

杜小勇, 卢煜寒, 廖麒翔, 等, 2025. 模糊逻辑法在天气雷达地物杂波识别和回波类型分类应用综述[J]. 气象, 51(2): 129-142.  
Du X Y, Lu Y H, Liao Q X, et al, 2025. A review of the application of fuzzy logic method in ground clutter recognition and echo type classification of weather radar[J]. Meteor Mon, 51(2): 129-142 (in Chinese).

# 模糊逻辑法在天气雷达地物杂波识别和 回波类型分类应用综述\*

杜小勇 卢煜寒 廖麒翔 叶松 孙学金 王毅 周树道

国防科技大学气象海洋学院, 长沙 410000

**提 要:** 模糊逻辑法在天气雷达地物杂波等回波分类识别上有着广泛应用和持续改进, 成为当前各国业务天气雷达系统非降水回波识别处理的主流技术类型。文章介绍了模糊逻辑法地物杂波识别的基本原理, 梳理了模糊逻辑法在天气雷达地物杂波识别上技术方法的演进和国内外应用情况, 展望了该领域技术发展方向和应用潜力, 旨在为天气雷达地物杂波识别和抑制技术水平发展提供借鉴和参考。

**关键词:** 模糊逻辑, 天气雷达, 地物杂波, 识别

**中图分类号:** P415, P413

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2024.122201

## A Review of the Application of Fuzzy Logic Method in Ground Clutter Recognition and Echo Type Classification of Weather Radar

DU Xiaoyong LU Yuhan LIAO Qixiang YE Song SUN Xuejin WANG Yi ZHOU Shudao  
College of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Changsha 410000

**Abstract:** The fuzzy logic method has been widely used and continuously improved in the classification and recognition of echoes such as ground clutter of weather radars, and has become the mainstream technology type for non-precipitation echo recognition processing of operational weather radar systems in various countries. This paper introduces the basic principle of fuzzy logic method for clutter recognition, sorts out the evolution and application of fuzzy logic method in ground clutter recognition of weather radar, and then looks into the future's development direction and application value of this field so as to provide some references for further promoting the development of ground clutter recognition and suppression technology of weather radar.

**Key words:** fuzzy logic, weather radar, ground clutter, recognition

### 引 言

天气雷达作为重要的气象观测设备, 具有百米级的高空间分辨率和分钟级的高时间分辨率, 在精

细化短时临近天气预报、降水测量、洪水预警、航空飞行保障等气象业务领域发挥着重要作用 (Serafin and Wilson, 2000; Harrison et al, 2009; Rauber and Nesbitt, 2018; Zhang et al, 2019; 俞小鼎和郑永光, 2020; Sanchez-Rivas and Rico-Ramirez, 2023)。受

\* 国家自然科学基金项目(42305048)资助

2024 年 4 月 9 日收稿; 2024 年 12 月 20 日收修定稿

第一作者: 杜小勇, 主要从事大气探测研究. E-mail: duxiaoyong9409@foxmail.com

通讯作者: 周树道, 主要从事大气海洋探测技术研究. E-mail: zhousd70131@sina.com

天气雷达工作模式及周边环境等因素影响,天气雷达接收到的回波信号,不仅包含云滴、雨滴、冰晶等降水气象目标回波信息,同时也可能夹杂着各种非降水回波信息(Mazur et al, 2004; 江源等, 2009),其中地物杂波是最为常见的一种非降水回波。地物杂波的产生是由于天气雷达发射出去的高频信号在扫描探测时受到地物阻挡而反射回来的信号进入接收机所引起,特别是低仰角工作模式和超折射传播(AP)时容易发生。朱丹等(2018)发现我国新一代天气雷达在 200 km 范围内  $0.5^\circ$ 、 $1.45^\circ$ 、 $2.4^\circ$  和  $3.35^\circ$  仰角工作时,平均遮挡比例分别为 30.7%、8.5%、2.5% 和 1.0%,证实了地物杂波的普遍性和严重性。

由于含有地物杂波的回波降低了天气雷达基数据和导出产品数据质量(Joss J and Lee R, 1995; Friedrich et al, 2009; Wu et al, 2021),给数值预报和降水估计等气象业务应用产生影响(Droegemeier et al, 2000)。因此,开展地物杂波识别和剔除,是一项关乎天气雷达回波数据质量的重要基础性工作(梁海河等, 2006; 黄兴友等, 2018),受到了气象学者的高度关注,各种处理方法陆续被提出,并在天气雷达业务系统中不断应用改进,归纳起来主要有以下三类:雷达回波资料的三维结构质量控制法(Steiner and Smith, 2002)、模糊逻辑法(Kessinger et al, 2003)和神经网络法(Lakshmanan et al, 2007)。Hubbert et al(2009)指出在这三种方法中,神经网络法相对效果最好,但其计算过程复杂,难以满足当时后续业务高实时性要求,并提出一种实时、实用的模糊逻辑杂波识别滤除算法。模糊逻辑法正是凭借良好的杂波识别能力和计算效率,成为地物杂波识别业务化应用的主流技术(Gourley et al, 2007; Krause, 2016; 张帅, 2022)。

鉴于基于模糊逻辑法的天气雷达地物杂波识别技术相关研究工作方兴未艾,文献数量众多(Kessinger et al, 2003; 陈媛等, 2007; Cho et al, 2006; 刘黎平等, 2007; Park et al, 2009; Hubbert et al, 2009; 吴涛等, 2013; Kollias et al, 2014; 张林和杨洪平, 2018; 刘宏等, 2019; Michelson et al, 2020; 张帅, 2022),为厘清该方法发展脉络,本综述首先介绍了模糊逻辑法地物杂波识别的基本原理,进而梳理了模糊逻辑法在天气雷达地物杂波识别上的技术演进和国内外应用情况,最后探讨和展望了该技术未来发展方向。

## 1 模糊逻辑法地物杂波识别原理基本框架

模糊逻辑法涉及的数学理论源自于 Zadeh (1973)在 1965 年首次提出的模糊集合理论,该理论把参量与集合的隶属关系从“是”和“否”这样的二元对立简单关系,演进为某种程度的隶属关系,并采用“隶属函数”来表征这种隶属程度关系。几十年来,模糊数学相关理论和应用方法迅速发展,在气象目标识别预报、能量控制、交通控制、故障诊断、网络通信等众多工程领域取得了丰富的应用成果(Lee et al, 2004; 朱亚平等, 2007; 王德旺等, 2015; 苟阿宁等, 2022; 田付友等, 2024; Kierzkowski and Kisiel, 2017; Atlam et al, 2021; 谢季坚和刘承平, 2006; 江源, 2013; 尚淑丽等, 2014)。在天气雷达回波分类识别领域,由于各类回波的特征信息往往存在部分交叠,因而适宜采用模糊逻辑法来解决处理,该方法模型框架如图 1 所示。

模糊逻辑法在天气雷达回波分类识别问题上的运用,总的来说是基于待识别回波特征提取合适的特征参量,运用模糊逻辑推理规则处理,以输出退模糊识别结果(何炜琨等, 2016),具体处理步骤如下。

第一步,特征提取。指的是通过映射的方法用低维空间来表示样本的过程,经特征提取后的样本可分析性增强(张新峰和沈兰莎, 2004)。地物杂波具有多种典型特征(Steiner and Smith, 2002; Cho et al, 2006; Hubbert et al, 2009),如:反射率因子具有空间上的不连续性和不规则性,表现在径向上对远处的遮挡,垂直方向上高度有限;地物杂波大部分源自固定地物反射,包括雷达波正常传播和超折射传播(AP)两种情况,由于固定地物杂波平均径向速度接近为零,谱宽也极窄,通常在  $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以内(Doviak and Zrnić, 2014)。为了突出这些地物杂波特征,人们采用参量统计值作为特征参量,如反射率因子的径向库间变化程度、反射率因子的纹理参量、径向速度的标准差等。Steiner and Smith(2002)、Kessinger et al(2003)、Gourley et al(2007)通过评估几种常用特征参量识别杂波的潜力,发现每个特征参量或统计值虽然具有一定的区分杂波和降水的能力,但单独使用还不足以较好区分杂波,有必要在模糊逻辑算法中组合运用。因此,有研究人员提取了雷达反射率因子、速度、双偏振参量的统计量

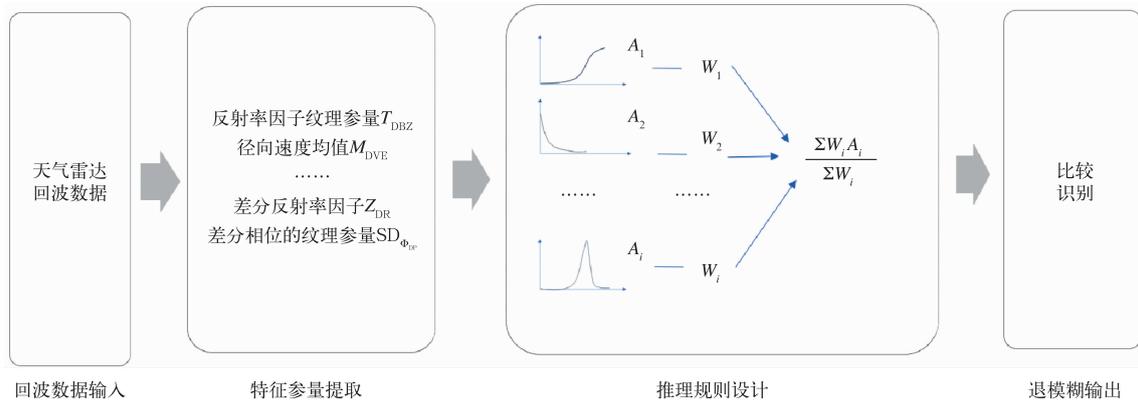


图 1 地物杂波识别模糊逻辑法模型

Fig. 1 Model of fuzzy logic method for ground clutter recognition

(VanAndel, 2001; Kessinger et al, 2003; Cho et al, 2006; Berenguer et al, 2006; 刘黎平等, 2007; 宗蓉等, 2017; 刘宗庆等, 2021), 共同作为模糊逻辑算法中识别地物杂波的特征参量。

第二步, 进行模糊推理。推理规则主要由模糊隶属函数、权重和识别规则三个方面组成。确定隶属函数  $A(u)$  是处理模糊问题的关键任务(梁保松和曹殿立, 2007), 它是将元素  $u$  对论域  $U$  上的一个模糊集合  $A$  的隶属关系, 从二元对立性的 0, 1 两个值, 替换为从区间  $[0, 1]$  中所取的数值来描述元素  $u$  属于模糊集合  $A$  的“真实程度”。确定方法主要有直觉法、推理法、模糊统计法、三分法、专家经验法、二元对比排序法、模糊分布法、神经网络法等(杨纶标等, 2011), 其中运用较为广泛的是模糊统计法和模糊分布法, 前者统计大量已有数据来确定隶属函数, 后者根据问题的性质直接套用某种分布作为隶属函数, 主观性较强, 适合于有明确数学模型或分布的情况, 常见的分布类型由矩阵型、梯形型、 $k$  次抛物线型、岭形分布、正态分布、柯西分布等。

在天气雷达杂波识别领域, 隶属函数可理解为目标距离库中回波信号被识别为气象杂波的程度。其构建方法主要是基于模糊统计法或模糊分布法, 利用天气雷达体扫产生的非降水事件和降水事件构成的数据集, 统计分析出现的地物杂波特征参量隶属频率分布图, 使隶属函数与地物杂波特征具有匹配的最大似然估计值(Kessinger et al, 2003; Cho et al, 2006)。

一般地, 对于天气雷达回波的气象目标、地物杂波、晴空回波等模糊子集  $A_i$ , 在论域  $U$  上有  $n$  个可提取的特征, 可对应构成  $n$  的隶属函数为:  $A_i(u)$ ,

$A_{i2}(u), \dots, A_{in}(u)$ , 这  $n$  个特征参量在地物杂波模糊识别中的作用是不同的, 因此对这些隶属函数分别分配适当的权重系数:  $W_1, W_2, \dots, W_n$ , 得到:

$$A_i = \sum_{j=1}^n W_j A_{ij}(u) \quad (1)$$

常用的权重系数设置方法有主因素决定型、主要突出型、加权平均型(周浩亮, 1994), 再根据设定阈值比较或最大隶属度原则进行分类识别, 将样本回波划分到对应类型。

## 2 模糊逻辑法地物杂波识别技术演进

### 2.1 特征参量提取

地物杂波特征参量提取是地物杂波模糊识别的基础。早期天气雷达不具备双偏振功能, 当时可列入的特征参量依赖于单偏振天气雷达所探测的基数据参量, 即通常使用给定区域的反射率因子  $Z_H$ 、径向速度  $V_r$  和速度谱宽  $S_w$  的统计量作为特征参量, 包括平均值、中位数、标准差和纹理参量, 用以识别各种回波(VanAndel, 2001)。例如: Kessinger et al (2003) 介绍的超折射地物杂波检测算法 (APDA) 中, 采用反射率因子水平纹理参量  $T_{DBZ}$ 、反射率因子垂直变化  $V_{dZdiff}$ 、径向速度的标准差  $S_{DVE}$ 、径向速度均值  $M_{DVE}$ 、速度谱宽均值  $M_{DSW}$ 、速度谱宽的标准差  $S_{DSW}$ 、反射率因子的径向库间变化程度  $S_{PIN}$ 、反射率因子径向库间平均变号值  $S_{IGN}$ , 这些特征参量计算公式如下:

$$T_{DBZ} = \frac{\sum_{i=1}^{N_A} \sum_{j=1}^{N_R} (Z_{i,j} - Z_{i-1,j})^2}{N_A \times N_R} \quad (2)$$

$$V_{\text{dZDiff}} = \text{dBZ}_{\text{upper angle}}^{\text{upper}} - \text{dBZ}_{\text{lower angle}}^{\text{lower}} \quad (3)$$

$$S_{\text{DVE}} = \frac{\sum_{i=1}^{N_A} \sum_{j=1}^{N_R} (M_{\text{DVE},i,j} - M_{\text{DVE}})^2}{N_A \times N_R} \quad (4)$$

$$S_{\text{PIN}} = \frac{\sum_{i=1}^{N_A} \sum_{j=1}^{N_R} M_{\text{SPIN}}}{N_A \times N_R}$$

$$M_{\text{SPIN}} = \begin{cases} 1 & |Z_{i,j} - Z_{i,j-1}| > Z_{\text{thresh}} \\ 0 & |Z_{i,j} - Z_{i,j-1}| \leq Z_{\text{thresh}} \end{cases} \quad (5)$$

$$S_{\text{IGN}} = \frac{\sum_{i=1}^{N_A} \sum_{j=1}^{N_R} M_{\text{SIGN}}}{N_A \times N_R}$$

$$M_{\text{SIGN}} = \begin{cases} 1 & Z_{i,j} - Z_{i,j-1} > 0 \\ 0 & Z_{i,j} - Z_{i,j-1} < 0 \end{cases} \quad (6)$$

式(2)  $T_{\text{DBZ}}$  表征反射率因子的平面扫描显示(PPI)局地变化幅度;式(3)  $V_{\text{dZDiff}}$  表征反射率因子的垂直变化幅度,刘黎平等(2007)使用了含有距离权重的对应参量,  $G_{\text{DBZ}} = W(R)(Z_{\text{up}} - Z_{\text{low}})$ ,  $Z_{\text{up}}$ 、 $Z_{\text{low}}$  是本层和上层 PPI 的反射率因子,  $W(R)$  是距离权重;式(4)中:  $M_{\text{DVE},i,j}$  是经过中值滤波平滑的径向某点速度,  $M_{\text{DVE}}$  是径向速度区间范围内的均值;式(5)  $S_{\text{PIN}}$  定义为:计算区域内相邻距离库间反射率因子差超过阈值  $Z_{\text{thresh}}$  的所占比例,Steiner and Smith(2002)在多普勒天气雷达 WSR-88D 数据应用中使用  $Z_{\text{thresh}} = 2.0$ ;式(6)  $S_{\text{IGN}}$  定义为:计算区域内距离库间反射率因子符号变化的平均值,表示沿径向方向反射率因子增加情形所占程度。在刘黎平等(2007)的改进算法中,对于与反射率因子有关的物理量,规定  $N_A = 3$ ,  $N_R = 3$ ;对于径向速度和速度谱宽的物理量,规定  $N_A = 3$ ,  $N_R = 9$ 。

随着天气雷达技术进步,双偏振天气雷达取代传统单偏振天气雷达,成为主流业务雷达。新增探测的基本产品数据有差分反射率因子  $Z_{\text{DR}}$ 、差分传播相移率  $K_{\text{DP}}$ 、互相关系数  $\rho_{\text{hv}}$  等双偏振参量,为散射体的形状、大小和方向等识别提供了有用信息(Kumjian, 2013)。在实际探测中,天气雷达双偏振参量受地物杂波等非气象回波影响比较敏感(Xia et al, 2019),更有必要对杂波进行识别剔除。杜牧云等(2012)总结了地物杂波回波各双偏振量相较于降水回波的显著差异,例如:地物杂波的  $Z_{\text{DR}}$  与气象回波正常的取值范围有差异,一般是明显偏低,偶有明显偏大;地物杂波的  $K_{\text{DP}}$  也会较降水回波有明显波动;  $\rho_{\text{hv}}$  一般在 0.4~0.7 区间内分布,较正常气象

回波(一般大于 0.9)偏小。因此双偏振天气雷达在识别地物方面,尤其是回波中混合含有地物与降水回波时具有优势。Schuur and Ryzhkov(2003)提出了识别地物杂波的模糊特征参数设置,除传统单偏振多普勒天气雷达强度和速度参量外,新增 3 个双偏振参量,为  $Z_{\text{DR}}$ 、水平偏振分量与垂直偏振分量之间的  $\rho_{\text{hv}}$ 、差分传播相移  $\Phi_{\text{DP}}$  纹理参量  $SD_{\Phi_{\text{DP}}}$ , 定义公式如下:

$$SD_{\Phi_{\text{DP}}} = \frac{\sum_{i=1}^{N_A} \sum_{j=1}^{N_R} (\Phi_{\text{DP},i,j+1} - \Phi_{\text{DP},i,j})^2}{N_A \times N_R} \quad (7)$$

Gourley et al(2007)研究发现  $Z_{\text{DR}}$ 、 $\Phi_{\text{DP}}$  两个参量分别对应的标准差  $\sigma_{Z_{\text{DR}}}$ 、 $\sigma_{\Phi_{\text{DP}}}$  是杂波的优秀特征参量,与 Kessinger et al(2003)的纹理参量计算方法略有区别,采用差分反射率因子场沿径向的标准差计算,定义为:

$$\sigma_{Z_{\text{DR}}} = \frac{\sum_{i=1}^{N_A} \sum_{j=1}^{N_R} (Z_{\text{DR},i,j} - \overline{Z_{\text{DR}}})^2}{N_A \times N_R} \quad (8)$$

除以上特征参量外,研究人员还持续挖掘出各种能够突出地物杂波特征的新参量。毛紫阳等(2006)为了克服前人没有考虑到特征参量所在区域以及相邻区域间变化程度的不足,引入反映图像的平坦程度,以及邻近像素变化剧烈程度的特征参量 ST,其定义公式为:

$$ST = \frac{\sum_{i=1}^{N_A} \sum_{j=1}^{N_R} [S(D_{ij}) - T(D_{ij})]}{N_A \times N_R} \quad (9)$$

式中:  $D_{ij}$  表示  $p$  特征平面上一点模糊特征  $p_{ij}$  的邻域。

$$S(D_{ij}) = \bigvee_{p_i \in D_{ij}} p_i$$

$$T(D_{ij}) = \bigwedge_{p_i \in D_{ij}} p_i \quad (10)$$

$$p_{ij} = G(Z_{ij}) = \left[ 1 + \frac{Z_{\text{max}} - Z_{ij}}{F_d} \right]^{-F_e} \quad (11)$$

式中:  $F_e$ 、 $F_d$  分别为指数型、倒数型模糊性因子,其赋值直接影响  $p$  特征平面的模糊性量值。实验结果表明,相比于方差类特征参量,ST 更能够准确地刻画回波图像的纹理特征。

美国国家大气研究中心(NCAR)的 Hubbert et al(2009)构建了一种新的统计特征参量:杂波相位阵列(CPA),它表示雷达有效照射体积内典型数据采集时间相位波动性,如式(12)所示,CPA 定义为独立时间序列成员  $x_i$  的向量和的幅度除以  $x_i$  的幅度

之和,研究证明其具有良好的杂波识别能力。

$$CPA = \frac{\left| \sum_{i=1}^N x_i \right|}{\sum_{i=1}^N |x_i|} \quad (12)$$

魏万益等(2020)加入回波强度时间变化量  $T_{VR}$  参数,如式(13)所示。试验结果表明,加入该参数后,长沙机场阵列天气雷达地物识别准确率最大可提高 4%,降水识别误判率最多可降低 2%。

$$T_{VR} = \frac{\sum_{i=1}^{N_A} \sum_{j=1}^{N_R} |Z_{i,j} - Z_{i-1,j}|}{N_A \times N_R} \quad (13)$$

## 2.2 模糊逻辑推理规则设计研究

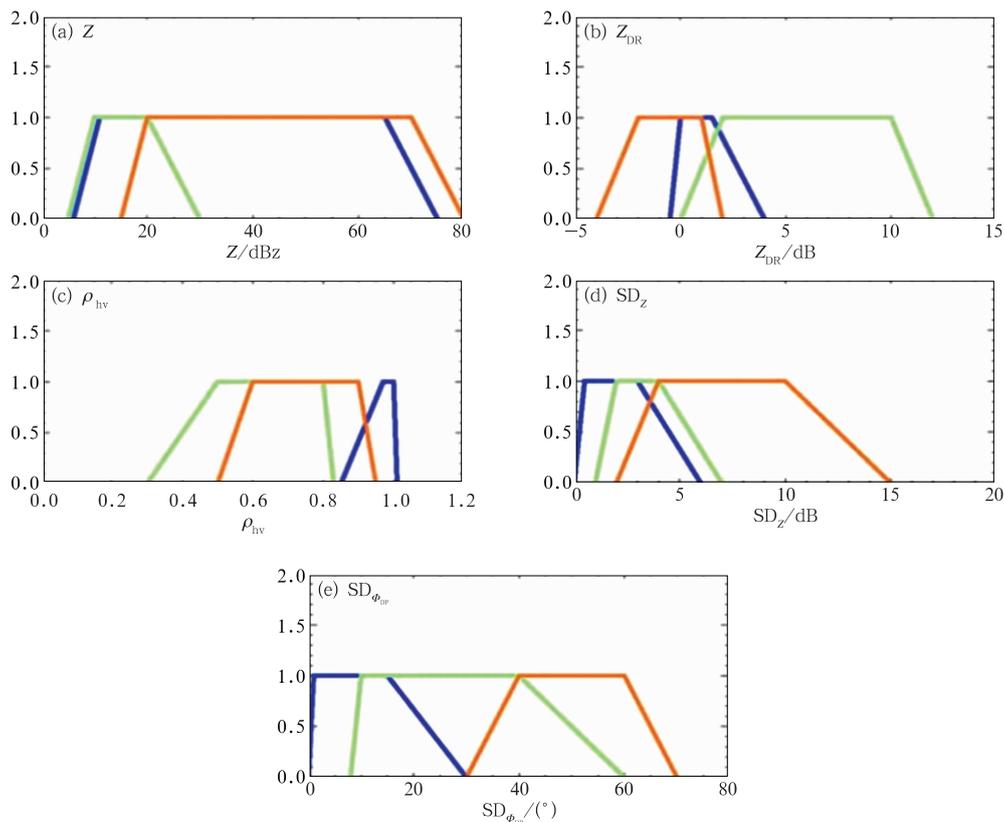
### 2.2.1 隶属函数的构建

Schuur et al(2003)基于在数年间收集的 98 个气象与非气象回波资料,采用单维非对称梯形隶属函数,经统计分析得到在非降水目标分类算法中,气象目标、生物散射体和地物杂波 3 种散射体的 5 个特征参量( $Z$ 、 $Z_{DR}$ 、 $\rho_{hv}$ 、 $SD_Z$ 、 $SD_{\phi_{DP}}$ )隶属函数(如图 2

所示)和对应的临界点值(表 1)。

Liu and Chandrasekar(2000)采样连续可微的 beta 函数作为隶属函数;Gourley et al(2007)开发了一种新的、自动化的经验推导隶属函数的方法。Dufton and Collier(2015)提出一种多顶点隶属函数的模糊逻辑分类器,如图 3 所示顶点超过两个,顶点间采用线性插值法定义隶属函数,这种方法允许函数具有更大的灵活性和适应性。试验结果表明该方法能够有效识别降水回波中的昆虫与地物杂波,也适用于如电力线和冷却塔这些微小尺度回波特征的地物杂波识别。

刘黎平等(2007)利用人工方法对资料进行判断,确定地物杂波和降水回波的“真值”,给出了地物杂波、对流性降水、层状云降水的回波特征概率密度图,再据此用梯形函数确定各个量的隶属函数。江源等(2009)、宗蓉等(2017)、刘宗庆等(2021)在刘黎平等(2007)方法基础上,开展了类似工作。其中刘宗庆等(2021)采用临界成功指数(CSI),如式(14)所示,以得到最高的CSI值为目标,对所有样本进行



注:蓝线:气象散射体,绿线:生物散射体,红线:地物杂波,含异常传播。

图 2 回波隶属函数(改绘自 Schuur et al,2003)

Fig. 2 Echo membership function (redrawn from Schuur et al, 2003)

表 1 地物杂波梯形隶属函数各特征参量临界点值

**Table 1 Critical point values of each feature parameter of ground clutter membership function**

地物杂波临界点	Z/dBz	Z <sub>DR</sub> /dB	$\rho_{hv}$	SD <sub>Z</sub> /dB	SD $\phi_{DP}$ /( $^{\circ}$ )
X <sub>1</sub>	15	-4	0.5	2	30
X <sub>2</sub>	20	-2	0.6	4	40
X <sub>3</sub>	70	1	0.9	10	60
X <sub>4</sub>	80	2	0.95	15	70

分析比较,得到一组最优化隶属函数。

$$CSI = \frac{1}{2} \left( \frac{R_c}{S_c} + \frac{R_p}{S_p} \right) \quad (14)$$

式中: $S_c$  和  $S_p$  代表地物杂波和降水的真实总样本数量, $R_c$  和  $R_p$  代表被准确识别这两类样本数量。

2.2.2 权重和阈值的优化

权重合适的隶属函数组合往往在很大程度上决定了算法最终识别效果,隶属函数最为常见采用的是等权重组合方式(Kessinger et al,2003;宗蓉等,2017),再将得到的地物杂波判别值与给定的识别阈值相比较,若该值大于该阈值,则将此回波标识为地物杂波;反之,则标识为降水。

Cho et al(2006)提出一种突出主要因素的权重设置方法,判别式如式(15)~式(18),该方法通过比较各参数归一化频率分布曲线的重叠面积计算权重,重叠面积代表了地物杂波和降水回波之间的模糊性程度。

$$W_{SDZ}(Z) = \frac{1}{A_{SDZ}} \times \frac{1}{S} \quad (15)$$

$$W_{VGZ}(Z) = \frac{1}{A_{VGZ}} \times \frac{1}{S} \quad (16)$$

$$W_{V_r}(Z) = \frac{1}{A_{V_r}} \times \frac{1}{S} \quad (17)$$

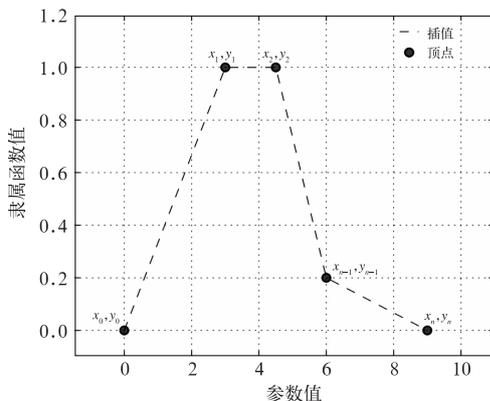


图 3 多顶点隶属函数方法的示例 (改绘自 Dufton and Collier,2015)

Fig. 3 Example of a multi-vertex membership function method (redrawn from Dufton and Collier, 2015)

$$S = \frac{1}{A_{SDZ}} + \frac{1}{A_{VGZ}} + \frac{1}{A_{V_r}} \quad (18)$$

式中: $A$  为地物杂波各特征参量与降水回波的归一化概率密度重叠区域面积;下角 SDZ 指反射率因子标准差,下角 VGZ 指反射率因子垂直梯度。

刘旭阳和黄裕文(2023)进一步在特征参量权重配备环节进行创新,对 4 个特征参量进行分析,选用熵权法来确定各个特征参量的权重。熵权法是利用指标内部所包含的信息量,来确定该指标在所有指标之中的地位,计算步骤依次包括数据标准化、计算比重矩阵、计算信息熵和确定指标权重四个环节,得到各特征参量相应的权重系数,如表 2 所示,能有效避免人为主观因素对于各个指标的权重确定时产生干扰。

表 2 各参量权重系数

**Table 2 Weight coefficients for each parameter**

特征参量	G <sub>DBZ</sub>	$\sigma_z$	M <sub>DVE</sub>	M <sub>DSW</sub>
权重系数	0.31	0.17	0.38	0.14

阈值的优化通常做法是在模糊识别计算输出后,将结果与客观真值进行比较,得到正确率 PC、临界成功指数 CSI、命中率 POD、虚假预警率 FAR、Heidke 技巧评分 HSS 五条曲线,如图 4 所示,以评

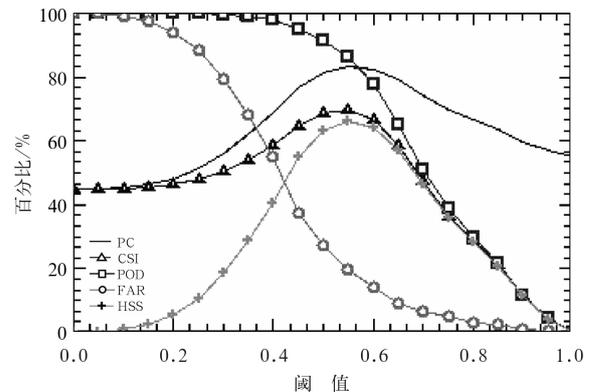


图 4 阈值与分类识别性能统计关系图 (改绘自 VanAndel,2001)

Fig. 4 Statistical relationship between threshold and classification recognition performance (redrawn from VanAndel, 2001)

估识别性能,优化调整隶属函数阈值(VanAndel, 2001)。

### 3 模糊逻辑法地物杂波识别技术应用

#### 3.1 国外应用

本世纪以来,各国基于模糊逻辑法的地物杂波识别技术研究持续深入、日益成熟,陆续在单偏振、双偏振多普勒天气雷达中成功部署应用。

WSR-88D 型天气雷达回波分类器(REC)是模糊逻辑法最早部署在业务天气雷达系统中以识别地物杂波的算法,由 NCAR 研究人员 VanAndel(2001)在第 30 届慕尼黑雷达气象学国际会议上公布。REC 利用传统单偏振多普勒天气雷达探测数据的统计量,包括平均值、中位数、标准差和纹理参量,用来分类各种雷达回波,如超折射传播地物杂波、降水回波、晴空回波。APDA 部署在 WSR-88D 开放式雷达产品发生器(ORPG)系统中运行(Kessinger et al, 2003),使用的特征参量增加到 8 项,实现了超折射地物杂波的自动检测和去除,减轻了预报员繁琐工作,提高了基础数据场和衍生产品的质量,然而该算法不足之处在于很难识别夹杂在降水回波中的地物杂波。

第一台具备双偏振功能的原型雷达 KOUN 在 2002 年 WSR-88D 基础上升级改造成功,俄克拉何马大学、美国国家强风暴实验室(NSSL)的 Schuur et al(2003)随后利用在 KOUN 联合双偏振实验中探测到的高质量双偏振数据集,开展了一系列的双偏振雷达产品的生成和显示处理方面的研究工作。他们开发的水凝物相态识别算法(HCA),采用  $Z_{DR}$ 、 $\rho_{hv}$ 、 $SD_Z$ 、 $SD_{\Phi_{DP}}$  4 个双偏振参量作为特征参量,有效分类识别降水、地物杂波和大气中的非气象目标,开始将天气雷达双偏振参量应用到地物杂波识别模糊逻辑算法中。需要注意的是 HCA 的性能受到天气雷达回波信噪比的明显影响,在信噪比大于 10 dB 时,降水区域被误识为非气象占比小于 1%。如果使用大于 5 dB 的信噪比阈值,则误识别率约 5%。

韩国庆北大学 Cho et al(2006)在借鉴 REC 算法的基础上,提出一种隶属函数随反射率因子大小调整的新的模糊逻辑方法。他们研究发现地物杂波的  $SD_Z$ 、 $VGZ$  和径向速度绝对值  $V_r$  等特征参量随天气雷达反射率因子变化而发生系统变化,因此新

方法更客观、更容易因地制宜;在 McGill 型天气雷达数据分析、处理和交互演示雷达转处理系统的超折射地物杂波探测处理中的应用显示,其总体性能可与采用双偏振特征参量的方法相媲美,可以很容易地在业务雷达中部署运行,在较低的俯仰角下具有良好的性能,能去除大部分地物杂波和超折射地物杂波,尽管一些降水信号也被误识。

NCAR 的 Hubbert et al(2009)描述了可以兼容单偏振和双偏振天气雷达数据识别杂波的模糊逻辑算法—杂波抑制决策(CMD)。算法部署在单偏振天气雷达时,除反射率因子水平纹理参量  $T_{DBZ}$ 、反射率因子的径向库间变化程度  $S_{PIN}$  外,引入了新参数—杂波相位变化率(CPA),可有效地识别和分离零速度、窄谱宽天气回波中的杂波,同时保持算法简单;算法部署在双偏振天气雷达时,新增两个双偏振参量  $\sigma_{Z_{DR}}$ 、互相关系数的标准差  $\sigma_{\rho_{hv}}$ ,相比单偏振 CMD 算法,由于双偏振参量增加了足够的分类依据,减小了算法将零速度、窄谱宽降水识别为杂波的可能性,因此 CPA 减去了中值滤波器处理环节。该算法整合部署运行在 WSR-88D 雷达系统中,但当时该算法还无法有效识别一些其他重要的非降水回波,如生物散射体、灰尘、箔条、烟雾、风轮机和飞机。

俄克拉何马大学、NSSL 和韩国庆北大学的 Park et al(2009)介绍了 WSR-88D 新版 HCA,采用了 6 个特征参量( $Z$ 、 $Z_{DR}$ 、 $\rho_{hv}$ 、 $K_{DP}$ 、 $SD_Z$ 、 $SD_{\Phi_{DP}}$ ),区分包括地物杂波在内的 10 种不同的气象类别。算法考虑到衰减、噪声、雷达误标、波束阻塞等因素对雷达分类可能影响,引入的置信因子如果超过阈值,则表明分类结果是可接受的。HCA 算法总体上能较好地区分降水-非降水回波,但对于距离较远处、信噪比低时的远处,超折射地物杂波的识别仍然不够理想;该算法因含有涉及多个双偏振变量的复杂程序,计算效率相对偏低。

俄克拉何马大学和 NSSL 的 Krause(2016)进一步提出了一种利用双偏振雷达数据区分非降水回波的改进算法 MetSignal,该算法是基于模糊逻辑法和少量的后处理规则,采用的特征参考包含 3 个双偏振参量( $Z_{DR}$ 、 $\rho_{hv}$ 、 $\Phi_{DP}$ )的纹理参量。算法使用了评估功能,在性能较差区域将评估结果驱动隶属函数和可变权重的优化,而且允许用户根据具体情况调整其关键参数。算法设计简单,计算效率高,被选中在美国的 WSR-88D ORPG 17 号版本中应用。

此外,其他一些国家也发展应用了地物杂波识

别的模糊逻辑算法。如:西班牙加泰罗尼亚理工大学 Berenguer et al(2006)、法国气象局 Gourley et al(2007)、韩国气象厅 Park et al(2014)均提出各自的地物杂波识别模糊逻辑算法,并在试验中得到检验。

波兰气象局 Ośródką and Szturc(2022)针对风轮机引起的杂波,开发了采用双偏振数据的 DP. TURBINE 模糊逻辑算法。基于模糊逻辑法的地物杂波识别技术国外应用主要情况如表 3 所示。

表 3 基于模糊逻辑法的地物杂波识别技术国外应用情况

时间	算法名称	机构	应用部署情况	特点
2001—2023	雷达回波分类器(REC)中的超折射地物杂波检测算法 APDA	美国 NCAR	WSR-88D OR-PG build 2	1. AP 地面回波的自动检测和去除 2. 当地杂波和降水同时存在时, APDA 很难检测到地杂波
2003	一种区分气象和非气象散射体算法 HCA	俄克拉何马大学、NSSL	WSR-88D 联合双偏振实验(JPOLE)	1. 可有效分类识别降水、地物杂波和大气中的非气象目标 2. 受信噪比影响大
2006	一种基于雷达回波特征的超折射传播和正常地物杂波检测方法	加拿大麦吉尔大学、韩国庆北大学	McGill 雷达数据分析、处理和交互演示(RAPID)雷达数据处理系统	1. 提出依赖于反射率因子的隶属函数 2. 总体性能较好,去除了大部分正常地面回波和 AP,尽管一些降水场被误除 3. 更客观,更容易因地制宜
2009	杂波抑制决策算法 CMD	美国 NCAR	WSR-88D 雷达实时处理	1. 有效地识别和分离零速度、窄谱宽天气回波中的杂波,并尽可能地保持算法的简单性,便于实际业务中实时处理 2. 还无法有效识别一些其他重要的非降水回波
2009	新版水凝物相态识别算法 HCA	美国俄克拉何马大学、NSSL、韩国庆北大学	部署在双偏振功能改造的 WSR-88D 网络上	1. 算法总体上能较好地地区分降水-非降水回波,但对于距离较远处、信噪比低处 AP 的识别还不够理想 2. 含有涉及多个双偏振变量的复杂程序,计算效率偏低
2016	MetSignal	美国俄克拉何马大学、NSSL	WSR-88D OR-PG build 17	1. 算法设计简单,计算效率高,允许用户根据具体情况调整其关键特征参数 2. 算法评估结果驱动隶属函数和可变权重的变化
2006	基于模糊逻辑的 AP 识别算法	西班牙加泰罗尼亚理工大学	C 波段雷达	与专家分析相似的性能,优于平均杂波掩码法的效果,适用于地面和海上两种情况
2007	仅使用双偏振变量的模糊逻辑算法	法国气象局	C 波段双偏振雷达	1. 其隶属函数和权重是基于客观探测的自动化推导,自动运行 2. 算法成功地从雷达降雨量估计中去除地面杂波、异常传播等杂波,但降水回波的外缘存在误识情况
2014	模糊质量控制算法	韩国气象厅	双偏振雷达中试运行	具有保留雪回波和弱雨回波的优点,同时消除了包括 AP 回波在内的部分污染回波区域
2022	DP. TURBINE	波兰气象局	波兰气象雷达网络的 RAD-VOL-QC 系统	针对风轮机引起地物杂波识别

### 3.2 国内应用

国内有关地物杂波的研究相比国外稍晚几年,主要是围绕新一代天气雷达开展。新一代天气雷达是我国在 20 世纪末建成,一直在网运行。刘黎平等(2007)分析了我国多地 SA 型新一代天气雷达和上海的 WSR-88D 天气雷达降水回波、地物杂波的特

性,给出了各国特征参量的梯形折线隶属函数,提出了基于模糊逻辑的分步式地物杂波识别方法,通过调整已被严格标准识别为地物和非地物的邻近区域回波点的判据,来减小地物的漏判和降水回波的误判。该方法第 1 步,设定 3 个阈值  $T_1$ 、 $T_s$ 、 $T_2$  ( $T_1 < T_s < T_2$ ),其中  $T_s$  为标准的阈值,判据大于  $T_2$  的为地物,小于  $T_1$  的为非地物杂波,介于之间的再下一

步判断;第 2 步,引入径向方向已判断为地物和非地物杂波的加权判据物理量:

$$\Delta T = \frac{\sum_{i=-n}^n (R_i - R)^2 T_i}{\sum_{i=-n}^n (R_i - R)^2} - T_s \quad (19)$$

式中: $n$  为待判断点的距离库数, $T_i$  和  $R_i$  为已判断为地物或非地物点的判据和距离。然后用  $\Delta T$  和待判断点的判据之和与  $T_s$  比较来判断是否为地物杂波。该方法与 Kessinger 方法相比,改进之处在于采用变化的阈值,结果表明可明显改善速度模糊区暴雨过程对流云团被误判为地物的概率。但是该方法依然依赖于人工方法对资料进行初始判断以确定阈值,这对于晴空回波和远处弱降水回波时非常困难。

江源(2008)运用模糊逻辑法系统分析了部署在北京和天津的新一代天气雷达体扫回波资料,提取 6 个参量为识别地物杂波的特征参量,采用 CSI 方法调优隶属函数,并与美国和我国现有的隶属函数对比分析,发现该方法能明显降低降水回波误判为地物杂波的概率,尤其是没有径向速度资料的空间变化梯度比较大的层状云降水回波,但是研究也指出仅依靠人工和雷达资料有时难以进行区分,有必要融入卫星等资料加以综合识别。

杨川(2012)在分步式地物杂波识别法基础上,进一步针对新一代天气雷达 150 km 外回波边缘残留高反射率因子大于 35 dBz 的区域,视为由超折射地物杂波引起予以剔除,以改善刘黎平等(2007)地物杂波识别法整体识别效果。

吴涛等(2013)参考 Kessinger et al(2003)的模糊逻辑算法,研发了 SWAN 系统的超折射地物杂波抑制算法。该算法适用于目前我国布网建设新一代天气雷达主要型号的回波资料,在计算反射率因子垂直梯度时将反射率因子随仰角变化改为随参考层高度的变化。试验显示,该算法可识别和剔除大部分超折射地物杂波,缺点是部分远距离超折射地物杂波未能被识别以及部分降水回波的误判。同时发现隶属函数需进行本地化调整才能达到更好的识别效果。

黄兴友等(2018)运用模糊逻辑方法识别新一代天气雷达地物杂波中,借鉴 Cho et al(2006)的方法,即划分反射率因子区间,构建相应的隶属函数,以此减少弱回波处误判,但是统计检验结果表明算法识

别效果在远距离时有所降低。此外,该研究对于非降水强度的弱回波不处理,以保留对短时临近预报具有指示作用、且强度较弱的特征回波,如晴空湍流回波以及阵风锋回波。

在双偏振参量应用方面,杜牧云(2012)基于中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室的车载 C 波段双偏振多普勒天气雷达,在前人工作基础上,添加  $Z_{DR}$ 、 $SD_{\phi_{DP}}$  及零滞后互相关系数  $\rho_{hv}(0)$  等共计 8 个物理量作为特征参量,克服了之前对零速度区过度识别的问题,同时通过叠加混合回波识别模式,明显提升了对地物与降水回波混合区域的识别能力。

李丰等(2014)也对 C 波段天气雷达的地物杂波特征进行了分析,建立了适合 C 波段多普勒天气雷达的地物识别方法,比对分析认为地物杂波的  $M_{DSW}$ 、 $S_{DVE}$  分布与降水回波没有明显差别,不能用于地物杂波的识别,这与 S 波段雷达有明显区别,而且该方法在降水回波边缘会产生一定误判。

针对弱信号区域  $\rho_{hv}(0)$  等双偏振雷达参量的波动非常剧烈不利于区分气象回波和非气象回波的难题,张帅(2022)作了有益探索。该研究基于 C 波段双偏振雷达(NUIS-CDP)探测数据,提出一种模糊逻辑算法的改进方法 MetSignal\_noise,即分段处理不同信噪比的回波数据,在纹理参量处理中规避信噪比小的双偏振参量,通过对  $\rho_{hv}(0)$  沿径向平均来降低地物杂波和超折射地物杂波异常高的  $\rho_{hv}(0)$ ,提升  $\rho_{hv}(0)$  在区分非气象回波效果。此外,该方法还通过限制径向速度的使用范围、沿径向对相关系数进行平均等步骤对算法误识别进行抑制。结果表明 MetSignal\_noise 算法总体优于改进之前,尤其是在低信噪比(SNR)区域。

2023 年底,中国气象局正式在网运行的新版本新一代天气雷达软件(ROSE2.1),依然采用模糊逻辑法作为地物杂波在基数据层面的识别技术,即以回波强度、径向速度和谱宽中提取的统计值,具体有  $T_{DBZ}$ 、 $G_{DBZ}$ 、 $S_{PIN}$ 、 $M_{DVE}$ 、 $S_{DVE}$  等作为特征参量,设置隶属函数进行模糊逻辑法处理,超过给定阈值,判为地物杂波,ROSE2.1 还融合高仰角数据进行地物杂波辅助判识。

此外,鉴于国内风电工业的快速发展,风轮机杂波对多普勒天气雷达数据质量的影响也不断加重,苏添记和葛俊祥(2023)在统计分析出风轮机杂波具有较高的反射率因子隆起度和水平通道信噪比隆起

度以及较大的速度奇异率的基础上,相应构建反射率因子隆起度( $U_{\text{dBt}}$ )、速度奇异率( $S_V$ )、水平通道信噪比隆起度( $U_{\text{SNRH}}$ )、信号质量指数( $I_{\text{SQ}}$ )和谱宽( $S_W$ )5个特征参量,其中前两项定义如式(20)~(21):

$$U_{\text{dBt}} = \begin{cases} \sqrt{\frac{\sum_{a=-n}^n \sum_{r=-m}^m (\text{dB}T_{a,r}^2 - \overline{\text{dB}T}^2)}{N_{\text{bin}} - 1}} & \text{dB}T > \overline{\text{dB}T}_{a,r} \\ 0 & \text{dB}T \leq \overline{\text{dB}T}_{a,r} \end{cases} \quad (20)$$

式中: $\text{dB}T$ 表示目标距离库的反射率因子; $\text{dB}T_{a,r}$ 表示以目标距离库为中心,方位和距离分别变化 $a$ 和 $r$ 个最小分辨单元的距离库的反射率因子; $N_{\text{bin}}$ 表示 $\text{dB}T_{a,r}$ 对应的所有距离库数目,大小由 $n$ 和 $m$ 确定; $\overline{\text{dB}T}_{a,r}$ 表示目标距离库的外围距离库反射率因子的平均值。

$$S_V = \sum_{r=-m}^m \frac{|V - V_r|}{|r| \times k}, \quad (21)$$

式中: $V$ 表示目标距离库的径向速度; $V_r$ 表示以目标距离库为中心,距离变化 $r$ 个最小分辨单元的距离库的径向速度, $k$ 根据 $V$ 与 $V_r$ 的符号差异取不同值。

$U_{\text{SNRH}}$ 定义与 $U_{\text{dBt}}$ 类似, $\text{dB}T$ 换成 $\text{SNRH}$ 即可, $I_{\text{SQ}}$ 表示在目标距离库内相邻两次脉冲采样回波信号的相似程度。这项研究使用模糊逻辑算法对雷达基数据中的风轮机杂波进行特征识别,剔除效果在有气象降水时剔除效果较好,晴空时处理效果不如气象降水时好。

## 4 结论与展望

综上,模糊逻辑法经过各国众多学者改进,凭借良好的识别效果和计算效率,在全球众多国家业务雷达系统应用中占据主流地位,然而该方法对于降水边缘、信噪比低的远距离处,以及杂波和降水混合区域等,仍然存在一定的回波信号误识概率(Gourley et al, 2007; Park et al, 2009; Ye et al, 2015; Kilambi et al, 2018),而且在更高精度的单个距离库层面上的地物杂波分类识别研究相对困难(Jatau et al, 2021)。正因为存在这些不足,探索改进地物杂波等回波识别模糊逻辑法技术研究,提升天气雷达数据质量的工作还需要进一步开展,这也受到各国高度重视。例如:美国国家气象局已将通过算法调整和高精校准来提高双偏振数据质量控制纳入 2021—

2025 年度 NEXRAD 战略规划中。未来随着各种相控阵及更高频段新型天气雷达的应用驱动,模糊逻辑法在天气雷达地物杂波分类识别领域,有望在以下方面得到进一步发展。

### (1) 模糊逻辑法模型内部优化改进

就现有模糊逻辑法技术模型内部改进而言,如何在选取相关性更高的特征参量,克服隶属函数、组合权重及阈值选取的经验主观依赖和本地化自适应优化,以及针对不同反射率因子、信噪比区域的精细化匹配(吴涛, 2013; Ye et al, 2015; Krause, 2016)等方面加强改进,减少回波误判,提升各类地物杂波的细分识别,应是下一步该技术发展的重要方向之一。随着当今算力资源的极大改善,开源软件算法的涌现(Sanchez-Rivas and Rico-Ramirez, 2023)等信息技术推动,以及新型天气雷达探测产品、卫星遥感数据、数值天气预报数据等大数据条件的成熟(李睿, 2019; Magaldi et al, 2009; Michelson and Sunhede, 2004; Pamment and Conway, 1998),模糊逻辑法模型在融入神经网络、功率谱分析等方法基础上(Liu and Chandrasekar, 2000; Hubbert et al, 2009; Ko et al, 2015),有望形成以基于深度学习的地物杂波智能模糊识别算法为主流的业务应用技术。

### (2) 模糊逻辑法外部应用拓展

在地物杂波识别上,如何提高远距离 SNR 较低区域地物杂波、地物与降雨混合区域的地物杂波识别,也是今后的模糊逻辑算法改进和业务化应用的重要方向;此外模糊逻辑算法也同样适用于天气雷达接收到的各类生物回波、干扰信号、晴空回波等非降水回波,以及云滴、雨滴、冰晶等降水粒子目标回波的识别问题(Park et al, 2009; 李晓敏等, 2017; 文浩等, 2020; 徐舒扬等, 2020; Jatau et al, 2021; Buschow and Friederichs, 2021)。可以预见,随着各类杂波识别技术的深入发展以及多源数据的有效融合,不仅带来天气雷达探测数据的精准分类和质量保证,而且也会促进非气象杂波蕴含信息价值的挖掘和再利用,例如:鸟类和昆虫迁徙(滕玉鹏等, 2020; Wang et al, 2023)、火灾监测(Saide et al, 2023; 黄克慧等, 2013),雷暴大风实时监测(周康辉等, 2017)以及气溶胶状况(王德旺等, 2014)等。

## 参考文献

- 陈媛, 陈江民, 毛紫阳, 等, 2007. 天气雷达反射率基数据质量控制的几种算法[J]. 气象与减灾研究, 30(3): 48-51. Chen Y, Chen J

- M, Mao Z Y, et al, 2007. Algorithms on quality control of weather radar reflectivity base-data[J]. Meteor Disaster Reduct Res, 30(3): 48-51(in Chinese).
- 杜牧云, 2012. 双线偏振多普勒雷达资料分析与质量控制[D]. 成都: 成都信息工程学院. Du M Y, 2012. Data analysis and quality control of dual linear polarimetric Doppler radar[D]. Chengdu: Chengdu University of Information Technology(in Chinese).
- 杜牧云, 刘黎平, 胡志群, 等, 2012. 双线偏振雷达差分传播相移的质量控制[J]. 应用气象学报, 23(6): 710-720. Du M Y, Liu L P, Hu Z Q, et al, 2012. Quality control of differential propagation phase shift for dual linear polarization radar[J]. J Appl Meteor Sci, 23(6): 710-720(in Chinese).
- 苟阿宁, 吴翠红, 袁延得, 等, 2022. 基于雷达参量的湖北地闪预警方法及效果检验[J]. 气象, 48(7): 878-890. Gou A N, Wu C H, Yuan Y D, et al, 2022. Early-warning method and effect test of cloud-to-ground lightning using Doppler radar data parameters in Hubei[J]. Meteor Mon, 48(7): 878-890(in Chinese).
- 何炜琨, 郭双双, 王晓亮, 等, 2016. 基于 Level-II 数据和模糊逻辑推理的气象雷达风电场杂波检测与识别方法[J]. 电子与信息学报, 38(12): 3252-3260. He W K, Guo S S, Wang X L, et al, 2016. Weather radar wind farms clutters detection and identification method based on level-II data and fuzzy logic inference [J]. J Electron Inf Technol, 38(12): 3252-3260(in Chinese).
- 黄克慧, 朱景, 黄以平, 等, 2013. 基于多普勒天气雷达的火情自动识别系统[J]. 气象, 39(2): 241-248. Huang K H, Zhu J, Huang Y P, et al, 2013. Fire automatic detection system based on Doppler weather radar[J]. Meteor Mon, 39(2): 241-248(in Chinese).
- 黄兴友, 李盈盈, 张帅, 等, 2018. 基于模糊逻辑的地物回波识别方法及效果检验[J]. 热带气象学报, 34(3): 305-313. Huang X Y, Li Y Y, Zhang S, et al, 2018. The algorithm and verification of ground clutter identification based on fuzzy logic[J]. J Trop Meteor, 34(3): 305-313(in Chinese).
- 江源, 2008. 新一代天气雷达气象回波与非气象回波识别方法的研究[D]. 北京: 中国气象科学研究院. Jiang Y, 2008. Meteorological echo and non-meteorological echo recognition study of CINRAD [D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences (in Chinese).
- 江源, 2013. 天气雷达观测资料质量控制方法研究及其应用[D]. 南京: 南京信息工程大学. Jiang Y, 2013. Meteorological radar data quality control study and application [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology(in Chinese).
- 江源, 刘黎平, 庄薇, 2009. 多普勒天气雷达地物回波特征及其识别方法改进[J]. 应用气象学报, 20(2): 203-213. Jiang Y, Liu L P, Zhuang W, 2009. Statistical characteristics of clutter and improvements of ground clutter identification technique with Doppler weather radar[J]. J Appl Meteor Sci, 20(2): 203-213(in Chinese).
- 李丰, 刘黎平, 王红艳, 等, 2014. C 波段多普勒天气雷达地物识别方法[J]. 应用气象学报, 25(2): 158-167. Li F, Liu L P, Wang H Y, et al, 2014. Identification of ground clutter with C-band Doppler weather radar[J]. J Appl Meteor Sci, 25(2): 158-167(in Chinese).
- 李睿, 2019. 复杂地形下高分辨率降雨雷达网数据质量控制及雨量估测研究[D]. 成都: 成都理工大学. Li R, 2019. Research on data quality control methods of high-resolution weather radar network and rainfall retrieval in complex terrain [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology(in Chinese).
- 李晓敏, 周筠珺, 肖辉, 等, 2017. 基于 X 波段双偏振雷达对雷暴单体中水成物粒子演变特征的研究[J]. 大气科学, 41(6): 1246-1263. Li X M, Zhou Y J, Xiao H, et al, 2017. Research on the evolution characteristics of hydrometeors in a thunderstorm cell with X-band dual-polarimetric radar[J]. Chin J Atmos Sci, 41(6): 1246-1263(in Chinese).
- 梁保松, 曹殿立, 2007. 模糊数学及其应用[M]. 北京: 科学出版社: 35. Liang B S, Cao D L, 2007. Fuzzy Mathematics and Its Applications[M]. Beijing: Science Press: 35(in Chinese).
- 梁海河, 荆 Z Q, 徐宝祥, 2006. NEXRAD 的技术升级和发展方向[J]. 气象, 32(1): 3-11. Liang H H, Jing Z Q, Xu B X, 2006. The technology improvement and development strategy for NEXRAD[J]. Meteor Mon, 32(1): 3-11(in Chinese).
- 刘宏, 王天正, 晋涛, 等, 2019. 基于气象灾害监测雷达基数据质量控制方法探讨[J]. 科技通报, 35(8): 1-5, 12. Liu H, Wang T Z, Jin T, et al, 2019. Discussion on quality control method of basic data based on meteorological disaster monitoring radar[J]. Bull Sci Technol, 35(8): 1-5, 12(in Chinese).
- 刘黎平, 吴林林, 杨引明, 2007. 基于模糊逻辑的分步式超折射地物回波识别方法的建立和效果分析[J]. 气象学报, 65(2): 252-260. Liu L P, Wu L L, Yang Y M, 2007. Development of fuzzy-logical two-step ground clutter detection algorithm [J]. Acta Meteor Sin, 65(2): 252-260(in Chinese).
- 刘旭阳, 黄裕文, 2023. 基于模糊逻辑的 X 波段双偏振雷达地物回波识别方法[J]. 科技和产业, 23(8): 241-246. Liu X Y, Huang Y W, 2023. Ground object echo recognition method of X-band dual-polarization radar based on fuzzy logic[J]. Sci Technol Ind, 23(8): 241-246(in Chinese).
- 刘宗庆, 王敏, 景号然, 等, 2021. 基于优化模糊逻辑的双线偏振天气雷达地物杂波识别算法研究[J]. 高原山地气象研究, 41(1): 90-96. Liu Z Q, Wang M, Jing H R, et al, 2021. Research on ground clutter identification algorithm of dual-polarization weather radar based on optimized fuzzy logic[J]. Plateau Mountain Meteor Res, 41(1): 90-96(in Chinese).
- 毛紫阳, 段崇雯, 成礼智, 等, 2006. 模糊特征在天气雷达反射率基数据质量控制中的应用[J]. 模糊系统与数学, 20(6): 136-142. Mao Z Y, Duan C W, Cheng L Z, et al, 2006. The application of fuzzy feature in technique to quality control CINRAD reflectivity data[J]. Fuzzy Syst Math, 20(6): 136-142(in Chinese).
- 尚淑丽, 顾正华, 赵世凯, 等, 2014. 基于模糊逻辑的水电工程生态效应综合评价[J]. 浙江大学学报(工学版), 48(9): 1603-1609. Shang S L, Gu Z H, Zhao S K, et al, 2014. Comprehensive evaluation of ecological effect of hydropower projects based on fuzzy logic[J]. J Zhejiang Univ Eng Sci, 48(9): 1603-1609(in Chinese).

- 苏添记,葛俊祥,2023. 新一代天气雷达风轮机杂波识别和剔除[J]. 海洋气象学报,43(3):45-58. Su T J, Ge J X, 2023. Wind turbine clutter identification and suppression for CINRAD[J]. J Mar Meteor, 43(3):45-58(in Chinese).
- 滕玉鹏,陈洪滨,马舒庆,等,2020. 天气雷达监测生物跨海迁飞方法[J]. 气象,46(7):938-947. Teng Y P, Chen H B, Ma S Q, et al, 2020. Weather radar identification of directional biological migrations across the sea[J]. Meteor Mon, 46(7):938-947(in Chinese).
- 田付友,郑永光,坚参扎西,等,2024. 融合物理解与模糊逻辑的分类强对流客观短期预报系统:(2)表现评估[J]. 气象,50(6):649-660. Tian F Y, Zheng Y G, Jian C Z X, et al, 2024. Forecasting system for short-term multi-category convective phenomena combining physical understanding and fuzzy logic part II: performance evaluation[J]. Meteor Mon, 50(6):649-660(in Chinese).
- 王德旺,黄宁立,谢潇,等,2014. 35 GHz 云雷达反射率因子数据的质量控制[J]. 气象科学,34(5):508-514. Wang D W, Huang N L, Xie X, et al, 2014. Quality control on reflectivity factor data of 35 GHz-cloud radar[J]. J Meteor Sci, 34(5):508-514(in Chinese).
- 王德旺,刘黎平,宗蓉,等,2015. 基于模糊逻辑的大气云粒子相态反演和效果分析[J]. 气象,41(2):171-181. Wang D W, Liu L P, Zong R, et al, 2015. Fuzzy logic method in retrieval atmospheric cloud particle phases and effect analysis[J]. Meteor Mon, 41(2):171-181(in Chinese).
- 魏万益,马舒庆,杨玲,等,2020. 长沙机场阵列天气雷达地物识别算法[J]. 应用气象学报,31(3):339-349. Wei W Y, Ma S Q, Yang L, et al, 2020. Ground clutter detection algorithm for array weather radar at Changsha Airport[J]. J Appl Meteor Sci, 31(3):339-349(in Chinese).
- 文浩,张乐坚,梁海河,等,2020. 基于模糊逻辑的新一代天气雷达径向干扰回波识别算法[J]. 气象学报,78(1):116-127. Wen H, Zhang L J, Liang H H, et al, 2020. Radial interference echo identification algorithm based on fuzzy logic for weather radar[J]. Acta Meteor Sin, 78(1):116-127(in Chinese).
- 吴涛,万玉发,沃伟锋,等,2013. SWAN 系统中雷达反射率因子质量控制算法及其应用[J]. 气象科技,41(5):809-817. Wu T, Wan Y F, Wo W F, et al, 2013. Design and application of radar reflectivity quality control algorithm in SWAN[J]. Meteor Sci Technol, 41(5):809-817(in Chinese).
- 谢季坚,刘承平,2006. 模糊数学方法及其应用:第 3 版[M]. 武汉:华中科技大学出版社. Xie J J, Liu C P, 2006. Fuzzy Mathematics Methods and Their Applications[M]. 3rd ed. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press(in Chinese).
- 徐舒扬,吴翀,刘黎平,2020. 双偏振雷达水凝物相态识别算法的参数改进[J]. 应用气象学报,31(3):350-360. Xu S Y, Wu C, Liu L P, 2020. Parameter improvements of hydrometeor classification algorithm for the dual-polarimetric radar[J]. J Appl Meteor Sci, 31(3):350-360(in Chinese).
- 杨川,2012. 新一代天气雷达资料质量分析和处理方法研究[D]. 成都:成都信息工程学院. Yang C, 2012. Study of method for radar data quality control with new generation weather radar[D]. Chengdu: Chengdu University of Information Technology (in Chinese).
- 杨纶标,高英仪,凌卫新,2011. 模糊数学原理及应用[M]. 广州:华南理工大学出版社. Yang L B, Gao Y Y, Ling W X, 2011. Principles and Applications of Fuzzy Mathematics[M]. Guangzhou: South China University of Technology Press(in Chinese).
- 俞小鼎,郑永光,2020. 中国当代强对流天气研究与业务进展[J]. 气象学报,78(3):391-418. Yu X D, Zheng Y G, 2020. Advances in severe convective weather research and operational service in China[J]. Acta Meteor Sin, 78(3):391-418(in Chinese).
- 张林,杨洪平,2018. S波段 WSR-88D 双偏振雷达观测非降水回波识别方法研究[J]. 气象,44(5):665-675. Zhang L, Yang H P, 2018. Non-precipitation identification technique on S-band WSR-88D polarization weather radar[J]. Meteor Mon, 44(5):665-675(in Chinese).
- 张帅,2022. 双偏振天气雷达杂波识别方法研究[D]. 南京:南京信息工程大学. Zhang S, 2022. Study on clutter identification method based on dual-polarization weather radar[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology(in Chinese).
- 张新峰,沈兰荪,2004. 模式识别及其在图像处理中的应用[J]. 测控技术,23(5):28-32. Zhang X F, Shen L S, 2004. Pattern recognition and its application in image processing[J]. Measure Control Tech, 23(5):28-32(in Chinese).
- 周浩亮,1994. 模糊数学基本理论及其应用[J]. 建井技术, (101):70-80,96. Zhou H L, 1994. Basic theory and application of fuzzy mathematics[J]. Mine Const Tech, (101):70-80,96(in Chinese).
- 周康辉,郑永光,王婷波,等,2017. 基于模糊逻辑的雷暴大风和非雷暴大风区分方法[J]. 气象,43(7):781-791. Zhou K H, Zheng Y G, Wang T B, et al, 2017. Fuzzy logic algorithm of thunderstorm gale identification using multisource data[J]. Meteor Mon, 43(7):781-791(in Chinese).
- 朱丹,谷军霞,师春香,等,2018. 新一代天气雷达布网设计的有效覆盖和地形遮挡分析[J]. 气象,44(11):1434-1444. Zhu D, Gu J X, Shi C X, et al, 2018. Analysis of effective coverage and terrain blockage for next generation radar network design[J]. Meteor Mon, 44(11):1434-1444(in Chinese).
- 朱亚平,刘健文,白洁,2007. 云分类中逐个修改聚类和模糊聚类分类性能的对比较研究[J]. 气象,33(2):15-21. Zhu Y P, Liu J W, Bai J, 2007. A comparative study on stepwise cluster and fuzzy cluster in cloud classification techniques[J]. Meteor Mon, 33(2):15-21(in Chinese).
- 宗蓉,陈超,潘国盛,2017. 基于模糊逻辑的双偏振多普勒雷达地物杂波抑制方法的初步应用[J]. 广东气象,39(6):56-59. Zong R, Chen C, Pan G S, 2017. Preliminary application of clutter suppression method for dual-polarization Doppler radar based on fuzzy logic[J]. Guangdong Meteor, 39(6):56-59(in Chinese).
- Atlam H F, Walters R J, Wills G B, et al, 2021. Fuzzy logic with expert judgment to implement an adaptive risk-based access control

- model for IoT[J]. *Mobile Networks Appli*,26(6):2545-2557.
- Berenguer M, Sempere-Torres D, Corral C, et al, 2006. A fuzzy logic technique for identifying nonprecipitating echoes in radar scans [J]. *J Atmos Oceanic Technol*,23(9):1157-1180.
- Buschow S, Friederichs P, 2021. Verification of boundary layer wind patterns in COSMO-REA2 using clear-air radar echoes [J]. *Geosci Model Dev*,14(11):6765-6780.
- Cho Y H, Lee G W, Kim K E, et al, 2006. Identification and removal of ground echoes and anomalous propagation using the characteristics of radar echoes[J]. *J Atmos Oceanic Technol*,23(9):1206-1222.
- Doviak R J, Zrnić D S, 2014. *Doppler Radar & Weather Observations [M]*. 2nd ed. New York : Academic Press.
- Droegemeier K K, Smith J D, Businger S, et al, 2000. Hydrological aspects of weather prediction and flood warnings: report of the ninth prospectus development team of the U. S. weather research program[J]. *Bull Am Meteor Soc*,81(11):2665-2680.
- Dufton D R L, Collier C G, 2015. Fuzzy logic filtering of radar reflectivity to remove non-meteorological echoes using dual polarization radar moments[J]. *Atmos Meas Tech*,8(10):3985-4000.
- Friedrich K, Germann U, Tabary P, 2009. Influence of ground clutter contamination on polarimetric radar parameters[J]. *J. Atmos. Oceanic Tech.* ,26,251-269.
- Gourley J J, Tabary P, Du Chatelet J P, 2007. A fuzzy logic algorithm for the separation of precipitating from nonprecipitating echoes using polarimetric radar observations [J]. *J Atmos Oceanic Technol*,24(8):1439-1451.
- Harrison D L, Scovell R W, Kitchen M, 2009. High-resolution precipitation estimates for hydrological uses[J]. *Proc Inst Civil Eng Water Manage*,162,125-135.
- Hubbert J C, Dixon M, Ellis S M, 2009. Weather radar ground clutter. Part II : real-time identification and filtering[J]. *J Atmos Oceanic Technol*,26(7):1181-1197.
- Jatau P, Melnikov V, Yu T Y, 2021. A machine learning approach for classifying bird and insect radar echoes with s-band polarimetric weather radar [J]. *J Atmos Oceanic Technol*, 38(10):1797-1812.
- Joss J, Lee R, 1995. The application of radar-gauge comparisons to operational precipitation profile corrections[J]. *J Appl Meteor Climatol*,34(12):2612-2630.
- Kessinger C, Ellis S, VanAndel J, 2003. The radar echo classifier: A fuzzy logic algorithm for the WSR-88D[C]//Proceedings of the 3rd Conference on Artificial Intelligence Applications to the Environmental Science. Long Beach: AMS.
- Kierzkowski A, Kisiel T, 2017. Evaluation of a security control lane with the application of fuzzy logic[J]. *Procedia Engineering*,187(187):656-663.
- Kilambi A, Fabry F, Meunier V, 2018. A simple and effective method for separating meteorological from nonmeteorological targets using dual-polarization data [J]. *J Atmos Oceanic Technol*, 35(7):1415-1424.
- Ko J H, Kim H K, Oh S K, 2015. Design of precipitation/non-precipitation pattern classification system based on neuro-fuzzy algorithm using meteorological radar data: instance classifier and echo classifier[J]. *The Transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers* ,64(7):1114-1124.
- Kollias P, Jo I, Borque P, et al, 2014. Scanning ARM cloud radars. Part II: data quality control and processing[J]. *J Atmos Oceanic Technol*,31(3):583-598.
- Krause J M, 2016. A simple algorithm to discriminate between meteorological and nonmeteorological radar echoes[J]. *J Atmos Oceanic Technol*,33(9):1875-1885.
- Kumjian M R, 2013. Principles and applications of dual-polarization weather radar. Part II : warm- and cold-season applications[J]. *J Operational Meteor*,1(20):243-264.
- Lakshmanan V, Fritz A, Smith T, et al, 2007. An automated technique to quality control radar reflectivity data[J]. *J Appl Meteor Climatol*,46(3):288-305.
- Lee S H, Howlett R J, Walters S D, 2004. Small engine control by fuzzy logic[J]. *J Intell Fuzzy Syst*,15(3):207-217.
- 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.
- Magaldi A V, Bech J, Lorente J, 2009. A multisource scheme based on NWP and MSG data to correct non-precipitating weather radar echoes[J]. *Meteor Atmos Phys*,105:121-132.
- Mazur R J, Lakshmanan V, Stumpf G J, 2004. Quality control of radar data to improve mesocyclone detection (Conference Paper) [J]. *Bull Am Meteor Soc*,1413-1422.
- Michelson D, Hansen B, Jacques D, et al, 2020. Monitoring the impacts of weather radar data quality control for quantitative application at the continental scale [J]. *Meteor Appl*, 27(4):e1929.
- Michelson D B, Sunhede D, 2004. Spurious weather radar echo identification and removal using multisource temperature information [J]. *Meteor Appl*,11(1):1-14.
- Ośródką K, Szturc J, 2022. Improvement in algorithms for quality control of weather radar data (RADVOL-QC system) [J]. *Atmos Meas Tech*,15(2):261-277.
- Pamment J A, Conway B J, 1998. Objective identification of echoes due to anomalous propagation in weather radar data[J]. *J Atmos Oceanic Technol*,15(1):98.
- Park H S, Ryzhkov A V, Zrnić D S, et al, 2009. The hydrometeor classification algorithm for the polarimetric WSR-88D: Description and application to an MCS[J]. *Wea Forecasting*, 24(3):730-748.
- Park S, Kim H A, Cha J W, et al, 2014. Analysis of quality control technique characteristics on single polarization radar data [J]. *Atmosphere*,24(1):77-87.
- Rauber R M, Nesbitt S W, 2018. *Radar Meteorology: A First Course [M]*. Hoboken, N J: John Wiley & Sons:232-248.

- Saïde P E, Krishna M, Ye X, et al, 2023. Estimating fire radiative power using weather radar products for wildfires[J]. *Geophys Res Lett*, 50(21):e2023GL104824.
- Sanchez-Rivas D, Rico-Ramirez M A, 2023. Towerpy: an open-source toolbox for processing polarimetric weather radar data[J]. *Environmental Modelling & Software*, 167:105746.
- Schuur T, Ryzhkov A, Heinselman P, 2003. Observations and classification of echoes with the polarimetric WSR-88 D radar[R]. Norman; NOAA.
- Serafin R J, Wilson J W, 2000. Operational weather radar in the United States: progress and opportunity[J]. *Bull Am Meteor Soc*, 81(3):501-518.
- Steiner M, Smith J A, 2002. Use of three-dimensional reflectivity structure for automated detection and removal of nonprecipitating echoes in radar data[J]. *J Atmos Oceanic Technol*, 19(5):673-686.
- VanAndel J, 2001. Radar echo classifier algorithm development using python[C]//30th International Conference on Radar Meteorology.
- Wang R, Mao H F, Cui K, et al, 2023. Quantification of migration birds based on polarimetric weather radar[J]. *Remote Sens*, 15(19):4809.
- Wu C, Liu L P, Chen C, et al, 2021. Challenges of the polarimetric update on operational radars in China-ground clutter contamination of weather radar observations[J]. *Remote Sens*, 13(2):217.
- Xia X L, Chen H N, He J Y, et al, 2019. Differential phase processing and data quality control for polarimetric weather radar in southern China[C]//2019 Photonics & Electromagnetics Research Symposium - Spring (PIERS-Spring). Rome; IEEE:2772-2776.
- Ye B Y, Lee G, Park H M, 2015. Identification and removal of non-meteorological echoes in dual-polarization radar data based on a fuzzy logic algorithm[J]. *Adv Atmos Sci*, 32(9):1217-1230.
- Zadeh L A, 1973. Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes[J]. *IEEE Trans Syst Man Cybern*, SMC-3(1):28-44.
- Zhang G F, Mahale V N, Putnam B J, et al, 2019. Current status and future challenges of weather radar polarimetry: bridging the gap between radar meteorology/hydrology/engineering and numerical weather prediction[J]. *Adv Atmos Sci*, 36(6):571-588.

(本文责编:俞卫平)