

冰雹预警的差分反射率特征：以山东三次冰雹过程为例

王文青¹ 杨慧玲^{2,3} 孙跃^{2,3} 蒋如斌^{2,3} 刘昭武⁴ 冯亮² 肖辉^{2,3}

¹ 山东省人工影响天气办公室， 济南 250031

² 中国科学院大气物理研究所大气环境与极端气象全国重点实验室，云降水物理与强风暴重点实验室，北京 100029

³ 中国科学院大学地球与行星科学学院，北京 100049

⁴ 山东省滨州市气象局，滨州 251799

提 要： 基于山东三次降雹个例，利用差分反射率 (Z_{DR}) 和冷层组合差分反射率 (C_{ZDR}) 开展雷达数据特征和冰雹预警研究，结果表明：在雷达回波面积较小时， C_{ZDR} 图中已可见降雹点附近云中出現约 3 dB 的 Z_{DR} 柱特征。 Z_{DR} 柱特征在降雹时刻前 20~40min 出现，较基于 45 dBz 或 55 dBz 反射率因子阈值的指标提前 10~20 min，具备提前预警冰雹的潜力。X 波段双偏振相控阵雷达、S 波段和 C 波段雷达等不同波段和扫描体制的天气雷达均能呈现强对流预警所需的 Z_{DR} 柱特征。此外， C_{ZDR} 图上 Z_{DR} 柱在三个个例中均紧邻且环绕降雹点，位于降雹点的对流层中层上风方向，可对降雹点预报、预警起到参考作用。

关键词： 双偏振雷达，差分反射率，冰雹预警

Characteristics of Differential reflectivity for Early Warning of Hail: Three Hail Cases in Shandong Province

Wang Wenqing¹ Yang Huiling^{2,3*} Sun Yue^{2,3} Jiang Rubin^{2,3} Liu Zhaowu⁴ Xiao Hui^{2,3} Feng Liang^{2,3}

¹ Shandong Weather modification office, Jinan 250031

² State Key Laboratory of Atmospheric Environment and Extreme Weather

& Key Laboratory of Cloud-Precipitation and Severe Storms of Chinese Academy of Sciences, Institute of Atmospheric Physics,

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

³ University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

中国科学院战略性先导科技专项 (XDB0760402)、中部区域人工影响天气能力建设项目研究试验 (ZQC-T22254)、黔科合支撑项目[2023]和山东省气象局榜单类专项 (2023SDBD09) 共同资助
第一作者：王文青，主要从事中尺度气象和人工影响天气研究.E-mail:wwqsdqxt@163.com
通讯作者：杨慧玲，主要从事云降水物理和人工影响天气研究.E-mail: yanghuiling@mail.iap.ac.cn

Abstract: Radar data features and hailstorm warning studies are conducted via differential reflectivity (Z_{DR}) and the cold layer composite differential reflectivity (C_{ZDR}) on the basis of three hailstorm cases observed in Shandong Province in recent years. The results indicate that even when the radar echo area is relatively small, a 3 dB Z_{DR} column feature can be observed within the cloud near the hailfall points in the C_{ZDR} map. The Z_{DR} column feature appears 20–40 minutes before the first hailfall time during a hail event, which is 10–20 minutes earlier than the traditional way by using 45 dBz or 55 dBz reflectivity threshold, indicating its potential as an early warning indicator for hailstorms. Weather radars of different wavelengths and scanning systems, including X-band dual-polarization phased-array radar, S-band, and C-band radars, present the Z_{DR} column feature necessary for strong convective weather warnings in both the C_{ZDR} map and Z_{DR} echo area time–height plot. Additionally, the Z_{DR} column feature on the C_{ZDR} map is closely situated and surrounds the hailfall points in all three case studies. These Z_{DR} column features are located northwest of the hailfall points, which are in the mid-tropospheric upwind direction, and could serve as a reference for hailfall locations prediction and warning. .

Keywords: dual-polarization radar, differential reflectivity, hail early warning

引言

差分反射率 (Z_{DR}) 柱是雷达观测中一种垂直柱状回波结构, 表现为 Z_{DR} 高值区在对流云内呈柱状延伸至 0°C 层以上 (Illingworth et al, 1987)。暖层中连续的 Z_{DR} 高值区通常与大雨滴的存在相关 (Kumjian and Ryzhkov, 2008; Snyder et al, 2015), 并可用于区分雨滴和冰相粒子 (如霰或冰雹) (Bringi et al, 1991), 而 Z_{DR} 高值区为何能延伸到 0°C 层以上, 成为自双偏振天气雷达被应用后较早被关注的现象 (Hall et al, 1980, 1984; Conway and Zrnić, 1993)。飞机观测、地面雷达探测 (Brandes et al., 1995) 及数值模拟 (Tuttle et al, 1989; Kumjian et al, 2014; Ilotoviz et al, 2016; van Lier-Walqui et al, 2016) 等和 Z_{DR} 柱相关的研究已揭示, 强对流上升气流的输送作用和过冷层的液滴碰并促进了过冷大雨滴和对应的 Z_{DR} 柱的形成。

Z_{DR} 柱可作为识别强对流天气、预警冰雹和大风的重要雷达观测特征 (Snyder et al, 2015)。其形态、高度和面积等参数与强上升气流及冰雹生成密切相关 (Ilotoviz et al, 2018; Snyder et

al, 2017)。Z_{DR} 柱的延伸高度和面积越大，通常预示更强的对流活动和冰雹潜力（潘佳文等，2023）。Z_{DR} 柱不仅在强对流单体早期随主要的上升气流出现，在对流中期也可随地面降水出流强迫而次生（Ren et al, 2024），有助于揭示对流单体内部动力结构的复杂性。近年来的研究还发现高炮防雹作业后 Z_{DR} 柱在短时间内消失（孙跃等，2023）。这些研究表明 Z_{DR} 柱在强对流天气的监测、预警和人工防雹等方面均具有重要的应用价值。

传统机械扫描式的天气雷达扫描速度慢，且不同时刻扫描的仰角不同，可能使观测到的对流单体垂直结构出现错位，从而导致无法正确捕捉到 Z_{DR} 柱。相比之下，相控阵天气雷达采用方位机械扫描、俯仰相扫方式，具有高时空分辨率扫描能力，可精确捕捉云体内部结构与演变（Wu and Liu, 2014; Palmer et al, 2022; Kollias et al, 2022），开展强对流天气监测预警研究（Kuster et al, 2020; McKeown et al, 2020）。例如 Kuster et al（2019）使用快速更新的雷达数据（体扫时间 ≤ 2.3 min），基于美国 Oklahoma 州 42 次强对流个例分析了 Z_{DR} 柱的面积和深度等特征，指出这些 Z_{DR} 柱特征相对于 -20 ℃ 层反射率因子核心出现时间均有不同程度的提前，可为冰雹、大风等强对流预警争取更多时间。

尽管我国近年来陆续部署一批相控阵天气雷达（Zhao et al, 2024），但是，利用 Z_{DR} 柱特征进行冰雹预警方面还存在许多挑战。一方面，类似经验（Kuster et al, 2019）不容易直接移植，因为不同地区的天气、气候背景存在诸多差异（潘佳文等，2020；高丽等，2021；阮悦等，2022；汤兴芝等，2022；王晓君和郑媛媛，2022；龚佃利等，2024；王福侠等，2024；夏凡等，2024；杨湘婧等，2025；余文梅等，2025），加之不同波段和型号雷达的数据本身存在差异，观测到的 Z_{DR} 柱特征也各不相同（王清川等，2022；刘瑾等，2022；沈雨等，2023；李芳等，2023；郭飞燕等，2023）。另一方面，目前我国不同地区相控阵天气雷达探测冰雹云的个例大都尚在积累阶段，有必要着眼于部署时间相对长、范围广、个例积累相对较多的传统机械扫描天气雷达开展统计研究。

为充分利用强对流云的雷达探测信息，推动冰雹云早期识别和预警研究，本文基于山东近年来的三次局地性强、发展迅速的降雹个例，提出能够诊断 Z_{DR} 柱特征的分析方法，并结合不同扫描体制和型号的天气雷达，开展雷达数据特征和冰雹预警研究。

83

84 1 数据与方法

85 1.1 降雹个例与雷达数据

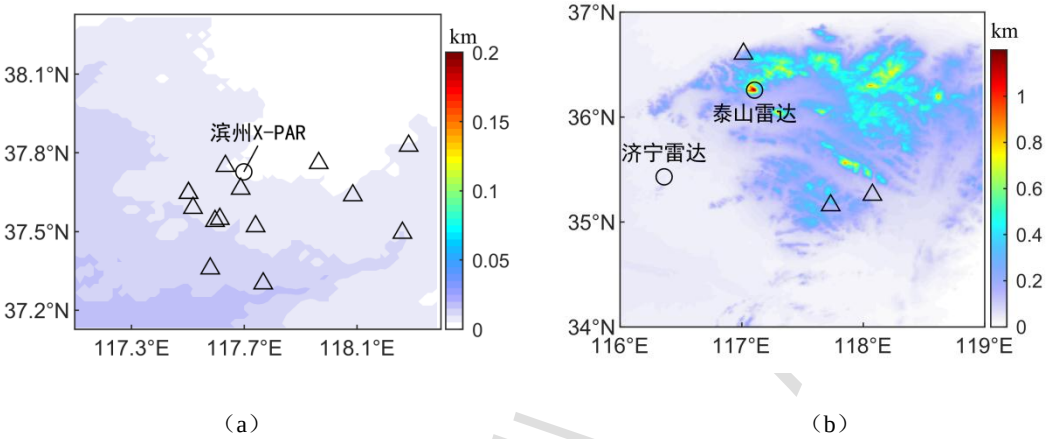
86 本文分析的三次降雹个例和所使用的雷达见表 1 和图 1。三次过程 500 hPa 上山东均位于西北气流中，低层均受西太平洋副热带高压西侧偏南风控制。文中所用时间均为北京时。

88 表 1 山东三次降雹个例及研究使用的雷达

89 Table 1 Three hailstorm cases in Shangdong Province and radars used in this study

个例序号	日期	降雹区域	降雹地点和时间	研究使用的雷达
1	2022 年 6 月 13 日	滨州	滨州和东营共 49 条记录，降雹时间范围为 12:01-15:30，在雷达监测范围内的首个降雹时刻为 12:14	滨州 X 波段双偏振相控阵雷达（X-PAR）
2	2024 年 5 月 18 日	临沂费县	胡阳徕庄村（14:38）、梁邱镇（16:39）	济宁 S 波段雷达
3	2024 年 5 月 18 日	济南	龟山站（18:40）	济宁 S 波段雷达、泰山 C 波段雷达

90



91

92

93

94

95

96

97

98

99

100

101

102

103

104

105

106

107

图 1 研究个例降雹位置、所用雷达及周边地形（填色）

(a) 2022 年 6 月 13 日降雹个例，(b) 2024 年 5 月 18 日两次降雹个例

Fig. 1 Study case hailfall location , radar and surrounding terrain (colored)

(a) hailstorm case June 13, 2022, (b) May 18, 2024 dual hailstorm cases

对于 2022 年 6 月 13 日山东滨州的降雹个例（以下简称个例 1），使用 X 波段相控阵双偏振雷达（X-PAR）观测数据进行分析。雷达站点海拔高度 22 m，采用方位机械扫描、俯仰相扫的体制，每约 123 s 生成一个体扫数据，含有 24 个仰角（0.9°~42.3°，采样分辨率 1.8°），每个仰角下含 400 个方位（采样分辨率 0.9°），径向距离库分辨率为 30 m，最大探测距离 57.96 km。

对于 2024 年 5 月 18 日发生在山东临沂费县的降雹个例（以下简称个例 2），使用济宁 S 波段业务化天气雷达数据。该雷达为 CINRAD-SA 型双偏振雷达，海拔高度 168 m，监测降水云时采用 VCP21 模式进行体扫，在约 340 s 内于 9 个仰角（0.5°~19.5°）下进行方位周扫，径向距离分辨率 250 m，最大探测距离 525.75 km。

对于 2024 年 5 月 18 日发生在山东济南的降雹个例（以下简称个例 3），除了使用济宁

S 波段雷达外, 还使用距离降雹点更近的泰山 C 波段业务化天气雷达数据, 两部雷达直线距离大约为 120 km。该雷达为 CINRAD-CD 型双偏振雷达, 海拔高度 1546 m, 在约 354 s 内于 14 个仰角 ($0.5^{\circ} \sim 19.5^{\circ}$) 下进行方位周扫, 径向距离分辨率 150 m, 最大探测距离 457.05 km。利用上述 S 波段和 C 波段雷达分别对同一降雹个例进行观测, 也有助于对这两个常见的业务化天气雷达在冰雹预警能力方面的一致性和适用性进行对比。

1.2 数据处理和分析方法

1.2.1 三维直角坐标插值

将雷达数据 (基于球坐标) 插值到三维直角坐标格点。采用三线性插值方法估算目标格点上的水平反射率 (Z_H) 和差分反射率 (Z_{DR}) (王超, 2023; Ren et al, 2024)。对不同型号雷达的插值格点垂直分辨率均设为 0.1 km。为了兼顾 X-PAR 的精细化观测能力, 将其插值出的水平格点分辨率设为 0.1 km。而对于 S 波段和 C 波段雷达, 将水平分辨率设为 1 km。这主要是因为本文使用的 S 波段和 C 波段雷达的波束宽度和方位角采样宽度均为 1° , 在 100 km 距离上已对应超过 1.74 km 的雷达波束切向距离, 设定比 1 km 更精细的插值水平分辨率无实际意义。在插值前, 考虑到 X-PAR 的统计波动较大, 对本文所使用的 Z_H 和 Z_{DR} 沿雷达径向进行 500 m 窗口的有限脉冲响应 (FIR) 低通滤波 (Ren et al, 2024), 并剔除最低两层仰角层中交叉极化相关系数小于 0.7 的点, 屏蔽人工确定为经常性遮挡的径向。对 C 波段进行 1.2 km 窗口的 FIR 低通滤波。涉及数据处理的其他问题见 1.2.4 节。

1.2.2 冷层组合 Z_{DR}

冷层组合 Z_{DR} (C_{ZDRC}) 是每个水平格点上空 0°C 层以上高度 Z_{DR} 的最大值。其计算方法类似组合反射率 (每个水平格点上空 Z_H 的最大值, 以下简称 Z_e)。本文三个降雹个例中的 0°C 层高度由相近时次的 FNL 分析数据和 ERA5 再分析数据综合获得。

C_{ZDRC} 可直观反映 Z_{DR} 柱的水平位置和强度 (Ren et al, 2024)。在传统观点中, 求不同高度上 Z_{DR} 的最大值并无意义, 因为云顶存在水平冰晶、雪粒子的区域和云体边缘弱回波中水平和垂直偏振功率不平衡的区域都常存在一些 Z_{DR} 的大值, 会使得组合 Z_{DR} 图中布满无诊断意义的大值点。但是, X-PAR 由于功率小、灵敏度低, 其能观测到的回波主要为 Z_H 大于 20 dBz 的回波, 恰好很难采集到云体边缘和云顶等易产生 Z_{DR} 大值的弱回波区的数据, 由此计算的 C_{ZDRC} 上的大值中心便可直观反映 Z_{DR} 柱特征。利用 C_{ZDRC} 分析 Z_{DR} 柱的位置和

强度特征，一方面可以避免对不同仰角层数据进行逐层查看、找到疑似 Z_{DR} 柱特征又由于高度不同而不易确定温度的局限性，另一方面对由于回波移动而使回波垂直结构在机械扫描天气雷达体扫数据中存在错位的情况也具有一定的兼容性，可避免人工垂直剖面查看时出现遗漏。

基于上述在 X-PAR 上利用 C_{ZDR} 诊断 Z_{DR} 柱的经验，对本文所使用的 X-PAR、S 波段和 C 波段雷达，均屏蔽 Z_H 小于 20 dBz 的回波后再计算 C_{ZDR} 。对这种屏蔽做法的必要性和影响的讨论见 2.4 节。

1.2.3 回波面积的时间—高度演变

对 Z_H 和 Z_{DR} 大于一定阈值的格点面积进行统计，形成时间—高度演变，可以弥补 C_{ZDR} 图上只有 Z_{DR} 柱水平位置特征而没有垂直结构诊断特征的局限性。本文对 Z_H 分别取 35、45、55 dBz，对 Z_{DR} 分别取 1、2、3dB 作为阈值进行统计。其中 Z_H 大于 35 dBz 仅用于表征明显降水回波的出现。屏蔽某个时间和高度上只有 1 个计数的点，以减少偶发性的杂波或非 Z_{DR} 柱内水平取向粒子的干扰。选取回波面积在时间和高度上相对连续出现的最早时刻在图中进行标示，用于讨论 Z_H 强回波和 Z_{DR} 柱特征出现的先后顺序。

对于回波面积时间—高度演变的空间统计范围，为了针对性地研究降雹云的变化特征，以每个个例中雷达监测范围内的首个降雹报告地点为准，屏蔽周边其他单体的回波，选取对应的降雹云的活动区域进行统计。具体做法为：个例 1 屏蔽 37.9°N 以北、118°E 以东的数据；个例 2 屏蔽 35.5°N 以北、117°E 以西的数据；个例 3 屏蔽 36.5°N 以南、117.5°E 以东的数据。关于选定统计区域所造成影响的讨论见 2.4 节。

1.2.4 质量控制的其他问题

除 1.2.1 节所述数据处理外，本文不再进行其他杂波滤除操作。这主要是为了避免过度的滤波或数据剔除影响到原本可见的 Z_{DR} 柱特征。按照 1.2.1 节的插值方法，只有在上下相邻两个仰角同时具有回波时，才能获得目标点的插值结果，故大部分偶发性杂波和主要集中在第一层仰角中的边界层杂波等非降水性回波将在插值过程中自动被剔除。

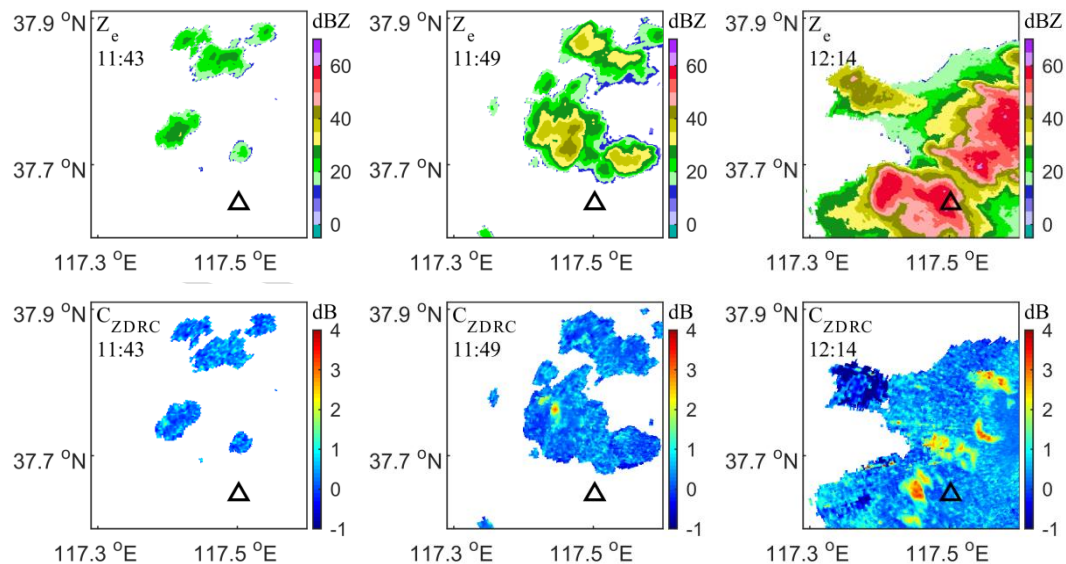
本文不对所使用的 X 波段和 C 波段雷达数据进行衰减订正操作，主要原因有以下三点。一是本文着眼于冰雹的早期预警，即尚未形成明显的强对流云图时的冰雹预警，此时雷达信号衰减十分有限。二是衰减订正操作难免会引入一些偏差，例如过度订正或波束间额外的条纹状偏差，这些会干扰到本文对 Z_{DR} 柱特征的识别。三是滨州 X-PAR 基数据中储存了衰减

订正后的 Z_H 和 Z_{DR} ，但没有储存原始的 Z_{DR} ，这使得重新开展 Z_{DR} 的衰减订正工作存在一定困难。

2 结果分析

2.1 2022 年 6 月 13 日滨州降雹个例

在滨州 X-PAR 监测范围内首个降雹时刻前约 30 min (11:43)、降雹点以西可见 20 dBZ 以上的单体云初生 (图 2)。此时 C_{ZDR} 显示有许多分散的 1 dB 左右的数据点，很难直观反映是否存在 Z_{DR} 柱。在降雹前 25 min (11:49)，降雹点西北侧的 Z_e 核心刚超过 40 dBZ，但 C_{ZDR} 图上已可以看到明显的 Z_{DR} 柱特征。在回波核心的偏后侧 (西北侧) 存在 3 dB 左右的 C_{ZDR} 大值中心，表明该处存在强上升气流和过冷雨滴。在首个降雹时刻 (12:14)，降雹点附近的云团已发展为多个 Z_e 核心在 55 dBZ 以上的单体。同时， C_{ZDR} 图显示此时同时存在多个 Z_{DR} 柱特征，其中一部分是围绕降雹点的，但降雹点上空不具备 Z_{DR} 柱特征。这种 Z_{DR} 柱水平分布形态和超级单体是相反的，但是和 Ren et al (2024) 归纳的模型类似，即在强上升气流和过冷雨滴区的对流层中高层下风方向可产生霰和雹，相关差异在 2.6 节展开讨论。综上，本个例显示， C_{ZDR} 图中出现的 Z_{DR} 柱特征虽然不能直接提示降雹点，但在回波发展的早期能够提示对流的增强。



注：三角代表首个降雹点的参考位置，下同。

图 2 2022 年 6 月 13 日个例 1 滨州 X-PAR (a~c) Z_e 和 (d~f) C_{ZDR}

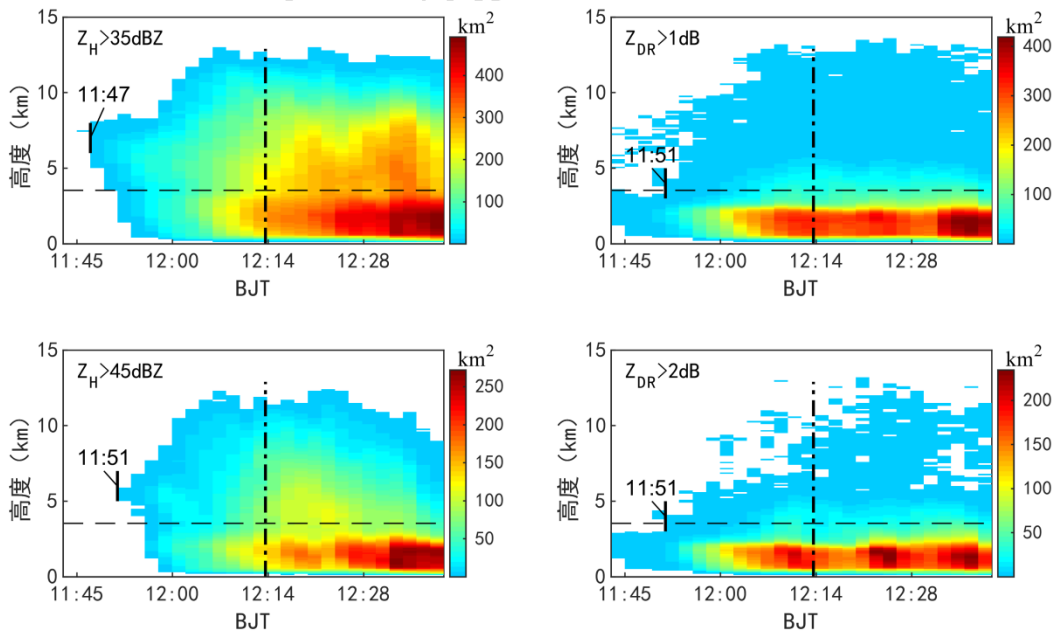
Fig. 2 (a~c) Z_e and (d~f) C_{ZDR} at Binzhou X-PAR in the case 1 on 13 June 2022

190

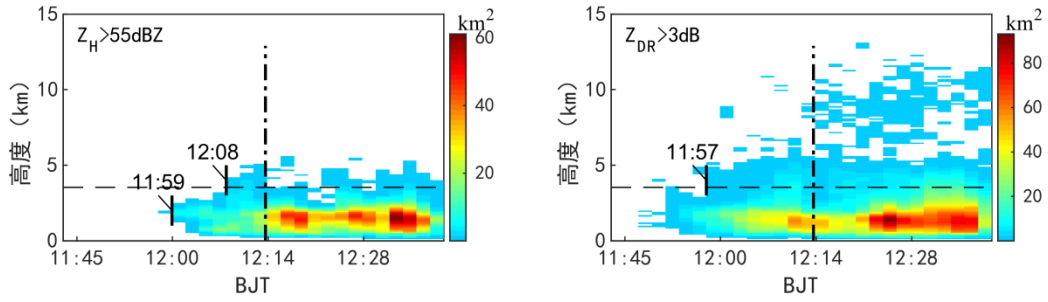
191 回波面积的时间—高度演变（图 3）中显示， Z_H 大于 35dBz、45 dBz 的回波分别在降雹
192 前 27 min 和 23 min 出现。虽然 45 dBz 是一个监测强对流的阈值，但是，以往山东观测个例
193 中某些融化层亮带也会出现 $\geq 45\text{dBz}$ 的回波（Sun et al, 2023），且在降雹前 20 min 左右 45
194 dBz 的强回波面积只有 10^0 km^2 量级，前期如此小的强回波面积很难明确指示强对流云，而
195 待其扩大到 $10^1 \sim 10^2 \text{ km}^2$ 量级，距降雹已不足 10 min。此外， $>55 \text{ dBz}$ 的回波在降雹前 15 min
196 首先出现在暖层，可能是由于霰粒子融化和雨滴碰并增长的共同作用，但并不能起到提示降
197 雹的作用，而当冷层出现垂直方向上连续大于 55 dBz 的回波时（12:18），距降雹（12:24）
198 只剩 6 min，可提前预警的时间很短。

199 另一方面， Z_{DR} 大于 1dB、2 dB 的回波在 11:49 前主要集中在暖层，对应暖层雨滴，而
200 11:49 先出现在 0°C 附近冷层的 Z_{DR} 回波和暖层不相连，不易直接判断其对应的是 Z_{DR} 柱还
201 是其他水平取向的冰相粒子或杂波。11:51（降雹前 23 min）， Z_{DR} 大于 1dB、2 dB 的回波从
202 暖层延伸到冷层，符合 Z_{DR} 柱特征，且该特征持续出现，故可以指示 Z_{DR} 柱的存在。 Z_{DR} 柱
203 的出现时间与图 2 中 C_{ZDR} 诊断结果也基本一致（图 2）。 $Z_{DR} > 3\text{dB}$ 时，上述 Z_{DR} 柱特征
204 出现的时间为 11:57，较降雹提前 17 min。此外， $Z_{DR} > 1 \text{ dB}$ 的回波面积在高空始终有零星
205 的“噪点”，这可能是受水平冰晶、雪或其他杂波影响产生，会干扰对 Z_{DR} 柱是否出现的判断。
206 总体来说，个例 1 中采用 Z_{DR} 大于 2dB、3 dB 阈值，可在降雹前 20 min 左右从回波面积的
207 时间-高度演变中识别出 Z_{DR} 柱，从而对冰雹云进行早期识别。

208



209



注：虚线代表 0℃ 层高度（3.5km），点划线代表首个降雹时刻，黑短线及标注时间代表指标出现时间。

图 3 2022 年 6 月 13 日个例 1 滨州 X-PAR (a~c) Z_H 和 (d~f) Z_{DR} 回波面积的时间—高度演变

Fig. 3 Time-height evolution of echo area for (a~c) Z_H and (d~f) Z_{DR} at Binzhou X-PAR in the case 1 on 13 June 2022

2.2 2024 年 5 月 18 日费县降雹个例

个例 2 中，在济宁 S 波段雷达上可明确看到降雹点附近有对流云形成时（13:57），单体的 Z_e 已超过 35 dBz（图 4）。此时 C_{ZDRC} 虽然整片超过 1 dB，但未出现强中心， Z_{DR} 柱特征不明显。在降雹前 35 min（14:03）， Z_e 核心超过 45 dBz，但回波范围仍然很小，此时 C_{ZDRC} 图上已有明显的 3 dB 左右的中心，表明了 Z_{DR} 柱的存在。在降雹时刻（14:37）， Z_e 最大值在 60 dBz 左右，而 C_{ZDRC} 图中显示的 Z_{DR} 柱特征与 2.1 节个例类似， Z_{DR} 柱围绕降雹点且位于降雹点的对流层中层上风方向。

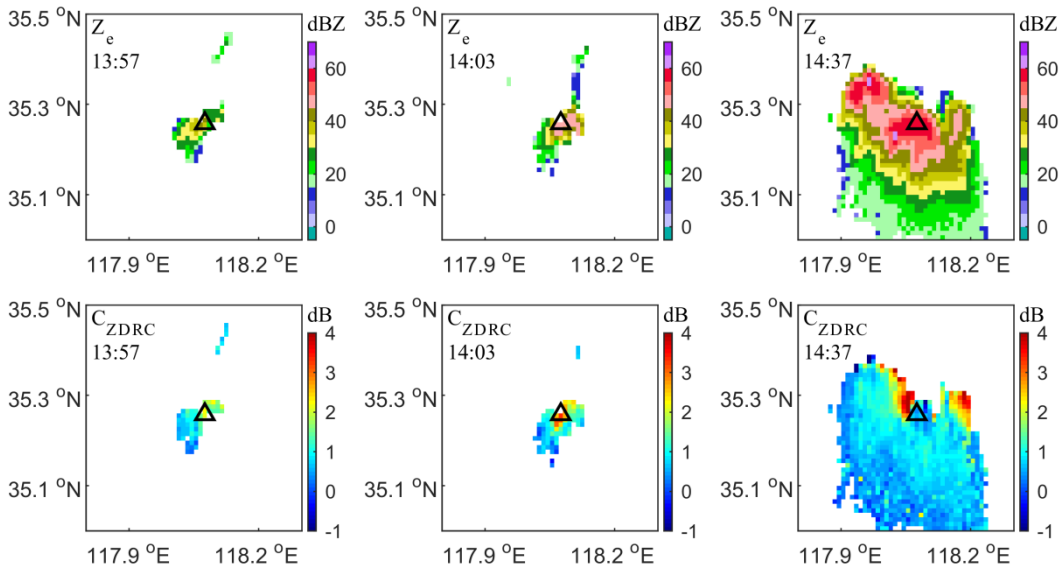
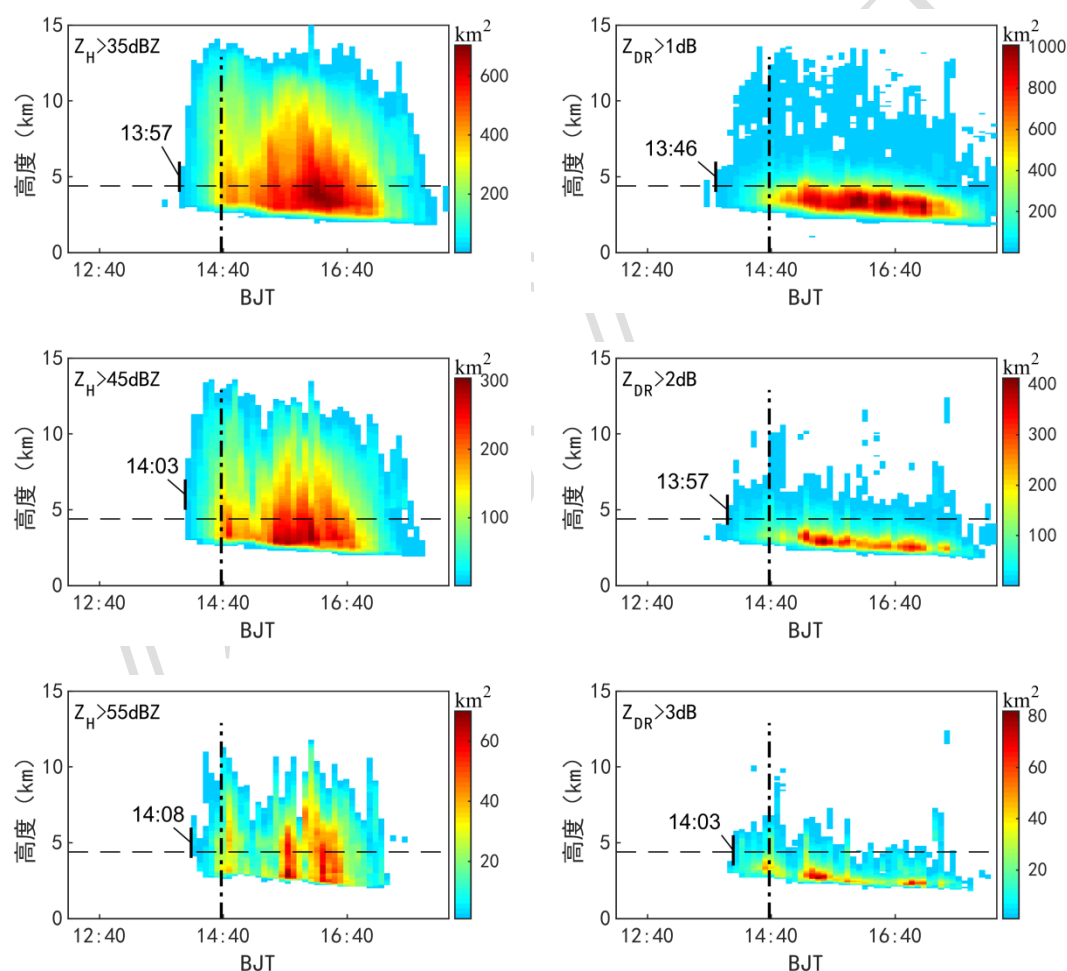


图 4 2024 年 5 月 18 日个例 2 济宁 S 波段雷达 (a~c) Z_e 和 (d~f) C_{ZDRC}

Fig. 4 (a-c) Z_e and (d-f) C_{ZDR} at Jining S-band Radar in the case 2 on 18 May 2024

回波面积的时间-高度演变（图 5）显示， Z_{DR} 大于 1、2、3 dB 且从暖层延伸到冷层的回波分别比 Z_H 大于 35、45、55 dBz 的回波早出现 5~11 min。但结合图 4 来看，至少在 15:57 C_{ZDR} 图上大于 1、2 dB 的回波强中心不明显，不容易确认 Z_{DR} 柱的存在，此时根据图 5 中 1、2 dB 阈值的 Z_{DR} 诊断 Z_{DR} 柱不一定可靠。而 Z_{DR} 大于 3 dB 时，出现 Z_{DR} 柱时间（14:03）较降雹提前了 35 min，图 4 中该时刻 Z_{DR} 柱也较为明显，更适合作为提前预警冰雹云的指标。这一特征虽然只比 Z_H 大于 55 dBz 出现提前 5 min，且和 Z_H 大于 45 dBz 出现时间相同，但考虑到初期强 Z_H 的面积很小，在降雹前约 10~20 min 才开始具有可观的面积，因此，使用 Z_{DR} 大于 3 dB 作为预警指标较 Z_H 可使预警提前约 10 min。



注：横虚线代表 0℃ 高度（4.4 km），竖点划线代表首个降雹时刻，黑短线及标注时间代表指标出现时间，下同。

图 5 2024 年 5 月 18 日个例 2 济宁 S 波段雷达 (a~c) Z_H 和 (d~f) Z_{DR} 回波面积的时间—高度演变

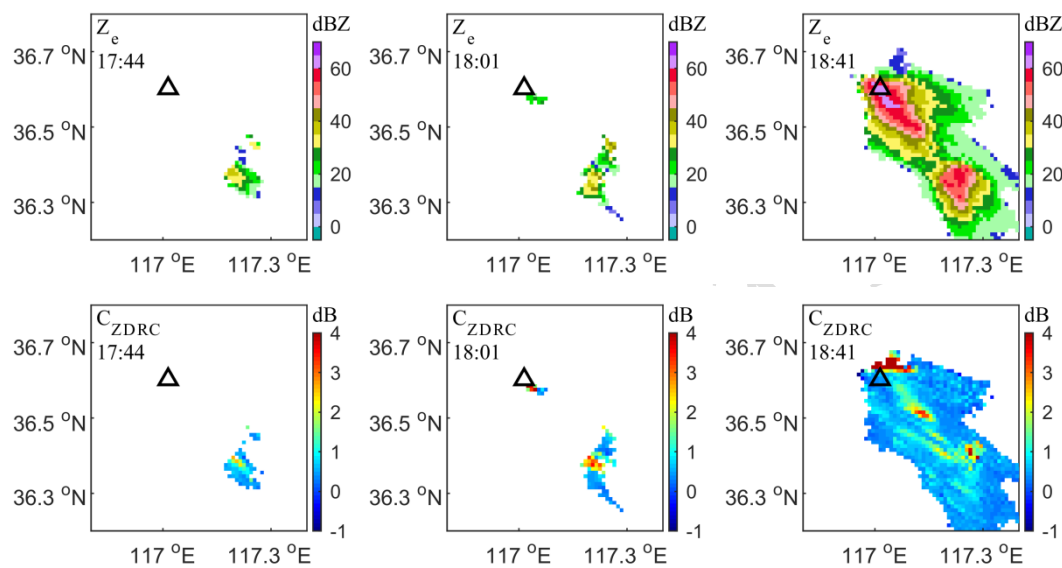
Fig. 5 Time-height evolution of echo area (a-c) Z_H and (d-f) Z_{DR} at Jining S-band Radar in the case 2 on

245 18 May 2024

246 2.3 2024 年 5 月 18 日济南降雹个例

247 2.3.1 济宁 S 波段雷达

248 在降雹前约 1 h, 降雹点上空无回波, 但其东南侧临近范围已出现具有 Z_{DR} 柱的对流单
249 体 (图 6)。在降雹前 39 min (18:01), 紧邻降雹点的东南侧出现回波, 其 Z_e 虽然刚超过
250 20 dBZ, 但 C_{ZDRC} 已显示出超过 3 dB 的中心, 表明此处有强上升气流和过冷雨滴区形成。
251 在降雹时刻 (18:41), 降雹点上空为 Z_e 超过 60 dBZ、沿西北—东南方向分布的强对流单体。
252 此时 C_{ZDRC} 图上的 Z_{DR} 柱特征与前两个个例类似, 位于降雹点的偏上风方向。



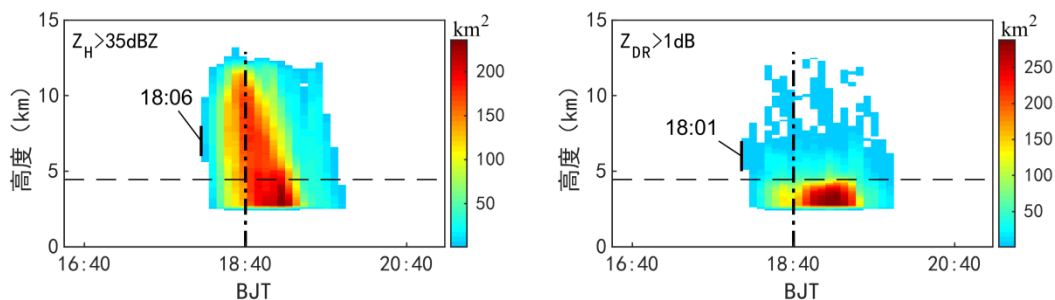
254

255 图 6 2024 年 5 月 18 日个例 3 济宁 S 波段雷达 (a~c) Z_e 和 (d~f) C_{ZDRC}

256 Fig. 6 (a~c) Z_e and (d~f) C_{ZDRC} at Jining S-band Radar in the case 3 on 18 May 2024

257

258 图 7 显示, Z_{DR} 大于 1、2、3 dB 的回波出现时间相同, 且分别比 Z_H 大于 35、45、55 dBZ
259 的回波早出现 5、17、23 min。与以 Z_H 大于 45 dBZ 或更高阈值的回波面积为特征指标的预
260 警方案相比, 基于图 7 中 Z_{DR} 柱可使预警提前约 20 min。



261

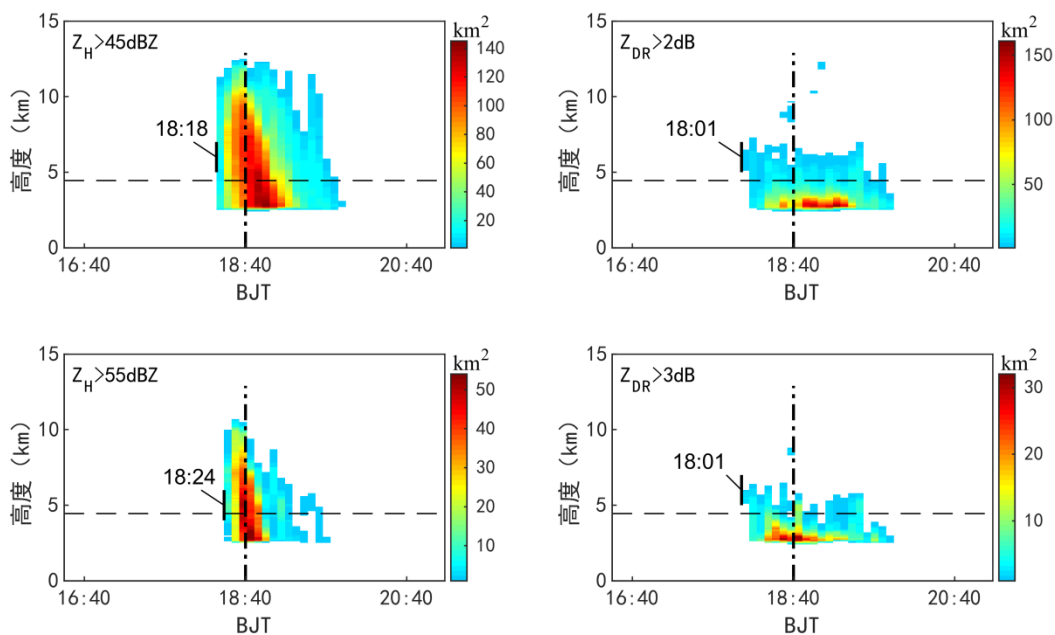
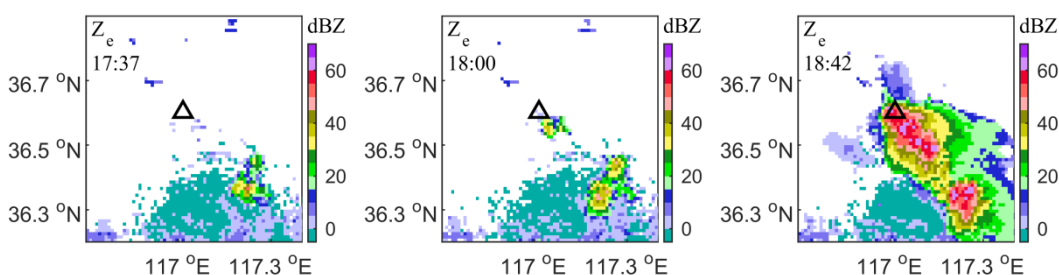


图 7 2024 年 5 月 18 日个例 3 济宁 S 波段雷达 (a~c) Z_H 和 (d~f) Z_{DR} 回波面积的时间—高度演变

Fig. 7 Time-height evolution of echo area for (a—c) Z_H and (d—f) Z_{DR} at Jining S-band Radar in the case 3 on 18 May 2024

2.3.2 泰山 C 波段雷达

泰山 C 波段雷达结果 (图 8) 和济宁 S 波段雷达结果 (图 6) 总体一致, 在降雹前 40 min (18:00) 紧邻降雹点的东南侧出现 Z_{DR} 柱。不同之处有二: 一是可能由于 C 波段雷达本身灵敏度高于 S 波段, 且泰山 C 波段雷达距离降雹点更近, 灵敏度更高, 在 Z_e 图上出现更多 0 dBZ 左右的非降水回波, 相应位置 C_{ZDR} 图上也有极个别大值噪点, 但并不影响对 Z_{DR} 柱的判断, 也很容易设置 Z_H 强度阈值进行剔除; 二是在降雹时刻 (18:42), 在降雹点西北侧 (对流层中层上风方向) 有更完整的环境绕降雹点的 Z_{DR} 柱。



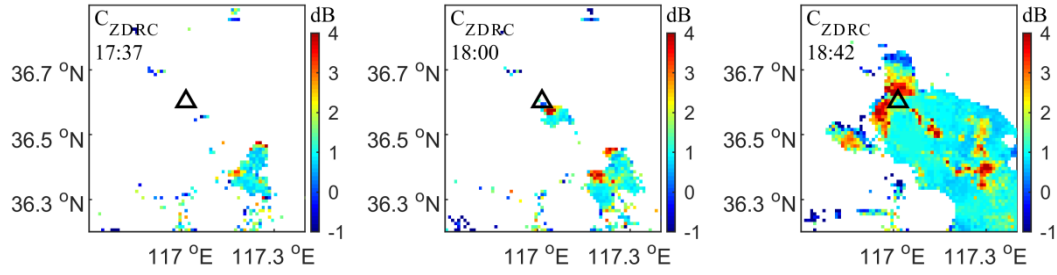


图 8 2024 年 5 月 18 日个例 3 泰山 C 波段雷达 (a~c) Z_e 和 (d~f) C_{ZDRC}

Fig. 8 (a~c) Z_e and (d~f) C_{ZDRC} at Taishan C-band Radar in the case 3 on 18 May 2024

泰山 C 波段雷达结果 (图 9) 与济宁 S 波段雷达 (图 7) 类似。 Z_{DR} 大于 1、2、3 dB 的回波出现时间相同，均较降雹时间提前 40 min。对于 Z_H ，由于 C 波段灵敏度高于 S 波段， Z_H 大于 45dBz、55 dBz 的回波出现时间比 S 波段早 6~12 min。与 Z_H 大于 45 dBz 或更高阈值的回波面积为特征指标的预警方案比较，基于图 9 中 Z_{DR} 柱可使预警提前 10~20 min。

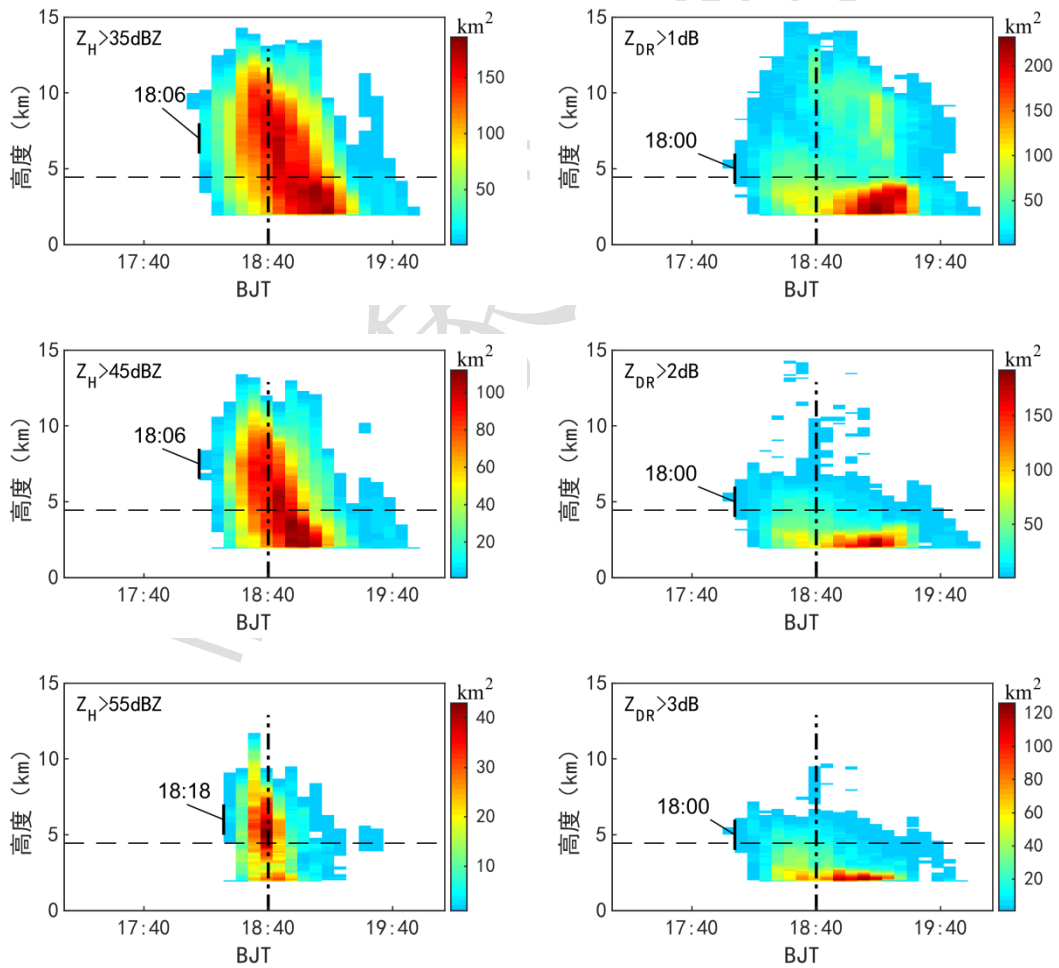


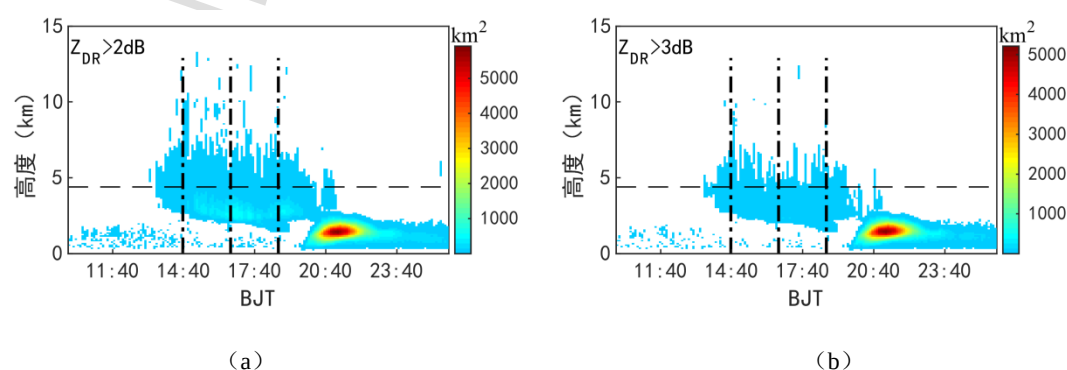
图 9 2024 年 5 月 18 日个例 3 泰山 C 波段雷达 (a~c) Z_H 和 (d~f) Z_{DR} 回波面积的时间—高度演变

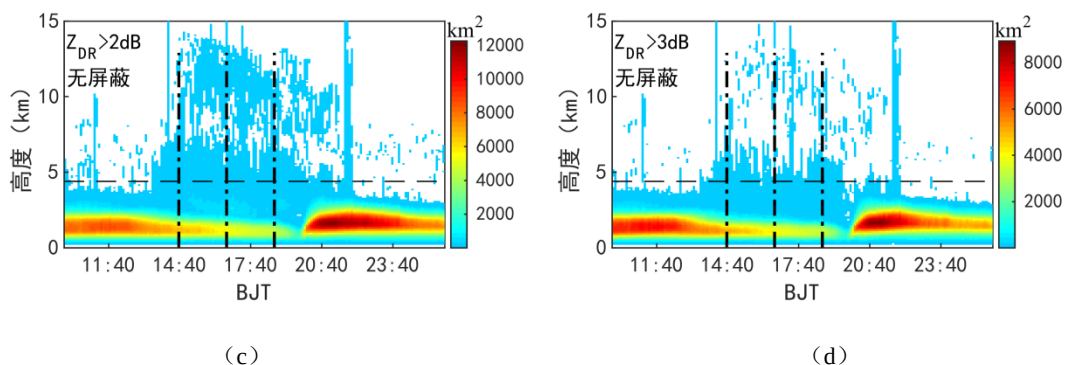
Fig. 9 Time-height evolution of echo area for (a–c) Z_H and (d–f) Z_{DR} at Taishan C-band Radar in the case 3 on 18 May 2024

2.4 统计区域和屏蔽阈值对冰雹云早期识别的影响

就统计区域而言,前文个例中的回波面积时间—高度演变均是针对降雹点附近范围含有指定冰雹云的空间范围统计而来的。如果不做区域限定,而以单部雷达所能探测到的范围进行统计,以 2.2 和 2.3 节中济宁雷达数据为例,最终结果如图 10a, 10b 所示,可见 Z_{DR} 大于 2 dB、3 dB 的回波从暖层延至冷层且连续特征出现时间(14:00 左右,图中标记略)均早于当天首次降雹时刻(14:38),但从图中很难诊断出当天第 2、第 3 次降雹。因此,基于这种单雷达所有探测范围的统计只对当天首次降雹有提前提示作用,不过也不失为一种粗略的提前预警方案。

就屏蔽阈值而言,如果在计算 Z_{DR} 回波面积时不屏蔽 $Z_H < 20\text{dBz}$ 的回波,结果如图 10 c, 10d 所示,可见噪点更多,更难分辨出 Z_{DR} 柱。这是因为介电常数较雨滴小、 Z_H 回波相对较弱的冰晶、雪等粒子也可能导致较大的 Z_{DR} 值。此外,图 10 中暖层 Z_{DR} 面积大值中心经利用雷达原始数据分区域溯源分析后被确认为边界层杂波,例如边界层中较弱的非降水性层状云、干扰和部分移动地物等目标会导致近地面出现起伏较大、噪声样分布的 Z_{DR} ,进而导致不同 Z_{DR} 阈值统计的回波面积在近地面出现大值中心,故在图 10 中不应将大范围统计的 Z_{DR} 面积大值中心视为降水特征看待。但是,由于上述杂波并不会导致增加虚假的、由暖层延至冷层且连续出现的 Z_{DR} 回波,因而其对本文的分析方法没有实质影响。





注：图中横虚线代表 0℃ 高度（4.4 km），竖点划线从左到右依次代表费县的两个降雹报告时刻和济南的一个降雹报告时刻。

图 10 2024 年 5 月 18 日由济宁 S 波段雷达大范围数据获取的 Z_{DR} 回波面积的时间—高度演变

（a, b）屏蔽、（c, d）不屏蔽 20dBz 以下反射率

Fig. 10 Time-height evolution of Z_{DR} echo area derived from extensive data collected by Jining S-band radar on May 18, 2024 (a,b) with masking and (c,d) without masking of reflectivity below 20 dBz

2.5 Z_{DR} 初生位置、冰雹落区和风廓线的关系

在本文讨论的三个局地性降雹个例中，2024 年 5 月 18 日的两个个例的首个降雹点均位于 Z_{DR} 柱初生位置附近，而 2022 年 6 月 13 日的首个降雹点则与 Z_{DR} 柱初生位置相距约 10 km。为分析上述差异成因，图 11 给出了降雹个例当天降雹点位置的风廓线，可见滨州上空的风向由地面的南风顺转为中层（5 km 左右）的西偏北风，且中层最大风速超过 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，有利于形成沿中低层偏西气流移动的降水云系。而费县和济南上空的风向均从南风顺转为北风，中层最大风速不足 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。这种低层和中层风向相反的配置更易促成局地的对流环流，加之风速偏小，可能是导致当地对流云系移动特征较不明显的关键因素。这种特征在进行冰雹预警时值得注意，但也需要对更多个例进行机理研究来确认。

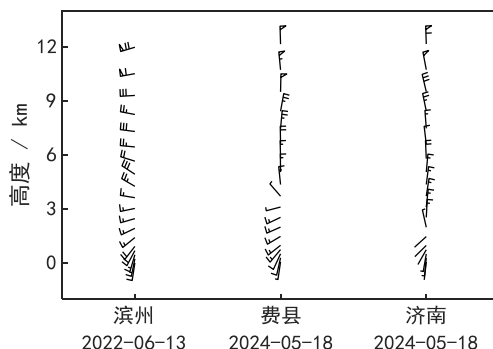


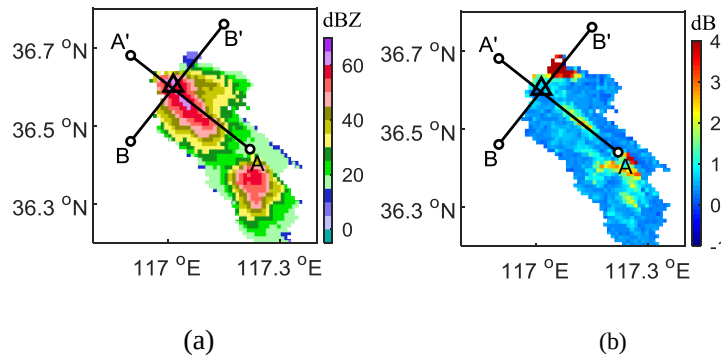
图 11 不同降雹个例当天 08:00 降雹点位置的风廓线

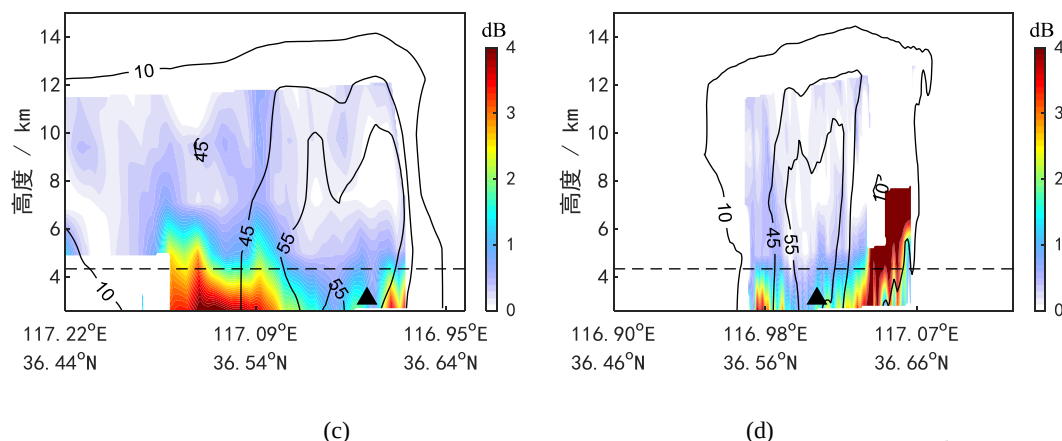
Fig. 11 Wind profiles above different hailfall points at 08:00 on the day of different hail cases

2.6 Z_{DR} 柱与 Z_H 核心的配置

本文三个个例的 Z_{DR} 柱特征与以往典型模型不同。典型超级单体 0℃ 层高度的 Z_{DR} 柱形态可接近半环状并水平分布于中低层入流一侧（Kumjian et al, 2010; Ryzhkov and Zrnica, 2019），故被也称为“ Z_{DR} 环”，且方向通常是与云体延伸方向相近。而本文三个个例降雹时的 C_{ZDR} 所反映的 Z_{DR} 柱位置既与云体延伸方向相反，也不在低层入流一侧，即在云体的后部而非前部。这与 Ren et al（2024）讨论过的孤立对流单体中情形更加类似。进一步做垂直剖面分析时，考虑到 X 波段和 C 波段中的衰减及其订正可能引入不确定性，下文仅使用 S 波段雷达数据，选取过 Z_{DR} 柱和降雹点的剖面进行分析。

在与图 6 个例相同但比降雹更早一个观测时刻（18:35），过降雹云前部较弱的 Z_{DR} 柱和降雹点（图 12a,12b 中 AA'）的垂直剖面（图 12c）显示出强 Z_H 核心和 Z_{DR} 柱的配置。综合考虑对流层中层风向和回波的移动、发展方向，将南偏东方向称为云体的“前部”、北偏西方向称为云体的“后部”。云体前部 Z_H 偏弱的区域存在 Z_{DR} 柱（图 12c 中偏左侧的填色大值区），通常对应于上升气流区；后部是 Z_H 超过 55 dBZ 但 Z_{DR} 较小的区域，与该个例的降雹点位置对应。过降雹点和降雹云后部 Z_{DR} 柱（图 12a,12b 中 BB'）的垂直剖面（图 12d）显示，云体后部的 Z_{DR} 柱高于前部。Ren et al（2024）曾指出，在对流单体中期可由降水流出流强迫抬升云体后部的中低层气流，从而在后部形成区别于主上升气流区 Z_{DR} 柱的、高度较低且强度较弱的“次级” Z_{DR} 柱，但本个例后部 Z_{DR} 柱比前部更高、更强的现象（图 12c、12d 中填色大值区）正好相反，原因之一可能是低层和中低风向相反的配置（图 11）。低层入流恰好在中层风的下风方向，会导致降水出现后在一定程度上抑制下风方向近处的上升运动。但是，后部的 Z_{DR} 柱则不受这种抑制，从而可导致更强的上升运动。至于后部更强的 Z_{DR} 柱中的过冷雨滴是否为冰雹提供了更主要的形成和增长条件，有待在后续工作中配合数值模拟进一步研究。





注：代表首个降雹点的参考位置；图 c、d 中虚线代表 0°C 高度，代表降雹点的水平位置。

图 12 2024 年 5 月 18 日 18:35 济宁 S 波段雷达 (a, b) 垂直剖面位置，过 (c) AA'、(d) BB' 的 Z_H (等值线，单位：dBz) 和 Z_{DR} (填色) 垂直剖面

Fig. 12 (a, b) Positions of the vertical profiles vertical profiles of Z_H (contour, unit: dBz) and Z_{DR} (colored) along the (c) AA' and (d) BB' at the Jining S-band Radar at 18:35 on 18 May 2024

3 结论与讨论

本文利用可表征 Z_{DR} 柱特征的 C_{ZDR} 图和 Z_{DR} 回波面积时间—高度演变，结合山东省近年来的三次局地性强、发展迅速的降雹个例，开展了雷达数据特征和冰雹预警研究，主要结论如下：

1) 在雷达回波面积较小的阶段， C_{ZDR} 图上已可见降雹点附近云中出現 3 dB 左右的 Z_{DR} 柱特征。在三个个例的回波面积时间—高度演变中， Z_{DR} 大于 2、3 dB 的 Z_{DR} 柱出現时间比降雹时刻分别提前约 20~40 min，且比 Z_H 大于 45 dBz 超过 100 km^2 或 55 dBz 回波出現时间提前 10~20 min。表明 C_{ZDR} 图和 Z_{DR} 回波面积时间—高度演变具有将降雹预警时间进一步提前的潜力。

2) 本文使用的 S 波段和 C 波段业务雷达虽然在时间和空间分辨率上不如近年来新建设的 X-PAR，但 C_{ZDR} 图和 Z_{DR} 回波面积时间—高度演变仍可显示出用于强对流预警的 Z_{DR} 柱特征，且 S 波段和 C 波段业务雷达观测和分析同一降雹个例的结果一致性较好。表明这两种用于冰雹预警的分析图形不仅可应用具有快速扫描能力的相控阵天气雷达，也具有应用于现有传统机械扫描式天气雷达的能力，能够较为直观、便捷地显示 Z_{DR} 柱出現的位置和时间。

3) C_{ZDR} 图上 Z_{DR} 柱在三个个例中均出现了紧邻且环绕降雹点、位于降雹点的西北侧即对流层中层上风方向的特点，对指示降雹地点也具有一定的参考。

需要指出的是，就建立完备的目标识别方法而言，本文研究尚未能涉及虚警率的探讨，

主要原因在于很难准确确定有强对流特征但未能产生降雹的观测样本。与可用遥感定位的闪电和可用大量自动雨量站捕获的极端强降雨相比,降雹尚缺乏空间连续性较高的原位观测手段。有限的地面观测站难以全面覆盖潜在的降雹区域,可能存在漏报的情况,导致对虚警率的评估存在很大局限。近年来,山东省人影办开发的“追雹者”微信小程序是一种很好的尝试,其允许群众上传拍摄到的降雹情况,对冰雹监测和相关研究具有很大的补充潜力。可在后续工作中针对性地收集和整编一批既具有强对流云特征又确定没有降雹和防雹作业的观测个例,结合降雹个例一并开展预警准确率的统计研究。

对冰雹云早期识别和预警的主要目标在于更科学、可靠地确定人工防雹作业位置和作业时机,以便在冰雹云形成的早期进行及时干预,而本文所展示的 C_{ZDR} 图上 Z_{DR} 柱恰是一种比较明确的冰雹云早期观测特征,下一步可探索将其进一步应用到防雹作业指挥中。对于 Z_{DR} 回波面积时间—高度演变的业务化应用,可以选择按特定区域或炮点覆盖范围进行针对性统计,或者设计软件让预报员或观测员通过交互的方式针对性地查看一个手动划定区域中的统计结果。此外,就相控阵雷达数据的深入应用而言,对于一些雷达厂家没有存储订正前的数据和订正导致原始观测可能被污染的问题,也需要进行针对性研究。

参考文献

- 高丽,潘佳文,蒋璐璐,等,2021.一次长生命史超级单体降雹演化机制及双偏振雷达回波分析[J].气象,47(2):170-182. Gao L, Pan J W, Jiang L L, et al, 2021. Analysis of evolution mechanism and characteristics of dual polarization radar echo of a hail caused by long-life supercell[J]. Meteor Mon, 47(2): 170-182 (in Chinese).
- 龚佃利,朱君鉴,林曲凤,等,2024.一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,50(5):561-576. Gong D L, Zhu J J, Lin Q F, et al, 2024. Radar observation analysis of severe hailstorm and tornado caused by a supercell in autumn[J]. Meteor Mon, 50(5): 561-576 (in Chinese).
- 郭飞燕,刁秀广,褚颖佳,等,2023.两次极端强降水风暴双偏振参量特征对比分析[J].干旱气象,41(1):103-113,122. Guo F Y, Diao X G, Chu Y J, et al, 2023. Contrast analysis of dual-polarization signatures for the two extreme rainfall storms[J]. J Arid Meteor, 41(1): 103-113, 122 (in Chinese).
- 李芳,刁秀广,夏凡,等,2023.基于双偏振雷达资料的一次强降水超级单体风暴特征分析[J].热带气象学报,39(6):838-847. Li F, Diao X G, Xia F, et al, 2023. Analysis of the characteristics of a heavy precipitation supercell storm based on dual polarization radar data[J]. J Trop Meteor, 39(6): 838-847 (in Chinese).
- 刘瑾,王丛梅,胡志群,等,2022.华北地区一次长生命史超级单体雹暴特征观测[J].气象科技,50(3):390-402. Liu J, Wang C M, Hu Z Q, et al, 2022. Characteristics of a long-life supercell hailstorm in North China[J]. Meteor Sci Technol, 50(3): 390-402 (in Chinese).
- 潘佳文,魏鸣,郭丽君,等,2020.闽南地区大冰雹超级单体演变的双偏振特征分析[J].气象,46(12):1608-1620. Pan J W, Wei M, Guo L J, et al, 2020. Dual-polarization radar characteristic analysis of the evolution of heavy hail supercell in Southern Fujian[J]. Meteor Mon, 46(12): 1608-1620 (in Chinese).
- 潘佳文,徐一鸣,吴举秀,等,2023.基于对流风暴结构的双偏振雷达 Z_{DR} 柱识别及应用研究[J].气象学报,81(6):943-957.

Pan J W, Xu M Y, Wu J X, et al, 2023. Identification of the Z_{DR} column in dual polarization radar observations based on convective storm structure and related applications[J]. *Acta Meteor Sin*, 81(6): 943-957 (in Chinese).

阮悦, 黄慧琳, 魏鸣, 等, 2022. 福建冰雹云三维闪电及双偏振雷达回波特征分析[J]. *气象*, 48(4): 442-451. Ruan Y, Huang H L, Wei M, et al, 2022. Analysis of three dimensional lightning and dual-polarization radar echo characteristics of hail cloud over Fujian[J]. *Meteor Mon*, 48(4): 442-451 (in Chinese).

沈雨, 周筠珺, 邹书平, 等, 2023. 一次孤立单体雹暴过程“ Z_{DR} 柱”演变特征分析[J]. *气象科技*, 51(1): 104-114. Shen Y, Zhou Y J, Zou S P, et al, 2023. Analysis of evolution characteristics of “ Z_{DR} Column” in an isolated hail storm[J]. *Meteor Sci Technol*, 51(1): 104-114 (in Chinese).

孙跃, 任刚, 孙鸿姆, 等, 2023. 一次高炮防雹的相控阵双偏振雷达观测特征[J]. *应用气象学报*, 34(1): 65-77. Sun Y, Ren G, Sun H P, et al, 2023. Features of Phased-array dual polarization radar observation during an anti-aircraft gun hail suppression operation[J]. *J Appl Meteor Sci*, 34(1): 65-77 (in Chinese).

汤兴芝, 俞小鼎, 熊秋芬, 等, 2022. 鄂西南冬末一次罕见的强冰雹过程分析[J]. *气象*, 48(5): 618-632. Tang X Z, Yu X D, Xiong Q F, et al, 2022. Analysis of a rare severe hailstorm event in Southwest Hubei at the end of winter[J]. *Meteor Mon*, 48(5): 618-632 (in Chinese).

王超, 2023. 基于双线偏振雷达的冰雹云演变的微物理和动力特征的提取方法及应用研究[D]. 南京信息工程大学. Wang C, 2023. Study on the microphysical and dynamic characteristics extraction algorithm of hailstorm evolution utilized with dualpolarization radar and its application [D]. Nanjing University of Information Science and Technology.

王福侠, 薛学武, 杨吕玉慈, 等, 2024. 一次长生命史超级单体风暴双偏振参量结构及演变特征[J]. *气象*, 50(10): 1216-1230. Wang F X, Xue X W, Yang L Y C, et al, 2024. Dual-polarization parameter structure and evolution characteristics of a long-life supercell storm[J]. *Meteor Mon*, 50(10): 1216-1230 (in Chinese).

王清川, 彭敏, 周涛, 等, 2022. 一次罕见超级单体风暴的 X 波段双偏振雷达特征分析[J]. *气象研究与应用*, 43(1): 107-111. Wang Q C, Peng M, Zhou T, et al, 2022. Characteristic analysis of X-band dual polarization radar for a rare supercell storm[J]. *J Meteor Res Appl*, 43(1): 107-111 (in Chinese).

王晓君, 郑媛媛, 2022. 普洱市不同等级冰雹天气的雷达回波特征对比分析[J]. *气象*, 48(7): 868-877. Wang X J, Zheng Y Y, 2022. Comparative analysis of radar echo characteristics of different grades of hail weather in Pu'er[J]. *Meteor Mon*, 48(7): 868-877 (in Chinese).

夏凡, 吴举秀, 申高航, 等, 2024. 泰山一次强雹暴微物理特征双偏振雷达和雨滴谱观测分析[J]. *气象*, 50(9): 1129-1141. Xia F, Wu J X, Shen G H, et al, 2024. Observation analysis of dual-polarization radar and raindrop spectrum for microphysical characteristics of a hailstorm in Mount Taishan[J]. *Meteor Mon*, 50(9): 1129-1141 (in Chinese).

杨湘婧, 唐明晖, 袁韬, 等, 2025. 基于双偏振雷达和 FY-4A 卫星资料的一次湖南秋季强冰雹预警特征分析[J]. *气象*, 51(1): 68-84. Yang X J, Tang M H, Yuan T, et al, 2025. Analysis on early warning characteristics of an autumn severe hail in Hunan Province based on dual-polarization radar and FY-4A satellite data[J]. *Meteor Mon*, 51(1): 68-84 (in Chinese).

余文梅, 陈豫英, 马国涛, 等, 2025. 宁夏六盘山区一次局地特大冰雹的雷达观测特征[J]. *气象*, 51(5): 595-606. Yu W M, Chen Y Y, Ma G T, et al, 2025. Radar observation characteristics of a local outsize hail in Liupan Mountains, Ningxia[J]. *Meteor Mon*, 51(5): 595-606 (in Chinese).

Brandes E A, Vivekanandan J, Tuttle J D, et al, 1995. A study of thunderstorm microphysics with multiparameter radar and aircraft observations[J]. *Mon Wea Rev*, 123(11): 3129-3143.

Bringi V N, Burrows D A, Menon S M, 1991. Multiparameter radar and aircraft study of raindrop spectral evolution in warm-based clouds[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 30(6): 853-880.

Conway J W, Zmić D S, 1993. A study of embryo production and hail growth using dual-Doppler and multiparameter radars[J]. *Mon Wea Rev*, 121(9): 2511-2528.

Hall M P M, Cherry S M, Goddard J W F, et al, 1980. Rain drop sizes and rainfall rate measured by dual-polarization radar[J]. *Nature*, 285(5762): 195-198.

Hall M P M, Goddard J W F, Cherry S M, 1984. Identification of hydrometeors and other targets by dual-polarization radar[J]. *Radio*

Sci, 19(1): 132-140.

Illingworth A J, Goddard J W F, Cherry S M, 1987. Polarization radar studies of precipitation development in convective storms[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 113(476): 469-489.

Ilotoviz E, Khain A P, Benmoshe N, et al, 2016. Effect of aerosols on freezing drops, hail, and precipitation in a midlatitude storm[J]. *J Atmos Sci*, 73(1): 109-144.

Ilotoviz E, Khain A, Ryzhkov A V, et al, 2018. Relationship between aerosols, hail microphysics, and Z_{DR} columns[J]. *J Atmos Sci*, 75(6): 1755-1781.

Kollias P, Palmer R, Bodine D, et al, 2022. Science applications of phased array radars[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 103(10): E2370-E2390.

Kumjian M R, Ryzhkov A V, 2008. Polarimetric signatures in supercell thunderstorms[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 47(7): 1940-1961.

Kumjian M R, Ryzhkov A V, Melnikov V M, et al, 2010. Rapid-scan super-resolution observations of a cyclic supercell with a dual-polarization WSR-88D[J]. *Mon Wea Rev*, 138(10): 3762-3786.

Kumjian M R, Khain A P, Benmoshe N, et al, 2014. The anatomy and physics of Z_{DR} columns: investigating a polarimetric radar signature with a spectral bin microphysical model[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 53(7): 1820-1843.

Kuster C M, Snyder J C, Schuur T J, et al, 2019. Rapid-update radar observations of Z_{DR} column depth and its use in the warning decision process[J]. *Wea Forecasting*, 34(4): 1173-1188.

Kuster C M, Schuur T J, Lindley T T, et al, 2020. Using Z_{DR} columns in forecaster conceptual models and warning decision-making[J]. *Wea Forecast*, 35(6): 2507-2522.

McKeown K E, French M M, Tuftedal K S, et al, 2020. Rapid-scan and polarimetric radar observations of the dissipation of a violent tornado on 9 May 2016 near Sulphur, Oklahoma[J]. *Mon Wea Rev*, 148(9): 3951-3971.

Palmer R, Bodine D, Kollias P, et al, 2022. A primer on phased array radar technology for the atmospheric sciences[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 103(10): E2391-E2416.

Ren G, Sun Y, Sun H P, et al, 2024. A case study on two differential reflectivity columns in a convective cell: phased-array radar observation and cloud model simulation[J]. *Remote Sens*, 16(3): 460.

Ryzhkov A V, Zmic D S, 2019. *Radar Polarimetry for Weather Observations*[M]. Cham: Springer.

Snyder J C, Ryzhkov A V, Kumjian M R, et al, 2015. A Z_{DR} column detection algorithm to examine convective storm updrafts[J]. *Wea Forecasting*, 30(6): 1819-1844.

Snyder J C, Bluestein H B, Dawson II D T, et al, 2017. Simulations of polarimetric, X-band radar signatures in supercells. Part II: Z_{DR} columns and rings and K_{DP} columns[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 56(7): 2001-2026.

Sun Y, Xiao H, Yang H L, et al, 2023. A uniformity index for precipitation particle axis ratios derived from radar polarimetric parameters for the identification and analysis of raindrop areas[J]. *Remote Sens*, 15(2): 534.

Tuttle J D, Bringi V N, Orville H D, et al, 1989. Multiparameter radar study of a microburst: comparison with model results[J]. *J Atmos Sci*, 46(5): 601-620.

van Lier-Walqui M, Fridlind A M, Ackerman A S, et al, 2016. On polarimetric radar signatures of deep convection for model evaluation: columns of specific differential phase observed during MC3E[J]. *Mon Wea Rev*, 144(2): 737-758.

Wu C, Liu L P, 2014. Comparison of the observation capability of an X-band phased-array radar with an X-band Doppler radar and S-band operational radar[J]. *Adv Atmos Sci*, 31(4): 814-824.

Zhao K, Huang H, Lu Y H, et al, 2024. Operational phased array radar network for natural hazard monitoring and warnings in urban environments over the Greater Bay Area, China[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 105(11): E2152-E2174.