

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).

近 11 年天津冰雹统计特征及对流参数指标分析*

尉英华¹ 花家嘉² 王莹¹ 卢焕珍¹

¹ 天津市气象台,天津 300074

² 河北雄安新区气象局,雄安 071700

提 要: 针对 2009—2019 年天津地区 70 次冰雹天气过程时空特征进行统计分析,并利用美国国家环境预报中心全球模式业务系统分析资料(NCEP FNL)和地面气象观测数据构建融合探空序列,对比分析不同月份、不同天气型和不同大小冰雹的环境条件差异,给出相应的环境参数指标。结果表明:天津降雹主要出现在 4—9 月,其中 6 月冰雹和大冰雹发生日数分别占 49.4%、60.0%,12—20 时冰雹和大冰雹发生概率分别占 74.8%、100%。冰雹发生前对流有效位能(CAPE)、抬升指数(LI)、垂直风切变(SHR)、湿球 0℃层高度(H_{WBZ})、大气可降水量(TPW)均存在明显的月变化特征,但总指数(TT)和强天气威胁指数(SWEAT)作为预报判据时其月变化并不明显,4 月和 9 月大多数冰雹天气发生在“低能强切变”条件下,7 月和 8 月则多发生在“中高能弱切变”条件下。此外,不同月份 H_{WBZ} 平均比干球 0℃层高度(H_{DBZ})偏低 0.4~0.9 km,除了 7 月和 8 月极少数冰雹 H_{WBZ} 位于 4.0~4.2 km 范围,其余冰雹天气过程均发生在低于 3.9 km 的环境条件下,5 月和 9 月均低于 3.5 km。高空冷涡型、西北气流型环境物理量阈值差异并不显著,但两者与西来槽型阈值差异明显。高空冷涡型、西北气流型冰雹通常发生在 $SHR > 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $H_{WBZ} < 3.6 \text{ km}$ 、 $TPW > 27 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 的环境条件下,西来槽型冰雹多发生在 $SHR > 9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $H_{WBZ} < 3.9 \text{ km}$ 、 $TPW > 36 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 的环境条件下。冰雹大小与 H_{WBZ} 、SHR 关系密切,以 6 月为例,非大冰雹一般发生在 $H_{WBZ} < 3.9 \text{ km}$ 、 $SHR > 9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的环境条件下,而大冰雹则均发生在 $H_{WBZ} < 3.5 \text{ km}$ 、 $SHR > 11 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的环境条件下。

关键词: 冰雹,湿球 0℃层,垂直风切变

中图分类号: P456

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2022.072201

Statistical Characteristics and Convection Indicators of Hailstorm over Tianjin in Recent 11 Years

WEI Yinghua¹ HUA Jiajia² WANG Ying¹ LU Huanzhen¹

¹ Tianjin Meteorological Observatory, Tianjin 300074

² Xiongan New Area Meteorological Station of Hebei, Xiongan 071700

Abstract: Based on the NCEP FNL ($1^\circ \times 1^\circ$) global analysis data and surface meteorological observations, the spatio-temporal characteristics of the 70 hailstorms in Tianjin from 2009 to 2019 are statistically analyzed, and the fusion sounding data are constructed to calculate the environmental parameters for hailstorms. Additionally, the environmental conditions for hailstorms in different months, different circulation patterns and different sizes are compared, and the corresponding prediction indices are given. The results show that the hailstorm in Tianjin mainly occurs from April to September, especially the hail and big hail days in June account for 49.4% and 60.0%, and the probability of hail and big hail from 12:00 BT to 20:00 BT account for 74.8% and 100%, respectively. Besides, the environmental parameters for hailstorms,

* 国家自然科学基金项目(41575049)、中国气象局预报员专项(CMAYBY2020-008)及天津市气象局气象预报预警创新团队共同资助

2022 年 1 月 13 日收稿; 2022 年 7 月 10 日收修定稿

第一作者:尉英华,主要从事强对流预报技术研究. E-mail: weyinghua1980@163.com

通讯作者:卢焕珍,主要从事强对流预报技术研究. E-mail: lu_hz12@sina.com

such as convective available potential energy (CAPE), lift index (LI), vertical wind shear (SHR), wet bulb 0°C layer height (H_{WBZ}) and total precipitable water (TPW), have obvious monthly variations and they should be noted significantly as prediction indicators. In April and September, the hailstorms mostly occur in low CAPE and high SHR conditions, but in July and August, the hailstorms often occur in medium-high CAPE and low SHR conditions. Additionally, the average H_{WBZ} is $0.4\text{--}0.9$ km lower than dry bulb 0°C layer height (H_{DBZ}), except that a very small number of hail in July and August H_{WBZ} is in the range of $4.0\text{--}4.2$ km. The other hails always occur in $H_{\text{WBZ}} < 3.9$ km conditions. The environmental conditions of cold vortex pattern and northwest flow pattern are not significantly different, but they are obviously different from the western trough pattern. The hailstorms of cold vortex pattern and northwest flow pattern usually occur under $\text{SHR} > 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $H_{\text{WBZ}} < 3.6$ km and $\text{TPW} > 27 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, while hailstorms of the western trough pattern mostly occur under $\text{SHR} > 9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $H_{\text{WBZ}} < 3.9$ km and $\text{TPW} > 36 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$. As for the hail, it is closely related to H_{WBZ} and SHR. Take June as example. Small hails generally occur under $H_{\text{WBZ}} < 3.9$ km and $\text{SHR} > 9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, while big hails appear under $H_{\text{WBZ}} < 3.5$ km and $\text{SHR} > 11 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Key words: hail, wet bulb 0°C layer, vertical wind shear

引 言

冰雹是我国最严重的气象灾害之一,往往给农业生产、交通运输和建筑设施等带来极大危害。我国地理条件复杂,不同地区冰雹高发季节略有差异,但大部分地区雹暴主要发生在午后至傍晚时段(黄玉霞等,2017;马晓玲等,2020),由于范围小、时间短、来势猛、强度大,其预报预警一直是气象业务中的难点。实际业务中,短时临近时效的冰雹预报往往依赖于雷达、卫星等遥感手段,但由于遥感资料外推时效性限制,短期时效的冰雹预报仍然依赖于环境条件识别。

近年来,国内许多学者对华北地区冰雹天气的环境条件进行了广泛而深入的研究。既有的诸多个例(范皓等,2019;罗琪等,2019;孙萌宇等,2020;王建恒等,2020;陈瑞敏等,2021;刘艳杰等,2021)表明华北地区冰雹对环境条件具有明显的敏感性,冰雹的产生很大程度上取决于大气层结状态;王在文等(2010)、李江波等(2011)分别针对蒙古冷涡、华北冷涡背景下的降雹天气特征进行分析,认为冰雹环境条件表现为丰富的水汽、强的垂直风切变、适宜的 0°C 层高度和一定的不稳定层结;刘艳杰等(2018)通过2006—2015年廊坊市冰雹环境物理量统计,指出冰雹多发生在“上干冷、下暖湿”的层结条件下,且与

对流有效位能、850~500 hPa 温差、 0°C 层高度及垂直风切变等具有较好的相关性,并给出了相关环境参数指标。

上述研究往往是基于某个冰雹典型个例进行分析,或是针对某种天气形势下的多个冰雹样例进行统计,部分研究虽开展了冰雹天气型划分,但由于样本不足,并未对不同季节或不同天气型背景下的环境热力、动力、水汽和特殊高度条件进行细致对比。曾明剑等(2015)、王迪等(2020)指出不同季节强对流天气发生前环境参数表现出一定的差异性,但以往天津冰雹研究主要针对典型个例进行诊断(许长义等,2017;尉英华等,2018),缺少相关统计分析,因此对比不同月份、不同天气型、不同大小冰雹发生的环境条件及其差异,对于天津冰雹潜势预报具有积极意义。本文收集了2009—2019年天津地区共70次冰雹天气过程,在较长时间尺度、较多样本数量上对比分析冰雹的环境条件差异,揭示并遴选出不同月份、不同天气型、不同大小的冰雹天气环境参数特征值作为预报指标,以期为冰雹天气潜势预报提供更加细致的科学参考。由于天津本地未设探空站,尝试将NCEP FNL($1^{\circ} \times 1^{\circ}$)全球分析资料与地面气象观测数据融合,构建针对冰雹发生区域的融合探空序列,以弥补远距离探空分析所带来的空间偏差,进一步提升预报指标的代表性,为业务人员提供更加可靠的预报依据。

1 资料及方法

1.1 资料说明

所用资料包括:①2009—2019 年国家气象信息中心下发的地面特殊天气资料、天津市气象信息中心数据库冰雹记录、区级气象部门核实并上报的灾情报告和业务值班记录等多源信息;②2009—2019 年国家常规气象站逐 1 h 观测数据,包括气温、气压、风向、风速等,该资料已经过国家气象信息中心质量控制;③美国国家环境预报中心同时期的 NCEP FNL($1^\circ \times 1^\circ$)逐 6 h 全球分析资料(以下简称为 NCEP FNL 分析资料),包括 21 个高度层的经向风速、纬向风速、相对湿度、温度等。

1.2 样本选取

由于缺乏有效的冰雹自动观测手段,通过以下几个步骤对冰雹个例进行遴选:①根据国家气象信息中心下发的地面特殊天气资料和天津市气象信息中心数据库冰雹记录,确定 2009—2019 年天津地区共 35 次冰雹天气过程,该途径收集的冰雹个例明显偏少,其中来源于地面特殊天气资料的个例占比不足 50%;②查阅冰雹灾情报告、值班记录和相关文献(许长义等,2017;郑建琴等,2017;尉英华等,2018),作为冰雹个例的有效补充,整理增加了具有记录报告的 37 次冰雹天气过程;③对上述途径收集到的冰雹个例,利用多普勒天气雷达观测资料作进

一步质量控制,剔除时间、地点与雷达观测出入较大的 2 个个例,最终选取了 2009—2019 年天津地区共计 70 次冰雹天气过程作为研究样本,并将其中直径 ≥ 2 cm 的冰雹定义为大冰雹。

2 冰雹时空分布特征

2.1 空间分布特征

天津地处华北平原,东临渤海、北依燕山,地形差异使得下垫面受热不均匀,强对流天气分布具有明显的地域特点。图 1 给出了 2009—2019 年天津地区冰雹年平均发生日数的空间分布。从图中可以看出,天津年平均降雹日数呈现南北多、中间少的分布态势。冰雹高发区分别位于地处北部山区的蓟州区和南部平原的静海区,其中蓟州区年平均降雹日数最多,为 2.1 d,静海次之,年平均降雹日数为 1.8 d,而天津中心城区年平均降雹日数仅为 0.3 d(图 1a)。此外,直径达 2 cm 以上的大冰雹主要发生在蓟州区、武清区和静海区等,年平均为 0.1~0.3 d(图 1b)。

2.2 月际分布特征

图 2 给出了 2009—2019 年天津地区不同月份冰雹日数占比分布。天津降雹的季节性特征显著,主要降雹时段集中在 4—9 月。其中,6 月是降雹日数占比最多的月份,较前一个月猛增 5.6 倍,占全年的 49.4%;其次是 7 月和 8 月,分别占全年的 20.3% 和 11.4%。此外,直径 2 cm 以上的大冰雹仅出现

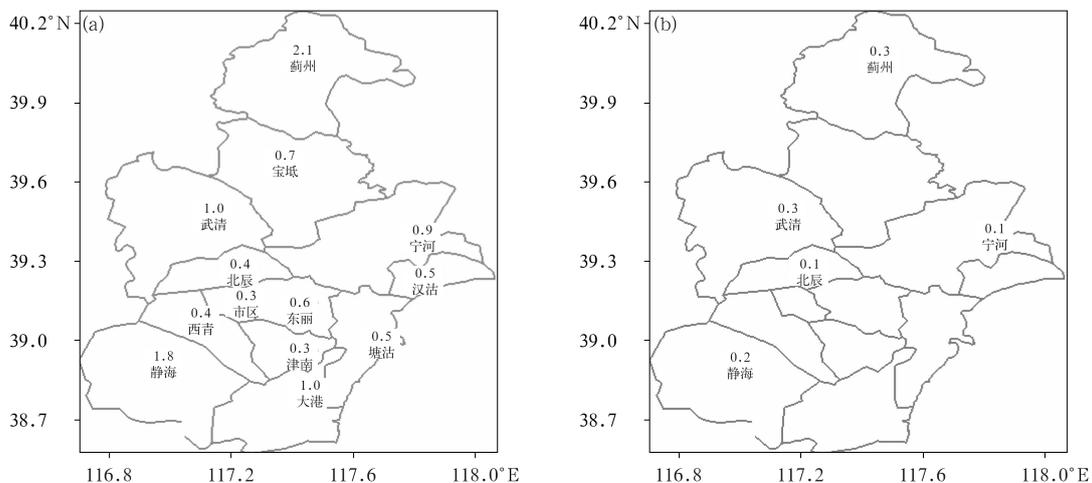


图 1 2009—2019 年天津(a)冰雹、(b)大冰雹年平均日数空间分布(单位:d)

Fig. 1 Spatial distribution of annual (a) hail and (b) big hail days in Tianjin from 2009 to 2019 (unit: d)

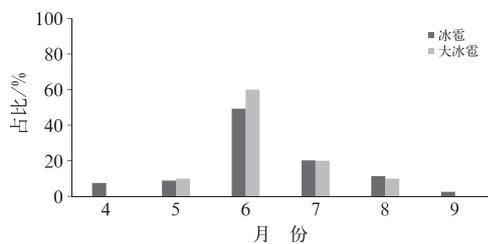


图 2 2009—2019 年天津冰雹和大冰雹月际分布

Fig. 2 Monthly distribution of hail and big hail in Tianjin from 2009 to 2019

在 5—8 月,6 月是大冰雹日数最多的月份,占全年的 60.0%,其次是 7 月,占全年的 20.0%。天津降雹具有季节性强、雹日高度集中的“单峰型”月际分布特征,这一结论与蓝渝等(2014)、虎雅琼等(2019)给出的华北地区降雹季节分布特征基本一致。究其原因,主要是初夏空气中水汽含量开始不断增强,同时伴随着地面太阳辐射加热的增加,使得边界层大气层结变得很不稳定,加之过渡季节冷暖空气交汇频繁,容易造成强烈的对流性天气,从而产生冰雹。

2.3 日变化特征

天津地区降雹日变化特征明显(图 3)。2009—2019 年 08—11 时(北京时,下同)无降雹发生,12 时开始降雹频率逐渐增加,并于 17 时达到峰值,随后逐渐降低。其中,12—20 时降雹概率占冰雹总数的 74.8%,23 时至次日 07 时仅占冰雹总数的 15.4%,即降雹发生的时段主要集中在午后至傍晚,尤其是傍晚发生的次数最多,降雹日变化特征与蓝渝等(2014)、虎雅琼等(2019)研究结果相符。此外,直径 2 cm 以上的大冰雹仅出现在 12—20 时,其他时段均无大冰雹天气发生。

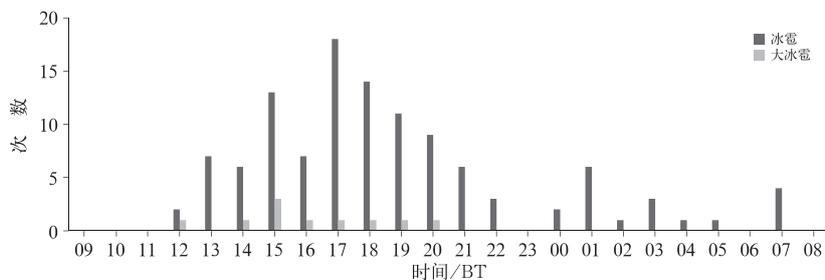


图 3 2009—2019 年天津冰雹和大冰雹次数的日分布

Fig. 3 Daily distribution of hail and big hail times in Tianjin from 2009 to 2019

3 冰雹环境条件特征

3.1 环境物理量分析方法

由于天津未设探空站,预报员通常使用北京探空资料来分析天津地区的强对流天气,而北京探空资料每天只有两次(08 时、20 时)且距离天津各区 60~140 km。由于冰雹多发生在午后至傍晚且局地性较强,北京探空资料往往无法准确诊断出天津中小尺度系统产生对流的环境条件,因此需要采用更高分辨率资料来获取有代表性的冰雹天气环境特征。NCEP FNL 全球分析资料融合了大量观测信息且每天有四次,不少学者利用该资料进行短时强降水、冰雹、雷暴大风等强对流天气的环境势研究,发现 NCEP FNL 分析资料构建探空和观测探空所得到的大多数环境物理量相当,但对流有效位能(CAPE)显著偏小,主要原因在于 NCEP FNL 分析资料低层温湿与探空观测差异较大(王秀明等,2012)。本文将 NCEP FNL 分析资料和地面观测数据融合,通过融合资料进行环境物理量计算,不仅可以弥补远距离探空分析所带来的空间差异,同时可以解决 NCEP FNL 分析资料低层要素偏差较大造成的 CAPE 等环境物理量失真问题。

首先选取样本发生前最近时次的 NCEP FNL 分析资料和地面气象观测数据进行要素一致性处理,统一转换为气压、温度、露点温度、风向、风速。由于地面观测资料为离散站点记录、NCEP FNL 分析资料为规则格点分布,为保证空间一致性,采用水平方向上二维双线性插值方法获得观测站上空 1000~100 hPa 共 21 层的温、湿及风场信息;又因 NCEP FNL 分析资料近地面要素误差较大,将地面观测要素值作为垂直方向上最低层数据,即删除

NCEP FNL 分析资料中低于站点海拔高度的层次,然后采用二次拉格朗日多项式插值算法对 900 hPa 以下高度层温湿要素进行融合订正(杨新林等,2017;尉英华等,2020)。最后,利用 NCEP FNL 分析资料和地面气象观测数据构建的融合探空序列来计算热力、动力和水汽等环境物理量。

经与北京站探空资料对比分析发现,融合前及融合后的总指数、0℃层高度、-20℃层高度、0~6 km 深层垂直风切变平均绝对误差分别为 3.2℃、124 m、83 m、 $2.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,均具有一定的可信度。但融合前 NCEP FNL 分析资料对流有效位能(CAPE)、抬升指数(LI)平均绝对误差达 $435 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 2.1°C ,融合后分别降至 $246 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 1.1°C 。偏差区间占有率是指融合前及融合后环境物理量与探空诊断值之间偏差在不同区间范围内占总数的百分比分布,从 CAPE、LI 偏差区间占有率进一步分析发现(图 4),NCEP FNL 分析资料的 CAPE 约 37.1% 样本比探空诊断值偏低超过 $400 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,低偏差区间 $[-400, 400]$ 占有率仅 54.3%,但融合后的 CAPE 在低偏差区间占有率增加至 80.0%,融合后 LI 在低偏差区间占有率由 52.9% 增加至 84.3%。可见,通过融合资料进行无探空站地区环境物理量

计算,对于与温湿要素密切相关的对流有效位能(CAPE)、抬升指数(LI)等环境物理量特征分析具有一定的积极意义。

3.2 不同月份冰雹环境参量特征

3.2.1 稳定度参量特征

大气层结不稳定是冰雹等强对流天气发生的必要条件。反映层结稳定度条件的物理量有很多,本文选取了对冰雹潜势具有一定指示意义的物理量来分析其环境条件特征,包括对流有效位能(CAPE)、抬升指数(LI)、总指数(TT)、强天气威胁指数(SWEAT)等。

CAPE 表示气块在上升过程中可能获得的不稳定能量,是度量静力稳定度的重要参数,也是风暴潜在强度的重要指标。从 2009—2019 年天津地区 70 次冰雹天气过程的 CAPE 箱线图(图 5a)可以看出,4—8 月冰雹发生前 CAPE 的下四分位数、中位数、平均值均呈逐月递增趋势,9 月 CAPE 箱体区间陡降。其中,盛夏(7—8 月)冰雹均发生在 $\text{CAPE} > 1000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的较高不稳定能量条件下,春季(4—5 月)和秋季(9 月)冰雹多发生在 $\text{CAPE} < 1000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的较低不稳定能量条件下,部分样本近乎于

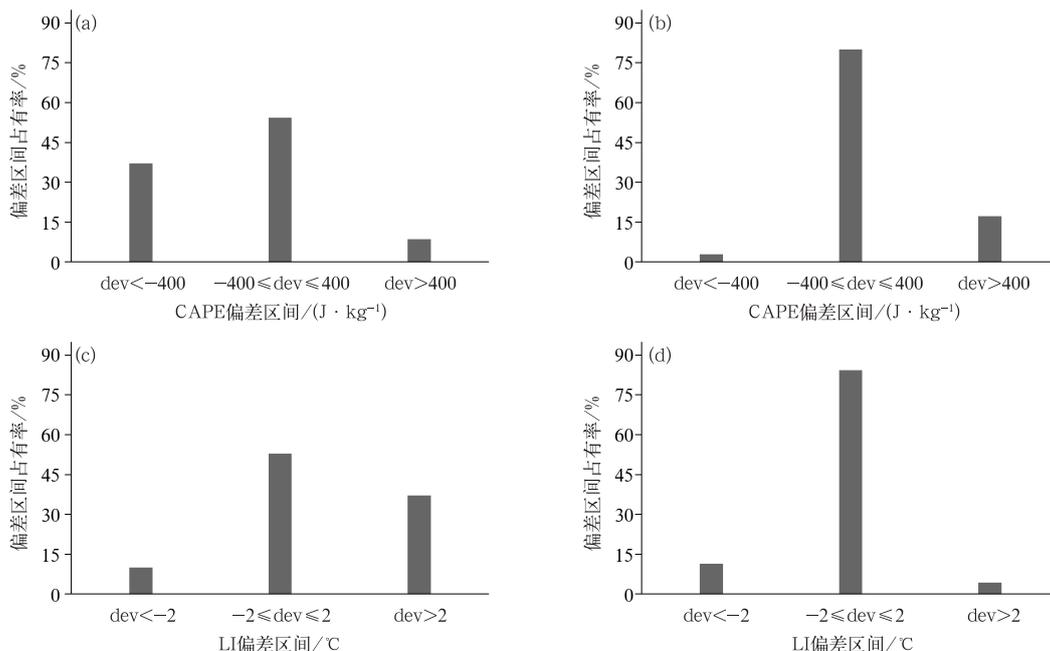


图 4 基于(a,c)NCEP FNL 分析资料和(b,d)融合订正资料的(a,b)CAPE 和(c,d)LI 偏差(dev)区间占有率分布

Fig. 4 The occurrence probability in different deviation ranges of (a, b) environmental parameter CAPE and (c, d) LI calculated with (a, c) NCEP FNL data and (b, d) fusion data

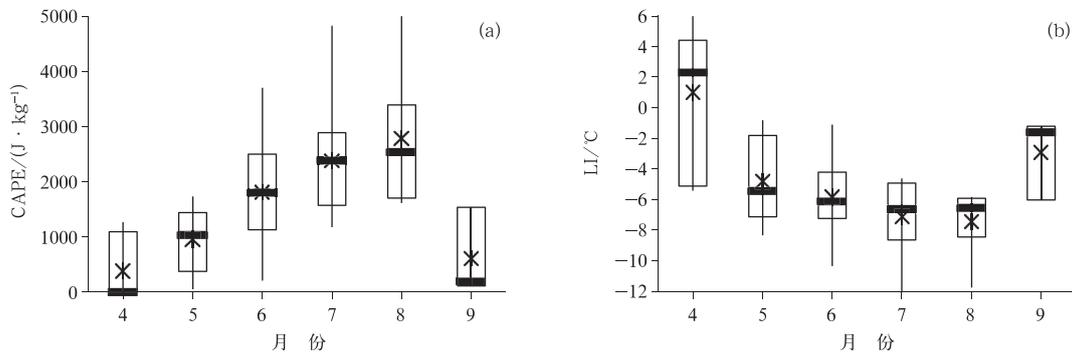


图 5 2009—2019 年天津地区不同月份的冰雹稳定性参数箱线图

(a)CAPE, (b)LI

(线段两端分别为最大值和最小值, 箱形上部和下部横线分别为上四分位值和下四分位值, 粗横线为中位线, “×”为平均值, 下同)

Fig. 5 Box plots of stability parameters for hail cases in different months in Tianjin from 2009 to 2019

(a) CAPE, (b) LI

(two ends of the vertical line; the statistical maximum and minimum values, horizontal lines located at lower and upper positions of box; the 25th and the 75th percentiles, horizontal thick line; the median values, symbol “×”; the average value, the same below)

$0 J \cdot kg^{-1}$, 而冰雹发生次数最多的初夏(6月)75%发生在 $>1000 J \cdot kg^{-1}$ 的较高不稳定能量条件下, 但也有 25%发生在 $<1000 J \cdot kg^{-1}$ 的较低不稳定能量条件下, 这与张琳娜等(2013)指出的 CAPE 值较低时仍有可能出现较强冰雹天气基本一致, 但上述分析表明此类情况多出现于 4—6 月和 9 月。可见, 冰雹发生前 CAPE 具有明显的季节性差异, 不稳定能量条件不是强上升气流发生发展的唯一因素。

LI 为气块从自由对流高度沿湿绝热线上升至 500 hPa 时所具有的温度 (T') 与 500 hPa 环境温度

(T_{500}) 的差值, LI 为负值时表示气块不稳定。图 5b 给出了 2009—2019 年天津地区冰雹天气发生前的 LI 箱线图。除个别样例外, 天津地区冰雹均发生在 $LI < 0^{\circ}C$ 的不稳定层结条件下, 其变化同样具有明显的季节性, 但呈现与 CAPE 反位相的月变化特征。春季(4—5 月)和秋季(9 月)75%冰雹天气发生在 $LI < -1^{\circ}C$ 条件下, 夏季(6—8 月)75%冰雹天气则分别发生在 $LI < -4^{\circ}C$ 、 $-5^{\circ}C$ 、 $-6^{\circ}C$ 的环境中。

图 6a、6b 分别给出了 2009—2019 年天津地区 70 次冰雹天气过程的总指数(TT)和强天气威胁指

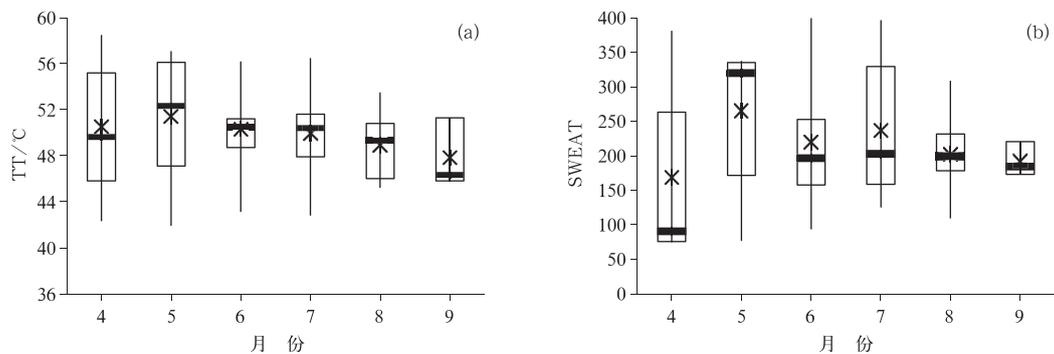


图 6 2009—2019 年天津地区不同月份的冰雹稳定性参数箱线图

(a)TT, (b)SWEAT

Fig. 6 Box plots of the stability parameters for hail cases in different months in Tianjin from 2009 to 2019

(a) TT, (b) SWEAT

数(SWEAT)箱线图。TT 代表了环境场温度递减率, SWEAT 则反映了不稳定能量、风垂直切变对风暴强度的综合作用, 两者值越大发生强对流的可能性也越大。从图中可以看出, 不同月份的 TT 和 SWEAT 箱体区间分布虽略有差异, 但与 CAPE 和 LI 相比其月变化特征并不显著。4—9 月天津地区冰雹发生前的 TT、SWEAT 下四分位数较为接近, 75% 冰雹分别发生在 $TT > 46、47、49、48、46、46^{\circ}\text{C}$ 的环境中, 同时 75% 冰雹分别发生在 $SWEAT > 76、172、158、159、178、173$ 的环境中。因此, 在冰雹潜势预报的稳定度参数分析中, 使用 CAPE 和 LI 作为预报判据时应充分考虑其季节性, 但 TT 和 SWEAT 作为预报判据时其季节性变化并不明显。

3.2.2 垂直风切变

在给定的大气热力不稳定条件下, 垂直风切变有助于普通风暴组织成持续性的强风暴, 是维系强对流发生发展的关键因素(蔡雪薇等, 2019; 崔新艳等, 2021)。因此, 垂直风切变是判断冰雹潜势的重要环境参数。图 7 给出了 2009—2019 年天津地区 70 次冰雹天气过程的 0~6 km 深层垂直风切变(SHR)箱线图。从图中可以看出, 不同月份冰雹天气发生前的环境垂直风切变表现出明显差异性, 4—8 月 SHR 中位数和平均值呈现逐月降低趋势, 9 月则再次升高。其中, 4—5 月垂直风切变平均值达 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 6 月和 9 月平均值为 $17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 7—8 月平均值仅为 $11 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。可见, 春季冰雹多发生于强垂直风切变环境条件下, 用于判断冰雹潜势的垂直风切变特征指标春季(4—5 月)高于初夏(6 月)和秋季(9 月), 而盛夏(7—8 月)指标要求最低。

冰雹的发生发展往往受环境动力条件和热力条件的共同作用。严红梅等(2019)指出冰雹天气不仅能在对流有效位能和深层垂直风切变均较大的条件下产生, 也能在“中高能弱切变”或“低能强切变”条件下产生, 但其并未给出“中高能弱切变”或“低能强

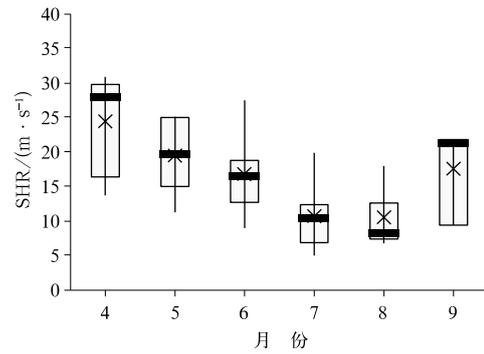


图 7 2009—2019 年天津地区不同月份冰雹的 0~6 km 深层垂直风切变(SHR)箱线图

Fig. 7 Box plots of SHR for hail cases in different months in Tianjin from 2009 to 2019

切变”的季节性差异。为了分析不同月份冰雹天气对热力和动力参数的敏感性差异, 将分别代表热力、动力条件的 CAPE 和 SHR 进行组合分析。其中, 0~6 km 风矢量差 $< 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 定义为弱切变, $12 \sim 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 为中切变, 超过 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 为强切变; $CAPE < 1000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 为低能, $\geq 1000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 为中高能(吴芳芳等, 2013; 严红梅等, 2019)。表 1 给出了不同 CAPE 及 SHR 条件下的冰雹个例分布。从不同月份对比来看, 4 月和 9 月冰雹天气多发生在“低能强切变”条件下; 7 月和 8 月多发生在“中高能弱切变”(SHR 约 $8 \sim 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 环境下; 而冰雹发生次数最多的 6 月除了“低能弱切变”条件下无冰雹发生外, 其他组合条件下均有可能发生冰雹天气。其中, “低能强切变”SHR 值约 30% 达到 $20 \sim 24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、70% 超过 $24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、“中高能弱切变”CAPE 值约 43% 达到 $1300 \sim 2500 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、57% 超过 $2500 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。因此, 在冰雹预报中使用 CAPE 和 SHR 作为预报判据时应充分考虑其季节性。

3.2.3 干球 0°C 层与湿球 0°C 层高度

冰雹下落过程中在气温高于 0°C 的环境条件下

表 1 2009—2019 年天津地区不同对流有效位能及垂直风切变下的冰雹个例数

Table 1 Distribution of hail cases with different CAPE and different SHR in Tianjin from 2009 to 2019

月份	中高能强切变	中高能中切变	中高能弱切变	低能强切变	低能中切变	低能弱切变
4	0	2	0	5	0	0
5	2	0	1	1	2	0
6	7	28	9	5	6	0
7	0	5	14	0	0	0
8	0	3	4	0	0	0
9	0	0	1	2	0	0

会发生融化,过高的 0°C 层高度会增加对流风暴上升气流强度的要求,并增大冰雹下落融化的空间距离,因此不太高的融化层到地面高度是冰雹产生的条件之一。我国大多数预报员都将干球 0°C 层高度 (H_{DBZ}) 作为冰雹融化层高度,实质上冰质粒子融化层高度更接近于湿球 0°C 层高度 (H_{WBZ}), H_{WBZ} 比 H_{DBZ} 对冰雹融化的起始高度描述更为客观准确(俞小鼎,2014;郑永光等,2017)。

图 8 给出了 2009—2019 年天津地区 70 次冰雹天气过程的 H_{DBZ} 和 H_{WBZ} 箱线图。从图中可以看出,5—8 月 H_{WBZ} 平均值分别比 H_{DBZ} 偏低 0.5、0.4、0.4、0.5 km,4 月和 9 月 H_{WBZ} 比 H_{DBZ} 分别偏低 0.6、0.7 km,而各月 H_{WBZ} 中位数则偏低 0.4~0.9 km。以冰雹发生次数最多的 6 月为例,75% 的冰雹天气发生在 H_{DBZ} 低于 4.0 km 范围内,25% 的冰雹天气 H_{DBZ} 位于 4.0~4.5 km,但其 H_{WBZ} 则全部低于 3.9 km。可见,多数冰雹事件对流层中层相对较干,当冰雹下落到 H_{DBZ} 以下时干空气被夹卷进下沉气流内使得冰雹表面的水膜剧烈蒸发降温,其表面温度仍在 0°C 以下,直至降落到 H_{WBZ} 附近冰雹才开始真正融化。此外, H_{WBZ} 存在明显的月际变化特征,4—7 月中位数和平均值呈逐月递增趋势,7—8 月变化幅度不大,9 月则快速降低。其中,除了 7 月和 8 月极少数冰雹天气发生在 H_{WBZ} 为 4.0~4.2 km 范围,其余冰雹天气过程均发生在 H_{WBZ} 低于 3.9 km 的环境条件下,5 月和 9 月均低于 3.5 km,4 月则均低于 2.6 km。因此,利用 H_{WBZ} 判别是否有冰雹潜势时同样需要注意其指标的月变化。

3.2.4 大气可降水量

冰雹的形成要求环境大气中有足够的水汽,大

气可降水量 (TPW) 反映单位面积整层气柱的水汽含量,是表征水汽条件的重要参数。图 9 给出了 2009—2019 年天津地区不同月份冰雹发生前的 TPW 箱线图,可以看出不同月份冰雹发生所必需的水汽条件差异显著。其中,4 月冰雹发生所需的 TPW 低于 $21 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,5 月和 9 月 75% 的冰雹发生在 $\text{TPW} > 22 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 的水汽条件下,当 $\text{TPW} < 20 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 时可以不考虑冰雹出现的可能性;对于冰雹发生次数最多的 6 月来说,75% 的冰雹天气发生在 $\text{TPW} > 31 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 的水汽条件下,当 $\text{TPW} < 23 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 时发生冰雹的可能性较小;而 7—8 月冰雹发生所需的 TPW 多数高于 $36 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

以上对于不稳定条件、垂直风切变、特殊高度层和水汽条件的分析表明,几乎所有冰雹天气的发生均需要满足一定的大气环境条件,但不同月份的环境物理量阈值区间存在一定的差异。由于 CAPE、TT、SWEAT、SHR、TPW 等物理量值越大,越有利于冰雹天气的发生,故选取其下四分位数作为相应的阈值,意味着 75% 的冰雹发生在物理量参数大于该阈值的环境条件下;而 LI 值越小,冰雹潜势越大,故选取其上四分位数作为阈值,代表 75% 的冰雹发生在物理量参数小于该阈值的环境条件下。表 2 给出了不同月份冰雹天气的环境物理量阈值,以便为冰雹预报提供参考依据。

3.3 不同天气型冰雹环境参量对比

根据 70 次冰雹过程的高空 500 hPa 环流形势特征,将冰雹分为四种天气型,即高空冷涡型(占比 58%)、西来槽型(占比 19%)、西北气流型(占比 15%)、横槽型(占比 7%)。其中高空冷涡型背景下

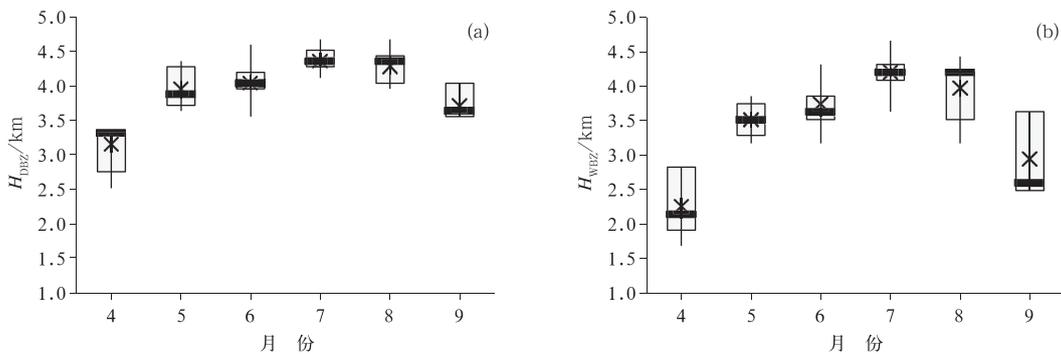


图 8 2009—2019 年天津地区不同月份冰雹 (a) 干球 0°C 层高度 (H_{DBZ}) 和 (b) 湿球 0°C 层高度 (H_{WBZ}) 箱线图

Fig. 8 Box plots of (a) dry bulb 0°C layer height (H_{DBZ}) and (b) wet bulb 0°C layer height (H_{WBZ}) for hail cases in different months in Tianjin from 2009 to 2019

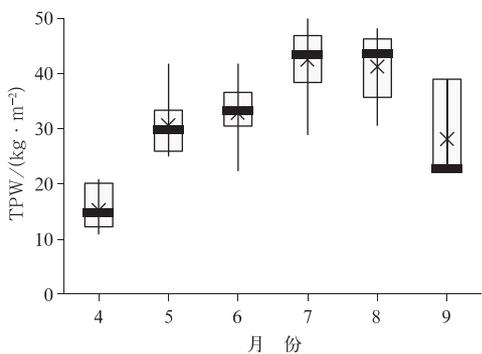


图 9 2009—2019 年天津地区不同月份冰雹大气可降水量(TPW)箱线图

Fig. 9 Box plots of the total precipitable water (TPW) for hail cases in different months in Tianjin from 2009 to 2019

的冰雹主要发生在 6 月,占此类型总过程数的 62%;西来槽型冰雹主要发生在 7 月,占此类型总过程数的 58%;西北气流型冰雹同样主要发生在 6 月,占该类型总过程数的 80%。表 3 给出了高空冷涡型、西来槽型和西北气流型三种主要天气型冰雹的环境参量阈值。对比分析发现高空冷涡型、西北气流型环境参量阈值差异并不显著,但两者与西来槽型 SHR、 H_{WBZ} 、TPW 等环境参数阈值差异明显,主要原因可能在于高空冷涡型和西北气流型均主要发生于 6 月、西来槽型多发生于 7 月。其中,西来槽型冰雹多发生在 $SHR > 9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的条件下,高空冷涡型、西北气流型冰雹 SHR 通常需达到 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上;西来槽型冰雹多发生在 H_{WBZ} 低于 3.9 km 的环境条件下,高空冷涡型、西北气流型冰雹 H_{WBZ} 则

表 2 2009—2019 年不同月份冰雹环境参数阈值

Table 2 The parameter threshold of hails in different months from 2009 to 2019

月份	CAPE/(J · kg ⁻¹)	LI/°C	SWEAT	TT/°C	SHR/(m · s ⁻¹)	H _{WBZ} /km	TPW/(kg · m ⁻²)
4	>0	<4.4	>76	>46	>16	<2.6	>12
5	>376	<-1.8	>172	>47	>15	<3.4	>26
6	>1127	<-4.2	>158	>49	>13	<3.5	>31
7	>1569	<-4.9	>159	>48	>7	<3.9	>38
8	>1703	<-5.9	>178	>46	>7	<3.8	>36
9	>114	<-1.2	>173	>46	>9	<3.3	>22

表 3 2009—2019 年不同天气型冰雹环境参数阈值

Table 3 The parameter thresholds of hails in different circulation patterns from 2009 to 2019

天气分型	CAPE/(J · kg ⁻¹)	LI/°C	SWEAT	TT/°C	SHR/(m · s ⁻¹)	H _{WBZ} /km	TPW/(kg · m ⁻²)
西来槽型	>1258	<-4.7	>149	>48	>9	<3.9	>36
高空冷涡型	>1019	<-4.0	>161	>48	>12	<3.6	>30
西北气流型	>848	<-3.8	>132	>47	>12	<3.6	>27

低于 3.6 km;此外,西来槽型冰雹 TPW 阈值明显高于高空冷涡型和西北气流型。

3.4 大冰雹与非大冰雹环境参量对比

受大冰雹样本数限制,仅以大冰雹和非大冰雹占比均最高的 6 月为例对比两者环境条件差异,表 4 给出了大冰雹和非大冰雹环境参量分布区间和均值。从表中可以看出,非大冰雹环境参数分布跨度

较大,大冰雹环境参数分布则较集中,且大冰雹比非大冰雹 CAPE、SWEAT、TT、TPW 平均值略低,这与李怀宇等(2015)研究指出的 CAPE 等环境参数与冰雹大小没有必然联系的结论相一致。

非大冰雹和大冰雹环境条件的主要差异在于:大冰雹的 H_{WBZ} 无论平均值还是最大值均比非大冰雹低,非大冰雹发生在 H_{WBZ} 低于 3.9 km 的环境条件下,而大冰雹则均发生在 H_{WBZ} 低于 3.5 km 的环

表 4 2009—2019 年大冰雹与非大冰雹环境参数对比

Table 4 The comparison of environmental parameters between big hails and small hails from 2009 to 2019

物理量	CAPE/(J · kg ⁻¹)	LI/°C	SWEAT	TT/°C	SHR/(m · s ⁻¹)	H _{WBZ} /km	TPW/(kg · m ⁻²)
大冰雹参数区间	445~3139	-7.4~-2.0	104~337	47~49	11~26	2.9~3.5	23~42
非大冰雹参数区间	209~3700	-10.3~-1.1	94~460	43~56	9~28	2.9~3.9	22~42
大冰雹参数均值	1504	-4.5	193	48	18	3.3	32
非大冰雹参数均值	1272	-5.9	225	51	16	3.4	33

境条件下;此外,大冰雹 SHR 最低值和平均值均高于非大冰雹,非大冰雹 SHR 一般大于 $9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,大冰雹 SHR 则大于 $11 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,较强的垂直风切变更加有利于大冰雹的出现。

4 结论与讨论

针对 2009—2019 年天津地区 70 次冰雹天气过程的时空特征进行统计分析,并利用 NCEP FNL ($1^\circ \times 1^\circ$) 全球分析资料和地面气象观测数据构建融合探空序列来计算热力、动力和水汽等环境物理量,从较长时间尺度、较多样本数量上对比分析不同月份、不同天气型及不同大小冰雹的环境条件差异,给出具有表征意义的环境参数特征值作为冰雹预报指标。

(1) 天津降雹日数呈南北多、中间少的分布态势,降雹主要出现在 4—9 月,其中 6 月冰雹和大冰雹日数分别占全年的 49.4%、60.0%,12—20 时降雹概率占 74.8%,且大冰雹仅出现在 12—20 时。

(2) 冰雹发生前环境物理量 CAPE、LI、SHR、 H_{WBZ} 、TPW 均存在明显的月变化特征,在冰雹潜势预报分析中作为预报判据时应充分注意指标的月变化。其中,4 月和 9 月大多数冰雹天气发生在“低能强切变”条件下,7 月和 8 月则多发生在“中高能弱切变”条件下。此外,不同月份 H_{WBZ} 平均值、中位数均比 H_{DBZ} 显著偏低 0.4~0.9 km,除了 7 月和 8 月极少数冰雹发生在 H_{WBZ} 为 4.0~4.2 km 范围,其余冰雹天气过程均发生在 H_{WBZ} 低于 3.9 km 的环境条件下,5 月和 9 月均低于 3.5 km。

(3) 从不同天气型环境物理量对比来看,高空冷涡型、西北气流型环境物理量阈值差异并不显著,但两者与西来槽型阈值差异明显。其中,西来槽型冰雹多发生在 SHR 大于 $9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 H_{WBZ} 低于 3.9 km 的环境条件下,高空冷涡型、西北气流型冰雹通常发生在 SHR 大于 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 H_{WBZ} 低于 3.6 km 的环境条件下;此外,西来槽型冰雹 TPW 阈值明显高于高空冷涡型和西北气流型。

(4) 冰雹大小与 H_{WBZ} 、SHR 关系密切。以 6 月为例,非大冰雹一般发生在 H_{WBZ} 低于 3.9 km、SHR 大于 $9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的环境条件下,而大冰雹则均发生在 H_{WBZ} 低于 3.5 km、SHR 大于 $11 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的环境条件下。较低的 H_{WBZ} 和较强的 SHR 更有利于大冰雹的出现。

参考文献

蔡雪薇, 谌芸, 沈新勇, 等, 2019. 冷涡背景下不同类型强对流天气的

成因对比分析[J]. 气象, 45(5): 621-631. Cai X W, Chen Y, Shen X Y, et al, 2019. Cause analysis of different types of severe convective weather under cold vortex background[J]. Meteor Mon, 45(5): 621-631 (in Chinese).

陈瑞敏, 赵孝伟, 于海磊, 等, 2021. 一次长生命史超级单体风暴的雷达观测特征[J]. 暴雨灾害, 40(4): 419-429. Chen R M, Zhao X W, Yu H L, et al, 2021. Characteristics of a supercell storm with long life cycle based on analysis of weather radar data[J]. Torr Rain Dis, 40(4): 419-429 (in Chinese).

崔新艳, 陈明轩, 秦睿, 等, 2021. 对流初生机理的研究进展[J]. 气象, 47(11): 1297-1318. Cui X Y, Chen M X, Qin R, et al, 2021. Research advances in the convective initiation mechanisms[J]. Meteor Mon, 47(11): 1297-1318 (in Chinese).

范皓, 杨永胜, 段英, 等, 2019. 太行山东麓一次强对流冰雹云结构的观测分析[J]. 气象学报, 77(5): 823-834. Fan H, Yang Y S, Duan Y, et al, 2019. An observational analysis of the cloud structure of a severe convective hailstorm over the eastern foothill of Taihang Mountain[J]. Acta Meteor Sin, 77(5): 823-834 (in Chinese).

虎雅琼, 边宇轩, 黄梦宇, 等, 2019. 基于灾情信息的 1981—2017 年北京地区降雹特征[J]. 应用气象学报, 30(6): 710-721. Hu Y Q, Bian Y X, Huang M Y, et al, 2019. Characteristics of hailstone distribution based on disaster information in Beijing from 1981 to 2017[J]. J Appl Meteor Sci, 30(6): 710-721 (in Chinese).

黄玉霞, 王宝鉴, 王研峰, 等, 2017. 1974—2013 年甘肃冰雹日数的变化特征[J]. 气象, 43(4): 450-459. Huang Y X, Wang B J, Wang Y F, et al, 2017. Variation characteristics of hail days in Gansu Province during 1974—2013[J]. Meteor Mon, 43(4): 450-459 (in Chinese).

蓝渝, 郑永光, 毛冬艳, 等, 2014. 华北区域冰雹天气分型及云系特征[J]. 应用气象学报, 25(5): 538-549. Lan Y, Zheng Y G, Mao D Y, et al, 2014. Classification and satellite nephogram features of hail weather in North China[J]. J Appl Meteor Sci, 25(5): 538-549 (in Chinese).

李怀宇, 何如意, 胡胜, 等, 2015. 近 10 年广东冰雹的统计特征及天气形势[J]. 气象科技, 43(2): 261-269. Li H Y, He R Y, Hu S, et al, 2015. Statistical characteristics and circulation patterns of hails in Guangdong in recent 10 years[J]. Meteor Sci Technol, 43(2): 261-269 (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).

刘艳杰, 王清川, 许敏, 等, 2021. 2019 年 5 月北京一次强降水超级单体特征及成因分析[J]. 气象与环境学报, 37(4): 9-17. Liu Y J, Wang Q C, Xu M, et al, 2021. Characteristics and causes of a high precipitation supercell in Beijing in May of 2019[J]. J Meteor Environ, 37(4): 9-17 (in Chinese).

刘艳杰, 周玉都, 马庚雪, 2018. 河北廊坊冰雹天气特征统计分析[J]. 气象与环境科学, 41(1): 108-115. Liu Y J, Zhou Y D, Ma G X, 2018. Statistical analysis of hail event characteristics in Langfang of Hebei Province[J]. Meteor Environ Sci, 41(1): 108-115

- (in Chinese).
- 罗琪,郑永光,陈敏,2019.2017年北京北部一次罕见强弓状飑线过程演变和机理[J].气象学报,77(3):371-386. Luo Q, Zheng Y G, Chen M, 2019. Evolution and development mechanisms of a rare strong arc-shaped squall line that occurred in northern Beijing in 2017[J]. Acta Meteor Sin, 77(3):371-386(in Chinese).
- 马晓玲,李德帅,胡淑娟,2020.青海地区雷暴、冰雹空间分布及时间变化特征的精细化分析[J].气象,46(3):301-312. Ma X L, Li D S, Hu S J, 2020. Refined analysis of spatio-temporal characteristics of thunderstorm and hail over Qinghai Province[J]. Meteor Mon, 46(3):301-312(in Chinese).
- 孙萌宇,郗秀书,孙凌,等,2020.北京城区相继多次降雹的一次强雷暴的闪电特征[J].大气科学,44(3):601-610. Sun M Y, Qie X S, Sun L, et al, 2020. Lightning activity of a severe thunderstorm with several hail-fall stages in Beijing metropolitan region[J]. Chin J Atmos Sci, 44(3):601-610(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).
- 王建恒,陈瑞敏,胡志群,等,2020.一次强雹云结构的双多普勒雷达观测分析[J].气象学报,78(5):796-804. Wang J H, Chen R M, Hu Z Q, et al, 2020. Dual Doppler radar observations and analysis of the structure of a severe hailstorm[J]. Acta Meteor Sin, 78(5):796-804(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).
- 王在文,郑永光,刘还珠,等,2010.蒙古冷涡影响下的北京降雹天气特征分析[J].高原气象,29(3):763-777. Wang Z W, Zheng Y G, Liu H Z, et al, 2010. Analyses on weather characters of hail event in Beijing with Mongolia cold vortex[J]. Plateau Meteor, 29(3):763-777(in Chinese).
- 尉英华,陈宏,张楠,等,2018.冷涡影响下一次冰雹强对流天气中尺度特征及形成机制[J].干旱气象,36(1):27-33. Wei Y H, Chen H, Zhang N, et al, 2018. Analysis on meso-scale characteristics and cause of a severe convective hailstorm weather under cold vortex background[J]. J Arid Meteor, 36(1):27-33(in Chinese).
- 尉英华,王艳春,朱磊磊,等,2020.基于融合资料的天津短时强降水环境物理量可信度及特征分析[J].沙漠与绿洲气象,14(5):84-91. Wei Y H, Wang Y C, Zhu L L, et al, 2020. Confidence and characteristics of short-duration heavy rainfall environmental parameters based on merging data in Tianjin[J]. Desert Oasis Meteor, 14(5):84-91(in Chinese).
- 吴芳芳,俞小鼎,张志刚,等,2013.苏北地区超级单体风暴环境条件与雷达回波特征[J].气象学报,71(2):209-227. Wu F F, Yu X D, Zhang Z G, et al, 2013. A study of the environmental conditions and radar echo characteristics of the supercell-storms in northern Jiangsu[J]. Acta Meteor Sin, 71(2):209-227(in Chinese).
- 许长义,易笑园,段丽瑶,等,2017.一次西北气流型冰雹过程分析中加密观测资料的综合应用[J].气象科技,45(4):698-709. Xu C Y, Yi X Y, Duan L Y, et al, 2017. Synthetic applications of intensive observations to a hail event analysis under northwest airflow pattern[J]. Meteor Sci Technol, 45(4):698-709(in Chinese).
- 严红梅,梁亮,黄艳,等,2019.金华地区18次冰雹天气的大气环境与雷达回波特征分析[J].暴雨灾害,38(1):48-58. Yan H M, Liang L, Huang Y, et al, 2019. Study on the atmospheric environment and radar echo characteristics of 18 hail events in Jinhua[J]. Torr Rain Dis, 38(1):48-58(in Chinese).
- 杨新林,孙建华,鲁蓉,等,2017.华南雷暴大风天气的环境条件分布特征[J].气象,43(7):769-780. Yang X L, Sun J H, Lu R, et al, 2017. Environmental characteristics of severe convective wind over South China[J]. Meteor Mon, 43(7):769-780(in Chinese).
- 俞小鼎,2014.关于冰雹的融化层高度[J].气象,40(6):649-654. Yu X D, 2014. A note on the melting level of hail[J]. Meteor Mon, 40(6):649-654(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).
- 张琳娜,郭锐,何娜,等,2013.北京地区冰雹天气特征[J].气象科技,41(1):114-120. Zhang L N, Guo R, He N, et al, 2013. Characteristic analysis of a hail event in Beijing[J]. Meteor Sci Technol, 41(1):114-120(in Chinese).
- 郑建琴,路明月,王曙东,等,2017.基于决策树的天津地区冰雹天气雷达因子分析[J].气象科技,45(2):349-354. Zheng J Q, Lu M Y, Wang S D, et al, 2017. Analysis of hail weather based on decision-making tree using radar data in Tianjin[J]. Meteor Sci Technol, 45(2):349-354(in Chinese).
- 郑永光,陶祖钰,俞小鼎,2017.强对流天气预报的一些基本问题[J].气象,43(6):641-652. Zheng Y G, Tao Z Y, Yu X D, 2017. Some essential issues of severe convective weather forecasting[J]. Meteor Mon, 43(6):641-652(in Chinese).

(本文责编:王蕾)