

高艳春,胡志群,王宏,等,2024. 基于贝叶斯方法的承德山区冰雹潜势预报研究[J]. 气象,50(11):1359-1372. Gao Y C, Hu Z Q, Wang H, et al, 2024. Study of hail potential forecast in Chengde Mountains based on Bayesian method[J]. Meteor Mon, 50(11):1359-1372(in Chinese).

## 基于贝叶斯方法的承德山区冰雹潜势预报研究<sup>\*</sup>

高艳春<sup>1</sup> 胡志群<sup>2</sup> 王 宏<sup>1</sup> 胡赛安<sup>1</sup> 胡琪琚<sup>1</sup>

1 河北省承德市气象局,承德 067000

2 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室,北京 100081

**提 要:** 利用承德山区冰雹实况资料、承德 CB 型多普勒天气雷达探测资料、NCEP FNL 再分析资料及 NCEP-GFS 模式预报资料,统计 2000—2020 年 4—9 月承德山区 184 个冰雹天气个例的相关环境参数分布特征及预报阈值;基于箱线图结果给定起步最优阈值条件,将 2014—2020 年 4—9 月有冰雹观测记录或组合反射率 $\geq 60$  dBz 的样本记为冰雹实况,依据邻近地点、临近时间原则将实况匹配到再分析数据网格上,构建正、负样本数据集,进行特征参数选取、区间分割及概率计算,利用贝叶斯方法建立 3、6、9、12 和 24 h 冰雹潜势预报模型。针对 2021—2022 年 6—8 月的天气过程进行试报和检验,结果表明:贝叶斯方法在冰雹天气的实际预报业务中具有一定的可行性,潜势预报模型识别冰雹的命中率均在 90% 以上,平均临界成功指数为 40.3%。该方法优于概率预报和配料法,可以给出有无冰雹的确定性预报,客观性更强,对山区强对流天气预报有一定的借鉴作用,但由于再分析资料的时空尺度远大于冰雹等强对流天气,故存在一定的空报。

**关键词:** 冰雹,潜势预报,环境参数,贝叶斯方法

**中图分类号:** P456, P457

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2024.022102

## Study of Hail Potential Forecast in Chengde Mountains Based on Bayesian Method

GAO Yanchun<sup>1</sup> HU Zhiquan<sup>2</sup> WANG Hong<sup>1</sup> HU Saian<sup>1</sup> HU Qilu<sup>1</sup>

1 Chengde Meteorological Office of Hebei Province, Chengde 067000

2 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

**Abstract:** A total of 184 hail weather cases in Chengde Mountains from April to September in 2000—2020 are analyzed by means of multi-source data including the hail observation, CINRAD/CB weather radar data, NCEP FNL reanalysis data, and NCEP-GFS forecasts. Firstly, the distribution characteristics and forecast thresholds of relevant ambient parameters such as water vapor, thermal instability, dynamic lift and characteristic height are analyzed in the form of box plots. Then, the initial optimal threshold values are set according to the results of box plots. The hail labels are determined according to the hail observation records or composite reflectivity greater than or equal to 60 dBz from April to September in 2014—2020. The hail labels are matched to the grids of reanalysis data according to the principle of near location and proximity time to construct the positive and negative sample dataset for feature parameter selection, interval segmentation and probability calculation. Next, five models for 3, 6, 9, 12 and 24 h hail potential forecast are established by the Bayesian method. The models are tested focusing on the weather processes

<sup>\*</sup> 国家重点研发计划(2022YFC3003900)、河北省气象局科研项目(22zc02)和承德市研究项目(202202F001、202305B074)共同资助

2023 年 10 月 10 日收稿; 2024 年 7 月 4 日收修定稿

第一作者:高艳春,主要从事短期和短时临近预报研究. E-mail:gaoyanchun987@163.com

通讯作者:胡志群,主要从事雷达气象研究. E-mail:huzq@cam.gov.cn

from June to August during 2021–2022. The results suggest that the Bayesian-based hail potential prediction models have a certain feasibility in daily weather forecasting. The hit rates of all the models are above 90%, and the average critical success index is over 40.3%. Differing from the traditional probability and ingredient methods, the method can provide a better objective forecast of hail occurrence, which has a certain reference value for forecasting severe convective weather in mountainous areas. However, there are some false alarms as the spatio-temporal scale of the reanalysis data is much larger than that of severe convective weather, which needs to be improved in the future.

**Key words:** hail, potential forecast, ambient parameter, Bayesian method

## 引 言

冰雹是由强对流活动产生的,具有空间尺度小、突发性强、生命史短等特点,常给国民经济和人民生命财产造成严重损失。承德地处河北省东北部山区,地势自西北向东南倾斜,北部为内蒙古高原的东南边缘,中部为浅山区,南部为燕山山脉,海拔 200~1200 m,是河北省冰雹灾害多发地区之一(孙霞等, 2014;《河北省天气预报手册》编写组, 2017)。例如, 2015 年 7 月 27 日,承德丰宁县西官营、千松沟、庞营等地遭遇冰雹灾害,造成重大经济损失;2022 年 6 月 10 日,冷涡造成承德多地落雹厚度达 10 cm,农作物大面积绝收。

近年来,随着新一代天气雷达、高分辨率卫星资料的应用,冰雹等强对流天气的监测和临近预报预警能力有了显著提升(孙继松等, 2014;俞小鼎等, 2006),但如何在潜势预报中较准确地预报冰雹事件,仍然是当前业务预报中面临的一个重要挑战(McNulty, 1995)。环境参数特征研究有助于了解冰雹等强对流天气发生的物理过程,在实际预报中有一定的指示意义(李江波等, 2011;张小玲等, 2012;樊李苗和俞小鼎, 2013;Johnson and Sugden, 2014)。雷蕾等(2011)利用北京南郊观象台探空资料探讨了冰雹等分类强对流的物理量差异,指出利用 0℃层高度、500 hPa 和 850 hPa 温差、低空风切变等能比较明显地区分冰雹(或雷暴大风)和暴雨天气。路亚奇等(2016)总结出可为陇东地区 0~12 h 冰雹潜势预报提供有效参考的物理量指标。张一平等(2013)、Tian et al(2015)、高晓梅等(2018;2019)、王迪等(2020)、董春卿等(2021)研究了冰雹等分类强对流对应的一系列关键环境参数特征,总结出不同地区各类强对流天气的物理参数指标和预报阈值。曹艳察等(2018)、尉英华等(2023)对表征冰雹天气

的水汽、热力和动力环境条件进行统计分析,为冰雹天气的主客观潜势预报提供了客观的统计基础和依据。

为了更深入研究冰雹的预报方法,有学者采用基于中尺度数值模式预报产品构建冰雹等强对流天气分类概率预报(雷蕾等, 2012;曾明剑等, 2015),也有学者基于模式对流参数建立未来 0~12 h 强对流天气及落区的潜势预报(斯琴等, 2016)。牛淑贞等(2021)采用模糊矩阵评价方法遴选各月表征各类强对流天气的特征环境物理参数并计算权重系数,结合历史强对流发生时物理参数的频率分布特征,基于 EC 细网格全球模式和华东区域中尺度模式资料构建了河南冰雹等分类强对流天气概率预报方法。史纬恒等(2018)采用隶属函数转换法,建立聊城地区夏季强对流天气预报模型,经实况拟合检验,准确率达 60%以上。李文娟等(2018)基于再分析资料计算的对流指数和物理量,应用随机森林算法开展冰雹等强对流分类训练,0~12 h 预报和检验,点对点整体误判率为 21.9%。周方媛等(2020)采用逐步回归方法建立了针对冰雹等强对流天气的 0~12 h 潜势预报方程,将基于关键对流参数分级的强对流潜势预报方法在数值预报模式中进行了业务应用,取得了较好效果。刘晓璐等(2014)基于探空因子组合分析方法建立了冰雹预报指标判别式,探测率为 84%,空报率为 67.7%。莫丽霞等(2020)利用再分析资料归纳总结广西冷空气影响冰雹过程及暖区冰雹过程的预报指标,应用预报指标动态调整的配料法,建立两类过程冰雹客观预报方程。

虽然很多学者在冰雹天气的预报方面做了许多研究,但目前还缺乏冀北山区冰雹的系统性研究。在日常业务中,系统性大范围的冰雹天气可预报性强,预报员可以通过常规的环境场条件和物理量诊断分析,结合自身的预报经验做出较为准确的预报,而对于非过程性的、分散性的、局地突发的降雹事

件,风雹具体发生时间和落区位置的预报难度较大,基于此,本文选用贝叶斯方法进行冰雹天气的客观化潜势预报研究。

朴素贝叶斯分类算法是一类利用概率统计知识进行分类的算法。在许多场合,朴素贝叶斯分类算法可以与决策树和神经网络分类算法相媲美,该算法能运用到大型数据中,而且方法简单、分类准确率高、速度快。Marzban and Witt(2001)基于冰雹雷达回波特征和环境特性,开发了用于预测冰雹大小和冰雹大小分类的贝叶斯神经网络算法。Marzano et al(2008)利用贝叶斯方法,基于 C 波段双偏振雷达研究了区分冰和混合相态的水凝物分类。张文海和李磊(2019)通过贝叶斯分类法对正、负样本数据集进行机器学习,开发了冰雹识别和临近预报的人工智能算法。李博勇等(2021)利用 2019 年广东 S 波段双偏振雷达观测的冰雹和非冰雹数据,采用贝叶斯方法改进了冰雹识别算法。吴举秀等(2023)基于小冰雹、大冰雹、特大冰雹的雷达水平反射率因子、差分反射率和相关系数的概率分布,构建了基于贝叶斯方法的冰雹大小识别模型。不过,目前基于贝叶斯算法对冰雹识别和临近预报的相关研究较多,少有冰雹潜势预报的研究。因此,本文利用贝叶

斯方法构建承德山区冰雹潜势预报模型,并对 2021—2022 年 6—8 月的天气过程进行预报和检验评估,期望为今后该地区冰雹天气的精细化预报预警提供参考。

1 资料与方法

1.1 数据及预处理

所用资料包括三部分。一是冰雹实况观测数据和再分析数据,时段为 2000—2020 年 4—9 月。其中冰雹实况数据为河北省气象信息中心经质量控制后提供的承德市 9 个国家站冰雹观测逐日数据,包括冰雹是否出现、出现时间。再分析数据为 NCEP FNL 每日 4 次(02:00、08:00、14:00、20:00,均为北京时,下同)的  $1^{\circ}\times 1^{\circ}$  数据。根据邻近地点、临近时间的原则将筛选出来的冰雹记录匹配到网格上,然后计算冰雹天气发生前临近时次对应的水汽、热力不稳定、能量、动力、特殊层高度等 21 个与冰雹天气密切相关的物理参数(表 1),通过箱线图给出各环境物理参数分布特征和预报阈值,为后续建模中起步阈值和各参数阈值分割区间的确定提供基础依据。

表 1 物理参数缩略形式及单位

Table 1 Parameter abbreviations and the units

全称	缩略形式	单位	全称	缩略形式	单位
整层大气可降水量	PWAT	mm	对流有效位能	CAPE	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$
700 hPa 相对湿度	RH <sub>700</sub>	%	对流抑制能量	CIN	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$
850 hPa 相对湿度	RH <sub>850</sub>	%	700 hPa 散度	DIV <sub>700</sub>	$10^{-5}\text{ s}^{-1}$
700 hPa 比湿	Q <sub>700</sub>	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	850 hPa 散度	DIV <sub>850</sub>	$10^{-5}\text{ s}^{-1}$
850 hPa 比湿	Q <sub>850</sub>	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	最佳抬升指数	BLI	$^{\circ}\text{C}$
K 指数	KI	$^{\circ}\text{C}$	0~3 km 的风矢量差	SH <sub>0~3</sub>	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
850 hPa 与 500 hPa 温差	$\Delta T_{85}$	$^{\circ}\text{C}$	0~6 km 的风矢量差	SH <sub>0~6</sub>	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
总指数	TT	$^{\circ}\text{C}$	风暴承载层平均风	SBL	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
A 指数	A	$^{\circ}\text{C}$	0 $^{\circ}\text{C}$ 层高度	ZH	m
850 hPa 与 500 hPa 假相当位温差	$\Delta\theta_{85}$	$^{\circ}\text{C}$	-20 $^{\circ}\text{C}$ 层高度	-20H	m
对流层中层干空气层强度	DAL	$^{\circ}\text{C}$			

建模数据,包括正样本和负样本。正样本基于 2014—2020 年 4—9 月承德市 9 个国家站冰雹观测日数据以及多普勒天气雷达基数据。张晓辉等(2022)指出可将最大回波强度 $>60\text{ dBz}$ 作为承德市冰雹预警的一个参考依据。统计分析表明,2007—2016 年承德国家站观测的 54 个冰雹个例中 80%的站点出现组合反射率(CR) $\geq 60\text{ dBz}$ ,因此,为了尽可能多地捕捉到实际降雹事件,将有冰雹观测记录或 CR $\geq 60\text{ dBz}$ 的样本均记为冰雹实况。根

据前文方法,计算得到冰雹天气发生前临近时次表 1 中相关物理参数值。为解决冰雹天气和非冰雹天气数据量不平衡的问题,根据箱线图分析结果,将各环境参数最低阈值作为承德山区冰雹天气的起步阈值库,根据不同的模型调整起步阈值库中环境参数组合,最终确定最优组合参数的最低阈值为起步阈值条件,将满足起步阈值的样本保留,最终得到用于构建临近时刻潜势预报模型的正样本数据。

对于负样本,首先将 2014—2020 年 4—9 月承

德山区无冰雹天气发生的记录挑选出来,以  $CR < 40$  dBz 作为没有冰雹的判断标准,匹配到水平分辨率为  $1^\circ \times 1^\circ$ ,时间分辨率为 6 h 的网格上;然后挑选满足起步阈值的时次,将该时次内满足起步阈值的所有格点对应的各物理参数进行平均,得到的均值代表该时段天气背景物理参数值,从而得到一个负样本;最后,所有存在满足起步阈值的时次构成负样本数据集。之所以对没有冰雹的天气进行区域平均处理,是因为单个格点的负样本数量过多,导致正负样本的数量极度不平衡。经过上述处理后,将得到的正负样本用于构建预报模型,能够在一定程度上反映出冰雹天气的潜势背景。

模型检验数据包括冰雹实况数据和驱动模型所需的预报场数据。冰雹实况数据确定方法同上文正样本部分,预报场选取 NCEP-GFS 每日 4 次 (02:00、08:00、14:00、20:00)  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  预报数据,时段为 2021—2022 年 6—8 月。

## 1.2 方法简介

贝叶斯方法是机器学习的核心算法之一,其描述的是在已知的一些条件下,某事件发生的概率。 $P(B|A)$  为  $A$  事件发生的条件下  $B$  发生的概率; $P(A|B)$  为  $B$  事件发生的条件下  $A$  发生的概率,贝叶斯定理描述两者之间的关系为:

$$P(B|A) = \frac{P(B)P(A|B)}{P(A)} \quad (1)$$

式中: $P(B|A)$  为后验概率, $P(B)$  为先验概率, $P(A|B)$  为条件概率, $P(A)$  为全概率。假如某一不确定事件发生的概率,因为某个新情况的出现而发生了改变,那么改变前的那个概率为先验概率,改变后的概率为后验概率。

朴素贝叶斯分类(NBC)的基本原理是通过某对象的先验概率,利用式(1)计算出其后验概率,即该对象属于某一类的概率,选择具有最大后验概率的类作为该对象所属的类。设有样本数据集  $D = \{d_1, d_2, \dots, d_n\}$ , 对应数据的特征属性集为  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_d\}$ , 类变量为  $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_k\}$ , 即  $D$  可以分为  $y_k$  类别。其中  $x_1, x_2, \dots, x_d$  相互独立且随机,

在给定类别  $y$  的情况下,条件概率为:

$$P(X|Y=y) = \prod_{i=1}^d P(x_i|Y=y) \quad (2)$$

由式(1)、式(2)计算后验概率:

$$P(Y|X) = \frac{P(Y) \prod_{i=1}^d P(x_i|Y)}{P(X)} \quad (3)$$

由于  $P(X)$  的大小是固定不变的,只比较分子部分即可。因此可以得到一个样本数据属于类别  $y_j$  的概率:

$$P(y_j|x_1, x_2, \dots, x_d) = \frac{P(y_j) \prod_{i=1}^d P(x_i|y_j)}{\prod_{i=1}^d P(x_i)} \quad (4)$$

式中: $P(y_j)$  和  $P(x_i|y_j)$  可以基于二者在训练数据中不同类和属性值组合的出现频率进行计算。

NBC 模型引入了概率密度的概念,通过将连续区间分割为若干个连续区间来进行计算。当位于某阈值区间的样本数值为零时,引入拉普拉斯(Laplace)平滑校准,平滑后先验概率和条件概率分别为:

$$P_\lambda(C_k) = P_\lambda(Y = C_k) = \frac{\sum_{i=1}^n m(y_i = C_k) + \lambda}{n + k\lambda} \quad (5)$$

$$P_\lambda(x_i = a_j|y = C_k) = \frac{\sum_{i=1}^n m(x_i = a_j, y_i = C_k) + \lambda}{\sum_{i=1}^n m(y_i = C_k) + e\lambda} \quad (6)$$

式中: $n$  表示样本总数, $k$  表示类别数量, $C_k$  表示类别为  $k$  时的取值, $a_j$  表示某属性的第  $j$  个选择, $e$  表示  $a_j$  中阈值区间的数量, $m$  为不同目标值数量, $\lambda$  可以取常量,通常  $\lambda=1$ 。

按照上述方法,首先构建冰雹预报训练数据集,统计满足起步阈值时有冰雹(设为 1)和没有冰雹(设为 0)出现的频数, $P(y=0)$  和  $P(y=1)$  分别为两类天气的训练样本占总频数的概率,决策公式如下:

$$P(y|x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \propto P(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n|y)P(y) = P(x_1|y)P(x_2|y)P(x_3|y)\dots P(x_n|y)P(y) \quad (7)$$

$$P(y=1|x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) = P(x_1|y=1)P(x_2|y=1)P(x_3|y=1)\dots P(x_n|y=1)P(y=1) \quad (8)$$

$$P(y=0|x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) = P(x_1|y=0)P(x_2|y=0)P(x_3|y=0)\dots P(x_n|y=0)P(y=0) \quad (9)$$

$P(x_1|y=0)$ 表示假设在没有冰雹条件下,满足 $x_1$ 时的条件概率; $P(x_1|y=1)$ 表示假设在有冰雹条件下,满足 $x_1$ 时的条件概率。若 $P(y=1|x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) > P(y=0|x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ ,则预报有冰雹;若 $P(y=0|x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) > P(y=1|x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ ,则预报无冰雹。

### 1.3 建模步骤

分三步构建冰雹潜势预报模型,即准备阶段、分类器训练阶段和评估阶段,具体流程如图 1 所示。

## 2 对流参数统计特征分析

### 2.1 水汽条件

由于承德山区(海拔 200~1200 m)水汽含量相对较低,而水汽需越过燕山山脉或沿河流峡谷输送,因此水汽是影响承德山区冰雹生成的一个重要因素。基于 $RH_{700}$ 、 $RH_{850}$ 、 $Q_{700}$ 、 $Q_{850}$ 和 PWAT (表 1)统

计给出承德山区冰雹天气发生前的水汽特征。由于承德山区地形高度多在 925 hPa 以上,因此分析 925~200 hPa 的 PWAT。由图 2 可以看出,承德山区冰雹天气发生前,超过 90%的冰雹个例 PWAT 集中在 8~45 mm,明显区别于中国一级阶梯(<1 km)的 15~41 mm、二级阶梯(1~3 km)的 6~30 mm, PWAT 第 25%~75%分位数的范围为 21~30 mm,中位数为 25 mm,略低于一级阶梯的 26 mm,但明显高于二级阶梯的 15 mm(曹艳察等,2018),可见形成冰雹时所需的 PWAT 随着地形海拔不同而有所差异。 $RH_{700}$ 、 $RH_{850}$ 第 25%~75%分位数范围分别为 53%~77%、44%~69%,中位数分别为 66%、57%,前者低于中国低海拔(低于 2500 m)地区冰雹的中位数 71%,后者与之接近(田付友等,2022); $Q_{700}$ 、 $Q_{850}$ 第 25%~75%分位数的范围分别为 4.1~6.3 g·kg<sup>-1</sup>、6.2~9.6 g·kg<sup>-1</sup>,中位数分别为 5.1 g·kg<sup>-1</sup>、7.9 g·kg<sup>-1</sup>,低于承德山区短时强降水发生前的 6.7 g·kg<sup>-1</sup>和 9.7 g·kg<sup>-1</sup>(王宏等,2021)。

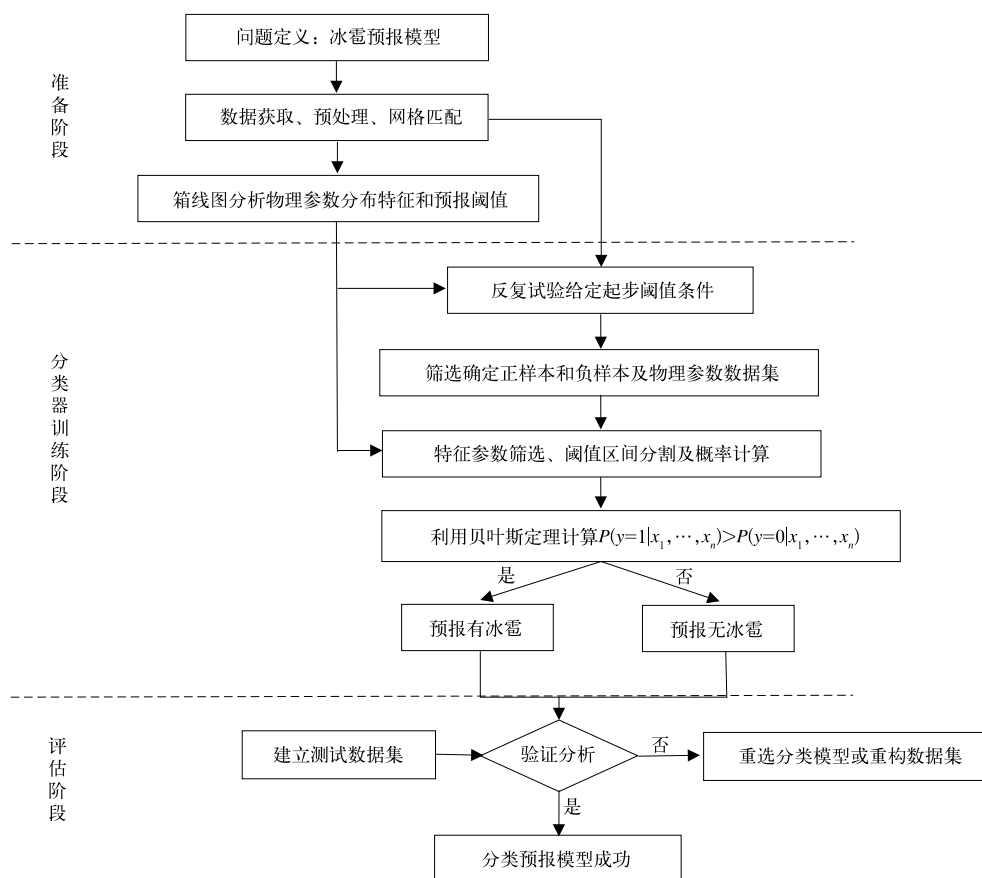
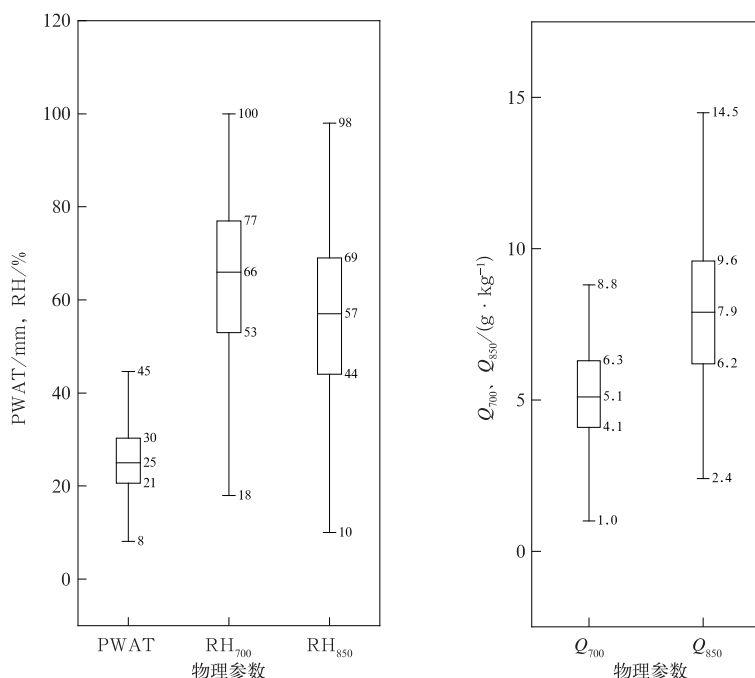


图 1 基于朴素贝叶斯模型的冰雹预报技术路线

Fig. 1 Technical route of hail forecast based on naive Bayesian model



注:箱体最上端、最下端的短横线分别表示第 95%及 5%分位数,长方形的上下两端分别表示第 75%及 25%分位数,中间的横线表示中位数,下同。

图 2 承德山区冰雹天气发生前对应的水汽条件箱线图

Fig. 2 Box plot of water vapor condition before the occurrence of hail in Chengde Mountains

## 2.2 热力不稳定参数

选取  $KI$ 、 $\Delta T_{85}$ 、 $TT$ 、 $A$ 、 $\Delta\theta_{85}$ 、 $DAL$ 、 $CAPE$ 、 $CIN$  等 8 种参数(表 1)进行分析,寻找承德山区冰雹天气发生前大气热力层结稳定度的阈值指标。

由图 3 可见,承德山区冰雹天气发生前  $KI$ 、 $\Delta T_{85}$ 、 $TT$ 、 $A$ 、 $\Delta\theta_{85}$  第 25%~75%分位数的范围分别为 28~35、28~32、49~54、-2~12、2~8℃,中位数分别为 32、30、51、6、5℃,  $A$  平均值为 4℃,其余参数平均值与中位数相同。与苏沪浙区域性冰雹(仇娟娟和何立富,2013)、陇东地区冰雹(路亚奇等,2016)和保定冰雹(马鸿青等,2014)对流参数相比,承德山区  $KI$ 、 $A$  平均值均明显高于苏沪浙和陇东地区, $KI$ 、 $\Delta T_{85}$ 、 $TT$  第 25%~75%分位数范围同保定地区较为一致,表明承德山区冰雹天气大气不稳定性与华北平原接近,相较于东部沿海平原和黄土高原地区更强。

$DAL$  用 700、500、400 hPa 3 层的平均温度露点差代表,该值越大表示空气越干或干层越深厚(高晓梅等,2018),即大气层结越不稳定,对冰雹等对流天气的出现越有利。图 3 中承德山区冰雹天气发生前  $DAL$  第 25%~75%分位数范围为 6~13℃,中位数

为 9℃,第 25%分位数和中位数均小于鲁中地区冰雹大风阈值,这可能与高晓梅等(2018)统计分析的均是大冰雹(直径 2 cm 以上)有关。 $CAPE$ 、 $CIN$  中位数分别为  $593 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $-16 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,  $CAPE$  中位数远小于鲁中和苏沪浙地区,这除与是否大冰雹有关外,还与利用 NCEP 再分析资料计算的  $CAPE$  与探空资料计算结果相比明显偏小有关(王秀明等,2012)。

## 2.3 动力抬升及特征高度参数

动力抬升触发是对流天气产生的基本条件之一。考虑承德山区海拔较高,选取  $DIV_{700}$ 、 $DIV_{850}$  和  $BLI$  (表 1)分析大尺度辐合抬升条件。结果显示(图 4a),承德山区冰雹天气发生前, $DIV_{700}$ 、 $DIV_{850}$  第 25%分位数分别为  $-0.5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 、 $-1.4 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ,中位数分别为  $0.3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 、 $0.1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ,即超过 25%的冰雹个例发生前低层存在有利的辐合抬升动力条件,但超过 50%的冰雹个例发生前低层不存在大尺度辐合上升,这与承德山区多局地对流触发现象是对应的。 $BLI$  中位数为  $-1.5^\circ\text{C}$ ,这与曹艳察等(2018)得出的中国一级阶梯冰雹的中位数( $-1.4^\circ\text{C}$ )接近,第 75%分位数为  $-0.3^\circ\text{C}$ ,即 75%以上的冰雹

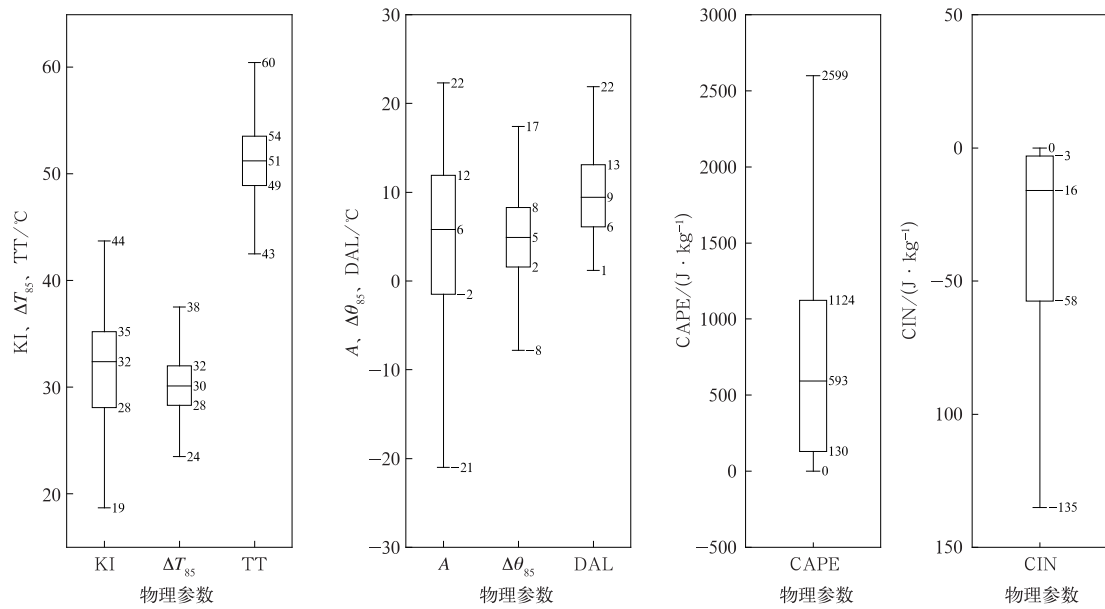


图 3 承德山区冰雹天气发生前对应的热力不稳定条件箱线图

Fig. 3 Box plot of thermodynamic instability condition before the occurrence of hail in Chengde Mountains

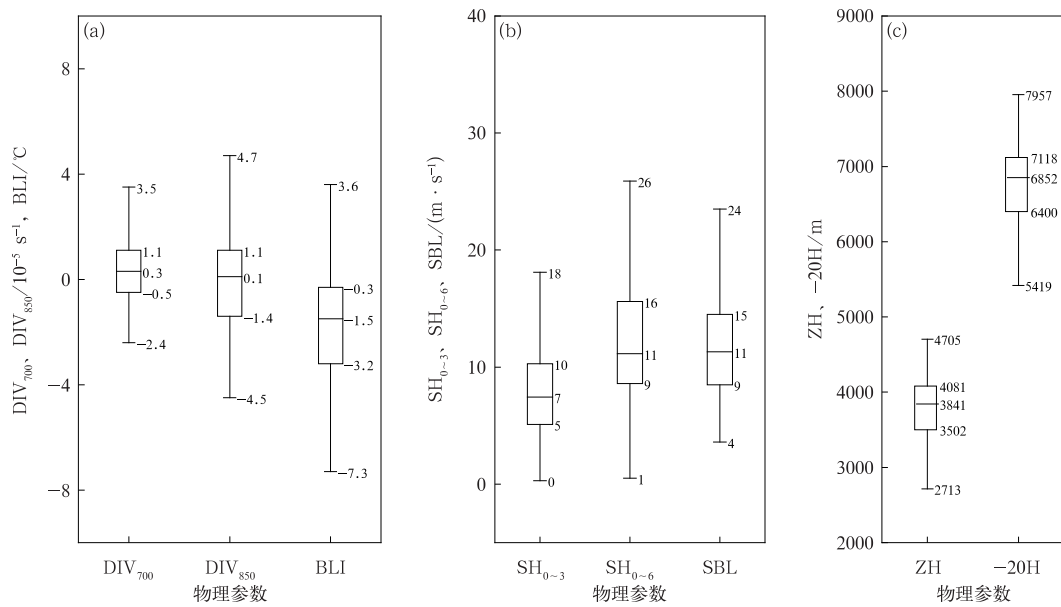


图 4 承德山区冰雹天气发生前对应的动力抬升及特殊层高度条件箱线图

Fig. 4 Box plot of dynamic uplift and characteristic height condition before the occurrence of hail in Chengde Mountains

天气发生前大气层结存在潜在不稳定。

垂直风切变矢量的大小和方向变化极大地影响着对流风暴的组织 and 演变,特别是对于可形成大冰雹的超级单体风暴,较强的垂直风切变是必不可少的条件(俞小鼎等,2006)。由图 4b 可见,承德山区

冰雹天气发生前  $SH_{0-3}$ 、 $SH_{0-6}$  (表 1) 中位数分别为  $7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $11 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,明显小于中国一级阶梯冰雹天气的  $15.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,有 75% 的过程  $SH_{0-6}$  在  $9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以上,小于鲁中地区冰雹大风阈值 ( $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )。风暴单体是随着风暴承载层的平均气流方向而平流

的,当对流层环境风场较强时,风暴运动主要取决于平流。本文用 850、700、500、300 hPa 这 4 层的平均风矢量绝对值表示 SBL(表 1)。承德山区冰雹天气发生前,SBL 中位数为  $11\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,第 25%~75%分位数的范围为  $9\sim15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,最大值为  $24\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,均与  $\text{SH}_{0\sim6}$  各值较为接近或一致,其第 25%分位数小于鲁中地区冰雹大风阈值( $12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )。

适宜的 ZH 和 -20H(表 1)有利于雹胚的形成和增长(濮文耀等,2015),因此 ZH 和 -20H 是判断冰雹天气是否会发生的重要环境条件。由图 4c 可见,超过 90%的冰雹个例 ZH、-20H 集中在 2713~4705 m 和 5419~7957 m,第 25%~75%分位数范围分别为 3502~4081 m、6400~7118 m,中位数分别为 3841 m 和 6852 m,均低于我国大冰雹天气的平均值 4300 m 和 7000 m(樊李苗和俞小鼎,2013),高于曹艳察等(2018)得出的中国一级阶梯冰雹天气中位数 3099 m 和 6304 m,这可能与未考虑冰雹大小及计算特殊层高度时未减去站点本身的海拔有关。

## 2.4 对流参数季节阈值特征

不同月份出现冰雹天气时的同一参数指标存在显著差异,因此基于不同月份给出上述 21 个关键参

数(表 1)的预报阈值,其中 DAL、ZH、-20H、CIN 以第 25%~75%分位数范围为预报阈值, $\text{DIV}_{700}$ 、 $\text{DIV}_{850}$  和 BLI 选取第 75%分位数作为预报阈值,其余参数均选取第 25%分位数作为预报阈值。由表 2 可知,PWAT、 $Q_{700}$ 、 $Q_{850}$  预报阈值均随着月份递增而先增大后减小,5 月最小,7 月、8 月达到最高值。5—8 月  $\text{RH}_{700}$  预报阈值也是先增后减,但 9 月阈值低于 7 月,高于 8 月。与  $\text{RH}_{700}$  相比, $\text{RH}_{850}$  预报阈值 5 月偏高 1%,其余月份均偏低 6%~13%,即承德山区冰雹天气对 700 hPa 相对湿度的要求高于 850 hPa。从热力不稳定参数预报阈值来看,KI、 $\Delta\theta_{85}$ 、CAPE 均随着月份的递增先增大后减小,7 月、8 月达到峰值; $\Delta T_{85}$ 、TT 预报阈值 7 月份最低,前者 5 月、6 月、8 月最高,后者 5 月最高;5 月 CIN 预报阈值为  $-128\sim-18\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,其绝对值显著高于其他月份,7 月最小。5 月、6 月、8 月 BLI 预报阈值分别  $\leq -0.8^\circ\text{C}$ 、 $\leq -0.2^\circ\text{C}$ 、 $\leq -1.2^\circ\text{C}$ ,表示大气层结存在潜在的不稳定性;从  $\text{DIV}_{700}$ 、 $\text{DIV}_{850}$  预报阈值来看,各月冰雹天气的出现与低层是否存在大尺度辐合并不呈现一一对应关系; $\text{SH}_{0\sim6}$  和 SBL 5 月预报阈值  $\geq 12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,均为各月中最大值,8 月均是最小值,分别为  $\geq 7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $\geq 6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。ZH 和 -20H

表 2 承德山区冰雹天气环境参数预报阈值

Table 2 Forecast thresholds of ambient parameters for hail in Chengde Mountains

参数名称	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	4—9 月
PWAT/mm	$\geq 14$	$\geq 21$	$\geq 25$	$\geq 25$	$\geq 19$	$\geq 21$
$\text{RH}_{700}/\%$	$\geq 46$	$\geq 53$	$\geq 57$	$\geq 55$	$\geq 56$	$\geq 53$
$\text{RH}_{850}/\%$	$\geq 47$	$\geq 42$	$\geq 44$	$\geq 49$	$\geq 43$	$\geq 44$
$Q_{700}/(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$	$\geq 3$	$\geq 3$	$\geq 6$	$\geq 5$	$\geq 4$	$\geq 4$
$Q_{850}/(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$	$\geq 5$	$\geq 6$	$\geq 8$	$\geq 8$	$\geq 6$	$\geq 6$
KI/ $^\circ\text{C}$	$\geq 25$	$\geq 28$	$\geq 32$	$\geq 32$	$\geq 27$	$\geq 28$
$\Delta T_{85}/^\circ\text{C}$	$\geq 29$	$\geq 29$	$\geq 27$	$\geq 29$	$\geq 28$	$\geq 28$
TT/ $^\circ\text{C}$	$\geq 51$	$\geq 49$	$\geq 48$	$\geq 50$	$\geq 49$	$\geq 49$
A/ $^\circ\text{C}$	$\geq 0.7$	$\geq -2.0$	$\geq -2.3$	$\geq -0.7$	$\geq -4.0$	$\geq -2.0$
$\Delta\theta_{85}/^\circ\text{C}$	$\geq 1$	$\geq 1$	$\geq 3$	$\geq 5$	$\geq 2$	$\geq 2$
DAL/ $^\circ\text{C}$	6~13	6~14	6~14	7~10	8~13	6~13
CAPE/ $(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1})$	$\geq 76$	$\geq 72$	$\geq 257$	$\geq 235$	$\geq 60$	$\geq 130$
CIN/ $(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1})$	-128~-18	-59~-4	-18~-2	-48~0	-42~-3	-58~-3
$\text{DIV}_{700}/10^{-5}\text{ s}^{-1}$	$\leq 0.4$	$\leq 1.2$	$\leq 0.8$	$\leq 2.0$	$\leq 1.0$	$\leq 1.1$
$\text{DIV}_{850}/10^{-5}\text{ s}^{-1}$	$\leq 1.8$	$\leq 1.1$	$\leq 1.2$	$\leq 1.2$	$\leq 1.0$	$\leq 1.1$
BLI/ $^\circ\text{C}$	$\leq -0.8$	$\leq -0.2$	$\leq 0$	$\leq -1.2$	$\leq 0.7$	$\leq -0.3$
$\text{SH}_{0\sim3}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$\geq 7$	$\geq 5$	$\geq 4$	$\geq 5$	$\geq 6$	$\geq 5$
$\text{SH}_{0\sim6}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$\geq 12$	$\geq 8$	$\geq 9$	$\geq 7$	$\geq 9$	$\geq 9$
SBL/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$\geq 12$	$\geq 9$	$\geq 8$	$\geq 6$	$\geq 11$	$\geq 9$
ZH/m	2904~3563	3547~3984	4003~4409	3811~4196	3284~3724	3502~4081
-20H/m	5467~6408	6520~7007	7079~7646	6913~7251	6156~6653	6400~7118



最低阈值均随着月份递增呈先增大后减小趋势,5月最小,7月达到最高值。

3 概率计算及预报模型构建和评估

3.1 概率计算

根据 1.3 节中提到的技术路线,进入分类器训练阶段,正、负样本建模数据按照 1.1 节数据要求进行选取。给定最优起步阈值的确定标准:(1)经该阈值条件筛选后得到的有冰雹样本数和无冰雹样本数能保持平衡;(2)筛选后得到的有冰雹样本要尽量包含全部实况冰雹个例;(3)筛选后得到的无冰雹样本不能包含实况冰雹个例。然后,基于箱线图分析结果得到最优起步阈值条件:将 21 个环境参数分为 3 组,即水汽(PWAT、RH<sub>700</sub>、RH<sub>850</sub>、Q<sub>700</sub>、Q<sub>850</sub>)、热力及动力(KI、ΔT<sub>85</sub>、TT、A、Δθ<sub>85</sub>、DAL、CAPE、CIN、DIV<sub>700</sub>、DIV<sub>850</sub>、BLI、SH<sub>0~3</sub>、SH<sub>0~6</sub>、SBL)、特殊层高度(ZH、-20H),每组中选出一个参数,以三个参数的第 5%分位数作为阈值进行组合,三个阈值同时满足时得到有冰雹样本和无冰雹样本;再按照最优起步阈值确定标准进行判定,不满足时参数重新组

合,最终试验给定 ΔT<sub>85</sub>≥24℃、Q<sub>850</sub>≥2.4 g·kg<sup>-1</sup>、ZH≥2713 m 参数组合为最优起步阈值条件,此时得到有冰雹样本 259 个,无冰雹样本 387 个,先验概率 P(y=1)=0.4,P(y=0)=0.6。

由于 NBC 算法中属性个数较多且各属性之间相关性较大时会影响分类结果,因此,在特征参数的选取上综合考虑以下三个方面:(1)各参数与冰雹天气的相关性,即对物理意义相似的预报因子,尽量只保留相关系数较大者;(2)尽量包含 MICAPS 4.7 版本探空预报中冰雹所用的物理参数;(3)尽量包含冰雹研究中利用频率较高的物理参数。最终以 RH<sub>850</sub>、Q<sub>850</sub>、KI、ΔT<sub>85</sub>、A、Δθ<sub>85</sub>、DAL、CAPE、CIN、BLI、SH<sub>0~6</sub>、ZH 等 12 个特征参数构建数据集,并基于 2.1~2.3 节分析结果将各参数 x 分别分为 5 个区间:x<第 5%分位数(1 区间)、第 5%分位数≤x<第 25%分位数(2 区间)、第 25%分位数≤x<第 75%分位数(3 区间)、第 75%分位数≤x<第 95%分位数(4 区间)、x≥第 95%分位数(5 区间),计算每个区间样本占总训练样本的概率。若区间统计个数为 0,按照式(5)、式(6)进行 Laplace 校准平滑处理,最后得到各参数不同区间条件概率(表 3)。

表 3 所选参数各区间条件概率

Table 3 Conditional probabilities of each interval of selected parameters

分类	区间	RH <sub>850</sub>	Q <sub>850</sub>	KI	ΔT <sub>85</sub>	A	Δθ <sub>85</sub>	DAL	CAPE	CIN	BLI	SH <sub>0~6</sub>	ZH
有冰雹	1	0.004	0.004	0.019	0.049	0.045	0.008	0.011	0.004	0.027	0.015	0.011	0.011
	2	0.201	0.144	0.186	0.341	0.299	0.265	0.242	0.273	0.110	0.242	0.383	0.155
	3	0.470	0.455	0.530	0.470	0.451	0.398	0.413	0.583	0.652	0.511	0.432	0.424
	4	0.322	0.371	0.261	0.136	0.193	0.311	0.299	0.136	0.121	0.208	0.152	0.326
	5	0.004	0.027	0.004	0.004	0.011	0.019	0.034	0.004	0.091	0.023	0.023	0.083
无冰雹	1	0.003	0.020	0.418	0.143	0.365	0.107	0.003	0.003	0.020	0.003	0.003	0.023
	2	0.531	0.554	0.380	0.347	0.418	0.645	0.110	0.872	0.074	0.013	0.319	0.286
	3	0.370	0.314	0.191	0.352	0.179	0.202	0.247	0.115	0.321	0.107	0.411	0.355
	4	0.092	0.105	0.008	0.153	0.036	0.038	0.482	0.008	0.247	0.518	0.242	0.212
	5	0.005	0.008	0.003	0.005	0.003	0.008	0.158	0.003	0.337	0.360	0.026	0.125

3.2 预报模型构建和评估

利用 NCEP-GFS 每日 4 次逐 3 h 预报资料计算承德山区 2021—2022 年 6—8 月各格点对应的 12 个特征环境参数,得到 3、6、9、12、24 h 时效预报满足起步阈值的格点样本数分别为 35 868、41 272、42 162、42 721、42 871,将各格点特征参数值匹配的区间条件概率代入决策方程式(8)和式(9),得到格

点冰雹预报,即 P(y=1)>P(y=0)预报有冰雹,P(y=0)>P(y=1)预报无冰雹。

本文选用了混淆矩阵方法(Beguería, 2006)对冰雹预报结果进行检验评估,评估要素如表 4 所示。

表 4 混淆矩阵评估要素

Table 4 Evaluation elements of confusion matrix

分类	预测无冰雹	预测有冰雹
实况无冰雹	TN	FP
实况有冰雹	FN	TP

检验指标包括命中率(POD)、空报率(FAR)、漏报率(MAR)、临界成功指数(CSI)和准确率,计算方法分别见式(10)~式(14)。

$$\text{POD} = \text{TP}/(\text{TP} + \text{FN}) \times 100\% \quad (10)$$

$$\text{FAR} = \text{FP}/(\text{FP} + \text{TN}) \times 100\% \quad (11)$$

$$\text{MAR} = \text{FN}/(\text{TP} + \text{FN}) \times 100\% \quad (12)$$

$$\text{CSI} = \text{TP}/(\text{TP} + \text{FP} + \text{FN}) \times 100\% \quad (13)$$

$$\text{准确率} = \text{TP}/(\text{TP} + \text{FP}) \times 100\% \quad (14)$$

不同时效预报检验结果(表 5)可见,利用贝叶斯方法识别的 3、6、9、12、24 h 时效冰雹预报 POD 分别为 96.0%、92.9%、93.8%、90.8% 和 91.7%,平均为 93.0%,平均 CSI 为 40.3%,FAR 分布在 52.1%~55.4%,整体预报效果较好,因此,该方法在冰雹天气识别中具有一定的可行性,可以为承德山区冰雹天气的潜势预报及短时临近预警提供新思路和新参考。

表 5 2021—2022 年 6—8 月承德山区冰雹天气不同时效预报的检验结果(单位:%)

Table 5 Test results of hail forecasts with different lead times in Chengde Mountains from June to August during 2021—2022 (unit: %)

预报时效	POD	FAR	MAR	CSI	准确率
3 h	96.0	52.1	4.0	30.7	31.1
6 h	92.9	52.9	7.1	43.8	45.4
9 h	93.8	52.9	6.2	43.5	44.8
12 h	90.8	53.4	9.2	41.7	43.6
24 h	91.7	55.4	8.3	41.7	43.4
平均	93.0	53.3	7.0	40.3	41.7

## 4 个例检验

### 4.1 2022 年 6 月 10 日个例

2022 年 6 月 10 日,受强雹暴云团影响,承德市多地出现冰雹天气,最大冰雹直径 2 cm,最大落雹厚度达 10 cm,并伴有强雷电、短时大风和短时强降水。从 14:00 北京探空图来看(图略),CAPE 值达到  $955.4 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,CIN 为  $0 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,KI 为  $30.2^\circ\text{C}$ ,抬升指数为  $-6.6^\circ\text{C}$ ,TT 超过  $50^\circ\text{C}$ ,大气环境层结不稳定;近地层到 500 hPa 从东南风顺时针旋转为偏西风,风矢量差为  $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,达到中等强度,有利于强对流天气的发生和维持;ZH 为 3910 m,为雹胚的形成和增长提供了适宜条件。雷达回波、FY-4A 可见光云图显示,15:15 左右(图 5a),对流云系覆盖承德东北部,雹暴云团 A 开始发展,上风方边界整齐光滑,呈 V 型,此处不断有对流单体初生、发展,下风边界由卷云覆盖;17:45 左右(图 5b),雹暴云团 A 东移影响平泉、承德县、隆化东南部区域,风暴主体处于成熟阶段,具有上冲云顶、暗影结构,对流活动旺盛,回波中心最大强度达 65 dBz(图 5c),且质心较高,55 dBz 强回波发展到 8 km(图 5d)。

该雹暴云团整个生命史为 6 h 左右,其控制下的强对流单体不断新生传播及发展东移导致了此次承德强对流天气过程。

利用贝叶斯方法对 10 日 17:00 雹暴云团成熟阶段出现的冰雹天气进行识别,从检验结果来看(图 6a~6c),提前 3、6、12 h 时效均可识别出承德山区的冰雹天气,POD 均为 100%。

### 4.2 2021 年 7 月 1 日个例

2021 年 7 月 1 日下午到夜间,受冷涡影响,承德山区出现强雷电、短时大风、短时强降水、冰雹等强对流天气,市区、隆化和承德县均监测到冰雹,最大冰雹直径 2.5 cm。从 15:00 识别结果来看(图 7),POD 较高,提前 3、6、12 h 时效无一漏报。

### 4.3 2021 年 8 月 16 日个例

2021 年 8 月 16 日午后到傍晚,受冷涡影响,承德多地出现冰雹、短时强降水、雷暴大风等强对流天气,国家站监测到最大冰雹直径为 0.8 cm。该个例的结果(图 8)与前两个类似,POD 均较高,提前 3、6、12 h 时效预报的 POD 均达 88% 以上,反映出贝叶斯方法在冰雹天气识别中具有一定的可行性。

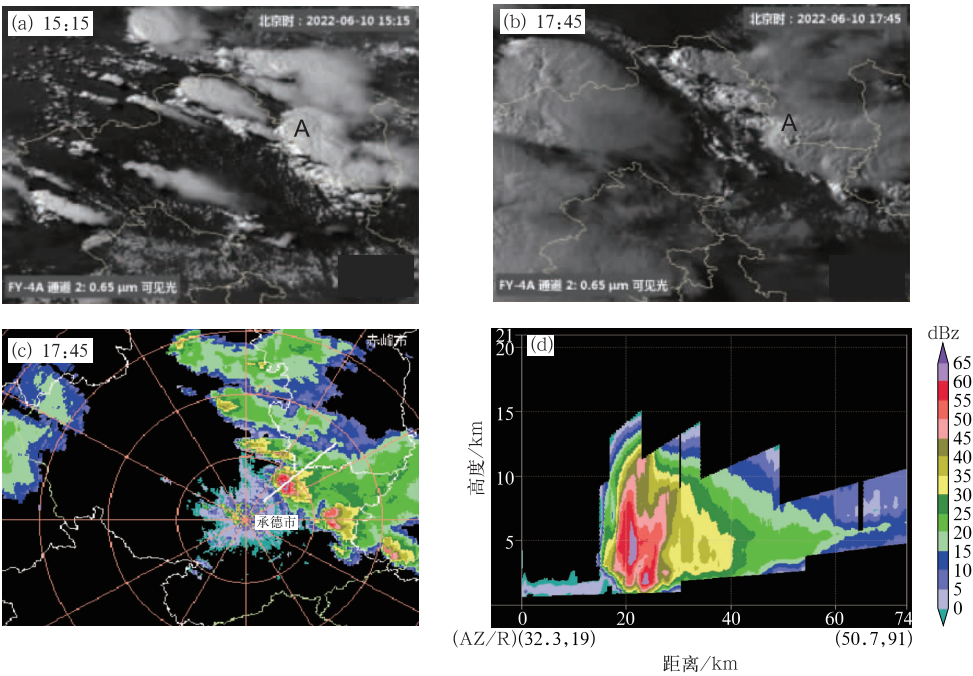


图 5 2022 年 6 月 10 日(a,b)FY-4A 可见光云图,(c)承德雷达组合反射率因子,(d)沿图 5c 中白线的组合反射率因子剖面  
Fig. 5 (a, b) FY-4A visible cloud image, (c) composite reflectivity factor of Chengde Radar, (d) vertical cross-section of composite reflectivity factor along the white line in Fig. 5c on 10 June 2022

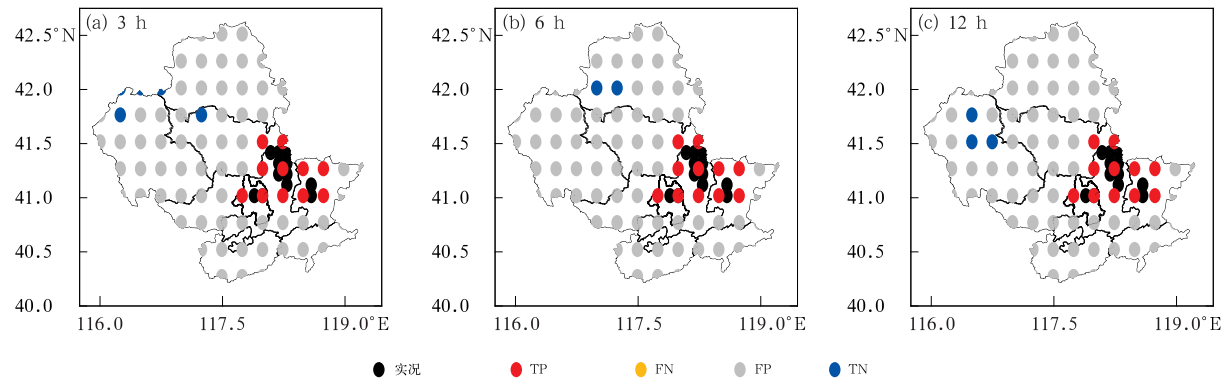


图 6 利用贝叶斯方法对 2022 年 6 月 10 日 17:00 承德山区冰雹的潜势预报结果  
Fig. 6 Hail potential forecast results in Chengde Mountains at 17:00 BT 10 June 2022 by the Bayesian method

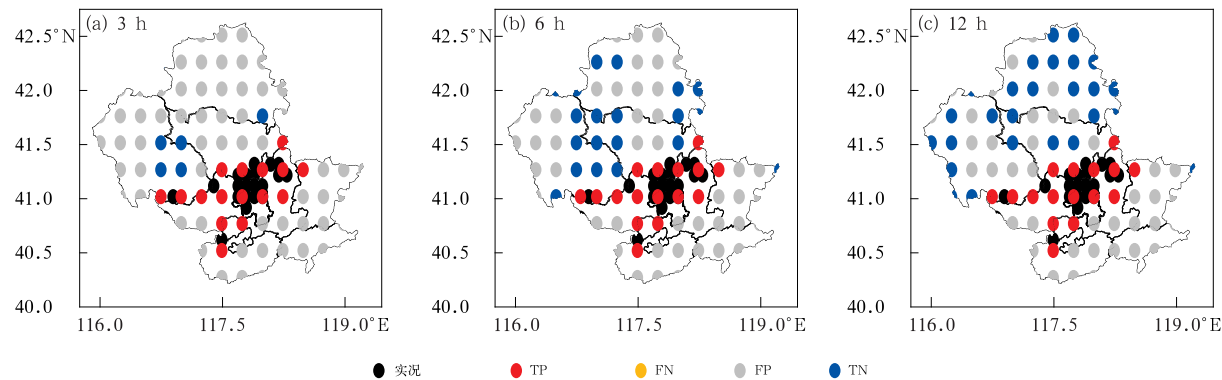


图 7 利用贝叶斯方法对 2021 年 7 月 1 日 15:00 承德山区冰雹的潜势预报结果  
Fig. 7 Hail potential forecast results in Chengde Mountains at 15:00 BT 1 July 2021 by the Bayesian method

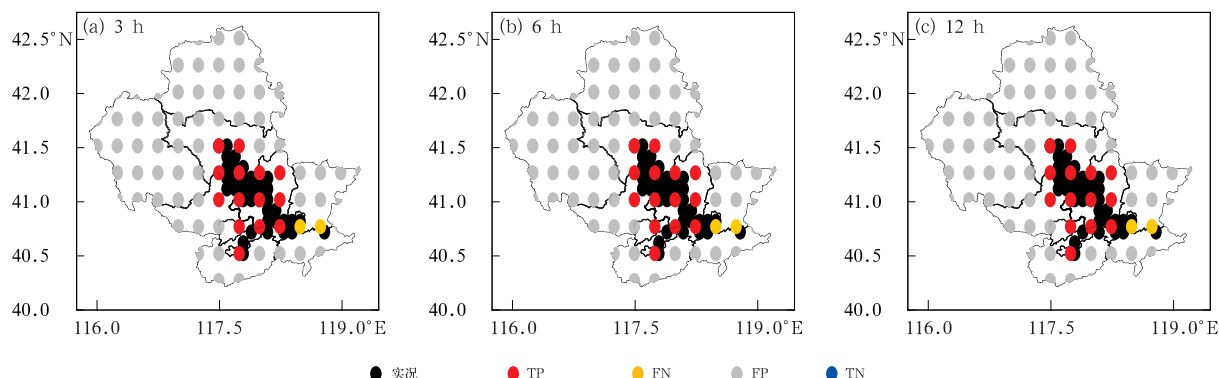


图 8 利用贝叶斯方法对 2021 年 8 月 16 日 15:00 承德山区冰雹的潜势预报结果

Fig. 8 Hail potential forecast results in Chengde Mountains at 15:00 BT 16 August 2021 by the Bayesian method

## 5 结论与讨论

本文基于承德山区实况冰雹数据, NCEP FNL 再分析资料、多普勒天气雷达资料以及 NCEP-GFS 预报资料, 统计分析了承德山区产生冰雹的天气背景, 利用贝叶斯方法建立了五个时效的冰雹潜势预报模型, 对 2021—2022 年 6—8 月承德山区的天气过程进行预报研究, 并利用三个冰雹天气个例进行验证, 得出以下结论:

(1) 承德山区冰雹发生前低层水汽较短时强降雨过程显著偏小, 超过 50% 的冰雹个例发生前低层不存在大尺度辐合上升, 这与承德山区多局地对流触发现象是对应的。与中国其他地区冰雹天气环境特征异同之处主要有: 低层水汽、BLI 中位数接近中国一级阶梯冰雹数值, 但 SH06 相反, KI、A 平均值明显高于苏沪浙区域性冰雹和陇东冰雹, 平均 CAPE、CIN 小于鲁中地区冰雹。

(2) 不同月份出现冰雹天气的同一参数指标存在显著差异, PWAT、Q700、Q850、KI、 $\Delta\theta_{85}$ 、CAPE、ZH 和 -20H 预报阈值均随着月份的递增先增大后减小, 7 月、8 月达到峰值, 7 月 CIN 最小; SH06 和 SBL 5 月预报阈值为  $\geq 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 为各月中最大值, 8 月最小; DIV700、DIV850 表征各月冰雹天气的出现与低层是否存在大尺度辐合不呈现一一对应关系。

(3) 对 2021—2022 年 6—8 月冰雹天气过程的检验结果显示, 贝叶斯方法具有一定的可行性, 五种模型的平均临界成功指数为 40.3%, 命中率均在 90% 以上, 但存在一定的虚警, 这是由于利用更大时

空尺度的物理量预测更小时空尺度的强对流发生潜势, 不可避免存在较高空报率; 从三次个例的检验结果来看, 命中率均可达 88% 以上, 表明该方法对冰雹天气短期时段潜势预报及短临预警有较好的指示作用。

由于承德山区地形复杂, 地表受热不均, 加之地形局地环流影响, 易触发中小尺度对流系统, 降雹分布极不均匀, 致灾概率高, 给预报预警工作带来了极大挑战, 实现冰雹的精细化预报仍然是目前强对流分类预报业务中的重点和难点。利用贝叶斯方法构建的冰雹潜势预报模型有别于概率预报和配料法, 可以给出 0~24 h 冰雹有无的确定性预报, 客观性更强, 但虚警率仍然不低, 后续将考虑从两个角度进行消空改进, 即采用朴素贝叶斯自适应方法 (Liang and Hu, 2022) 客观选定最优起步初值条件和基于逐月各环境参数预报阈值分月选定起步初值条件进行建模, 以进一步提升山区冰雹预报预警能力。

## 参考文献

- 曹艳察, 田付友, 郑永光, 等, 2018. 中国两级阶梯地势区域冰雹天气的环境物理量统计特征[J]. 高原气象, 37(1): 185-196. Cao Y C, Tian F Y, Zheng Y G, et al, 2018. Statistical characteristics of environmental parameters for hail over the two-step terrains of China[J]. Plateau Meteorol, 37(1): 185-196(in Chinese).
- 董春卿, 武永利, 郭媛媛, 等, 2021. 山西强对流天气分类指标与判据的应用[J]. 干旱气象, 39(2): 345-355. Dong C Q, Wu Y L, Guo Y Y, et al, 2021. Application of classification indexes and criterion on severe convection weather in Shanxi Province[J]. J Arid Meteorol, 39(2): 345-355(in Chinese).
- 樊李苗, 俞小鼎, 2013. 中国短时强对流天气的若干环境参数特征分析[J]. 高原气象, 32(1): 156-165. Fan L M, Yu X D, 2013. Characteristic analyses on environmental parameters in short-term

- severe convective weather in China[J]. Plateau Meteor, 32(1): 156-165(in Chinese).
- 高晓梅, 俞小鼎, 马守强, 等, 2019. 鲁中地区强对流天气的气候特征及相关环境参数特征分析[J]. 海洋气象学报, 39(3): 43-54. Gao X M, Yu X D, Ma S Q, et al, 2019. Climatic characteristics and environmental parameters of severe convective weather in central region of Shandong Province[J]. J Mar Meteor, 39(3): 43-54(in Chinese).
- 高晓梅, 俞小鼎, 王令军, 等, 2018. 鲁中地区分类强对流天气环境参量特征分析[J]. 气象学报, 76(2): 196-212. Gao X M, Yu X D, Wang L J, et al, 2018. Characteristics of environmental parameters for classified severe convective weather in central area of Shandong Province[J]. Acta Meteor Sin, 76(2): 196-212(in Chinese).
- 《河北省天气预报手册》编写组, 2017. 河北省天气预报手册[M]. 北京: 气象出版社. The Writing Group of Hebei Province Weather Forecast Manual, 2017. Hebei Province Weather Forecasting Manual[M]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 雷蕾, 孙继松, 王国荣, 等, 2012. 基于中尺度数值模式快速循环系统的强对流天气分类概率预报试验[J]. 气象学报, 70(4): 752-765. Lei L, Sun J S, Wang G R, et al, 2012. An experimental study of the summer convective weather categorical probability forecast based on the rapid updated cycle system for the Beijing Area (BJ-RUC)[J]. Acta Meteor Sin, 70(4): 752-765(in Chinese).
- 雷蕾, 孙继松, 魏东, 2011. 利用探空资料判别北京地区夏季强对流的天气类别[J]. 气象, 37(2): 136-141. Lei L, Sun J S, Wei D, 2011. Distinguishing the category of the summer convective weather by sounding data in Beijing[J]. Meteor Mon, 37(2): 136-141(in Chinese).
- 李博勇, 胡志群, 郑佳锋, 等, 2021. 利用贝叶斯方法改进华南地区冰雹识别效果[J]. 热带气象学报, 37(1): 112-125. Li B Y, Hu Z Q, Zheng J F, et al, 2021. Using Bayesian method to improve hail identification in South China[J]. J Trop Meteor, 37(1): 112-125(in Chinese).
- 李江波, 王宗敏, 王福侠, 等, 2011. 华北冷涡连续降雹的特征与预报[J]. 高原气象, 30(4): 1119-1131. Li J B, Wang Z M, Wang F X, et al, 2011. Characteristic and forecasting of continuous hail shooting processes caused by the North China cold vortex[J]. Plateau Meteor, 30(4): 1119-1131(in Chinese).
- 李文娟, 赵放, 郇敏杰, 等, 2018. 基于数值预报和随机森林算法的强对流天气分类预报技术[J]. 气象, 44(12): 1555-1564. Li W J, Zhao F, Li M J, et al, 2018. Forecasting and classification of severe convective weather based on numerical forecast and random forest algorithm[J]. Meteor Mon, 44(12): 1555-1564(in Chinese).
- 刘晓璐, 刘建西, 张世林, 等, 2014. 基于探空资料因子组合分析方法的冰雹预报[J]. 应用气象学报, 25(2): 168-175. Liu X L, Liu J X, Zhang S L, et al, 2014. Hail forecast based on factor combination analysis method and sounding data[J]. J Appl Meteor Sci, 25(2): 168-175(in Chinese).
- 路亚奇, 曹彦超, 张峰, 等, 2016. 陇东冰雹天气特征分析及预报预警[J]. 高原气象, 35(6): 1565-1576. Lu Y Q, Cao Y C, Zhang F, et al, 2016. The prediction and forewarning system as well as weather characteristics analyses of hail in the east of Gansu[J]. Plateau Meteor, 35(6): 1565-1576(in Chinese).
- 马鸿青, 于雷, 司丽丽, 等, 2014. 保定地区冰雹的气候及物理量参数特征[J]. 干旱气象, 32(4): 616-621, 628. Ma H Q, Yu L, Si L L, et al, 2014. Climatology and physical parameters characteristics of hail in Baoding[J]. J Arid Meteor, 32(4): 616-621, 628(in Chinese).
- 莫丽霞, 高宪权, 欧徽宁, 等, 2020. 基于数值模式产品的广西冰雹客观预报方法研究[J]. 干旱气象, 38(3): 480-489. Mo L X, Gao X Q, Ou H N, et al, 2020. Study of objective forecast method of Guangxi hail based on numerical model product[J]. J Arid Meteor, 38(3): 480-489(in Chinese).
- 牛淑贞, 张一平, 王迪, 等, 2021. 河南省分类强对流天气概率预报方法研究与应用[J]. 气象与环境科学, 44(1): 1-12. Niu S Z, Zhang Y P, Wang D, et al, 2021. Probability forecasting method for classified severe convections in Henan Province and its objective product application[J]. Meteor Environ Sci, 44(1): 1-12(in Chinese).
- 濮文耀, 李红斌, 宋煜, 等, 2015. 0℃层高度的变化对冰雹融化影响的分析和应用[J]. 气象, 41(8): 980-985. Pu W Y, Li H B, Song Y, et al, 2015. Analysis and application of the effect of 0℃ layer height on melting hail[J]. Meteor Mon, 41(8): 980-985(in Chinese).
- 仇娟娟, 何立富, 2013. 苏沪浙地区短时强降水与冰雹天气分布及物理量特征对比分析[J]. 气象, 39(5): 577-584. Qiu J J, He L F, 2013. Comparative analysis on weather characteristics and convective parameters of torrential rain and hail in Yangtze River Delta[J]. Meteor Mon, 39(5): 577-584(in Chinese).
- 史纬恒, 王磊, 韩飞, 等, 2018. 聊城地区强对流天气预报模型的对流参数选取研究[J]. 暴雨灾害, 37(6): 549-557. Shi W H, Wang L, Han F, et al, 2018. Study on choosing convection parameters in strong convective weather forecast model of Liaocheng Area[J]. Torr Rain Dis, 37(6): 549-557(in Chinese).
- 斯琴, 王佳津, 荀学义, 等, 2016. 基于 T639 对流参数的内蒙古强对流天气潜势预报方法初探[J]. 干旱气象, 34(5): 906-911. Si Q, Wang J J, Xun X Y, et al, 2016. Preliminary study on potential forecast method of strong convective weather in Inner Mongolia based on T639 convective parameters[J]. J Arid Meteor, 34(5): 906-911(in Chinese).
- 孙继松, 戴建华, 何立富, 等, 2014. 强对流天气预报的基本原理与技术方法: 中国强对流天气预报手册[M]. 北京: 气象出版社. Sun J S, Dai J H, He L F, et al, 2014. The Basic Principles and Methods of Convective Weather Forecasting: China Convective Weather Forecasting Manual[M]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 孙霞, 俞海洋, 孙斌, 等, 2014. 河北省主要气象灾害时空变化的统计分析[J]. 干旱气象, 32(3): 388-392. Sun X, Yu H Y, Sun B, et al, 2014. Statistical analysis of meteorological disasters in

- Hebei Province[J]. *J Arid Meteor*, 32(3):388-392(in Chinese).
- 田付友, 张小玲, 曹艳察, 等, 2022. 中国中低海拔地区三类强对流天气环境条件的基本气候特征[J]. *高原气象*, 41(6):1446-1459.
- Tian F Y, Zhang X L, Cao Y C, et al, 2022. Baseline climatology of environmental parameters for three severe convective weather phenomena over middle-low areas of China[J]. *Plateau Meteor*, 41(6):1446-1459(in Chinese).
- 王迪, 牛淑贞, 曾明剑, 等, 2020. 河南省分类强对流环境物理条件特征分析[J]. *气象*, 46(5):618-628. Wang D, Niu S Z, Zeng M J, et al, 2020. Analysis on the characteristics of environmental and physical conditions for the classified severe convections in Henan Province[J]. *Meteor Mon*, 46(5):618-628(in Chinese).
- 王宏, 王秀明, 姜云雁, 等, 2021. 承德山区夏季短时强降水的时空分布及环境参数特征[J]. *气象*, 47(12):1469-1483. Wang H, Wang X M, Jiang Y Y, et al, 2021. Spatio-temporal distribution and environmental parameters of short-time severe precipitation in the Chengde Mountains in summer[J]. *Meteor Mon*, 47(12):1469-1483(in Chinese).
- 王秀明, 俞小鼎, 朱禾, 2012. NCEP 再分析资料在强对流环境分析中的应用[J]. *应用气象学报*, 23(2):139-146. Wang X M, Yu X D, Zhu H, 2012. The applicability of NCEP reanalysis data to severe convection environment analysis[J]. *J Appl Meteor Sci*, 23(2):139-146(in Chinese).
- 尉英华, 花家嘉, 王莹, 等, 2023. 近 11 年天津冰雹统计特征及对流参数指标分析[J]. *气象*, 49(2):213-223. Wei Y H, Hua J J, Wang Y, et al, 2023. Statistical characteristics and convection indicators of hailstorm over Tianjin in recent 11 years[J]. *Meteor Mon*, 49(2):213-223(in Chinese).
- 吴举秀, 胡志群, 夏凡, 等, 2023. 基于贝叶斯方法的冰雹大小识别研究[J]. *气象学报*, 81(5):801-814. Wu J X, Hu Z Q, Xia F, et al, 2023. Hail size discrimination based on the Bayesian method[J]. *Acta Meteor Sin*, 81(5):801-814(in Chinese).
- 俞小鼎, 姚秀萍, 熊廷南, 等, 2006. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京:气象出版社. Yu X D, Yao X P, Xiong T N, et al, 2006. Principle and Application of Doppler Weather Radar[M]. Beijing:China Meteorological Press(in Chinese).
- 曾明剑, 王桂臣, 吴海英, 等, 2015. 基于中尺度数值模式的分类强对流天气预报方法研究[J]. *气象学报*, 73(5):868-882. Zeng M J, Wang G C, Wu H Y, et al, 2015. Study of the forecasting method for the classified severe convection weather based on a meso-scale numerical model[J]. *Acta Meteor Sin*, 73(5):868-882(in Chinese).
- 张文海, 李磊, 2019. 人工智能在冰雹识别及临近预报中的初步应用[J]. *气象学报*, 77(2):282-291. Zhang W H, Li L, 2019. A preliminary application of artificial intelligence on the detection and nowcasting of hail weather[J]. *Acta Meteor Sin*, 77(2):282-291(in Chinese).
- 张晓辉, 高艳春, 易永力, 等, 2022. 承德市冰雹时空分布特征及雷达预警指标分析[J]. *沙漠与绿洲气象*, 16(2):16-22. Zhang X H, Gao Y C, Yi Y L, et al, 2022. Spatial and temporal distribution characteristics and radar early warning indicators of hail in Chengde City[J]. *Desert Oasis Meteor*, 16(2):16-22(in Chinese).
- 张小玲, 湛芸, 张涛, 2012. 对流天气预报中的环境场条件分析[J]. *气象学报*, 70(4):642-654. Zhang X L, Chen Y, Zhang T, 2012. Meso-scale convective weather analysis and severe convective weather forecasting[J]. *Acta Meteor Sin*, 70(4):642-654(in Chinese).
- 张一平, 吴蓁, 苏爱芳, 等, 2013. 基于流型识别和物理量要素分析河南强对流天气特征[J]. *高原气象*, 32(5):1492-1502. Zhang Y P, Wu Z, Su A F, et al, 2013. Analysis on severe convective weather characteristic in Henan based on flow pattern identification and physical elements[J]. *Plateau Meteor*, 32(5):1492-1502(in Chinese).
- 周方媛, 戴建华, 陈雷, 2020. 基于关键对流参数分级的强对流潜势预报[J]. *气象科技*, 48(2):229-241. Zhou F Y, Dai J H, Chen L, 2020. Severe convective potential forecast based on key convective parameter classification[J]. *Meteor Sci Technol*, 48(2):229-241(in Chinese).
- Begueria S, 2006. Validation and evaluation of predictive models in hazard assessment and risk management[J]. *Nat Hazards*, 37(3):315-329.
- Johnson A W, Sugden K E, 2014. Evaluation of sounding-derived thermodynamic and wind-related parameters associated with large hail events[J]. *E-J Severe Storms Meteor*, 9(5):1-42.
- Liang Z M, Hu Z Q, 2022. A Bayes-based approach against sample imbalance to improving the potential forecasts of gale[J]. *Geophys Res Lett*, 49(18):e2022GL100019.
- Marzano F S, Scaranari D, Montopoli M, et al, 2008. Supervised classification and estimation of hydrometeors from C-band dual-polarized radars: A Bayesian approach[J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 46(1):85-98.
- Marzban C, Witt A, 2001. A Bayesian neural network for severe-hail size prediction[J]. *Wea Forecasting*, 16(5):600-610.
- McNulty R P, 1995. Severe and convective weather: a central region forecasting challenge[J]. *Wea Forecasting*, 10(2):187-202.
- Tian F Y, Zheng Y G, Zhang T, et al, 2015. Statistical characteristics of environmental parameters for warm season short-duration heavy rainfall over central and eastern China[J]. *J Meteor Res*, 29(3):370-384.

(本文责编:张芳)