夏凡，龚佃利，潘佳文，等，2023. 双偏振雷达水凝物分类算法优化及在雹暴云的应用分析[J]. 气象，49(11)：1343-1358. Xia F，Gong D L，Pan J W，et al，2023. The hydrometeor classification optimum algorithm for polarimetric radar and its application for the hailstorm cloud[J]. Meteor Mon，49(11)：1343-1358(in Chinese).

双偏振雷达水凝物分类算法优化及在雹暴云的应用分析*

夏 凡[1,2,3] 龚佃利[1,4] 潘佳文[5] 史 茜[1,6]

1 山东省气象防灾减灾重点实验室，济南 250031
2 山东省气象科学研究所，济南 250031
3 山东省长岛国家气候观象台，长岛 265800
4 山东省人民政府人工影响天气办公室，济南 250031
5 厦门市气象局，厦门市海峡气象开放重点实验室，厦门 361012
6 山东省气象台，济南 250031

提 要： 为提升我国多普勒双偏振雷达水凝物分类的应用水平，在美国强风暴实验室(NSSL)研发的水凝物分类算法(HCA)基础上，通过增加冰雹区与三体散射区水凝物类型的订正识别、选用数值模式温度分析场识别融化层、引入水凝物类型垂直分布限制条件等，建立了优化方法(HCA-Opt)。利用 HCA-Opt 分析了 2021 年 7 月 9 日济南市章丘区一次雹暴云的水凝物分布特征，对冰雹落区与水凝物分类结果进行比对检验，得到如下主要结论：HCA-Opt 可以正确识别冰雹与三体散射区的水凝物类型，修正了 HCA 将其识别为地物的问题；HCA-Opt 利用模式温度分析场可准确识别融化层高度，解决了强对流天气下 HCA 使用的融化层自动识别算法(MLDA)无法有效识别融化层的缺陷；与 HCA 相比，HCA-Opt 识别的水凝物在垂直分布上更加合理。HCA-Opt 给出的水凝物分类结果较好描述了雹暴初生、降雹不同阶段的水凝物空间分布，初步揭示了不同高度水凝物粒子相态转化特征。HCA-Opt 识别的水凝物分类中，中(小)雨与霰的可信度最高，冰晶与湿雪的可信度较低，且容易与干雪混淆；总体而言，HCA-Opt 提高了水凝物分类识别技巧，对冰雹预警和落区判别具有较好的指示作用和业务应用前景。

关键词： 双偏振雷达，水凝物分类，HCA 优化，雹暴

中图分类号： P413，P426 **文献标志码：** A **DOI：** 10.7519/j.issn.1000-0526.2022.122601

The Hydrometeor Classification Optimum Algorithm for Polarimetric Radar and Its Application for the Hailstorm Cloud

XIA Fan[1,2,3] GONG Dianli[1,4] PAN Jiawen[5] SHI Qian[1,6]

1 Laboratory for Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Shandong, Jinan 250031
2 Shandong Institute of Meteorological Sciences, Jinan 250031
3 Changdao National Climatology Observatory of Shandong, Changdao 265800
4 Weather Modification Office of Shandong Province People's Government, Jinan 250031
5 Xiamen Key Laboratory of Straits Meteorology, Xiamen Meteorological Bureau, Xiamen 361012
6 Shandong Meteorological Observatory, Jinan 250031

* 山东省自然科学基金项目(ZR2022MD072、ZR2021QD028、ZR2020MD052、ZR2020MD053)、中国气象局创新发展专项(CXFZ2022J034)、山东省气象局重点科研项目(2021sdqxz05、2021sdqxz09)共同资助
2022 年 9 月 15 日收稿； 2023 年 1 月 24 日收修定稿
第一作者：夏凡，主要从事多源观测资料分析应用与数值天气预报研究. E-mail：xf0718@126.com
通讯作者：龚佃利，主要从事中尺度气象和人工影响天气研究. E-mail：sdgongdl@163.com

Abstract: To promote the application level of hydrometeor classification for Chinese Doppler polarimetric radar, based on the hydrometeor classification algorithm (HCA) developed by the National Severe Storm Laboratory (NSSL) of the United States, we design an optimum algorithm, named HCA-Opt, by adding the amendatory identification for the hydrometeor in hail and three-body scatter area, using the temperature of the numerical weather model analysis field to detect the location of the melting layer, and integrating restricted condition of vertical distribution for all hydrometeors. HCA-Opt is utilized to analyze the distribution characteristics of hydrometeor during a hailstorm cloud weather in Zhangqiu of Jinan City on 9 July 2021, and the location of the hail and the hydrometeor classification result are verified. The conclusions are as follows. The type of hydrometeor wrongly recognized as ground clutter by the HCA in the hail and the three-body scatter region can be correctly identified by the HCA-Opt. HCA-Opt can use the temperature from model analysis field to accurately identify the height of melting layer, solving the defect that the melting layer could not be detected by the algorithm in severe convective weather in HCA. Compared to HCA, the vertical distribution of hydrometeor identified by HCA-Opt is more reasonable. Besides, the classification result retrieved from the HCA-Opt can better describe the spatial distribution of hydrometeor at newborn and hailfalling stages of hailstorm, and initially reflect the characteristics of phase transformation at different heights. Through the verification, the reliability of the moderate (light) rain and graupel identified by the HCA-Opt is the highest, while that of the crystal and wet snow is lower, and easy to be mixed with the dry snow. Overall, the HCA-Opt can improve the skill of hydrometeor identification to certain extent, provide indicative information for warning and detecting the hailfalling area and have a good operational application prospect.

Key words: dual polarization radar, hydrometeor classification, HCA optimum, hailstorm

引 言

双偏振雷达带来的一大业务突破是可以在降水系统中进行高时空分辨率的水凝物分类，这主要得益于新增的双偏振观测量对不同水凝物的粒子形状、大小、取向等信息较为敏感。水凝物分类有着广泛的业务应用，如定量估测降水(Giangrande and Ryzhkov，2008；汪舵等，2017)、数据同化(Gao and Stensrud，2012)、描述强对流系统微物理结构(杨吉等，2020；潘佳文等，2020；2021；高丽等，2021；何清芳等，2022；李昭春等，2021；夏凡等，2021；苏永彦和刘黎平，2022)等。

常用的水凝物分类算法有布尔树与模糊逻辑算法。最初学者利用布尔树法(Höller et al，1994)并结合雷达参量阈值对水凝物进行分类，该方法优点是简单易实施，但缺点是相同的雷达参量值可以匹配不同的水凝物，并且会受到观测误差的影响，常导致水凝物被错误识别，因此该方法逐渐被弃用。模糊逻辑法逐渐成为水凝物分类的主流方法，其原理是利用不同水凝物的隶属函数对雷达参量进行泛化处理，消除不同水凝物对应雷达参量分布存在重叠带来的影响，较为准确地识别各类水凝物。Straka(1996)最先将模糊逻辑原理用于水凝物分类，后期很多方法在其基础上发展起来。Vivekanandan et al(1999)利用反射率因子与其他参量构建双参量隶属函数。Straka et al(2000)根据大量观测与模拟结果给出各水凝物雷达参量分布范围。Zrnić et al(2001)利用 Straka et al(2000)研究成果建立各水凝物双参量隶属函数并设定边界斜率，通过敏感性试验给出所有参量识别不同水凝物的作用。Liu and Chandrasekar(2000)引入神经网络系统，用其后向反馈机制对隶属函数的参数进行调整。Lim et al(2005)使用了 Liu and Chandrasekar(2000)的隶属函数，通过增加融化层识别优化高度参量的隶属函数，并根据Zrnić et al(2001)试验结果将隶属函数的权重因子由一维扩展到二维。Park et al(2009)基于前人的研究成果，在隶属函数中加入置信度因子，还增加了层状云与对流云判别条件，建立了水凝物分类算法(hydrometeor classification algorithm，HCA)并应用于北美 WSR-88D 的 S 波段双偏振雷达。Kurdzo et al(2020)对 HCA 的隶属函

数与权重因子参数进行了调整。还有学者利用模糊逻辑法开展 C 波段(Marzano et al,2007;Dolan et al,2013)与 X 波段(Dolan and Rutledge,2009;Lim et al,2013)双偏振雷达水凝物分类研究。

随着我国越来越多的业务天气雷达升级为双偏振雷达,水凝物分类识别受到广泛的关注,曹俊武(2005)、何宇翔等(2010)、刘亚男等(2012)、郭凤霞等(2014)、冯亮等(2018)和杨磊等(2019)借鉴国外算法对不同波段双偏振雷达进行研究。在众多方法中,HCA 展现出较好的水凝物粒子识别效果,已有学者将其用于业务双偏振雷达,开展了本地化调试与应用工作。Wu et al(2018)利用珠海 S 波段双偏振雷达数据,对 HCA 隶属函数与置信度因子进行本地化调试,并用于分析广东一次飑线过程;徐舒扬等(2020)基于广州 S 波段双偏振雷达观测统计结果,对 HCA 的隶属函数、权重矩阵与附加判别条件进行改进。吴翀等(2021)改进了 HCA 中融化层识别算法,并根据北京 X 波段双偏振雷达数据特征调整了置信度因子与隶属函数的参数。

HCA 在国内实际应用中依然存在特定区域水凝物类型识别错误、分布不合理等问题。本文针对 HCA 存在的不足进行优化,利用 2019 年 8 月 16 日潍坊诸城强雹暴、2021 年 7 月 9 日济南章丘强雹暴过程对优化的分类结果进行验证分析,为利用双偏振雷达分析强对流云结构、开展冰雹天气预警等提供更客观可靠的水凝物分类产品。

1　方法与数据简介

1.1　HCA 算法

$$A_i = \frac{\sum_{j=1}^{6} W_{ij} Q_j P^i(V_j)}{\sum_{j=1}^{6} W_{ij} Q_j} \tag{1}$$

上式为 HCA 的计算公式,i 表示水凝物类型,HCA 可识别 8 类水凝物,分别是干雪(DS)、湿雪(WS)、冰晶(CR)、霰(GR)、大滴(BD)、中(小)雨(RA)、大雨(HR)、雨雹混合(RH),附加识别地物或超折射地物(GC/AP)与生物(BS)。A 表示集成概率值,对于每个距离库,HCA 根据隶属函数计算所有类型的集成概率值,选取最大值对应的类型作为识别结果。V 表示雷达参量,j 表示参量类型:水平反射率因子(Z_H)、差分反射率(Z_{DR})、零滞后相关系数(CC)、比差分相移对数形式($\lg K_{DP}$)、水平反射率因子纹理 SD(Z_H)与差分相移纹理 SD(Φ_{DP})。P 是隶属函数,选取非对称梯形确定参量的概率分布边界。W 表示权重因子,取值介于 0～1,数值越高表示识别水凝物的作用越大。Q 表示置信度因子,它的作用是消除了雷达定标、衰减、非均一性填充、波束阻挡、观测误差与噪声带来的影响。隶属函数、权重因子与置信度因子具体见 Park et al(2009)。

HCA 还包含以下处理:引进了融化层自动识别算法(MLDA),具体原理见 Giangrande et al(2008)和夏凡等(2023),根据融化层位置将整层大气分为 5 个高度层,限定了每层不可能出现的水凝物类型;增加了层状云与对流云的识别,规定了两类云中可以出现的水凝物类型;建立了单雷达参量阈值判别条件,具体阈值参见 Park et al(2009)。

1.2　优化方法(HCA-Opt)简介

1.2.1　冰雹与三体散射区识别

由于冰雹区通常伴有强降水,固、液态水凝物共存,CC 通常会小于 0.9,HCA 会将冰雹区的水凝物识别为地物。三体散射(TBSS)是雷达波束在经过大粒子-地面-大粒子的三次散射返回雷达天线,并在粒子后方出现的虚假回波。Lemon(1998)指出,当 TBSS 出现后的 10～30 min 内,直径超过 2.5 cm 的冰雹将降落地面。大量观测发现,冰雹伴随降水时,TBSS 区可能出现降水粒子,通常也会被 HCA 错误识别为地物。为此,借鉴 Tang et al(2014)提出的条件对这两类区域进行识别,具体见下式。

$$\mathrm{CC} < 0.9 \cap \begin{cases} \mathrm{ETOP}_{18\ \mathrm{dBz}} > 8.0\ \mathrm{km} \cap Z_H > 45\ \mathrm{dBz} & (2) \\ \mathrm{ETOP}_{0\ \mathrm{dBz}} > 9.0\ \mathrm{km} \cap R > r_{\mathrm{stormcore}} & (3) \end{cases}$$

式中:$\mathrm{ETOP}_{18\ \mathrm{dBz}}$与 $\mathrm{ETOP}_{0\ \mathrm{dBz}}$分别表示 Z_H 为 18 dBz 与 0 dBz 的回波高度,$r_{\mathrm{stormcore}}$为强回波区,表示径向上 Z_H>45 dBz、累计距离>1 km 的区域,R 为强回波区到雷达站的径向距离。式(2)表示 CC<0.9,并且 Z_H>45 dBz、18 dBz 回波顶高>8 km 时判定为冰雹区;式(3)表示在强回波中心后侧确定可能出现 TBSS 的区域,再利用 CC 阈值与 0 dBz 回波顶高,判断 TBSS 区域的水凝物类型,满足式(3)条件时为降水类型,否则为非降水类型。当某个距离库参量

满足式(2)或式(3)时,将 HCA 计算地物与生物的集成概率设置为 0。

1.2.2 融化层识别

HCA 利用 MLDA 识别融化层位置,以此区分隶属函数重合部分较多的水凝物类型,如干雪与中(小)雨。MLDA 的优势是可以获取时空分辨率较高的融化层位置,不足之处是当融化层特征不明显时,如局地强对流天气,利用 MLDA 则无法识别出融化层,这需要其他数据来辅助判别。

目前,国内多利用探空数据获取融化层位置,但其时空分辨率较低,只能给出单点、单时刻的信息,当有剧烈天气影响(如飑线)时,融化层会发生很大变化。国外已有学者采用中尺度模式分析场中的温度确定融化层位置(Al-Sakka et al,2013),较好弥补了探空数据时空分辨率低的问题。本文利用山东省气象科学研究所研发的 HHUPS 短时临近预报模式的温度分析场确定融化层高度。该模式每天进行两次冷启动,选取美国环境预报中心(NCEP)0.25°的 08:00、20:00(北京时,下同)全球预报数据作为背景场。该模式逐半小时进行一次同化生成分析场,逐小时进行一次预报,水平分辨率为 3 km。从模式分析场中提取 0℃高度作为融化层顶,2℃湿球温度作为融化层底(Boodoo et al,2010),依次计算雷达探测每个距离库中心对应的经纬度,选取距离最近的 4 个模式格点数据,利用双线性法将模式的融化层顶与底对应高度插值到所计算距离库的中心坐标上。

1.2.3 水凝物垂直分布限定

HCA 识别的水凝物在垂直分布上有时存在不合理现象,如在冰雹区上方是大雨区。本文参考 Bechini and Chandrasekar(2015)提出的条件,对识别的水凝物垂直分布进行限定,具体条件见表 1。

表 1 水凝物类型垂直分布限制条件

Table 1 Restricted condition of vertical distribution for all types of hydrometeor

类型	DS	WS	CR	GR	BD	RA	HR	RH
DS	√	√	√	√	√	√	√	√
WS	×	√	×	√	√	√	√	√
CR	√	√	√	√	√	√	√	√
GR	√	√	×	√	√	√	√	√
BD	×	×	×	×	√	√	√	√
RA	×	×	×	×	√	√	√	×
HR	×	×	×	×	√	√	√	×
RH	×	√	×	√	√	√	√	√

表中√号、×号分别表示其所在列对应的水凝物可以、不可以出现在其所在行对应的水凝物下方。例如,当某个距离库被判别为干雪 DS(表 1 第 1 行),其下方可以出现任何类型水凝物,当某个距离库被判别为湿雪 WS(表 1 第 2 行),其下方不可以出现干雪 DS 与冰晶 CR。由于低层仰角容易受到非气象回波的污染,将最高层仰角识别的水凝物类型作为真值,按表格限定条件从高仰角到低仰角依次进行订正。当下层仰角识别的水凝物类型不符合条件时,根据上层仰角分类结果查看符合条件的水凝物,选取最大集成概率值对应的水凝物作为订正后的分类结果。将经过上述优化后的 HCA 称为 HCA-Opt(Opt 为 optimization 的缩写)。

1.3 数据前处理方法

在进行水凝物分类计算前,将 Z_H、Z_{DR} 与 CC 沿着每条径向进行平滑,对 Z_H 使用 1 km 窗口、对 Z_{DR} 与 CC 使用 2 km 窗口进行平滑。先使用 6 km 窗口对差分相位(Φ_{DP})进行平滑,再利用平滑后的 Φ_{DP} 计算降水系统中 S 波段双偏振雷达的 Z_H 与 Z_{DR} 的衰减量(Ryzhkov and Zrnić,1995),公式如下:

$$\Delta Z_H = 0.04\Phi_{DP} \tag{4}$$

$$\Delta Z_{DR} = 0.004\Phi_{DP} \tag{5}$$

将衰减量添加到平滑后的 Z_H 与 Z_{DR} 完成衰减订正。如果 Z_H>40 dBz,用 2 km 窗口平滑的 Φ_{DP} 计算 K_{DP},反之用 6 km 窗口平滑的 Φ_{DP} 计算 K_{DP}。

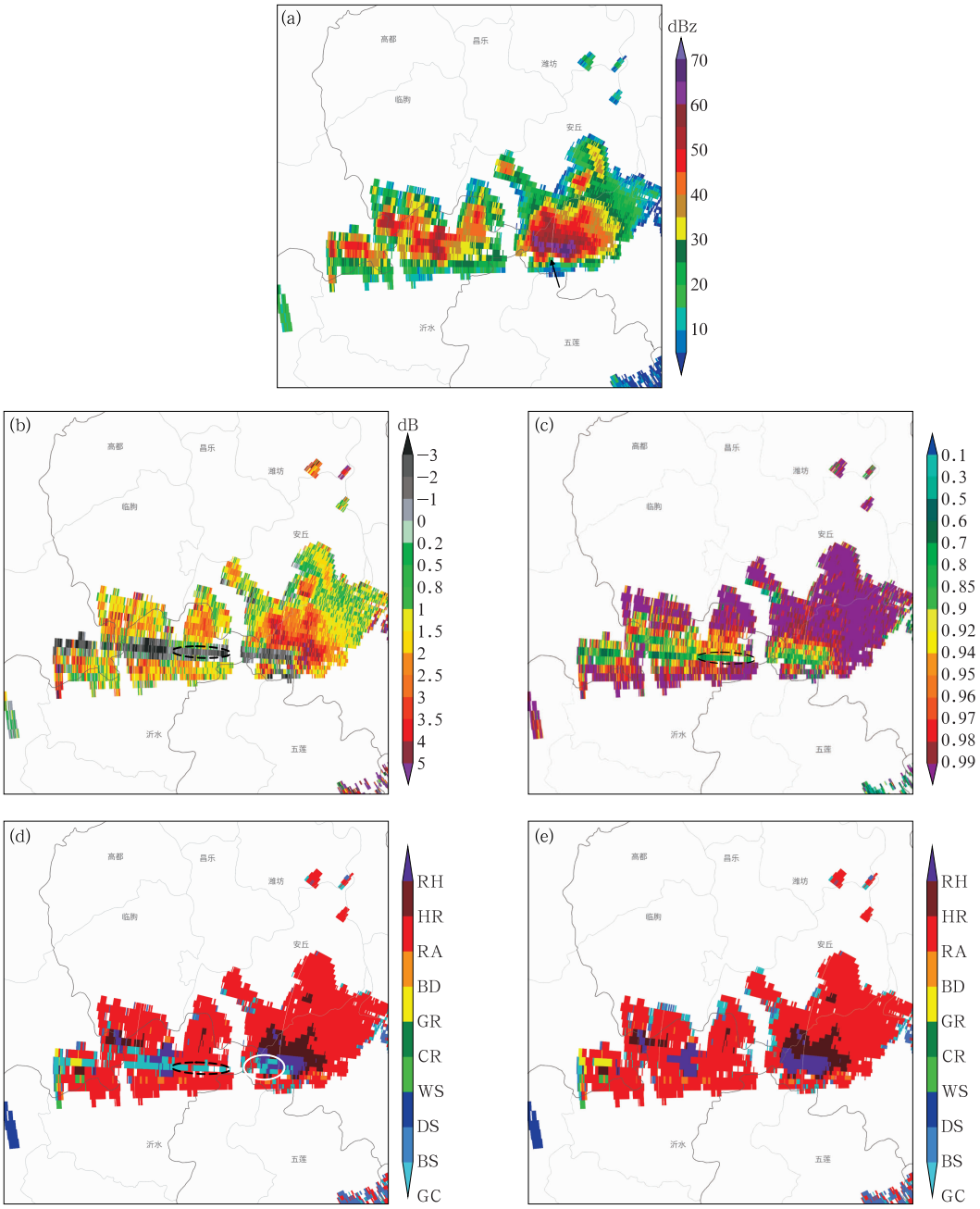
1.4 数 据

本文使用的雷达资料为济南、青岛 S 波段双偏振雷达原始体扫数据,扫描方式均为 VCP21,径向分辨率为 250 m,最远扫描斜距为 460 km,以下分别简称为济南雷达、青岛雷达。

2　HCA-Opt 改进效果展示

2.1　冰雹区与三体散射区的水凝物识别

2019 年 8 月 16 日，山东潍坊诸城市出现一次强雹暴过程，龚佃利等(2021)对其典型雷达结构特征进行了分析。图 1 给出了 8 月 16 日 15:30 青岛雷达 0.5°仰角雷达参量与水凝物分布，可见诸城境内强回波区(Z_H＞60 dBz)南侧存在暖湿气流前侧入流槽口(图 1a 黑色箭头所指位置)，回波顶高普遍超过10 km，符合超级单体特征；强回波区对应的Z_{DR}主要分布在－2.5～0 dB(图 1b)、CC 主要分布在 0.8～0.9(图 1c)，HCA 识别的强回波区水凝物



注：白色椭圆实线为冰雹区，黑色椭圆虚线为三体散射区域。

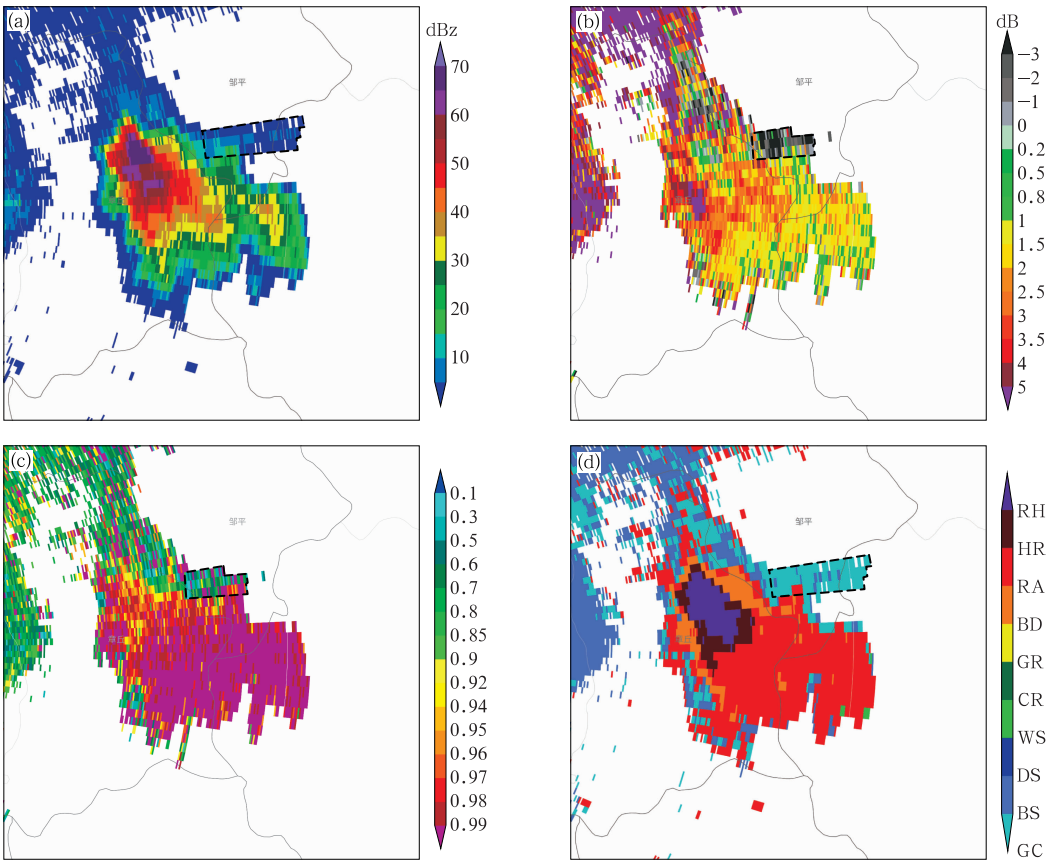
图 1　2019 年 8 月 16 日 15:30 青岛雷达 0.5°仰角(a)Z_H，(b)Z_{DR}，(c)CC，(d)HCA 与(e)HCA-Opt 分类结果

Fig. 1　(a－c) Distribution of (a) Z_H, (b) Z_{DR}, (c) CC, (d, e) the hydrometeor identified by (d) HCA and (e) HCA-Opt at 0.5° elevation from Qingdao Radar Station at 15:30 BT 16 August 2019

除了冰雹和大雨外，还被识别为地物（图 1d 白色椭圆实线），这是由于取向较为固定的非球形冰雹，Z_{DR} 通常小于 0（刘黎平等，1992），而冰雹融化使得固、液态水凝物共存，CC 减小，Z_{DR} 与 CC 的冰雹隶属度较低，导致冰雹的集成概率值较低，误识别为地物。加入冰雹区判别条件[式(2)]后，HCA-Opt 不再将部分强回波区域识别为地物（图 1e），而是识别为雨加雹，与实况一致。

强回波中心西侧，沂水县境内有三个径向的 Z_{DR} 分布在 −3～0 dB（图 1b 黑色椭圆虚线）、CC 分布在 0.65～0.85（图 1c 黑色椭圆），出现 TBSS 特征，刁秀广和郭飞燕（2021）指出，Z_{DR} 负值区与 CC 小值区分别由强冰雹对电磁波衰减与冰雹后方非均匀填充所致，对应的 Z_H 为 20～40 dBz，上层仰角的 Z_H 分布范围大致相同，垂直梯度较小，应为降水回波，从 HCA 分类结果（图 1d 黑色椭圆虚线）可见，该区域不仅包含了中（小）雨，还有地物。Z_{DR} 负值与 CC 小值导致地物比冰雹的集成概率高。增加TBSS 判别条件[式(3)]，图 1d 中黑色椭圆虚线区的地物被 HCA-Opt 识别为中（小）雨（图 1e）。同样，图 1d 中黑色椭圆区以西原识别为地物的区域，HCA-Opt 订正识别为冰雹和中（小）雨。

2021 年 7 月 9 日下午，济南市章丘区出现一次雹暴天气过程。图 2 给出了 2021 年 7 月 9 日 14:19 济南雷达 1.5°仰角雷达参量分布，章丘东部有一强回波中心（图 2a），Z_H 超过 65 dBz，HCA-Opt 分类结果（图 2d）将该区域识别冰雹。冰雹区后侧 Z_{DR} 先增大后减小为负值（图 2b 黑色虚线）、CC 也较低（图 2c 黑色虚线），出现典型 TBSS 特征，该区域 Z_H 主要分布在 5～15 dBz，回波顶较低，不符合式(3)条件，HCA-Opt 将该区域识别为超折射地物，即对应 TBSS。



注：黑色虚线为三体散射区域。

图 2 2021 年 7 月 19 日 14:19 济南雷达 1.5°仰角(a)Z_H，(b)Z_{DR}，(c)CC，(d)HCA-Opt 分类结果

Fig. 2 Distribution of (a) Z_H, (b) Z_{DR}, (c) CC and (d) the hydrometeor identified by HCA-Opt at 1.5° elevation from Jinan Radar Station at 14:19 BT 9 July 2021

2.2　融化层上下的水凝物识别

融化层高度可为水凝物分类结果提供一些限制，在融化层以下分类结果不应该有干（湿）雪、冰晶，在融化层以上不应该有中（小）雨、大雨分类。图 3a 是由 HHUPS 模式分析场给出的 2021 年 7 月 9 日章丘 0℃逐时高度和当日 08：00、20：00 探空观测的 0℃高度，可见模式分析的 0℃高度（融化层顶）与探空观测差异不大，因此利用模式分析场 0℃高度代替探空是可行的。同时可看到，模式给出的 0℃高度随时间存在明显的波动变化。从 HHUPS 模式 14：00 0℃高度分析场（图 3b）可见，鲁西北东部到鲁中地区的 0℃高度逐渐增加约 300 m。因此，引入模式分析的逐小时融化层高度，可更好地与雷达观测进行匹配，提高融化层高度在水凝物识别中的约束作用。

图 4 给出的是 2021 年 7 月 9 日 14：19 济南雷达 0.5°仰角 HCA 与 HCA-Opt 分类结果。HCA 的水凝物分类结果显示（图 4a），在渤海、潍坊东部、青岛与日照沿海等区域（黑色虚线）存在大量中（小）雨，其中夹杂部分干雪与霰，这些区域距离雷达站 250～350 km，垂直高度为 8～12 km，高于－20℃高度（7.4 km），不可能存在液态水凝物。分析 14：19 济南雷达站各层仰角 Z_H、Z_{DR} 与 CC 分布（图略）可见，融化层特征不明显，未满足 MLDA 阈值条件，HCA 无法对高度进行分层，因此不能对水凝物类型进行限定，而中（小）雨与干雪隶属函数大致相同，导致这些区域出现液、固态水凝物交错分布，并且以中

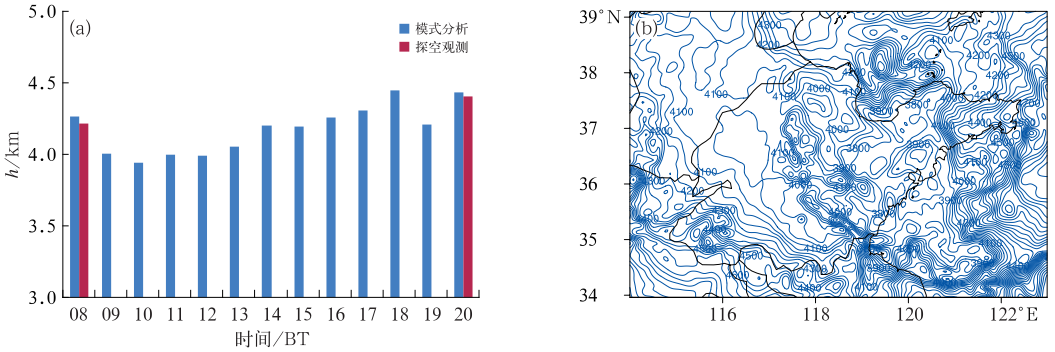
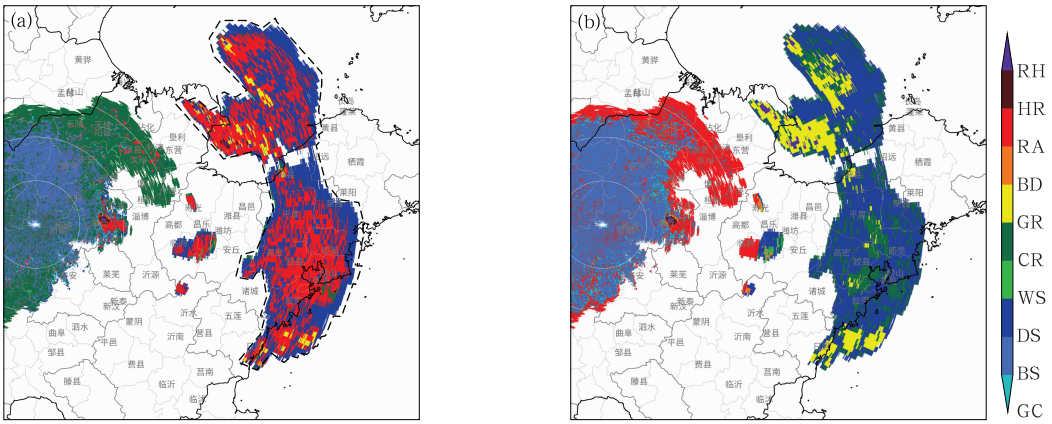


图 3　2021 年 7 月 9 日（a）章丘探空站 08：00、20：00 观测 0℃高度与 HHUPS 模式 08：00—20：00 时段 0℃高度，（b）14：00 HHUPS 模式 0℃高度（单位：m）水平分布

Fig. 3　(a) The 0℃ layer height at 08：00 BT and 20：00 BT from Zhangqiu Sounding Station and from 08：00 BT to 20：00 BT from HHUPS model, (b) distribution of the 0℃ height (unit: m) from HHUPS model at 14：00 BT 9 July 2021



注：黑色虚线为 HCA 识别的水凝物出现错误的区域。

图 4　2021 年 7 月 9 日 14：19 济南雷达 0.5°仰角（a）HCA 与（b）HCA-Opt 分类结果

Fig. 4　Distribution of the hydrometeor identified by (a) HCA and (b) HCA-Opt at 0.5° elevation from Jinan Radar Station at 14：19 BT 9 July 2021

(小)雨为主。加入模式分析场提供的融化层高度信息后,HCL-Opt 在上述区域的水凝物识别类型主要为干雪、霰与冰晶,消除了 0℃层以上的中(小)雨(图 4b),分布更为合理。

2.3 垂直水凝物分布的识别

图 5 给出了 2021 年 7 月 9 日 14:19 的 HCA、HCA-Opt 水凝物分类沿 87°方位角的剖面。在 3.3°仰角、69～73 km 处(图 5a),HCA 识别的水凝物有冰晶 CR 出现在霰 GR 之下。霰是由干雪或冰晶凇附冻滴形成,霰在下落过程中与冻滴碰撞形成雹或融化成雨,因此冰晶出现在 0℃层附近,且处于霰之下是不合理的。在 0.5°仰角、76 km 处,有两个距离库出现雨加雹,并处于 1.5°仰角的大雨下方,与 2.4°仰角的冰雹分离,也不尽合理。增加了水凝物垂直分布限定条件后,HCA-Opt 将 69～73 km 处的冰晶识别为霰(图 5b 黑色虚线区),76 km 处的冰雹识别为大雨(图 5b 白色虚线区),水凝物的垂直分布更加合理。

3 HCA-Opt 分类结果在章丘强雹暴天气的应用

本节利用 HCA-Opt 给出的分类结果,进一步分析 2021 年 7 月 9 日济南市章丘区强雹暴初生、降雹阶段水凝物的分布特征和演进过程。

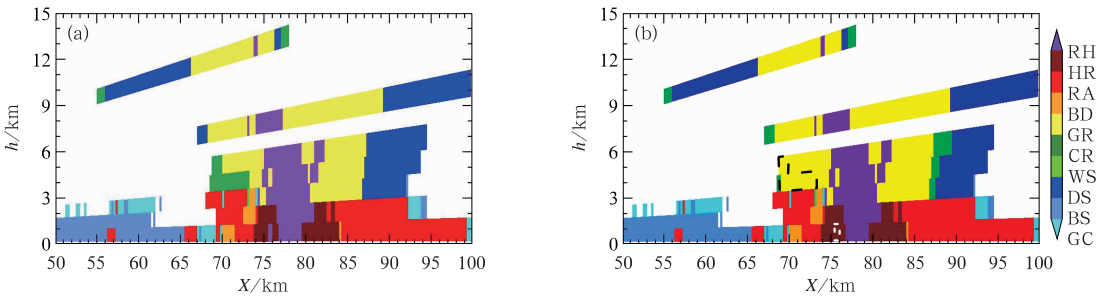
3.1 天气背景

2021 年 7 月 9 日 08:00 500 hPa 高空图(图 6a)显示,山东受东北冷涡底部西风槽影响,槽线位于鲁中北部,山东中西部为西北气流影响;850 hPa(图 6b)在山东以西有暖舌,呈上冷下暖层结不稳定状态,850 hPa 与 500 hPa 温差大于 28℃;由当日 08:00 章丘探空站 T-ln$p$ 图(图 6c)可见,0、－10、－20℃层高度分别为 4.3、6.0、7.4 km;整层湿度较小,低层风速顺时针旋转,有暖平流,对流有效位能达到 2334.6 J·kg^{-1}。

3.2 水凝物的水平分布特征

7 月 9 日 14:02,济南市章丘区内有对流单体 A、B、C 初生,0.5°仰角回波主体的 Z_H 介于 30～45 dBz(图 7a),对应的 Z_{DR} 大多大于 3 dB(图 7b)、CC 多分布在 0.95～1.00(图 7c),HCA-Opt 识别的水凝物粒子主要为中(小)雨 RA 和大滴 BD,对流单体 D 的反射率因子大于 45 dBz 的区域识别为大雨(图 7d)。对流单体之间的 CC＜0.9,HCA-Opt 将该区域识别为生物 BS,表明有昆虫生物等被卷入上升气流,与降水混合时导致 CC 降低。此时,对流处于发展初期,空中尚未识别出冰雹。

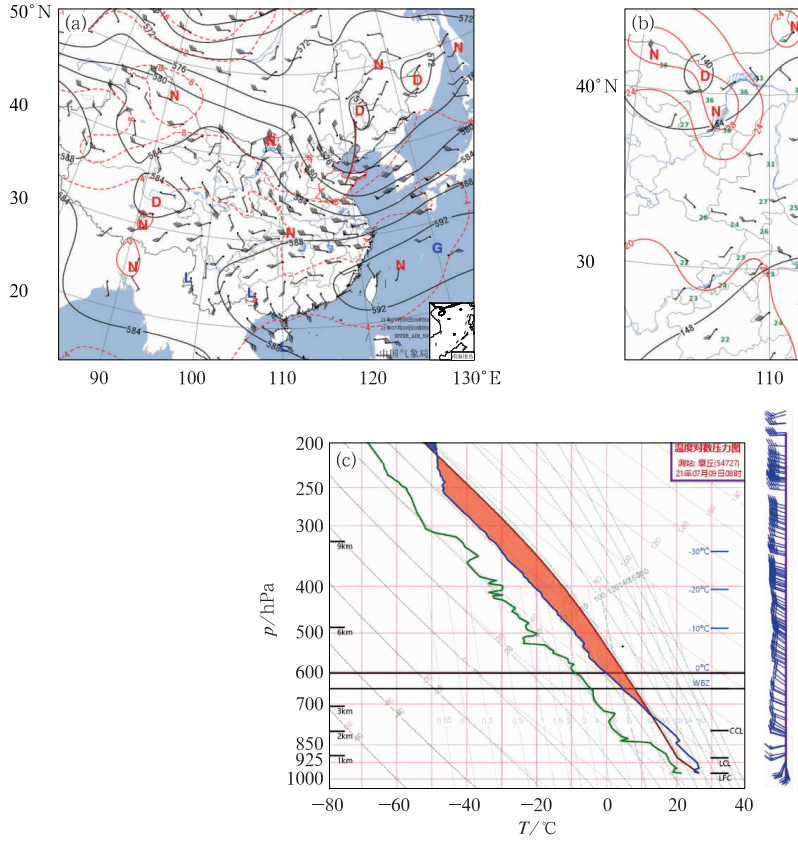
14:19 时,图 7 中对流单体 B 快速发展,与 A、C 合并加强,单体 D 减弱,0.5°仰角强回波中心 Z_H＞65 dBz(图 8a),1.5°仰角出现明显 TBSS(图 2),符合强雹暴特征,此时地面出现降雹。2.4°仰角经向速度图(图 8b)显示出一个明显的中气旋,其最大切变约为 5×10^{-3} s^{-1};中气旋结构直立向上伸展到 8 km 以上(超过－20℃高度),表明强的旋转上升气流将低层水汽和水凝物粒子带到高层,有利于大冰雹增长。HCA-Opt 识别 0.5°仰角 Z_H＞55 dBz 强



注:黑色虚线为 HCA-Opt 将冰晶订正识别为霰的区域,白色虚线为 HCA-Opt 将冰雹订正识别为大雨的区域。

图 5 2021 年 7 月 9 日 14:19 济南雷达(a)HCA 与(b)HCA-Opt 沿 87°方位角的分类结果垂直剖面

Fig. 5 Vertical cross-section of the hydrometeor classification identified by (a) HCA and (b) HCA-Opt along the 87° azimuth angle from Jinan Radar Station at 14:19 BT 9 July 2021



注：D：低压中心，G：高压中心，N：暖中心，L：冷中心。

图 6　2021 年 7 月 9 日 08 时(a)500 hPa，(b)850 hPa 天气图，
(c)章丘探空站温度对数压力图

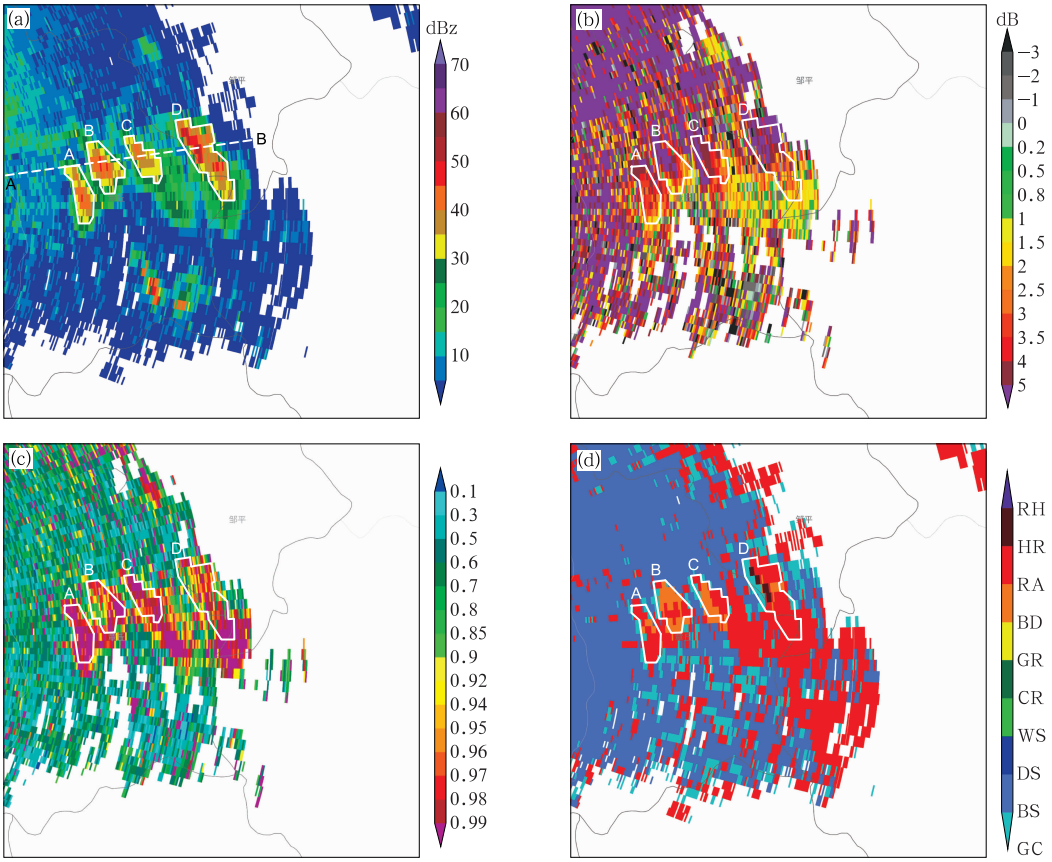
Fig. 6　Synoptic charts at (a) 500 hPa and (b) 850 hPa,
(c) the skew T diagram of Zhangqiu Station at 08:00 BT 9 July 2021

回波区的水凝物分类为冰雹 RH 和大雨 HR(图 8c)，次强和弱回波区为中(小)雨 RA、大滴 BD。图 8d 给出的是 2.4°仰角 HCA-Opt 的分类结果，该仰角的中气旋中心高度为 3.55 km，接近于融化层底高度；识别的冰雹主要分布于主上升气流东侧，且分布范围较 0.5°仰角大，Z_H 介于 30～55 dBz 的区域识别为霰，雹暴下风方弱回波区识别为干雪，而中气旋内识别出了冰雹、大滴、雨等多类水凝物，中气旋西南侧为中(小)雨、西北侧有湿雪。比较图 8c 与 8d 可见，0℃以上的固态的冰雹、霰下落到融化层以下时很大程度上融化变成雨或大滴，而雹暴西侧的湿雪则基本上完全融化，雹暴强中心尺度较大的冰雹不能完全融化而降落到地面。图 2d 给出的是 1.5°仰角 HCA-Opt 的分类结果，也可以反映出降水粒子下落途中的融化过程。

3.3　水凝物的垂直分布特征

图 9a 为 2021 年 7 月 9 日 14:02 济南雷达沿 84°方位角的 Z_H 垂直剖面，在距离雷达 70、76、86 km 附近有三个 Z_H＞45 dBz 对流云体，对应图 7a 中的 B，C，D 三个对流单体，其中 B 单体在中高空的回波最强，＞55 dBz 的回波顶向上超过－20℃的高度(7.2 km)，具备大冰雹形成条件，单体 D＞45 dBz 的回波在低层 0.5°、1.5°两个仰角，已处于减弱阶段。由图 9b 给出的 HCA-Opt 分类结果看，对流云体 B、C 在 3～8 km 高度的分类结果主要为霰，其中夹杂着少量雹，2 km 以下低层则主要为大滴和雨，对应地面为雹暴发展初期的降雨。

图 9c～9f 分别为 14:19 的 Z_H、HCA-Opt 水凝物分类、径向速度 V、Z_{DR} 在同方位角的垂直剖面，此



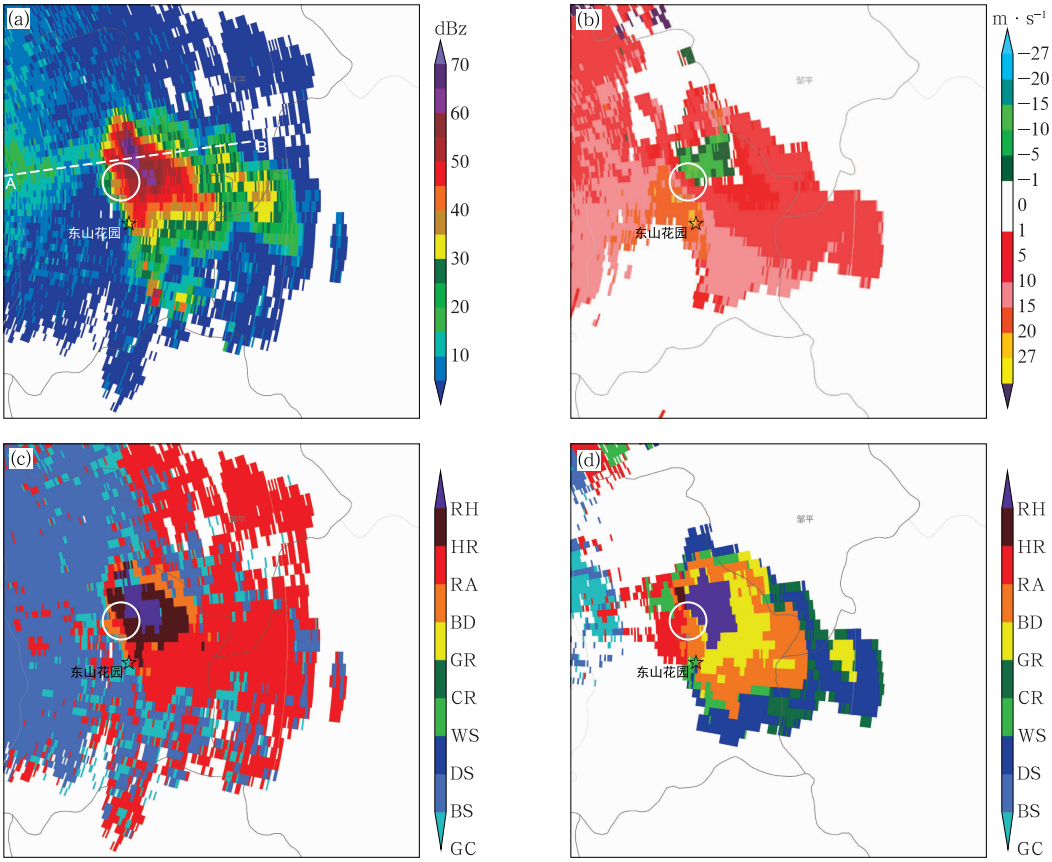
注：图 a 中 AB 虚线为图 9a，9b 中剖面位置，白色折线区为
Z_H＞30 dBz 的回波区，白框 A～D 为对流单体。

图 7 2021 年 7 月 9 日 14:02 济南雷达 0.5°仰角(a)Z_H，(b)Z_{DR}，(c)CC，(d)HCA-Opt 分类结果

Fig. 7 Distribution of (a) Z_H, (b) Z_{DR}, (c) CC, (d) the hydrometeor identified by HCA-Opt at 0.5° elevation from Jinan Radar Station at 14:02 BT 9 July 2021

时的雹暴强回波中心 Z_H＞65 dBz，且已接地，HCA-Opt 水凝物分类为雨雹混合；距离雷达 70～73 km 处低层有径向风辐合、高层为强的辐散(图 9e)，该距离区间融化层以上的 Z_{DR}＞1.5 dB，高度可到达 8 km 处，为“Z_{DR}柱”，对应图 9c 为强回波中心西侧 Z_H 水平梯度最大云区(Z_H 介于 5～55 dBz)，CC 则大于 0.96(图略)。对照图 8a，8b 可见，此时对流发展处于强盛阶段，雹暴西南侧低层强的入流与雹暴中心偏东气流辐合，形成强的中气旋和上升运动：一方面，上升气流将低层的水汽与大滴向上输送到 0℃层以上，最高达－20℃以上，“Z_{DR}柱”的存在表明以扁平状的液态粒子或包有水膜的冰相粒子为主，为冰雹增长提供了有利的过冷水凝物供给条件；另一方面，强的上升气流对冰雹具有托举作用，有利于大冰雹的生成，直到冰雹的落速大于上升气流时，冰雹下落直至落地。

图 9g，9h 分别为 14:42 的 Z_H、HCA-Opt 水凝物分类的垂直剖面。此时，雹暴向东南方向移动，中心回波强度稍有减弱，剖面经过特大冰雹降落到的章丘区东山花园(距雷达站约 74.2 km)。据东山花园的志愿者观察，该位置自 14:30 开始降雹，持续约 40 min，直径 6.8 cm 的特大冰雹于 14:48 降落(见“追雹者”微信小程序上传信息)。东山花园特大冰雹出现低层入流前方强上升运动区，是 Z_H 梯度最大的区域，而非强回波中心，这与 Blair et al(2012)研究的大冰雹落区位置一致。从相态分布结果看，距雷达 70～95 km 的高层仰角主要为霰、雹和干雪，低层以雹、大雨、中(小)雨为主；实况为东山花园以东近 10 km 范围出现雨夹雹，以直径小于 3 cm 的中小冰雹为主。



注：白色圈为中气旋，图 a 中 AB 虚线为图 9c～9f 剖面位置。

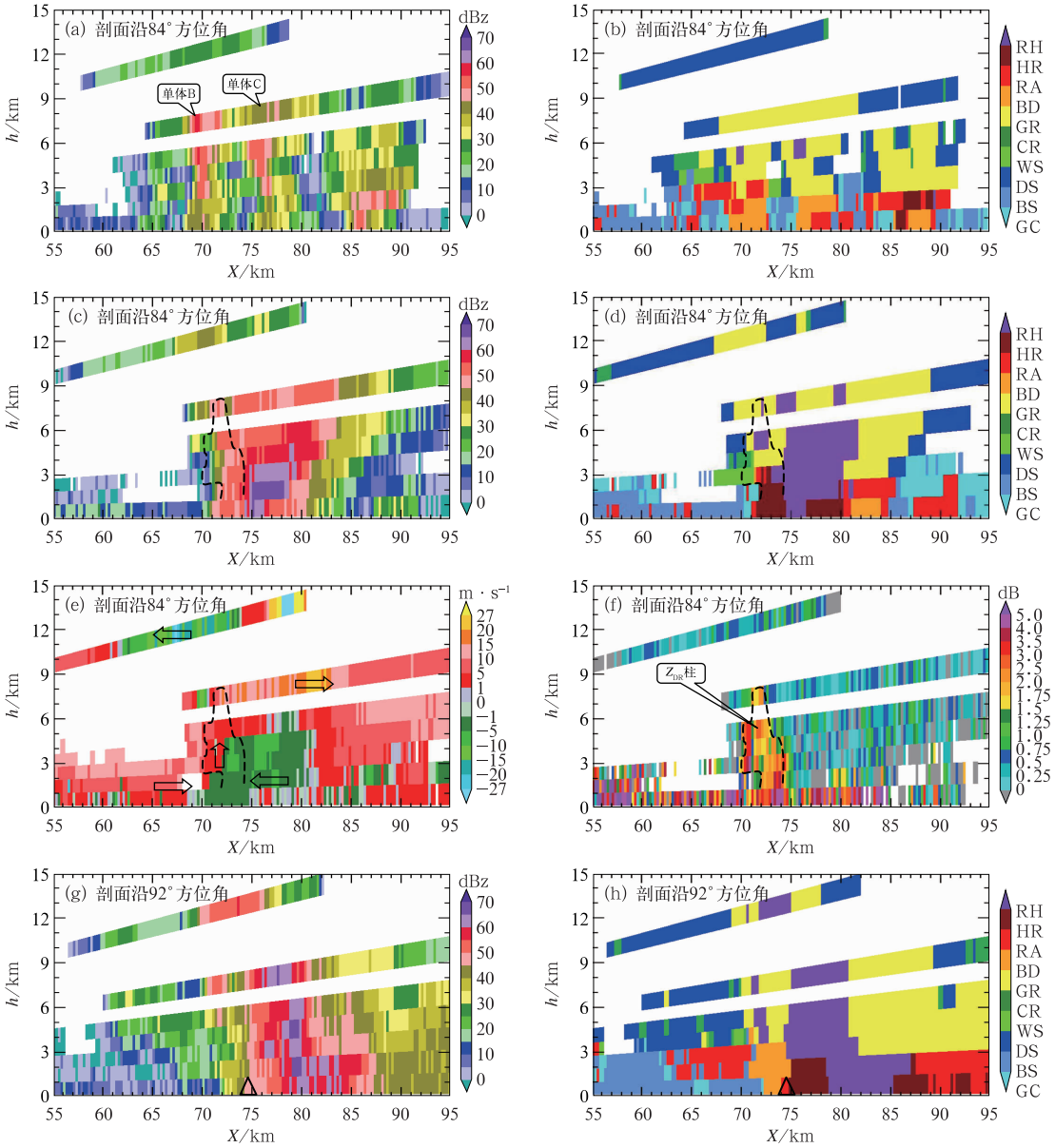
图 8　2021 年 7 月 9 日 14：19 济南雷达 0.5°仰角(a)Z_H，(c)HCA-Opt 水凝物分类，2.4°仰角(b)径向速度，(d)HCA-Opt 水凝物分类

Fig. 8　Distribution of (a) Z_H, (c) the hydrometeor identified by HCA-Opt at 0.5° elevation and (b) radial velocity, (d) the hydrometeor identified by HCA-Opt at 2.4° elevation from Jinan Radar Station at 14:19 BT 9 July 2021

3.4　HCA-Opt 识别冰雹与降雹实况对比

根据冰雹观测志愿者提供的东山花园、章丘区气象局(坐落在瓦山)的降雹信息，对比分析 HCA-Opt 识别冰雹的准确性。表 2 给出济南雷达 HCA-Opt 在东山花园位置(36.688°N、117.545°E)降雹时段(14：30—15：10)各层仰角水凝物的识别结果。可见，除最低仰角层外，其他仰角均识别给出冰雹 RH；其中 14：31—14：42，冰雹出现在高层仰角，中层仰角主要为霰；14：48—15：17，第 2、3 层仰角识别出冰雹，中、高层仰角主要为霰或雹。

图 10 给出的是 2021 年 7 月 9 日 14：42、15：05、15：28 济南雷达 0.5°仰角 HCA-Opt 识别的冰雹分布及与 Z_H 的叠加。分析雹暴移向移速可见，14：00—15：00，雹暴向东南方向移动，15：00—16：00 则逐步转向西南方向移动，移速缓慢。14：42 为东山花园 6.8 cm 特大冰雹落地前一个体扫时间，此时 HCA-Opt 识别的冰雹集中分布在雹暴强中心区(图 10a)，而对雹暴前部、Z_H 水平梯度大的区域的冰雹识别能力不足。15：05(图 10b)，强雹暴中心经过东山花园，东山花园位于雹暴后部，降雹趋于结束，而此时处于雹暴前部的章丘区气象局 10 min 后开始降雹。据章丘气象局观测人员报告：“15：15—15：45 出现降雹，刚开始下冰雹时，颗粒较小，边下边化，后续颗粒逐渐变大，密度不大，地面没有积存，其中大冰雹(5 cm)约于 15：30 降落”。15：28，HCA-Opt 识别的冰雹分布与 Z_H＞55 dBz 的雹暴强回波区吻合一致(图10c)，此时瓦山处于雹暴云体



注：虚线为 $Z_{DR}>1.5$ dB 区域，即“Z_{DR}柱”；△指示东山花园位置。

图 9 2021 年 7 月 9 日济南雷达 14:02(a)Z_H、(b)HCA-Opt 水凝物分类的垂直剖面，14:19(c)Z_H、(d)HCA-Opt 水凝物分类、(e)径向速度、(f)Z_{DR}的垂直剖面，14:42(g)Z_H、(h)HCA-Opt 水凝物分类的垂直剖面

Fig. 9 Vertical cross-section of (a) Z_H, (b) the hydrometeor identified by HCA-Opt at 14:02 BT, (c) Z_H, (d) the hydrometeor identified by HCA-Opt, (e) radial velocity, (f) Z_{DR} at 14:19 BT, (g) Z_H, (h) the hydrometeor identified by HCA-Opt at 14:42 BT from Jinan Radar Station on 9 July 2021

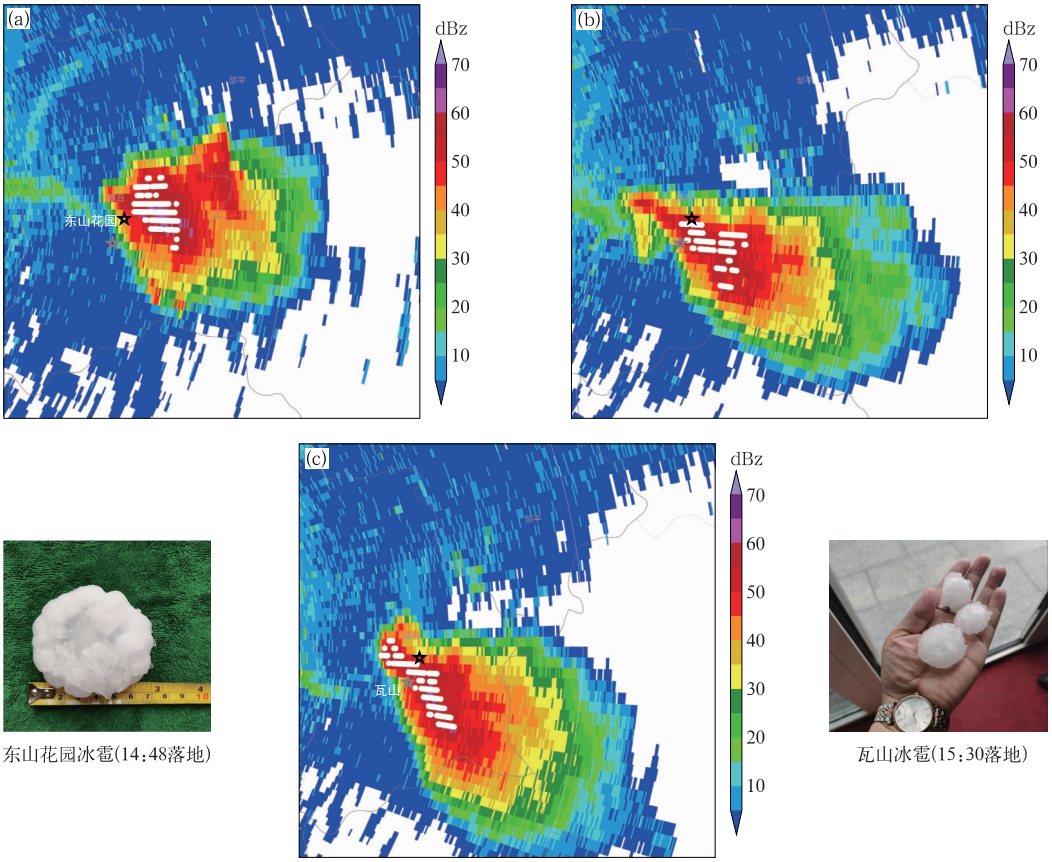
西南侧、Z_H 梯度最大的位置，与东山花园降下特大冰雹时所处位置基本一致。

表 3 给出了 HCA-Opt 识别的 0.5°仰角冰雹位置与东山花园的距离，可见东山花园降雹时段两者的最近距离小于 4 km，14:59 最近为 0.223 km。总体上看，HCA-Opt 识别的冰雹分布与地面降雹实况具有很好的对应关系，对地面冰雹落区预估具有很好的参考。

表 2　2021 年 7 月 9 日 14:31—15:11 东山花园 HCA-Opt 水凝物识别结果

Table 2　The hydrometeor identified by HCA-Opt at Dongshan Garden from 14:31 BT to 15:11 BT 9 July 2021

仰角/(°)	高度/km	14:31	14:36	14:42	14:48	14:54	14:59	15:05	15:11
0.5	1.05	RA	BD、RA	BD	HR、BD	HR	HR	HR	HR
1.5	2.35	RA	BD	BD	HR、BD	RH	RH	HR、RH	HR、RH
2.4	3.54	GR	BD、RH	BD	RH	BD、RH	RH	RH	RH
3.3	4.67	GR	GR	GR	RH	RH	RH	RH	GR、RH
4.3	5.98	GR	GR、RH	RH、GR	RH	RH	RH	RH	RH
6.0	8.21	RH	RH	GR	GR	RH	GR、RH	GR、RH	RH、GR
9.9	13.3	DS、GR	RH	RH	GR	RH	GR	GR	GR



东山花园冰雹(14:48落地)

瓦山冰雹(15:30落地)

注:白点为识别冰雹,黑色★为东山花园,灰色★为瓦山。

图 10　2021 年 7 月 19 日(a)14:42,(b)15:05,(c)15:28 济南雷达 0.5°仰角 Z_H 及 HCA-Opt 识别冰雹分布

Fig. 10　Distribution of Z_H and the hail identified by HCA-Opt at 0.5° elevation from Jinan Radar Station at (a) 14:42 BT, (b) 15:05 BT, (c) 15:28 BT 9 July 2021

表 3　2021 年 7 月 9 日 14:31—15:11 济南雷达 0.5°仰角 HCA-Opt 识别冰雹位置与东山花园的最短距离

Table 3　The shortest distance between the Dongshan Garden and the location of the hail identified by HCA-Opt at the 0.5° elevation from Jinan Radar Station from 14:31 BT to 15:11 BT 9 July 2021

时间/BT	14:31	14:36	14:42	14:48	14:54	14:59	15:05	15:11
最短距离/km	3.848	3.578	2.281	1.256	0.494	0.223	0.899	0.367

4　HCA-Opt 水凝物识别可靠性分析

本节通过计算分类结果中首选与次选类型的概率差,分析 HCA-Opt 对章丘强雹暴天气水凝物分类识别的可靠性,当两者差异越大分类结果越可信。

表 4 给出了 HCA-Opt 识别的首选水凝物类型对应的次选类型的频率。例如,当冰雹是首选类型

时(第 10 行 RH),次选类型为霰 GR、中(小)雨 RA 与大雨 HR,对应的频率分别为 0.62、0.11 与 0.27。通过这个表可以看出哪些水凝物类型之间易出现混淆。

表 4 HCA-Opt 识别的 10 种分类对应次选类型出现频率

Talbe 4 Frequency of second choice type corresponding to 10 types of hydrometer identified by HCA-Opt

类型	GC	BS	DS	WS	CR	GR	BD	RA	HR	RH
GC	1.00	0.00	0.00	0.30	0.00	0.00	0.00	0.70	0.00	0.00
BS	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.99	0.00	0.00
DS	0.00	0.00	1.00	0.01	0.97	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
WS	0.02	0.00	0.63	1.00	0.04	0.00	0.00	0.20	0.00	0.10
CR	0.00	0.00	0.96	0.00	1.00	0.01	0.00	0.00	0.02	0.00
GR	0.00	0.00	0.00	0.00	0.69	1.00	0.00	0.01	0.03	0.28
BD	0.00	0.05	0.00	0.00	0.01	0.01	1.00	0.85	0.02	0.01
RA	0.07	0.10	0.00	0.09	0.00	0.02	0.01	1.00	0.69	0.02
HR	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.76	1.00	0.22
RH	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.62	0.00	0.11	0.27	1.00

注:行代表首选类型,列对应次选类型。

从 HCA-Opt 给出的 10 种分类结果中首选与次选类型的概率平均差(图 11)可见,概率差最大为中(小)雨 RA,为 0.5 左右,其次是霰 GR,为 0.4 左右,说明 HCA-Opt 识别结果为这两类水凝物时,大概率不会出现误判。冰雹 RH 与大滴 BD 概率差异波动较大,对照表 4 可以看出,这两类水凝物对应的次选类型频率最高的分别为霰 GR 和中(小)雨 RA,即便 HCA-Opt 出现误判,也不会对降水粒子相态判别产生较大影响。冰晶 CR 与湿雪 WS 概率差较小,分别为 0.1 与 0.2 左右,对应的次选类型频率最高的均为干雪 DS,这主要由于冰晶、湿雪与干雪各雷达参量隶属函数重合部分较多,所处的高度大致相同,利用融化层位置也无法有效将冰晶、湿雪与干雪进行区分,后期可根据飞机观测的粒子类型,对其隶属函数进行进一步改进。

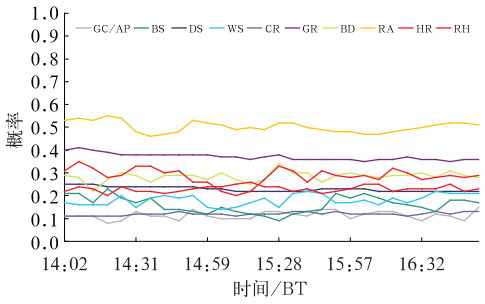


图 11 2021 年 7 月 9 日 14:02—17:00 济南雷达 HCA-Opt 识别的水凝物首选与次选类型概率的平均差

Fig. 11 Time series of the average difference between the probability of the first and the second choice types identified by HCA-Opt from Jinan Radar Station from 14:02 BT to 17:00 BT 9 July 2021

5 结 论

本文在美国双偏振 WSR-88D 业务应用的 HCA 基础上,通过增加冰雹区与三体散射区水凝物类型的订正、数值模式温度分析场识别的融化层及水凝物类型垂直分布的限制条件,优化建立了 HCA-Opt。利用 HCA-Opt 分析了 2021 年 7 月 9 日济南章丘区一次强雹暴天气过程的水凝物分布特征,检验了 HCA-Opt 对水凝物识别的准确性与可靠性。

(1)当雹暴中冰雹与 TBSS 区域的 Z_{DR} 为负值、CC 较低时,HCA 通常会将该区域类型为识别地物,通过引入冰雹与 TBSS 区的识别条件,HCA-Opt 可以正确识别上述区域的水凝物类型。融化层特征不明显时,HCA 利用 MLDA 无法自动识别融化层位置,利用模式的温度分析场可以弥补这一不足,有效区分不同高度层的水凝物。通过引入水凝物垂直分布限定条件,HCA-Opt 识别的水凝物在垂直方向上分布较 HCA 更加合理。

(2)HCA-Opt 给出的水凝物分类结果较好描述了章丘区 7 月 9 日强雹暴天气过程中对流初生、降雹不同阶段的水凝物空间分布,结合 Z_H,Z_{DR},CC 和径向速度等反映的雹暴云体结构,初步揭示了不同高度的水凝物粒子相态转化特征。

(3)通过检验可以发现,HCA-Opt 在 0.5°仰角

层识别的冰雹分布与地面降雹范围较为一致，对冰雹预警和落区判别具有较好的指示意义，但对雹暴前部大冰雹落点的识别能力不足。分析首选与次选类型的概率差表明，HCA-Opt 识别的中(小)雨与霰最为可信，当识别类型为冰晶或湿雪时，容易与干雪出现混淆。

参考文献

曹俊武，刘黎平，葛润生，2005. 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，29(5)：827-836. Cao J W，Liu L P，Ge R S，2005. A study of fuzzy logic method in classification of hydrometeors based on polarimetric radar measurement[J]. Chin J Atmos Sci，29(5)：827-836(in Chinese).

刁秀广，郭飞燕，2021. 2019 年 8 月 16 日诸城超级单体风暴双偏振参量结构特征分析[J]. 气象学报，79(2)：181-195. Diao X G，Guo F Y，2021. Analysis of polarimetric signatures in the supercell thunderstorm occurred in Zhucheng on 16 August 2019[J]. Acta Meteor Sin，79(2)：181-195(in Chinese).

冯亮，肖辉，孙跃，2018. X 波段双偏振雷达水凝物粒子相态识别应用研究[J]. 气候与环境研究，23(3)：366-386. Feng L，Xiao H，Sun Y，2018. A study on hydrometeor classification and application based on X-band dual-polarization radar measurements[J]. Climatic Environ Res，23(3)：366-386(in Chinese).

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，王洪，许焕斌，等，2021. 2019 年 8 月 16 日山东诸城一次罕见强雹暴结构和大雹形成的观测分析[J]. 气象学报，79(4)：674-688. Gong D L，Wang H，Xu H B，et al，2021. Observational analysis of a rare and severe hailstorm cloud structure and large hailstones formation on 16 August 2019 in Zhucheng，Shandong Province[J]. Acta Meteor Sin，79(4)：674-688(in Chinese).

郭凤霞，马学谦，王涛，等，2014. 基于 X 波段双线偏振天气雷达的雷暴云粒子识别[J]. 气象学报，72(6)：1231-1244. Guo F X，Ma X Q，Wang T，et al，2014. An approach to the hydrometeors classification for thunderclouds based on the X-band dual-polarization Doppler weather radar[J]. Acta Meteor Sin，72(6)：1231-1244(in Chinese).

何清芳，林文，张深寿，等，2022. 闽西南地区一次春季降雹过程的双偏振参量及降水粒子谱特征[J]. 气象，48(7)：856-867. He Q F，Lin W，Zhang S S，et al，2022. Dual polarization parameters and precipitation particle spectrum characteristics of a spring hail event in southwestern Fujian[J]. Meteor Mon，48(7)：856-867(in Chinese).

何宇翔，肖辉，吕达仁，2010. 利用极化雷达分析层状云中水凝物粒子性状分布[J]. 大气科学，34(1)：23-34. He Y X，Xiao H，Lü D R，2010. Analysis of hydrometeor distribution characteristics in stratiform clouds using polarization radar[J]. Chin J Atmos Sci，34(1)：23-34(in Chinese).

李昭春，朱君鉴，张持岸，等，2021. 海南屯昌儋州台风雨带龙卷双偏振雷达探测分析[J]. 气象，47(9)：1086-1098. Li Z C，Zhu J J，Zhang C A，et al，2021. Analysis of dual polarization radar detection of tornado typhoon rainband in Danzhou and Tunchang in Hainan Province[J]. Meteor Mon，47(9)：1086-1098(in Chinese).

刘黎平，徐宝祥，王致君，等，1992. 用 C 波段双线偏振雷达研究冰雹云[J]. 大气科学，16(3)：370-376. Liu L P，Xu B X，Wang Z J，et al，1992. Study of hail with C-B and dual linear polarization radar[J]. Sci Atmos Sin，16(3)：370-376(in Chinese).

刘亚男，肖辉，姚振东，等，2012. X 波段双极化雷达对云中水凝物粒子的相态识别[J]. 气候与环境研究，17(6)：925-936. Liu Y N，Xiao H，Yao Z D，et al，2012. Analyses of hydrometeor identification based on X-band polarimetric radar[J]. Climatic Environ Res，17(6)：925-936(in Chinese).

潘佳文，高丽，魏鸣，等，2021. 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，79(1)：168-180. Pan J W，Gao L，Wei M，et al，2021. Analysis of the polarimetric characteristics of hail storm from S band dual polarization radar observations[J]. Acta Meteor Sin，79(1)：168-180(in Chinese).

潘佳文，蒋璐璐，魏鸣，等，2020. 一次强降水超级单体的双偏振雷达观测分析[J]. 气象学报，78(1)：86-100. Pan J W，Jiang L L，Wei M，et al，2020. Analysis of a high precipitation supercell based on dual polarization radar observations[J]. Acta Meteor Sin，78(1)：86-100(in Chinese).

苏永彦，刘黎平，2022. S 波段双偏振雷达和 X 波段相控阵天气雷达中气旋识别结果对比[J]. 气象，48(2)：229-244. Su Y Y，Liu L P，2022. Comparison of mesocyclone identification results between S-band dual polarization radar and X-band phased array weather radar[J]. Meteor Mon，48(2)：229-244(in Chinese).

汪舵，刘黎平，吴翀，2017. 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，43(9)：1041-1051. Wang D，Liu L P，Wu C，2017. An optimization rainfall algorithm of S-band dual-polarization radar based on hydrometeor identification[J]. Meteor Mon，43(9)：1041-1051(in Chinese).

吴翀，刘黎平，仰美霖，等，2021. X 波段双偏振雷达相态识别与拼图的关键技术[J]. 应用气象学报，32(2)：200-216. Wu C，Liu L P，Yang M L，et al，2021. Key technologies of hydrometeor classification and mosaic algorithm for X-band polarimetric radar[J]. J Appl Meteor Sci，32(2)：200-216(in Chinese).

夏凡，吴炜，张乐坚，等，2023. 基于 S 波段双偏振雷达融化层识别算法的研究[J]. 气象，49(2)：146-156. Xia F，Wu W，Zhang L J，et al，2023. Study of designation algorithm of the melting layer based on S-band dual-polarization radar[J]. Meteor Mon，49(2)：146-156(in Chinese).

夏凡，张乐坚，张林，2021. 基于双线偏振参量对北京 X 波段雷达非降水回波识别方法的研究[J]. 气象，47(5)：561-572. Xia F，Zhang L J，Zhang L，2021. Study of recognition algorithm of non-precipitation echo for Beijing X-band radar based on dual polarization parameter[J]. Meteor Mon，47(5)：561-572(in Chinese).

徐舒扬，吴翀，刘黎平，2020. 双偏振雷达水凝物相态识别算法的参数

改进[J]. 应用气象学报,31(3):350-360. Xu S Y, Wu C, Liu L P, 2020. Parameter improvements of hydrometeor classification algorithm for the dual-polarimetric radar[J]. J Appl Meteor Sci, 31(3):350-360(in Chinese).

杨吉,郑媛媛,徐芬,2020. 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,78(4):568-579. Yang J, Zheng Y Y, Xu F, 2020. An analysis of a hail case over the Yangtze and Huai River Basin based on dual-polarization radar observations[J]. Acta Meteor Sin, 78(4):568-579(in Chinese).

杨磊,贺宏兵,杨波,等,2019. 基于S波段双线偏振天气雷达的降水粒子相态识别[J]. 气象与环境学报,35(4):127-132. Yang L, He H B, Yang B, et al, 2019. Identification of hydrometeors based on S-band dual-polarimetric radar measurement[J]. J Meteor Environ, 35(4):127-132(in Chinese).

Al-Sakka H, Boumahmoud A A, Fradon B, et al, 2013. A new fuzzy logic hydrometeor classification scheme applied to the French X-, C-, and S-band polarimetric radars[J]. J Appl Meteor Climatol, 52(10):2328-2344.

Bechini R, Chandrasekar V, 2015. A semisupervised robust hydrometeor classification method for dual-polarization radar applications [J]. J Atmos Oceanic Technol, 32(1):22-47.

Blair S F, Laflin J M, Leighton J W, et al, 2012. S-band polarimetric analysis of the 23 May 2011 Oklahoma record hailstorm using high-resolution observations during HailSTONE [C] // 26th Conference on Severe Local Storms. Nashville, TN: American Meteorological Society.

Boodoo S, Hudak D, Donaldson N, et al, 2010. Application of dual-polarization radar melting-layer detection algorithm [J]. J Appl Meteor Climatol, 49(8):1779-1793.

Dolan B, Rutledge S A, 2009. A theory-based hydrometeor identification algorithm for X-band polarimetric radars[J]. J Atmos Oceanic Technol, 26(10):2071-2088.

Dolan B, Rutledge S A, Lim S, et al, 2013. A robust C-band hydrometeor identification algorithm and application to a long-term polarimetric radar dataset [J]. J Appl Meteor Climatol, 52(9):2162-2186.

Gao J D, Stensrud D J, 2012. Assimilation of reflectivity data in a convective-scale, cycled 3DVAR framework with hydrometeor classification[J]. J Atmos Sci, 69(3):1054-1065.

Giangrande S E, Krause J M, Ryzhkov A V, 2008. Automatic designation of the melting layer with a polarimetric prototype of the WSR-88D radar[J]. J Appl Meteor Climatol, 47(5):1354-1364.

Giangrande S E, Ryzhkov A V, 2008. Estimation of rainfall based on the results of polarimetric echo classification[J]. J Appl Meteor Climatol, 47(9):2445-2462.

Höller H, Hagen M, Meischner P F, et al, 1994. Life cycle and precipitation formation in a hybrid-type hailstorm revealed by polarimetric and Doppler radar measurements[J]. J Atmos Sci, 51(17):2500-2522.

Kurdzo J M, Bennett B J, Smalley D J, et al, 2020. The WSR-88D inanimate hydrometeor class[J]. J Appl Meteor Climatol, 59(5):841-858.

Lemon L R, 1998. The radar "three-body scatter spike": an operational large-hail signature[J]. Wea Forecasting, 13(2):327-340.

Lim S, Chandrasekar V, Bringi V N, 2005. Hydrometeor classification system using dual-polarization radar measurements: model improvements and in situ verification[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 43(4):792-801.

Lim S, Cifelli R, Chandrasekar V, et al, 2013. Precipitation classification and quantification using X-band dual-polarization weather radar: application in the hydrometeorology testbed[J]. J Atmos Oceanic Technol, 30(9):2108-2120.

Liu H P, Chandrasekar V, 2000. Classification of hydrometeors based on polarimetric radar measurements: development of fuzzy logic and neuro-fuzzy systems, and in situ verification[J]. J Atmos Oceanic Technol, 17(2):140-164.

Marzano F S, Scaranari D, Vulpiani G, 2007. Supervised fuzzy-logic classification of hydrometeors using C-band weather radars[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 45(11):3784-3799.

Park H S, Ryzhkov A V, Zrnić D S, et al, 2009. The hydrometeor classification algorithm for the polarimetric WSR-88D: description and application to an MCS[J]. Wea Forecasting, 24(3):730-748.

Ryzhkov A, Zrnić D S, 1995. Precipitation and attenuation measurements at a 10-cm wavelength[J]. J Appl Meteor, 34(10):2121-2134.

Straka J M, 1996. Hydrometeor fields in a supercell storm as deduced from dual-polarization radar[C]// Preprints, 18th Conference on Severe Local Storms. San Francisco: Amer Meteor Soc, 551-554.

Straka J M, Zrnić D S, Ryzhkov A V, 2000. Bulk hydrometeor classification and quantification using polarimetric radar data: synthesis of relations[J]. J Appl Meteor, 39(8):1341-1372.

Tang L, Zhang J, Langston C, et al, 2014. A physically based precipitation-nonprecipitation radar echo classifier using polarimetric and environmental data in a real-time national system [J]. Weather and Forecasting, 29(5):1106-1119.

Vivekanandan J, Zrnic D S, Ellis S M, et al, 1999. Cloud microphysics retrieval using S-band dual-polarization radar measurements[J]. Bull Amer Meteor Soc, 80(3):381-388.

Wu C, Liu L P, Wei M, et al, 2018. Statistics-based optimization of the polarimetric radar hydrometeor classification algorithm and its application for a squall line in South China[J]. Adv Atmos Sci, 35(3):296-316.

Zrnić D S, Ryzhkov A, Straka J, et al, 2001. Testing a procedure for automatic classification of hydrometeor types[J]. J Atmos Oceanic Technol, 18(6):892-913.

(本文责编:俞卫平)