

刘亚男, 肖辉, 姚振东, 等. 2012. X 波段双极化雷达对云中水凝物粒子的相态识别 [J]. 气候与环境研究, 17 (6): 925–936, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.06.30. Liu Yanan, Xiao Hui, Yao Zhendong, et al. 2012. Analyses of hydrometeor identification based on X-band polarimetric radar [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (6): 925–936.

X 波段双极化雷达对云中水凝物粒子的相态识别

刘亚男^{1, 2, 3} 肖辉² 姚振东¹ 冯亮²

1 成都信息工程学院电子工程学院, 成都 610025

2 中国科学院大气物理研究所云降水物理与强风暴实验室, 北京 100029

3 大连市气象装备保障中心, 大连 116001

摘要 人工影响天气研究需对云中降水粒子的相态和分布结构进行准确识别, 以便提高人工影响天气作业效率。中国科学院大气物理研究所的车载 X 波段双极化雷达可提供与云中降水粒子大小、形状、相态等特征密切相关的 4 个极化参数: 反射率因子、差分反射率、差分相移率、水平和垂直极化相关系数。利用这 4 个极化参数加上环境温度作为 5 个输入参量, 建立了降水粒子相态模糊逻辑识别算法, 识别的降水粒子有 10 种: 毛毛雨、雨、湿霰、干霰、小雹、大雹、雨加雹、湿雪、干雪、冰晶。利用此雷达的实际观测资料, 并与地面和飞机空中实测资料对照, 对我国南、北方地区观测的降水天气过程进行分析, 结果表明: 建立的模糊逻辑算法对云内水凝物粒子的相态识别分类合理。

关键词 X 波段双极化雷达 模糊逻辑 相态识别 应用试验

文章编号 1006-9585 (2012) 06-0925-12

中图分类号 P412

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.06.30

Analyses of Hydrometeor Identification Based on X-Band Polarimetric Radar

LIU Yanan^{1, 2, 3}, XIAO Hui², YAO Zhendong¹, and FENG Liang²

1 Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610025

2 Laboratory of Cloud-Precipitation and Severe Storms, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

3 Dalian Meteorological Equipment Support Center, Dalian 116001

Abstract The study of weather modification must exactly identify the phases of cloud hydrometeor particles to improve the weather modification performance. The vehicle-borne X-band dual-polarization radar system set up by the Laboratory of Cloud-Precipitation and Severe Storms (LACS), Institute of Atmospheric Physics (IAP), Chinese Academy of Sciences, can provide several dual-polarization radar observables, including radar reflectivity, differential reflectivity, specific differential propagation phase, and correlation coefficient, which are related to the sizes, shapes, and phases of hydrometeor particles. In this paper, the four polarimetric observables combined with environmental temperature are considered as five input parameters, and a fuzzy logic algorithm for hydrometeor particle identification is developed and implemented to discriminate ten different hydrometeor types including drizzle, rain, wet graupel, dry graupel, small hail, large hail, rain and hail mixture, wet snow, dry snow, and ice crystals. The identification algorithm is tested and estimated by using the radar data observed in southern and northern China, and comparing the results with the surface field

收稿日期 2012-04-23 收到, 2012-06-26 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金项目 40875080, 国家科技支撑计划项目 2006BAC12B01-01, 中国气象局阳江国际探空仪比对辅助遥感试验课题, 国家公益性行业(气象)科研专项 GYHY201006031

作者简介 刘亚男, 女, 1985 年出生, 硕士, 主要从事气象雷达信号与信息处理研究。E-mail: l_y_nan@163.com

通讯作者 肖辉, E-mail: hxiao@mail.iap.ac.cn

observation and airborne instrument observations. The classification results indicate that the fuzzy logic algorithm is reasonable and practicable.

Keywords X-band dual-polarization radar, Fuzzy logic, Hydrometeor classification, Compatibility test

1 引言

双极化气象雷达通过发射水平和垂直极化电磁波可获得更多与降水粒子大小、形状、相态、空间取向和分布等密切相关的雷达参量(Bringi and Chandrasekar, 2000), 主要包括水平极化反射率因子 Z_H 、垂直极化反射率因子 Z_V 、差分反射率 Z_{DR} 、差分传播相移率 K_{DP} 、水平极化和垂直极化零滞后相关系数 ρ_{HV} 等。这些雷达探测参量因能更好地反映云内水凝物粒子的特征状况, 使利用双极化气象雷达识别降水粒子的相态成为可能。

Seliga and Bringi (1976) 利用 Z_H 和 Z_{DR} 两个极化参量探测粒子的形状、相态、空间取向的试验取得了与理论预测相一致的结果, Aydin et al. (1986) 通过统计分析大量双极化雷达资料表明, 双极化雷达探测到的冰雹区的位置与地面实际降雹的区域位置较一致。Doviak and Zrnic (1993) 通过双极化雷达探测参量对不同水凝物识别能力和取值范围进行了更详细的分析计算。在此基础上, Straka and Zrnic (1993) 提出了采用模糊逻辑算法识别降水粒子相态的方法。模糊逻辑算法因具有用简单的规则而不是公式来描述系统的特点, 在对水凝物粒子相态识别上具有很明显的优越性。Liu and Chandrasekar (2000) 建立了 CSU-CHILL (美国科罗拉多州立大学用于研究天气的雷达设备) S 波段双极化雷达探测参量的降水粒子分类模糊逻辑算法, 曹俊武等(2005)也使用该方法对美国 KOUN S 波段双极化雷达 PPI 扫描数据进行降水粒子分类识别, 得到较为合理的识别结果。程周杰等(2009)也利用英国 CAMRa S 波段双偏振雷达 RHI 探测数据建立了云粒子相态反演的模糊逻辑算法, 并对一次层状云降水过程中水凝物相态演变进行了分析。何宇翔等(2010)利用国内研制的车载 X 波段双极化多普勒雷达探测资料对层状云降水粒子进行了更为细致的划分, 建立了有 15 种降水粒子的模糊逻辑识别算法。对云内降水粒子相态合理的识别在云降水物理和人工影响天气研究中均具有非常重要的科学意义, 这不仅对了解水凝物在云中的生长和转

换机制, 提高定量测量降水的精度有重要的应用价值, 而且能为人工影响天气的作业条件选择、作业决策和效果评估提供重要的参考依据。

本文使用中国科学院大气物理研究所(IAP)云降水物理与强风暴实验室车载 X 波段双极化多普勒气象雷达系统(IAP-714XDP-A)观测资料, 将探测到的 4 个极化雷达参数以及观测的大气环境温度作为输入变量建立适用于层状云和冰雹云降水粒子相态识别的模糊逻辑算法, 并选取典型层状云和冰雹云天气过程的雷达 RHI 扫描数据对云内水凝物粒子的相态进行识别检验, 并对识别的结果进行分析讨论, 验证算法的合理性和适用性。

2 观测仪器介绍和资料来源

IAP 车载 X 波段双极化多普勒气象雷达系统(IAP-714XDP-A)采用直径为 2.4 m 的旋转抛物面天线, 通过同时发射水平和垂直极化波来获取极化参量。雷达系统的主要性能指标如表 1 所列。

表 1 IAP-714XDP-A 双极化雷达性能指标

Table 1 IAP-714XDP-A dual-polarization radar characteristics

序号	项目	参数值
1	工作频率	9.370 GHz
2	天线转速	12° s ⁻¹
3	天线增益	41.6 dB
4	波束宽度	1°
5	雷达波极化状态	水平、垂直
6	发射脉冲宽度	0.5、1.0、2.0 μs
7	脉冲重复频率	500、1000、2000 Hz
8	变 PRF (脉冲重复频率) 功能	2/3、3/4、4/5 可选
9	峰值功率	80 kW
10	信噪比	2.3 dB
11	线性动态范围	>90 dB
12	通道数	2
13	雷达探测量	Z_H 、 V 、 W 、 Z_{DR} 、 K_{DP} 、 ρ_{HV}
14	反射率因子 Z_H	1 dBZ*
15	平均径向速度 V 和速度谱宽 W	1 m s ⁻¹ *
16	差分反射率 Z_{DR}	0.2 dB*
17	差分相移 Φ_{DP}	1°*
18	相关系数 ρ_{HV}	0.01*

*指可观测量的测量精度。

本文实例应用分析中选用的雷达探测资料分别是 2010 年夏季在广东阳江地区和 2009 年春季在河北张北地区这部车载双极化雷达观测的资料。2010 年 7 月 IAP X 波段雷达参加了由中国气象局气象探测中心组织的广东阳江国际探空比对辅助遥感观测试验, IAP X 波段雷达安放在阳江市区南郊 (21.8200°N , 111.9840°E), 海拔高度为 6.2 m, 在其南方 10 km 之外就是宽阔的北部湾海面。本文选取此期间于 2010 年 7 月 22 日观测的降雨性层状云回波数据。2009 年春季由国家科技支撑项目支持在山西、河北、北京地区开展人工增雨联合观测试验, 该部雷达参加了这次试验观测。雷达放置于河北省北部的张家口市张北县 (41.3578°N , 114.7121°E), 雷达站海拔高度为 1345 m。在此期间于 2009 年 4 月 23 日观测到一次春季降雹天气过程, 这次降雹过程发生在离雷达站较近地区, 识别结果可与地面实测资料进行对比验证。

3 雷达探测参量特征及算法描述

若要合理地利用双极化雷达探测到的多个极化参量联合判别降水粒子的类型, 则必须明确这几个探测参量与降水粒子之间的关系, 进而建立合理的识别算法, 进行云中降水粒子的分类判断。

3.1 雷达测量参数与降水粒子之间的关系

Hall et al. (1984) 提出用双极化雷达测量的极化参量识别降水粒子类型, Cherry et al. (1984) 利用各种类型的滴谱和降水粒子形状的分布得到 S 波段雷达探测到的极化参量与各种降水粒子之间的定性关系。刘黎平等 (1996) 用双偏振雷达研究云内降水粒子相态及尺度的空间分布特征。曹俊武等 (2006) 也通过 C 波段双极化雷达探测数据研究了极化参数与不同降水粒子之间的关系。Doviak and Zrnic (1993) 给出了不同降水粒子类型时各个双极化参量的阈值范围。根据理论计算结合实际探测资料分析表明, 对于不同的降水粒子, S 波段雷达各个极化参量的表现有所不同, 其主要表现如下 (张培昌等, 2001):

(1) 对于纯降雨区即融化层以下的区域: Z_H 的取值与雨滴的尺度大小有关, 并随着雨强的增大而增加, Z_{DR} 表现为正值, 当出现大雨滴时, Z_{DR} 的值可达到 $3\sim 5 \text{ dB}$ 。相关系数 ρ_{HV} 与雨强关系不大, 在同一种粒子组成的理想介质中, 取值较高, 在纯

雨区 ρ_{HV} 的值接近于 1。 K_{DP} 一般小于 $1^{\circ} \text{ km}^{-1}$, 但在含有未完全融化的冰晶的大雨区, 其值可达到 $2.5^{\circ} \text{ km}^{-1}$ 。

(2) 对于雨和冰雹共存区: Z_H 的值较大, 由于冰雹或霰在下落过程中往往会出现摇晃或翻滚运动而使得 Z_{DR} 的值较小。例如当 $Z_H < 50 \text{ dBZ}$ 时, 而 Z_{DR} 的值约等于 0。此外, 在该降水粒子的混合区, ρ_{HV} 会变小, 可能会小于 0.5。

(3) 在大冰雹区域, Z_H 的值很大 (如大于 50 dBZ) 而 Z_{DR} 取负值 (如 $-1\sim -3 \text{ dB}$), 在冰雹的取向不是随机的情况下 K_{DP} 的值会较大。

根据上述 S 波段雷达极化参量与云内降水粒子类型的定性关系, 本文在考虑 X 波段雷达本身的衰减等因素的基础上, 结合国内外对降水粒子的相态识别情况, 对 Keenan (2003) 使用 C 波段雷达的参数范围和温度限制范围进行适当的调整。这里主要根据 K_{DP} 与波长之间的关系, 对 C 波段双极化雷达的 K_{DP} 乘以 $5/3$ (认为 C 波段和 X 波段雷达的波长分别为 5 cm 和 3 cm) 并做些小的调整, 其他极化参数的取值范围也进行了细微的调整, 得到 X 波段雷达的参数范围和温度限制范围。

何宇翔等 (2010) 利用 X 波段双极化雷达探测数据将降水粒子分为 15 种不同的类型, 建立了相应的降水粒子相态模糊逻辑识别算法, 并利用层状云观测数据对算法进行了验证。这里考虑到现场观测很难获得如此细致划分的降水粒子类型资料, 为了便于与实际观测资料的比对和现场应用, 本文参考 Keenan (2003) 的工作, 对何宇翔等 (2010) 提出的识别算法进行了简化, 将降水粒子的类型归并成 10 种: 毛毛雨、雨、湿霰、干霰、小雹、大雹、雨加雹、湿雪、干雪、冰晶。本文归纳给出了针对 X 波段双极化雷达的 10 种不同降水粒子类型极化参数取值范围以及对应的环境温度区间范围, 结果如表 2 所示。

需要指出的是, 利用 X 波段双极化雷达开展云中水凝物粒子相态识别的研究是否可行在学术界中还存在争议, 争议的焦点主要是怎样合理地确定各种粒子极化参数取值范围, 因此, 需要有来自于云中水凝物相态的探测与双极化雷达同步观测的比对, 特别是识别结果是否准确要有云中水凝物相态以及地面降水粒子相态的同步观测验证。本文利用几个有现场实际观测配合的 X 波段双极化雷达探测个例对上述降水粒子类型极化参数取值范围

表2 各种降水粒子的雷达极化参数取值范围以及对应的温度区间

Table 2 Polarization radar parameter ranges for various hydrometeors and existing temperature ranges

类型	符号	雷达探测参数				
		Z_H (dBZ)	Z_{DR} (dB)	K_{DP} [$^{\circ}$ km $^{-1}$]	ρ_{HV}	T ($^{\circ}$ C)
毛毛雨	DZ	10~25	0.0~0.8	0.0~0.1	>0.97	-5~40
雨	RN	25~60	0.5~4.0	0.0~18.0	>0.95	-5~40
湿霰	WG	30~50	-0.5~2.0	0.0~5.3	>0.95	-15~5
干霰	DG	20~35	-0.5~1.0	0.0~1.7	>0.95	-15~0
小雹	SH	45~60	-0.5~0.5	-1.8~1.8	0.92~0.95	-15~5
大雹	LH	55~70	-1.0~0.5	-1.8~3.5	0.90~0.92	-40~25
雨夹雹	RH	45~75	-1.0~6.0	0.0~13.0	0.70~0.95	-20~20
融化的湿雪	WS	20~45	0.5~3.0	0.0~1.8	0.5~0.95	0~5
干雪	DS	-10~35	-0.5~1.0	-0.9~1.4	>0.95	-15~0
冰晶	IC	-10~25	0.1~5.0	0.3~2.0	>0.96	-50~5

和对应的环境温度区间范围以及下面介绍的模糊逻辑识别算法的合理性进行检验。

3.2 模糊逻辑识别算法

在对水凝物分类识别方法的研究中, Straka and Zrnic (1993), Holler et al. (1994) 以及 Zeng et al. (2001) 均使用判决图的经验算法来进行水凝物粒子分类, 但分类结果却表明, 由于不同水凝物粒子的协方差矩阵并不是相互独立的而存在相互交叠, 因此该方法用于细致的分类结果并不精确。同时, 考虑到水凝物粒子本身的特殊性(如存在相态之间的转化), 以往基于边界条件和布尔逻辑的判决图方法并不适合水凝物粒子的分类问题。相比之下, 模糊逻辑算法采用的是简单的分类规则, 而不是公式来进行分类系统描述, 所以, 也就更容易应用于水凝物粒子的分类问题。

3.2.1 模糊逻辑算法流程

参考 Liu and Chandrasekar (2000) 关于 S 波段双极化雷达识别方法的研究成果, 本文采用模糊逻

辑算法对云中水凝物粒子进行相态识别。该算法简单、高效, 可以实时计算, 显示降水粒子的类型。模糊逻辑算法大体可分为 4 个步骤: 模糊化、规则推理、集成和退模糊化。模糊水凝物分类方法的方框图如图 1 所示。其中, Z_H 、 Z_{DR} 、 K_{DP} 、 ρ_{HV} 、温度 T 为 5 个输入变量, 输出为降水粒子类型 C 。

3.2.2 成员函数的选取

模糊逻辑算法用于水凝物粒子的分类首先需要将 5 个输入变量进行模糊化, 即把原始的输入数据以隶属度形式转化为模糊基, 对于某一个确定的输入数据可以属于不同的模糊基, 但它在模糊基中的隶属度是不同的。在模糊化过程中最重要的参数则为成员函数, 而成员函数有多种形式。在对云中水凝物粒子的分类中成员函数的选取是否恰当, 是否贴近客观事实, 将直接影响到分类结果的合理性。本文在对水凝物进行分类时选用 Beta 型成员函数 (Liu and Chandrasekar, 2000)。一方面, Beta 型成员函数具有宽的扁平宽阔的区域, 它对应于水凝物粒子的参数取值范围, 而不是单一的数值, 且该区域的最大取值为 1, 另一方面, Beta 型成员函数有一个很宽的过渡区, 因而, 可以改善模糊逻辑识别算法在过渡区的可靠性。

选用 Beta 型函数作为识别算法的成员函数, 其表达式为:

$$\beta(x, a, b, m) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x - m}{a} \right|^{2b}}, \quad (1)$$

其中, a 、 b 、 m 为 Beta 型成员函数的形状参数, 分别表示宽度、斜率和函数曲线的中心; x 为输入变量的值, 输出值的取值范围在 0 和 1 之间。

3.2.3 对环境温度的处理和对观测数据的质量控制

环境温度作为影响水凝物粒子相态的一个重要参量, 对其处理的是否恰当会直接影响到识别结果的合理性。本文在构造模糊逻辑识别算法时将环

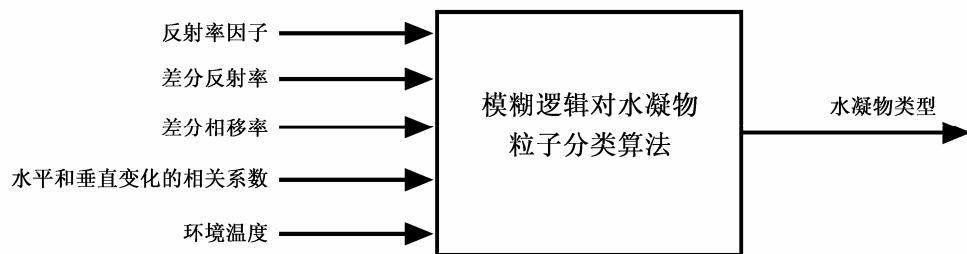


图 1 模糊逻辑降水粒子分类法示意框图

Fig. 1 Fuzzy logic hydrometeor classification

境温度作为一个输入变量进行模糊化处理。通过试验, 温度的权重系数设置为 0.15, 可得到较合理的识别结果。

在对云中水凝物粒子分类时, 各种降水粒子可能出现的高度和温度有着直接的关系, 其中零度层高度的确定最为关键。由于探空资料只有 08:00 (北京时间, 下同) 和 20:00 两个时间点的, 雷达观测天气过程的时间和探空时间往往不能完全对应, 因此, 本文参考距离雷达站最近的探空站的探空观测, 并结合雷达探测到的零度层回波亮带(如果存在的话)的高度, 然后, 根据 ICAO (International Civil Aviation Organization, 国际民用航空组织) 定义的标准大气中零度层与对流层之间温度递减率 $6.49^{\circ}\text{C km}^{-1}$ 的关系来确定出雷达探测范围内对流层各层的温度。

需要特别指出的是, 由于 X 波段雷达信号 (反射率因子 Z_H 和差分反射率 Z_{DR}) 在较大的雨中传播存在较明显的雨衰减现象, 因此, 在利用上述算法进行粒子相态识别前, 需要对雷达观测的反射率因子 Z_H 和差分反射率 Z_{DR} 进行雨衰减订正。本文采用何宇翔等 (2009a, 2009b) 建立的 X 波段双极化雷达反射率和差分反射率的衰减订正方法, 即利用强度衰减率 A_H 、差分衰减率 A_{DP} 与比差分传播相移 K_{DP} 之间的线性关系建立 Z_H 和 Z_{DR} 的衰减订正量与差分传播相移 Φ_{DP} , $K_{DP} = [\Phi_{DP}(r_2) - \Phi_{DP}(r_1)] / [2(r_2 - r_1)]$,

(r 表示与雷达之间的距离, $\Phi_{DP}(r_2)$ 、 $\Phi_{DP}(r_1)$ 分别表示距离雷达 r_2 和 r_1 处的差分传播相移), 进而利用观测的 Φ_{DP} 进行 Z_H 和 Z_{DR} 的衰减订正。在 X 波段雷达观测 Φ_{DP} 的过程中经常发现, 由于较大的粒子产生 Mie 散射造成 Φ_{DP} 观测数据存在后向传播效应 (即 δ 效应), 并存在雷达机内噪声的影响, 因此, 本文利用何宇翔等 (2009a) 提出的 Kalman 滤波方法来滤除这些 δ 效应和噪声对 Φ_{DP} 的影响。由于气象目标的差分反射率 Z_{DR} 随着仰角的增加而逐渐减小, 因此需要对 Z_{DR} 观测数据进行仰角效应消除, 本文采用 Ryzhkov et al. (2005) 提出的方法对不同仰角观测的 Z_{DR} 数据转化成水平观测数据。关于双偏振雷达观测数据的质量控制的详细方法可参阅何宇翔等 (2009a, 2009b)。

4 降水粒子分类的个例分析

本文选用中国科学院大气物理研究所 IAP-714XDP-A X 波段双极化雷达在广东省阳江地区和

河北省张北地区获取的两次不同类型降水天气过程的观测数据进行识别分析对比。阳江地区的雷达数据为 2010 年 7 月 22 日观测数据, 其主要表现为由 2010 年 3 号台风“灿都”外围云系形成的稳定层状云。通过极化雷达 RHI 扫描可以很好地观测到天气系统的层状云垂直分布结构, 适合于层状云内降水粒子的识别分析。在张北地区的观测数据则来自 2009 年 4 月 23 日一次北方春季降雹的天气过程, 并将识别结果与地面实测进行对比, 以验证识别结果的合理性。

4.1 层状云降水粒子分类及结果分析

为了利用飞机入云观测的机载粒子测量系统 (PMS) 数据检验本文提出的模糊逻辑识别算法和参数选择的合理性, 本文首先利用上述所建立的识别算法对何宇翔等 (2010) 使用过的 2006 年 5 月 8 日 09:44 降水型层状云个例进行分类识别试验 (这里将水凝物粒子分为 10 类), 分类识别结果如图 2 所示。从图 2 中可以看到, 在零度层之下主要为雨水区 (RN) 和毛毛雨区 (DZ), 雨水区对应于 $Z_H > 35 \text{ dBZ}$ 的较强回波区, 而毛毛雨区对应于 $Z_H < 35 \text{ dBZ}$ 的较弱回波区。在零度层附近为湿霰 (WG)、干雪 (DS) 等多种混合型粒子, 在零度层之上至 5.5 km 高度层区为干霰 (DG)、干雪 (DS)、湿霰 (WG) 等多种冰相粒子, 在 5.5 km 高度至云顶, 为不规则冰晶 (IC) 和少量干雪的区域。而由飞机实时观测看到, 在零度层之下几百米云层区域为雪花、霰等冰相粒子的融化层, 再往下全为不同大小、表面圆滑的水滴, 在零度层附近及之上区域为霰、雪花、冰晶等多种冰相粒子 [见何宇翔等 (2010) 的图 4]。

通过将分类识别结果与飞机观测的 PMS 结果对比表明, 本文提出的分类算法的结果与现场观测结果基本一致。上述验证还表明, 本文所给的雷达极化参数范围对层状云粒子相态识别是合适的, 分类结果基本能反映出层状云中水凝物粒子的空间分布结构特征。因此, 可用于层状云的粒子相态识别和分类。下面利用该分类算法对 2010 年 7 月 22 日发生在广东阳江地区的一次稳定层状云的降水个例进行水凝物粒子分类和垂直结构特征分析。

根据 2010 年 7 月 22 日的天气实况, 这次降水过程是由 2010 年 3 号台风“灿都”外围云系形成稳定的层状云降水。由于 X 波段雷达探测范围的限制, 在雷达回波上未能看到距离雷达 120 km 处的台风中心位置, X 波段雷达仅观测到由台风外围云系形成

的螺旋状回波带，最大回波强度 35 dBZ 左右。为能更直观地了解台风外围云系的垂直结构，图 3 给出了 IAP X 波段雷达在 2010 年 7 月 22 日 09:20:09 沿 300° 方位未经衰减订正的 RHI 回波强度分布。从图

3 上可以看到，雷达观测的 RHI 回波大约在 5 km 高度处有非常明显的零度层亮带，回波云顶高度已超过 12 km，探测到的最大回波强度在 30~35 dBZ 之间，主要出现在距离雷达 10 km 处上空的零度层亮

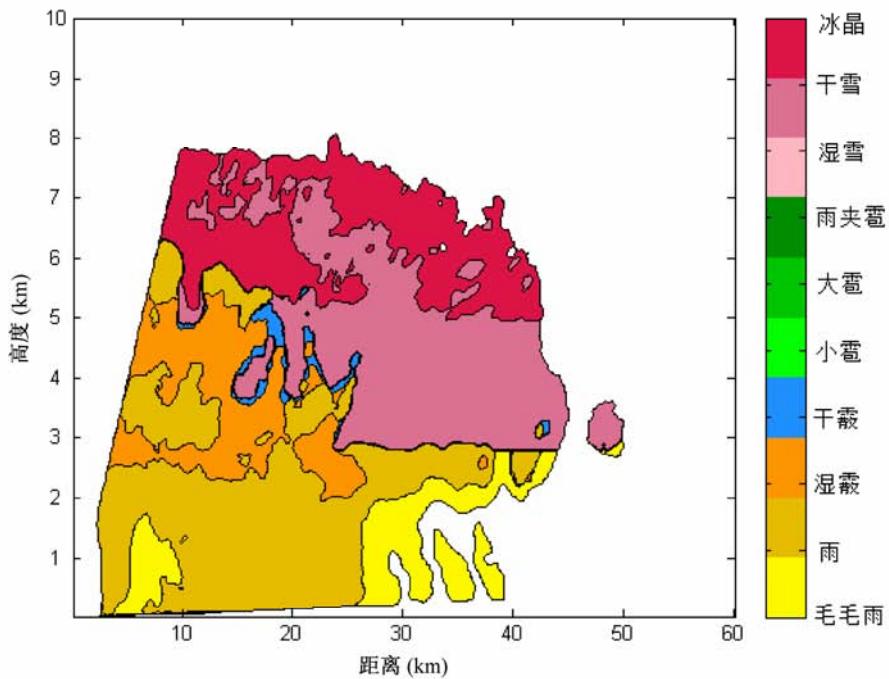


图 2 2006 年 5 月 8 日层状云降水粒子分类结果

Fig. 2 Hydrometeor classification results for the stratiform cloud observed on 8 May 2006

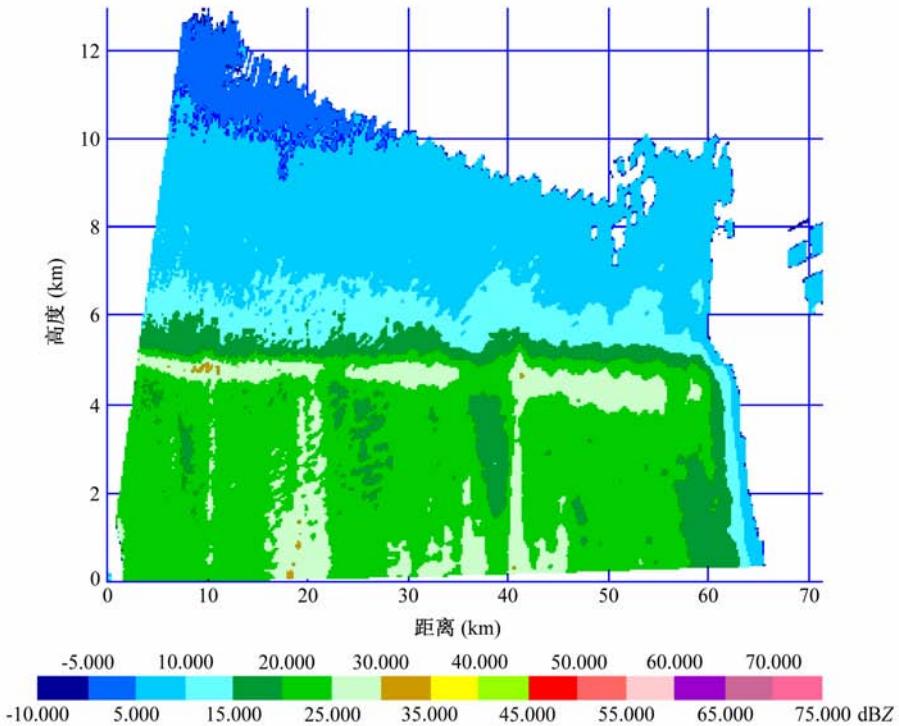


图 3 2010 年 7 月 22 日 09:20 衰减订正前 RHI 回波强度分布（方位角：300°）

Fig. 3 RHI radar reflectivity before attenuation correction observed at 0920 LST 22 Jul 2010 (azimuth: 300°)

带中。从该图上还看到一个很明显的特点是随着探测距离的增大,回波强度有较明显的衰减。

图 4 为 7 月 22 日 09:20 在广东省阳江市观测的由台风外围云系形成的稳定层状云的各极化参数垂直分布,其中图 4a、4b 分别给出了衰减订正后的回波强度 Z_H 和差分反射率 Z_{DR} 。对比订正前后反射率因子的垂直分布(图 3 和图 4a)可以发现,订正前 X 波段双极化雷达回波强度存在较为严重的雨中衰减,订正后雷达回波强度整体上有了很明显的改善,说明数据使用前进行雨衰减订正很有必要。从图 4a 和 4b 可以看到, Z_H 和 Z_{DR} 均表现出非常明显的零度层亮带和下挂回波的层状云典型特征。从图 4a 中可以看到,订正后的反射率因子垂直分布在零度层亮带上显示出较明显的强回波核以及下挂回波结构,在零度层之上雷达回波强度出现分层结构,回波强度随高度是减小的。 ρ_{HV} 在零度层附近也出现一条很明显的带状回波,只是在该

带中的 ρ_{HV} 值减小到 0.90,而在其它区域 ρ_{HV} 值一般大于 0.98(图 4d)。对照图 4a 和 4b,在零度层亮带附近, Z_H 的值较大处 Z_{DR} 也有较大值,但 ρ_{HV} 却取较小值(图 4d),这与前面提到的在纯雨区理想介质中 ρ_{HV} 取值较大(接近于 1),而在粒子的混合区 ρ_{HV} 的值较小的看法是一致的。图 4c 给出了差分相移 Φ_{DP} 的垂直分布,由图可以看到,层状云中 Φ_{DP} 的垂直分层结构并不明显,但沿雷达射线方向距离的增加而增加,分层结构很明显,这与双偏振雷达探测 Φ_{DP} 的原理相吻合。由差分相移 Φ_{DP} 可计算得到相态识别算法使用的差分相移率 K_{DP} 。

利用上面介绍的模糊逻辑识别算法和表 2 中给出的各种降水粒子对应的极化参数的取值范围和环境温度取值范围,对该层状云的降水粒子类型进行识别,分类识别结果如图 5 所示。从图 5 中可以清楚地看到,该层状云中的降水粒子分区从上至下依次主要为冰晶(IC)、干雪(DS)、湿雪(WS)

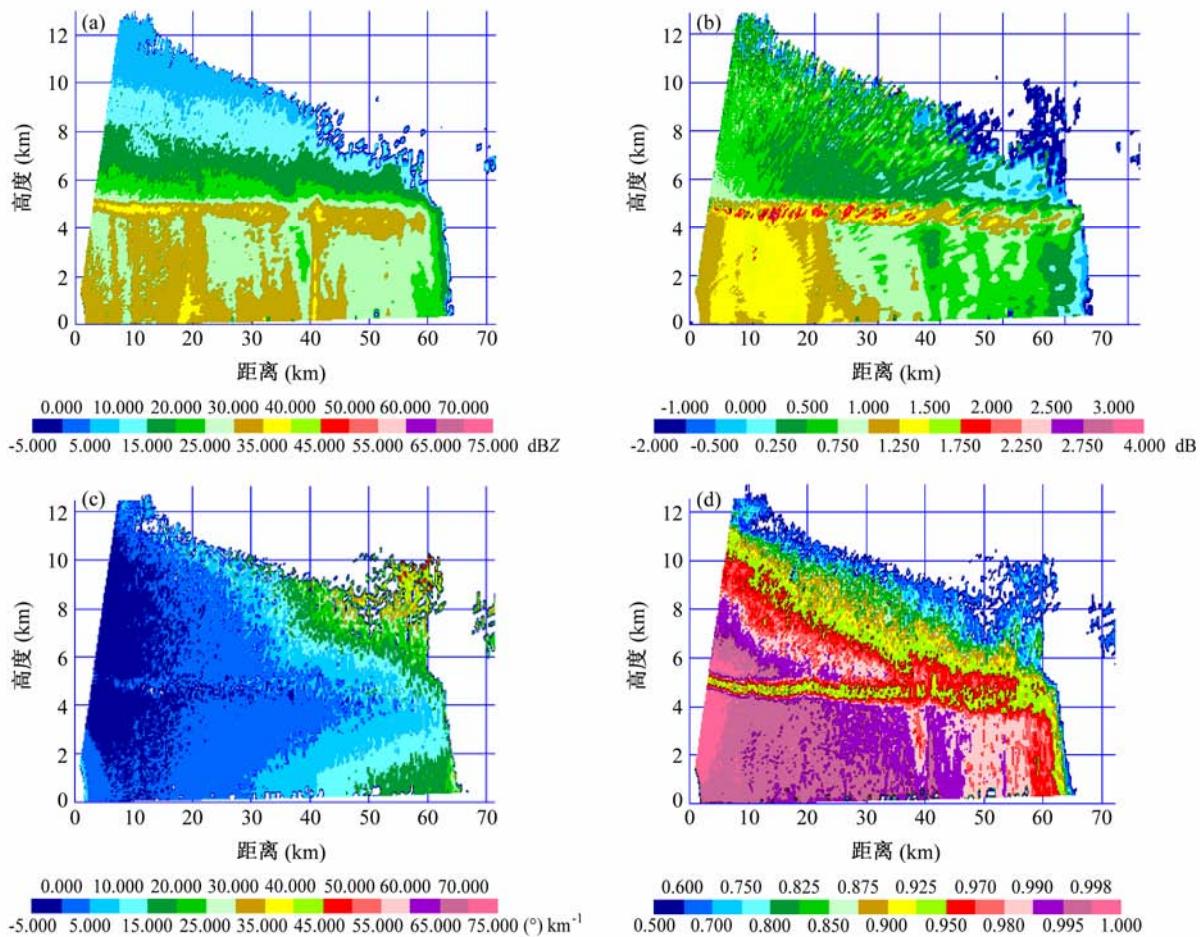


图 4 2010 年 7 月 22 日 09:20 X 波段雷达探测的层状云各极化变量的垂直分布(方位角: 300°): (a) 反射率因子 Z_H ; (b) 差分反射率 Z_{DR} ; (c) 差分相移 Φ_{DP} ; (d) 相关系数 ρ_{HV}

Fig. 4 Vertical distribution of radar variables of stratiform cloud observed at 0920 LST 22 Jul 2010 (azimuth: 300°): (a) Reflectivity Z_H ; (b) differential reflectivity Z_{DR} ; (c) differential propagation phase Φ_{DP} ; (d) correlation coefficient ρ_{HV}

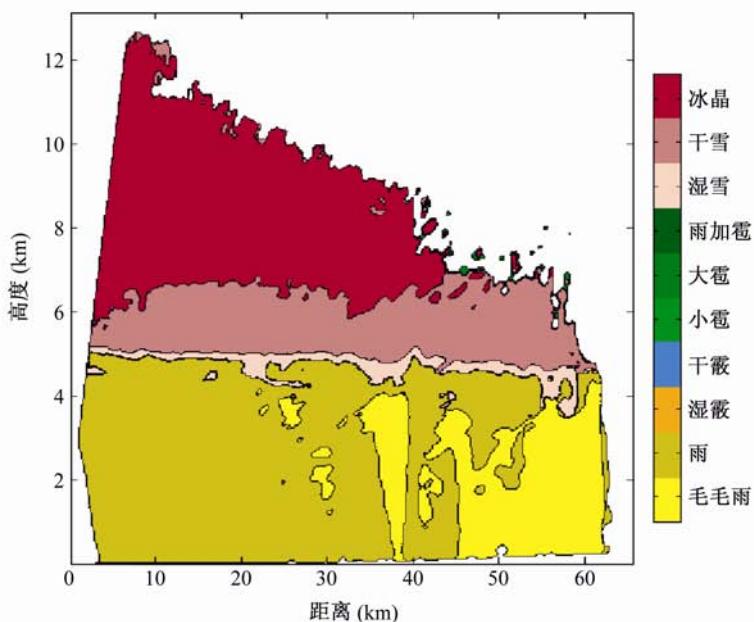


图 5 2010 年 7 月 22 日层状云降水粒子分类结果

Fig. 5 Hydrometeor classification results of stratiform cloud on 22 Jul 2010

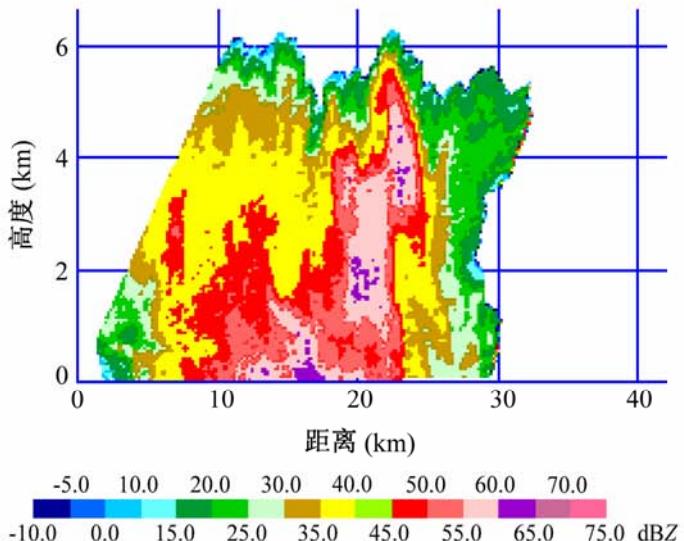


图 6 2009 年 4 月 23 日 16:58 冰雹云衰减订正后的 RHI 回波强度 (方位角: 180°)

Fig. 6 RHI radar reflectivity of hail cloud after attenuation correction at 1658 LST 23 Apr 2009 (azimuth:180°)

和雨水 (RN 和 DZ) 区, 其中, 冰晶层位于 6.5 km 以上的区域, 干雪层位于 5.0~6.5 km 之间, 并且, 湿雪层恰好位于零度层至其下方几百米范围内, 在零度层以下基本上为暖雨区, 说明零度层为冰相降水粒子融化向液态降水粒子的过渡区。高层的冰晶粒子在下落过程中聚并长大成为较大尺度的雪花, 雪花在下落到零度层之后发生融化成为湿雪, 湿雪进一步融化成为雨水。在雷达回波强度较强的区域出现尺度较大的雨滴 (RN), 而在比较弱的区域则为毛毛雨 (DZ)。这次观测到的层状云降水粒子垂

直分布结构与顾震潮在 20 世纪 60 年代提出的层状云降水形成的 3 层垂直分布模型基本一致(顾震潮, 1980), 表明本文所建立的识别算法和所给的识别参数范围可以较准确地识别出层状云中粒子的相态分布结构, 分类结果是可信的。

4.2 冰雹云水凝物粒子分类及结果分析

现利用所建立的模糊逻辑算法对冰雹云进行水凝物粒子分类识别, 并利用地面观测实况检验 X 波段双极化雷达探测和识别冰雹的有效性和准确性。对冰雹云正确的识别不仅能为冰雹云形成过程

的研究提供重要的基础数据,而且也可为人工影响天气的作业指挥、判断作业时机和作业效果评估提供重要的参考依据,在人工消雹减灾中具有十分显著的应用价值。

2009年4月23日16:30左右,在河北省张北地区IAP X波段雷达测站西南方出现了一块向东北方向移动的强对流云。图6给出了X波段雷达在16:58沿180°方位作RHI扫描的雷达回波强度垂直分布,该强度信息已进行了衰减订正处理。从图6中看到,强对流云正处于旺盛发展阶段,最大回波强度达60~65 dBZ,但云顶高度只有6 km。45 dBZ强回波区从地面一直伸展到5.7 km,占据了云体绝大部分厚度,其水平尺度到达20 km(位置范围从7 km到25 km)。

图7给出了对上述16:58观测的强对流云进行降水粒子分类识别结果。从图7中可以看出,距离雷达16 km处的近地面有大冰雹粒子(LH)出现,与图6中强回波的大值区相对应,在其附近(距离雷达12~23 km范围)回波强度稍微小一些的区域分布有小冰雹(SH)。在云中冰雹粒子从地面向上一直伸展到5 km高度,几乎接近云顶,冰雹粒子的垂直分布结构与图6中对应的强回波大值区位置非常一致。在云中从1 km至5 km高度层还存在大量的霰粒子(WG),在其下方从距离雷达3~12 km和23~28 km两个范围为雨水(RN)区。

根据安放在张北县城西边的张北县气象站的Parsivel降水粒子谱仪在17:01的观测记录显示,在17:01判定的天气现象为“密集的小雹(heavy small hail)”,最大粒径为12 mm。另外,根据张北县气象站气象观测人员的人工记录显示,在当天的16:57至17:05有降雹天气过程。张北县气象站正好位于IAP X波段雷达测站的180°方位,距离21 km处。因此,这些现场观测结果可以用来检验降水粒子识别的准确性,对比说明,对冰雹云降水粒子的识别结果与降水粒子谱仪的现场观测结果和气象站的人工记录都是非常一致的,由该识别算法得到的冰雹识别结果是可靠的。

2009年4月23日下午,在河北省张北地区有另一个强对流天气系统自IAP X波段雷达测站的正西向雷达站靠近,对流云发展旺盛,给张北县北部地区带来了2009年春季首次较强的降雹天气过程。

据雷达实时观测显示,2009年4月23日下午15:30左右有一强回波带自西北偏西向雷达观测站

移来,回波强度不断增强,最大回波强度达到55 dBZ,但云顶高度只有6 km。大约在16:32该强对流风暴系统在雷达测站出现了降雹现象,雷达观测人员对地面降雹状况进行实时照相,通过分析发现这次降雹过程的固态粒子主要为冰雹和霰粒,地面上冰雹和霰数密度达到8000~10000 m⁻²,呈现非规则形状,降雹的最大尺度达到了12 mm。图8为IAP X波段雷达在16:43:17沿210°方位观测的RHI回波强度分布,该图回波强度未经过雨中衰减订正。由图8可以清楚地看到,对流云系统存在多个强回波中心,最大强度高达55 dBZ,强回波从云的下部一直伸展到云的上部5 km高度,云顶部出现凹凸状,说明该对流云发展非常旺盛,但其云顶平均高度只有6 km左右,云中看不到零度层亮带。

图9给出了同一时刻雷达探测该强对流云的各个极化参数的垂直分布结构,其中图9a和9b的回波强度和差分反射率都分别利用3.2.3节所述的方法进行了衰减订正。从图9a可以看到,经过衰减订正后回波强度(即反射率因子Z_H)最大值达到65 dBZ,且45 dBZ的强回波区向上伸展更高,范围更大。由于冰雹粒子的空间取向和下落过程情况比较复杂,在下落过程中可能存在不同程度的翻滚和摇摆,差分反射率Z_{DR}的取值有较大差异,但一般认为有冰雹存在时Z_{DR}的取值趋于0。从图9b中看到,衰减订正后的Z_{DR}基本和此理论值相一致。K_{DP}的值由图9c中差分相移Φ_{DP}计算得到,从图9c中可以看到Φ_{DP}的变化较小。

图10为利用上面建立的模糊逻辑识别算法对该冰雹云观测个例进行水凝物粒子分类的结果。从图10中可以看到,在距离雷达观测站25 km和35 km处分别出现小雹和大雹粒子,对应于图9a中两个强回波大值区位置,且冰雹粒子一直从地面向上伸展到5.0 km高层,冰雹粒子的垂直伸展和分布情况与图9a中强回波大值区位置非常吻合。由图10还看到,在冰雹区附近Z_H值较小的区域有一层厚度仅为1 km的雨水(RN)区,在该层的上面分布有大范围湿霰粒子。根据雷达观测人员的现场观测记录显示,当这块强对流云经过雷达站时先有几分钟降小雨,接着是几分钟的降雹霰,然后又是短时间的降小雨。16:32至16:35在雷达站观测到地面降雹现象。这些观测记录与雷达观测到的回波水平结构分布相吻合,说明上述的识别算法结果与实况吻合得非常好。

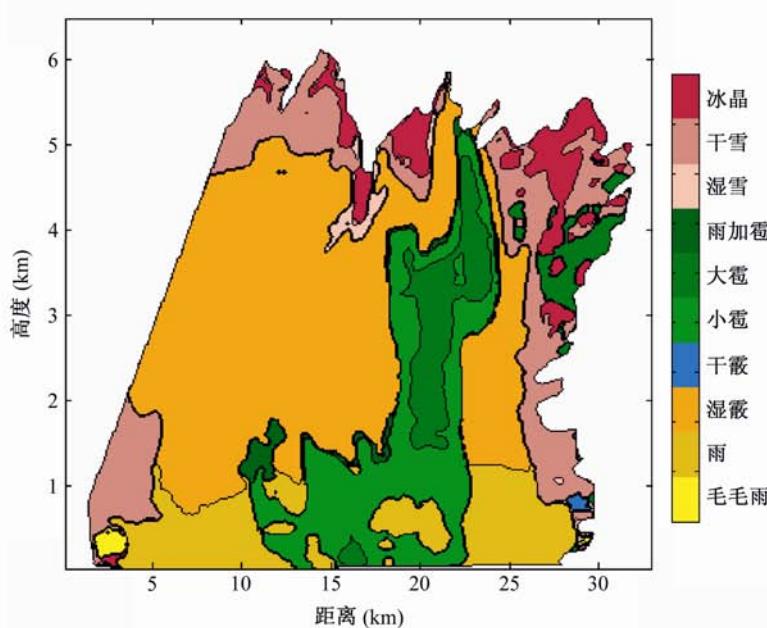


图 7 2009年4月23日冰雹云降水粒子分类结果(方位角: 180°)

Fig. 7 Hydrometeor classification results of hail cloud on 23 Apr 2009 (azimuth: 180°)

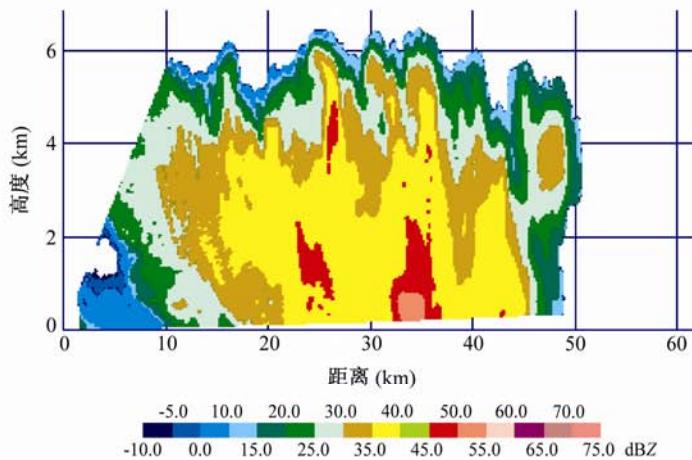


图 8 2009年4月23日16:43 冰雹云衰减订正前的 RHI 回波强度分布(方位角: 210°)

Fig. 8 RHI radar reflectivity of hail cloud before attenuation correction at 1643 LST 23 Apr 2009 (azimuth: 210°)

5 小结与讨论

本文在考虑 X 波段雷达本身的衰减等因素的基础上,结合国内外对降水粒子的相态识别情况,对 Keenan (2003) 使用 C 波段雷达的参数范围和温度限制范围进行适当的调整,确定了 10 种水凝物粒子(毛毛雨、雨、湿霰、干霰、小雹、大雹、雨加雹、湿雪、干雪、冰晶)的雷达双极化参数范围和温度适用范围,并建立了适用于 X 波段双极化雷达的降水粒子类型模糊逻辑识别算法,然后,利用 IAP 车载 X 波段双极化雷达分别在阳江和张北地

区探测到的层状云和冰雹云降水过程实例进行识别检验和分析,得到如下结论:

(1) 通过 IAP X 波段双极化雷达探测到的多个极化参数对降水粒子进行模糊逻辑分类识别,得到的地面降水粒子识别类型与实况吻合得很好,其垂直分布也能很好地反映层状云和冰雹降水粒子的不同相态结构特征,表明本文所给出的 10 种水凝物粒子雷达双极化参数和温度适用范围是合理的,所建立的降水粒子识别算法具有较强的适用性,识别结果是可信的。

(2) 利用所建立的降水粒子类型模糊逻辑识别算法反演得到的层状云降水粒子相态垂直分布结

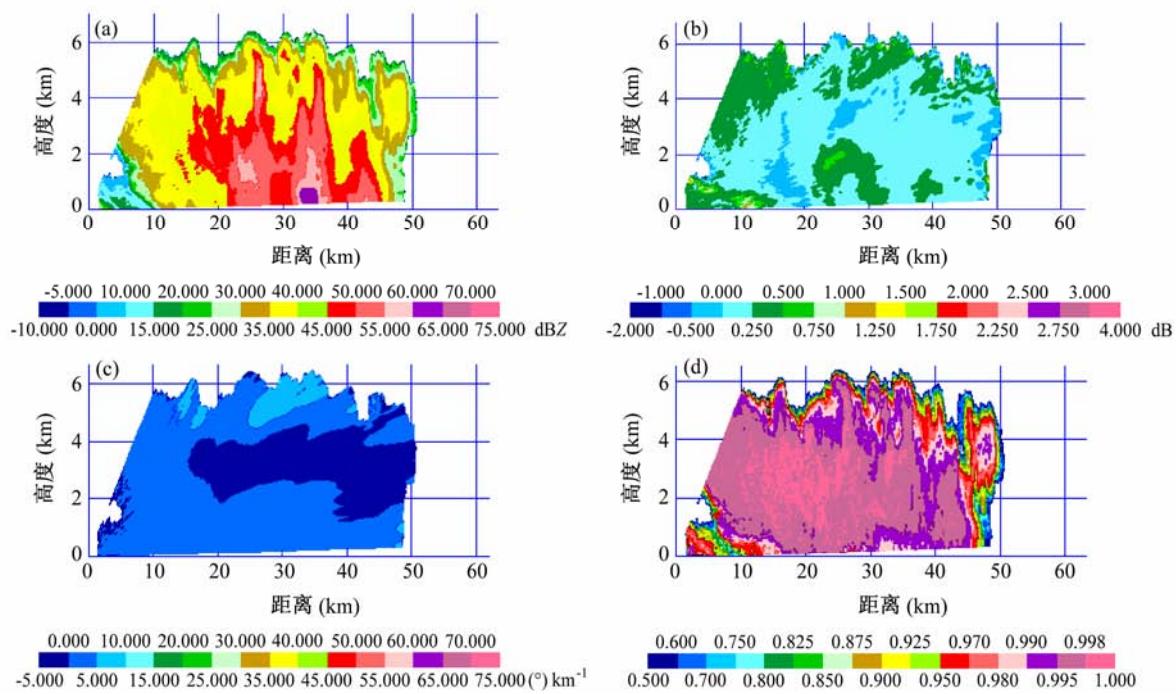


图 9 2009 年 4 月 23 日 16:43 X 波段雷达探测到冰雹云各极化变量的垂直结构分布 (方位角: 210°): (a) 反射率因子 Z_H ; (b) 差分反射率 Z_{DR} ; (c) 差分相移 Φ_{DP} ; (d) 相关系数 ρ_{HV}

Fig. 9 Vertical distribution of X-band radar observed variables of hail cloud at 1643 LST 23 Apr 2009 (azimuth: 210°): (a) Reflectivity Z_H ; (b) differential reflectivity Z_{DR} ; (c) differential propagation phase Φ_{DP} ; (d) correlation coefficient ρ_{HV}

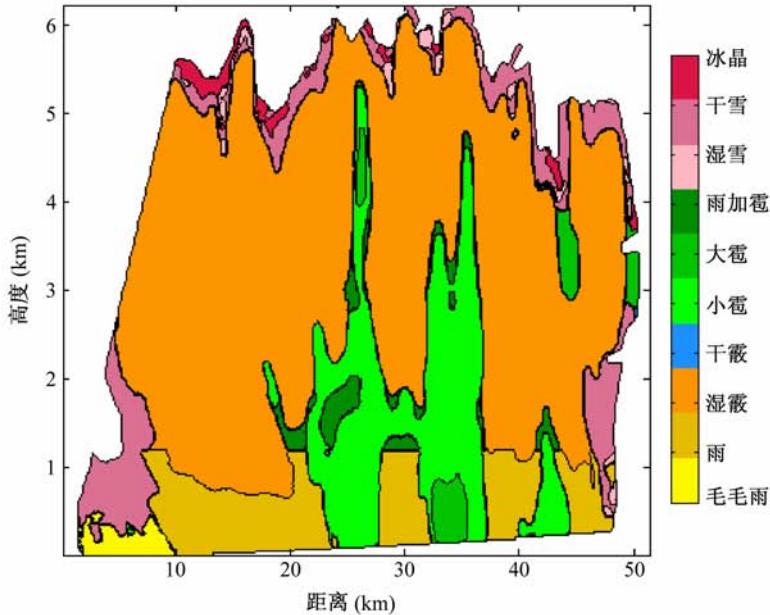


图 10 2009 年 4 月 23 日冰雹云降水粒子分类结果

Fig. 10 Hydrometeor classification results of hail cloud on 23 Apr 2009

构基本符合顾震潮 (1980) 在 20 世纪 60 年代初提出的层状云降水形成的 3 层模型, 说明利用该 X 波段双极化雷达观测数据和所建立的模糊逻辑识别算法可以为层状云降水机制研究和人工增雨试验的物理检验提供验证证据。

(3) 利用 IAP X 波段双极化雷达极化参数结合本文所建立的降水粒子模糊逻辑识别算法, 可以给出冰雹云降水粒子的垂直分布结构、冰雹粒子的类型和大小以及降落的具体位置。降水粒子的准确识别对云和降水物理研究以及人工影响天气作业和

效果评估都具有重要的应用价值。

需要说明的是，利用双偏振雷达参数进行云中粒子相态的识别是非常困难的工作，本文对层状云和冰雹云个例中降水粒子相态识别的研究结果也只是初步的。比如，在今后的工作中仍需结合更多的飞机入云观测资料验证模糊逻辑识别算法对降水粒子的分类结果，通过对比验证进一步完善识别算法的极化参数的范围选取；利用模糊逻辑识别算法对降水粒子进行分类，最终显示的仅仅是最大真值的结果所对应的那种降水粒子类型，而不能给出云中各种降水粒子所占的比例；根据冰雹云数值模拟的结果显示冰雹的胚胎主要是冻滴和霰，但由于目前缺少“冻滴”这一降水粒子所对应的极化参数取值范围数据，本文所采用模糊逻辑算法并没有考虑冻滴这种降水粒子。这些问题均需要在以后的降水粒子识别算法研究中加以改进和完善。

参考文献 (References)

- Aydin K, Seliga T A, Balaji V. 1986. Remote sensing of hail with a dual linear polarization radar [J]. *J. Climate Appl. Meteor.*, 25: 1475–1484.
- Bringi V N, Chandrasekar V. 2000. *Polarimetric Doppler Weather Radar: Principles and Applications* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 256–312.
- 曹俊武, 刘黎平, 葛润生. 2005. 模糊逻辑法在双线偏振雷达识别降水粒子相态的研究 [J]. *大气科学*, 29 (5): 827–836. Cao Junwu, Liu Liping, Ge Runsheng. 2005. A study of fuzzy logic method in classification of hydrometeors based on polarimetric radar measurement [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 29 (5): 827–836.
- 曹俊武, 刘黎平, 陈晓辉, 等. 2006. 3836C波段双线偏振多普勒雷达及其在一次降水过程中的应用研究 [J]. *应用气象学报*, 17 (2): 192–200.
- Cao Junwu, Liu Liping, Chen Xiaohui, et al. 2006. Data quality analysis of 3836 C-band dual-linear polarimetric weather radar and its observation of a rainfall process [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 17 (2): 192–200.
- 程周杰, 刘宪勋, 朱亚平. 2009. 双偏振雷达对一次水凝物相态演变过程的分析 [J]. *应用气象学报*, 20 (5): 594–601. Cheng Zhoujie, Liu Xianxun, Zhu Yaping. 2009. A process of hydrometeor phase change with dual-polarimetric radar [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 20 (5): 594–601.
- Cherry S M, Goddard J W F, Ouldridge M. 1984. Simultaneous measurements of rain by airborne distrometer and dual-polarization radar [J]. *Radio Sci.*, 19 (1): 169–176.
- Doviak R J, Zrnic D S. 1993. *Doppler Radar and Weather Observation* [M]. New York: Academic Press, 554pp.
- 顾震潮. 1980. 云雾降水物理基础 [M]. 北京: 科学出版社, 173–179. Gu Zhenchao. 1980. *Bases of Cloud and Mist Precipitation Physics (in Chinese)* [M]. Beijing: Science Press, 173–179.
- Hall M P M, Goddard J W F, Cherry S M. 1984. Identification of hydrometeors and other targets by dual-polarization radar [J]. *Radio Sci.*, 19 (1): 132–140.
- 何宇翔, 吕达仁, 肖辉, 等. 2009a. X波段双线极化雷达反射率的衰减订正 [J]. *大气科学*, 33 (5): 1027–1037. He Yuxiang, Lü Daren, Xiao Hui, et al. 2009a. Attenuation correction of reflectivity for X-band dual polarization radar [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 33 (5): 1027–1037.
- 何宇翔, 吕达仁, 肖辉, 等. 2009b. X波段双线极化雷达差分反射率的衰减订正 [J]. *高原气象*, 28 (3): 607–616. He Yuxiang, Lü Daren, Xiao Hui, et al. 2009b. Attenuation correction of radar differential reflectivity for X-band dual polarization radar [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 28 (3): 607–616.
- 何宇翔, 肖辉, 吕达仁. 2010. 利用极化雷达分析层状云中水凝物粒子性状分布 [J]. *大气科学*, 34 (1): 23–34. He Yuxiang, Xiao Hui, Lü Daren. 2010. Analysis of hydrometeor distribution characteristics in stratiform clouds using polarization radar [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 34 (1): 23–34.
- Holler H, Bringi V N, Hubbert J, et al. 1994. Life cycle and precipitation formation in a hybrid-type hailstorm revealed by polarization radar measurements [J]. *J. Atmos. Sci.*, 51: 2500–2522.
- Keenan T. 2003. Hydrometeor classification with a C-band polarimetric radar [J]. *Aust. Meteor. Mag.*, 52: 23–31.
- Liu H P, Chandrasekar V. 2000. Classification of hydrometeors based on polarimetric radar measurements: Development of fuzzy logic and neuro-fuzzy systems, and in situ verification [J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 17 (2): 140–164.
- 刘黎平, 钱永甫, 王致君. 1996. 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 [J]. *气象学报*, 54 (5): 590–598. Liu Liping, Qian Yongfu, Wang Zhijun. 1996. The study of special distribution of phase and size of hydrometeors in cloud by dual linear polarization radar [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 54 (5): 590–598.
- Ryzhkov AV, Giangrande SE, Melnikov V M, et al. 2005. Calibration issues of dual-polarization radar measurements [J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 22, 1138–1155.
- Seliga T A, Bringi V N. 1976. Potential use of radar differential reflectivity measurements at orthogonal polarization for measuring precipitation [J]. *J. Appl. Meteor.*, 15: 69–76.
- Straka M J, Zrnic D S. 1993. An algorithm to deduce hydrometeor types and contents from multi-parameter radar data [C]// 26th Conf. on Radar Meteor., 17: 513–515.
- Zeng Z, Yuter S E, Houze R A Jr, et al. 2001. Microphysics of the rapid development of heavy convective precipitation [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 129 (8): 1882–1904.
- 张培昌, 杜秉玉, 戴铁丕. 2001. 雷达气象学 [M]. 北京: 气象出版社, 511pp. Zhang Peichang, Du Bingyu, Dai Tiepi. 2001. *Radar Meteorology (in Chinese)* [M]. Beijing: China Meteorological Press, 511pp.