基于多源雷达资料的六盘山地区冰雹过程 特征分析

王心怡^{1,2,3}, 靳雨晨⁴, 李新庆^{1,2,3*}, 王艳萍^{1,2,3}

中国气象局旱区特色农业气象灾害监测预警与风险管理重点实验室,宁夏 银川
²宁夏气象防灾减灾重点实验室,宁夏 银川
³宁夏回族自治区气象信息中心,宁夏 银川
⁴内蒙古自治区气象科学研究所,内蒙 呼和浩特

收稿日期: 2025年5月31日; 录用日期: 2025年6月28日; 发布日期: 2025年7月7日

摘要

本文利用常规探空资料、六盘山地区C波段与X波段双偏振多普勒天气雷达资料,对2024年7月22日一次六盘山地区对流单体冰雹过程进行分析。本研究发现,此次过程在蒙古冷涡东移、高原低值系统东移、台风与副热带高压相互作用的天气背景下,大气层结具有强不稳定度,0℃层高度以及-20℃层高度均十分有利于冰雹在雷暴单体中的维持和增长;C波段雷达和X波段雷达的反射率因子以及径向速度均表现出十分典型的超级单体雷暴回波特征,C波段与X波段雷达回波特征存在显著差异。在同一高度上程儿山X波段雷达的回波强度比固原C波段雷达的弱,也没有出现通常能用来确定冰雹的三体散射回波和旁瓣回波。

关键词

冰雹,双偏振多普勒天气雷达,回波特征,六盘山区

A Study on Hailstorm Characteristics in the Liupan Mountains Using Multi-Source Radar Observations

Xinyi Wang^{1,2,3}, Yuchen Jin⁴, Xinqing Li^{1,2,3*}, Yanping Wang^{1,2,3}

¹Key Laboratory for Meteorological Disaster Monitoring and Early Warning and Risk Management of Characteristic Agriculture in Arid Regions, CMA, Yinchuan Ningxia

²Ningxia Key Lab of Meteorological Disaster Prevention and Reduction, Yinchuan Ningxia ³Ningxia Hui Autonomous Region Meteorological Information Center, Yinchuan Ningxia

*通讯作者。

文章引用: 王心怡, 靳雨晨, 李新庆, 王艳萍. 基于多源雷达资料的六盘山地区冰雹过程特征分析[J]. 气候变化研究 快报, 2025, 14(4): 604-610. DOI: 10.12677/ccrl.2025.144060

⁴Inner Mongolia Weather Modification Center, Hohhot Inner Mongolia

Received: May 31st, 2025; accepted: Jun. 28th, 2025; published: Jul. 7th, 2025

Abstract

This study analyzes a convective hailstorm event that occurred in the Liupan Mountains region on July 22, 2024, using conventional radiosonde data and dual-polarization Doppler weather radar data from both C-band and X-band systems in the area. This study found that this process was under the weather background of the eastward movement of the Mongolian cold vortex, the eastward movement of the plateau low-value system, and the interaction between the typhoon and the subtropical high pressure system, with the atmospheric stratification having strong instability. The heights of the 0°C and -20°C isotherms were highly conducive to the maintenance and development of hail within the thunderstorm cell. Both the C-band and X-band radars showed reflectivity and radial velocity signatures characteristic of a classic supercell thunderstorm. There were significant differences in the echo characteristics between the C-band and X-band radars. At the same altitude, the echo intensity of the Cheng'ershan X-band radar is weaker than that of the Guyuan C-band radar, and neither the triple-body scattering echo nor the sidelobe echo, which are usually used to determine hail, appear.

Keywords

Hailstorm, Dual-Polarization Doppler Weather Radar, Echo Characteristics, Liupan Mountain Region

Copyright © 2025 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/

CC Open Access

1. 引言

随着遥感观测技术的不断发展,新一代天气雷达已成为降水观测的重要手段[1][2],我国建成了新一 代天气雷达观测网,在气象防灾减灾中发挥了重要作用。与传统多普勒气象雷达相比,双偏振气象雷达 可以交替发射水平和垂直偏振波,并接收2个偏振方向的回波信号,有助于更准确地判断短时强降水天 气过程的类型及降水强度[3],是近年降水粒子分类研究领域的研究热点。Zhao等[4]介绍了相控阵双偏振 雷达等新兴技术在中国气象监测中的应用,及双偏振雷达数据在定量降水估计和预报方面的研究。Otsubo 等[5]利用日本双偏振雷达数据发现差分反射率因子峰值高度与地面最大降雨率成正相关关系,当差分反 射率因子从0℃层起高度超过3千米时极端降雨可达180 mm/h。宁夏六盘山地区新增布设2部X波段双 偏振雷达,结合常规C波段雷达,组成了设备完善的地面雷达观测组网。

冰雹是一种产生于强对流云、直径大于 5 mm 的冰相固态降水物[6]。因其具有较强的突发性和局地 性,强烈的降雹过程常造成房屋、汽车、航空、农业和商业等多方面的损害,其预报预警一直是现代气 象业务工作中的重点和难点[7][8]。宁夏地处我国西北地区东部,位于黄河中上游,有山地、丘陵、台地 多,平原少的特点。宁夏降雹区域主要集中在六盘山山脉所在地区,冰雹多发生在夏季和秋季[9]-[11]。 虽然已有一些学者对宁夏地区冰雹的气候特征、时空分布特征、冰雹的宏微观特征等进行了研究[12]-[15], 但仍缺乏对该地区冰雹雷达回波特征的认知与分析。 目前,宁夏新增布设3部X波段双偏振雷达,对于双偏振雷达数据的应用研究处于起步阶段。2024 年7月22~23日,宁夏出现大范围强降水天气,为西吉县兴隆镇马咀水库站197.6 mm,其中31个站累 计降雨量达100 mm 以上。本文利用常规探空资料、X 波段双偏振多普勒雷达和C 波段多普勒天气雷达 资料,探索双偏振参量在六盘山区冰雹天气过程中的特征,解决宁夏气象雷达数据应用和产品分析不足 的短板问题。

2. 探空分析

蒙古冷涡东移期间,宁夏南部形成切变线系统(图略)。与此同时,高原低值系统沿切变线东移,叠加 台风与副热带高压的相互作用,偏南气流将能量与水汽输送至宁夏南部。在此过程中,高原低涡系统提 供动力抬升作用,配合台风外围环流输送的充沛水汽与能量,最终在固原南部地区触发系统性降水。

图 1(a)为 2024 年 7 月 22 日银川站(53614) 20 时(北京时,下同)的温度压力对数图,由图可知,抬升





凝结高度(LCL)位于 2 km 以下(817.7 hpa), 云系云底高度即对流凝结高度(CCL)位于 3 km 左右, 而自由对 流高度(LFC)位于 673.7 hpa 处, 0℃层高度位于 5584 m 处, 地面到高空 t-td 基本小于 2℃, 整体大气处于 高湿状态,在对流过程中,大量水汽上升至高空,水汽在上升过程中不断冷却凝结,形成小水滴或冰晶 (Winkler, *et al.*, 2006)。低层存在浅薄逆温,其中对流抑制能量(CIN)达到 281.1 J/kg,而对流有效位能(CAPE) 达到 867.2 J/kg。CAPE 远大于 CIN,整层大气中具有很大的不稳定能量,有利于对流发展。对比 22 日 08 时,CAPE 为 221.9 J/kg,CIN 为 210.4 J/kg,表明对流云系处于发展阶段,不稳定能量处于累积过程,而至 22 日 20 时发展旺盛(K 指数为 34.4℃, SI 指数为 1.04℃),强烈的垂直运动为冰雹形成提供了动力基础。

图 1(b)为 2024 年 7 月 22 日银川站(53614) 20 时垂直位温(V-3θ)图, 22 日 20 时 53614 从地面到高空 3 条 θ线均出现多处不同程度的折拐,说明此时大气层结处于极不稳定状态(整层比湿积分为 3242.2 g/kg)。 从垂直风场配置上来看,表现为地面东北风,低层东南风,高层偏西风配置,存在强的垂直风切变,最 大上升速度为 41.6 m/s,高层偏西风的抽吸作用有利于对流运动的发展,充足的水汽和较强的上升气流能 够将冰晶或过冷水滴托举在高空,使其在云中停留较长时间,有更多机会与周围的水汽或其他冰晶碰撞 合并,不断增大体积。

3. 雷达分布情况

雷达分布情况如图 2 所示,固原雷达站(Z9954)为新一代天气雷达(CINRAD/CD),天线海拔 2853 m, 最大测距 230 km,距离分辨率 150 m。西吉雷达站(ZY141)为 X 波段天气雷达(XA),天线海拔 2278 m, 最大测距 150 km,距离分辨率 150 m。程儿山雷达站(ZY142)为 X 波段天气雷达(XDP),天线海拔 1987 m,最大测距 120 km,距离分辨率 120 m。



Figure 2. Distribution of radar stations 图 2. 雷达站点分布情况

4. 雷达回波分析

结合天气图与 22 日 23 时至 23 日 01 时西吉 X 波段双偏振雷达组合反射率(图略)可以看到降水云系

自西向东移动,降水中心 23 日 00 时经过固原雷达站,回波强度较强,泾源日降水达 122.1 mm,远超 1996 年 7 月 7 日历史极值 90.9 mm。

在固原雷达站(Z9954) 23 日 00 时 05 分的 0.5°仰角图上(图 3(a)),00 时 05 分回波中心强度在 45 dBZ 左右,冰雹初期形成,局地强回波区表示降水粒子直径较大,可能开始形成冰雹。强回波区对应对流上 升气流开始加强的位置,附近存在弱回波区,可能是由于上升气流很强,使得降水粒子在上升过程中还 未充分增长或聚集。从同一时刻等高平面位置显示图(图 3(b))中可以看到,台站扫描范围内对应大片中小 雨区,回波中心最强处为 48 dBZ,回波形状呈椭圆形,与对流单体相关。回波受高空风向、引导气流等 影响,自西向东移动。

由图 3(c)可知,回波中心强度大于 50 dBZ,这是因为产生冰雹的强对流风暴,其垂直最大反射率因 子会达到较高的值。其中,隆德地区垂直最大反射率具有高度较高的特点,7月22日降水累计值达94.5 mm,-20℃等温线对应的高度之上有超过 50 dBz 的反射率因子,产生强冰雹。总体上看 50 dBz 扩展到 的最大高度越大,冰雹直径越大;湿球 0℃层高度越高,产生同直径冰雹所需的 50 dBZ 反射率扩展高度 越大。在垂直剖面上,垂直最大反射率通常出现在强回波区中,冰雹云中的强上升气流能迅速把大粒子 抬升到高于 0℃层以上的高度,在云内形成含水量累积区,含水量累积区内大量的大冰雹、过冷却水滴的 雷达反射率因子大,构成强回波中心,其中垂直累积液态含水量集中分布在 1~5 kg/m²之间,最大值为 8.114 kg/m²,在15 分钟后迅速达到 16.496 kg/m²。与此同时,在C 波段雷达中往往出现三体散射的现象, 三体散射回波是雷达波经大冰雹粒子反射后再经地面反射形成的虚假回波,其出现通常指示直径≥15 mm 的冰雹存在,但小冰雹或强降水也可能引发伪像。



Figure 3. Comparison of echo characteristics between the C-band Radar at Guyuan Station (a, b, c) and the X-band Radar at Chenger Mountain Station (d, e, f) on July 23, 2024. (a) Basic reflectivity at 00:05 with 0.5° elevation angle; (b) Contour plan position indicator (PPI) at 00:05; (c) Vertical maximum reflectivity at 00:05; (d) Basic reflectivity at 00:06 with 0.5° elevation angle; (e) Contour PPI at 00:11; (f) Vertical maximum reflectivity at 00:11

图 3.2024 年 7 月 23 日固原雷达站 C 波段雷达(a、b、c)与程儿山雷达站 X 波段雷达(d、e、f)回波特征对比。(a) 0.5° 仰角 00:05 基本反射率; (b) 00:05 等高平面位置显示; (c) 00:05 分垂直最大反射率; (d) 0.5° 仰角 00:06 基本反射率; (e) 00:11 等高平面位置显示; (f) 00:11 垂直最大反射率

从图 3(d)可以看出,回波顶高大面积在 6~8 km 范围内,有持续上升的趋势,表明对流活动逐渐加强。 回波顶高最大超过 15 km,对流活动非常强烈,伴有雷电、大风等强对流天气。从垂直最大反射率图(图 3(f))可以看出,因为冰雹粒子对雷达波反射能力强,最大反射率达 68 dBZ。从 2.4°仰角基本反射率及等 高平面位置可以看出雹区中心在固原市原州区。

此次冰雹过程具有明显超级单体雷暴特征。从 C 波段雷达 1.5°仰角的基本反射率图上可以看到,在 00:06 固原原州区的对流单体开始发展,存在明显的回波中心,最大反射率为52 dBz,在对流单体前方存 在强上升运动造成的入流缺口,以及出现钩状回波特征。00:16 回波中心的最大反射率已达 64 dBZ,同 时出现了三体散射回波和旁瓣回波,说明此时对流单体已显示出冰雹回波特征,且持续到 01:00。01:06 三体散射回波和旁瓣回波消失,回波中心的反射轻度开始下降。在速度图上(图略)可以看到强回波中心对 应的地方存在速度对,雷达径向左侧为负速度中心,径向右侧为正速度中心,正负速度中心差值约25m/s, 且正负速度对中心距离约在5km左右,呈现中尺度气旋特征。X 波段雷达由于具有更短波长和更高分辨 率, 能展现与 C 波段雷达不同的回波特征, 并且能反映对流单体更细微的回波特征。对比 00:05 的程儿 山 X 波段雷达的基本反射率图可以发现,在4.3°仰角上的最大反射率为63 dBz (图 4(a)),对流单体同样 具有入流缺口特征(图 4(b)),并且风暴主体向着入流方向伸出一个突出物,同时由于大粒子对较短波长电 磁波的强衰减作用,在对流云回波后方有"V"型缺口特征。在计算固原雷达 1.5°仰角速度图中气旋所在 高度后,选取程儿山雷达 3.3°仰角作对比,发现程儿山雷达 3.3°仰角速度图中同样具有中气旋特征,正负 速度中心差值约10m/s,且中气旋同时存在于2.4°到4.3°的3个不同仰角上(图略),说明雷暴中心的中尺 度气旋性运动十分深厚; 6.0°和9.9°仰角上均为辐散性速度场,同一水平高度上呈现雷暴前方为大范围外 流区,十分有利于雷暴云高度组织性的维持。以距离程儿山雷达站 50 km 作为起点,对雷暴单体做基本 反射率剖面分析可以发现,00:20 强回波顶高在 12 km 处(图 4(c)),强度超过 55 dBz 的回波核位于 4~10 km 高度, 与银川探空 0℃和-20℃层高度有较好的对应关系; 存在与强入流和强上升运动对应的弱回波 区(WER)和悬垂结构,具有明显的回波墙。



Figure 4. X-band Radar Echoes from Chenger Mountain. (a) Base reflectivity at 4.3° Elevation at 00:11; (b) Base reflectivity at 6.0° elevation at 00:11; (c) Echo top height at 00:20 图 4. 程儿山 X 波段雷达回波图。(a) 4.3° 仰角 00:11 时基本反射率; (b) 6° 仰角 00:11 时基本反射率; (c) 达 00:20 时 回波顶高

5. 结果与讨论

利用常规探空资料、六盘山地区 C 波段与 X 波段双偏振多普勒天气雷达资料相结合,对 2024 年 7 月 22 日一次六盘山地区对流单体冰雹过程进行分析,此次过程在蒙古冷涡东移、高原低值系统东移、台风与副热带高压相互作用的天气背景下,大气层结具有强不稳定度,垂直方向上风向表现为顺滚流配置,存在强的垂直风切变,均有利于对流运动的发展。探空站的各项探空指数数值在 22 日 20:00 达到最大并超过了临界值,反映出不稳定能量先累积后释放的特征。22 日银川探空的 0℃层高度以及-20℃层高度均十分有利于冰雹在雷暴单体中的维持和增长。

固原 C 波段雷达和程儿山 X 波段雷达的反射率因子以及径向速度均表现出十分典型的超级单体雷暴回波特征,但 2 部雷达的回波特征有所差别。在同一高度上程儿山 X 波段雷达的回波强度比固原 C 波段雷达的弱,也没有出现通常能用来确定冰雹的三体散射回波和旁瓣回波。雷暴单体强回波顶高在 12 km

处,强度超过 55 dBz 的回波核高度与银川探空 0℃和-20℃层高度有较好的对应关系;存在与强入流和强上升运动对应的弱回波区和悬垂结构,具有明显的回波墙。

基金项目

中国气象局旱区特色农业气象灾害监测预警与风险管理重点实验室 2024 年度青年培养项目(CAMT-202402)。

参考文献

- [1] Binetti, M.S., Campanale, C., Massarelli, C. and Uricchio, V.F. (2022) The Use of Weather Radar Data: Possibilities, Challenges and Advanced Applications. *Earth*, **3**, 157-171. <u>https://doi.org/10.3390/earth3010012</u>
- [2] 罗浩,杨凤婷.基于双偏振多普勒雷达的贵阳一次春季强对流天气的综合分析[J]. 气候变化研究快报, 2024, 13(2): 327-342.
- [3] Zhang, G. (2016) Advances in Polarimetric Weather Radar Technology and Applications. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **33**, 11-37.
- [4] Zhao, K., Huang, H., *et al.* (2019) Recent progress in Dual-Polarization Radar Research and Applications in China. *Advances in Atmospheric Sciences*, **36**, 961-974. <u>https://doi.org/10.1007/s00376-019-9057-2</u>
- [5] Otsubo, A. and Adachi, A. (2024) Short-Term Predictability of Extreme Rainfall Using Dual-Polarization Radar Measurements. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **102**, 151-165.
- [6] 龙安华,龙源. 黔东南州一次冰雹天气过程分析[J]. 气候变化研究快报, 2021, 10(5): 474-483.
- [7] 刘艳, 张涛. 一次早春冰雹天气过程的双偏振相控阵雷达回波特征分析[J]. 地球科学前沿, 2021, 11(9): 1188-1194.
- [8] 张秉祥, 李国翠, 刘黎平, 等. 基于模糊逻辑的冰雹天气雷达识别算法[J]. 应用气象学报, 2014, 25(4): 415-426.
- [9] 高亮书,姚展予,贾烁,等. 六盘山地区一次低槽低涡云系结构及其降水机制的数值模拟研究[J]. 大气科学, 2021, 45(2): 257-272.
- [10] 陈楠, 赵光平, 陈晓光. 近 40 年宁夏云量和气温年际变化的相关分析[J]. 高原气象, 2006(6): 1176-1183.
- [11] 马思敏, 刘晓莉, 杨侃, 等. 宁夏固原市一次对流性天气的数值模拟[J]. 干旱气象, 2015, 33(2): 278-290.
- [12] 赵庆云, 张武, 陈晓燕, 等. 一次六盘山两侧强对流暴雨中尺度对流系统的传播特征[J]. 高原气象, 2018, 37(3): 767-776.
- [13] 张沛,姚展予,贾烁,等. 六盘山地区空中水资源特征及水凝物降水效率研究[J]. 大气科学, 2020, 44(2): 421-434.
- [14] 邱玉珺, 舒志亮, 陆春松, 等. 六盘山地形及相对湿度对微波辐射计反演气温的影响[J]. 大气科学, 2024, 48(2): 659-670.
- [15] 田磊, 桑建人, 姚展予, 等. 基于 Ka 波段云雷达的六盘山顶云特征分析[J]. 气象与环境学报, 2021, 37(2): 84-90.