

文章编号: 2096-1618(2023)05-0507-09

# 降雹概率的多源探测数据分析及地面验证

何关兴<sup>1,2</sup>, 苏德斌<sup>1,2</sup>, 李治<sup>3</sup>, 黄梓恒<sup>1,2</sup>

(1. 成都信息工程大学电子工程学院, 四川 成都 610225; 2. 中国气象局大气探测重点开放实验室, 四川 成都 610255; 3. 山西省气象灾害防御技术中心, 山西 太原 030000)

**摘要:**受特殊地理环境的影响,冰雹天气成为内蒙古巴彦淖尔地区夏季主要气象灾害之一,因此对巴彦淖尔进行降雹概率研究十分必要。基于巴彦淖尔地区雷达、探空、风云四号卫星 TBB 等气象探测数据和地面观测人员记录的降雹观测信息,研究雷达数据、探空资料对识别冰雹特征的相关算法。通过 2020 年 7 月 4 日发生在巴彦淖尔乌拉特中旗的一次典型降雹过程,运用测雹板和气象服务人员观测的地面降雹结果与冰雹识别算法结果进行对比分析,验证冰雹识别算法。结果表明冰雹识别算法在引入 0℃ 层和 -20℃ 层的高度信息后,能更加准确地预测出冰雹的发生概率和尺寸信息。

**关键词:**冰雹识别算法;降雹概率;探空数据;地面验证

**中图分类号:** TN959.4

**文献标志码:** A

**doi:** 10.16836/j.cnki.jcuit.2023.05.003

## 0 引言

中国是一个冰雹灾害多发的国家,为防雹减灾,在受冰雹灾害影响的地区广泛开展人工防雹作业,通过人工干预的方法,达到防治和减轻冰雹灾害的目的。为减少冰雹灾害可能造成的国民经济损失并提升防雹作业的有效性和准确性,冰雹灾害预报工作一直是人工影响作业工作重点。在冰雹云的发展初期<sup>[1-2]</sup>,即云内大冰雹尚未形成时,就对雹云进行人工影响天气作业,破坏其生成大冰雹的环境条件,可起到事半功倍的防雹效果,否则等冰雹长大后再对其进行人工影响作业,人影作业的催化剂并不能将已长大的冰雹消除。为研究雷达数据和冰雹发生概率、冰雹降雹尺寸的关系,进而得出冰雹早期识别算法模型,现利用雷达强度数据和探空数据,研究冰雹单体在各个高度层的回波特征,利用反射率回波识别冰雹可能发生的区域。

国外利用雷达研究冰雹的工作开展较早,早在 1982 年 Petrocchi<sup>[3]</sup> 和 1985 年 Smart 等<sup>[4]</sup> 得到了冰雹相关算法,但在实际人影作业验证过程中效果不尽如人意<sup>[5]</sup>。Smith 等<sup>[6]</sup> 得出强冰雹的最基本特征是高悬的强回波,这说明在不同高度层雷达回波强度与冰雹的对应关系是变化的,具体是大气环境 0℃ 层高度和 -20℃ 层高度与强回波的关系。Witt 等<sup>[7]</sup> 基于这一思路得到了美国新一代天气雷达的冰雹探测算法,中国气象人员的相关研究也验证了这一结论<sup>[8]</sup>。近年来,利用双偏振雷达进行粒子识别可以更好的观测并得到冰雹信息<sup>[9-10]</sup>。Grams 等<sup>[11]</sup> 使用云顶和地面雷达数

据检索朴素贝叶斯降水类型,将冰雹划分为降水类型的一种,不过算法对于冰雹的识别效果欠佳。Mroz 等<sup>[12]</sup> 使用全球降水测量 (GPM) 任务核心天文台卫星和地面 S 波段天气雷达同时观测冰雹天气,研究冰雹识别算法,最佳性能 CSI 达到 49%。兰明才等<sup>[13]</sup> 利用 11 部多普勒天气雷达、自动站、闪电定位仪数据,用神经网络构建冰雹识别模型,识别准确率达 93.81%。黄钰等<sup>[14]</sup> 对 2016-2019 年贵州中西部降雹过程探空资料分析,发现冰雹实际融化层高度对于冰雹粒子大小有明显的影响。杨宁等<sup>[15]</sup> 针对巴彦淖尔冰雹云探测进行初步研究,表明由于独特的地理环境,冰雹天气成为巴彦淖尔市河套平原夏季主要气象灾害之一,对巴彦淖尔地区进行降雹概率研究具有实际意义。

在冰雹研究和人影作业中,须关注以下 3 方面内容:冰雹可能发生的概率;降雹的影响范围与持续时间;降雹预估的最大冰雹粒子尺寸。双偏振雷达的有效探测范围较低,考虑到中国气象行业现状,利用新一代多普勒天气雷达进行冰雹识别算法的研究仍有需求。本文利用多普勒天气雷达进行冰雹识别算法研究降雹概率,以 2020 年 7 月 4 日发生在乌拉特中旗气象局附近的一次降雹过程为例,利用雷达数据反演降雹概率及冰雹粒子最大尺寸,与地面测雹板对比,冰雹识别算法的预测效果较好。

## 1 数据

### 1.1 研究区域

内蒙古自治区巴彦淖尔市地处内蒙古高原西部位于 105°12'E ~ 109°53'E、40°13'N ~ 42°28'N,东西长

378 km,南北宽238 km,面积6.4万 km<sup>2</sup>。巴彦淖尔市多年平均年蒸发量为 2030 ~ 3180 mm,多年平均日照时数在 3100 ~ 3300 h<sup>[16]</sup>,是中国日照时数最多的地区之一。巴彦淖尔境内的河套灌区是亚洲最大自流灌区,境内河套平原有“塞上江南”美誉,全市有机奶产量占全国一半以上,农畜产品出口位居内蒙古第一,为全国最大的羊毛绒生产基地<sup>[15]</sup>。

阴山山脉狼山段位于巴彦淖尔市中部,将巴彦淖尔市一分为二,山前为富饶的河套平原,山后为荒漠化草原(图 1),受此特殊地理环境的影响,冰雹天气成为巴彦淖尔市山前河套平原夏季主要气象灾害之一。

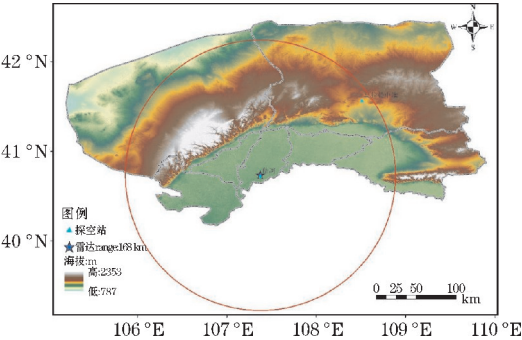


图 1 巴彦淖尔地形及观测设备布局

1.2 数据来源

收集 2020 年 6-8 月巴彦淖尔地区 C 波段多普勒雷达数据,探空数据和风云四号 A 星(FY-4A)的相当黑体亮带温度产品 TBB,数据如表 1 所示。

表 1 数据

数据来源	数据信息	时间分辨率	空间分辨率
C 波段多普勒雷达	反射率资料	1 次/6 min	Bin;30 m
探空站	0℃层高度和 -20℃层高度	07,19	台站
FY-4A	TBB	1 次/h	4000 m

其中 C 波段多普勒雷达(714CDN 雷达)位于巴彦淖尔市气象局(图 1 五角星位置,107.36°E,40.73°N),有效定量探测半径均为168 km,时间分辨率为6 min,按 VCP21 模式运行。巴彦淖尔地区有两个探空站,分别位于临河区气象局(图 1 三角形位置,站号:53513)及乌拉特中旗气象局(图 1 三角形位置,站号:53336),提供秒级探空数据,其中包括大气环境 0℃层高度和-20℃层高度数据。提供的 TBB 表示气象卫星红外探测通道获取的云顶和无云或少云区的地球表面的向外辐射。

2 冰雹识别算法

2.1 算法流程

研究算法程序采用巴彦淖尔地区临河市 CD 雷达作为雷达反射率数据的数据源。0℃层和-20℃层高

度的数据是利用当天 8 点探空气球得到的探空信息作为算法参量的输入<sup>[17]</sup>,适宜的 0℃和-20℃层为降雹提供了更有利的层结条件<sup>[18]</sup>。算法流程如图 2 所示。

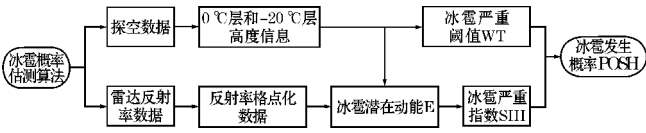


图 2 冰雹概率算法流程图

2.2 算法原理

利用雷达反射率数据研究冰雹算法,有基于垂直积分液态水(VIL)进行冰雹识别的相关算法研究工作<sup>[19]</sup>,该算法在多次实际人影作业中都得到了良好的验证。

此外为得出冰雹尺寸和雷达回波强度的关系模型,需要研究融化层高度信息和强回波(高于45 dBZ)的关系,Waldvogel 等<sup>[20]</sup>得出45 dBZ以上强度回波与地面冰雹发生概率的简单关系(图 3)。Witt 采用类似 VIL 算法的方法,基于单体的数据反演冰雹算法,利用反射率数据反演冰雹的动能进而实现冰雹的识别。

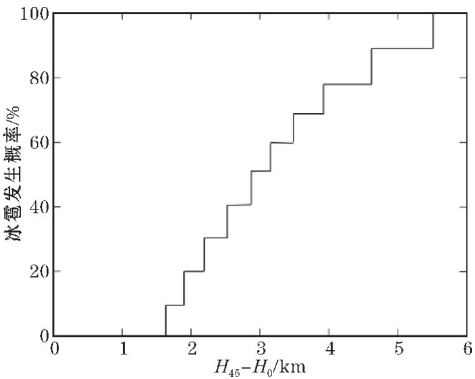


图 3 冰雹在地面发生的概率与 45 dBZ 强回波层与 0℃层高度差之间的关系

冰雹动能计算相关公式为

$$E=5\times10^{-6}\times10^{0.084Z}W(Z)$$
(1)

其中

$$W(Z)=\begin{cases} 0 & Z\leq Z_L \\ \frac{Z-Z_L}{Z_U-Z_L} & Z_L<Z<Z_U \\ 1 & Z\geq Z_U \end{cases}$$
(2)

其中,Z 是反射率强度值,单位 dBZ,加权函数W(Z)是反射率强度与冰雹识别算法之间的过度函数,式(2)中 Z<sub>L</sub>和 Z<sub>U</sub>分别对应40 dBZ和50 dBZ(可根据雷达实际情况作调整),VIL 算法通常是通过设置55 dBZ上限值来滤除与冰雹有关的高反射率数据,而上述 Z-E 算法采用相反的策略,仅使用与冰雹有较大相关性的高反射率数据,并滤除通常与液态水有关的较低反射率值。利用动能计算冰雹的好处还包括,以此为依据可以对降雹尺寸和严重程度进行预估,建立对降雹严重

程度的预估模型。同时相关研究结论表明,冰雹生长仅发生在0℃层高度以上的区域,严重性冰雹发生在-20℃层或更低温度层。在冰雹算法中引入温度层信息,可以更加准确地进行冰雹识别,高度层信息的加权函数:

$$W_T(H)=\begin{cases} 0 & H\leq H_0 \\ \frac{H-H_0}{H_{m20}-H_0} & H_0<H<H_{m20} \\ 1 & H\geq H_{m20} \end{cases} \quad (3)$$

其中  $H$  是反射率数据所在高度,  $H_0$  和  $H_{m20}$  分别对应 0℃层高度和-20℃层高度。

综上得到严重冰雹指数函数 SHI:

$$SHI=0.1\int_{H_0}^{H_T} W_T(H)EdH \quad (4)$$

其中  $H_T$  是云顶高,SHI 单位是  $J/(m^2s)$ 。

结合 Witt 算法,将雷达体扫数据转换成网格数据。冰雹严重指数计算公式则转变为

$$SHI=0.1\sum_{H_0}^{H_T} W_T(H)E\Delta h \quad (5)$$

其中,  $\Delta h$  是逐层网格数据高度间隔。

此外,Witt 还利用0℃层高度信息计算了冰雹严重灾害的阈值参量 WT:

$$WT=57.5H_0-121 \quad (6)$$

利用冰雹严重指数和警告阈值可以计算网格点各处冰雹可能发生的概率函数,经验公式为

$$POSH=29\ln\left(\frac{SHI}{WT}\right)+50 \quad (7)$$

为提升数据的连续性和可靠性,利用 Barnes 插值算法<sup>[21]</sup>将雷达数据插值至  $600\times600\times40$  的经纬度网格中,设置成 0.01 度经纬度分辨率,高度500 m间隔的网格数据。同时为提高算分数据存取的执行效率,算法系统将数据网格每个格点对应的体扫数据及坐标位置存储至二进制文件中,通过查询二进制文件,可以快

速实现反射率网格数据的读取和计算。

3 降雹个例

2020 年 7 月 4 日 15-18 时巴彦淖尔市临河区新华镇,杭锦后旗团结镇、蛮会镇,乌拉特中旗海流图镇、巴音乌兰和乌拉特中旗气象局、五原县丰裕等地区出现冰雹天气,具有区域性强、冰雹颗粒分布不均等特点。乌拉特中旗气象局(图 4 三角形位置,108.52°E,41.57°N)在 17:40 出现降雹,持续时间约 6~10 min,冰雹颗粒直径大。

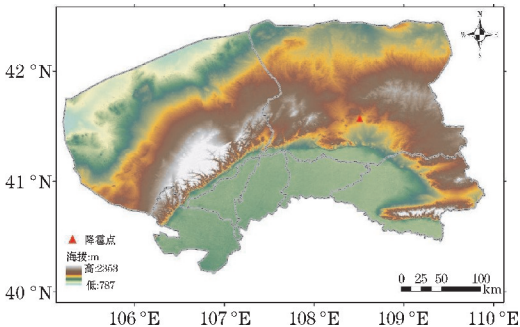


图 4 2020 年 7 月 4 日 17:40-17:50 巴彦淖尔降雹点

3.1 天气背景

2020 年 7 月 4 日 08 时环流背景形势场(图 5)可以看出,500 hPa 处于东北地区高空槽后的西北气流,在巴彦淖尔市地区具有风速辐合,西北气流携带冷空气在巴市地区堆积;700 hPa 同样受西北气流控制,在巴彦淖尔市地区具有风速辐合,表明中高层有干冷空气侵入,有利于风雹天气的产生;850 hPa 在阿盟东南部及巴市有切变线,850 hPa 与 500 hPa 温差达 29℃,同时有暖舌伸入,有利于低层增暖,促使低层到高层的温度递减率加大,形成上冷下暖的热力不稳定层结,有利于强对流的出现。

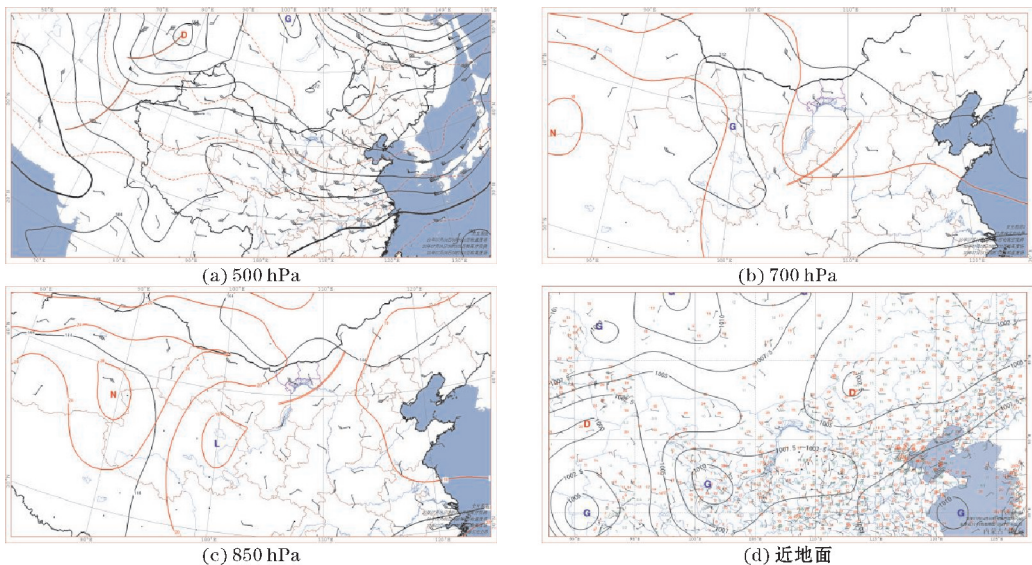


图 5 2020 年 7 月 4 日 08 时环流背景形势场



3.2 探空资料

图6为临河、乌拉特中旗7月4日的探空曲线。临河站7月4日08时在500~600 hPa有不稳定存在,CAPE值为80.3 J/kg,CIN值为237 J/kg,对流抑制位能大于有效位能;500 hPa以下风随高度顺转有暖平流;0℃层高度在4077 m,-20℃层高度在7341 m;地面温度露点差>5℃,K指数为32.9℃,SI指数为0.25℃;中午辐射升温,用临河对流发生前17时地面实况进行订正,CAPE订正后为1601.7 J/kg、CIN订正后为0 J/kg,温度上升使底层对流抑制消失,对流天气产生。

乌拉特中旗站7月4日08时在700~250 hPa层结不稳定明显,CAPE值为696.8 J/kg,对流高度在700 hPa以上,CIN值为93.5 J/kg,对流有效位能大于对流抑制位能;500 hPa以下风随高度顺转暖平流;0℃层高度在4100 m,-20℃层高度在7167 m;地面温度露点差<5℃,湿度条件好。K指数为36.9℃,SI指数为-1.2℃。中午辐射升温,用乌拉特中旗对流发生前16时地面实况进行订正,CAPE订正值1377 J/kg、CIN订正值0 J/kg,温度上升使底层对流抑制消失,对流天气产生。结合两地探空资料分析,当日空中存在不稳定能量,为强对流天气的产生提供了条件。

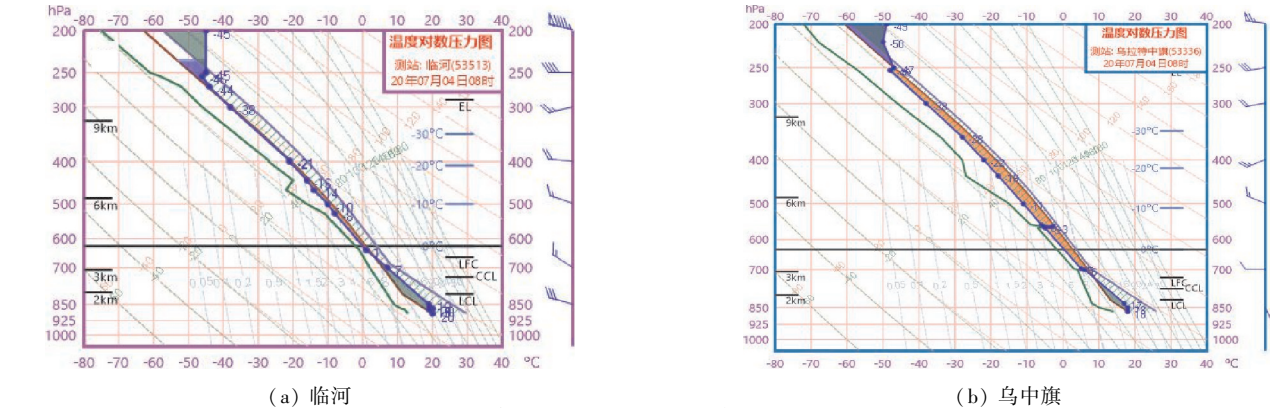


图6 2020年7月4日08时临河和乌中旗订正后T-lnP图

3.3 卫星 TBB 分析

TBB是相当黑体温度(temperature of black body),通常称为亮温或者亮带温度,表示云顶和无云区或少云区的地球表面向太空发射的辐射,也是气象卫星红外通道的观测值,是生成红外云图和各种增强显示云图最原始的资料<sup>[22]</sup>。它能够反映出云的发展高度、上升

气流的强弱和中小尺度对流发展的旺盛程度。TBB温度越低,对应云顶越高,对流越旺盛,当TBB温度达到-32℃,对流云高度有8 km左右,TBB温度达到-54℃,对流云高度有11 km左右,为雷暴云系<sup>[23-24]</sup>。本次降雹事件于17:40左右(BTJ)发生在乌拉特中旗气象局(图7绿色圆圈),选取降雹事件前1 h以及降雹事件后2 h TBB资料,分析冰雹云在降雹前后的TBB变化特征。

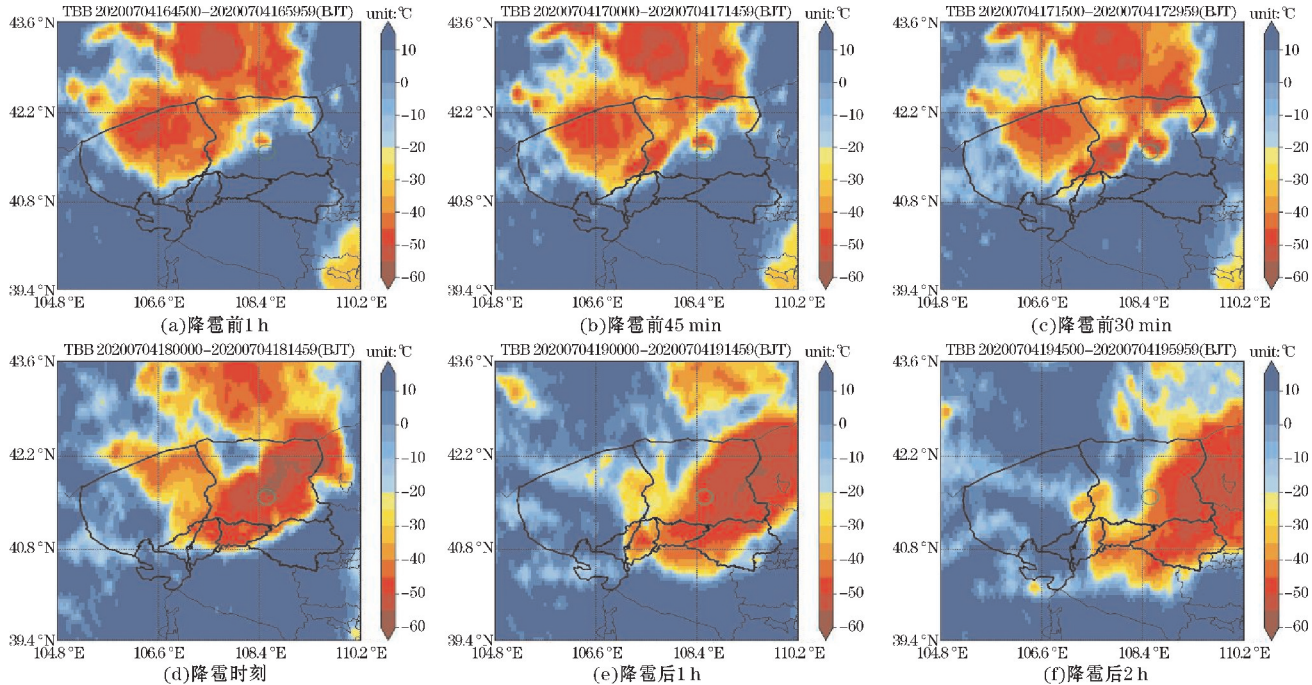


图7 2020年7月4日16:45-20:00巴彦淖尔地区TBB空间分布(绿色圆圈为降雹点)

图 7 为降雹事件 TBB 空间分布。由图 7(a)可知,在降雹前 1 h,乌拉特中旗气象局上空云团 TBB 值大于  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,对流稳定。在降雹前 45 min(图 7b)、降雹前 30 min(图 7c)云团中心 TBB 值快速下降至  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,云团向东南移动,对流加强。在降雹时刻(图 7d),云团面积迅速膨胀,云团中心 TBB 值也进一步降低至  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,在云团的 TBB 梯度的大值区(乌拉特中旗气象局)产生降雹,说明降雹发生在对流云团的发展旺盛阶段<sup>[20]</sup>。在降雹后 1 h(图 7e),云团向东南方向移动,乌拉特中旗气象局上空云团 TBB 值上升到  $-40\text{ }^{\circ}\text{C} \sim -45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在降雹后 2 h(图 7f),云团继续向东南方向移动,乌拉特中旗气象局上空 TBB 值上升到  $-15\text{ }^{\circ}\text{C} \sim -25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,此区域云团对流减弱。

综上,此次降雹事件中冰雹云的形态分布为自西北至东南走向,降雹点主要位于 TBB 梯度大值区,与陈英英等<sup>[25]</sup>指出的对流云团的生长中心位于 TBB 低

值区和陡变的温度梯度区相对应。

### 4 降雹概率分析及最大尺寸估算

2020 年 7 月 4 日 17:40 左右乌拉特中旗气象局地区出现降雹,持续时间约 6 ~ 10 min。研究团队收集到了本次冰雹过程的雷达数据、探空数据和地面观测信息。雷达体扫数据是由临河市 CD 雷达获取的体扫基数据,雷达数据有效距离取 168 km,地面观测信息包括测雹板和地面人员降雹信息的记录,通过冰雹掉落至测雹板造成的痕迹可以反演冰雹尺寸信息。

通过观察当天 17:40(BJT)前后的组合反射率回波图(图 8),可以观察到在  $(108.52\text{ }^{\circ}\text{E}, 41.57\text{ }^{\circ}\text{N})$  周围具有大于 550700 dBZ 的强回波数据,说明有较大概率存在冰雹粒子。

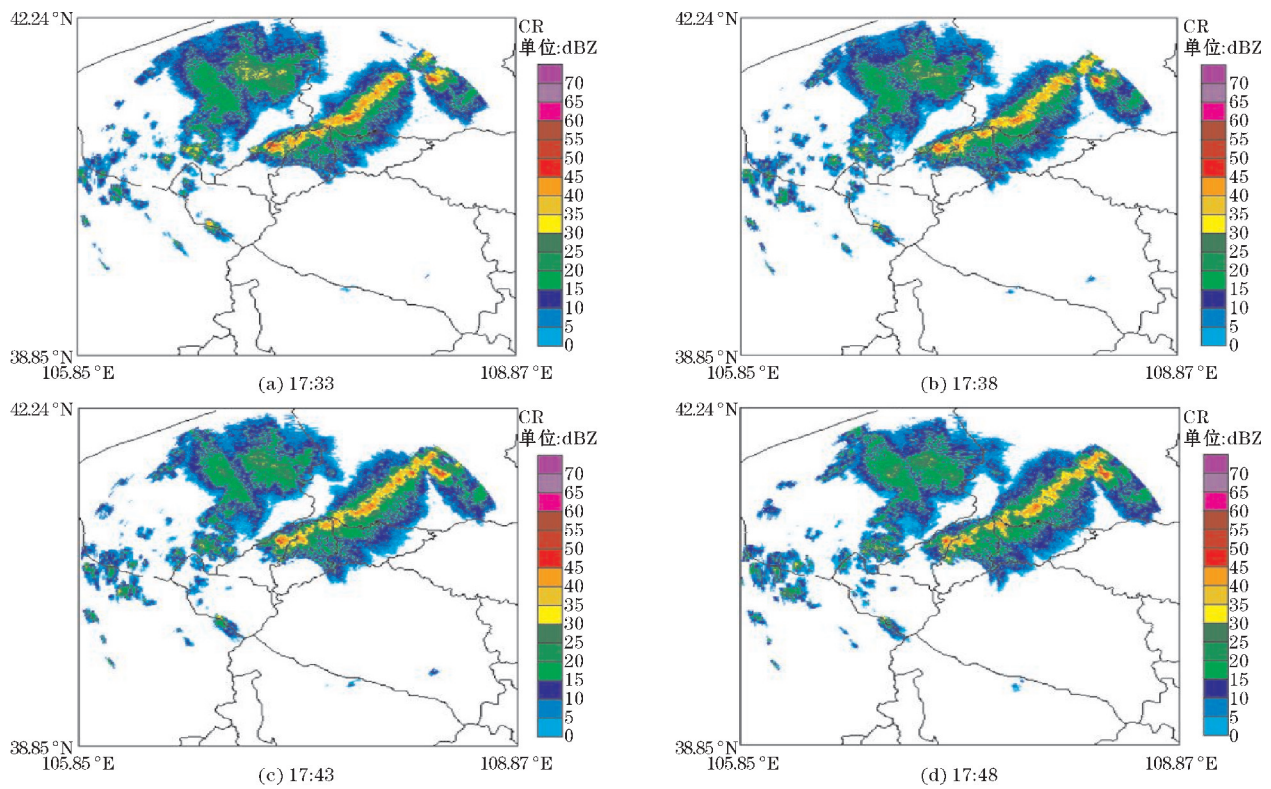


图 8 临河 CD 雷达 2020 年 7 月 4 日 17:33–17:48(BJT)组合反射率回波图

利用反射率 25 dBZ 作为阈值回波顶高识别阈值,从图 9 可以看出,7 月 4 日 17:33 开始(图 9a),乌拉特中旗气象局出现顶高在 8 km 以上的强回波。17:38(图 9b)乌拉特中旗气象局上空回波顶高上升至 11 km 以上,对流发展旺盛。17:43(图 9c)回波顶高在 13 km 以上的回波范围显著增大,17:48(图 9d)乌拉特中旗

气象局上空回波顶高有所减弱。

通过解码当天 07 时探空数据,当日高空  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  层高度为 4100 m,  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  高度为 7167 m,带入上文冰雹识别算法,作为冰雹概率评估的高空数据,计算冰雹概率数据 POSH,绘制降雹概率  $>80\%$  空间分布图,结果如图 10 所示。



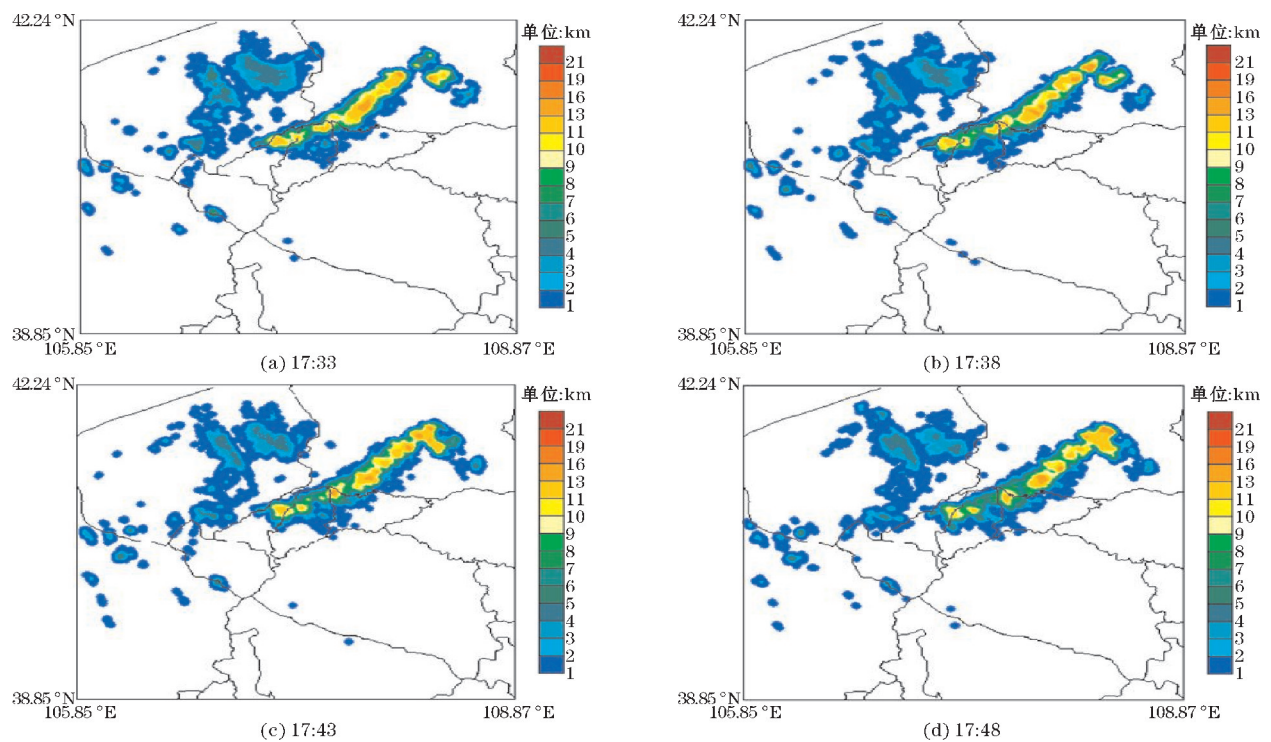


图9 临河CD雷达2020年7月4日17:33–17:48(BJT)回波顶高回波图

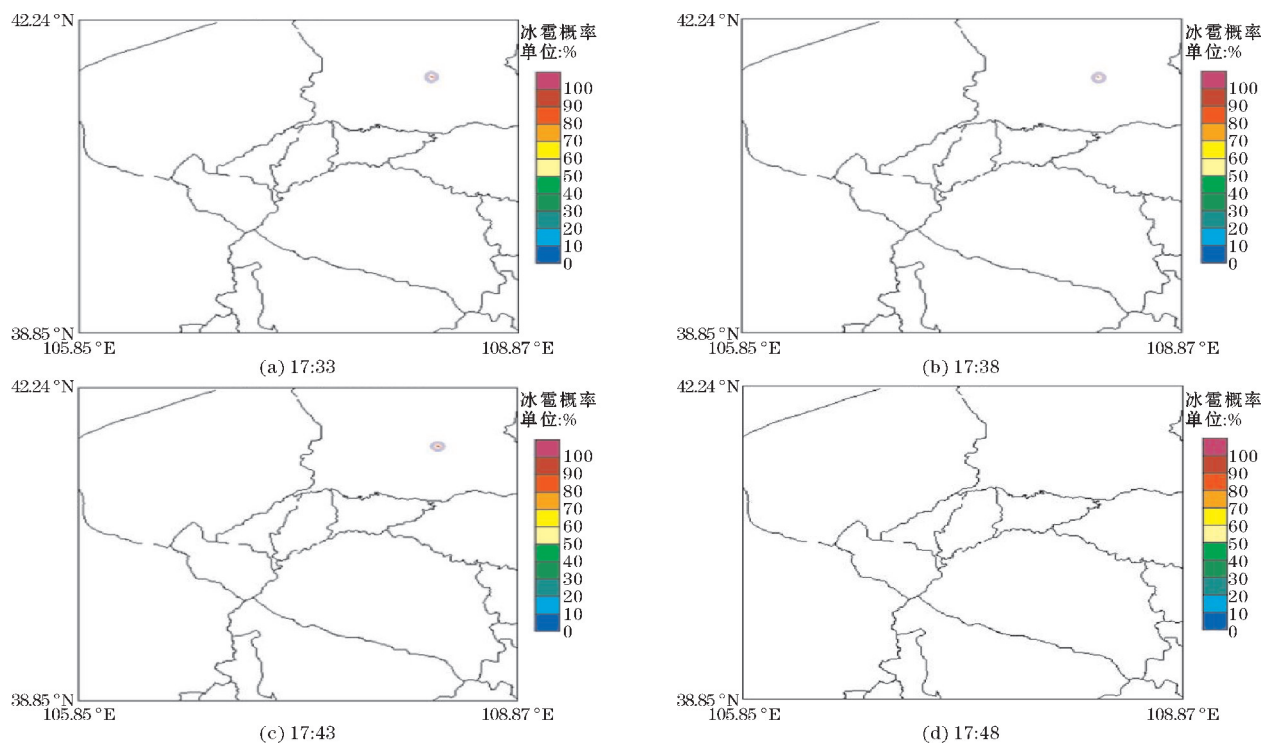


图10 冰雹发生概率>80% POSH 空间分布

利用冰雹严重指数 SHI 可以作为反演冰雹粒子降落能量的指标,通过式(8),可以评估每次降雹概率模型对应的降雹粒子最大尺寸。

$$\text{MEHS}=1.38\left(\text{SHI}\right)^{0.5}$$

(8)

利用当天 17:38(BJT)雷达数据,可以发现乌拉特中旗气象局上空出现57.5 dBZ的强回波数据,回波顶高达16.5 km。根据式(1),可以计算出冰雹动能

$E=0.338$ ,结合0℃层高度信息,运用式(6)计算出冰雹严重灾害的阈值参量  $\text{WT}=114.75$ 。综上利用式(5)得到冰雹严重指数  $\text{SHI}=419.17\text{ J}/\left(\text{m}^2\text{ s}\right)$ ,进而结合式(7)获得降雹概率信息  $\text{POSH}=87.57\%$ ,通过式(8)计算冰雹最大预估尺寸为2.83 cm,平均粒子尺寸为1.32 cm。利用 Witt 研究结论得出,考虑到高空坠落到地面过程冰雹的磨损和碰撞破碎过程,实际降

落到地面的冰雹粒子尺寸约为估计尺寸的 75% 左右,此次降雹实际预估降落到地面的最大冰雹尺寸为 2.12 cm,平均尺寸1.15 cm。

5 验证分析

5.1 地面验证

通过地面气象服务人员和提前布设的测雹板,得到当天实际发生降雹的时刻和冰雹尺寸信息。根据地面气象服务人员统计,当天 17:40 左右在乌拉特中旗气象局发生降雹(图 11),降雹颗粒最大的达到“鹌鹑蛋”大小。



图 11 乌拉特中旗气象局 2020 年 7 月 4 日测雹板采样示例

通过提前布设在附近的测雹板,可以看到当日冰雹留在测雹板上的跌落痕迹。通过实际测试,测雹板是采用30 cm×30 cm×3 cm规格的 EPS 泡沫板作为测雹板的内芯,利用20 μm厚的锡箔纸作为测雹板的外部附着材料。通过凹坑直径和凹坑的坑深反演造成凹坑痕迹的冰雹粒子的冲击能量,利用能量匹配原理反演冰雹颗粒的尺寸。

通过测量测雹板采样,最大的采样坑直径为

15 mm,平均粒子采样直径为9 mm,通过式(9)<sup>[26]</sup>可以预估当时测雹板采样最大粒子尺寸。

$$D_{\max} = -0.002d_{\max}^3 + 0.053d_{\max}^2 + 0.989d_{\max} + 0.565 \quad (9)$$

计算得出冰雹预估尺寸最大粒子为2.06 cm,平均尺寸为1.23 cm。

通过与雷达反演的数值结果进行对比,发现利用测雹板测得的冰雹粒子最大尺寸要略低于利用雷达数据反演得到的降雹粒子最大尺寸,平均尺寸数值相近,这可能是由于测雹板布设的随机性,未采样到实际降落到地面的最大冰雹粒子。

5.2 多次数据验证

为验证算法的普遍适用性,将 2020 年随机 10 次降雹事件统一对比分析。通过解码每一次降雹事件的探空数据,找到当日高空0℃层高度与-20℃层高度数据,作为冰雹概率评估的高空数据,计算冰雹概率数据 POSH。为提高冰雹概率预测的准确性,只绘制 POSH>80%的预测位置。如图 12,三角符号代表预测点位,五边形代表出现降雹事件的测雹板布设位置。

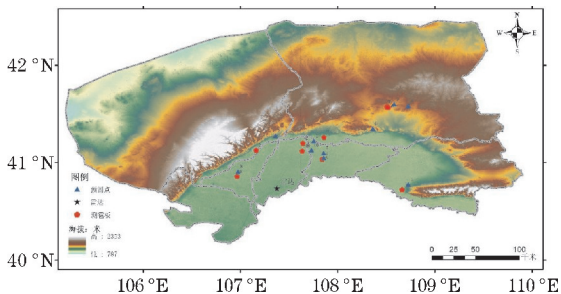


图 12 POSH>80% 冰雹预测点与实际降雹点对比图

巴彦淖尔市 2020 年 10 次降雹事件的降雹时间,预测点地理坐标与测雹板布设坐标如表 2 所示。经过计算,10 次降雹事件中预测降雹中心点与测雹板布设点平均距离差异13.25 km。

表 2 巴彦淖尔市 2020 年 10 次降雹事件

时间	预测点		测雹板布设点			差异/km
	经度	纬度	站点	经度	纬度	
2020-7-1 15:55	108°43'30" E	40°46'31" N	前旗本站	108°39'49" E	40°43'24" N	8.09
2020-7-2 15:05	107°45'14" E	41°13'25" N	临河新华和平	107°38'29" E	41°11'59" N	11.45
2020-7-4 17:00	107°21'36" E	41°16'48" N	杭后团结联合	107°09'38" E	41°07'41" N	24.92
2020-7-4 17:40	108°43'30" E	41°35'06" N	中旗本站	108°30'28" E	41°34'26" N	21.52
2020-7-4 18:05	107°51'18" E	41°03'N	刀老召	107°50'29" E	41°02'02" N	1.64
2020-7-4 18:05	108°21'36" E	41°21'N	海流图	108°31'12" E	41°34'12" N	27.20
2020-7-4 17:40	107°51'18" E	41°06'N	中旗乌加河	107°51'32" E	41°15'42" N	16.00
2020-7-11 21:01	106°58'19" E	40°54'33" N	杭后三道桥	106°57'51" E	40°51'34" N	4.96
2020-7-25 17:44	108°34'48" E	41°36'N	中旗本站	108°30'28" E	41°34'26" N	7.28
2020-9-1 15:23	107°43'48" E	41°07'48" N	狼山农场三连	107°38'02" E	41°07'10" N	9.48

结合 ECMWF ERA5 再分析数据对巴彦淖尔市降雹时刻不同高度层进行风场分析。由图 13 可知在 2020 年 7 月 4 日 18:00 (BJT) 巴彦淖尔市上空 300 hPa 受到偏西气流影响, 最大风速达到 23.9 m/s; 500 hPa

受到西北气流影响, 最大风速达到 16.9 m/s; 750 hPa 受到西北气流影响, 最大风速达到 9.3 m/s; 850 hPa 受风切变影响, 最大风速达到 7.1 m/s。风速随着高度的减小而减小。

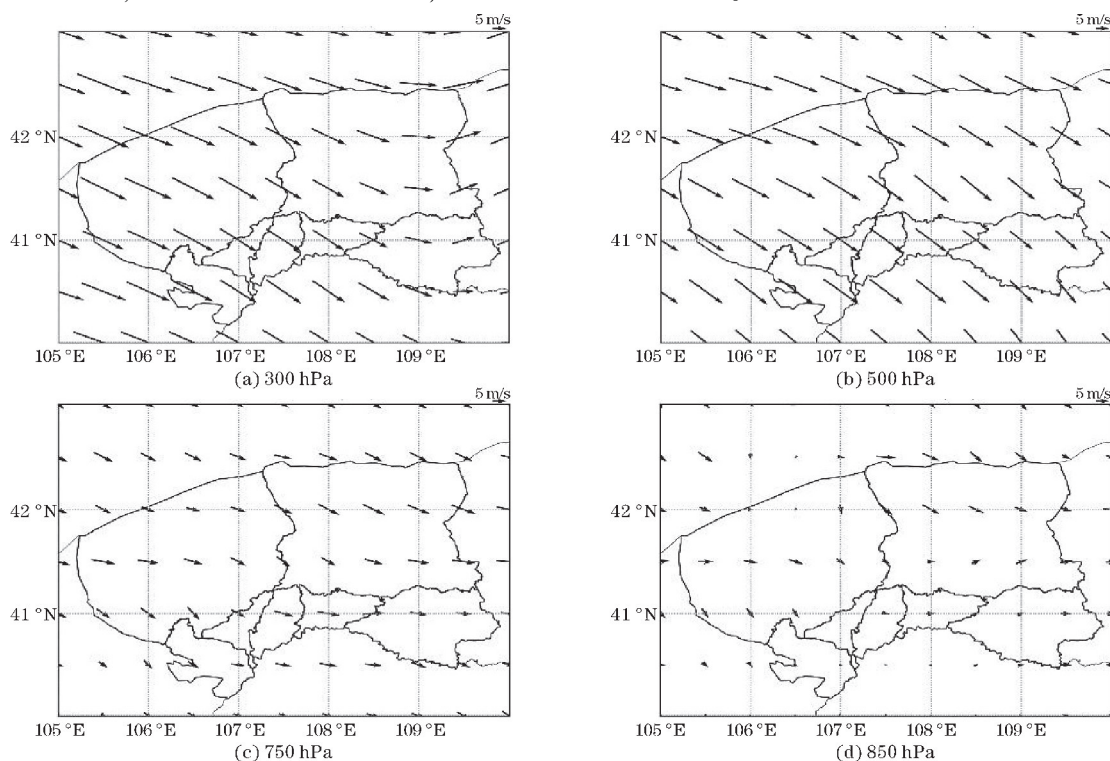


图 13 2020 年 7 月 4 日 18:00 (BJT) 风场图

由此可见, 冰雹下降过程中受到不同气流影响, 使得降雹位置变得难以准确预测。同时测雹板可能未能布设在每次降雹事件的中心, 使得预测降雹中心点位置与测雹板布设位置差异增加。

## 6 结束语

利用 2020 年 7-9 月巴彦淖尔地区的雷达资料、探空数据、卫星资料和地面测雹板数据进行冰雹识别算法研究及地面验证分析, 结果表明:

(1) 根据雷达资料, 实时反演降雹天气过程, 可以获取更大的降雹天气识别范围, 对可能发生的降雹过程有更加及时的指示作用。

(2) 利用雷达资料结合探空资料提供的 0 °C 层和 -20 °C 层的高度信息设计的冰雹识别算法, 计算雷达扫描范围内有较大概率发生降雹的地区范围, 通过雷达反射率可以计算目标粒子所带能量, 进而通过目标区域潜在冰雹概率, 实现降雹概率的预估。

(3) 通过地面测雹板和地面气象观测人员验证, 雷达数据评估降雹粒子平均尺寸有较好的估测效果。

## 参考文献:

[1] Lakshmanan V, Smith T, Stumpf G, et al. The warn-

ing decision support system-integrated information [J]. Weather and Forecasting, 2007, 22 (3): 596-612.

[2] 许焕斌. 雹云物理与防雹的原理和设计 [M]. 北京: 气象出版社, 2004.

[3] Petrocchi P J. Automatic detection of hail by radar [M]. Air Force Geophysics Laboratory, Air Force Systems Command, United States Air Force, 1982.

[4] Smart J R, Alberty R L. The NEXRAD hail algorithm applied to Colorado thunderstorms [C]. Preprints, 14th Conf. on Severe Local Storms, Indianapolis, IN, Amer. Meteor. Soc. 1985: 244-247.

[5] Winston H A, Lipschutz R C. An evaluation technique for comparing three radar-based hail detection algorithms [J]. Preprint Volume of the Eleventh Conference on Weather Forecasting and Analysis, 1986, 17 (20): 345-349.

[6] Smith P L, Johnson L R, Priegnitz D L, et al. An exploratory analysis of crop hail insurance data for evidence of cloud seeding effects in North Dakota [J]. Journal of Applied Meteorology, 1997, 36 (5): 463-473.

[7] Witt A, Eilts M D, Stumpf G J, et al. An enhanced



- hail detection algorithm for the WSR-88D [J]. Weather and Forecasting, 1998, 13(2): 286–303.
- [8] 俞小鼎, 周小刚, 王秀明. 雷暴与强对流临近天气预报技术进展[J]. 气象学报, 2012, 70(3): 311–337.
- [9] 王致君. 偏振气象雷达发展现状及其应用潜力[J]. 高原气象, 2002, 21(5): 495–500.
- [10] 苏德斌, 马建立, 张菁, 等. X波段双线偏振雷达冰雹识别初步研究[J]. 气象, 2011, 37(10): 1228–1232.
- [11] Grams H M, Kirstetter P, Gourley J J. Naïve bayesian precipitation type retrieval from satellite using a cloud-top and ground-radar matched climatology[J]. Journal of Hydrometeorology, 2016(17): 2649–2665.
- [12] Mroz K A, Battaglia T J, Lang D J, et al. Hail-detection algorithm for the GPM Core Observatory satellite sensors[J]. J. Appl. Meteor. Climatol., 2017(56): 1939–1957.
- [13] 兰明才, 蔡荣辉, 张靖, 等. 基于深度学习方法的冰雹自动识别[J]. 湖北农业科学, 2021, 60(S2): 376–381.
- [14] 黄钰, 张小娟. 探空资料在大冰雹判别中的应用[J]. 气象水文海洋仪器, 2022, 39(1): 101–103.
- [15] 杨宁, 苏德斌, 苏立娟, 等. 冰雹云探测技术研究进展——基于巴彦淖尔人工防雹技术研究试验[J]. 气象科技进展, 2021, 11(5): 141–148.
- [16] 郭玉凤, 刘继东, 方晓红. 巴彦淖尔市冰雹天气[M]. 北京: 科学普及出版社, 2011.
- [17] 奉超. 浅谈L波段探空系统资料及在预报中的应用[J]. 气象研究与应用, 2007, 28(2): 84–87.
- [18] 马丽, 张青梅, 马秀梅, 等. 青海高原一次冰雹天气成因及雷达产品特征分析[J]. 青海科技, 2022, 29(2): 86–91.
- [19] Winston H A, Ruthi L J. Evaluation of RADAP II severe-storm-detection algorithms[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1986, 67(2): 145–150.
- [20] Waldvogel A, Federer B, Grimm P. Criteria for the detection of hail cells[J]. Journal of Applied Meteorology, 1979, 18(12): 1521–1525.
- [21] 肖艳姣, 刘黎平. 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, 2006, 64(5): 647–657.
- [22] 张妍, 张建. 吉林省短时强降水及TBB特征分析[J]. 气象灾害防御, 2016(4): 34–35.
- [23] 刘小艳, 刘国强, 王兴菊, 等. 基于卫星云参数监测产品的贵州冰雹云指标分析[J]. 中低纬山地气象, 2020, 44(1): 10–14.
- [24] 罗雄, 罗喜平, 李枚曼, 等. 基于卫星和雷达资料的FAST冰雹云特征分析及识别指标初探[J]. 中低纬山地气象, 2021, 45(5): 56–62.
- [25] 陈英英, 唐仁茂, 李德俊, 等. 利用雷达和卫星资料对一次强对流天气过程的云结构特征分析[J]. 高原气象, 2013, 32(4): 1148–1156.
- [26] Lozowski E P, Strong G S. On the Calibration of Hailpads[J]. Journal of Applied Meteorology, 1978, 17(4): 521–528.

## Multi-source Detection Data Analysis and Ground Verification of Hail Probability

HE Guanxing<sup>1,2</sup>, SU Debin<sup>1,2</sup>, LI Zhi<sup>3</sup>, HUANG Ziheng<sup>1,2</sup>

(1. College of Electronic Engineering Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. Key Laboratory of Atmospheric Sounding, China Meteorological administration, Chengdu 610225, China; 3. Shanxi Meteorological Disaster Prevention Technology Center, Taiyuan 030000, China)

**Abstract:** Influenced by its special geographical environment, hail weather has become one of the main meteorological disasters in summer in the Bayannur area of Inner Mongolia. Therefore, it is necessary to study the probability of hail in Bayannur. Based on the meteorological detection data such as radar, sounding, and the temperature of black body (TBB) data of Fengyun-4 satellite in Bayannur area, as well as the hailfall observation information recorded by ground observers, this paper studies the correlation algorithm of radar data and sounding data to identify hail characteristics. Through a typical hailfall process that occurred in Bayannur Urad Middle Banner on July 4, 2020, the comparative analysis of the ground hail results observed by hail measuring boards and meteorological service personnel with the results of the hail identification algorithm was used to verify the hail identification algorithm. The results show that the hail recognition algorithm can more accurately predict the hail occurrence probability and size information after introducing the height information of the 0 °C layer and the -20 °C layer.

**Keywords:** hail recognition; hail probability; sounding data; ground verification