

双偏振X波段天气雷达在天气预报预警中的应用研究

次仁旦珍¹ 白玛德吉²

1. 西藏日喀则市吉隆县气象局 西藏 日喀则 857000

2. 南木林县气象局 西藏 日喀则 857000

摘要: 双偏振X波段天气雷达凭借短波长、高时空分辨率及双偏振观测优势,在天气预报预警中发挥关键作用。通过提取差分反射率、差分传播相移率及相关系数等参量,可精准识别降水类型与强度,支撑中小尺度对流系统监测、强降水定量预报及灾害性天气预警。本文系统梳理其核心特性、数据处理技术及在预报预警中的应用路径,提出基于多参量融合的预警指标体系与精准度提升策略,为构建高密度、立体化气象监测网络提供理论支撑。

关键词: 双偏振X波段雷达;天气预报;气象预警;偏振参量;中小尺度对流

引言:传统天气雷达受波长限制,对中小尺度天气系统的监测能力不足,且单偏振观测难以区分降水粒子相态,导致灾害预警时效性与精准度受限。双偏振X波段天气雷达通过融合短波长与双偏振技术,以8-12GHz频段实现高空间分辨率(可达75米)与30秒级时间分辨率,可清晰捕捉微下击暴流、龙卷涡旋等微弱信号。其核心偏振参量(ZDR、KDP、CC)通过量化降水粒子扁率、浓度及相态混合程度,为降水类型识别与强度估算提供物理依据。

1 双偏振X波段天气雷达核心特性与观测原理

1.1 双偏振X波段天气雷达的频段特性与优势

双偏振X波段天气雷达采用8至12GHz的短波长频段,这一频段赋予独特的观测优势。相较于传统S波段(2-4GHz)与C波段(4-8GHz)雷达,X波段雷达的波长更短,天线尺寸更小,设备部署灵活性显著提升,尤其适合城市密集区或地形复杂区域的观测需求^[1]。短波长特性使其具备更高的空间分辨率,能够捕捉尺度更小的天气系统,如微下击暴流、龙卷涡旋等中小尺度强对流现象。同时,X波段雷达的脉冲宽度更窄,时间分辨率可达30秒级,可实时追踪快速演变的天气过程,为短时临近预警提供关键数据支持。X波段雷达的硬件成本与运维成本较低,易于构建高密度观测网络,弥补大范围监测的空白区域。

1.2 双偏振观测的核心原理

双偏振观测的核心在于同时发射水平偏振波与垂直偏振波,并通过接收后向散射信号提取降水粒子的形态与相态信息。水平偏振波(H波)与垂直偏振波(V波)在传播过程中与降水粒子相互作用,产生不同的散射特性。例如,扁平雨滴对水平偏振波的散射强度高于垂直偏振波,而球形冰晶的散射特性则接近各向同性。

通过分析两种偏振波的回波差异,可推导出多个关键参量:差分反射率(ZDR)反映降水粒子扁率,值越大表明雨滴越扁平;差分传播相移率(KDP)与降水粒子浓度及含水量正相关,用于定量估测降水强度;相关系数(CC,即 ρ_{hv})表征两种偏振波回波的相似程度,值越低说明降水相态混合越复杂,如雨雪混合或冰雹夹杂。这些参量共同构成降水粒子的“指纹信息”,为精准识别降水类型与强度提供物理依据。

1.3 双偏振X波段雷达与其他波段雷达的观测差异

双偏振X波段雷达与S/C波段雷达的观测差异主要体现在探测目标与适用场景上。S波段雷达波长较长,穿透力强,适合监测大范围降水系统,但对小尺度天气现象的分辨率不足;C波段雷达在探测范围与分辨率间取得平衡,但硬件成本较高,组网密度受限。双偏振X波段雷达则通过短波长与双偏振技术的结合,在中小尺度天气监测中表现突出。其高时空分辨率可清晰刻画雷暴单体结构,而双偏振参量进一步揭示降水粒子相态与动力特征,例如通过ZDR与CC参数区分冰雹与雨滴,或通过KDP参数追踪短时强降水中心。此外,X波段雷达的轻量化设计支持快速部署,可灵活嵌入现有观测网络,形成“低空-地面”立体监测体系,弥补传统雷达的观测盲区。

2 双偏振X波段天气雷达数据处理关键技术

2.1 原始观测数据的质量控制

双偏振X波段天气雷达的原始数据易受环境噪声、电磁干扰及设备误差影响,需通过质量控制技术提升数据可靠性^[2]。噪声抑制技术主要针对地物杂波与随机噪声展开,例如采用自适应滤波算法对低仰角回波进行动态滤波,通过设定阈值区分降水信号与固定地物回波;针对电磁干扰,可利用频谱分析技术识别异常频段信号并实

施剔除。干扰剔除后，数据缺测问题需通过时空插值方法补全，如基于邻近雷达观测数据的协同插值，或利用历史数据构建时空模型进行动态填补。一致性校准则聚焦于多雷达组网观测时的数据匹配问题，通过统一坐标系转换与辐射定标，消除不同设备因发射功率、接收灵敏度差异导致的观测偏差，确保数据在空间与时间维度上的连续性。

2.2 偏振参量的反演与融合方法

核心偏振参量的反演需解决多参数耦合与信号衰减问题。差分反射率（ZDR）的反演需校正天线波束宽度与发射功率波动的影响，采用动态标定技术实时修正系统误差；差分传播相移率（KDP）的反演则需通过相位解缠算法处理相位折叠现象，结合信号噪声比（SNR）筛选有效数据区间。多源偏振数据融合策略强调参量互补性，例如将X波段雷达的高分辨率ZDR数据与S波段雷达的长距离探测能力结合，通过加权平均或机器学习模型优化融合权重，提升降水相态识别的鲁棒性。融合过程需考虑不同波段雷达的观测视角差异，通过三维变分同化技术将多源数据映射至统一大气模型，实现从二维参量到三维结构的重构。

2.3 气象目标的识别与分类技术

气象目标识别依赖偏振参量的物理特征差异。冰雹与雨滴的区分可通过ZDR与相关系数（CC）的联合分析实现：冰雹因内部结构复杂导致CC值较低，而扁平雨滴的ZDR值显著高于球形冰雹。龙卷涡旋的识别则聚焦于多普勒速度与偏振参量的协同特征，例如通过速度涡度计算定位旋转中心，结合低CC值区域确定涡旋边界。对于混合相态降水，需引入模糊逻辑分类算法，将ZDR、KDP、CC等参量输入训练好的神经网络模型，输出降水类型概率分布。分类精度提升还需考虑环境因素影响，如温度层结对降水相态的调控作用，通过引入数值预报背景场信息优化分类阈值，实现从单一参量判断到多因素综合决策的升级。

3 双偏振 X 波段天气雷达在天气预报中的应用

3.1 中小尺度对流系统的监测与预报

双偏振X波段天气雷达凭借高时空分辨率特性，在中小尺度对流系统监测中发挥关键作用。对流系统初生阶段常伴随弱回波区与上升气流核，传统雷达易漏测此类微弱信号，而双偏振雷达通过差分反射率（ZDR）与相关系数（CC）的联合分析，可捕捉雨滴扁平化特征与相态混合迹象，从而提前识别对流初生。例如，低值ZDR与高值CC的组合常对应上升气流区，结合多普勒速度涡度计算，可进一步定位对流核位置^[1]。预报时效提升依赖

数据快速更新与算法优化，X波段雷达30秒级的时间分辨率支持实时追踪对流单体演变，配合机器学习模型对历史数据的学习，可延长有效预警时间至30分钟以上。对流系统发展强度与移动路径的预报则需融合多源数据，通过将雷达观测的反射率因子、垂直积分液态水含量（VIL）与数值模式输出的环境场参数结合，构建动力-热力耦合模型，动态修正对流系统移动轨迹与强度变化趋势。

3.2 强降水天气的定量预报应用

强降水定量预报依赖偏振参量与降水物理过程的深度关联。基于ZDR与差分传播相移率（KDP）的降水强度估算模型，通过建立参量与雨滴谱分布的统计关系，可实现分钟级降水率更新。ZDR反映雨滴扁率，大值对应大粒径雨滴，而KDP与降水粒子浓度正相关，二者协同可区分层状云降水与对流云降水，优化不同降水类型的估算精度。降水时空分布的精细化预报需结合雷达组网观测与数值模式输出，通过变分同化技术将多部X波段雷达的观测数据融入高分辨率数值模式，生成覆盖城市尺度的降水预报产品。利用深度学习模型对历史降水事件的学习，可挖掘偏振参量与降水时空分布的非线性关系，进一步提升预报分辨率至1公里以内，满足城市内涝预警需求。

3.3 其他灾害性天气的预报支撑

雷暴大风预报指标提取聚焦于中层径向速度与偏振参量的协同特征。强风区常伴随速度辐合与垂直风切变，结合低值CC（表明降水粒子相态复杂）与高值KDP（反映粒子浓度高），可定位大风核心区。冰雹等固态降水预报则依赖ZDR与CC的联合诊断，冰雹因内部结构复杂导致CC值显著低于雨滴，而ZDR值接近零或略负，通过设定双参量阈值可实现冰雹识别。进一步挖掘固态降水信号需引入环境场参数，如零度层高度与融化层厚度，当雷达观测到高反射率因子（ $> 55\text{dBZ}$ ）与低CC值区域位于零度层以下时，可判定冰雹生成概率。通过分析KDP的垂直梯度变化，可推断冰雹生长层高度，为冰雹直径估算提供依据，支撑灾害等级划分与防灾减灾决策。

4 双偏振 X 波段天气雷达在气象预警中的应用

4.1 预警指标体系的构建

双偏振X波段天气雷达通过提取降水粒子的物理特征，为灾害性天气预警提供量化指标，在气象预警领域发挥着关键作用^[4]。基于偏振参量的预警阈值确定需结合降水类型与环境条件，例如冰雹预警中，低相关系数（CC值低于0.85）与差分反射率（ZDR接近零或略负）的组合常被设定为阈值，这精准反映了冰雹内部结构复

杂且球形度低的特点。雷暴大风预警则关注中层径向速度辐合与高差分传播相移率(KDP值超过 $0.5^{\circ}/\text{km}$)，前者指示气流强烈汇聚，后者表明降水粒子浓度高且可能伴随强下沉气流。多参量融合的预警判据构建强调参量间的协同性，如将ZDR、KDP、CC与反射率因子(Z)结合，通过逻辑回归或决策树模型生成综合预警指数，当指数超过设定值时触发预警，可显著降低单一参量误报率，提升预警的可靠性与准确性。

4.2 预警时效与精准度的提升路径

提升双偏振X波段天气雷达在气象预警中的时效与精准度，是当前气象研究的重要方向。短时临近预警的触发机制优化依赖数据快速更新与算法迭代。双偏振X波段雷达30秒级的时间分辨率支持实时追踪天气系统演变，结合机器学习模型对历史预警事件的学习，可动态调整触发阈值。例如，当雷达检测到ZDR值在10分钟内从 0.5dB 降至 -0.2dB ，同时KDP值从 $0.2^{\circ}/\text{km}$ 升至 $0.8^{\circ}/\text{km}$ 时，系统自动判定为冰雹生成前兆并触发预警，较传统方法提前15-20分钟。预警范围的精准界定需融合地理信息系统(GIS)与雷达观测数据，通过构建降水粒子散射模型，模拟不同地形对雷达波传播的影响，修正预警区域边界。例如，山区因地形遮挡可能导致雷达低仰角观测盲区，需结合邻近雷达数据或卫星云图进行空间插值，确保预警范围覆盖完整，为灾害防御争取宝贵时间。

4.3 不同灾害类型预警中的偏振参量应用侧重

鉴于不同灾害类型在形成机制和特征表现上的差异，在气象预警中需针对性地优化偏振参量组合。不同灾害类型对偏振参量的响应存在差异，需针对性优化参数组合。冰雹预警侧重CC与ZDR的联合分析，CC值低于0.8且ZDR接近零的区域通常对应冰雹核心区，能精准定位冰雹可能出现的区域。雷暴大风预警则依赖速度场与KDP的协同特征，强风区常伴随速度辐合与高KDP值，反映降水粒子被强气流裹挟的特征，有助于提前感知大风来袭^[5]。短时强降水预警需结合ZDR与KDP的动

态变化，当ZDR值随高度升高而增大(表明雨滴增长)且KDP值超过 $0.3^{\circ}/\text{km}$ 时，预示降水强度将快速增强。此外，固态降水与液态降水的混合相态预警需引入环境场参数，如零度层高度与湿度垂直分布，当雷达观测到高反射率因子($>50\text{dBZ}$)与低CC值区域位于零度层以下时，可判定为冰雹或霰混合降水，为灾害等级划分提供依据，提高预警的针对性。

结束语

双偏振X波段天气雷达通过高时空分辨率观测与偏振参量反演技术，实现了对中小尺度天气系统的精细化监测与灾害性天气的精准预警。其数据处理流程中，质量控制、参量融合与目标分类技术的协同应用，显著提升了数据可靠性与预警指标的鲁棒性。该雷达在冰雹、雷暴大风等灾害预警中可提前识别关键特征信号，结合地理信息系统优化预警范围，为防灾减灾决策提供了科学依据。随着多源数据融合与机器学习技术的深入应用，双偏振X波段雷达的监测能力将持续优化，进一步夯实气象灾害预警的技术基础。

参考文献

- [1]张昕,陈超,顾溟清,等.盐城市X波段全固态双偏振天气雷达在探测短时强对流天气中的应用[J].电子元器件与信息技术,2022,6(3):194-196.
- [2]宋歌,雷蕾,马建立,等.北京强对流天气中X波段双偏振雷达特征及应用[J].中低纬山地气象,2022,46(6):63-69.
- [3]李思腾,马建立,罗丽,等.研发睿图-雷达系统支撑气象预警预报[J].科技成果管理与研究,2025,20(9):64-65.
- [4]吴江,德庆措姆,卡卓,等.X波段天气雷达在西藏灾害性天气预报服务中的运用[J].农业灾害研究,2024,14(11):320-322.
- [5]王雁翔,罗淋元,熊彬.“X波段”雷达在灾害性天气预报及服务中的应用效果评估及建议[J].气候变化研究快报,2024,13(3):497-500.