

文章编号: 2096-1618(2018)04-0383-08

基于 X 波段双线偏振雷达的冰雹云降水粒子识别研究

王晓艺^{1,2}, 苏德斌^{1,2}

(1. 成都信息工程大学电子工程学院, 四川 成都 610225; 2. 中国气象局大气探测重点开放实验室, 四川 成都 610225)

摘要:利用甘肃平凉 X 波段双线偏振雷达的一次冰雹云观测个例,对降水粒子模糊逻辑识别算法进行适用性验证。通过雷达性能评估和数据质量分析以保证降水粒子识别结果的可靠性;在此基础上,建立 11 种输出类型的隶属函数参数表,并根据不同粒子类型对 6 个输入参量的敏感程度以及数据质量构建权重参数表,以实现降水粒子模糊逻辑识别算法。利用建立的算法识别个例中降水粒子类型,并依据 4 个雷达原始偏振参量和探空数据作为识别结果的验证参考,结果表明建立的降水粒子模糊逻辑识别算法能较为合理地识别出冰雹云内部的粒子分布。

关键词:模糊逻辑;X 波段双线偏振雷达;降水粒子识别;冰雹云

中图分类号:TN959.4

文献标志码:A

doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2018.04.006

0 引言

双线偏振天气雷达被广泛应用于降水探测研究。其通过发射和接收水平、垂直偏振电磁波,可得到相较于传统多普勒天气雷达更多的云和降水特征参量,且这些参量对水凝物粒子的形状、大小、空间取向、相态和降落状态等属性较为敏感,通过对比分析这些偏振参量所含的信息可以有效识别水凝物粒子类型^[1-2]。

识别水凝物粒子的方法有多种,其中较为常见的是模糊逻辑法^[3-5]和布尔逻辑决策树法^[6]。相较于布尔逻辑决策树法,模糊逻辑法能根据简单的分类规则区分偏振参量范围有重叠区域的水凝物粒子,这些特点使模糊逻辑法在水凝物粒子识别方面有着较大的优势,并且这些优势也在过去的近 30 年得到直接或间接地验证^[3-5,7],Chandrasekar 等^[8]系统全面地介绍了相关研究成果,这些研究和验证主要针对 S 波段和 C 波段双线偏振雷达。随着 X 波段雷达的普及应用,上述水凝物粒子识别算法在 X 波段双线偏振雷达的适用性得到关注和发展。

Dolan 等^[7]指出对于 X 波段雷达而言,直径小于约 2 mm 的雨滴粒子才属于瑞利区,因此需要修改甚至重建水凝物粒子分类算法框架;Lim 等^[9]根据 X 波段雷达信噪比 SNR 对相关系数 ρ_{HV} 和差分传播相位纹理参量 $TX(\Phi_{DP})$ 间的影响,构建融化层模糊逻辑识别方法; Snyder 等^[10]对比 S、C 和 X 波段 T 矩阵散射模拟结果,指出由于非瑞利散射引起的米散射效应会影响

反射率因子 Z_H 和差分反射率 Z_{DR} ,以及在一定程度上影响相关系数 ρ_{HV} 。例如,对于“大雨滴”(一种主要由大尺寸雨滴构成的雨滴谱类型),在 X 波段下, Z_H 值比 S 波段下高 0 ~ 4 dBZ, Z_{DR} 值比 S 波段下高至少 0.3 dB, ρ_{HV} 值偏低;对于“雹”,相较于 S 波段, X 波段下 Z_H 值范围与“雨”的 Z_H 范围重叠区间较大, Z_{DR} 值 X 波段与 S 波段整体在 0 dB 附近,但 X 波段下 Z_{DR} 值会因雹的含水量增加而更易偏向负值。曹俊武等^[11-12]针对 S 波段偏振雷达展开对粒子识别相关研究;刘亚男等^[13] S、C 波段雷达的水凝物粒子参数范围,根据 K_{DP} 与波长之间的关系进行调整(对 C 波段雷达的 K_{DP} 乘以 5/3)得到 X 波段雷达的水凝物粒子 K_{DP} 参数范围;何宇翔等^[14]根据所用 X 波段雷达数据统计层状云中 15 种水凝物粒子类型的雷达参量范围,并利用模糊逻辑法识别层状云各层水凝物粒子类型,其识别结果与顾震潮 1980 年提出的层状云降水三层概念模型相验证。郭凤霞等^[15]在关于 X 波段雷达粒子识别研究的基础上利用 714XDP 偏振雷达对雷暴云中影响起电的 11 种主要水凝物粒子类型进行识别研究,指出 K_{DP} 可以作为有效判断云内电荷区分布的偏振参量。

虽然已有较多降水粒子识别相关文献,并且利用模糊逻辑法建立粒子识别算法也在其他文献中有较为详细地介绍,但较少文献考虑到偏振雷达回波信号信噪比 SNR 对降水粒子模糊逻辑识别算法中的输入变量的影响。由于外部或内部原因降低,雷达回波信号信噪比降低并达到某一阈值时,输入变量精度开始下降,在这种情况下降水粒子模糊逻辑识别结果的可靠

性将会降低,不同雷达的 SNR 阈值存在差异。因此需根据雷达性能进行相关质量控制。

使用甘肃平凉一部可移动式 X 波段双线偏振多普勒天气雷达(714XDP)观测资料,将 6 个雷达观测变量作为输入变量建立 11 种输出类型的降水粒子模糊逻辑识别算法,并根据 Snyder 等^[10]关于 X 波段偏振雷达的不同降水粒子类型散射模拟研究结果,得到降水粒子模糊逻辑识别算法的输入变量范围。利用一次冰雹云降水个例进行降水粒子识别,最后结合探空资料对识别结果进行分析讨论,以检验算法的合理性与适用性。

1 模糊逻辑识别算法

1.1 输入参量与输出类型

所用降水粒子识别算法主要基于 Park 等^[16]美国 S 波段 WSR-88D 偏振雷达模糊逻辑识别算法版本,算法的输入变量、输出类型与该版本相同。6 个输入变量分别为 4 个雷达观测变量(反射率因子 Z_H 、差分反射率 Z_{DR} 、相关系数 ρ_{HV} 和 LK_{DP})和 2 个纹理参量($TX(Z_H)$ 和 $TX(\Phi_{DP})$)。其中, LK_{DP} 是将 K_{DP} 转换为对数形式(在散射模拟实验中发现 LK_{DP} 与 Z_H 的线性关系比 K_{DP} 更明显,因此在建立 LK_{DP} - Z_H 的二维隶属函数更为容易),其公式为

$$\begin{cases} LK_{DP} = 10\lg(K_{DP}), K_{DP} > 10^{-3}/\text{km} \\ LK_{DP} = -30, K_{DP} \leq 10^{-3}/\text{km} \end{cases} \quad (1)$$

两个纹理参量 $TX(Z_H)$ 和 $TX(\Phi_{DP})$,分别表示 Z_H 和 Φ_{DP} 沿径向一定距离内的波动程度,在识别非气象回波方面有重要作用,其估计公式为式(2)、(3)。式中,平均值 $\text{ave}(Z_H)$ 和 $\text{ave}(\Phi_{DP})$ 分别由 600 m 和 1.2 km 的滑动窗口得到, N 表示滑动平均所用距离库个数(文中所用数据距离库库长为 150 m), N_{Z_H} 和 $N_{\Phi_{DP}}$ 分别采用径向连续 4 个距离库和 8 个距离库。

$$TX(Z_H) = \sqrt{\frac{\sum_{bin=0}^{N_{Z_H}-1} [Z_H - \text{ave}(Z_H)]^2}{N_{Z_H}}} \quad (2)$$

$$TX(\Phi_{DP}) = \sqrt{\frac{\sum_{bin=0}^{N_{\Phi_{DP}}-1} [\Phi_{DP} - \text{ave}(\Phi_{DP})]^2}{N_{\Phi_{DP}}}} \quad (3)$$

表 1 列出了识别算法 11 种输出类型,其中“大雨滴”是指在对流上升气流或风切变的筛选作用下而产生的一种特殊的雨滴谱类型;主要由直径为 4 ~ 7 mm 的较大雨滴构成,数密度在 0.001 ~ 1 m⁻³;输出的“地物杂波/异常传播”(GC/AP)和“生物回波”(BS)虽然

不属于降水粒子类型,但识别并去除该类非气象回波后能为之后的降水估测工作提供有效帮助。

表 1 输出类型

序号	输出类型	标识符
1	地物杂波/异常传播	CG/AP
2	生物回波	BS
3	大雨滴	BD
4	小到中雨	RA
5	大雨	HR
6	雨雹混合	RH
7	冰雹	HL
8	干雪	DS
9	湿雪	WS
10	冰晶	CR
11	霰	GR

1.2 模糊逻辑算法流程

模糊逻辑识别算法大体可分为模糊化、规则推断、集成和退模糊化 4 个步骤。模糊化是将雷达观测变量作为输入变量并以隶属函数的形式转化模糊基,每种降水粒子类型对应各输入参量都设计有一套模糊基,每套模糊基用隶属函数 MBF_{ij} 表述,其中 i 表示输入变量, j 表示输出类型。隶属函数有多种形式,常用的隶属函数有梯形函数和 β 函数,由于梯形函数具有不规则性,相较于 β 型函数能建立非对称型隶属函数,能够较为灵活且完整地包络不同降水粒子类型的不同输入参量的特征^[16],因此采用梯形函数作为隶属函数的形式。梯形隶属函数形状可以用 4 个边界参量 X_1, X_2, X_3 和 X_4 描述,其函数形式如图 1 所示,图中, X 为输入参量, $F(x)$ 为梯形隶属函数函数值,为 0 ~ 1。

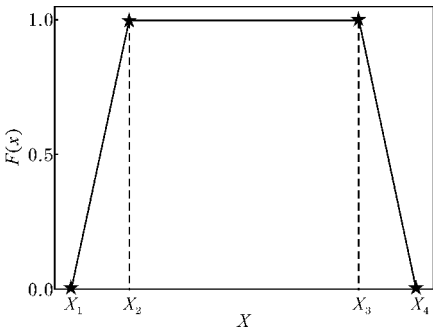


图 1 梯形隶属函数形式

当隶属函数的边界参量 X_1, X_2, X_3 和 X_4 均为常量时,该隶属函数为一维隶属函数;当隶属函数由两个及两个以上输入变量描述时,这种隶属函数属于二维或多维(根据隶属函数的输入变量个数决定其维度)。

文中输出类型的雷达观测参量范围采用 Snyder 等^[10] X 波段偏振雷达散射模拟实验结果,表 3 给出表 2 中 11 种输出类型隶属函数的边界参数。其中,标识符为 BD,RA,HR,RH 以及 GR 的降水粒子类型,其 Z_{DR} 和 LK_{DP} 隶属函数为二维隶属函数;边界参量 $X1,X2,X3,X4$ 的取值分别由 5 个以 Z_H 自变量的函数参量,即 $A1,A2,A3$ 和 $B1,B2$ 决定,这些参量的公式根据 Z_H 与 Z_{DR},Z_H 与 LK_{DP} 之间的统计关系模拟得到:

$$A1 = -3.9 \times 10^{-1} + 4.2 \times 10^{-2} \times Z_H - 1.7 \times 10^{-3} \times Z_H^2 + 3.2 \times 10^{-5} \times Z_H^3$$
$$A = 4.9 \times 10^{-1} - 9.6 \times 10^{-2} \times Z_H + 5.9 \times 10^{-3} \times Z_H^2 - 4.1 \times 10^{-5} \times Z_H^3$$
$$A3 = 1.43 + 6.67 \times 10^{-2} \times Z_H + 4.85 \times 10^{-4} \times Z_H^2$$
$$B1 = 0.7 \times Z_H - 42$$
$$B2 = 0.7 \times Z_H - 28$$

表 2 11 种输出类型隶属函数参数配置

输入参量	标识符	GC	BS	BD	RA	HR	HL	RH	DS	WS	CR	GR
Z_H	X1	15	5	24	5	42	45	40	5	15	5	25
	X2	20	10	29	10	45	50	45	10	25	10	35
	X3	70	20	49	45	57	60	65	35	35	25	50
	X4	80	39	54	50	62	65	70	40	45	30	55
Z_{DR}	X1	-4.0	0.0	A2 - 0.3	A1 - 0.3	A1 - 0.3	-1.5	-0.3	-0.3	0.5	0.1	-0.3
	X2	-2.0	2.0	A2	A1	A1	-1.0	0	0.0	1.0	0.4	0
	X3	1.0	10.0	A3	A2	A2	0.5	A1	0.3	2.0	3.0	A1
	X4	2.0	12.0	A3 + 1	A2 + 0.5	A2 + 0.5	0.7	A1 + 0.5	0.6	3.0	3.3	A1+0.3
$TX(Z_H)$	X1	2.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	X2	6.0	2.0	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
	X3	15.0	4.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
	X4	20.0	7.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0
$TX(\Phi_{DP})$	X1	20.0	8.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	X2	30.0	10.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	X3	50.0	40.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0
	X4	60.0	60.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0
ρ_{HV}	X1	0.50	0.30	0.92	0.95	0.92	0.8	0.80	0.95	0.88	0.95	0.90
	X2	0.60	0.50	0.93	0.96	0.94	0.9	0.85	0.98	0.92	0.98	0.97
	X3	0.90	0.80	1.00	1.00	1.00	0.95	0.95	1.00	0.95	1.00	1.00
	X4	0.95	0.83	1.01	1.01	1.01	1.00	1.01	1.00	0.98	1.01	1.01
LK_{DP}	X1	-30.0	-30.0	B1 - 1	B1 - 1	B1 - 1	-30.0	-10	-30.0	-30.0	-30.0	-30.0
	X2	-25.0	-25.0	B1	B1	B1	0.0	-4	-25.0	-25.0	-25.0	-25.0
	X3	10.0	10.0	B2 - 3	B2	B2	2.0	B1	10.0	10.0	10.0	10.0
	X4	20.0	11.0	B2 - 1	B2+1	B2+1	3.0	B1+1	20.0	20.0	20.0	20.0

规则推断是将输入变量根据输出类型对应的一套模糊基,通过一定关系综合转换为一个数值,该数值代表着相应输出类型的规则强度 RS_j ,选用 Lim 等^[17]提出的一种混合综合方式,同时为了方便下一环节的计算,将 RS_j 标准化为 0 ~ 1 的数值,其表达式为

$$RS_j = \frac{W_{j-Z_H} PS_{j-Z_H} \times \sum_{k \neq Z_H} (W_{j-k} PS_{j-k})}{\sum_{k \neq Z_H} W_{j-k}}$$

其中 RS_j 表示第 j 类水凝物粒子类型的规则强度; $PS_{j,k}$ 表示第 k 个输入参量对第 j 类水凝物的贡献强度,该值由模糊基中对应的隶属函数值得到;系数 $W_{j,k}$ 为第 k

个参数对第 j 类水凝物的权重系数, W_{j-Z_H} 为第 j 类水凝物对输入参量 Z_H 的权重系数。权重的配置根据 X 波段偏振雷达 714XDP 的数据质量以及输入变量对判断降水粒子类型的重要性来配置,例如, LK_{DP} 是识别液态降水粒子的重要变量,因此对大雨滴(BD)、小到中雨(RA)、大雨(HR)的输出类型给予权重 $W=1.0$;在识别冰水混合状态的降水粒子时, LK_{DP} 的重要性降低但仍有一定识别作用,因此对于雨雹混合(RH)和湿雪(WS)类型给予权重 $W=0.5$;对于冰相粒子类型冰晶(CR)和冰雹(HL),这些粒子对 LK_{DP} 较为敏感,因此对冰晶类型给予权重 $W=0.5$,冰雹类型分配权重

$W=0.2$;其余输出类型对 LK_{DP} 并不敏感,因此权重分配为0。输入参量 ρ_{HV} 由于在识别各种输出类型时重叠区间较多,因此给予相对较低的权重系数,而由于 Z_H 识别粒子的能力最强,因此权重分配 W 均为1.0。各输入参量对应 11 种输出类型的具体权重配置参见表 3。

表3 权重配置

输入参量	输出类型										
	GC	BS	BD	RA	HR	HL	RH	DS	WS	CR	GR
Z_H	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Z_{DR}	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6	0.5	0.8	0.8	0.6	1.0
$TX(Z_H)$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.2	0.2	0.2	0.2
$TX(\Phi_{DP})$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.2	0.2	0.2	0.2
ρ_{HV}	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5
LK_{DP}	0.0	0.0	1.0	1.0	1.0	0.2	0.5	0.0	0.5	0.5	0.0

2 数据与质量分析

2.1 观测仪器及数据来源

所用数据来自一部可移动式 X 波段双线偏振多普勒天气雷达(714XDP),该雷达位于在甘肃平凉陆面过程与灾害天气试验站(35.57 °N,106.69 °E,海拔 1614 m),该雷达由中国科学院寒区旱区环境与工程研究所与国营第 784 厂雷达研究所合作研制,最大探测范围150 km,探测偏振参量有 Z_H 、 Z_{DR} 、 K_{DP} 、 Φ_{DP} 和 ρ_{HV} ;数据扫描方式有 PPI 扫描、RHI 扫描以及体扫。714XDP 雷达采用高相位稳定全相参脉冲多普勒和双通道偏振体制,通过同时发射和接收水平和垂直极化波获取偏振变量,其主要性能指标见表 4。

2.2 数据质量分析

双线偏振雷达数据质量好坏通常会影响算法识别结果的准确性,而雷达偏振参量数据精度与雷达回波信号的信噪比密切相关,因此在对数据进行处理前,首先分析回波信号信噪比对粒子识别算法几个重要输入变量的影响。

714XDP 双线偏振雷达未存储回波信号的信噪比 SNR 参量,但根据雷达性能参数、反射率因子 Z_H 以及距离 R ,仍能得到信噪比估计值^[18]。当假定雷达噪声功率与雷达最小探测功率 P_{min} 一样时,

$$SNR = P_r - P_{min}$$

式中,对于该 X 波段偏振雷达,最小探测功率 P_{min} 为-106 dBm;在不考虑衰减情况下,雷达接收回波功率 P_r 为

$$P_r = Z - 20\lg(R) - C$$

经过规则推断后,各类降水粒子类型对应的规则强度 RS_j 在“集成”阶段选用某种方法判断得到唯一的结果,这里采用的集成方法为最大集成法,即将最大的规则强度设为最终结果。最后查找出最大规则强度对应的降水粒子类型索引,此为“退模糊化”。

表4 714XDP 主要性能指标

序号	项目	参数
1	天线直径	2.4 m
2	双线程交叉偏振比积分	≤-28 dB
3	旁瓣电平	≤-25 dB
4	波束宽度	0.98°(H),0.98°(V)
5	交叉极化隔离度	≤32 dB
6	增益	45.4 dB
7	采样方式	PPI,RHI,VCP
8	极化方式	双线极化
9	波长	3.2 cm
10	频率	9370±20 MHz
11	峰值功率	81 kW
12	杂波抑制	≥50 dB
13	脉冲宽度	1 μs,2 μs
14	脉冲重复频率	500~2000 Hz(1 μs),500~1000 Hz(2 μs)
15	仰角/方位角分辨率	0.3°/1°
16	探测范围	300 km(2 μs),150 km(1 μs)
17	最小可测功率	-106 dBm(1 μs),-111 dBm(2 μs)
18	线性动态范围	≥95 dB
19	库数	1000
20	库长	150 m
21	测量参数	$Z_H, Z_{DR}, \Phi_{DP}, K_{DP}, \rho_{HV}, V, W$

其中, $C=10\lg[(2.69\times\lambda^2)/(P_t\tau\theta\varphi)]-2G+160+L$
 λ 为雷达波长,值取3.2 cm; P_t 为雷达发射机功率,值为81 kW; τ 为发射脉宽,值取1 μs; θ,φ 分别为水平和垂直波束宽度,值均为0.98°; G 为天线增益,值为45 dB; L 为系统损耗,值取10 dB。

图 2 给出了雷达回波信号的信噪比 SNR 与 Z_{DR} 、

ρ_{HV} 和 $TX(\Phi_{DP})$ 散点图。从图2可以发现雷达回波信号较强时, ρ_{HV} 稳定在1.0附近, Z_{DR} 稳定在气象回波正常范围内($-5 \sim 5$ dB), $TX(\Phi_{DP})$ 值也稳定在15以内。在 SNR 低于约20 dB时, 输入变量数值分布不再集中在某一较小范围内, 其值分布随机性增大且随 SNR 降低这种随机性越明显。综上得出, 使714XDP雷达偏振数据误差增大的回波信噪比 SNR 阈值在20 dB左右, 这一结果与赵果等^[18]对714XDP雷达的性能评估结果相一致。因此在利用模糊逻辑法识别降水粒子之前, 需将低于该阈值的数据剔除, 以确保分类结果的准确性。

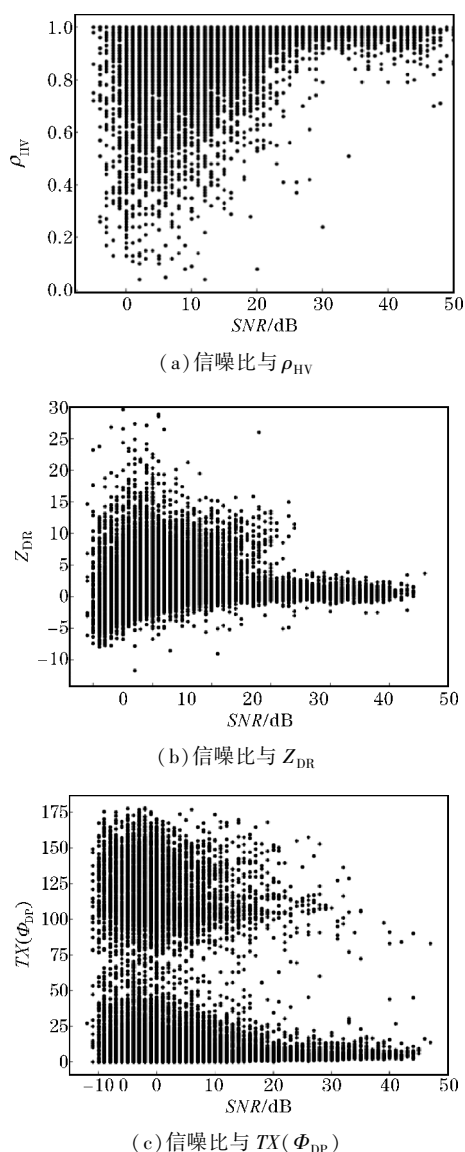


图2 714XDP 偏振雷达回波信号信噪比与 ρ_{HV} 、 Z_{DR} 和 $TX(\Phi_{DP})$ 散点关系图

3 个例分析

冰雹云降水过程, 根据雷达资料显示, 这次过程自雷达观测站西北方向, 经过雷达站后向东南方向移动并逐渐减弱, 最终消散。14:25BJT, 该冰雹云产生了较强的降水并伴有少量冰雹。图3给出了 0.9° 仰角的PPI图, 图中以雷达中心为坐标原点, X 轴、 Y 轴表示表示回波距雷达中心的距离, 正负号表示回波位于雷达东西侧或南北侧(注:以正 Y 轴为正北方向)。所用资料已经过预处理和衰减订正。

图3中共有两处强回波中心, 选取其中一处强回波中心, 位于 $(X, Y) = (1.5 \text{ km}, 47.0 \text{ km})$, 并自雷达中心 $(X, Y) = (0, 0)$ 沿该处强回波中心方向(即方位角 2.1°)给出了以距离-高度为坐标系的冰雹云垂直结构信息(图4), 以此作为分析重点。

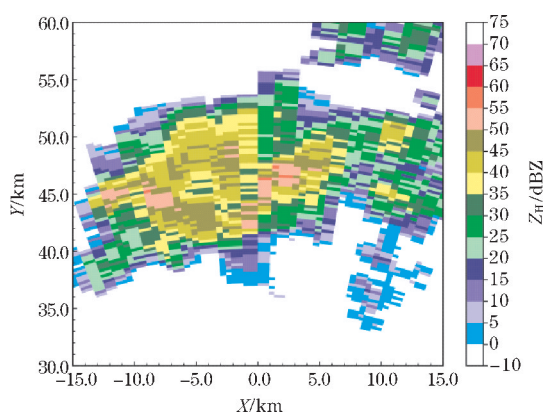


图3 0.9° 仰角反射率因子 Z_H

在进行分析前, 先简要介绍各降水粒子在各雷达偏振参量的表现特征^[10-13]:

(1) 对于纯雨区(融化层以下区域): Z_H 与雨滴尺寸大小有关, 并且雨强越大, 其值也越大, $Z_{DR} \geq 0$, 对于X波段, K_{DP} 值在 $0 \sim 3^\circ/\text{km}$, $\rho_{HV} > 0.95$;

(2) 冰雹区, Z_H 通常 $> 50 \text{ dBZ}$, Z_{DR} 的情况较为复杂, 大体趋于 0 dBZ ; K_{DP} 对冰相粒子不敏感, ρ_{HV} 在 $0.90 \sim 0.95$;

(3) 对于霰, 结构松软其 Z_H 值在 $20 \sim 40 \text{ dBZ}$, Z_{DR} 绝对值偏小, 而结构紧密其 Z_H 值可达 50 dBZ 以上, Z_{DR} 绝对值偏大; ρ_{HV} 在 0.96 以上;

(4) 冰水混合区域, Z_H 值增大, Z_{DR} 偏向于正值, ρ_{HV} 减小, 低于 0.9 , 甚至低于 0.5 ;

(5) 对于冰晶和雪花, 其 Z_H 一般低于雨区反射率, Z_{DR} 一般 $< 0.5 \text{ dB}$, 但对高密度, 且水平尺度较大的冰晶, 其 Z_{DR} 值可能较大。

从图4(a)可看出, 该冰雹云强回波区($> 50 \text{ dBZ}$) (图4a方框区域)主要集中在距雷达中心 $41 \sim 49 \text{ km}$ 处, 发展较高, 自地面至高空 10 km 处, 说明该处对流较旺盛。

分析图 4 可以发现,在水平距离 40 ~ 46 km,高度地面到 4 km 的区域, Z_H 为 35 ~ 50 dBZ, Z_{DR} 值大部分都大于 1 dB, ρ_{HV} 基本在 0.95 以上,同时 K_{DP} 基本大于 $0.6^\circ/\text{km}$,表明这些地方的降水粒子扁平且呈液态,综合可以得出该区域可能的降水粒子类型为纯液态降水。在水平距离 40 ~ 50 km,高度 4 ~ 6 km 区域,相关系数 ρ_{HV} 明显较低,在对应区域内, Z_H 有一定程度增大,同时 $0 < K_{DP} < 1^\circ/\text{km}$ 表明存在一定数量的液态粒子,说明该区域为冰水混合区域;而在高空 6 ~ 10 km

高度仍有 Z_H 值大于 45 dBZ 的区域指示出该区域有固态降水粒子特性,而与之对应的 Z_{DR} 值却在 0 ~ 3 dB,同时相关系数 ρ_{HV} 也较大,表明可能存在密度不同的霰或雹粒子;在该区域外围 Z_H 低于 20 dBZ 的地方, Z_{DR} 值一些集中在 0 dB 附近,一些则呈现较大的正值,这可能分别为雪花或不同水平尺度的冰晶。

根据 4 个偏振参数的识别推理和图 5 探空温度廓线图来检验模糊逻辑识别算法识别结果的合理性。

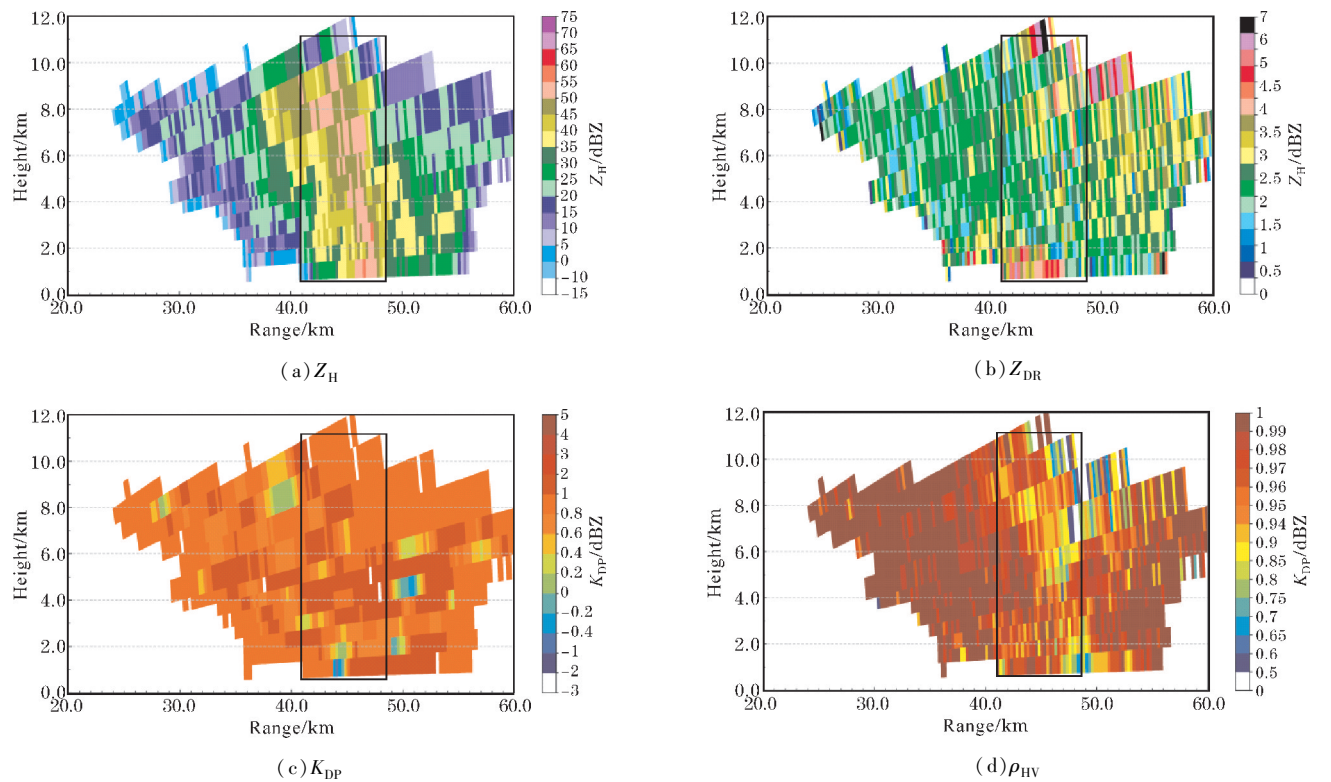


图 4 体扫数据沿方位角 2.1°剖面图

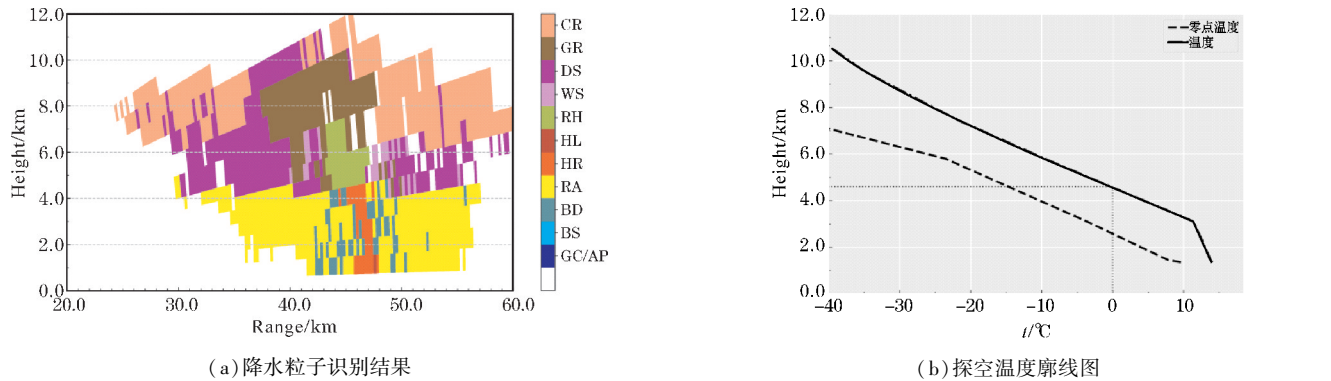


图 5 降水粒子识别结果剖面图及探空温度廓线图

图 5(a)降水粒子识别结果显示,在倒钩形的强回波区中上部为雨夹雹、少量湿雪和大范围霰粒子,在其外围至云体上缘依次分布着干雪和冰晶。云体中下部强回波区为雨强较大的雨和并出现大雨滴这种在强烈上升气流的筛选作用下而产生的特殊雨滴谱类型,同

时底部还有一处冰雹的识别。图 5(b)为当天 08 时的探空资料,探空温度显示 0°C 层在约 4.6 km 高度(平均海拔高度), -10°C 层约在 5.9 km, -20°C 层大约位于 7.3 km 处。据郭凤霞等^[15]研究,在云体内,在 -20°C 层以上的云体外围主要为冰晶和雪花构成,云体内部

为冰晶、雪花、霰和雹等冰相粒子类型共存;0℃层以下主要为液态降水粒子类型,在0℃层附近几百米范围则为冰水混合区域。对照温度廓线图,并参照前面的分析结果,算法识别结果都能与之相对应。在图5(a)中,探空资料-20℃层对应的高度附近,识别结果主要为冰晶,干雪和霰粒子;识别结果为冰水混合区(雨夹雹、湿雪),高度在4.1 km~6.5 km,参照探空温度廓线,该区域对应温度在-10℃~0℃;而在高度4 km以下,几乎全部识别为雨滴,这一高度同0℃层高度相吻合;总体而言,算法识别结果与探空资料和4个偏振参量识别推理结果相一致。

4 结论与讨论

利用X波段双线偏振多普勒天气雷达714XDP探测得到的4个偏振参量和2个偏振纹理参量,在考虑到X波段与S波段偏振雷达的偏振参量对不同降水粒子类型的散射结果差异,以及X波段衰减现象的情况下,对Park等^[5]针对S波段雷达的偏振参数范围进行调整,并在此基础上确立了11种输出类型(其中包括地物杂波/异常传播和生物回波两种非气象回波),建立了适用于X波段双线偏振雷达的降水粒子模糊逻辑识别算法。此外,在质量控制方面,还考虑到雷达回波信号的信噪比对算法识别结果的影响,对一些低信噪比的地方予以剔除。最后利用平凉一次冰雹云降水过程个例对建立的算法进行适用性检验与分析,得到如下结论:

(1)对照不同降水粒子对各雷达偏振参量已知的特征经验和探空温度资料,模糊逻辑识别算法的识别结果都能与之相吻合,在垂直分布上给出的9种降水粒子类型能够较好地反应冰雹云云体内部结构,表明确立的11种输出类型较为合理,所建立得降水粒子模糊逻辑识别算法的适用性较强;

(2)冰雹和霰粒子的准确识别在防雹作业具有重要的应用价值,利用建立的X波段偏振雷达模糊逻辑降水粒子识别算法,结合X波段偏振雷达714XDP的偏振参量可以探测冰雹云内部垂直结构,冰雹粒子以及与冰雹产生密切相关的霰粒子的位置;

(3)通过分析雷达回波信号的信噪比SNR与模糊逻辑识别算法输入变量间的关系,发现文中所用的714XDP偏振雷达的数据精度下降阈值在20 dB左右,为了保证识别结果的准确性需要将低于该阈值的数据进行剔除。

由于冰雹云在产生、发展与成熟过程中降水粒子的分布与变化十分复杂,因此当进一步研究其云体内

部的微物理特征时,需要在确立降水粒子输出类型时进行更为细致地划分,同时还需要增加其他辅助变量以提高降水粒子模糊逻辑识别算法的精确性。

致谢:感谢成都信息工程大学科研资助项目(KYTZ201529)对本文的资助

参考文献:

- [1] Aydin K, T A Seliga, V Balaji. Remote Sensing of Hail with a Dual Linear Polarization Radar [J]. Journal of Climate and Applied Meteorology, 1986, 25(10): 1475-1484.
- [2] Straka J M, Zrni D S, Ryzhkov A V. Bulk Hydrometeor Classification and Quantification Using Polarimetric Radar Data: Synthesis of Relations [J]. Journal of Applied Meteorology, 2000, 39(8): 1341-1372.
- [3] Vivekanandan J, Ellis S M, Oye R, et al. Cloud Microphysics Retrieval Using S-band Dual-Polarization Radar Measurements [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1999, 80(3): 381-388.
- [4] Liu H, Chandrasekar V. Classification of Hydrometeors Based on Polarimetric Radar Measurements: Development of Fuzzy Logic and Neuro-Fuzzy Systems, and In Situ Verification [J]. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology, 2000, 17(2): 140.
- [5] Park H, Ryzhkov A V, Zrni D S, et al. The Hydrometeor Classification Algorithm for the Polarimetric WSR-88D: Description and Application to an MCS [J]. Weather & Forecasting, 2009, 24(3): 730-748.
- [6] Höller H, Hagen M, Meischner P F, et al. Life Cycle and Precipitation Formation in a Hybrid-Type Hailstorm Revealed by Polarimetric and Doppler Radar Measurements [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1994, 51: 2500-2522.
- [7] Dolan B, Rutledge S A. A theory-based hydrometeor identification algorithm for X-band polarimetric radars [J]. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology, 2008, 26(10): 2071-2088.
- [8] Chandrasekar V, R Keränen, S Lim, et al. Moisseev. Recent Advances in Classification of Observations from Dual Polarization Weather Radars [J]. Atmospheric Research, 2013, 20(119): 97-111.
- [9] Lim S, Cifelli R, Chandrasekar V, et al. Precipitation Classification and Quantification Using X-Band

- Dual-Polarization Weather Radar: Application in the Hydrometeorology Testbed [J]. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology, 2013, 30 (9): 2108–2120.
- [10] Snyder, Jeffrey C, Howard B, et al. Attenuation Correction and Hydrometeor Classification of High-Resolution, X-Band, Dual-Polarized Mobile Radar Measurements in Severe Convective Storms [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2010, 12 (27): 1979–2001.
- [11] 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, 29 (5): 827–836.
- [12] 曹俊武, 刘黎平. 双线偏振雷达判别降水粒子类型技术及其检验[J]. 高原气象, 2007, 26 (1): 116–127.
- [13] 刘亚男, 肖辉, 姚振东, 等. 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, 2012, 17 (6): 925–936.
- [14] 何宇翔, 肖辉, 吕达仁. 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, 2010, 34 (1): 23–34.
- [15] 郭凤霞, 马学谦, 王涛, 等. 基于X波段双线偏振天气雷达的雷暴云粒子识别[J]. 气象学报, 2014 (6): 1231–1244.
- [16] Park Hyang Suk, A V Ryzhkov, D S Zrnić, et al. The Hydrometeor Classification Algorithm for the Polarimetric WSR-88D: Description and Application to an MCS [J]. Weather and Forecasting, 2009, 3 (24): 730–48.
- [17] Lim S, Chandrasekar V, Bringi V N. Hydrometeor classification system using dual-polarization radar measurements: model improvements and in situ verification [J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2005, 43 (4): 792–801.
- [18] 赵果, 王致君, 贾伟, 等. 双线偏振天气雷达有效探测范围研究[J]. 高原气象, 2016, 35 (1): 244–250.

Classification of Hydrometeor Types for Hail Cloud based on X-band Dual-polarization Radar

WANG Xiao-yi^{1,2}, SU De-bin^{1,2}

(1. College of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. Key Open Laboratory of Atmospheric Exploration of China Meteorological Administration, Chengdu 610225, China)

Abstract: The applicability verification of the fuzzy logic algorithm for classification of hydrometeor types in hail cloud, which based on X-band dual-polarization radar in Pingliang, Gansu, is showed in this paper. Through the evaluation of the radar performance and data quality analysis, the reliability of the hydrometeor identification results has been ensured. And to realize the fuzzy logic algorithm, the membership function parameter table of 11 output types is established, besides, the weight parameters is given, which according to the characteristic of different hydrometeor types for 6 input parameters and the data quality. Then, the established the fuzzy logic algorithm classify the types of hydrometeor in hail cloud, 4 polarimetric parameters and sounding data is used as references to verify its result, the classification results indicate that the fuzzy logic algorithm for classification of hydrometeor types is reasonable and practicable.

Keywords: fuzzy logic; X-band dual-polarization radar; hydrometeor classification; hail cloud