

宋薇,邱晓滨,王兆宇,等.2024.一次冰雹过程的多源资料观测特征分析[J].暴雨灾害,43(3):322–331. SONG Wei, QIU Xiaobin, WANG Zhaoyu, et al. 2024. Analysis of the characteristics of a hail event with multi-source data [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 43(3):322–331 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023–032

一次冰雹过程的多源资料观测特征分析

宋薇^{1, 2, 3}, 邱晓滨^{4, 5}, 王兆宇¹, 陈超¹

(1. 天津市人工影响天气办公室, 天津 300074; 2. 甘肃省气候资源开发与防灾减灾重点实验室, 兰州 730000;
3. 中国气象局沈阳大气环境研究所 东北冷涡研究重点开放实验室, 沈阳 110166; 4. 天津市海洋气象
重点实验室, 天津 300074; 5. 天津市气象科学研究所, 天津 300074)

摘要:为认识降雹不同阶段对流系统的回波、微物理参量和热动力演变特征,利用多普勒天气雷达、激光雨滴谱仪、微波辐射计、自动气象观测站等观测资料,对2017年7月9日天津地区一次冰雹天气的回波特征、雨滴谱差异、温湿度及水汽变化进行研究。结果表明:(1) 850 hPa切变线东侧的暖湿气流与500 hPa冷空气叠加,有利于不稳定能量积累及对流天气触发。降雹临近时,环境大气不稳定性显著增强。(2) 冰雹云发展演变阶段观测到两次地面降雹,均发生在对流单体合并加强过程中。(3) 降雹时段,粒子最大直径、质量加权平均直径和中值体积直径达到峰值,中大滴对降水雨强的贡献率达94.56%,该时段平均谱谱宽最大;降雹后,直径小于1.0 mm的小滴对雨强贡献率增大,在不超过1.0 mm的粒子区间平均谱呈双峰特征,第一峰和第二峰分别出现在0.3 mm、0.6 mm附近。(4) 降雹前水汽出现缓慢持续积累,积分水汽、液态水含量在降雹前1 h出现明显跃增,低层逆温的存在使高层干冷、低层暖湿的现象更为明显;降雹结束后整层大气水汽有所回落。

关键词:冰雹; 对流单体; 数浓度; 特征直径

中图分类号: P458.1⁺1

文献标志码: A

DOI: 10.12406/byzh.2023–032

Analysis of the characteristics of a hail event with multi-source data

SONG Wei^{1, 2, 3}, QIU Xiaobin^{4, 5}, WANG Zhaoyu¹, CHEN Chao¹

(1. *Tianjin Weather Modification Office, Tianjin 300074*; 2. *Key Laboratory of Climate Resource Development and Disaster Prevention in Gansu Province, Lanzhou 730000*; 3. *Shenyang Institute of Atmospheric Environment, China Meteorological Administration, Key Opening Laboratory for Northeast China Cold Vortex Research, Shenyang 110166*; 4. *Tianjin Key Laboratory for Oceanic Meteorology, Tianjin 300074*; 5. *Tianjin Institute of Meteorological Science, Tianjin 300074*)

Abstract: To understand the evolution characteristics of radar echo, microphysical parameters, and thermal dynamics of the convective systems during different stages of hailstorms, observations from Doppler weather radar, laser raindrop spectrometer, microwave radiometer, and automatic meteorological stations were used to investigate the radar echo characteristics, raindrop spectrum difference, temperature, humidity and water vapor variation characteristics of a hailstorm occurred in Tianjin on July 9, 2017. The results are as follows. (1) The warm and wet air on the east side of the shear line at 850 hPa is superimposed with the cold air at 500 hPa, which is conducive to the accumulation of unstable energy and triggering of convective weather. With hail approaching, the instability of the ambient atmosphere increased significantly. (2) During the evolution stage of the hail cloud, two hailfall events were observed, both of which occurred during the strengthening and merging processes of the convective cells. (3) During the hailfall stage, the maximum diameter, mass-weighted mean diameter, and median volume diameter of the precipitation particles reached their peak values. The contribution rate of medium and large droplets to precipitation intensity reached 94.56%, and the average spectral width during the hailfall stage was the largest. While after hailfall, the contribution rate of particles with a diameter less than 1.0 mm increased. The mean spectrum of particles within the range of less than 1.0 mm showed a bimodal pattern, with the first peak and the second peak occurring near 0.3 mm and 0.6 mm, respectively. (4) Before the hailfall, the water vapor accu-

收稿日期: 2023–02–22; 定稿日期: 2023–10–30

资助项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC3007700, 2019YFC1510301); 甘肃省气候资源开发与防灾减灾重点实验室开放课题(ACRE–2021–ZD02); 东北冷涡研究重点开放实验室开放基金项目(2023SYIAEKFMS14); 天津市气象局科研项目(202405ybxm04)

第一作者: 宋薇, 主要从事云降水微物理特征研究。E-mail: wen_s2006@126.com

通信作者: 邱晓滨, 主要从事数值预报及资料同化研究。E-mail: qiuxiaobin.tj@qq.com

© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY–NC–ND 4.0

mulated slowly but continuously. The integrated water vapor and liquid water content showed an obvious increase in 1 h before hailfall. Due to the existence of temperature inversion, the upper layers were dryer and colder, while the lower layers were warmer and wetter. Note that the water vapor content in the whole atmosphere started to decrease after the hailfall.

Key Words: hail; convection cell; number concentration; characteristic diameter

引言

冰雹是一种具有较强致灾性的强对流天气,由于冰雹过程局地性和突发性强、天气变化剧烈,常给农业、电力、交通等带来不利影响,并造成巨大经济损失。冰雹是天津地区的主要气象灾害,以往研究围绕天津冰雹气候特征(宋薇等,2012;陈跃浩等,2022)、降雹过程诊断分析(闵晶晶等,2011)、降雹对流参数指标(尉英华等,2023)及环境条件演变(许长义等,2017)等方面取得了一定进展。由于降雹系统特有的时空尺度和演变特征,使得冰雹精细化预报仍是当前短临预报业务的难点。随着气象探测技术不断进步,多种非常规观测资料得以在冰雹的分析监测和预警研究中广泛应用(杜牧云等,2022),这些连续、实时、高时空分辨率的观测信息,能够更全面准确地揭示对流初生、发展、衰减和消亡阶段的典型特征。

多普勒天气雷达作为追踪监测冰雹天气的主要工具,在雹云监测识别及结构特征分析中发挥着重要作用。研究表明能产生大冰雹的强对流风暴,具有高悬的反射率因子高值区,并存在弱回波区或有界弱回波区。此外,垂直累积液态水含量(VIL)跃增或VIL密度的异常大值、三体散射及强烈风暴顶辐散等,也是强冰雹雷达回波典型特征(俞小鼎等,2020),可作为强冰雹的重要判别指标。雨滴谱仪可监测雨强及降水相态变化(吴宜等,2021),对于冰雹观测较为准确(吴世美等,2017),并在粒子谱特征研究方面具有很好的应用价值。作为冰雹微物理研究的一项重要内容,降水谱特征可以反映不同尺度粒子在对流云中的生长及发展状况(陶涛等,2020)。雹暴系统在不同发展阶段,降水谱会存在差异,谱型可较好地反映对流系统生消过程(张丰伟等,2019)。在强对流云体前部雨滴谱呈双峰或多峰结构,云体强中心位置直径不超过1.0 mm的小滴数浓度显著增加;在雨强增大阶段,降水中有较多大滴和较少小滴,雨滴数浓度低但雷达反射率因子大(王俊等,2021);短时强降水过程各粒子平均数浓度高且粒径大,主要源于对流云内部活跃的冰相过程和暖云层中雨滴碰并、碰撞-破碎过程的影响(李山山等,2023)。获得降雹过程尺度谱的时序变化特征,对于发展和改进数值模式中显式云微物理方案也具有一定参考价值(岳治国和梁谷,2018)。微波辐射计能够探测不同高度大气温湿度及水汽信息,这些

资料能较好描述强对流发生前后大气状态的改变,对降水的生消发展及对流潜势分析具有很好的指示意义(Chan and Lee, 2011; Kulikov et al., 2020; Qi et al., 2021; Ma et al., 2022; Xu et al., 2024)。黄治勇等(2013, 2014)研究发现强降水发生前,相对湿度存在由非饱和状态向饱和或接近饱和状态转变的趋势,暴雨出现前12 h辐射计观测的液态水含量及水汽总量显著增加。孙京等(2018)研究发现微波辐射计探测的云中整层水汽在地面降水形成前2 h有明显跃增,水汽峰值超前于降水峰值近1 h。李聪等(2017)分析微波辐射计监测信息发现,冰雹常发生在云液态水含量快速增长的波峰上。微波辐射计资料可用于研究降雹过程云降水粒子的三态演变,这为验证冷云降水的贝吉隆过程提供了观测证据(唐仁茂等,2012)。

现阶段多普勒天气雷达、激光雨滴谱仪、微波辐射计、自动气象观测站(以下简称观测站)等观测资料在冰雹天气监测预警中发挥了重要作用,这些资料在对流触发及发展机制分析、降水宏微观演变特征研究中各具优势。为此,本文综合利用多种观测资料,对2017年7月9日天津一次冰雹过程的回波发展、降雹前后雨滴谱差异、温湿度及水汽变化特征等进行了分析,以加深对降雹不同阶段对流系统回波结构、微物理参量和热动力演变特征的认识,为基于非常规观测资料的冰雹天气特征研究及临近监测预警提供有益参考。

1 资料与方法

本文所用资料包括滨海新区塘沽(117.716 9°E, 39.043 8°N)多普勒天气雷达、西青观测站微波辐射计、西青(117.065 5°E, 39.088 8°N)和宝坻(117.278 8°E, 39.729 1°N)观测站激光雨滴谱仪资料;7月9日08:00(北京时,下同)、14:00和20:00北京探空站资料,天津西青辛口、静海台头观测站逐小时降雨量、平均风速,西青观测站地面温度与露点温度;18:00—21:30的FY-2E卫星资料等。资料均来源于天津市气象信息中心。

滨海新区塘沽雷达为CINRDA/SA新一代天气雷达,波长为10 cm,采用VCP21体扫模式,有效探测范围为230 km。雷达资料用于对流降水回波特征分析。

微波辐射计型号为MP-3000A,可获得从地面到10 km高度的温度、水汽、相对湿度及液态水垂直廓线,廓线数据共58层,时间分辨率为1 min。辐射计资料使用时进行了前期预处理。选取08:00、20:00的

辐射计观测与北京探空资料进行对比表明,温湿观测具有较好的一致性,基于微波辐射计资料获得0—2.0 km、2.0—6.0 km、超过6.0 km处的观测信息。微波辐射计资料用于分析降雹前后对流层不同高度的温湿度及水汽变化。

Thies激光雨滴谱仪有22个粒子尺度观测通道与20个粒子落速观测通道,可连续自动监测各类降水现象。雨滴谱资料在使用前,按照Friedrich等(2013)方法进行原始数据质控,去除异常观测样本。借助于雨滴谱观测资料,可获得雨滴尺度谱,计算公式见式(1)。

$$N(D_j) = \sum_{i=1}^{22} \frac{n_{ij}}{A(D_j) \times \Delta t \times V_i \times \Delta D_j} \quad (1)$$

式中, $N(D_j)$ 表示第 j 个粒径通道 D_j 和 $D_j + \Delta D_j$ 的雨滴数浓度(单位: $\text{m}^{-3} \cdot \text{mm}^{-1}$), n_{ij} 表示第 i 个速度通道、第 j 个粒径通道对应的雨滴数目, $A(D_j)$ 表示采样面积($4\,560\,\text{mm}^2$), Δt 为采样时间间隔(60 s), V_i 表示第 i 级速度通道的粒子下落末速度(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), ΔD_j 表示第 j 个粒径通道的宽度(单位:mm)。

在此基础上可求算其他微物理参数(Chen et al., 2016),如最大直径 $D_{\max}$ (单位:mm)、平均直径 D_{ave} (单位:mm)、中值体积直径 D_0 (单位:mm)、质量加权平均直径 D_m

(单位:mm)、数浓度 N (单位: $\text{m}^{-3} \cdot \text{mm}^{-1}$)、降水雨强 R (单位: $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)、反射率 Z (单位: $\text{mm}^6 \cdot \text{m}^{-3}$)、含水量 W (单位: $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)、平均动能通量 KE (单位: $\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$)等。

2 天气实况及影响系统和环境条件

2.1 天气实况

受强对流天气影响,7月9日21:00—22:00天津局地出现冰雹,静海区台头镇21:00前后降雹,雹径约10~15 mm;21:30以后,西青区辛口镇当城村降雹,雹径为5~10 mm,降雹密度约每平方米10粒。降雹持续时间较短,对农作物影响有限,未造成严重灾情。静海台头和西青辛口临近降雹时,地面风速增大,两站平均风速分别从 $1.9\,\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $1.7\,\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 增加至 $7.8\,\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $8.0\,\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;22:00两站逐小时降雨量也达到峰值,分别为72.5 mm和15.3 mm(图1a)。

9日18:00—10日02:00自动雨量站监测显示(图1b),天津西南部、北部降雨量偏大,东部无降水。对比不同等级降雨量的出现频率(图略)可知,全市有198站为小到中雨,23站出现大到暴雨,2站出现大暴雨,分别是静海台头(103.0 mm),静海独流镇(100.2 mm)。

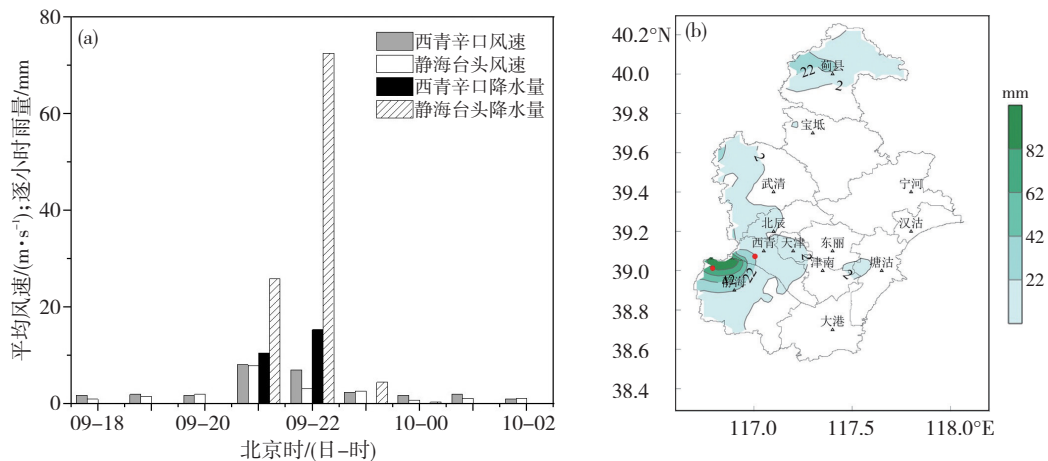


图1 2017年7月9日18:00—7月10日02:00台头与辛口自动站逐小时平均风速和降雨量变化
(a)及天津市累积雨量空间分布(b,红色圆点表示降雹地点)

Fig. 1 Hourly evolution of (a) average wind speed and precipitation at Taitou and Xinkou automatic meteorological stations, (b) spatial distribution of precipitation in Tianjin from 18:00 BT on July 9 to 02:00 BT on July 10, 2017

2.2 影响系统和环境条件

7月9日20:00,500 hPa(图2a)内蒙古东部地区存在涡旋环流,涡旋南侧有高空槽向南伸展,天津位于高空槽底部,槽后西北气流引导冷空气向天津地区输送。高空槽系统具有前倾结构,850 hPa切变线位于河北以西地区,切变线东侧的暖湿气流与500 hPa的冷空气叠加,有利于不稳定能量积累。9日20:00北京大兴探空图显示(图2b),对流有效位能达 $1\,906.05\,\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$,浮力引起的最大上升速度为 $67.8\,\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,表明环境大气

具备一定不稳定能量。0℃层位于600 hPa附近,高度偏低,整层大气温度露点差较小,抬升凝结高度较低,导致层结曲线和状态曲线围成的能量正面积主体位于零度层以上,为降雹提供了有利条件。此外,整层大气偏干,利于降水粒子在下落过程中蒸发冷却,下沉运动增强,易触发雷暴大风。

2017年7月9日18:00—22:30的FY-2E卫星云图显示(图略),18:00河北西南部有发展旺盛的对流云团,自西向东略偏北移动,不断与新生对流云合并并

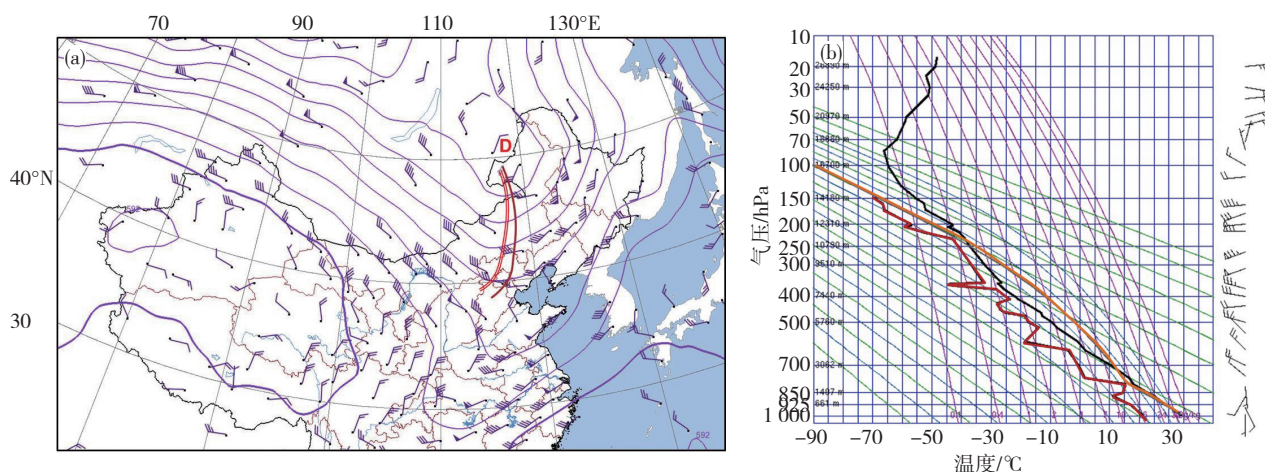


图2 2017年7月9日20:00的500 hPa环流形势(a,红色实线为500 hPa槽线,红色双实线为850 hPa切变线)及北京大兴探空图(b)

Fig. 2 The (a) circulation situation at 500 hPa (the red solid line denotes 500 hPa slot line, the red double solid line denotes 850 hPa shear line) and (b) sounding chart from Daxing station in Beijing at 20:00 BT on July 9, 2017

加强发展。20:30对流影响天津地区,21:30对流云系相当黑体亮温(TBB)冷中心位于天津静海附近,温度介于 $-75\sim-70\text{ }^{\circ}\text{C}$,冷中心的影响时长约0.5 h。22:30后对流云团逐渐消散。

对流参数是表征大气不稳定状态的理想参数。鉴于天津无探空站,因此本文利用天津本地地面资料对北京探空进行订正(张楠等,2018),从表1给出的2017年7月9日08:00、14:00、20:00西青观测站对流参数可知,沙氏指数从08:00的 $1.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 降为20:00

的 $-6.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,在3个观测时次中20:00的K指数、全总指数最大,分别达 $37\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $58\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。当沙氏指数 $<-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,有发生强对流天气的可能,20:00环境大气的稳定性较前期显著增强,这有利于强对流天气出现。刘一玮等(2011)研究表明,天津强对流参数阈值K指数在 $34\sim37\text{ }^{\circ}\text{C}$,沙氏指数 $<0\text{ }^{\circ}\text{C}$, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 层高度在 $3\ 600\sim4\ 500\text{ m}$,全总指数越大越易诱发对流。本次降雹过程K指数($37\text{ }^{\circ}\text{C}$)、沙氏指数($-6.5\text{ }^{\circ}\text{C}$)、全总指数($58\text{ }^{\circ}\text{C}$)、 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 层高度($4\ 396\text{ m}$)等符合强对流天气的出现条件。

表1 2017年7月9日08:00、14:00、20:00西青观测站对流参数

Table 1 Convective parameters from Xiqing station at 08:00 BT,14:00 BT and 20:00 BT on July 9, 2017

时间	沙氏指数/ $^{\circ}\text{C}$	K指数/ $^{\circ}\text{C}$	总指数/ $^{\circ}\text{C}$	$0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 层高度/m	$-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 层高度/m
08:00	1.8	31	46	4 608	7 293
14:00	0.8	5	47	4 602	7 421
20:00	-6.5	37	58	4 396	7 170

3 多源资料观测特征

3.1 多普勒天气雷达观测特征

3.1.1 对流单体演变特征

图3为不同时段多普勒天气雷达组合反射率。7月9日19:54天津以西地区已有大范围积层混合云降水回波发展(图略),位于涞水、保定附近的对流回波中心强度超过 50 dBz 。20:00(图3a)静海台头附近有孤立单体生成,单体原地发展并增强,20:06原单体西南部生成新的对流单体,强度为 30 dBz 。20:12—20:24对流单体合并,并发展为水平尺度约 $20\text{ km}\times30\text{ km}$ 、呈西南—东北走向的对流风暴(图3b、c),在天津静海区台头附近稳定少动,风暴中心回波增至 60 dBz 。20:42(图3d)该对流风暴与霸州东南部的新生单体再次合并加强,21:00中心强度达 65 dBz 。21:30以后,

对流风暴东移并影响西青地区,强中心为 $50\sim55\text{ dBz}$ 。22:20之后,风暴沿东偏北方向移动并逐渐减弱消失。

导致静海台头降雹的对流单体如图3e黑色圆圈所示,回波强度达 $60\sim65\text{ dBz}$,单体水平尺度约 $30\text{ km}\times50\text{ km}$,移速约 $30\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$,后期与文安西南侧的对流单体(图3e蓝色圆圈)合并,回波中心强度为 60 dBz (图3f黑色圆圈),回波顶高接近 15 km ,使西青区辛口镇当城村在21:30以后降雹。

3.1.2 对流单体结构特征

为深入认识强回波中心结构及对流发展情况,针对典型时次的雷达反射率及径向速度特征进行分析。20:06—20:54位于静海台头附近的对流单体加强发展(图略),回波中心强度迅速增强,且强回波区逐渐向低层扩展。21:06(图4a)强回波中心位于($116.883^{\circ}\text{E},39.094^{\circ}\text{N}$),位置少动,强反射率因子核达

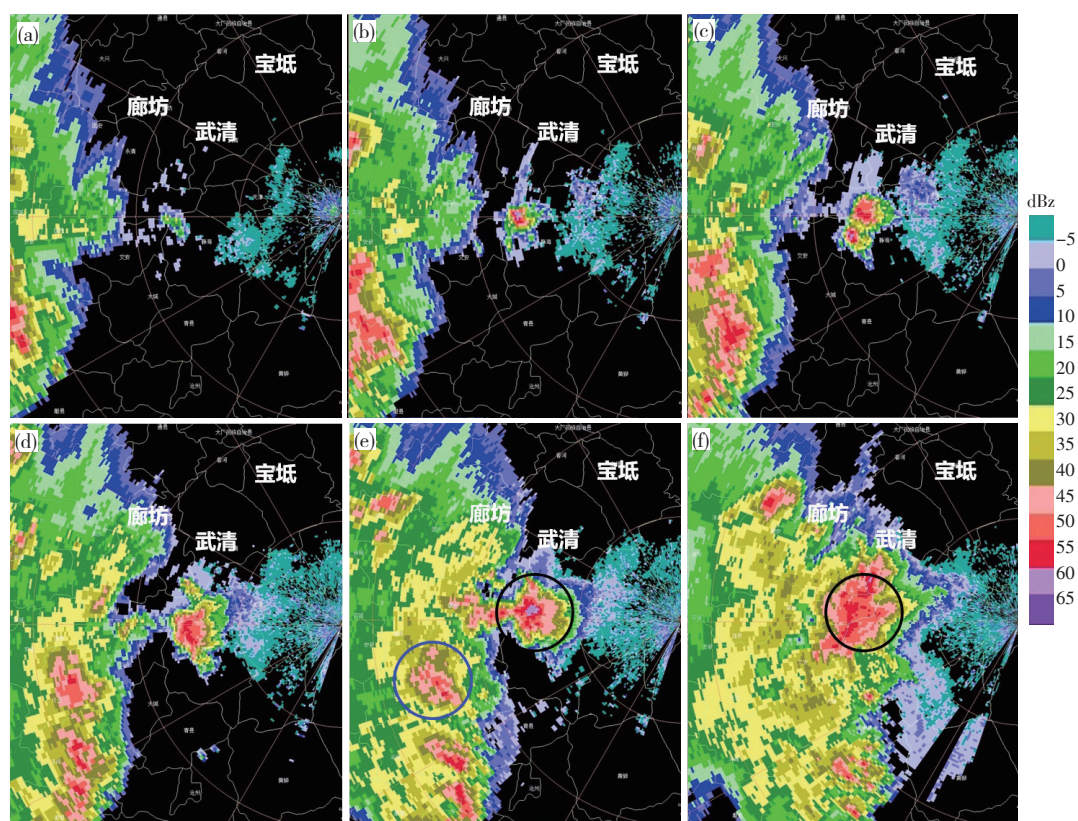


图3 2017年7月9日20:00 (a)、20:12 (b)、20:24 (c)、20:42 (d)、21:00 (e)和21:30 (f)塘沽多普勒雷达组合反射率(图3e中黑色、蓝色圆圈分别表示引发静海降雹的对流单体、文安西南侧的对流单体,3f中黑色圆圈表示合并后的新对流单体)

Fig. 3 Composite radar reflectivity of Tanggu Doppler radar at (a) 20:00 BT, (b) 20:12 BT, (c) 20:24 BT, (d) 20:42 BT, (e) 21:00 BT and (f) 21:30 BT on July 9, 2017 (The black and blue circles represent the convective cell causing hail in Jinghai and the convective cell in the southwest of Wen'an in Fig.3e, respectively. The black circle in Fig.3f indicates the new convective cell after the merging process)

65 dBz, 单体边界清晰, 反射率因子空间梯度大。反射率剖面(图4b)显示, 回波顶高为15 km, 存在有界弱回波区, 悬垂结构明显, 超过60 dBz强回波区位于1~6 km, 强回波接地表明此时对流单体处于发展成熟阶段。21:06不同仰角径向速度(图4c)上存在方向相反的密集等风速线, 且有水平尺度小于10 km的辐合式气旋性旋转, 伴有较强的上升运动。21:06之后, 位于静海台头的对流单体由于降雹能量有所释放, 强度稍有减弱, 后期因新生单体并入而再度加强, 强度增至60 dBz(图4d)。超过55 dBz回波位于(116.687°E—117.016°E, 38.855°N—39.368°N), 强回波高度从8 km降至3 km(图4e), 回波顶高为13~14 km, 此时悬垂结构已不明显。受对流单体影响, 21:48—22:05西青区辛口镇当城村降雹。降雹前期在雷达站点西北象限的径向速度正负速度对已不明显(图4f), 根据西青观测站雨滴谱仪资料获得的平均回波强度为54.6 dBz, 雨强达28.2 mm·h⁻¹, 平均动能通量和粒子数浓度分别为642.2 J·m⁻²·h⁻¹和3 167.5 m⁻³·mm⁻¹。

3.2 雨滴谱仪观测特征

结合雷达回波演变特征, 选择受对流云系影响的

西青、宝坻观测站雨滴谱资料进行分析, 两站降水时段分别为7月9日20:41—23:41、9日22:56—10日00:02。

3.2.1 雨滴谱仪和雨量计观测降雨量对比

对比西青观测站的雨滴谱仪与雨量计观测的分钟雨量(图5), 降水维持时段两种设备的观测一致性较好, 表明雨滴谱仪观测的降雨量可以较好反映此次对流性降水的变化特征。降雹时次雨滴谱仪的观测明显大于雨量计观测(两者分钟雨量差为0.24~0.76 mm), 主要原因是雨滴谱仪以激光测量为基础, 观测响应时间短, 能有效区分液固态降水, 翻斗式雨量计更适用于对液态降水的观测。降水时段雨滴谱仪观测的累计降雨量为16.44 mm(其中液态降水9.33 mm, 固态降水7.11 mm), 雨量计观测为12.5 mm。

3.2.2 微物理参量变化特征

西青观测站降水持续时段, 雨强 R 、雷达反射率 Z 及粒子数浓度 $N(D)$ 变化曲线(图6a)表明, Z 与 R 起伏变化明显。 R 有3个明显峰值, 分别是58.5 mm·h⁻¹(21:49), 57.9 mm·h⁻¹(22:00)和44.4 mm·h⁻¹(21:48)。降水持续时段 Z 均值为30.6 dBz, 雨强较大时雷达反射率介于45~55 dBz。 $N(D)$ 高值出现在21:04—21:09、

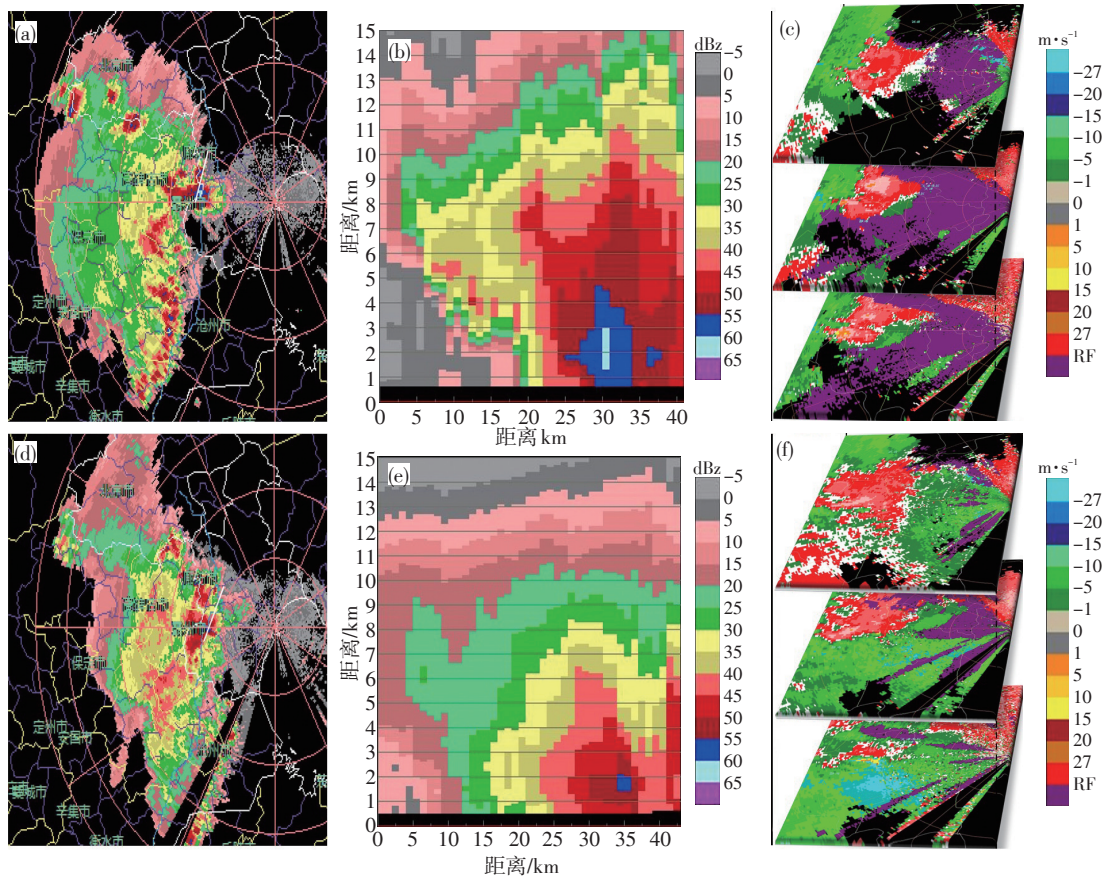


图4 2017年7月9日 21:06 (a)、21:48 (d)塘沽雷达反射率,21:06 (b)、21:48 (e)沿图4a、d白线处的反射率剖面以及21:06 (c)、21:48 (f)不同仰角径向速度

Fig. 4 Radar reflectivity at (a) 21:06 BT, (d) 21:48 BT, vertical profile at (b) 21:06 BT, (e) 21:48 BT along the white lines in Fig.4a and Fig.4d and radial velocity of different elevation angles at (c) 21:06 BT, (f) 21:48 BT from Tanggu radar on July 9, 2017

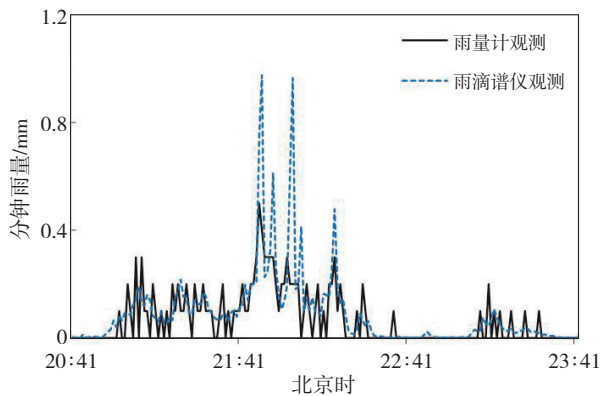


图5 2017年7月9日 20:41—23:41 西青观测站雨量计与雨滴谱仪观测的分钟降雨量对比

Fig. 5 Comparison of minute rainfall between hyetometrograph and raindrop spectrometer at Xiqing Station from 20:41 BT to 23:41 BT on July 9, 2017

21:19—21:29、21:44—22:03 三个时段。降雹时(21:48—21:53), $N(D)$ 迅速增大并达到峰值,此时雨强也最大($58.5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$)。该时段监测到3次降雹,分别是21:48(雹径6.3 mm)、21:49(雹径9.1 mm)和21:53(雹径7.3 mm)。22:20以后对流减弱, $N(D)$ 、 R 和 Z 减小。宝坻观测站(图6b)对流偏弱, R 介于 $0.02 \sim 3.2 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,

降水持续时段 R 与 Z 的均值分别是 $0.7 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 20.6 dBZ 。 $N(D)$ 最大为 $14.5 \text{ m}^{-3} \cdot \text{mm}^{-1}$,出现在23:39,数浓度和雷达反射率变化趋势较一致。

对比西青观测站降雹不同阶段微物理参数统计特征(表2)可知,随着降雹临近,特征直径中最大直径、中值体积直径和质量加权平均直径有所增大,并在降雹时达到峰值,分别为5.73 mm、2.56 mm和2.72 mm。降雹结束,对流减弱,粒子数浓度、反射率、雨强、含水量、平均动能通量等参数有所减小,粒子数浓度和动能通量降幅最为明显,分别从 $2809.25 \text{ m}^{-3} \cdot \text{mm}^{-1}$ 、 $410.39 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 降至 $180.51 \text{ m}^{-3} \cdot \text{mm}^{-1}$ 和 $39.94 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

3.2.3 不同尺度降水粒子对雨强的贡献

将降水粒子按照粒径大小分成小滴($D < 1.0 \text{ mm}$)、中滴($1.0 \text{ mm} \leq D \leq 3.0 \text{ mm}$)和大滴($D > 3.0 \text{ mm}$)三类,对比不同尺度粒子的雨强贡献率(图7)。在不同降雹阶段,中滴对雨强贡献率最大(均达50%以上)。降雹过程中,大滴对雨强的贡献较其他阶段有明显增加,中滴和大滴贡献率达94.56%。降雹结束,平均雨强从 $19.35 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 降至 $1.93 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,此时大滴对雨强的贡献率从42.54%降至17.89%,小滴对雨强贡献率有所增

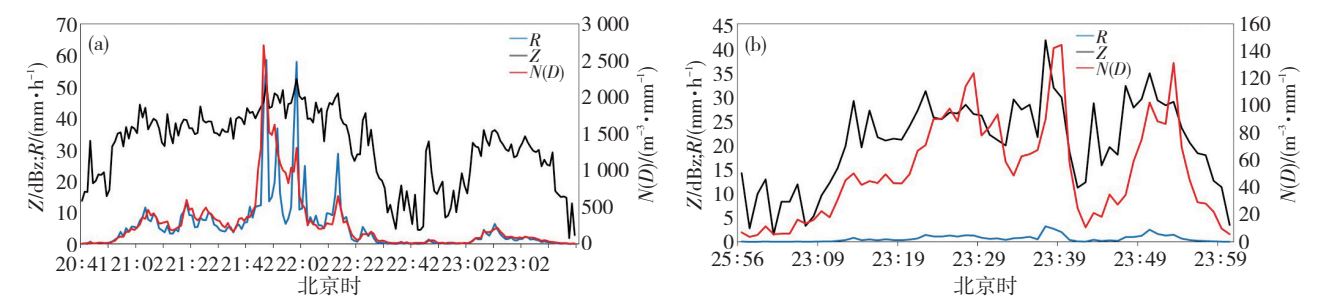


图6 2017年7月9日20:41—23:41西青观测站(a)以及22:56—00:02宝坻观测站
(b)雨强 R 、雷达反射率 Z 和粒子数浓度 $N(D)$ 变化

Fig. 6 Variation trend of precipitation intensity R , radar reflectivity Z , and particle number concentration $N(D)$ in (a) Xiqing station from 20:41 BT to 23:41 BT and (b) Baodi station from 22:56 BT to 00:02 BT on July 9, 2017

表2 降雹不同阶段西青观测站降水微物理参数统计特征

Table 2 Statistical characteristics of microphysical parameters of precipitation at Xiqing Station during different hailfall stages

降雹阶段	最大直径/mm	平均直径/mm	中值体积直径/mm	质量加权平均直径/mm	粒子数浓度/($\text{m}^{-3}\cdot\text{mm}^{-1}$)	反射率因子/dBz	雨强/($\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$)	含水量/($\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	平均动能通量/($\text{J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)
降雹前	4.02	0.59	1.91	2.08	579.65	40.73	5.18	0.28	95.26
降雹中	5.73	0.45	2.56	2.72	2 809.25	51.05	19.35	0.99	410.39
降雹后	3.39	0.67	1.80	1.91	180.51	36.24	1.93	0.10	39.94

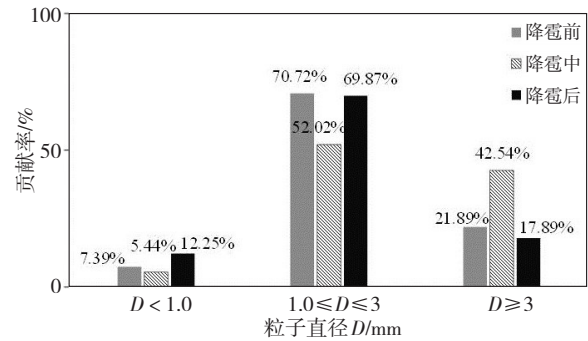


图7 降雹不同阶段不同尺度粒子对雨强的贡献率

Fig. 7 Contribution rate of precipitation particles at different scales to rain intensity during different stages of hailfall

加。以上分析表明对流发展旺盛阶段雨强大,这其中大滴的贡献不容忽视。

3.2.4 雨滴谱特征

图8为降雹不同阶段单位体积单位尺度间隔的降水粒子数浓度随粒子直径的变化曲线,可见曲线呈单调下降特征,小滴数浓度偏高。粒子数浓度在降雹中最大、降雹前次之、降雹后最小,这与陕西渭北降雹的谱特征类似(岳治国和梁谷,2018)。降雹中平均谱谱宽最大,超过7.0 mm,平均谱峰值在0.3 mm附近,且拥有一定数量的直径超过6.0 mm的大滴。出现此类谱型的原因可能是,在冰相粒子下落过程中,有的粒子会在高空完全融化,以大滴形式降落到地面,有些会部分融化并转换为小滴降落,受融化、破碎等共同影响,降水谱中存在较多小滴和一定数量的大滴。降雹前与降雹后,不超过1.0 mm的粒子区间平均谱

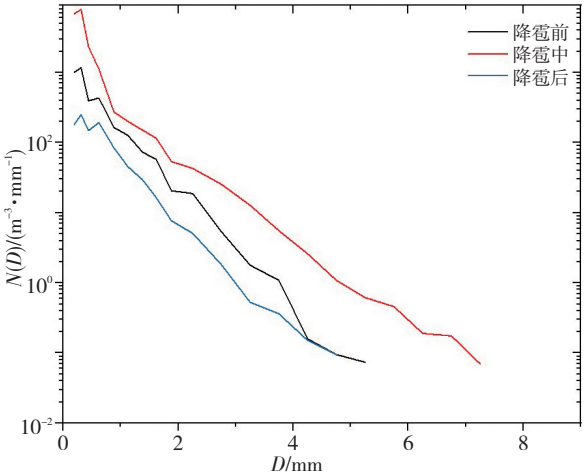


图8 2017年7月9日20:41—23:41西青观测站降水
雨滴平均数浓度 $N(D)$ 随粒子直径 D 的变化

Fig. 8 Variation of mean raindrop number concentration $N(D)$ with particle diameter D in Xiqing station from 20:41 BT to 23:41 BT on July 9, 2017

具有双峰特征,第一峰和第二峰分别出现在0.3 mm和0.6 mm附近,降雹前的平均谱谱宽要略大于降雹后的谱宽。

3.3 微波辐射计观测特征

3.3.1 气象要素演变特征

图9a为7月9日14:00—23:59微波辐射计探测的不同高度的温度变化,可见降雹前低、中、高层的温度约在30℃、1.0℃和-25℃,气温变化不明显;随着降雹临近,中高层由于冷空气侵入导致气温迅速降低,低层温度则显著上升,下暖上冷的温度配置有助于大

气不稳定状态加剧,为降雹提供了有利条件。相对湿度变化(图9b)显示,降雹前高低层相对湿度小(分别为17.1%,36.8%),中层湿度大(78.7%);降雹前1 h,低层湿度明显增加,中层湿度有所减小,高层依然偏干,下湿上干的湿度分布加剧大气不稳定,有利于降雹;降雹出现后,近地层湿度近乎饱和,中高层湿度明显降低。积分水汽和液态水含量的变化表明(图9c、d),

18:00开始中低层水汽逐渐增加,21:00前后达到峰值,表明降雹前水汽出现缓慢持续的积累。积分水汽、液态水含量在降雹前1 h出现明显跃增,降雹结束后迅速下降,降雹期间在高值区维持。2—6 km处的液态水含量较其他层明显偏高,结合20:00探空资料可知,0℃层在4396 m,2—6 km处含水量累积区有助于冰雹形成及快速增长(郑凯琳和陈宝君,2011)。

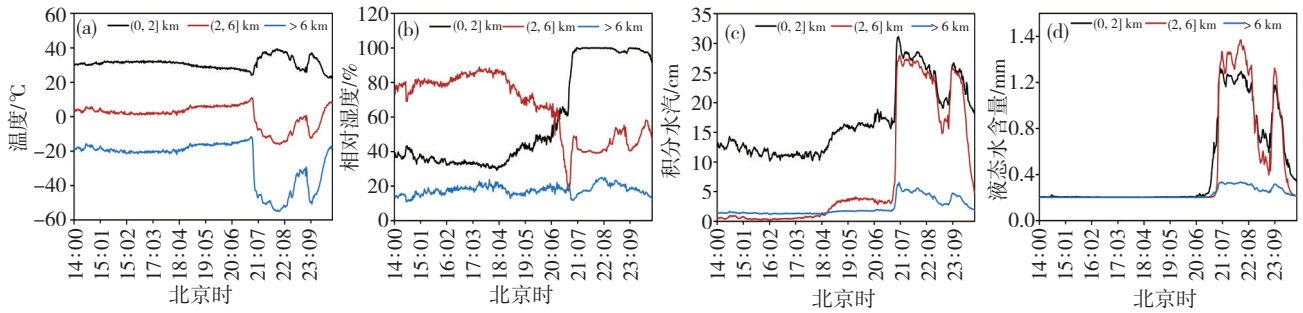


图9 2017年7月9日14:00—23:59微波辐射计探测的不同高度层温度(a)、相对湿度(b)、积分水汽(c)和液态水含量(d)的时间变化

Fig. 9 Temporal variation of (a) temperature, (b) relative humidity, (c) integrated water vapor, and (d) liquid water content at different levels detected by microwave radiometer from 14:00 BT to 23:59 BT on July 9, 2017

3.3.2 典型时次气象要素特征

对比降雹前后整层大气水汽、液态水含量以及不同高度相对湿度、温度变化可知,水汽含量丰沛区位于3.0 km以下(图10a)。降雹前(20:00),近地层水汽含量随高度增加而降低,0.8—1.9 km水汽含量明显减小,2.0—3.0 km为水汽含量大值区;降雹临近时(21:00),低层0.8—1.9 km水汽含量增加,2.0—3.0 km水汽含量逐渐降低;对流结束时(22:30),整层大气水汽含量略有增加。降雹前,各高度层液水含量最小(图10d);降雹临近,近地层和中层液水明显增加,峰值位于2.25 km和3.25 km附近(对应数值为7.05 mm,8.655 mm),3.5 km

以上液态水含量迅速降低;降雹结束后,各层液水含量降低。

相对湿度变化表明,4.5 km以下呈中间层干、上下层湿的特征(图10b),干湿配置有利于对流不稳定增强。降雹前,1.0 km以下湿度为56.1%,1.1—2.25 km湿度减小到18.8%,2.5—4.5 km处湿度为30.1%;降雹临近,1.0 km以下湿度增大至60.7%且近地面近乎饱和,高层2.5—4.5 km处湿度减小至25.2%,表明降雹前低层出现水汽的汇聚,高层由于有冷空气侵入而导致相对湿度有所减小;降雹后,由于雹、雨的影响使2.5—4.5 km相对湿度有所增加。

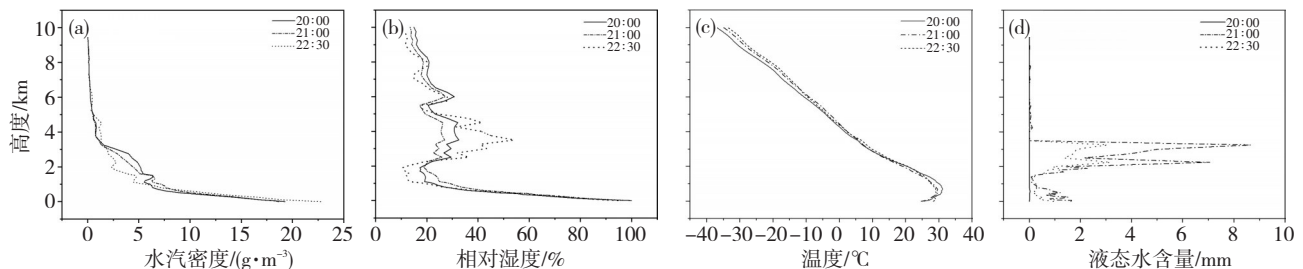


图10 降雹不同阶段典型时次微波辐射计探测的水汽密度(a)、相对湿度(b)、温度(c)及液态水含量(d)垂直廓线

Fig. 10 Vertical profiles of (a) water vapor density, (b) relative humidity, (c) temperature, and (d) liquid water content detected by microwave radiometer during different periods of hailfall

在对流初期及发展阶段,0.7 km以下存在逆温,降水结束,逆温消失(图10c)。逆温层会在一定程度上阻碍大气中不同高度层水汽与热量交换,使高层干冷、低层暖湿的现象更加明显,有利于不稳定能量积累及对流触发。降雹前0.5 h,整层大气温度降低,平均降幅超过0.5℃,2.0 km以下温度降幅更为明显,主要源

于降雹前中高层冷空气的侵入;降雹后,整层大气温度有所回升。

4 结论与讨论

基于多普勒天气雷达、激光雨滴谱仪、微波辐射计、自动气象观测站等多种资料,对2017年7月9日天

津地区一次降雹过程的对流单体演变、雨滴谱、微物理参数及气象要素变化特征等进行了深入分析,得出主要结论如下:

(1) 850 hPa 切变线东侧的暖湿气流与 500 hPa 冷空气叠加,有利于不稳定能量积累和对流触发。降雹临近时,K 指数、沙氏指数和全总指数分别达 37℃、-6.5℃和 58℃,环境大气不稳定性显著增强。

(2) 对流单体前期稳定少动,后期合并加强,导致静海及西青部分地区降雹。降雹前强回波区逐渐向低层扩展,降雹时 60 dBz 强回波接地,不同仰角径向速度产品上存在小尺度的辐合式气旋性旋转,伴有较强上升运动。

(3) 降雹过程中,最大直径、质量加权平均直径和中值体积直径达到峰值,中大滴对雨强贡献率达 94.56%,平均谱谱宽最大,超过 7.0 mm,平均谱峰值出现在 0.3 mm 附近,且拥有一定数量直径超过 6.0 mm 的大滴;降雹后,粒子数浓度、反射率、雨强、含水量、平均动能通量等明显减小,小滴对雨强贡献率增大,大滴的贡献率减小,在不超过 1.0 mm 的粒子区间平均谱具有双峰特征,第一峰和第二峰分别出现在 0.3 mm 和 0.6 mm 附近。

(4) 降雹前水汽出现缓慢持续积累,积分水汽、液态水含量在临近降雹前 1 h 出现明显跃增,降雹后迅速下降。降雹临近,中高层由于冷空气侵入气温迅速降低,高层偏干,低层温度有所上升,湿度增加,下暖上冷与下湿上干的温湿配置有利于大气不稳定加剧。

本文基于多种地面观测资料,分析了天津地区一次降雹过程的雨滴谱特征、降雹前后环境温湿度和水汽的变化,有助于加深对降雹过程微物理及热动力演变特征的认识。对比微物理参数发现降雹时粒子平均直径下降,粒子数浓度、平均动能通量、雨强等较降雹前明显增加,这与宁夏六盘山地区降雹微物理参数演变特征类似(陶涛等,2020)。但两地降雹的平均雨滴谱谱型不同,谱型差异一方面可能源于区域气候或地形差异的影响,另一方面源于对流发展不同阶段碰并、碰撞、破碎等微物理过程对降水谱分布的影响,这些问题值得在今后的研究中重点关注。

参考文献(reference):

陈跃浩,黄鹤,熊明明,等.2022.天津地区冰雹气候特征及影响路径研究[J].自然灾害学报,31(4):107-115. Chen Y H, Huang H, Xiong M M, et al. 2022. Research of climatic characteristics and influence path of hail in Tianjin [J]. Journal of Natural Disasters, 31(4):107-115 (in Chinese). doi:10.13577/j.jnd.2022.0410

杜牧云,赵娴婷,周伶俐,等.2022.鄂西南一次早春强对流的多元资料分析[J].暴雨灾害,41(2):174-183. Du M Y, Zhao X T, Zhou L L, et al.

2022. Analysis of an early spring convective weather event in south-west of Hubei Province based on multi-source data [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 41(2):174-183 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2022.02.008

黄治勇,徐桂荣,王晓芳,等.2013.地基微波辐射资料在短时暴雨潜势预报中的应用[J].应用气象学报,24(5):576-584. Huang Z Y, Xu G R, Wang X F, et al. 2013. Applications of ground-based microwave radiation data to short-term rainstorm and potential forecast [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 24(5):576-584 (in Chinese). doi:10.11898/1001-7313.20130507

黄治勇,徐桂荣,王晓芳,等.2014.基于地基微波辐射计资料对咸宁两次冰雹天气的观测分析[J].气象,40(2):216-222. Huang Z Y, Xu G R, Wang X F, et al. 2014. Analysis on two hailstorm events in Xianning based on observations of ground based microwave radiometer[J]. *Meteorological Monthly*, 40(2):216-222 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2014.02.009

李聪,姜有山,姜迪,等.2017.一次冰雹天气过程的多源资料观测分析[J].气象,43(9):1084-1094. Li C, Jiang Y S, Jiang D, et al. 2017. Observation and analysis of a hailstorm event based on multi source data [J]. *Meteorological Monthly*, 43(9):1084-1094 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2017.09.006

李山山,王晓芳,李国平,等.2023.短时强降水和持续性强降水的雨滴谱特征对比[J].暴雨灾害,42(1):1-12. Li S S, Wang X F, Li G P, et al. 2023. Comparative analysis on characteristics of raindrop spectrum of short-term and persistent heavy rain [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 42(1):1-12 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2022-119

刘一玮,寿绍文,解以扬,等.2011.热力不均匀场对一次冰雹天气影响的诊断分析[J].高原气象,30(1):226-234. Liu Y W, Shou S W, Xie Y Y, et al. 2011. Diagnostic analysis of the effect of thermal inhomogeneous field on the hail [J]. *Plateau Meteorology*, 30(1):226-234 (in Chinese). doi:10.3724/SP.J.1011.2011.00197

闵晶晶,刘还珠,曹晓钟,等.2011.天津“6.25”大冰雹过程的中尺度特征及成因[J].应用气象学报,22(5):525-536. Min J J, Liu H Z, Cao X Z, et al. 2011. The mesoscale characteristics and causes of a severe hail event in Tianjin [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 22(5):525-536 (in Chinese). doi:10.11898/1001-7313.20110502

宋薇,靳瑞军,孟辉,等.2012.近年天津地区冰雹和雷暴天气特征研究[J].气候与环境研究,17(6):919-924. Song W, Jin R J, Meng H, et al. 2012. Analysis of hailstone and thunderstorm characteristics in Tianjin during recent years [J]. *Climatic and Environmental Research*, 17(6):919-924 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.06.29

孙京,蔡然,柴健,等.2018.基于微波辐射计和闪电观测资料估算对流性降水方法初探[J].干旱气象,36(3):438-446. Sun J, Cai R, Chai J, et al. 2018. A preliminary study on estimation of rainfall in convective weather system by using lightning location system and ground microwave radiometers retrievals [J]. *Journal of Arid Meteorology*, 36(3):438-446 (in Chinese). doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2018)-03-0438

唐仁茂,李德俊,向玉春,等.2012.地基微波辐射计对咸宁一次冰雹天气过程的监测分析[J].气象学报,70(4):806-813. Tang R M, Li D J, Xiang Y C, et al. 2012. Analysis of a hailstorm event in the middle Yangtze River basin using ground microwave radiometers [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 70(4):806-813 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2012.066

- 陶涛,张立新,桑建人,等.2020.六盘山区一次非典型冰雹天气过程微物理量特征的分析[J].干旱区地理,43(2):299–307. Tao T, Zhang L X, Sang J R, et al. 2020. A case analysis of microphysical characteristics of atypical hail formation over Liupan Mountain, China [J]. Arid Land Geography, 43(2):299–307 (in Chinese). doi:10.12118/j.issn.1000–6060.2020.02.03
- 王俊,王文青,王洪,等.2021.山东北部一次夏末雹暴地面降水粒子谱特征[J].应用气象学报,32(3):370–384. Wang J, Wang W Q, Wang H, et al. 2021. Hydrometeor particle characteristics during a late summer hailstorm in northern Shandong [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 32(3):370–384 (in Chinese). doi:10.11898/1001–7313.20210309
- 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]. Meteorological Monthly, 49(2): 213–223. doi:10.7519/j.issn.1000–0526.2022.072201
- 吴世美,徐飞英,沈杨迪.2017.一次冰雹天气的降水现象仪观测分析[J].贵州气象,41(5):79–82. Wu S M, Xu F Y, Shen Y D. 2017. Observation analysis of precipitation phenomenon meter to a hail weather process [J]. Journal of Guizhou Meteorology, 41(5):79–82 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1003–6598.2017.05.015
- 吴宜,刘西川,孙宇,等.2021.雨滴谱式降水现象仪与人工观测结果的一致性分析[J].气象科技,49(1):32–39. Wu Y, Liu X C, Sun Y, et al. 2021. Consistency analysis of raindrop-spectrum precipitation phenomenon sensor and manual observation results [J]. Meteorological Science and Technology, 49(1):32–39 (in Chinese). doi:10.19517/j.1671–6345.20200064
- 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]. Meteorological Science and Technology, 45(4):698–709 (in Chinese). doi:CNKI:SUN:QXKJ.0.2017–04–018
- 俞小鼎,王秀明,李万莉,等.2020.雷暴与强对流临近预报[M].北京:气象出版社:416. Yu X D, Wang X M, Li W L, et al. 2020. Thunderstorm and strong convection nowcasting [M]. Beijing: Meteorological Press:416 (in Chinese)
- 岳治国,梁谷.2018.陕西渭北一次降雹过程的粒子谱特征分析[J].高原气象,37(6):1716–1724. Yue Z G, Liang G. 2018. Characteristics of precipitation particles in a hailstorm process in Weibei area of Shanxi Province [J]. Plateau Meteorology, 37(6):1716–1724 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000–0534.2018.00023
- 张丰伟,张逸轩,韩树浦,等.2019.2016年5月6日重庆万盛短时强降雨雨滴谱特征分析[J].沙漠与绿洲气象,13(4):46–51. Zhang F W, Zhang Y X, Han S P, et al. 2019. Analysis on raindrop spectrum during a short-time strong precipitation on 6, May 2016 in Wansheng [J]. Desert and Oasis Meteorology, 13(4):46–51 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002–0799.2019.04.007
- 张楠,杨晓君,邱晓滨,等.2018.一次突发性暴雨的机理分析及短期预报思考[J].气象,44(1):118–131. Zhang N, Yang X J, Qiu X B, et al. 2018. Mechanism analysis and rethinking of short-term prediction of a sudden rainstorm [J]. Meteorological Monthly, 44(1):118–131 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000–0526.2018.01.010
- 郑凯琳,陈宝君.2011.含水量累积区与冰雹增长行为之数值模拟[J].大气科学,35(2):298–310. Zheng K L, Chen B J. 2011. Numerical simulation of the accumulation zones and hail growth trajectories in hailstorms [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 35(2):298–310 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006–9895.2011.02.09
- Chan P W, Lee Y F. 2011. Application of a ground-based, multi-channel microwave radiometer to the alerting of low-level windshear at an airport [J]. Meteorologische Zeitschrift, 20(4):423–429. doi:10.1127/0941–2948/2011/0275
- Chen B J, Wang J, Gong D L. 2016. Raindrop size distribution in a midlatitude continental squall line measured by Thies optical disdrometers over East China [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 55(3):621–634. doi:10.1175/JAMC-D-15–0127.1
- Friedrich K, Stephanie H, Masters F J, et al. 2013. Articulating and stationary PARSIVEL Disdrometer measurements in conditions with strong winds and heavy rainfall [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 30(9):2063–2080. doi:10.1175/JTECH-D-12–00254.1
- Kulikov M Y, Belikov M V, Skalyga N K, et al. 2020. Skills of thunderstorm prediction by convective indices over a metropolitan area: comparison of microwave and radiosonde data [J]. Remote Sensing, 12:604. doi:10.3390/rs12040604
- Ma R J, Li X F. 2022. Sounding data from ground-based microwave radiometers for a hailstorm case: analyzing spatiotemporal differences and initializing an idealized model for prediction [J]. Atmosphere, 13(10): 1535. doi:10.3390/atmos13101535
- Qi Y J, Fan S Y, Mao J J, et al. 2021. Impact of assimilating ground-based microwave radiometer data on the precipitation bifurcation forecast: A case study in Beijing [J]. Atmosphere, 12:551. doi:10.3390/atmos12050551
- Xu G R. 2024. A review of remote sensing of atmospheric profiles and cloud properties by ground-based microwave radiometers in Central China [J]. Remote Sensing, 16(6):966. doi:10.3390/rs16060966

(责任编辑 唐永兰)