Climate Change Research Letters 气候变化研究快报, 2026, 15(6), 1285-1295
Published Online November 2026 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/ccrl
https://doi.org/10.12677/ccrl.2026.156134

河东机场雷暴与典型降水过程的双偏振雷达特征分析

潘　佳

中国民用航空宁夏空中交通管理分局气象台，宁夏　银川

收稿日期：2026年10月9日；录用日期：2026年11月9日；发布日期：2026年11月18日

摘　要

本文利用河东机场长期雷暴日统计、2022~2024年降水过程分类记录及三次典型降水过程的双偏振雷达图像和地面观测，描述雷暴时空分布，并比较强雷雨伴小冰雹、中到大雪和雨夹雪过程的回波特征。长期统计显示，6~8月雷暴日约占全年总数的71.5%，7月平均雷暴日最多；2022~2024年记录的降水过程以强降雨和中度降雨为主。典型个例中，强雷雨伴小冰雹表现为强反射率核心、偏高Z_DR及局地偏低ρ_HV；中到大雪回波范围较广且相对稳定，Z_DR较小、ρ_HV较高；雨夹雪个例的Z_DR介于雨雪特征之间且ρ_HV偏低。由于雷达资料主要为产品截图，本文仅对图示的Z_H、Z_DR、K_DP和ρ_HV作定性比较，图3(c)、图4(c)和图5(c)直接显示K_DP产品；由于缺少原始体扫和处理记录，本文仅作定性判读，不进行逐格点重处理或定量统计。表4所列数值范围依据河东机场日常业务中对雷达回波特征的统计整理形成，属于业务试用参考范围；由于本文未取得该业务统计的完整样本清单、样本量及独立检验结果，尚不能称为经独立验证的正式预报阈值。研究可为河东机场建立双偏振雷达判识流程提供个例依据，阈值业务化仍需全量雷达和地面观测配对检验。

关键词

河东机场，双偏振雷达，雷暴，降水相态，冰雹，临近预报

Dual-Polarimetric Radar Characteristics of Thunderstorms and Typical Precipitation Events at Yinchuan Hedong International Airport

Jia Pan

Meteorological Observatory, Ningxia Air Traffic Control Sub-Bureau, Civil Aviation Administration of China, Yinchuan Ningxia

文章引用: 潘佳. 河东机场雷暴与典型降水过程的双偏振雷达特征分析[J]. 气候变化研究快报, 2026, 15(6): 1285-1295.
DOI:10.12677/ccrl.2026.156134

Received: October 9, 2026; accepted: November 9, 2026; published: November 18, 2026

Abstract

This study describes the temporal distribution of thunderstorms at Yinchuan Hedong International Airport and compares dual-polarimetric radar signatures in three precipitation cases, using long-term thunderstorm-day records, precipitation-event classifications for 2022~2024, radar product images, and surface observations. Thunderstorm days during June-August accounted for approximately 71.5% of the annual total, with the highest monthly mean in July. The 35 precipitation-process records for 2022~2024 were dominated by heavy and moderate rain. The hail-producing convective case showed a strong reflectivity core, locally enhanced differential reflectivity (Z_DR), and locally reduced copolar correlation coefficient (ρ_HV); the snow case showed broader and more persistent echoes with lower Z_DR and higher ρ_HV; and the rain–snow case exhibited transitional signatures. Because the available radar data are primarily product images, the analysis is qualitative and is limited to Z_H, Z_DR, specific differential phase (K_DP), and ρ_HV. Figure 3(c), Figure 4(c), and Figure 5(c) show show K_DP products in degrees per kilometer; the underlying volumetric data and processing records were unavailable for reprocessing or quantitative statistics. The precipitation-type ranges in Table 4 were compiled from routine operational statistics of radar echo characteristics at the airport and are presented as trial reference ranges. The underlying sample inventory and independent verification are not available in this study; therefore, the ranges should not be interpreted as independently validated forecast thresholds.

Keywords

Yinchuan Hedong International Airport, Dual-Polarization Weather Radar, Thunderstorm, Precipitation Phase, Hail, Nowcasting

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 引言

雷暴、冰雹、降雪和雨雪相态转换等天气对机场运行安全、航班调度和地面保障具有直接影响。传统天气雷达主要依靠反射率因子判断回波强度，能够较好地识别强对流回波的空间范围，但在降水粒子相态判识、融化层定位、雨雪转换区识别和定量降水估测方面仍存在局限。双偏振天气雷达通过同时获取水平和垂直偏振方向的回波信息，为分析水凝物的形状、尺度、相态、取向和混合程度提供了额外观测约束[1]-[5]。

双偏振雷达的物理基础在于降水粒子的电磁散射特性与其形状、介电常数、姿态和相态密切相关。液态雨滴在下落过程中通常呈扁椭球形，因而水平和垂直偏振回波存在差异；冰晶、聚合雪、霰和冰雹则因密度、形态及取向差异而表现出不同的偏振响应[1] [3]-[5]。Z_DR 主要反映粒子水平与垂直尺度差异，CC 反映一个分辨率体内不同偏振回波的一致性，K_DP 与传播路径上的液态水含量及强降水强度密切相关。将这些变量联合使用，可从“回波强度–粒子形状–粒子混合程度–液态水含量”四个维度增强降水识别能力[6]-[10]。

国外研究已经形成了较为系统的水凝物分类和定量降水估测技术体系。基于规则阈值、模糊逻辑和

贝叶斯方法的分类算法能够在业务雷达网中识别雨、雪、霰、冰雹和混合相态粒子，并为定量降水估测提供相态约束[7]-[13]。针对不同雷达波段，研究者进一步考虑了衰减、非瑞利散射、融化层和观测几何等因素，发展了适用于 S、C 和 X 波段的分类方法[11]-[15]。近年来，聚类、半监督学习和准垂直廓线分类方法逐步用于减少预设类别和经验阈值带来的偏差，为从连续观测资料中识别混合水凝物提供了新的思路[16]-[19]。

国内双偏振雷达研究起步稍晚，但已在雷达测雨、差分相位质量控制、冰雹识别、水凝物相态分类和强对流微物理结构分析等方面形成了较丰富成果。早期研究主要关注双线偏振参数对降雨估测的改进，以及不同测雨关系在不同降水条件下的适用性[20]-[24]；随后，研究重点拓展到 X 波段和 C 波段雷达的差分相位质量控制、衰减订正和业务化降水估测[25]-[27]。针对我国不同区域的强对流、冰雹和冬季降雪过程，已有研究揭示了 Z_DR 柱、K_DP 增强区、低 CC 区、融化层结构及水凝物相态转换与冰雹、极端降水之间的联系[28]-[34]。这些成果说明，双偏振雷达参数具有较好的区域应用潜力，但其判识阈值仍会受到雷达波段、气候背景、地形、粒子谱和质量控制方法的影响。

近年的研究进一步表明，双偏振雷达应用正在从经验阈值判识向“物理约束、多源观测与数据驱动相结合”的方向发展。偏振定量降水估测综述指出，Z_H、Z_DR 和 K_DP 的组合关系需要根据降水相态、雷达波段和质量控制水平进行选择[35]；深度学习和卷积神经网络也开始用于定量降水估测和严重冰雹识别，但其训练样本、区域迁移能力和可解释性仍是业务应用中的关键问题[32] [36]。对于雨雪转换过程，融化层高度、近地层温度和地面天气现象具有重要约束作用，单一雷达变量容易在混合相态和弱回波条件下产生误判[34]。因此，面向机场运行保障的研究需要同时关注雷达变量的物理意义、地面观测的一致性和预警信息的可操作性。

河东机场已有长期雷暴统计和典型降水过程双偏振雷达资料，但现有材料尚不能支持完整的本地水凝物分类算法或预报技巧评估。本文的目标是开展描述性综合分析：统计雷暴年际、月际变化及 2022~2024 年降水过程分类次数；比较三个有地面天气记录的典型过程在可见雷达产品中的回波表现；据此提出待检验的机场预报关注信号。本文不将个例定性特征表述为普适阈值，也不声称已验证预报命中率。

2. 资料与方法

2.1. 资料来源与研究对象

研究资料包括 1998~2024 年河东机场雷暴日统计序列、2022~2024 年按降水类型整理的过程记录、典型过程双偏振雷达产品及机场地面观测/METAR 报文。表 2 中三个年份的过程记录数分别为 8、10 和 17 次(合计 35 次)；这些计数按原始资料中的过程分类统计，本文未获得统一的独立事件定义、完整降水量或影响时长。典型个例按资料可用性选取 2022 年 7 月 1 日强雷雨伴小冰雹、2024 年 11 月 24 日中到大雪和 2023 年 4 月 20 日雨夹雪。

河东机场 C 波段全相双偏振双通道多普勒天气雷达位于宁夏回族自治区灵武市临河镇银川河东机场内，中心坐标为东经 106˚23′24.383″、北纬 38˚19′49.474″。系统支持 PPI (平面位置扫描)、RHI (距离高度扫描)和 VOL (体扫)；方位覆盖 0~360˚，VOL 体扫采用 0.5˚、1.45˚、2.4˚、3.35˚、4.3˚、6.0˚、9.9˚、14.6˚和 19.5˚共 9 个仰角，常规体扫时间约 6 min。

部分雷达资料仅以业务产品截图保存，缺少原始体扫、完整站点与扫描参数、质量控制流程及逐格点变量值。因此，图 3~5 只用于描述图示变量的空间形态；除资料明确记载的反射率峰值外，不从截图反演变量统计量。图 3(c)、图 4(c)和图 5(c)面板色标单位为˚·km^{-1}，显示的是差分相移率 K_DP 产品，而非差分传播相移 Φ_DP。由于缺少原始体扫及处理记录，本文仅作图像层面的定性判读，不进行逐格点重处理和定量统计。

2.2. 双偏振雷达变量及判识思路

本文采用的主要双偏振雷达变量及其物理意义、分析用途见表 1。

Table 1. Major dual-polarimetric radar variables, physical meanings, and applications in this study
表 1. 主要双偏振雷达变量、物理含义及判识用途

变量	物理含义	本文中的判识用途
Z_H	水平偏振反射率因子	反映回波强弱，通常与粒子尺度、数浓度和介电常数共同有关；强降雨和冰雹过程可出现较高值。
Z_DR	差分反射率	反映粒子水平与垂直尺度差异；较大的雨滴、扁平液态水滴或部分非球形大粒子可使其增大。
CC(ρ_HV)	共极化相关系数	衡量水平、垂直偏振回波的一致性；相态混合、粒子形态差异增大时通常降低。
Φ_DP	差分传播相移	沿传播路径累积的相位差；图 3(c)、图 4(c)和图 5(c)显示其距离变化率 K_DP。
K_DP	差分相移率	差分传播相移 Φ_DP 沿距离方向的变化率，单位为°·km^{-1}；图 3(c)、图 4(c)和图 5(c)显示该业务产品，本文仅作定性图像判读。

2.3. 分析流程

首先统计雷暴日和降水过程分类次数；其次结合地面天气记录，分析三个典型过程的 Z_H、Z_DR、K_DP 和 ρ_HV 产品图像；最后将图像特征与温度、能见度及 METAR 现象对照，归纳机场业务可关注的定性信号。由于缺少逐格点原始数据，本文不进行 K_DP 样本分布估计、阈值拟合、分类准确率计算或预报技巧评分。

3. 结果与分析

3.1. 雷暴天气的年际和月际变化

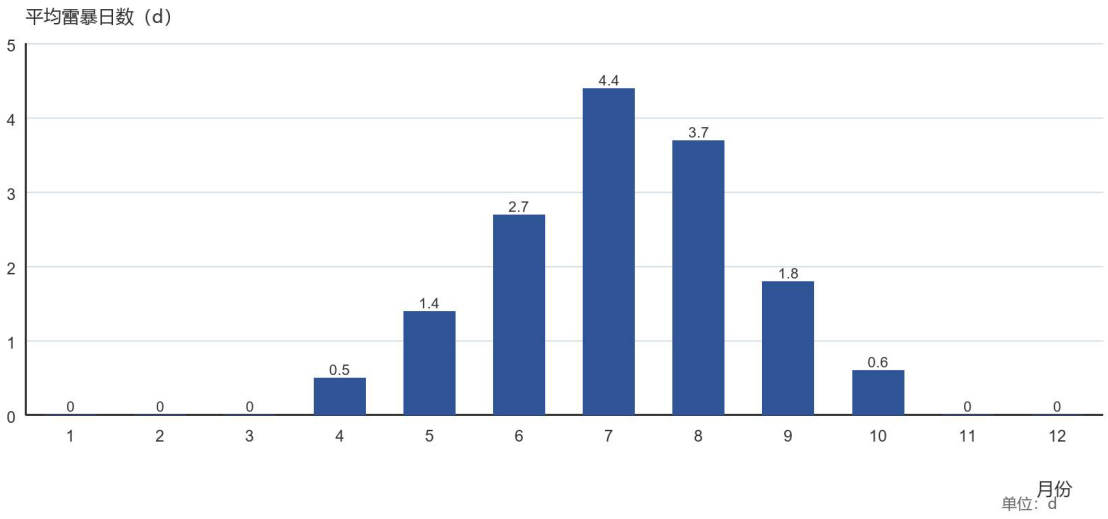


Figure 1. Monthly distribution of the long-term mean number of thunderstorm days at Yinchuan Hedong International Airport (unit: days; values above bars indicate monthly means)
图 1. 河东机场长期平均雷暴日数的月变化(单位：d；柱顶数字为月平均值)

如图 1 所示，河东机场雷暴具有明显的季节集中性。长期统计表明，6~8 月出现的雷暴日约占全年总雷暴日的 71.5%，其中 7 月平均雷暴日最多，约为 4.4 日；8 月和 6 月分别约为 3.7 日和 2.7 日。5 月和 9 月仍有一定雷暴活动，10 月以后明显减少。该分布与暖季太阳辐射增强、近地层热力不稳定加大以及对流云活动增多相一致，说明雷暴监测和航空气象保障应将 6~8 月作为重点时段。

如图 2 所示，河东机场年平均雷暴日约为 15.1 日，不同年份之间差异明显。原始统计序列中，2023 年雷暴日数最多，为 29 日；2003 年较少，为 4 日；2022 年雷暴日数为 13 日，2024 年雷暴日数为 24 日，处于较高水平。年际变化呈波动特征，说明雷暴活动受当年环流背景、低层水汽条件、热力不稳定和局地地形辐合等多因素共同影响。业务预报中应避免将多年平均值作为单一年份的固定气候阈值，而应结合当年汛期环流形势和短期天气尺度系统进行订正。

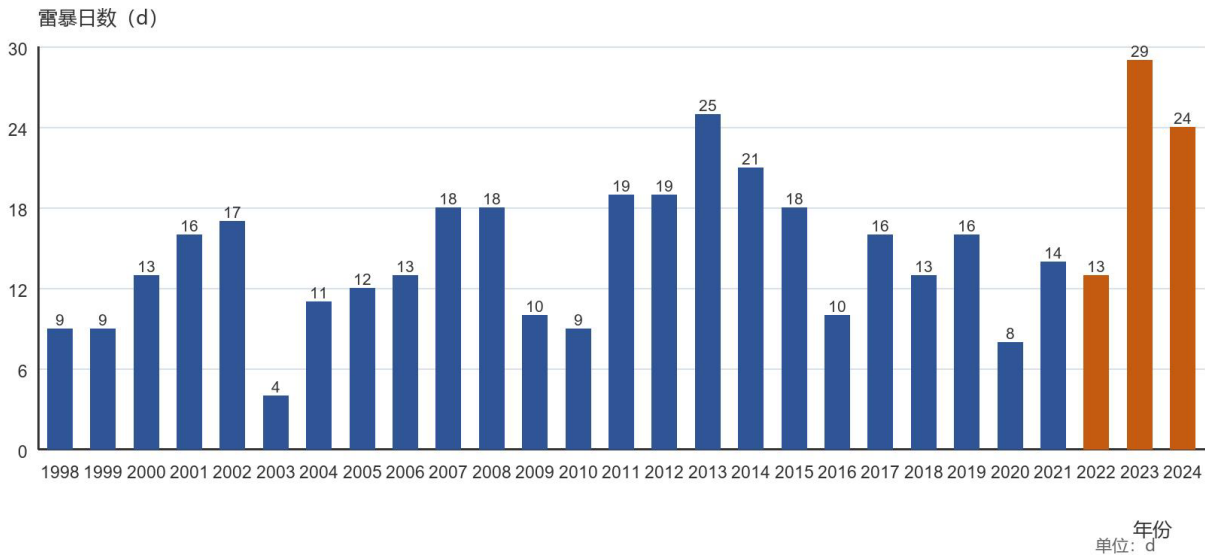


Figure 2. Interannual variation in thunderstorm days at Yinchuan Hedong International Airport (unit: days; orange bars indicate the latest three years in the record)
图 2. 河东机场雷暴日数的年际变化(单位：d；橙色柱表示最近 3 个统计年份)

3.2. 不同降水类型的发生特征

表 2 显示，2022~2024 年原始分类记录共 35 次，其中强降雨 12 次、中度降雨 11 次、小雪 7 次、雨夹雪 2 次、大雪 1 次、冰雹 1 次、中雪 1 次。强降雨和中度降雨三年均有记录，2024 年分别为 6 次和 5 次；小雪记录数最多。该表反映的是资料记录中的过程分类频次，未按降水量、持续时间或独立天气系统进行标准化，故不能据此推断降水强度分布或发生概率。

Table 2. Numbers of precipitation processes by type at Yinchuan Hedong international airport, 2022~2024
表 2. 2022~2024 年河东机场不同类型降水过程次数

年份	小雪	中雪	大雪	雨夹雪	冰雹	强降雨	中度降雨	合计
2022	1	0	0	0	1	4	2	8
2023	2	1	0	1	0	2	4	10
2024	4	0	1	1	0	6	5	17

3.3. 典型降水过程的双偏振雷达特征

3.3.1. 强雷雨伴小冰雹过程

如图 3 所示，2022 年 7 月 1 日强雷雨伴小冰雹过程中，半小时内先后出现弱雷雨、小冰雹伴中度降水以及小冰雹伴强降水。雷达反射率图显示，雷暴中心反射率最高约为 65 dBZ，强回波区范围较大，并在一定时段内保持相对稳定。该回波强度说明云内存在较大的水凝物和较强的上升运动，但仅凭反射率仍难以区分大雨滴、冰雹及雨雹混合粒子。

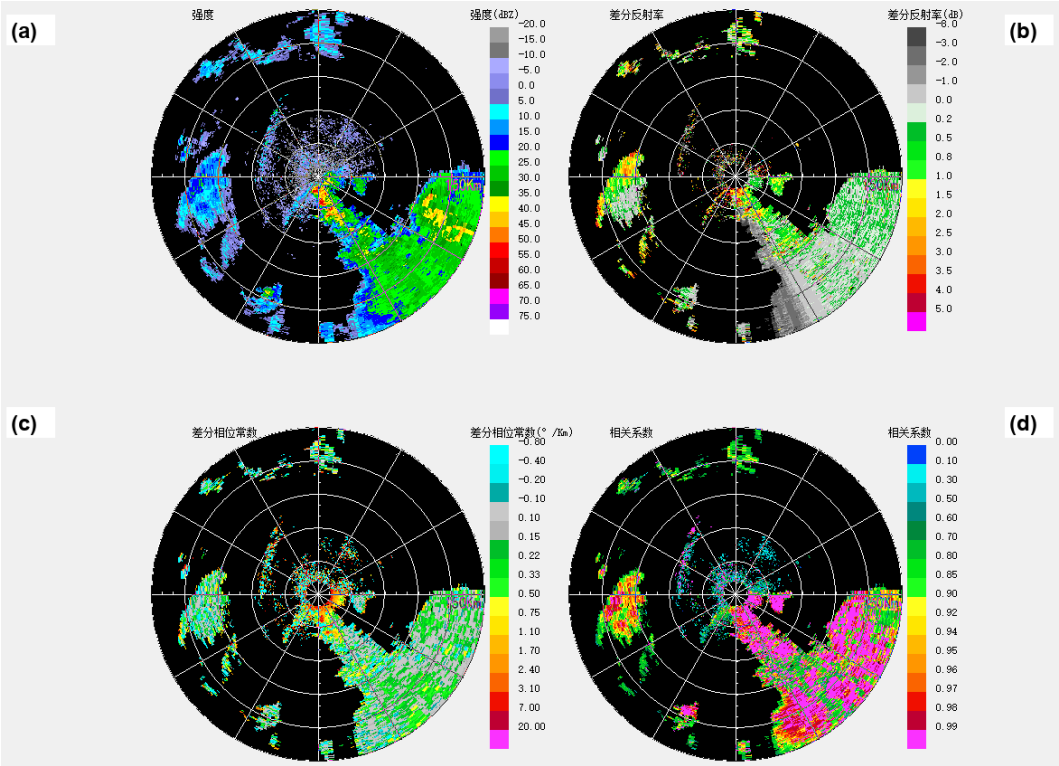


Figure 3. Dual-polarimetric radar products for the severe thunderstorm with small hail on 1 July 2022: (a) Z_H; (b) Z_DR; (c) K_DP; and (d) ρ_HV. Units are dBZ, dB, degrees per kilometer, and dimensionless, respectively
图 3. 2022 年 7 月 1 日强雷雨伴小冰雹过程的双偏振雷达产品：(a) Z_H；(b) Z_DR；(c) K_DP；(d) ρ_HV。单位分别为 dBZ、dB、°·km^{-1} 和无量纲

图 3 所示 Z_DR 在强回波附近偏高，ρ_HV 局地偏低，表明观测体内粒子散射特性存在差异，与雨滴、冰雹或其他固态水凝物混合的情形相容。图 3(c)直接显示 K_DP 产品图像，色标单位°·km^{-1}。受限于原始体扫和质量控制记录缺失，本文仅对其空间分布作定性描述，不据截图进行逐格点统计或反演液态水含量。结合约 65 dBZ 的反射率峰值及地面小冰雹记录，可将强回波核心与偏振不均一作为对流和冰雹风险的联合提示，但不能视为冰雹的充分或必要判据。

3.3.2. 中到大雪过程

如图 4 所示，2024 年 11 月 24 日中到大雪过程中，反射率整体较低，回波分布较广且相对稳定；Z_DR 偏低、ρ_HV 较高。该组合与以雪粒子为主且回波组成相对均一的情况相符。图 4(c)显示 K_DP 产品的空间分布。由于缺少原始体扫及处理记录，本文不进行数值统计，也不将定性图像直接转化为雪强阈值。

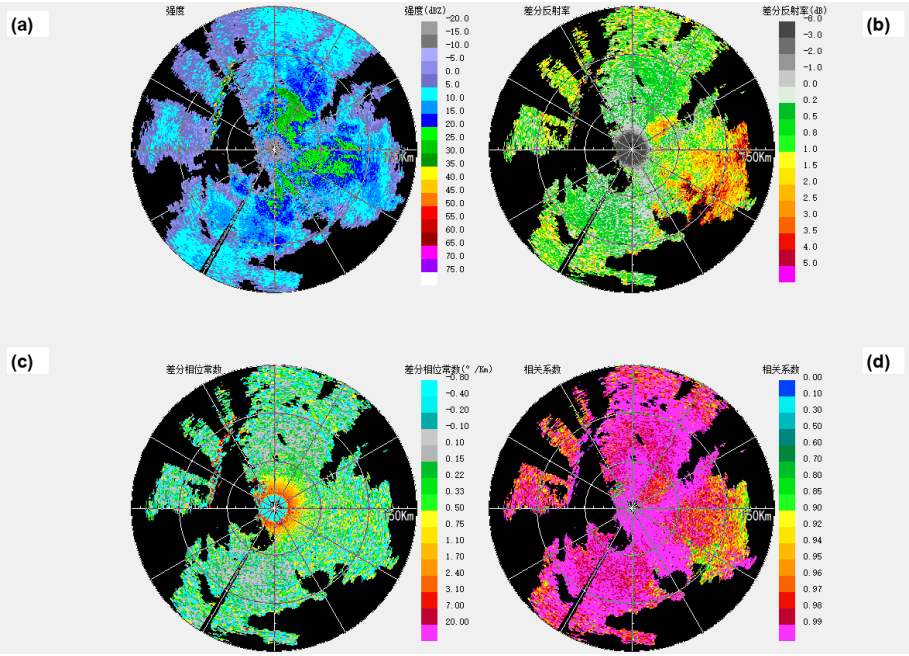


Figure 4. Dual-polarimetric radar products for the moderate-to-heavy snow event on 24 November 2024: (a) Z_H; (b) Z_DR; (c) K_DP; and (d) ρ_HV. Units are dBZ, dB, degrees per kilometer, and dimensionless, respectively
图 4. 2024 年 11 月 24 日中到大雪过程的双偏振雷达产品：(a) Z_H；(b) Z_DR；(c) K_DP；(d) ρ_HV。单位分别为 dBZ、dB、°·km^{-1} 和无量纲

3.3.3. 雨夹雪过程

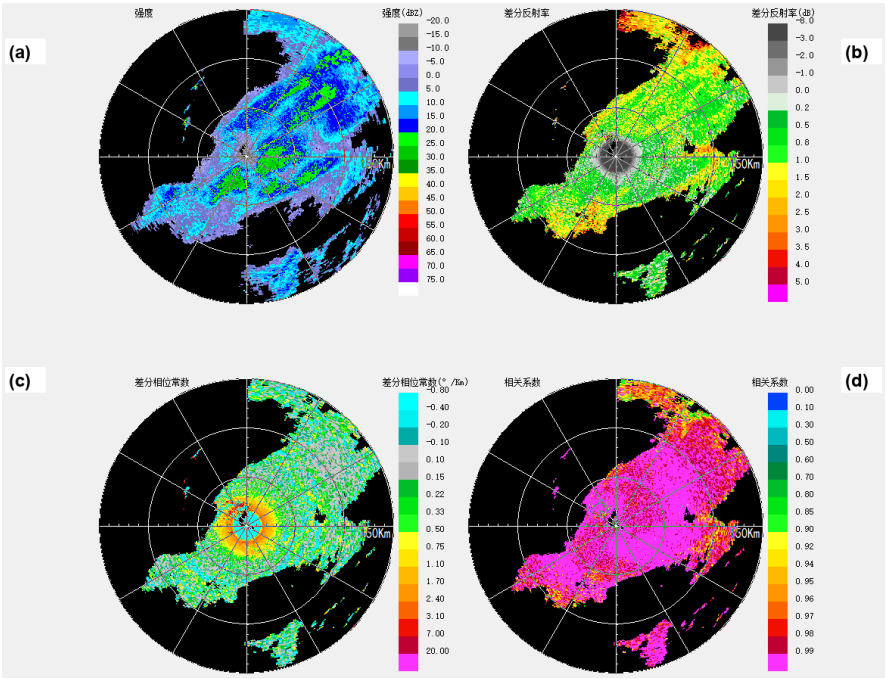


Figure 5. Dual-polarimetric radar products for the rain–snow mixed-phase event on 20 April 2023: (a) Z_H; (b) Z_DR; (c) K_DP; and (d) ρ_HV. Units are dBZ, dB, degrees per kilometer, and dimensionless, respectively
图 5. 2023 年 4 月 20 日雨夹雪过程的双偏振雷达产品：(a) Z_H；(b) Z_DR；(c) K_DP；(d) ρ_HV。单位分别为 dBZ、dB、°·km^{-1} 和无量纲

如图 5 所示，2023 年 4 月 20 日雨夹雪过程中，机场 METAR 记录显示，16 时至次日 00 时之间多次出现降雨和雨夹雪，能见度在 4000~9999 m 之间变化，气温约为 1~3℃。图示雷达回波强度介于纯雪和纯雨个例的定性特征之间，Z_DR 处于中间水平且 ρ_HV 偏低；该组合与同一观测体内存在雨滴、雪花或融化粒子的混合情形相容。现有截图仅支持对 K_DP 产品作定性观察，缺少原始体扫和配对雨量资料以量化其与雨强的关系，判断相态转换仍需结合温度层结和连续地面观测。

雨夹雪属于相态转换明显、空间分布不均匀的降水类型，雷达识别容易受到融化层高度、温度层结、观测距离和地面回波质量的影响。因此，业务判识应将双偏振变量与气温、露点、能见度、云底高度及连续地面观测结合，避免仅依据单一阈值作出结论。三个典型过程的主要图示特征对比见表 3。

Table 3. Comparison of dual-polarimetric radar characteristics among the selected precipitation cases
表 3. 典型降水个例的双偏振雷达特征对比

个例	天气类型	反射率特征	Z_DR/ρ_HV/Φ_DP 图示特征	识别意义
2022-07-01	强雷雨伴小冰雹	强回波核心，记录峰值约 65 dBZ	Z_DR 偏高；ρ_HV 局地偏低；图示 Φ_DP 仅作定性观察	与混合粒子及小冰雹报告相符；截图不能支持 K_DP 定量结论
2024-11-24	中到大雪	低反射率，回波分布较广且稳定	Z_DR 较小；ρ_HV 较高；不判定 K_DP	与降雪型回波特征相符，仍需地面天气记录约束
2023-04-20	雨夹雪	回波定性特征介于纯雪与纯雨之间	Z_DR 居中；ρ_HV 偏低；不判定 K_DP	提示混合相态可能，需结合温度层结与 METAR

4. 讨论

4.1. 双偏振变量的互补性与不确定性

Z_H 提供回波强弱信息，Z_DR 反映水平与垂直散射差异，ρ_HV 对观测体内粒子组成和散射一致性变化敏感；K_DP 在经过质量控制和相位处理后可用于表征路径上的差分相移率及强降水相关特征[9] [35]。但本文图 3(c)、图 4(c)和图 5(c)展示的是 K_DP 业务产品图像；由于没有原始体扫及质量控制处理记录，个例结论仅限于图示 Z_H、Z_DR、K_DP 和 ρ_HV 的定性空间特征。双偏振变量不是水凝物类型的直接测量，相同特征可能受粒子混合、融化、观测距离、衰减和质量控制影响，应结合地面天气及温度层结解释。

4.2. 对机场业务预报的启示

河东机场 2022~2024 年过程记录和三个典型个例支持若干定性的业务关注信号：强对流时跟踪强回波核心、Z_DR 偏高及 ρ_HV 局地降低；降雪时关注较连续回波、较低 Z_DR 和较高 ρ_HV；雨夹雪时结合偏振特征过渡、ρ_HV 降低与近地层温度。图 3(c)、图 4(c)和图 5(c)为 K_DP 产品截图；由于缺少原始体扫和处理记录，本文不进行 K_DP 逐格点统计或预报性能评价。表 4 所列数值范围来自河东机场日常业务中的回波特征统计整理，与本文 2022~2024 年 35 次过程分类计数及三个典型个例分析相互补充，但两类统计口径并不相同。本文未取得试用范围统计所依据的完整样本清单、样本量和独立检验结果，因此将其定位为业务试用参考范围，而非经本文独立拟合和验证的正式阈值。

Table 4. Dual-polarimetric radar precipitation forecast signals and trial reference ranges compiled from routine operational statistics at Yinchuan Hedong International Airport
表 4. 河东机场双偏振雷达降水预报信号及日常业务统计试用参考范围

降水类型	双偏振参数试用参考范围
小雨	Z_H < 28； Z_DR 0—0.62； K_DP 0—0.03； ρ_HV 0.97—1.00
中雨	28 ≤ Z_H < 44； Z_DR 0.69—2.0； K_DP 0.03—0.59； ρ_HV 0.95—1.00
强降雨/强对流	45 ≤ Z_H < 60； Z_DR > 2.0； K_DP 0.59—10.0； ρ_HV 0.95—1.00
降雪(偏干雪)	Z_H < 35； Z_DR 0—1.0； K_DP 0—0.2； ρ_HV 0.95—1.00
雨夹雪/湿雪	Z_H < 45； Z_DR 0.5—3.0； K_DP 0—0.5； ρ_HV 0.5—0.9
小冰雹/雨雹混合	45 ≤ Z_H < 60； Z_DR −2.0—0.5； K_DP −0.5—0.5； ρ_HV 0.92—0.97

在业务应用中，暖季可连续跟踪高反射率核心、Z_DR 与 ρ_HV 的空间异常，并结合多仰角结构及地面报告监测强降水和冰雹风险；冷季和过渡季应将回波连续性、Z_DR、ρ_HV 与地面温度、露点和能见度联合用于降雪或雨雪转换判识。表 4 范围仅供初筛，须用本地原始数据按雷达波段、距离、质量控制和温度层结进行验证；K_DP 的业务应用需基于质量控制后的 Φ_DP 距离向处理结果，而非直接读取现有截图。定量降水估测还应与雨量计资料配对评估。

4.3. 资料局限与后续工作

本研究属于资料受限的描述性个例分析。主要局限包括：雷达资料以产品截图和过程记录为主，虽已补充雷达站址和扫描体制信息，但仍缺少设备具体型号、原始体扫和完整质量控制方案；降水类型统计为过程次数，未与降水量、影响时长及航班运行指标建立定量关系；典型个例仅三次，且现有 K_DP 资

料为产品截图，不能据此完成逐格点阈值拟合、分类性能及预报技巧验证。后续应建立逐体扫雷达–地面观测配对数据库，明确独立事件划分，统计各类天气下变量分布，并用留出样本检验阈值、命中率、虚警率和预警提前量。

5. 结论

(1) 河东机场雷暴活动具有显著的暖季集中性，6~8 月雷暴日约占全年总数的 71.5%，7 月平均雷暴日最多；年际变化明显，业务预报需结合当年环流背景和短期天气尺度系统进行订正。

(2) 2022~2024 年降水类型以强降雨和中度降雨为主，2024 年强降雨和中度降雨分别出现 6 次和 5 次；小雪在降雪类过程中较常见，冷季和过渡季雨雪相态转换过程具有较高的机场保障关注度。

(3) 三个典型过程的图示结果显示，强雷雨伴小冰雹过程具有强反射率核心、偏高 Z_DR 和局地偏低 ρ_HV；中到大雪回波范围较广且稳定，Z_DR 较小、ρ_HV 较高；雨夹雪个例呈现雨雪过渡特征且 ρ_HV 偏低。由于缺少原始体扫及处理记录，本文不对典型个例 K_DP 作逐格点数值统计或性能结论。

(4) 双偏振雷达能够为机场复杂降水和雷暴监测提供比单偏振反射率更丰富的粒子信息，但最终预警仍需依赖雷达多变量、地面观测、温度湿度资料和卫星云图的综合分析。

(5) 依据 2022~2024 年过程频次及强雷雨伴小冰雹、中到大雪和雨夹雪三个典型个例，可初步形成面向河东机场的强对流、降雪和雨雪相态转换组合预报信号。表 4 数值范围尚未由全量本地雷达样本拟合和独立检验，应视为试用参考，不能作为已验证的业务阈值。

参考文献

[1] Bringi, V.N. and Chandrasekar, V. (2001) Polarimetric Doppler Weather Radar: Principles and Applications. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/cbo9780511541094

[2] Doviak, R.J. and Zrnić, D.S. (1993) Doppler Radar and Weather Observations. 2nd Edition, Academic Press.

[3] Seliga, T.A. and Bringi, V.N. (1976) Potential Use of Radar Differential Reflectivity Measurements at Orthogonal Polarizations for Measuring Precipitation. *Journal of Applied Meteorology*, **15**, 69-76. https://doi.org/10.1175/1520-0450(1976)015<0069:puordr>2.0.co;2

[4] Bringi, V.N., Chandrasekar, V., Balakrishnan, N. and Zrnić, D.S. (1990) An Examination of Propagation Effects in Rainfall on Radar Measurements at Microwave Frequencies. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **7**, 829-840. https://doi.org/10.1175/1520-0426(1990)007<0829:aeopei>2.0.co;2

[5] Straka, J.M., Zrnić, D.S. and Ryzhkov, A.V. (2000) Bulk Hydrometeor Classification and Quantification Using Polarimetric Radar Data: Synthesis of Relations. *Journal of Applied Meteorology*, **39**, 1341-1372. https://doi.org/10.1175/1520-0450(2000)039<1341:bhcaqu>2.0.co;2

[6] Zrnić, D.S., Ryzhkov, A.V., Straka, J.M., Liu, Y. and Vivekanandan, J. (2001) Testing a Procedure for Automatic Classification of Hydrometeor Types. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **18**, 892-913. https://doi.org/10.1175/1520-0426(2001)018<0892:tapfac>2.0.co;2

[7] Ryzhkov, A.V., Schuur, T.J., Burgess, D.W., Heinselman, P.L., Giangrande, S.E. and Zrnic, D.S. (2005) The Joint Polarization Experiment: Polarimetric Rainfall Measurements and Hydrometeor Classification. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **86**, 809-824. https://doi.org/10.1175/bams-86-6-809

[8] Park, H.S., Ryzhkov, A.V., Zrnić, D.S. and Kim, K. (2009) The Hydrometeor Classification Algorithm for the Polarimetric WSR-88D: Description and Application to an MCS. *Weather and Forecasting*, **24**, 730-748. https://doi.org/10.1175/2008waf2222205.1

[9] Kumjian, M.R. (2013) Principles and Applications of Dual-Polarization Weather Radar. Part I: Description of the Polarimetric Radar Variables. *Journal of Operational Meteorology*, **1**, 226-242. https://doi.org/10.15191/nwajom.2013.0119

[10] Kumjian, M. (2013) Principles and Applications of Dual-Polarization Weather Radar. Part II: Warm- and Cold-Season Applications. *Journal of Operational Meteorology*, **1**, 243-264. https://doi.org/10.15191/nwajom.2013.0120

[11] Dolan, B. and Rutledge, S.A. (2009) A Theory-Based Hydrometeor Identification Algorithm for X-Band Polarimetric Radars. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **26**, 2071-2088. https://doi.org/10.1175/2009jtecha1208.1

[12] Al-Sakka, H., Boumahmoud, A., Fradon, B., Frasier, S.J. and Tabary, P. (2013) A New Fuzzy Logic Hydrometeor

Classification Scheme Applied to the French X-, C-, and S-Band Polarimetric Radars. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **52**, 2328-2344. https://doi.org/10.1175/jamc-d-12-0236.1

[13] Giangrande, S.E. and Ryzhkov, A.V. (2008) Estimation of Rainfall Based on the Results of Polarimetric Echo Classification. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **47**, 2445-2462. https://doi.org/10.1175/2008jamc1753.1

[14] Matrosov, S.Y., Clark, K.A. and Kingsmill, D.E. (2007) A Polarimetric Radar Approach to Identify Rain, Melting-Layer, and Snow Regions for Applying Corrections to Vertical Profiles of Reflectivity. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **46**, 154-166. https://doi.org/10.1175/jam2508.1

[15] Grazioli, J., Tuia, D. and Berne, A. (2015) Hydrometeor Classification from Polarimetric Radar Measurements: A Clustering Approach. *Atmospheric Measurement Techniques*, **8**, 149-170. https://doi.org/10.5194/amt-8-149-2015

[16] Besic, N., Gehring, J., Praz, C., Figueras i Ventura, J., Grazioli, J., Gabella, M., *et al*. (2018) Unraveling Hydrometeor Mixtures in Polarimetric Radar Measurements. *Atmospheric Measurement Techniques*, **11**, 4847-4866. https://doi.org/10.5194/amt-11-4847-2018

[17] Lukach, M., Dufton, D., Crosier, J., Hampton, J.M., Bennett, L. and Neely III, R.R. (2021) Hydrometeor Classification of Quasi-Vertical Profiles of Polarimetric Radar Measurements Using a Top-Down Iterative Hierarchical Clustering Method. *Atmospheric Measurement Techniques*, **14**, 1075-1098. https://doi.org/10.5194/amt-14-1075-2021

[18] 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.

[19] Tiira, J. and Moisseev, D. (2020) Unsupervised Classification of Vertical Profiles of Dual Polarization Radar Variables. *Atmospheric Measurement Techniques*, **13**, 1227-1241. https://doi.org/10.5194/amt-13-1227-2020

[20] 张培昌, 魏鸣, 黄兴友, 等. 双线偏振多普勒天气雷达探测原理与应用[M]. 北京: 气象出版社, 2018.

[21] 刘黎平, 钱永甫, 王致君. 双线偏振雷达测雨效果的对比分析[J]. 大气科学, 1996, 20(5): 615-619.

[22] 殷秀良, 张培昌. 双线偏振雷达测雨公式的对比分析[J]. 南京气象学院学报, 2000, 23(3): 428-434.

[23] 赵果, 楚荣忠, 张彤, 等. 偏振多普勒雷达定量测量降雨精度的改进[J]. 高原气象, 2011, 30(2): 498-507.

[24] 汪舵, 刘黎平, 吴翀. 基于相态识别的 S 波段双线偏振雷达最优化定量降水估测方法研究[J]. 气象, 2017, 43(9): 1041-1051.

[25] 肖艳姣, 王斌, 陈晓辉, 等. 移动 X 波段双线偏振多普勒天气雷达差分相位数据质量控制[J]. 高原气象, 2012, 31(1): 223-230.

[26] 魏庆, 胡志群, 刘黎平, 等. C 波段偏振雷达数据预处理及在降水估计中的应用[J]. 高原气象, 2016, 35(1): 231-243.

[27] 杨吉, 郑媛媛, 徐芬. 江淮地区一次冰雹过程的双线偏振雷达观测分析[J]. 气象学报, 2020, 78(4): 568-579.

[28] 杨忠林, 赵坤, 徐坤, 等. 江淮梅雨期极端对流微物理特征的双偏振雷达观测研究[J]. 气象学报, 2019, 77(1): 58-72.

[29] 唐佳琪, 寇蕾蕾, 蒋银丰, 等. C 波段双偏振雷达降水估计的误差分析与建模[J]. 气象学报, 2022, 80(2): 224-242.

[30] 张哲, 戚友存, 朱自伟, 等. 深圳 S 波段与 X 波段双偏振雷达在定量降水估计中的应用[J]. 气象学报, 2021, 79(5): 786-803.

[31] 李博勇, 胡志群, 郑佳锋, 陈超. 利用贝叶斯方法改进华南地区冰雹识别效果[J]. 热带气象学报, 2021, 37(1): 112-125.

[32] 皇甫江, 胡志群, 郑佳锋, 等. 利用深度学习开展偏振雷达定量降水估测研究[J]. 气象学报, 2022, 80(4): 565-577.

[33] 潘佳文, 高丽, 魏鸣, 等. 基于 S 波段双偏振雷达观测的雹暴偏振特征分析[J]. 气象学报, 2021, 79(1): 168-180.

[34] Wang, L., Wang, Y., Liu, M., Chen, W. and Li, C. (2024) Analysis of Dual-Polarimetric Radar Observations of Precipitation Phase during Snowstorm Events in Jiangsu Province, China. *Atmosphere*, **15**, Article No. 321. https://doi.org/10.3390/atmos15030321

[35] Ryzhkov, A., Zhang, P., Bukovčić, P., Zhang, J. and Cocks, S. (2022) Polarimetric Radar Quantitative Precipitation Estimation: Review. *Remote Sensing*, **14**, Article No. 1695. https://doi.org/10.3390/rs14071695

[36] Forcadell, V., Augros, C., Caumont, O., Dedieu, K., Ouradou, M., David, C., *et al*. (2024) Severe-Hail Detection with C-Band Dual-Polarisation Radars Using Convolutional Neural Networks. *Atmospheric Measurement Techniques*, **17**, 6707-6734. https://doi.org/10.5194/amt-17-6707-2024