孟磊，杨元建，万秉成，等，2026. 基于地基雷达组网的冰雹多参数综合识别与预报指标研究——以河北省为例[J]. 高原气象，45(5)：1489−1505. Meng Lei, Yang Yuanjian, Wan Bingchen, et al., 2026. Research on multi-parameter comprehensive identification and prediction index of hail based on ground-based radar network: a case study in Hebei Province[J]. Plateau Meteorology, 45(5): 1489−1505. DOI: 10.7522/j.issn.1000−0534.2026.00010. CSTR: 32265.14.gyqx.CN62−1061/P.2026.00010.

基于地基雷达组网的冰雹多参数综合识别与预报指标研究
——以河北省为例

孟 磊[1]，杨元建[1]，万秉成[4]，楚志刚[1]，张文杰[5]，
范俊红[2,3]，刘瑜珊[2]，周 爽[2]

（1. 南京信息工程大学大气物理学院，江苏 南京 210044；
2. 河北省气象与生态环境重点实验室，河北 石家庄 050021；
3. 河北省气象服务中心，河北 石家庄 050021；
4. 南京信息工程大学人工智能学院(未来技术学院)，江苏 南京 210044；
5. 南京信息工程大学地理科学学院，江苏 南京 210044）

摘要：冰雹是河北省主要的灾害性天气，其突发性强，可在短时间内造成重大的经济损失。本研究基于2019—2023年河北省地基雷达观测数据，提取了逐6 min三维反射率因子信息，计算了最大预期冰雹尺寸(Maximum Expected Size of Hail，*MESH*)、冰雹概率(Probability of Hail，*POH*)、强冰雹概率(Probability of Severe Hail，*POSH*)、垂直液态水含量(Vertical Integrated Liquid，*VIL*)和垂直液态水含量密度(Vertical Integrated Liquid Density，*VILD*)关键识别参数。基于河北省国家站冰雹观测和雷达资料，共筛选出245个有效冰雹事件和1373个非冰雹事件作为分析样本。评估了5种常用冰雹识别参数的性能表现。通过核密度估计分析发现，*MESH*、*VIL*、*VILD*和*POSH*在冰雹与非冰雹事件之间表现出显著的分布差异。基于混淆矩阵的技能评分评估进一步表明，在单一参数中，*POSH*冰雹识别能力最强，主要因为其综合考虑了0 ℃层和−20 ℃层高度信息，有效滤除了低反射率因子的干扰。而多参数组合则表现出更高的稳定性，因其能够更好地反映复杂的气象条件和冰雹生成的多样性，可有效降低误报风险。由*POSH*>10%、*VIL*>14 kg·m^{-2}和*VILD*>1.2 g·m^{-3}构成的三参数组合表现最优，其临界成功指数(Critical Success Index，*CSI*)较单一参数可提高约3%，且峰值*CSI*对应更高的准确率。然而，由于冰雹下落过程中的水平平流效应、冰雹尺寸分布的变异性、复杂的散射和衰减现象，以及混合水凝物类型的影响，组合参数的冰雹尺寸估计精度存在局限性。本研究提出了一种距离平均的冰雹尺寸改进算法*MESH*ra(range average)，通过对格点9 km距离内各高度层大于40 dBZ的回波强度进行平均后重新计算*MESH*，该方法能有效提高冰雹尺寸观测与预估之间的相关性。利用多参数组合识别法对河北省2025年两次冰雹过程(6月9日和6月18日)进行了检验，识别出全部8个冰雹个例，可提前6~60 min识别出冰雹。改进的*MESH*ra预估的直径10 mm以下的小冰雹误差小，而传统*MESH*预估的直径在18 mm以上的大冰雹误差小。2019—2023年河北省85%冰雹直径在10 mm以下，因此*MESH*ra冰雹预估比较适合河北省业务冰雹预估，但在大冰雹的环境条件下，适合用*MESH*预估冰雹尺寸。

关键词：冰雹识别；多参数组合；识别指标；临界成功指数；冰雹尺寸预估

文章编号：1000−0534(2026)05−1489−17 **中图分类号**：P426.64 **文献标识码**：A

DOI：10.7522/j.issn.1000−0534.2026.00010

CSTR: 32265.14.gyqx.CN62−1061/P.2026.00010

收稿日期：2025-10-10；**定稿日期**：2026-01-04

资助项目：国家自然科学基金项目(42521006)；中国气象局首批揭榜挂帅项目(CMAJBGS202210)；河北省气象局2024年省级财政业务建设项目“气象防灾减灾救灾工程-河北省气象灾害风险预报业务能力提升”(13000024P00846410134L)

作者简介：孟磊(2000—)，男，贵州普安人，硕士研究生，主要从事短临灾害天气预报及其相关方法研究. E-mail: menglei_ln@163.com

通信作者：范俊红(1968—)，女，河北磁县人，正高级工程师，主要从事暴雨、暴雪和强对流等灾害性天气预报技术研究. E-mail: 378307267@qq.com

© Editorial Department of *Plateau Meteorology* (CC BY-NC-ND)

1 引言

冰雹是由强对流天气系统引起的一种短暂的、破坏性强且危险的现象。常常对农作物、公共设施、建筑物和机动车辆造成损害，严重危害农业、电力和交通，是影响国民经济和社会发展不可低估的气象灾害(Brimelow et al., 2017)。中国是世界上最容易发生冰雹的四个地区之一(Hand and Cappelluti, 2011)，冰雹也是中国最严重的气象灾害之一(Guan et al., 2015)。河北地区位于中纬度的沿海与内陆交界处，北部有燕山山脉，南部为华北平原，西部是太行山脉，东部环绕渤海。该地区地势自西北向东南逐渐降低，独特的地形条件和明显的干湿季节交替导致河北地区春季至秋季频繁发生冰雹等强对流天气(顾光芹等，2011；闵晶晶等，2012；孙继松等，2006；张仙等，2013)。因此，准确识别和预测冰雹事件对防灾减灾具有重要的科学意义和现实价值。

精确辨识冰雹事件及其规模或损害程度仍是一项亟待解决的难题，尤其准确估计冰雹尺寸仍然具有挑战性。许多学者对冰雹云的监测和预警进行了深入研究，主要集中在冰雹生成风暴的环境条件和雷达特征分析(Gutierrez and Kumjian, 2021；Farnell et al., 2023；Brook et al., 2023；Kumjian et al., 2021；李腊平等，2024)。在冰雹探测研究中，早期主要依赖雷达回波参数(如强度、回波顶高)与点聚图方法(龚乃虎和蔡启铭，1982)。后续发展则涵盖了更多特征，包括由多普勒雷达识别的悬垂回波、有界弱回波区及三体散射等(俞小鼎等，2005；杨静等，2023)，以及45 dBZ回波高度与0 ℃层高度差值(Waldvogel et al., 1979)、低空反射率与云顶温度(Auer, 1994)等特定参数组合。Shi et al.(2019)也基于弱回波区进行冰雹的识别和预报。此外，在单一物理量识别的基础上，学者们逐步发展综合利用多特征参数进行冰雹判识。早期研究侧重于回波结构参数，李子华等(1979)综合使用了回波结构、强回波顶高、负温区厚度及反射率因子。刁秀广等(2008)则强调了垂直液态水含量及其密度指标的月度变化价值。潘佳文等(2021)提出了基于差分反射率(ZDR)柱的偏振识别判据区分大小冰雹。Holleman(2001)与Skripnikova and Rezcova(2014)分别对多种识别方法进行了系统性对比与评估，并指出其统计指标趋势相似，后者还建立了联合判别标准。汤兴芝等(2023)指出高反射率因子、*VIL*异常高值、三体散射和风暴顶辐散对极端冰雹的指示作用。马中元等(2024)提出了基于组合反射率(CR)的四要素识别法，并引入*VIL*和强回波垂直面积以提升准确率。计燕霞等(2025)系统分析了最大回波强度、低层回波强度、回波顶高、风暴顶高、*VIL*和*VIL*密度6个特征量构建了适用于当地冰雹的客观识别方法。关于冰雹尺寸的研究已被证明表现良好的雷达方法是基于雷达反射率(Horizontal Reflectivity Factor，*ZH*)的垂直积分*VIL*(刘治国等，2008)和*MESH*。但冰雹的尺寸分布和浓度不能仅通过雷达反射率推断，因为体积内可能存在液态和冻结水成分的混合，可能导致尺寸估计出现正偏差。此外，冰雹在降落过程中会受到环境风和风暴产生的水平风的影响，这可能导致高空观测与地面观测中雷达估计的冰雹位置不一致。Ackermann et al.(2024)结合*MESH*与保险数据发现，*MESH*在冰雹损害估计方面表现较好，但Picca and Ryzhkov(2012)指出*MESH*存在高估冰雹尺寸的问题。综上所述，多数方法基于单一雷达参数，识别稳定性有限，缺乏针对区域特性的系统化阈值组合方案，且基于雷达观测提供准确的冰雹尺寸估计仍然具有很大的不确定性。鉴于此，本文对雷达产品进行了综合分析，评估了当前5种广泛使用的冰雹检测指标，进一步发展识别冰雹发生的最佳测量方法，改进冰雹尺寸预估误差问题，旨在确定识别冰雹发生及冰雹尺寸的最佳指标。

2 资料来源

本研究使用了多种数据源，其中雷达数据和ERA5(ECMWF Reanalysis 5th Generation)再分析数据存在时空分辨率方面存在显著差异，且数据格式各异，因此首先将所有异构数据进行汇总，通过线性插值法与光流插值法将ERA5数据重新缩放至0.01°的空间分辨率，时间间隔设定为6 min，与雷达组网数据保持一致。另外，文中涉及的地图是基于中华人民共和国自然资源部地图技术审查中心标准地图服务系统下载的审图号为GS(2024)0650号的中国地图制作，底图无修改。无特殊情况说明，文中所用时间均为北京时。

2.1 ERA5再分析资料

ERA5是由欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts，ECMWF)开发的最新综合再分析产品(Hersbach et al., 2020)，相较于过去常用于研究雷暴环境的ERA-Interim(Dee et al., 2011；Allen and Karoly, 2014)，ERA5在多个方面都进行了显著的改进，空

间分辨率达到了0.25°，并且数据间隔为1 h。为计算所需的相关指数，每个网格单元都使用了包括压力、温度在内的垂直剖面数据，这种方法也被广泛应用于对流参数的研究中（Thompson et al.，2003；Taszarek et al.，2018，2019），本研究使用的为逐小时的pressure levels产品。

2.2　冰雹报告

冰雹信息可以通过气象观测员记录站点冰雹相关信息、保险公司的损失报告、公众、大众媒体收集的报告和损害调查的文件获取。调查恶劣天气现象的难度较大，主要是因为稀疏的气象网络难以有效地报告此类事件，尤其是在无人居住的地区。除了站点记录信息其他报告可能偏向于最具破坏性的冰雹事件，其他类型的信息来源都有一定的局限性。因此，本研究主要基于2019—2023年河北省国家站冰雹观测数据，经统计分析[图(1)]发现，河北省冰雹主要出现在5—9月，6月出现冰雹次数最多，为74次。另外，冰雹多发生在午后到傍晚，傍晚发生的次数最多，为110次。将冰雹直径（Hail Diameter，HD）分为5个等级，各等级冰雹出现频率如图2所示，河北省冰雹以直径10 mm以下居多，占85%，其中直径小于5 mm的占42.5%，5~10 mm的占42.5%，直径10 mm以上的仅占15%，其中直径在20 mm以上的大冰雹出现频率仅为4.1%。

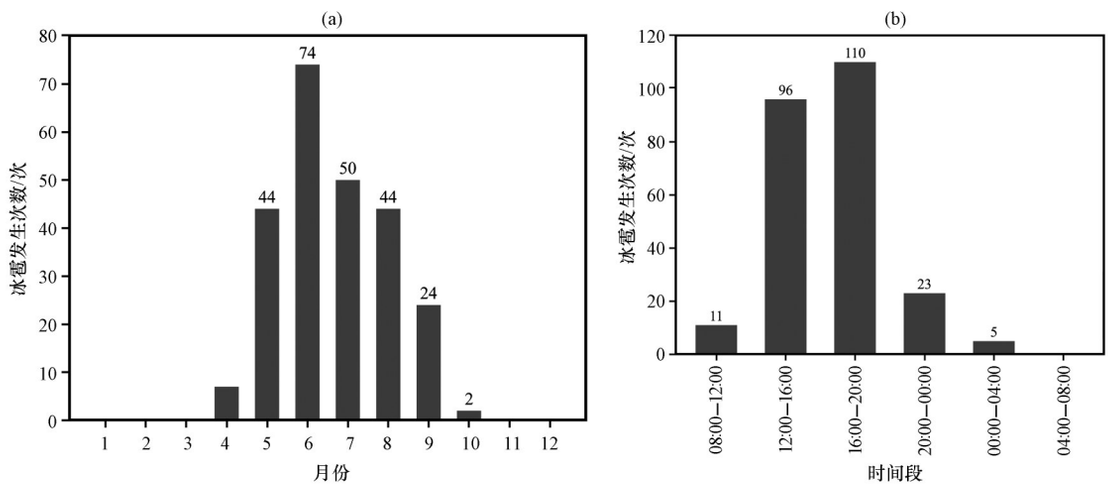


图1　2019—2023年河北省冰雹发生情况按月（a）和时次（b）统计的结果

Fig. 1　Statistical results of hail occurrences by month (a) and by time of hour (b) in Hebei Province from 2019 to 2023

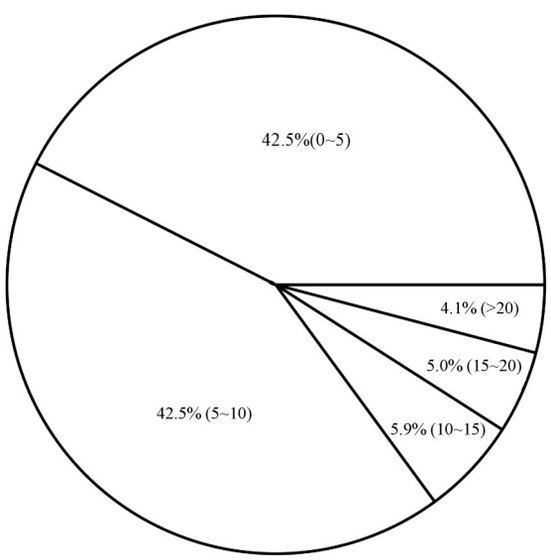


图2　2019—2023年河北冰雹直径分布饼状图

括号内数字表示冰雹直径范围（单位：mm）

Fig. 2　Pie chart showing the distribution of hailstone diameters in Hebei Province during 2019—2023. The numbers in parentheses indicate the range of hail diameters (unit: mm)

2.3　雷达拼图资料

为了保持数据内部时间和空间的一致性，严格处理了雷达观测数据与地面实际记录的时间对准问题。雷达观测数据使用世界时（UTC）作为时间戳，将雷达观测资料进行UTC+8处理与地面观测记录的北京时间相同。为了保证雷达样本数据的质量，首先对体扫反射率因子数据进行质量控制，质量控制方法包括去除孤立噪声点、剔除地物杂波、滤波平滑以及对C波段进行H-B衰减订正（Hitschfeld and Bordan，1954）等。通过极坐标转换及八点内插法实现雷达回波的三维组网（肖艳姣和刘黎平，2006；黄兴友等，2021），产品水平分辨率为0.01°，垂直层数为21层，高度0~10 km，间隔0.5 km，研究区域位于113°E—120°E，35.5°N—43°N。地形数据为地理空间数据云提供的美国航空航天局（The Shuttle Radar Topography Mission，SRTM）高分辨率地形高程数据，数据版本为V4.1，分辨率精度为90 m。涉及雷达为华北地区

的6部S波段雷达(沧州雷达、秦皇岛雷达、石家庄雷达、邯郸雷达、北京雷达、天津雷达)和2台C波段雷达(承德雷达、张家口雷达),雷达覆盖范围与冰雹记录点如图3所示。

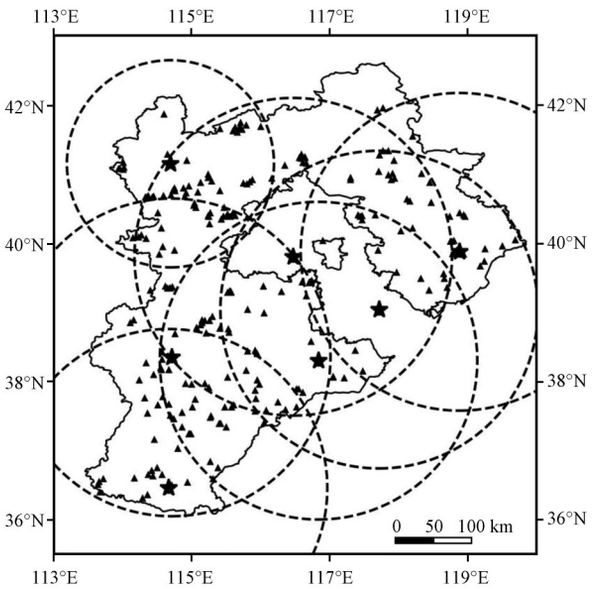


图3 2019—2023年研究区域河北冰雹事件(▲)以及雷达站点位置(★)

虚线圆圈表示雷达覆盖范围

Fig. 3 Hail events (▲) in Hebei Province and the locations of radar stations (★) within the study area from 2019 to 2023. The dotted circles indicate radar coverage areas

3 研究方法

本研究旨在系统评估雷达参数在冰雹识别与尺寸预估中的能力,技术路线如图4所示。首先,基于雷达观测数据计算5种冰雹识别参数;接着,利用核密度估计分析参数的区分能力;最后,通过混淆矩阵计算多种技能评分,以确定单参数及多参数组合的最佳识别阈值,再通过距离平均法提高冰雹尺寸预估能力。

3.1 冰雹探测算法

Witt et al.(1998a)提出的*MESH*是用来评估冰雹发生频率和尺寸的常见工具。该指标基于与强冰雹指数*SHI*(Strong Hail Index)之间的幂次关系,定义如下:

$$E = 5 \times 10^{-6} \times W(Z) \times 10^{0.084Z} \tag{1}$$

$$W(Z) = \begin{cases} 0 & Z \leqslant Z_L \\ \dfrac{Z - Z_L}{Z_U - Z_L} & Z_L < Z < Z_U \\ 1 & Z \geqslant Z_U \end{cases} \tag{2}$$

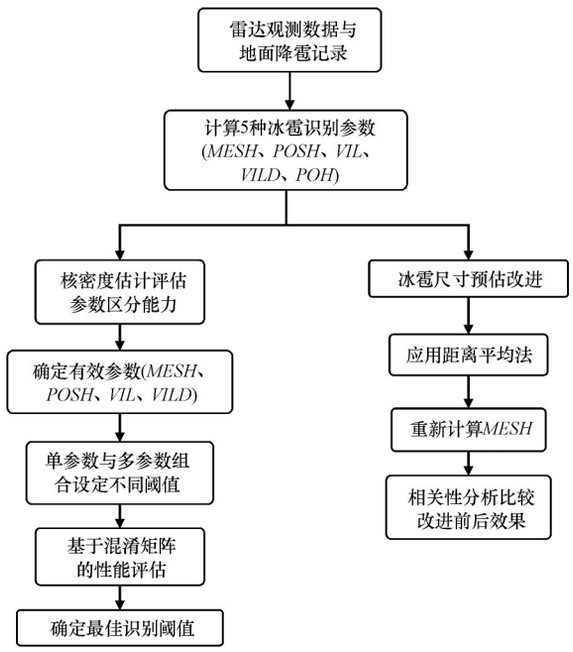


图4 技术路线图

Fig. 4 Technology road map

$$SHI = 0.1\int_{H_0}^{H_T} W_T(H)\,E\mathrm{d}H \tag{3}$$

$$W_T(H) = \begin{cases} 0 & H \leqslant H_0 \\ \dfrac{H - H_0}{H_{m20} - H_0} & H_0 < H < H_{m20} \\ 1 & H \geqslant H_{m20} \end{cases} \tag{4}$$

$$SHI = \sum_{i=1}^{n} W_T(H_i)\,E_i\Delta H_i \tag{5}$$

式中:Z为雷达反射率因子(单位:dBZ);E为冰雹动能通量(单位:J·m^{-2}·s^{-1});权重函数$W(Z)$可以用来定义雨和冰雹反射率之间的过渡区,在本算法中,Z_L=40 dBZ,Z_U=50 dBZ。$W_T(H)$为风暴顶高度的权重函数;H_0为0 ℃层高度(单位:km);H_{m20}为−20 ℃层高度,二者均可由ERA5所提供的资料获取。所使用的雷达数据为拼图数据,因此所采用的方法为分段求和[式(5)],ΔHi为拼图高度。通过将*SHI*转换为*MESH*[式(6)]。Murillo and Homeyer(2019)提出了分位数回归模型,得到了最大预期冰雹尺寸75百分位($MESH_{75}$)和最大预期冰雹尺寸95百分位($MESH_{95}$)改进的估算[式(7)]。

$$MESH = 2.54(SHI)^{0.5} \tag{6}$$

$$\begin{aligned} MESH_{75} &= 16.566(SHI)^{0.181} \\ MESH_{95} &= 17.270(SHI)^{0.272} \end{aligned} \tag{7}$$

*POSH*是使用以下简单的经验关系从*SHI*中得出的;*WT*为警报阈值,如果*WT*<20 J·m^{-1}·s^{-1},则*WT*设置为20 J·m^{-1}·s^{-1}。

$$WT = 57.5H_0 - 121 \tag{8}$$

$$POSH = 29\ln\left(\frac{SHI}{WT}\right) + 50 \tag{9}$$

*POH*算法由 Waldvogel et al.（1979）提出，可以估计任意尺寸（≥5 mm）的*POH*。*POH*是由在冰点以上检测到的大量上升气流的存在推导出来的，观测到45 dBZ反射率的最高高度与冻结高度之间的差Δ*H*（单位：km）被认为与*POH*成正比。Holleman（2001）对*POH*的原始经验关系进行了调整，并以式（10）对*POH*进行了评估。

$$POH\,(\%) = 0.319 + 0.133\Delta H \tag{10}$$

Greene and Clark（1972）提出了一种新的预报因子*VIL*，即：

$$VIL = \int_0^{H_{top}} M \cdot \mathrm{d}h = 3.44 \times 10^{-3} \int_0^{H_{top}} Z^{4/7}\mathrm{d}h \tag{11}$$

式中：H_{top}为回波顶高度；d*h*为每层高度；*VIL*为垂直液态水含量（单位：kg·m^{-2}）。

Amburn and Wolf（1997）提出使用一定反射率阈值的回波顶高度（本研究采用反射率阈值为18 dBZ）对*VIL*值进行“归一化”。这将捕捉到一些高顶雷暴不产生冰雹，而一些低顶雷暴具有低*VIL*值却产生冰雹的结果。*VILD*为垂直液态水含量密度（单位：g·m^{-3}），其经验公式为式（12）。图5显示了在2021

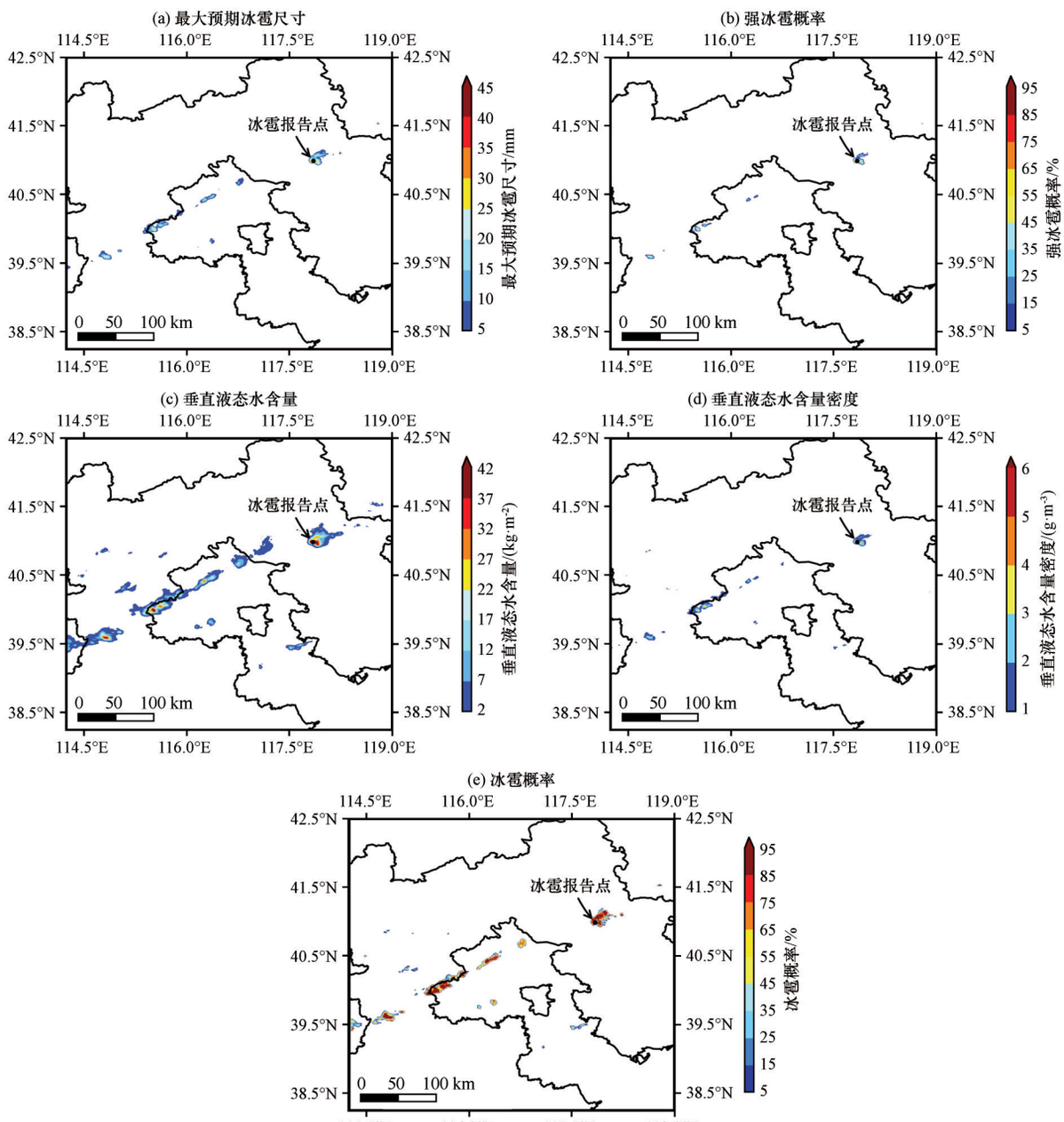


图5　2021年7月1日15:36各冰雹参数的空间变化

Fig. 5　Spatial variations of hail parameters at 15:36 on July 1, 2021

年7月1日15:36冰雹出现时各参数的表现。

$$VILD = \frac{VIL}{H_{\text{top}}} \tag{12}$$

3.2 统计与检验方法

在获取冰雹参数的基础上，为深入分析冰雹参数的分布特性，本研究采用了由Rosenblatt(1956)和Parzen(1962)提出的核密度估计KDE(Kernel Density Estimation)非参数检验方法。该方法的核心思想是利用核函数的线性叠加来平滑样本数据，经归一化处理后得到概率密度函数。

$$\hat{f}_h(x) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} K_h(x - x_i) = \frac{1}{nh}\sum_{i=1}^{n} K\left(\frac{x - x_i}{h}\right) \tag{13}$$

式中：$\hat{f}_h(x)$为概率密度函数；n为样本大小；$K(x)$为核函数；h为带宽。核函数使用广泛的高斯核函数(Gaussian kernel)，是KDE中最常用的核函数之一[式(14)]。

$$K(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) \tag{14}$$

在本研究中，由二分类(是/否)预测的混淆矩阵，从该表的条目中导出质量指标(表1)，检测准确率(Probability Of Detection，*POD*)、虚警率(False-alarm Rate，*FAR*)和临界成功指数(Critical Success Index，*CSI*)。

表1 混淆矩阵

Table 1 Confusion matrix

观测	预测	
	非冰雹	冰雹
非冰雹	正确识别非冰雹(N)	误报(F)
冰雹	漏报(M)	正确识别冰雹(H)

$$POD = \frac{H}{H + M} \tag{15}$$

$$FAR = \frac{F}{F + H} \tag{16}$$

$$CSI = \frac{H}{H + M + F} \tag{17}$$

3.3 样本匹配与筛选

冰雹记录信息由观测员在冰雹降落站点上时进行时间、地点、冰雹直径的记录，本研究选取2019—2023年河北省142个国家站冰雹记录资料，但记录时间可能受其他因素影响而产生偏差。为评估雷达参数在冰雹识别中的潜力，需将雷达观测与地面冰雹报告进行精确匹配。本研究选取与雷达拼图时间相邻的报告时间，采用12 min的时间窗口，以缓解雷达数据时间采样粗糙性及报告时间误差(预计不超过±12 min)。研究中常使用55 dBZ的反射率阈值来区分大雨和冰雹，为进一步对数据进行筛选，对组合反射率低于50 dBZ的冰雹事件进行过滤，据此获得245例冰雹正样本。反之，基于数据较全的2021—2023年，对于国家站出现组合反射率超过50 dBZ但无冰雹记录的时次，则将其归为负样本，共1373例。

4 结果与分析

4.1 区分冰雹参数

通过一维核密度估计(KDE)函数，可以深入分析冰雹事件与非冰雹事件在选定基本参数中的分布。这种可视化方法有助于确定哪些参数有效地将冰雹与非冰雹区别开来。有几项指标能够有效识别冰雹的发生，包括*MESH*[图6(a)]、*POSH*[图6(b)]、*VIL*[图6(c)]、*VILD*[图6(d)]，这些指标在冰雹和无冰雹观测之间显示出较大的差异。

在上述结果中，*MESH*、*POSH*、*VIL*和*VILD*的概率密度估计曲线显示出较高的分离度，通过柯尔莫哥罗夫-斯米尔诺夫检验(Kolmogorov-Smirnov test)可以获取每个参数的p值[图6(a)~(e)]，用于检验冰雹与非冰雹事件来源于同一分布的零假设。所有关键参数(*MESH*，*POSH*，*VIL*，*VILD*，*POH*)的p值均小于0.01的显著性水平，即冰雹事件与非冰雹事件在这些参数的分布上存在显著差异，因此可以作为冰雹预测的关键指标。其中*MESH*与*POSH*的分离度最高，*POH*差距较大。*POH*[图6(e)]的概率分布在冰雹与非冰雹事件之间重叠较多，区分能力较弱。这可能是因为*POH*的经验关系基于荷兰C波段雷达数据建立，虽然样本量有所增加，但仍有限。此外，河北各地区的气候差异显著，这可能使得*POH*算法的关系式在这样的环境和数据条件下存在较大的偏差，因此其在河北的应用效果并不理想。在后续的分析以及最终的多参数组合识别冰雹时将不考虑*POH*。

4.2 冰雹识别

本研究选用了4种冰雹检测方法的评分参数，即与冰雹发生相关的4个主要判别器(*MESH*、*VIL*、*VILD*和*POSH*)的范围，并评估了它们的表现指标[图(7)]，包括*POD*、*FAR*和*CSI*，以确定每个指标的最优 阈值(即相应高*POD*的最大*CSI*)。冰雹预警的阈值是根据不同的冰雹探测方法设定的，尽管每个参数生成了相似的性能曲线，所有冰雹探测方法的评分参数的整体趋势显示出高度一致性。随着预警阈值的提高，*POD*和*FAR*两者均呈下降趋势，而*CSI*在某个阈值时达到最大值，此时，*FAR*减少，这表明检测到的事件的可靠性增加，与理论预

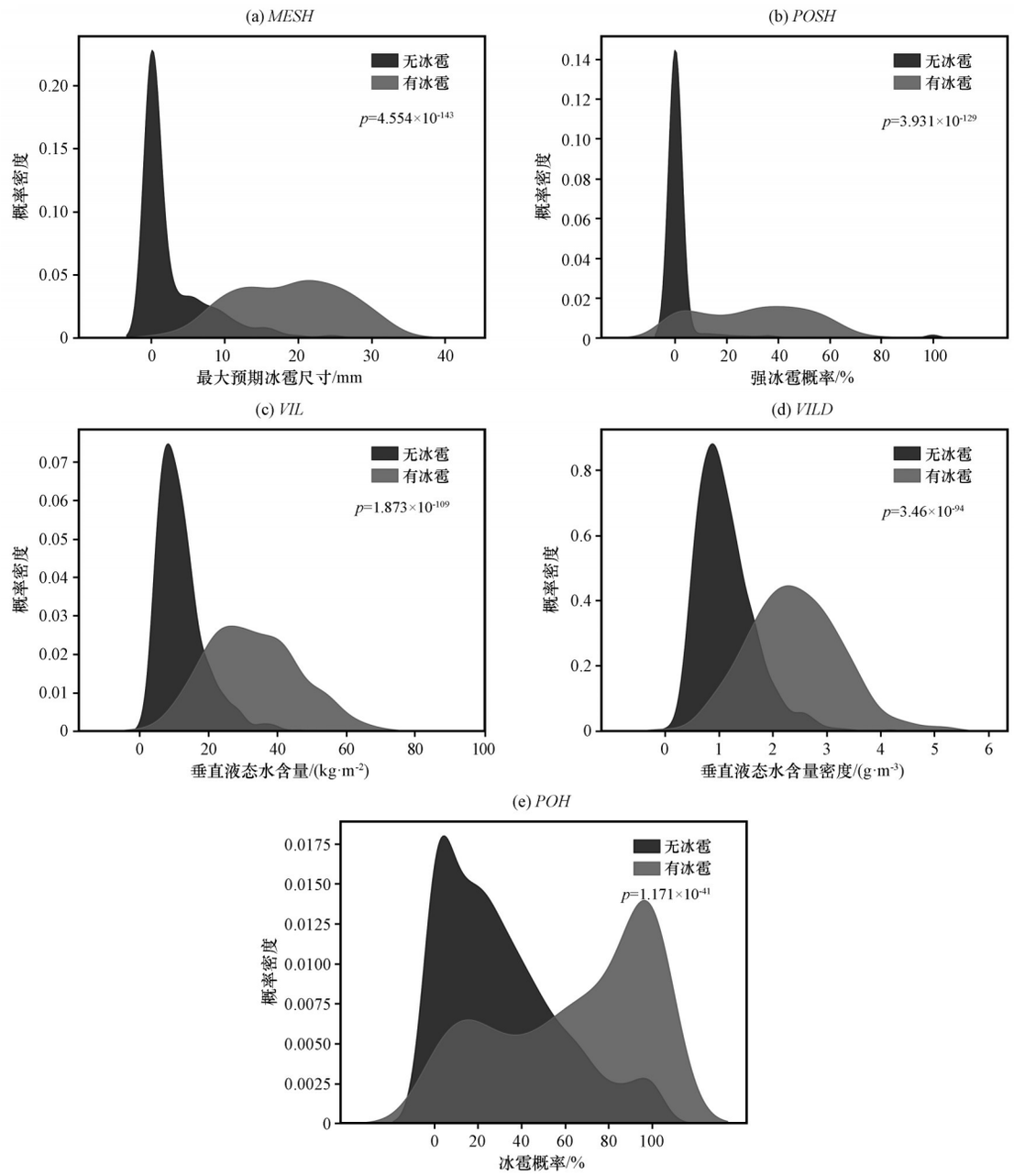


图6　各参数有冰雹和无冰雹事件的概率密度分布

*p*值为柯尔莫哥罗夫–斯米尔诺夫检验值

Fig. 6　Probability density distributions (kernel density estimates) for parameters under hail and no-hail conditions. The associated *p*-values are from the Kolmogorov-Smirnov test

期一致。虽然对于*POSH*的表现这种趋势并不是特别明显，但也保持了类似的变化规律。为评估多参数组合的识别性能，将2个或3个指标进行组合，使得所有参数必须超过其相应的阈值才能指示产生冰雹的风暴(例如，使用5 mm的*MESH*和2 g·m^{-3}的*VILD*)并计算评分指标研究*POD*与*CSI*之间的关系[图(8)]，图8中M代表*MESH*、P代表*POSH*、V代表*VIL*、VD代表*VILD*。例如M−V表示*MESH*与*VIL*的组合，M-VD表示*MESH*与*VILD*的组合。在*CSI*的计算中，采用了±3σ(标准差)的标准来观察每一种组合之间的差异性。当将*CSI*作为*POD*的函数进行比较时，4个参数之间的分离度较高，单一参数的差异表现出显著性[图8(a)]，*POSH*的表现优于其他方法，其原因是*POSH*引入了0 ℃层高度与−20 ℃层高度同时滤掉低反射率因子，能有效降低误报率，从而提高分数。然而，在结合多个参数进行识别时，曲线的分离度相较于单一参数降低[图8(b)~(c)]。考虑到±3σ的不确定性重叠，多个

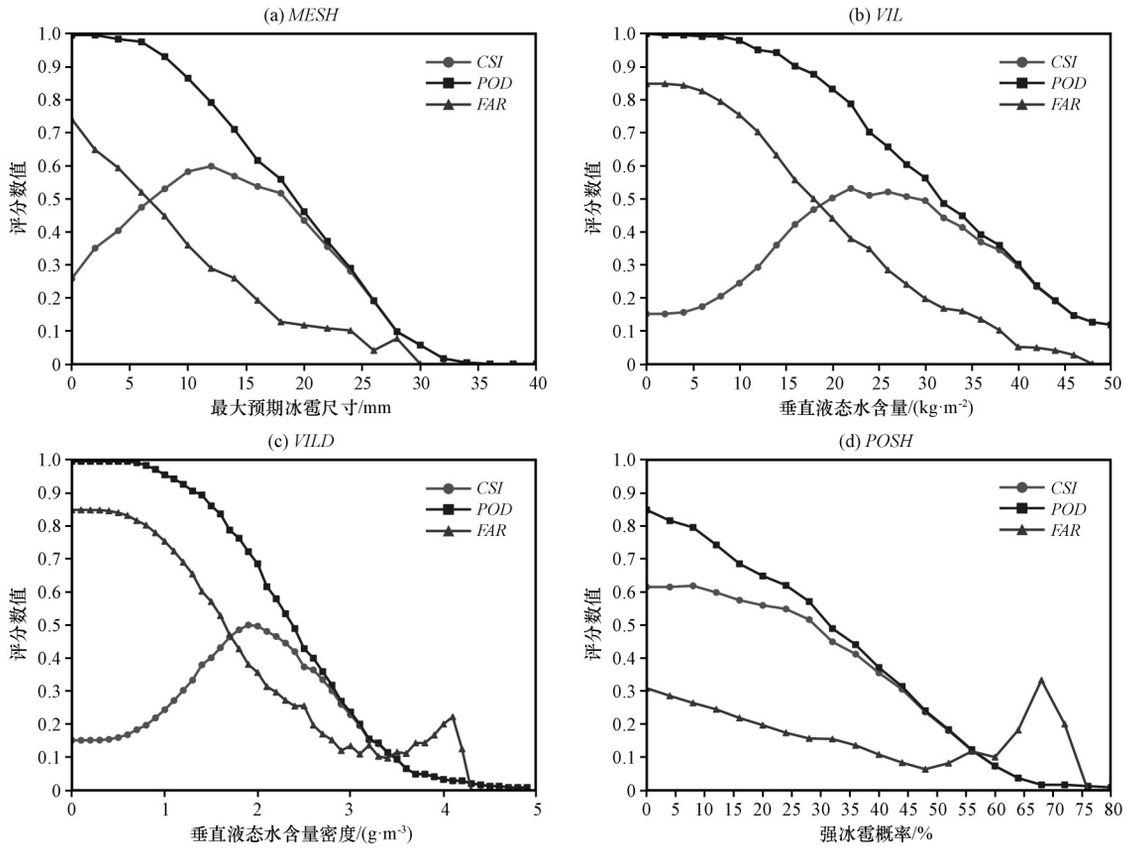


图7 使用*MESH*(a)、*VIL*(b)、*VILD*(c)和*POSH*(d)进行基于阈值的冰雹风暴识别的*POD*、*FAR*和*CSI*数值变化

Fig. 7 Threshold-based hail storm identification using *MESH* (a), *VIL* (b), *VILD* (c), and *POSH* (d): variations in *POD*, *FAR*, and *CSI* values

参数的差异并不显著，但仍然能实现更大的技能提升。当多个参数同时使用时，任何一个所选参数与*POSH*组合都可以相对于单独使用*POSH*提升性能约3个百分点，由*POSH*>10%，*VIL*>14 kg·m^{-2}，*VILD*>1.2 g·m^{-3}构成的3参数组合的效果最好[图8(c)]。尽管±3σ的不确定性依然重叠，但多参数和单参数在平均性能上仍有一定差异。这表明，同时结合多个指标可以实质性地提升预测技能。

值得注意的是，在多参数方法中，*CSI*峰值对应更高的*POD*。这种性能评估对样本大小十分敏感。考虑到数据是依据国家气象站进行筛选的，冰雹与非冰雹的分布相对稀少，实际的预测技能可能略低于本研究描述的结果。尽管如此，单参数和多参数方法之间的相对表现预期与样本量的限制无关。在实验中，为了评估雷达跟踪风暴时冰雹指标的表现，选择了使用与冰雹报告相邻的数据，是为了克服冰雹报告和观测过程中存在的时空限制，这是实验中常用的方法。更复杂的技术(如线性判别分析)能提升识别能力，但在处理大数据集时，单一和多个参数的阈值判断等简化方法可能会产生与复杂技术相近的效果。*MESH*、*VIL*及*VILD*值对冰雹发生事件的区分能力，其依赖性主要体现在两方面。首先，雷达反射率(*ZH*)垂直积分计算过程为这些参数提供了基础数据。数值越大，表明风暴深度的增加，同时伴随的对流强度提升更有利于冰雹的形成。其次，*ZH*对颗粒尺寸的特性敏感，意味着水凝物的存在会显著提高反射率，这与缺乏大颗粒的同类深度风暴相比更为明显。因此，较高的*MESH*、*VIL*和*VILD*值通常与更强的对流活动和大颗粒的形成可能性相关。而那些区分效果较差的参数组合，要么未能有效刻画风暴的动力特征，要么在识别水凝物物理特性方面具有明显的局限性。

4.3 冰雹尺寸预估

除了冰雹事件的识别能力，冰雹尺寸的准确预估同样对灾害评估具有重要意义。传统上，将雷达观测与冰雹报告进行搭配，以建立最佳的冰雹尺寸关系，这也是本研究的主要目标。根据雷达观测数据计算所得到的值，可以评估观测到的冰雹分布的特征，作为冰雹尺寸判别和最大冰雹尺寸潜力指标的函数。根据前面的分析，评估了*MESH*、*VIL*、*VILD*和*POSH*在冰雹识别中的作用，且参数中包含冰雹尺寸的信息。而*POSH*表示为冰雹概率，研究

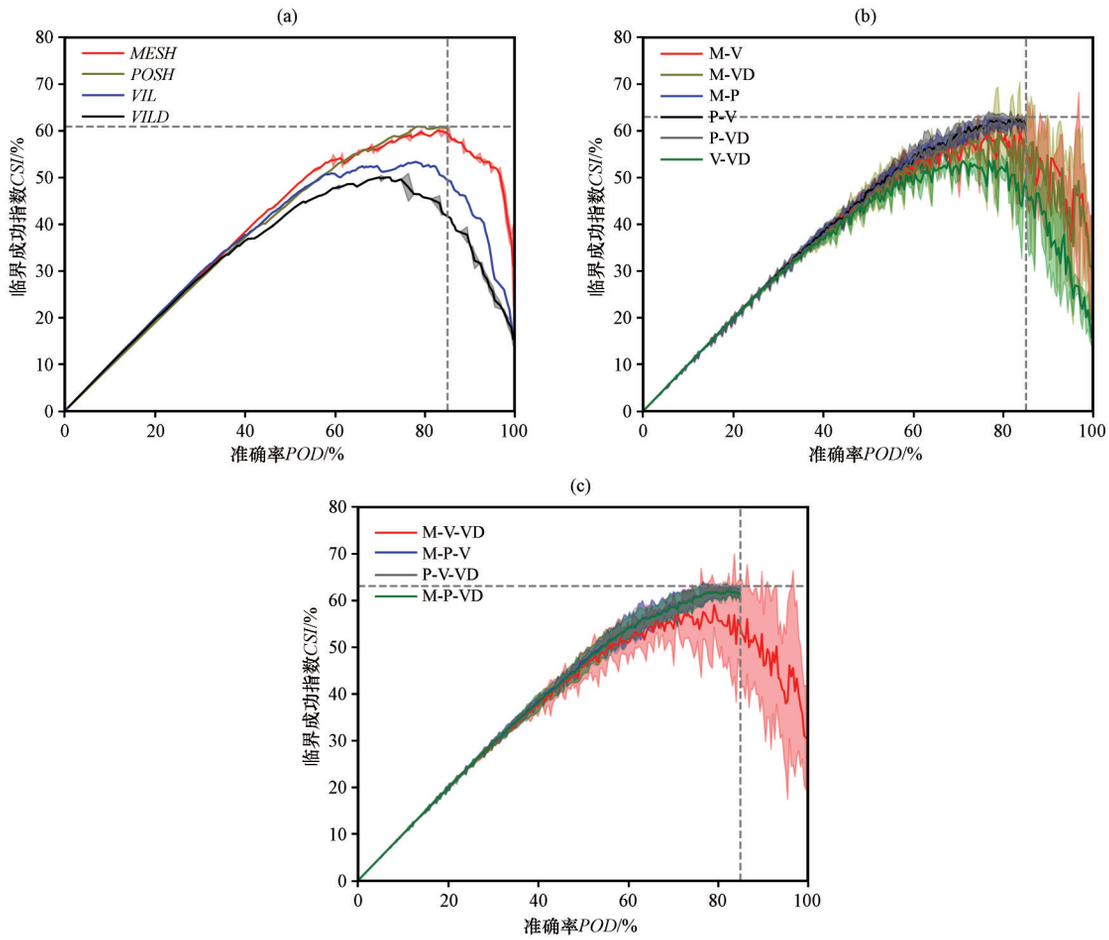


图 8　不同识别方法下临界成功指数 *CSI* 随准确率 *POD* 的变化

(a)单参数识别方法;(b)双参数冰雹识别方法;(c)三参数冰雹识别方法。颜色填充区域表示每个参数平均技能的±3σ不确定性(α=0. 01)。纵虚线表示 *POD* 为 85%,横虚线表示相应的最高 *CSI*

Fig. 8　Changes in the critical success index (*CSI*) with probability of detection (*POD*) under different identification methods. (a) single-parameter hail identification method; (b) two-parameter hail identification method; (c) three-parameter hail identification method. The shaded areas represent the ±3σ uncertainty (α=0. 01) of the mean skill for each parameter. The vertical dashed line indicates a *POD* of 85%, and the horizontal dashed line indicates the corresponding maximum *CSI*

冰雹尺寸时不将其考虑在内,其他 3 个参数均是根据雷达在垂直方向上的积分,这 3 个参数提供的尺寸区分性能是相似的。因此,为了简洁性,且 *MESH* 指标可以很容易地应用于河北省现有的长期数据集,将目标集中在 *MESH* 上进行冰雹尺寸分布的分析。为评估 *MESH* 算法在本研究区域的适用性,并选择合适的基准进行对比,评估 $MESH_{75}$、$MESH_{95}$ 与冰雹尺寸之间的关系,发现 $MESH_{75}$、$MESH_{95}$、*MESH* 与实际冰雹尺寸之间存在显著的近似线性关系[图 9(a)~(c)]。根据对原始冰雹尺寸和不同预估参数的比较,结果显示计算得出的冰雹尺寸普遍偏大,并没有显著差异。这一结果在预期之内,因为 *MESH*、$MESH_{75}$ 和 $MESH_{95}$ 之间唯一的差别在于幂律拟合的系数。由于对流上升气流的空间尺度较小,冰雹落区范围有限,而地面气象站分布稀疏,难以全面记录冰雹事件。加上冰雹尺寸分布的变异性,以及复杂的散射和衰减现象,组合参数导出的冰雹尺寸估计精度较低。在冰雹尺寸的预估过程中,*MESH* 算法依赖于点对点的对应关系。然而,冰雹的落区并不总与雷达回波严格匹配,这造成了 *MESH* 在冰雹尺寸预估方面的偏差。具体来说,*MESH* 的计算仅考虑了格点的回波分布,忽略了回波面的整体分布。

为克服点对点匹配的偏差,本研究尝试从空间平均的角度,通过考虑冰雹落区的整体回波结构来平滑单点极端值的影响,提出了一种距离平均计算冰雹尺寸的方法,考虑了冰雹落区的空间分布而非单点回波,平滑了因冰雹空间分布不均带来的影响,从而更合理地代表了产生该地降雹的风暴的整体强度。该方法通过对报告点周围 1~10 km 不同距

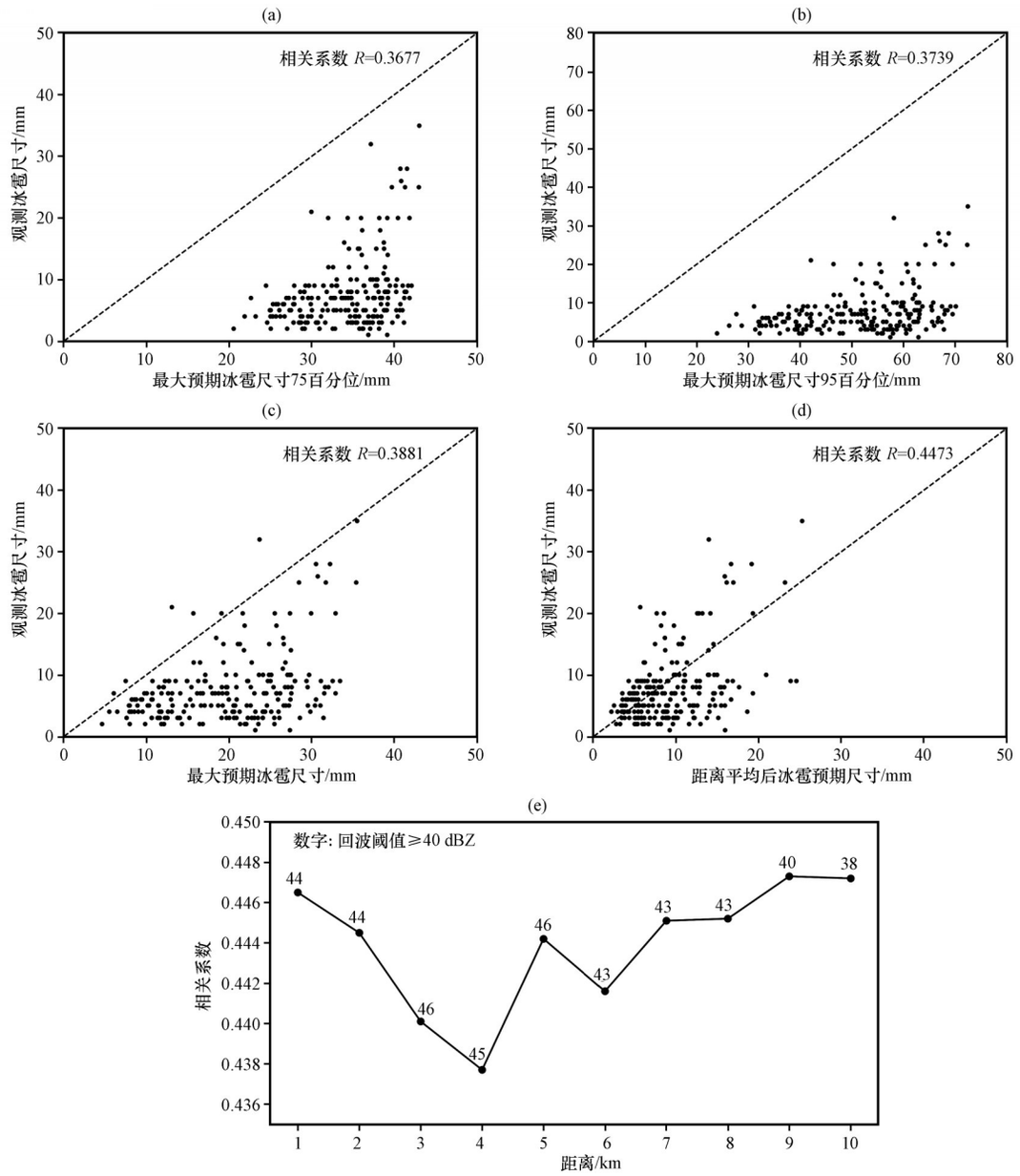


图9 不同尺寸估计方法与冰雹报告尺寸之间的关系

(a)$MESH_{75}$、(b)$MESH_{95}$、(c)*MESH*、(d)距离平均后冰雹预期尺寸(*MESH*ra),(e)不同距离(1~10 km)和回波阈值40 dBZ以上雷达回波平均后计算的*MESH*ra与实测冰雹尺寸相关系数*R*的最大值

Fig. 9 Relationship between different size estimation methods and reported hail sizes: (a) $MESH_{75}$, (b) $MESH_{95}$, (c) *MESH*, (d) range-averaged maximum expected size of Hail (*MESH*ra). Panel (e) shows the maximum correlation coefficient *R* between *MESH*ra calculated by averaging radar echoes at different distances (1~10 km) and above a reflectivity threshold of 40 dBZ and observed hail sizes

离内的各高度层的回波值进行平均,如计算1 km距离内大于40 dBZ的回波值的均值。随后,将计算得出的回波均值作为新的输入数据代入*MESH*算法中以达到减弱计算结果。最终,通过更新回波值,重新计算*MESH*与冰雹报告尺寸之间的关系。通过计算,*MESH*ra更接近实际冰雹落区内的冰雹尺寸,从而提高冰雹尺寸预估的准确性。图9(e)展示了在不同空间距离(1~10 km)和回波值40 dBZ以上雷达回波平均后,计算的*MESH*ra与实测冰雹尺寸相关系数的最大值,最终结果为9 km距离平均的*MESH*ra与冰雹的尺寸相关性最高,*MESH*ra更接近冰雹尺寸实际观测值[图9(d)],能够有效解决*MESH*预估的冰雹尺寸偏大的问题。

5 典型个例应用与检验

将多参数识别法应用于河北2025年两次冰雹

过程。结果表明，该方法成功识别出这两次冰雹过程，效果良好，并且具备一定的提前预警能力。其中，2025 年 6 月 9 日的过程包含 6 个识别个例(分别位于迁安、卢龙、滦州、昌黎、秦皇岛海港区、邢台信都区)，2025 年 6 月 18 日的过程包含 2 个识别个例(位于怀安、定州)。

5.1　2025 年 6 月 9 日河北东北部和南部冰雹

2025 年 6 月 9 日，河北省东北部和南部地区出现了大范围冰雹天气，直径 6~30 mm，其中秦皇岛海港区和邢台信都区冰雹直径最大，最大直径达 30 mm，同时伴有强雷电、短时大风和短时强降水。此次冰雹过程是由多个超级单体造成的，河北省东北部出现东北-西南向带状强回波，并镶嵌反射率因子超过 60 dBZ 的多个超级单体[图 10(a)~(f)]，带状强回波向东南方向移动，所经之处造成唐山、秦皇岛多个县区出现冰雹(表 2)，最大反射率因子

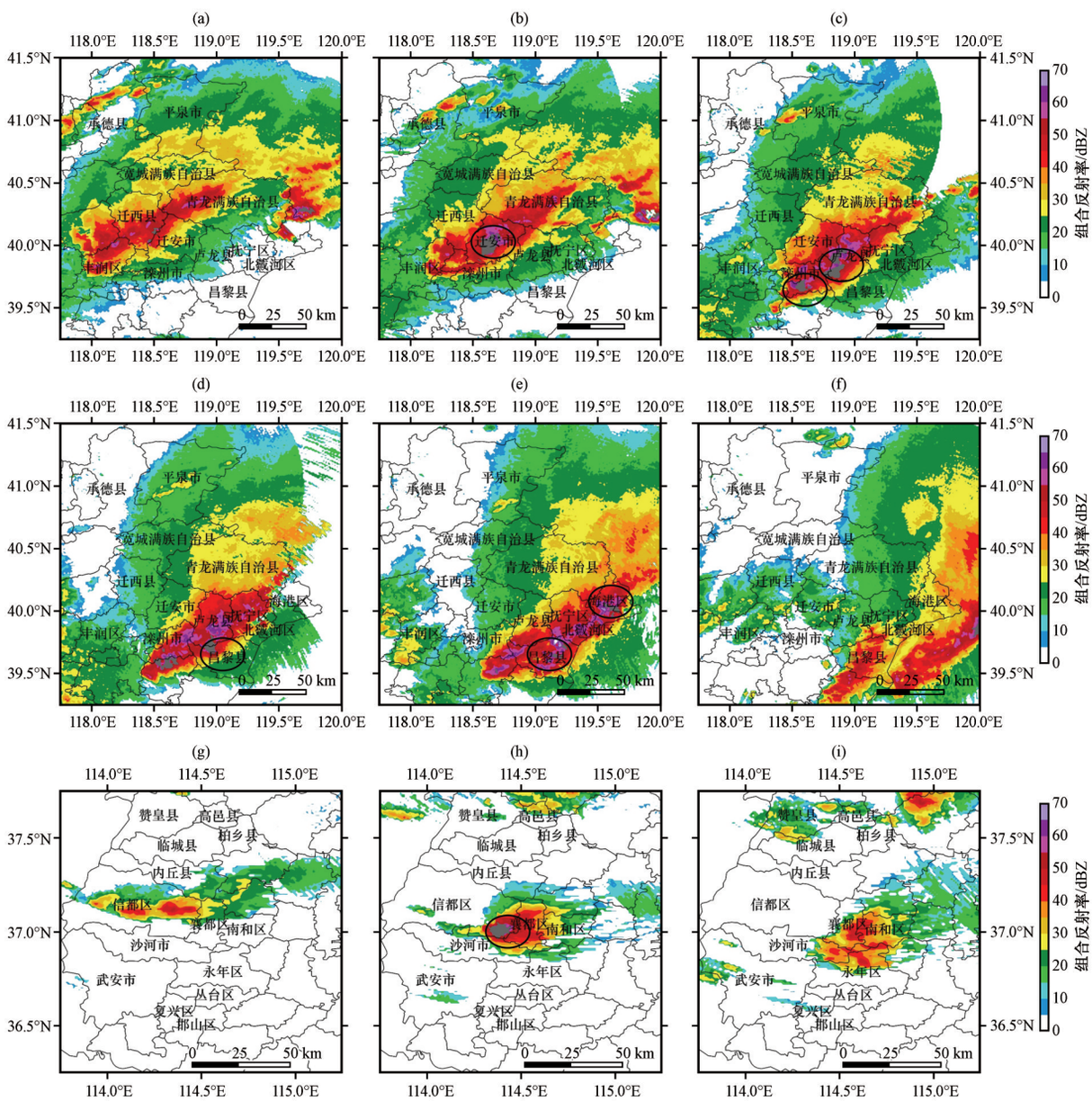


图 10　2025 年 6 月 9 日河北东北部冰雹回波图(填色，单位：dBZ)

黑色椭圆为冰雹强回波和冰雹落点，(a)15:42 雷达回波图，(b)16:00 迁安冰雹，(c)16:18 卢龙与滦州冰雹，(d) 16:30 昌黎冰雹，(e)16:48 昌黎与海港冰雹，(f)17:18 雷达回波图，(g)13:36 信都区回波图，(h)14:18 信都区冰雹，(i)14:42 雷达回波图

Fig. 10　Echo maps of five hails in northeast Hebei on 9 June, 2025 (shading, unit: dBZ). Black ellipse is hail strong echo and hail falling point) (a) radar echo map at 15:42, (b) hail in Qian 'an at 16:00, (c) hail in Lulong and Luanzhou at 16:18, (d) hail in Changli at 16:30, (e) hail in Changli and Haigang at 16:48, (f) radar echo map at 17:18, (g) Xindu echo map at 13:36, (h) hail in Xindu District at 14:18, (i) radar echo map at 14:42

强度为67.5 dBZ。6月9日13:36—14:18，河北省南部邢台信都区有孤立的经典超级单体发展[图10(g)~(i)]。13:36[图10(g)]信都区西南部识别出冰雹，回波强度为55 dBZ。单体向东移动发展，14:18出现大范围超过60 dBZ的强回波区[图10(h)]，冰雹降落，信都区南石门镇、羊范镇、李村镇均出现冰雹。14:42回波逐渐消散，冰雹结束[图10(i)]。

计算了此次过程的冰雹识别(*POSH*、*VIL*和*VILD*)和冰雹尺寸预估(*MESH*、*MESH*ra)参数(表2)。由于此次过程冰雹观测除1站直径为6 mm，其他5站为18~30 mm，基本属于大冰雹(直径20 mm以上)过程，计算的冰雹识别参数远远超过河北省冰雹识别参数阈值(*POSH*>10%，*VIL*>14 kg·m^{-2}，*VILD*>1.2 g·m^{-3})，冰雹识别时间比观测时间提前6~60 min，但对于发展较快、移动迅速的冰雹提前量时间较少，这也与雷达扫描时间相关。在冰雹尺寸预估方面，本次过程直径18 mm以上较大冰雹*MESH*冰雹尺寸预估偏大，但误差较小，改进的*MESH*ra预估冰雹直径偏小，但误差较大，因冰雹局地性非常强，国家站由于站点稀少，往往观测不到冰雹过程中最大直径的冰雹，因此对于强冰雹过程，*MESH*预估效果比较好。针对直径为6 mm的小冰雹，*MESH*ra预估直径为11.56 mm，误差较小，*MESH*预估值22.07 mm，误差较大。统计显示河北省冰雹直径10 mm以下占85%，因此改进的*MESH*ra适合河北省一般情况下的冰雹直径预估。

表2 2025年6月9日河北冰雹的识别信息汇总表

Table 2 Summary of hail identification information in Hebei on 9 June, 2025

时刻	*MESH* /mm	*POSH* /%	*VIL* /(kg·m^{-2})	*VILD* /(g·m^{-3})	最大回波强度/dBZ	冰雹落区	记录尺寸 /mm	*MESH*ra /mm	记录时间
16:00	26.52	53.91	48.57	2.62	60.5	迁安	26	16.65	16:03
16:18	21.46	41.50	32.153	1.74	63	卢龙	18	13.25	16:13
16:18	22.07	43.18	31.59	2.75	58.5	滦州	6	11.56	16:23
16:30	29.61	59.92	40.82	3.024	56	昌黎	/	/	16:44
16:42	24.89	50.21	32.36	3.40	69.5	昌黎	18	10.96	
16:48	16.28	26.17	28.61	2.48	62	秦皇岛海港区	30	17.57	16:43
13:18	27.94	48.58	44.23	3.27	60	邢台信都区南石门镇	最大30	16.53	未记录
13:18	25.16	42.44	42.63	3.15	59	邢台信都区羊范镇	最大30	16.00	未记录
13:18	18.04	24.34	32.43	2.40	54	邢台信都区李村镇	最大30	14.38	未记录

/表示无数据(/ notes no data)

5.2 2025年6月18日怀安、定州冰雹

2025年6月18日，河北北部怀安[图11(a)~(d)]和中部定州[图11(e)~(h)]各发生了一次超级单体冰雹事件。14:36尚义西南部出现对流，雷达回波强度约为45 dBZ[图11(a)]。该单体从西北向东南方向移动，15:06回波强度发展为53 dBZ[图11(b)]，出现超级单体，并识别出冰雹，而观测站冰雹记录时间(15:33)。到15:30，对流发展最强，回波强度达到60 dBZ，15:48回波结束。定州在识别出冰雹前，安国已识别出冰雹[图11(e)]，但观测站未记录冰雹。该单体向西北方向移动，16:30进入定州区域[图11(f)]，中心回波达到59.5 dBZ。17:06回波明显增强，观测站监测到冰雹，冰雹记录时间为17:10，识别时间与记录时间接近。计算此次过程的冰雹识别(*POSH*、*VIL*和*VILD*)和冰雹尺寸预估(*MESH*、*MESH*ra)参数(表3)显示，此次过程冰雹直径为5~8 mm，为小冰雹，均满足冰雹识别参数阈值。冰雹尺寸预估*MESH*为18~21 mm，明显偏大，而改进的*MESH*ra为10~13 mm，预估偏差较小。

从以上两个冰雹过程、8个冰雹个例检验来看，研究得出的冰雹识别参数阈值全部识别出8个冰雹个例，能够提前6~60 min识别出冰雹。

在冰雹尺寸预估方面，*MESH*预估两个冰雹过程的5例大冰雹个例，误差较小。改进的*MESH*ra预估直径10 mm以下的3例小冰雹个例，误差较小。河北省85%为直径10 mm以下的小冰雹，因此改进的*MESH*ra比较适合河北省冰雹直径预估业务。后期结合产生冰雹的天气背景、环境条件、对流参数，利用传统的*MESH*进行大冰雹尺寸预估。

6 结论

本研究基于2019—2023年河北省雷达组网数据、地面降雹记录和ERA5再分析资料，通过计算

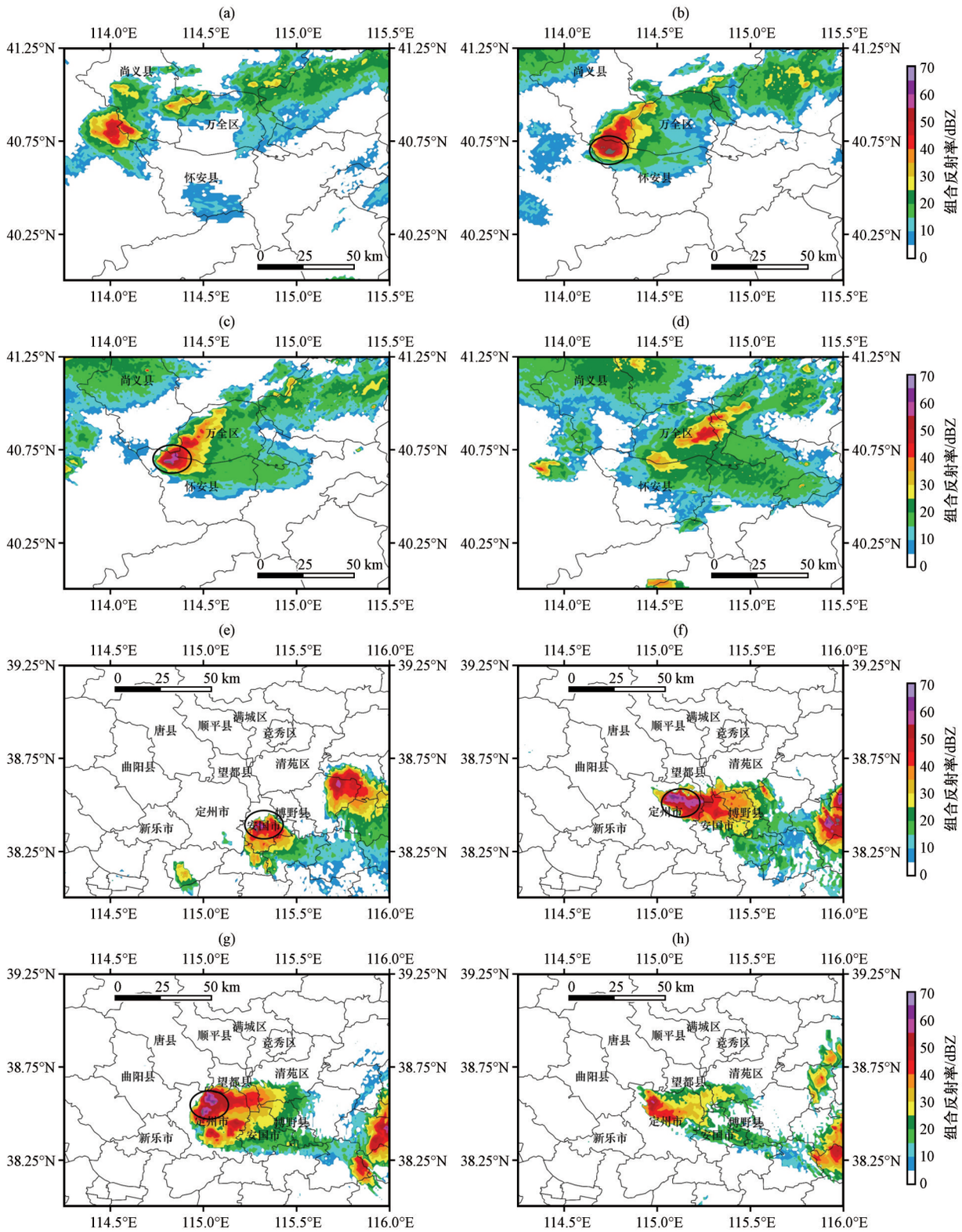


图 11　2025 年 6 月 18 日河北北部与中部冰雹回波图(填色，单位：dBZ)

黑色椭圆为冰雹强回波和冰雹落点，(a)14:36 雷达回波图，(b)15:06 怀安冰雹，(c)15:30 雷达回波图，(d)15:48 雷达回波图，(e)15:00 安国雷达回波图，(f)16:30 定州冰雹，(g)17:06 定州冰雹，(h)17:36 雷达回波图

Fig. 11　Echoes maps of two hailstorms in northern and central Hebei 18 on June, 2025 (shading, unit: dBZ). Black ellipse is hail strong echo and hail falling point. (a) radar echo map at 14:36, (b) hail in Huai 'an at 15:06, (c) radar echo map at 15:30, (d) radar echo map at 15:48, (e) radar echo map in Anguo at 15:00, (f) hail in Dingzhou at 16:30, (g) hail in Dingzhou at 17:06, (h) radar echo map at 17:36

表3 2025年6月18日怀安、定州冰雹的识别信息汇总表

Table 3 Summary of hail identification information in Huai 'an and Dingzhou on June 18, 2025

时刻	*MESH* /mm	*POSH* /%	*VIL* /(kg·m^{-2})	*VILD* /(g·m^{-3})	最大回波强度/dBZ	冰雹落区	记录尺寸 /mm	*MESH*ra /mm	冰雹记录时间
15:06	18. 77	24. 52	19. 76	1. 718	53. 0	怀安	/	/	15:33
15:30	19. 41	26. 40	24. 69	2. 14	60. 0	怀安	8	12. 13	15:33
16:30	20. 12	26. 04	21. 57	2. 27	59. 5	定州	/	/	17:10
17:06	19. 11	22. 89	41. 48	2. 76	60. 5	定州	5	10. 51	17:10

/表示无数据(/ notes no data)

MESH、*VIL*、*VILD*和*POSH*，以及改进的*MESH*ra参数，评估冰雹识别和冰雹尺寸预估效果，得出以下主要结论：

（1）*MESH*、*VIL*、*VILD*和*POSH*的概率密度估计曲线能够将冰雹和非冰雹显著分开，是识别河北省冰雹的优秀参数，其中，*MESH*与*POSH*的分离度最高。

（2）基于最优阈值（即相应高*POD*的最大*CSI*），评估*MESH*、*VIL*、*VILD*和*POSH*的冰雹识别能力，其中*POSH*的表现最好，是因为*POSH*引入了0 ℃高度与−20 ℃层高度同时滤掉低反射率因子，能有效降低误报率，从而提高分数。综合多个参数的组合（*POSH*、*VIL*和*VILD*）能够将临界成功指数提高约3%，其中由*POSH*>10%，*VIL*>14 kg·m^{-2}，*VILD*>1. 2 g·m^{-3}构成的三参数组合的效果最好，多参数组合更好地反映了复杂的气象条件和冰雹生成的多样性，能够有效降低误报。

（3）研究提出了一种通过距离平均的冰雹尺寸估计改进方法*MESH*ra，即对冰雹报告点周围9 km距离内各高度层大于40 dBZ的回波值进行平均，之后重新计算*MESH*。通过对河北省两个冰雹过程8个冰雹个例检验，改进的冰雹尺寸预估*MESH*ra预估的10 mm以下的小冰雹误差小，而传统的冰雹尺寸预估*MESH*预估的直径在18 mm以上的大冰雹误差小。2019—2023年河北省冰雹统计显示85%冰雹直径在10 mm以下，因此*MESH*ra冰雹预估比较适合河北省业务冰雹预估，但18 mm以上大冰雹往往造成严重灾害，更需要准确预估，并且河北省冰雹统计资料来源于国家站观测，国家气象站因站点稀疏，冰雹局地性强，站点冰雹观测往往不是过程的最大冰雹，因此根据天气背景、环境对流参数，在大冰雹的环境条件下，用传统的*MESH*预估冰雹尺寸效果更好。

本研究采用的是多雷达组网数据，组网是通过多部雷达的观测进行时间和距离的平均。然而，这种组网方式可能导致雷达参数的测量值低于单部雷达的独立观测结果，因此单雷达条件下的指标性能评估可能会有所差异。此外，原始数据时空分辨率有限，不同研究中用到的数据处理存在不确定性，难以准确捕捉局地性强、突发性高、尺度较小的冰雹过程及其气象条件，增加了分析的不确定性，影响部分判别指标的稳定性。由于雷达数据均受到平均化效应的影响，单雷达分析中各项指标的相对表现预计仍会保持一致，但关键阈值的判定标准可能会有所提高。后续研究应当聚焦于单雷达观测模式，采用规模相当的实验数据，对现有研究中表现优异的判别指标进行重新验证，从而更全面地评估其实际应用价值。

研究成果为雷达冰雹监测技术的优化发展提供了重要参考。这些发现既可用于数值预报模式的检验，也能服务于区域冰雹气候特征研究。后续研究重点关注雷达观测数据与其他遥感手段的协同应用，特别是要结合更高精度的冰雹观测资料，以突破传统冰雹报告的质量限制，建立更加可靠的冰雹判别方法体系，而不仅仅依赖于不完整的冰雹报告。

参考文献(References)：

Ackermann L, Soderholm J, Protat A, et al., 2024. Radar and environment-based hail damage estimates using machine learning[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 17(2): 407−422. DOI: 10. 5194/amt−17−407−2024.

Allen J T, Karoly D J, 2014. A climatology of Australian severe thunderstorm environments 1979−2011: inter-annual variability and enso influence: climatology of Australian severe thunderstorm environments 1979−2011[J]. International Journal of Climatology, 34(1): 81−97. DOI: 10. 1002/joc. 3667.

Amburn S A, Wolf P L, 1997. VIL density as a hail indicator[J]. Weather and Forecasting, 12(3): 473−478. DOI: 10. 1175/1520−0434(1997)012<0473: vdaahi>2. 0. co;2.

Auer A H, 1994. Hail recognition through the combined use of radar reflectivity and cloud-top temperatures[J]. Monthly Weather Review, 122(9): 2218−2221. DOI: 10. 1175/1520−0493(1994)122<2218: hrttcu>2. 0. co;2.

Brimelow J C, Burrows W R, Hanesiak J M, 2017. The changing hail threat over North America in response to anthropogenic climate change[J]. Nature Climate Change, 7(7): 516-522. DOI: 10.1038/nclimate3321.

Brook J P, Protat A, Potvin C K, et al., 2023. The effects of spatial interpolation on a novel, dual-Doppler 3D wind retrieval technique[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 40(10): 1325-1347. DOI: 10.1175/jtech-d-23-0004.1.

Dee D P, Uppala S M, Simmons A J, et al., 2011. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 137(656): 553-597. DOI: 10.1002/qj.828.

Farnell C, Batalla E, Rigo T, et al., 2023. Reanalysis of giant hail event in Catalonia (NE of the Iberian Peninsula)[J]. Atmospheric Research, 296: 107051. DOI: 10.1016/j.atmosres.2023.107051.

Greene D R, Clark R A, 1972. Vertically integrated liquid water—a new analysis tool[J]. Monthly Weather Review, 100(7): 548-552. DOI: 10.1175/1520-0493(1972)100<0548:vilwna>2.3.co;2.

Guan Yinghui, Zheng Fenli, Zhang Peng, et al., 2015. Spatial and temporal changes of meteorological disasters in China during 1950–2013[J]. Natural Hazards, 75(3): 2607-2623. DOI: 10.1007/s11069-014-1446-3.

Gutierrez R E, Kumjian M R, 2021. Environmental and radar characteristics of gargantuan hail-producing storms[J]. Monthly Weather Review, : 2523-2538. DOI: 10.1175/mwr-d-20-0298.1.

Hand W H, Cappelluti G, 2011. A global hail climatology using the UK Met Office convection diagnosis procedure (CDP) and model analyses[J]. Meteorological Applications, 18(4): 446-458. DOI: 10.1002/met.236.

Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al., 2020. The ERA5 global reanalysis[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 146(730): 1999-2049. DOI: 10.1002/qj.3803.

Hitschfeld W, Bordan J, 1954. Errors inherent in the radar measurement of rainfall at attenuating wavelengths[J]. Journal of Meteorology, 11(1): 58-67. DOI: 10.1175/1520-0469(1954)011<0058:eiitrm>2.0.co;2.

Holleman I, 2001. Hail detection using single-polarization radar[J]. Scientific Report WR-2001-01.

Kumjian M R, Lombardo K, Loeffler S, 2021. The evolution of hail production in simulated supercell storms[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 3417-3440. DOI: 10.1175/jas-d-21-0034.1.

Murillo E M, Homeyer C R, 2019. Severe hail fall and hailstorm detection using remote sensing observations[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 58(5): 947-970. DOI: 10.1175/jamc-d-18-0247.1.

Parzen E, 1962. On estimation of a probability density function and mode[J]. The Annals of Mathematical Statistics, 33(3): 1065-1076. DOI: 10.1214/aoms/1177704472.

Picca J, Ryzhkov A, 2012. A dual-wavelength polarimetric analysis of the 16 may 2010 Oklahoma City extreme hailstorm[J]. Monthly Weather Review, 140(4): 1385-1403. DOI: 10.1175/mwr-d-11-00112.1.

Rosenblatt M, 1956. Remarks on some nonparametric estimates of a density function[J]. The Annals of Mathematical Statistics, 27(3): 832-837. DOI: 10.1214/aoms/1177728190.

Shi Junzhi, Wang Ping, Wang Di, et al., 2019. Radar-based automatic identification and quantification of weak echo regions for hail nowcasting[J]. Atmosphere, 10(6): 325. DOI: 10.3390/atmos10060325.

Skripniková K, Řezáčová D, 2014. Radar-based hail detection[J]. Atmospheric Research, 144: 175-185. DOI: 10.1016/j.atmosres.2013.06.002.

Taszarek M, Allen J, Púčik T, et al., 2019. A climatology of thunderstorms across Europe from a synthesis of multiple data sources[J]. Journal of Climate, 32(6): 1813-1837. DOI: 10.1175/jcli-d-18-0372.1.

Taszarek M, Brooks H E, Czernecki B, et al., 2018. Climatological aspects of convective parameters over Europe: a comparison of ERA-interim and sounding data[J]. Journal of Climate, 31(11): 4281-4308. DOI: 10.1175/jcli-d-17-0596.1.

Thompson R L, Edwards R, Hart J A, et al., 2003. Close proximity soundings within supercell environments obtained from the rapid update cycle[J]. Weather and Forecasting, 18(6): 1243-1261. DOI: 10.1175/1520-0434(2003)018<1243:cpswse>2.0.co;2.

Waldvogel A, Federer B, Grimm P, 1979. Criteria for the detection of hail cells[J]. Journal of Applied Meteorology, 18(12): 1521-1525. DOI: 10.1175/1520-0450(1979)018<1521:cftdoh>2.0.co;2.

Witt A, Eilts M D, Stumpf G J, et al., 1998. An enhanced hail detection algorithm for the WSR-88D[J]. Weather and Forecasting, 13(2): 286-303. DOI: 10.1175/1520-0434(1998)013<0286:aehdaf>2.0.co;2.

刁秀广, 朱君鉴, 黄秀韶, 等, 2008. VIL和VIL密度在冰雹云判据中的应用[J]. 高原气象, 27(5): 1131-1139. Diao Xiuguang, Zhu Junjian, Huang Xiushao, et al., 2008. Application of VIL and VIL density in warning criteria for hailstorm[J]. Plateau Meteorology, 27(5): 1131-1139.

龚乃虎, 蔡启铭, 1982. 雹云的特征及其雷达识别[J]. 高原气象, 1(2): 43-52. Gong Naihu, Cai Qiming, 1982. The characteristics of hailstorms and their identification with radar[J]. Plateau Meteorology, 1(2): 43-52.

顾光芹, 史印山, 池俊成, 等, 2011. 河北省冰雹气候特征及其与环流异常的关系[J]. 高原气象, 30(4): 1132-1138. Gu Guangqin, Shi Yinshan, Chi Juncheng, et al., 2011. Climatic characteristic of hail in Hebei and its relation to circulation anomaly[J]. Plateau Meteorology, 30(4): 1132-1138.

黄兴友, 马玉蓉, 胡苏蔓, 2021. 基于深度学习的天气雷达回波序列外推及效果分析[J]. 气象学报, 79(5): 817-827. Huang Xingyou, Ma Yurong, Hu Suman, 2021. Extrapolation and effect analysis of weather radar echo sequence based on deep learning[J]. Acta Meteorologica Sinica, 79(5): 817-827. DOI: 10.11676/qxxb2021.041.

计燕霞, 孙鑫, 赵斐, 等, 2025. 一种基于雷达观测的冰雹客观识别

方法[J]. 内蒙古气象(1)：3−10. Ji Yanxia，Sun Xin，Zhao Fei，et al.，2025. An objective identification method for hail based on radar observation[J]. Meteorology Journal of Inner Mongolia(1)：3−10. DOI：10. 14174/j. cnki. nmqx. 2025. 01. 001.

李腊平，杨淑华，刘洁莉，等，2024. 多普勒雷达V型缺口特征在冰雹预报预警中的应用分析[J]. 高原气象，43(3)：749−761. Li Laping，Yang Shuhua，Liu Jieli，et al.，2024. Application analysis on the characteristics of Doppler radar V-shaped gap in hail forecasting and warning[J]. Plateau Meteorology，43(3)：749−761. DOI：10. 7522/j. issn. 1000−0534. 2024. 00008.

李子华，宫福久，徐书田，等，1979. 雷达识别冰雹云的综合指标方法[J]. 大气科学，3(4)：385−387. Li Zihua，Gong Fujiu，Xu Shutian，et al.，1979. Comprehensive index method for radar identification of hail clouds[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences，3(4)：385−387.

刘治国，田守利，邵亮，等，2008. 冰雹云垂直累积含水量密度与降雹大小的关系研究[J]. 干旱气象，26(3)：22−28. Liu Zhiguo，Tian Shouli，Shao Liang，et al.，2008. Correlation between the vertically integrated water content density of hail cloud and the hail diameter on the ground[J]. Journal of Arid Meteorology，26(3)：22−28.

马中元，王金鑫，张林才，等，2024. 基于雷达拼图CR产品四要素识别冰雹云的方法[J]. 大气科学学报，47(5)：826−840. Ma Zhongyuan，Wang Jinxin，Zhang Lincai，et al.，2024. A method for identifying hail clouds based on four elements of radar mosaic CR products[J]. Transactions of Atmospheric Sciences，47(5)：826−840. DOI：10. 13878/j. cnki. dqkxxb. 20230801001.

闵晶晶，曹晓钟，段宇辉，等，2012. 近30年京津冀地区冰雹的气候特征和突变分析[J]. 气象，38(2)：189−196. Min Jingjing，Cao Xiaozhong，Duan Yuhui，et al.，2012. Analysis on the climate characteristics of hail and its break in Beijing，Tianjin and Hebei during recent 30 years[J]. Meteorological Monthly，38(2)：189−196.

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 Jiawen，Gao Li，Wei Ming，et al.，2021. Analysis of the polarimetric characteristics of hail storm from S band dual polarization radar observations[J]. Acta Meteorologica Sinica，79(1)：168−180. DOI：10. 11676/qxxb2021. 001.

孙继松，石增云，王令，2006. 地形对夏季冰雹事件时空分布的影响研究[J]. 气候与环境研究，11(1)：76−84. Sun Jisong，Shi Zengyun，Wang Ling，2006. A study on topography impacting on distribution of hail events[J]. Climatic and Environmental Research，11(1)：76−84. DOI：10. 3969/j. issn. 1006−9585. 2006. 01. 007.

汤兴芝，俞小鼎，姚瑶，等，2023. 华东一次极端冰雹天气过程雷达回波特征的比较分析[J]. 高原气象，42(4)：1078−1092. Tang Xingzhi，Yu Xiaoding，Yao Yao，et al.，2023. Comparative analysis of radar echo characteristics of an extreme hail storm process in East China[J]. Plateau Meteorology，42(4)：1078−1092. DOI：10. 7522/j. issn. 1000−0534. 2022. 00066.

肖艳姣，刘黎平，2006. 新一代天气雷达网资料的三维格点化及拼图方法研究[J]. 气象学报，64(5)：647−657. Xiao Yanjiao，Liu Liping，2006. Study of methods for interpolating data from weather radar network to 3-d grid and mosaics[J]. Acta Meteorologica Sinica，64(5)：647−657. DOI：10. 3321/j. issn：0577−6619. 2006. 05. 011.

杨静，姚秀萍，李彦霖，等，2023. 云贵高原东北部一次罕见冰雹超级单体结构特征与发展分析[J]. 高原气象，42(2)：374−385. Yang Jing，Yao Xiuping，Li Yanlin，et al.，2023. Structural characteristics and developmental analysis of the rare hail supercell in the northeast Yunnan-Guizhou Plateau[J]. Plateau Meteorology，42(2)：374−385. DOI：10. 7522/j. issn. 1000−0534. 2021. 00120.

俞小鼎，王迎春，陈明轩，等，2005. 新一代天气雷达与强对流天气预警[J]. 高原气象，24(3)：456−464. Yu Xiaoding，Wang Yingchun，Chen Mingxuan，et al.，2005. Severe convective weather warnings and its improvement with the introduction of the NEXRAD[J]. Plateau Meteorology，24(3)：456−464. DOI：10. 3321/j. issn：1000−0534. 2005. 03. 025.

张仙，谌芸，王磊，等，2013. 冷涡背景下京津冀地区连续降雹统计分析[J]. 气象，39(12)：1570−1579. Zhang Xian，Chen Yun，Wang Lei，et al.，2013. Statistical analysis of continuous hailfall under the background of cold vortex in the Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. Meteorological Monthly，39(12)：1570−1579. DOI：10. 7519/j. issn. 1000−0526. 2013. 12. 005.

Research on multi-parameter comprehensive identification and prediction index of hail based on ground-based radar network: a case study in Hebei Province

Meng Lei[1], Yang Yuanjian[1], Wan Bingchen[4], Chu Zhigang[1], Zhang Wenjie[5], Fan Junhong[2,3], Liu Yushan[2], Zhou Shuang[2]

(1. *School of Atmospheric Physics*, *Nanjing University of Information Science and Technology*, *Nanjing* 210044, *Jiangsu*, *China*;
2. *Key Laboratory of Meteorology and Ecological Environment of Hebei Province*, *Shijiazhuang* 050021, *Hebei*, *China*;
3. *Hebei Meteorological Service Center*, *Shijiazhuang* 050021, *Hebei*, *China*;
4. *School of Artificial Intelligence* (*School of Future Technology*), *Nanjing University of Information Science and Technology*, *Nanjing* 210044, *Jiangsu*, *China*;
5. *School of Geographical Sciences*, *Nanjing University of Information Science and Technology*, *Nanjing* 210044, *Jiangsu*, *China*)

Abstract: Hailstorms are a major severe weather hazard in Hebei Province, which can cause severe economic losses in a short period of time. This study computed the Maximum Expected Size of Hail (*MESH*), Probability of Hail (*POH*), Probability of Severe Hail (*POSH*), Vertical Integrated Liquid (*VIL*), and Vertical Integrated Liquid Density (*VILD*) using 6-minute-interval three-dimensional reflectivity data from ground-based radar observation data from Hebei Province between 2019 and 2023. A total of 245 genuine hail events and 1373 non-hail events were chosen as analysis samples based on radar data and hail observations from national stations in Hebei Province. Five widely used hail identification factors were assessed for performance. Significant distributional variations between hail and non-hail events were found for *MESH*, *VIL*, *VILD* and *POSH* using kernel density estimation methodology. *POSH* has the best hail detection performance among single parameters, according to the skill score evaluation based on the confusion matrix. This is mostly because it efficiently filters out interference from low reflectivity elements by taking into account both the 0 ℃ layer and −20 ℃ layer height information. Multi-parameter combinations, on the other hand, show more stability since they more accurately capture the variety of hail formation and complex meteorological conditions, which effectively lowers the likelihood of false alarms. *POSH*>10%, *VIL*>14 kg·m^{-2}, and *VILD*>1.2 g·m^{-3} were the three parameters that showed the best results. When compared to single-parameter methods, its Critical Success Index (*CSI*) increased by about 3%, with higher accuracy being associated with the peak *CSI*. However, the accuracy of composite parameter-based hail size prediction is constrained by the influence of mixed hydrometeor types, complicated scattering and attenuation events, variability in hail size distribution, and horizontal advection effects during hailstone fall. This study suggests *MESH*ra (range average), an enhanced hail size algorithm. This approach successfully improves the connection between hail size observations and forecasts by averaging the echo intensities surpassing 40 dBZ across all height layers within a 9 km grid distance and recalculating *MESH*. The multi-parameter combination identification method was applied to two hail events in Hebei Province in 2025 (June 9 and June 18), successfully identifying all eight hail cases and providing advance warning of hail 6 to 60 minutes in advance. While the conventional *MESH* model exhibited lower errors in forecasting large hail with diameters over 18 mm, the enhanced *MESH*ra model showed lower errors in predicting small hail with diameters under 10 mm. In Hebei Province, 85% of hailstones had a diameter of less than 10 mm between 2019 and 2023. For operational hail forecasting in Hebei Province, the *MESH*ra hail prediction is therefore reasonably appropriate. However, the *MESH* forecast is better suited for anticipating hail size when the atmosphere is favourable to huge hail.

Key words: hail identification; multi-parameter combination; identification indicators; critical success index; hail size estimation