

FY-4A卫星和X波段雷达在一次混合强对流过程中的应用分析

张颖¹, 雷生国¹, 尚国英², 王探文³, 索积英¹

¹海东市气象局, 青海 海东

²平安区气象局, 青海 海东

³化隆县气象局, 青海 海东

收稿日期: 2026年1月28日; 录用日期: 2026年2月27日; 发布日期: 2026年3月10日

摘要

为探究高原地区混合强对流天气的监测与预警技术, 利用FY-4A卫星多通道观测数据、乐都新一代X波段双偏振雷达资料及地面观测实况, 对2023年6月12日发生在青海海东市的混合强对流过程(含冰雹、雷暴大风及罕见EF1级龙卷)进行系统分析。结果表明: 此次强对流由高空短波槽、低层热低压及低空切变线共同触发, “上冷下暖”的不稳定层结与充足的对流有效位能为其提供了有利条件; FY-4A卫星可见光通道的上冲云顶、水汽通道的楔形湿区推进及红外通道 ≤ 220 K的云顶亮温可有效指示强对流发展; 乐都X波段双偏振雷达30米高距离分辨率与 1° 仰角分辨率的配置, 成功捕捉到冰雹的“穹窿”回波结构及龙卷的龙卷涡旋特征(TVS)与龙卷碎片特征(TDS); 冰雹落区对应 $Z_{DR} \leq 0$ dB、 $CC \leq 0.94$ 、 $K_{DP} \leq 1^\circ/\text{km}$ 的偏振参数组合, 龙卷过程则表现为CC异常低值(0.75~0.83)与 Z_{DR} 剧烈波动的协同特征。卫星与雷达的协同观测构建了“宏观云系-微观粒子”的全维度监测体系, 为高原地区强对流天气的短临预警提供了重要技术支持。

关键词

FY-4A卫星, X波段双偏振雷达, 混合强对流, 龙卷, 冰雹, 高原气象

Application Analysis of FY-4A Satellite and X-Band Radar in a Mixed Severe Convection Process

Ying Zhang¹, Shengguo Lei¹, Guoying Shang², Tanwen Wang³, Jiyong Suo¹

¹Haidong Meteorological Bureau, Haidong Qinghai

²Ping'an County Meteorological Bureau, Haidong Qinghai

³Hualong County Meteorological Bureau, Haidong Qinghai

Abstract

To explore the monitoring and early warning technologies for mixed severe convective weather in plateau areas, this study systematically analyzes the mixed severe convective process (including hail, thunderstorm gales, and a rare EF1 tornado) that occurred in Haidong City, Qinghai Province on June 12, 2023, using multi-channel observation data from FY-4A satellite, data from the new-generation Ledu X-band dual-polarization radar, and ground observation facts. The results show that this severe convection was jointly triggered by upper-air short-wave trough, low-level thermal low, and low-level shear line, with the “upper cold and lower warm” unstable stratification and sufficient convective available potential energy (CAPE) providing favorable conditions. The overshooting top in the visible channel, the advancement of wedge-shaped moist area in the water vapor channel, and the cloud top brightness temperature (TBB) ≤ 220 K in the infrared channel of FY-4A satellite can effectively indicate the development of severe convection. The configuration of 30-meter high range resolution and 1° elevation angle resolution of the Ledu X-band dual-polarization radar successfully captured the “vault” echo structure of hail, as well as the tornado vortex signature (TVS) and tornado debris signature (TDS) of the tornado. The hail fall area corresponds to the polarization parameter combination of $Z_{DR} \leq 0$ dB, $CC \leq 0.94$, and $K_{DP} \leq 1^\circ/\text{km}$, while the tornado process is characterized by the synergy of abnormally low CC values (0.75~0.83) and drastic Z_{DR} fluctuations. The synergistic observation of satellite and radar has constructed a full-dimensional monitoring system of “macro cloud system-micro particles”, providing important technical support for the short-term and imminent early warning of severe convective weather in plateau areas.

Keywords

FY-4A Satellite, X-Band Dual-Polarization Radar, Mixed Severe Convection, Tornado, Hail, Plateau Meteorology

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

强对流天气具有突发性强、破坏力大的特点，常伴随冰雹、龙卷等灾害，严重威胁农业生产与人民生命财产安全。超级单体风暴引发的冰雹、龙卷可造成严重的经济财产损失甚至人员伤亡[1]。2023年6月12日，青海海东市出现区域性混合强对流天气，互助、化隆等4县10个乡镇遭遇冰雹，互助县南门峡镇西山根村出现罕见EF1级龙卷，造成14户房屋损坏。

乐都新一代X波段双偏振雷达有效填补了海东北部低层探测盲区，具备高分辨率与快速扫描能力，可精准识别降水粒子相态；FY-4A卫星凭借多通道协同探测优势，在中尺度对流系统监测中发挥重要作用。二者协同观测可为高原地区强对流天气监测预警提供新方法，具有重要业务价值。

龙卷作为极端强对流天气，我国发生率仅为美国的十分之一，主要集中于江淮流域等平坦区域，高原地区极为罕见。双偏振雷达探测到的龙卷碎片特征(TDS)与龙卷涡旋特征(TVS)是龙卷识别的核心指标，已在多波段雷达中得到验证。卫星云图多通道特征可有效指示强对流发展阶段，X波段雷达高分辨率优势利于捕捉精细结构，但二者在高原混合强对流中的协同应用研究仍较缺乏，亟需深入探索。

2. 资料和方法

本研究综合多源观测数据支撑强对流过程分析,数据覆盖地面、高空、卫星、雷达及环流形势等维度:地面实况与灾情资料包含海东市全域自动气象站逐时气温、气压、降水等要素(时间分辨率 5 分钟),以及互助县龙卷灾害的实地调查记录、房屋损坏影像与灾情统计;高空探测采用西宁国家基准站(52866) 2023 年 6 月 12 日 08 时、20 时探空数据,通过 14 时地面实测温湿度订正以优化层结分析精度;卫星数据选用 FY-4A 多通道观测资料(时间分辨率 15 min,空间分辨率 2 km),可提取云顶亮温(TBB)、云团形态等关键参数;雷达数据来自乐都 X 波段双偏振雷达(ZX201),含组合反射率、径向速度等常规参数及 Z_{DR}、CC 等双偏振参数,扫描周期小于 5 min,能精细刻画强对流回波结构;环流形势资料采用 MICAPS4.5 系统 1°×1°分辨率的高空天气图与物理量场数据,用于解析大尺度天气系统。

研究采用多方法协同分析技术:通过天气学诊断方法,结合高空环流图与地面要素时序变化,分析 500 hPa “两槽一脊”、700 hPa 切变线等系统演变,利用 CAPE、垂直风切变等物理量,量化层结不稳定性与对流条件;卫星数据采用多通道协同法,利用可见光、水汽、红外通道识别云团特征、水汽输送及强对流临界信号,雷达数据重点解析强回波结构、双偏振参数异常及龙卷涡旋信号(TVS),构建强对流监测分析框架,提升灾害判定与预警精度。

3. 强对流过程分析

3.1. 过程概况

2023 年 6 月 12 日 12 时 40 分起,强对流系统自北向南影响海东市,12 时 40 分乐都区达拉乡率先出现冰雹;13 时 08 分~13 时 47 分,互助县 6 个乡镇遭遇冰雹;13 时 20 分,互助县南门峡镇西山根村出现 EF1 级龙卷,持续约 10 分钟,移动路径 3 km;15 时后,化隆、民和等地出现冰雹及短时强降水,16 时后天气减弱结束。

3.2. 关键环境条件

西北区强对流天气基本形势配置可大体分为 3 类,即:高空冷平流强迫、低层暖平流强迫、斜压锋生类[2]。本次过程属于高空冷平流强迫类,由高空短波槽、低层热低压及低空切变线共同触发,大气层结呈“上冷下暖”不稳定结构。西宁站订正探空显示,对流有效位能(CAPE)达 1121.9 J/kg,6 公里垂直风切变 13.3 m/s,0℃层与-20℃层高度差 2954 m,为冰雹与龙卷形成提供有利热力和动力条件。

3.3. FY-4A 卫星云图特征分析

卫星观测具备覆盖范围广、连续观测、参数完备等优势,能够提供多时次、大范围、连续性的云微物理探测信息,可以有效补充地基观测的不足[3]。FY-4A 静止气象卫星以 15 分钟/次的高时间分辨率、多通道协同探测能力,完整捕捉了本次强对流云团从初生、发展、强盛到消散的全生命周期演变,各通道特征如下:

3.3.1. 可见光通道(ch2, 0.65 μm)特征

可见光通道对云顶结构与对流强度敏感:12 时许,互助西北部出现零散对流单体(云顶纹理均匀、边界清晰,对流初生);13:00-13:15 (见图 1(a)),单体快速合并为东西向带状云系,上风侧边界整齐,下风侧延伸 50 km 光滑卷云砧(高空急流引导,上升运动强烈);13:38,互助南门峡至乐都达拉乡出现上冲云顶(高出周围云砧 3~5 像素,强雷暴核标志,上升气流 ≥20 m/s,与冰雹、龙卷区高度吻合);14 时后(见图 1(b)),云带南扩至化隆、民和,云顶趋缓、卷云砧扩散,对流进入成熟后期。

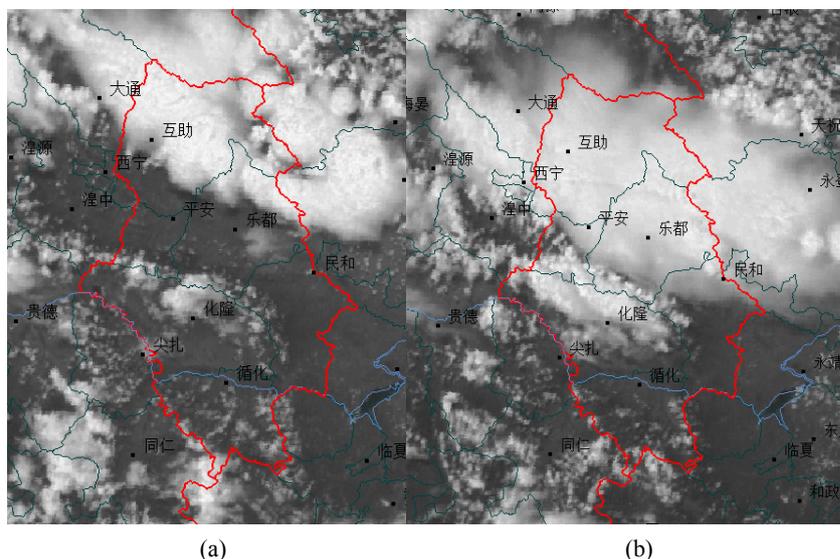


Figure 1. Visible satellite imagery of Channel 2 at 13:15 (a) and 14:30 (b) on June 12, 2023
图 1. 2023 年 6 月 12 日 13:15 (a)、14:30 (b) ch2 通道的可见光云图

3.3.2. 水汽通道(ch9: 6.2 μm , ch10: 7.0 μm)演变

ch9 通道(中高层水汽): 12 时前祁连山存在东北 - 西南向水汽输送带, 13 时覆盖海东北部, 高层水汽持续汇聚; ch10 通道(中低层水汽): 干湿区边界鲜明, 楔形湿区向南推进(速度 30 km/h, 与低空切变线同步, 对流触发关键信号); 14 时后, 水汽亮区范围扩大但亮度减弱, 水汽供应逐步不足。

3.3.3. 红外通道(ch12: 11.2 μm)云顶亮温分析

对流在发展中云团快速垂直增长, 云顶及其变化特征是反映对流情况的关键[4]。云顶亮温直接指示对流强度: 12 时 40 分, 乐都达拉乡云顶亮温 240 K (-33°C), 对应小冰雹; 13:00~13:15, 互助地区亮温降至 220 K (-53°C , 过程最低), 云顶超 12 km (对流层顶附近), 强对流达鼎盛, 对应冰雹、龙卷集中发生; 13 时 20 分龙卷发生时(见图 2(a)), 亮温维持 227~228 K (强对流阈值内); 15 时(见图 2(b)), 化隆、民和云顶亮温 220~225 K, 对应冰雹与短时强降水; 16 时后, 亮温回升至 245 K 以上, 对流显著减弱。

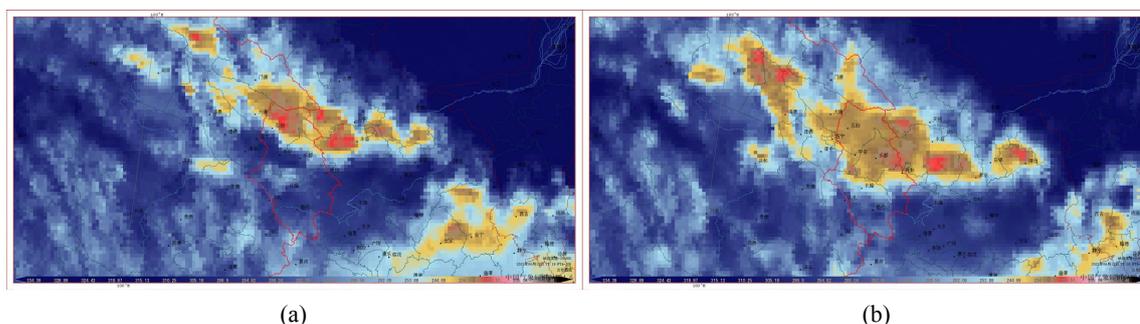


Figure 2. Infrared satellite imagery of Channel 12 at 13:20 (a) and 15:00 (b) on June 12, 2023
图 2. 2023 年 6 月 12 日 13:20 (a)、15:00 (b) ch12 通道的红外云图

3.4. X 波段雷达回波演变特征

乐都新一代 X 波段双偏振雷达凭借 30 米的高距离分辨率、 1° 的仰角分辨率及快速扫描模式, 有效穿透海东地区复杂地形, 捕捉到强对流回波的精细结构和演变特征, 为短临预警提供了关键支撑。

3.4.1. 回波演变过程

组合反射率因子是一个体积扫描中最强反射率因子的产品，能够比较直观地反映冰雹存在可能性的大小[5]。11时15分，互助松多乡出现孤立对流回波(35~40 dBz)；11:40~12:00，回波增强至 50 dBz 以上；12:02~12:30(见图 3(a))，乐都达拉乡维持 55~60 dBz 强回波，回波顶高 12 km(见图 3(b))，12:40 出现 5~8 mm 冰雹；12:30 后，互助地区形成东西向强回波带，南门峡镇至东沟乡一带出现 55 dBz 以上核心区，VIL 峰值 25 g/kg，引发 6 个乡镇冰雹天气；15 时后(见图 3(d))，强回波带南移至化隆、民和，维持 50~55 dBz，对应冰雹与短时强降水；16 时后回波减弱至 40 dBz 以下。

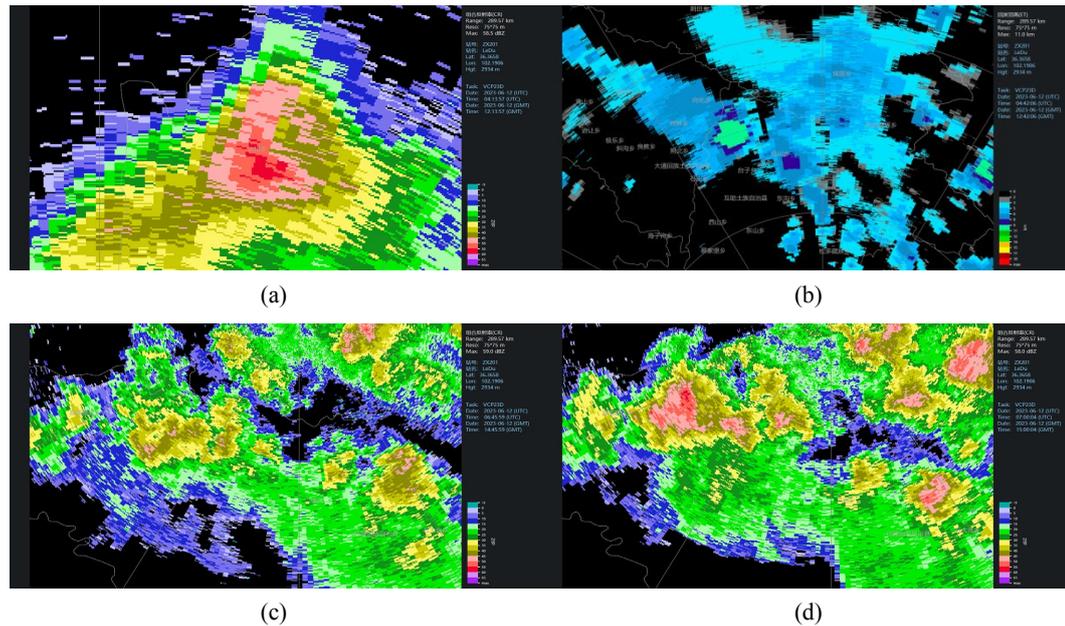


Figure 3. CR at 12:13 (a), 14:45 (c) and 15:00 (d); ET at 12:42 (b)
图 3. 12:13 (a)、14:45 (c)、15:00 (d) CR, 12:42 (b) ET

3.4.2. 冰雹回波结构与预警指标

强降雹过程的雷达回波属于生命史较长的类超级单体和普通多单体。中气旋持续时间长强回波质心偏上，在弱回波区上方有强回波悬垂，风暴组织化程度较高[6]。强冰雹落区回波呈现典型“穹窿”结构：低层(0~3 km)回波强度 55~60 dBz，中层(3~6 km)形成中空弱回波区(BWER)，高层(6~10 km)回波再次增强，这是大冰雹的重要识别特征。

Table 1. Characteristic parameters (maximum values) of townships with hail occurrence
表 1. 出现冰雹乡镇各特征参量(最大值)

乡镇	冰雹出现时间	冰雹出现前 各参量最大值时间	组合反射率/dBz	垂直积分 液态水含量/(g/kg)
乐都区达拉乡	12:40	12:11	58	19
互助县南门峡镇、台子乡	13:08~13:47	12:58	55	17
互助县丹麻镇、五十镇	13:08~13:47	13:07	57	38
互助县蔡家堡乡、东山乡	13:08~13:47	13:41	56	23
化隆县巴燕镇、昂思多镇	15:00	15:00	56	20
民和县松树乡	15:30	15:19	52	11

基于观测数据(见表 1)提炼海东地区冰雹预警指标:

- (1) 组合反射率 ≥ 55 dBz 且持续 ≥ 10 分钟, 10~30 分钟后出现冰雹;
- (2) VIL ≥ 20 g/kg 或 VIL 密度 ≥ 3 g/m³, 为冰雹强信号;
- (3) 探测距离 40~60 km 区域, 组合反射率 ≥ 50 dBz、VIL ≥ 10 g/kg, 预警时效 5~15 分钟。

3.5. 基于双偏振参数的微物理特征分析

双偏振雷达通过测量差分反射率因子(Z_{DR})、相关系数(CC)、差分相移率(K_{DP})等参数, 能够有效区分云中粒子相态(雨滴、霰、冰雹等), 揭示强对流过程中的微物理演变特征。使用这些新的参量可以提高探测精度和识别冰雹的准确率, 了解一定区域内降水粒子相态与形状, 确定雨滴谱参数等, 并可将这些新物理量用于中小尺度云数值模式, 提高预报时效及准确率[7]。

3.5.1. 差分反射率因子(Z_{DR})特征

Z_{DR} 反映降水粒子的形状和取向, 球形粒子(如冰雹) Z_{DR} 值接近 0 dB, 扁球形雨滴 Z_{DR} 值为正(通常 0~5 dB)。本次过程中, 所有冰雹发生区域的 Z_{DR} 值均呈现显著负偏特征, 维持在-1.0~0.5 dB 区间: 12:40 乐都达拉乡冰雹天气时, Z_{DR} 核心区为-0.8~-0.3 dB, 与周围雨区 Z_{DR} (1.5~3.0 dB)形成鲜明对比; 13:13 互助东沟乡大冰雹发生时, Z_{DR} 值低至-1.0 dB, 且低 Z_{DR} 区与 55 dBz 强回波核心完全重合, 表明此时云中以大冰雹粒子为主, 雨滴占比极低; 冰雹融化阶段(强回波过后 10~15 分钟), Z_{DR} 值逐步回升至 1.0~2.0 dB, 提示冰雹粒子大量融化, 云中雨滴占比增加。

3.5.2. 相关系数(CC)特征

相关系数(CC)用于衡量雷达水平与垂直极化回波信号的相关性, 在纯雨滴区域, CC 值通常大于 0.98, 而当云内存在冰雹、霰等非球形不规则粒子时, CC 值会出现明显下降。在冰雹天气发生前 30 分钟, 对应区域 CC 值便开始呈现下降趋势, 从初始的 0.98 逐步回落至 0.90~0.96; 进入冰雹发生时段, CC 值进一步降至 0.80~0.94, 其中大冰雹落区的 CC 值更是低至 0.80~0.85, 这是由于冰雹粒子形状不规则、粒径分布离散, 导致极化信号相关性大幅降低。13:13 互助丹麻镇出现冰雹时(见图 4), CC 值出现低值区 (0.88~0.94), 与冰雹落区精准对应。

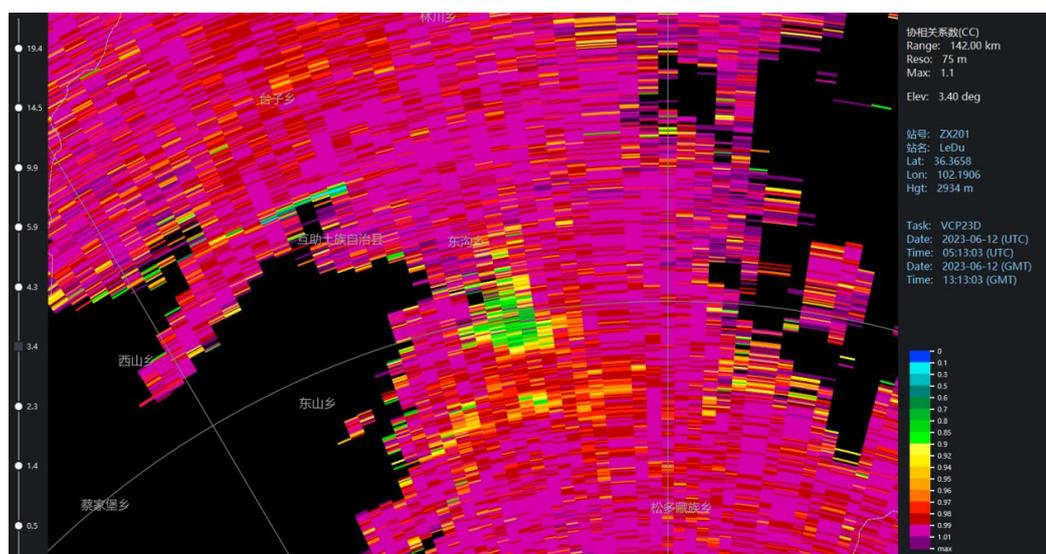


Figure 4. CC at 13:13
图 4. 13:13 CC

3.5.3. 差分相移率(K_{DP})特征

差分相移率(K_{DP})反映的是降水粒子对电磁波的差分相移特性,其数值大小与雨滴的浓度和粒径密切相关,对冰雹等大粒子的响应则相对较弱,通常纯雨区的 K_{DP} 值在 $1^{\circ}\sim 5^{\circ}/\text{km}$ 区间,而冰雹主导区域的 K_{DP} 值多低于 $1^{\circ}/\text{km}$ 。在本次过程中,冰雹发生区域的 K_{DP} 值稳定维持在 $0.2^{\circ}\sim 0.8^{\circ}/\text{km}$ 的低值区间,与周边雨区 $2.0^{\circ}\sim 4.5^{\circ}/\text{km}$ 的 K_{DP} 值形成明显分异(见图 5); 12 时 45 分达拉乡冰雹最强时段,对应区域 K_{DP} 值仅为 $0.3^{\circ}\sim 0.5^{\circ}/\text{km}$,进一步验证了该区域粒子以冰雹为主、雨滴占比极低的微物理特征。

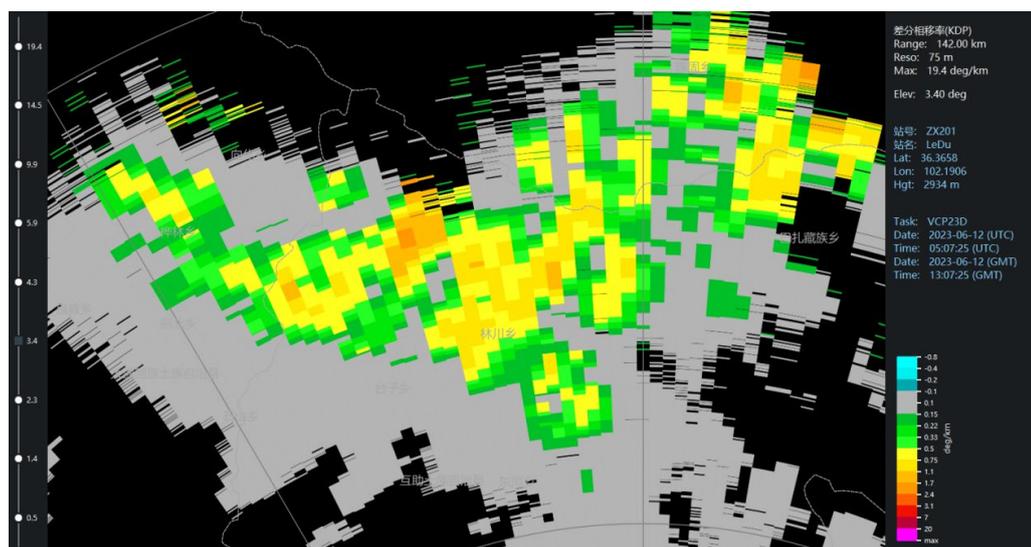


Figure 5. K_{DP} at 13:07

图 5. 13:07 K_{DP}

3.5.4. 冰雹偏振判据

综合双偏振参数的演变特征来看(见表 2),本次过程中冰雹落区的典型偏振判据为 $Z_{DR} \leq 0 \text{ dB}$ 、 $CC \leq 0.94$ 、 $K_{DP} \leq 1^{\circ}/\text{km}$,该判据可为冰雹天气的精细化识别提供关键支撑,不同乡镇冰雹过程的双偏振参量统计结果如下表所示:

Table 2. Dual-polarization parameters (3.4° elevation angle) of townships with hail occurrence

表 2. 出现冰雹的乡镇双偏振参量(3.4° 仰角)

乡镇	Z_{DR}/dB	$K_{DP}/(^{\circ}/\text{km})$	CC
乐都区达拉乡	-1~0.5	0	0.86~0.92
互助县南门峡镇、台子乡	-1~0.2	0.2~0.6	0.94~0.96
互助县丹麻镇、五十镇	-1~0.5	0~0.2	0.88~0.94
互助县蔡家堡乡、东山乡	-1~0.8	0.4~0.8	0.8~0.93
化隆县巴燕镇、昂思多镇	-3~1	0.5~2.4	0.85~0.97
民和县松树乡	-0.7~0.5	0.3~0.7	0.95

3.6. 龙卷在 X 波段雷达资料中的观测特征分析

13 时 08 分互助南门峡镇发生 EF1 级龙卷天气,乐都 X 波段双偏振雷达对其全程实现有效监测,结合雷达常规回波及双偏振参量,清晰识别出龙卷过程中的龙卷碎片特征(TDS)与龙卷涡旋特征(TVS),为

龙卷的实时识别与预警提供了重要依据。

3.6.1. 龙卷碎片特征(TDS)

龙卷碎片特征(TDS)是龙卷触地后,强风裹挟地面杂物、水汽及云内粒子形成的特殊粒子群在雷达双偏振参量上的异常响应。对于本次 EF1 级龙卷而言,其 TDS 在双偏振参量上表现为显著的协同异常:相关系数(CC)降至 0.75~0.83 的低值区间(见图 6),较周边区域降幅超 0.1;差分反射率因子(Z_{DR})呈-0.5~1.0 dB 的剧烈波动,幅度达 1.5 dB;差分相移率(K_{DP})为 0.5~1.2°/km 的低幅震荡,介于雨区与冰雹落区的 K_{DP} 值之间。这种参量异常是粒子群形态不规则、相态混杂的直接体现,且其变化过程与龙卷生命周期高度吻合,可作为龙卷触地及强度判定的关键依据。

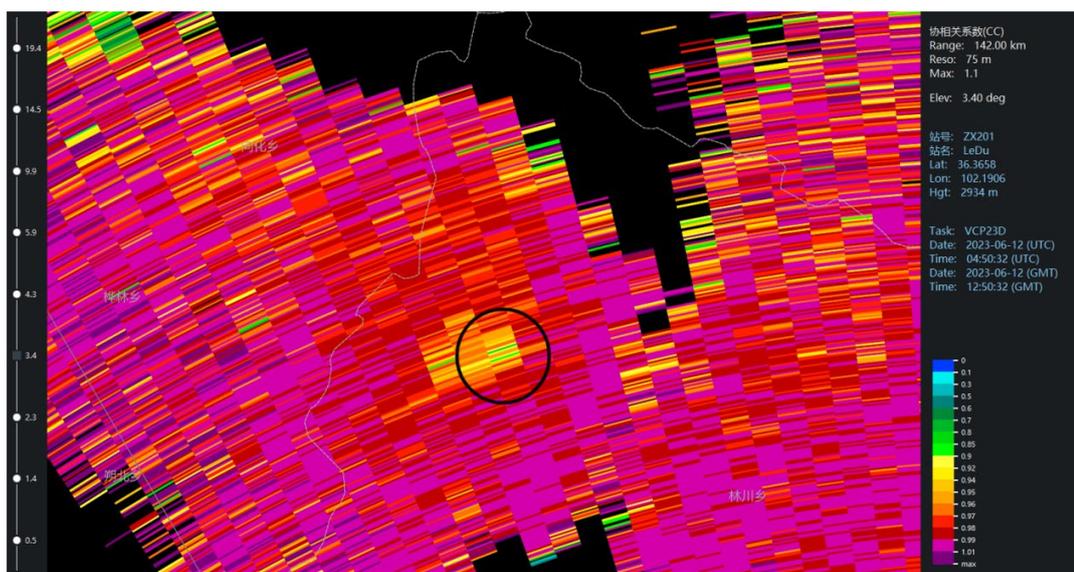


Figure 6. CC at 12:50

图 6. 12:50 CC

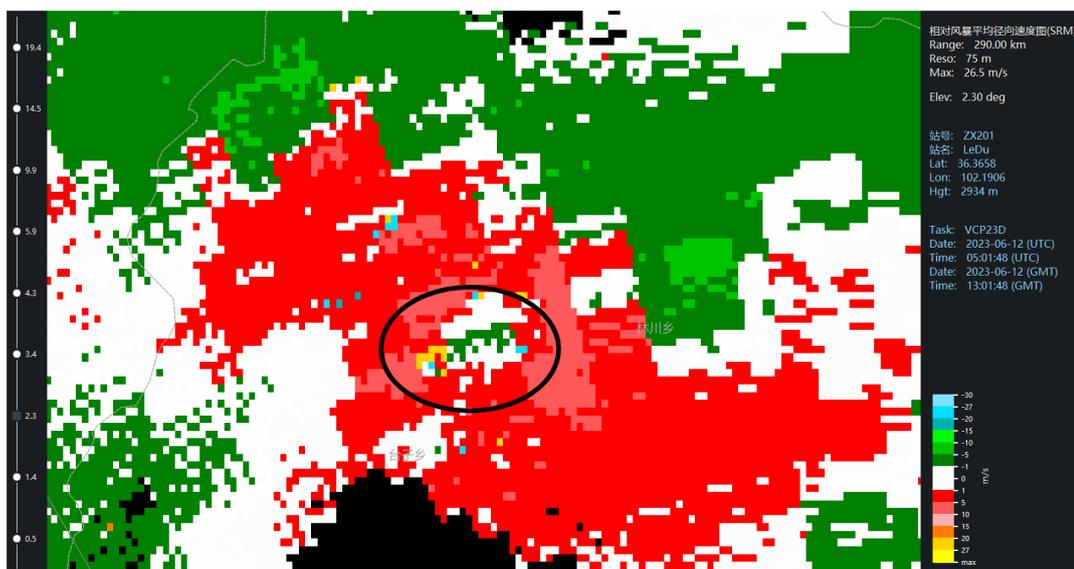


Figure 7. SRM at 13:01

图 7. 13:01 SRM

3.6.2. 龙卷涡旋特征(TVS)

龙卷涡旋特征是龙卷环流在雷达径向速度图上的直接体现, 表现为小尺度的正负速度对, 反映了强对流系统内部的强烈旋转气流, 是识别龙卷环流的核心指标。在 12 时 50 分, 南门峡镇 3~5 km 高度层率先出现小尺度正负速度对, 速度差值达 28 m/s, 正负速度区的水平尺度仅 2 km, 符合龙卷涡旋的小尺度强旋转特征; 13 时 01 分龙卷触地时(见图 7), 该速度对下降至 1~3 km 高度层, 速度差值进一步增至 32 m/s, 且旋转中心与地面龙卷落区完全重合; 13 时 10 分龙卷减弱阶段, 速度差值回落至 20 m/s, 旋转中心逐步消散, 其演变过程与龙卷的发生、发展、减弱过程高度同步。

3.6.3. 双偏振参量与 TVS 的协同特征

TVS 与 TDS 异常区高度重叠, TVS 形成阶段, Z_{DR} 波动幅度增大、CC 同步下降, 二者时空耦合大幅提升龙卷识别准确性。

4. 结论

本次混合强对流过程由高空短波槽、低层热低压及低空切变线共同触发, “上冷下暖”的不稳定层结、充足的对流有效位能(CAPE 达 1121.9 J/kg)及强垂直风切变(SHR6 = 13.3 m/s)为其提供了有利的热力和动力条件, 0℃层与-20℃层的适宜高度差为冰雹形成创造了良好环境。

FY-4A 卫星多通道数据可有效指示强对流发展: 可见光通道的上冲云顶对应强雷暴核区, 水汽通道的楔形湿区推进反映水汽输送与对流触发, 红外通道云顶亮温 ≤ 220 K 是强对流鼎盛期的重要标志, 三者协同可实现强对流云团从初生到消散的全程追踪。

乐都 X 波段双偏振雷达的高分辨率配置(30 米距离分辨率、1°仰角分辨率)成功捕捉到强对流的精细结构: 冰雹过程呈现“穹窿”回波结构及 $Z_{DR} \leq 0$ dB、 $CC \leq 0.94$ 、 $K_{DP} \leq 1^\circ/\text{km}$ 的偏振参数组合; 龙卷过程则表现为小尺度强旋转的 TVS 特征(速度差值达 32 m/s)与 CC 异常低值(0.75~0.83)、 Z_{DR} 剧烈波动的 TDS 特征, 二者时空耦合是龙卷识别的核心依据。

提炼出适用于海东地区的强对流预警指标: 冰雹预警可采用组合反射率 ≥ 55 dBz (远距区域 ≥ 50 dBz)、 $VIL \geq 20$ g/kg (远距区域 ≥ 10 g/kg)的判据; 龙卷预警可依据 TVS 与 TDS 的协同出现, 结合卫星云顶亮温异常, 实现短临预警。

卫星与雷达的协同观测构建了“宏观云系-微观粒子”的全维度监测体系, FY-4A 卫星提供早期预警信号, X 波段双偏振雷达精准捕捉精细结构与粒子相态, 二者结合有效提升了高原地区强对流天气的监测时效与预警精度。

参考文献

- [1] 龚佃利, 朱君鉴, 林曲凤, 等. 一次超级单体引发的秋季特大冰雹和龙卷雷达探测分析[J]. 气象, 2024, 50(5): 561-576.
- [2] 许东蓓, 许爱华, 肖玮, 等. 中国西北四省区强对流天气形势配置及特殊性综合分析[J]. 高原气象, 2015, 34(4): 973-981.
- [3] 邵建, 张肃诏, 陈敏, 等. FY-4A 卫星在宁夏短时强降水中的适用性研究[J]. 干旱区研究, 2023, 40(2): 163-172.
- [4] 曹学君, 王钊, 白爱娟, 等. FY-4A 产品在秦巴山区对流天气中的应用分析[J]. 高原山地气象研究, 2023, 43(1): 65-70, 80.
- [5] 李玉婷, 周祥华, 李晓勇, 等. 泸州 X 波段双偏振雷达在冰雹识别中的对比应用[J]. 高原山地气象研究, 2022, 42(S1): 114-118.
- [6] 朱平, 俞小鼎. 青藏高原东北部一次罕见强对流天气的中小尺度系统特征分析[J]. 高原气象, 2019, 38(1): 1-13.
- [7] 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.