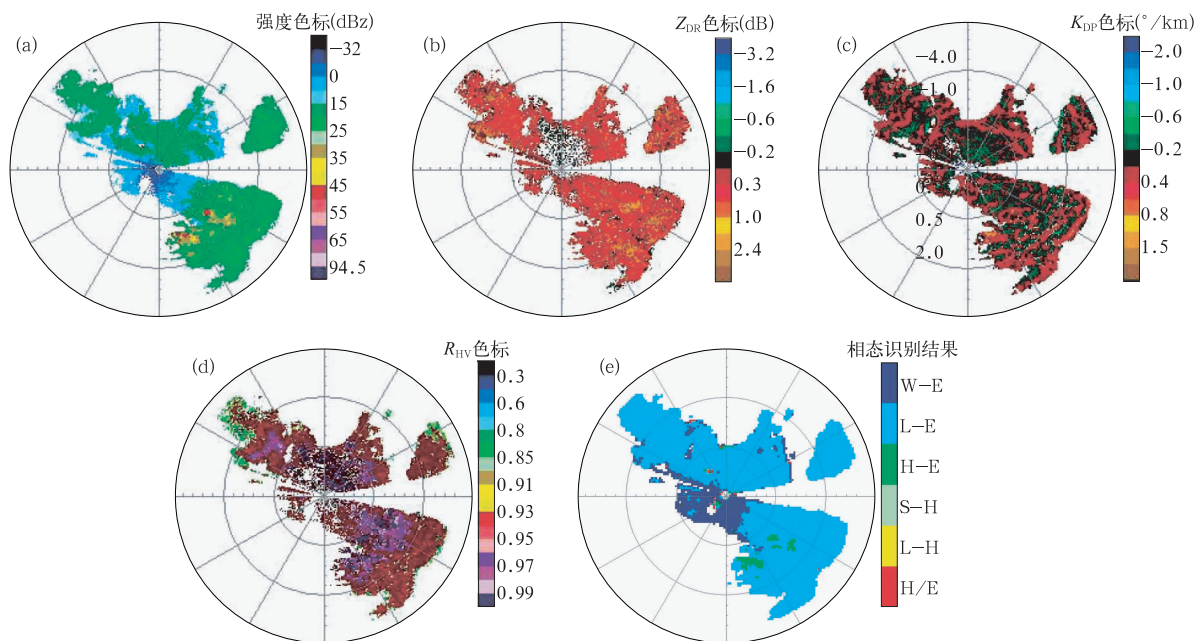


图 7 2008 年 5 月 26 日 17:39, XPDRW 探测到的一次降水过程的偏振量和识别结果

(a)  $Z_H$  (dB); (b)  $Z_{DR}$  (dB); (c)  $K_{DP}$  ( $^{\circ}/km$ ); (d)  $\rho_{HV}$  (0); (e) 识别结果

Fig. 7 Image of the polarimetric parameters and classification result of a precipitation case observed with XPDRW at 17:39 BT 26 May 2008

(a)  $Z_H$  (dB); (b)  $Z_{DR}$  (dB); (c)  $K_{DP}$  ( $^{\circ}/km$ ); (d)  $\rho_{HV}$  (0); and (e) classification result



结果,也可得到类似的结论(图略)。通过分析我们认为: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。

### 5.3 数据处理系统软件设计

上面所提到的所有算法都是在 XPDRW 的数据处理系统软件中实现的。数据处理系统软件系统包括资料预处理模块、显示模块、网络监视模块以及产品生成模块等功能模块。该软件的总体结构的设计采用了 WINDOWS 的多文档窗口界面技术,实现各菜单命令和消息通讯,同一文档窗口中可以分别显示单要素、两要素以及四要素的同时显示,以便于对同一天气过程的对应比较。在多文档窗口界面的控制下系统内嵌网络通讯客户端模块,在处理气象数据的同时,采用 TCP/IP 协议接收监控终端发送的原始数据信息。软件系统采用目录监视技术,通过监视监控终端的原始回波数据保存路径,在数据处理软件端可以实现回波数据的准实时显示并进行气象产品的自动生成、危险天气的声光告警等功能。系统可以支持 WINDOWS 2000/XP 等多种软件平台,其编程语言以 Visual C++ 6.0 为主。该软件具有速度快、功能全等特点,能够满足实际的用户使用要求。

## 6 结 语

根据目前国内外(特别是美国等发达国家)雷达技术的发展趋势,双线偏振雷达技术是继多普勒雷达技术后最有推广潜力和价值的雷达系统之一。我国的偏振天气雷达研究起步晚、发展慢,与国外有较大的差距。本文介绍了基于单发双收制式的车载 X 波段双线偏振多普勒天气雷达,并利用该雷达的系列观测试验中获取的参数,分析了该雷达的资料质量和探测性能,讨论了该雷达对降水的估测以及降水回波分类的处理方法。通过分析我们认为:从该雷达获取的数据资料来看,其探测的数据是基本可信的,基本上能反映降水粒子的分布特性,可以进行后续的进一步分析研究。在雷达探测资料的应用上,我们建立了自己的数据处理软件系统,该软件系

统具有速度快、功能全等特点,可以实现利用雷达探测资料进行降水的估测以及降水回波的分类,能够满足实际的用户使用要求。

应该指出的是,由于其他观测资料(如地面降水资料、探空资料等)的限制,我们目前还不能进行更多的试验对比验证。我们只能利用雷达的探测数据进行定性的分析,而不能用真实的观测资料来对比。在降水估算和降水粒子相态的识别方法上今后还有许多工作要做。鉴于此,我们希望在未来的工作中,能得到更多的资料,包括地面实测资料和探空资料等,对这些资料进行分析处理建立适合我国实际情况的各种算法,并将其应用于实际的气象服务中去,更好地为社会经济建设服务。

**致谢:**中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室的刘黎平老师对本文提出的许多宝贵意见和建议,仲凌志博士也为本文的成稿提供了很大的帮助,在此一并表示感谢!

### 参考文献

- [1] Seliga T A, Bringi V N. Potential use of radar differential reflectivity measurements at orthogonal polarisations for measuring precipitation[J]. J Appl Meteor, 1976, 15: 69-76.
- [2] 王致君, 楚荣忠. X 波段双通道同时收发式多普勒偏振雷达[J]. 高原气象, 2007, 26(1): 135-140.
- [3] Hall M P, Cherry M S, Goddard T W, et al. Raindrop sizes and rain rate measured by dual-polarization radar[J]. Nature, 1980, 285: 132-140.
- [4] Atlas D M, Hitschfeld W. Scattering and attenuation by non-spherical atmospheric particles[J]. J Atmos and Terrest Phys, 1953, 3: 108-119.
- [5] Gent H I, Hunter M, Robinson N P. Polarization of radar echoes, including aircraft, precipitation and terrain[J]. Prof of IEE, 1963, 110(12): 2139-2148.
- [6] 曹俊武, 刘黎平. 双线偏振雷达识别冰雹区的方法分析研究[J]. 气象, 2006, 32(6): 13-19.
- [7] Bringi V N, Chandrasekar V, Balakrishnan N, et al. An examination of propagation effects in rainfall on polarimetric variables at microwave frequencies [J]. J Atmos Oceanic Technol, 1990, 7: 829-840.
- [8] 肖艳娇. X 波段双线偏振雷达数据质量控制[J]. 待发表.
- [9] Matrosov S Y, Clark K A, Martner B E, et al. X-band polarimetric radar measurements of rainfall[J]. J Appl Meteor, 2002, 41: 941-952.
- [10] Hubbert J V, Bringi V N. An iterative filtering technique for the analysis of copolar differential phase and dual-frequency radar measurements[J]. J Atmos and Oceanic Tech, 1995,

- 12:643-648.
- [11] 曹俊武,刘黎平,陈晓辉,等. 3836C 波段双线偏振多普勒雷达资料质量分析及其在一次降水过程中的应用研究[J]. 应用气象学报,2006,17(2):192-200.
- [12] Ryzhkov A V, Zrnice D S, Burgess D, et al. Observation and Classification of Echoes with the Polarimetric WSR-88D Radar[R]. Report of National Severe Storms Laboratory, Norman, Oklahoma, 2003, 19-26 L. A.
- [13] Aydin K, Seliga T A. Remote sensing of hail with a dual polarization radar[J]. J Climate and App Metero, 1986, 25: 1475-1484.
- [14] Hall M P, Cherry M S, Goddard T W, et al. Raindrop sizes and rain rate measured by dual-polarization radar[J]. Nature, 1980,285:132-140.
- [15] Chandrasekar V, Bringi V N, Balakrishnan N, et al. Error structure of multiparameter radar and surface measurements of rainfall. Part III: Specific differential phase[J]. J Atmos Oceanic Technol, 1990, 7:621-629.
- [16] Herzog P H, Jameson A R. Observing precipitation through dual-polarization radar measurements[J]. Bull Amer Meteor Soc, 1992, 73:1365-1374.
- [17] Ryzhkov A V, Giangrande S E, Schuur T J. Rainfall estimation with a polarimetric prototype of WSR-88D[J]. J Appl Meteor, 2005,44:502-515.
- [18] Sachidananda M, Zrnice D S. Differential propagation phase shift and rainfall rate estimation[J]. Radio Science, 1986, 21:235-247.
- [19] 李淑日,王广河,刘卫国. 降水性层状云微物理结构个例分析[J]. 气象,2001,27(11):17-21.
- [20] 金华,王广河,游来光,等. 河南春季一次层状云物理结构分析[J]. 气象,2006,32(10):3-10.
- [21] Zadeh L A. Fuzzy algorithms. Info. & Ctl[J]. 1968,12:94-102.
- [22] 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[J]. 大气科学,2005,26(5):768-778.
- [23] Liu H P, Chandrasekar V. Classification of hydrometeor based on polarimetric radar measurements: Development of fuzzy logic and neuro-fuzzy systems, and in situ verification[J]. J Atmos and Oceanic Tech, 2000,17:140-164.