

# 2017年北京北部一次罕见强弓状飚线 过程演变和机理<sup>\*</sup>

罗琪<sup>1,2,3</sup> 郑永光<sup>1,2</sup> 陈敏<sup>3</sup>

LUO Qi<sup>1,2,3</sup> ZHENG Yongguang<sup>1,2</sup> CHEN Min<sup>3</sup>

1. 中国气象科学研究院,北京,100081
2. 国家气象中心,北京,100081
3. 北京城市气象研究院,北京,100089

1. *Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China*

2. *National Meteorological Centre, Beijing 100081, China*

3. *Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100089, China*

2018-07-20 收稿,2018-10-23 改回.

罗琪, 郑永光, 陈敏. 2019. 2017年北京北部一次罕见强弓状飚线过程演变和机理. 气象学报, 77(3):371-386

**Luo Qi, Zheng Yongguang, Chen Min. 2019. Evolution and development mechanisms of a rare strong arc-shaped squall line that occurred in northern Beijing in 2017. *Acta Meteorologica Sinica*, 77(3):371-386**

**Abstract** Based on the NCEP (National Centers of Environmental Prediction) analysis data and various observations from automatic weather stations (AWS), cloud-to-ground lightning positioning system, stationary meteorological satellites and weather radars, the present study uses a "ingredient-based method" to comprehensively analyze environmental conditions, evolution characteristics, trigger and development mechanisms of a rare strong arc-shaped squall line with maximum instantaneous wind on nearly F12 scale and large hails. The squall line originated on the southwestern side of a 500 hPa cold vortex and swept northwestern Hebei Province and central and northern Beijing during the period from afternoon to midnight on 7 July 2017. The strong low-level jet, large convective available potential energy (CAPE) above 2000 J/kg and intense 0–6 km and 0–3 km vertical wind shears were very favorable for the development and maintenance of the squall line. A supercell storm embedded in the squall line produced large hails and high winds. The lower level of 3.8 km altitude for the wet bulb temperature 0°C was in favor of producing large hails. Dew-point deficit that was up to 30°C in the middle troposphere and large vertical temperature lapse rate caused large downdraft convective available potential energy (DCAPE), which promoted the formation of bow echoes and high winds. The convection initiation of the squall line was triggered near a surface convergence line between northwesterly winds and southwesterly winds. High winds and large hails were mainly located in the low TBB and active positive cloud-ground lightning area. Radar observations show that the squall line developed from a linear convection system to a cluster supercell storm, and finally to an arc-shaped squall line with significant overhang echoes, weak echo regions, mesocyclone (or mesovortex) and strong rear inflows which caused rear inflow notches. Intense downdraft induced by the strong jet in the middle of the troposphere and high dew-point deficit was the main cause for the formation of the bow echoes in the squall line. The mechanisms of maintaining the squall line and bow echoes include large CAPE and DCAPE and strong vertical wind shear.

**Key words** Bow echo, Squall line, Supercell, Evolution, Mechanism

<sup>\*</sup> 资助课题:国家重点研发计划(2018YFC1507504、2018YFC1506804)、国家自然科学基金项目(41375051)。

作者简介:罗琪,主要从事雷暴大风分析和数值模拟研究。E-mail: loco420@163.com

通信作者:郑永光,主要从事强对流和强降水等中小尺度天气研究。E-mail: zhengyg@cma.gov.cn

**摘要** 2017年7月7日下午至午夜,河北西北部和北京中北部发生了一次罕见的最大瞬时风力将近12级并伴有冰雹的强弓状飚线过程,其触发、演变和维持机制等具有较高研究价值。综合多种观测资料和NCEP分析资料,利用“配料法”分析了该次飚线过程的环境条件、触发、演变、风暴结构和弓形回波的形成与维持机制。飚线发生在500 hPa冷涡西南部的后倾槽和低空急流形势下;超过2000 J/kg的对流有效位能(CAPE)、强0—6 km和0—3 km风垂直切变为弓状飚线及其相关超级单体的生成和维持、冰雹和地面强风的形成提供了有利条件;较低的湿球温度0℃层(~3.8 km)是有利于冰雹形成的融化层高度;对流层中层高达30℃温度露点差与大的垂直减温率造成环境大气具有强的下沉对流有效位能(DCAPE),利于弓形回波和地面大风的形成。初始对流形成于西北风和西南偏西风之间的地面辐合线附近。地面大风和冰雹主要分布于低黑体亮温(TBB)和以正闪为主的闪电活跃处。雷达回波显示飚线先由线状对流系统发展成为团状超级单体对流系统,最后演变成弓状飚线。超级单体阶段和飚线阶段都有明显的回波悬垂、弱回波区、中气旋(飚线成熟后期为中涡旋)、强后侧入流及其伴随的入流缺口等;对流层中层急流和大的温度露点差是形成强下沉气流并发展出弓状特征的主要原因;大的对流有效位能和下沉对流有效位能以及强风垂直切变是飚线维持的原因。

**关键词** 弓形回波, 飚线, 超级单体, 演变, 机理

**中图法分类号** P458.3

## 1 引言

2017年7月7日下午至午夜,河北西北部与北京中北部发生了一次罕见强飚线过程,导致了较大范围的雷暴大风、冰雹、短时强降水等强对流天气。据相关研究统计结果(Meng, et al, 2013; 杨珊珊等, 2016),北京中南部和河北中南部易于发生飚线过程,北京中北部地区的飚线过程较为罕见,因此,这次过程的发生、发展特征和机理非常值得研究。

飚线是水平尺度至少达100 km、具有较大长宽比的中尺度深厚湿对流系统(American Meteorological Society, 2016; Parker, et al, 2000),易产生较大范围的暴雨、雷暴大风、冰雹等天气(俞小鼎等, 2012; 郑永光等, 2018a),而弓状回波飚线通常与下击暴流、灾害性大风有关,比普通飚线更易于产生雷暴大风天气(Hamilton, 1970; Fujita, 1978; Forbes, et al, 1983; Przybylinski, 1995; Weisman, 2001; Atkins, et al, 2005)。中国飚线发生时的大尺度环流背景主要有槽后型、槽前型、高后型和台风倒槽型4种,其中北方飚线主要以槽后型为主(丁一汇等, 1982),且经常与冷涡密切相关。美国的多数飚线大风天气也是发生在500 hPa西风或西北风背景下(Johns, 1982)。冷涡是影响中国北方地区夏季强对流天气的重要天气系统之一(白人海等, 1998; 戴建华等, 2012; 杨珊珊等, 2016),如2009年6月3日导致河南22人死亡的飚线过程、2016年6月30日影响河北和山东的飚线过程(公衍铎等, 2019)等。

飚线的发展维持机制尚未完全清楚。有研究认

为,飚线系统前沿的上升气流的直立发展与飚线发展有密切联系,而上升气流是否直立发展很大程度上取决于冷池和低层风垂直切变分别产生的负涡度与正涡度的平衡情况(Rotunno, et al, 1988; Parker, et al, 2004; Coniglio, et al, 2006; Markowski, et al, 2010)。陈明轩等(2012)用RKW(Rotunno-Klemp-Weisman)理论较好地解释了一次华北飚线低层风垂直切变和冷池对其发展的作用。Davis等(2007)提出中尺度线状对流系统中两端存在的涡旋能够增强后侧入流从而有利于线状对流系统的维持。最近,陈淑琴等(2017)、张宁等(2017)、公衍铎等(2019)分别分析了2008年7月2日浙北沿海、2014年7月29日河南、2016年6月30日河北和山东飚线过程的环境条件、演变、触发和维持机制。

本研究利用常规地面、重要天气报、自动气象站、探空、云-地闪电(简称闪电)定位、静止气象卫星、新一代天气雷达等观测资料和 $1^\circ \times 1^\circ$ 的美国国家环境预报中心(NCEP)分析资料,应用“配料法”(Doswell III, et al, 1996; 俞小鼎, 2011)等方法,综合分析发生在冷涡西南部、影响河北西北部和北京中北部的一次罕见弓状飚线过程(图1a)的环境条件、触发、演变、风暴结构和弓形回波的形成与维持机制;其中使用GR2Analyst软件分析多普勒天气雷达的基本反射率因子和径向速度分布,并利用该软件优化的冰雹、中气旋等识别产品来辅助分析大冰雹和超级单体分布。通过对此次罕见飚线及其产生强对流天气的特征分析以期加深对该类天气系统发生、发展规律的认识,并为其预报、预警提供参考依据。

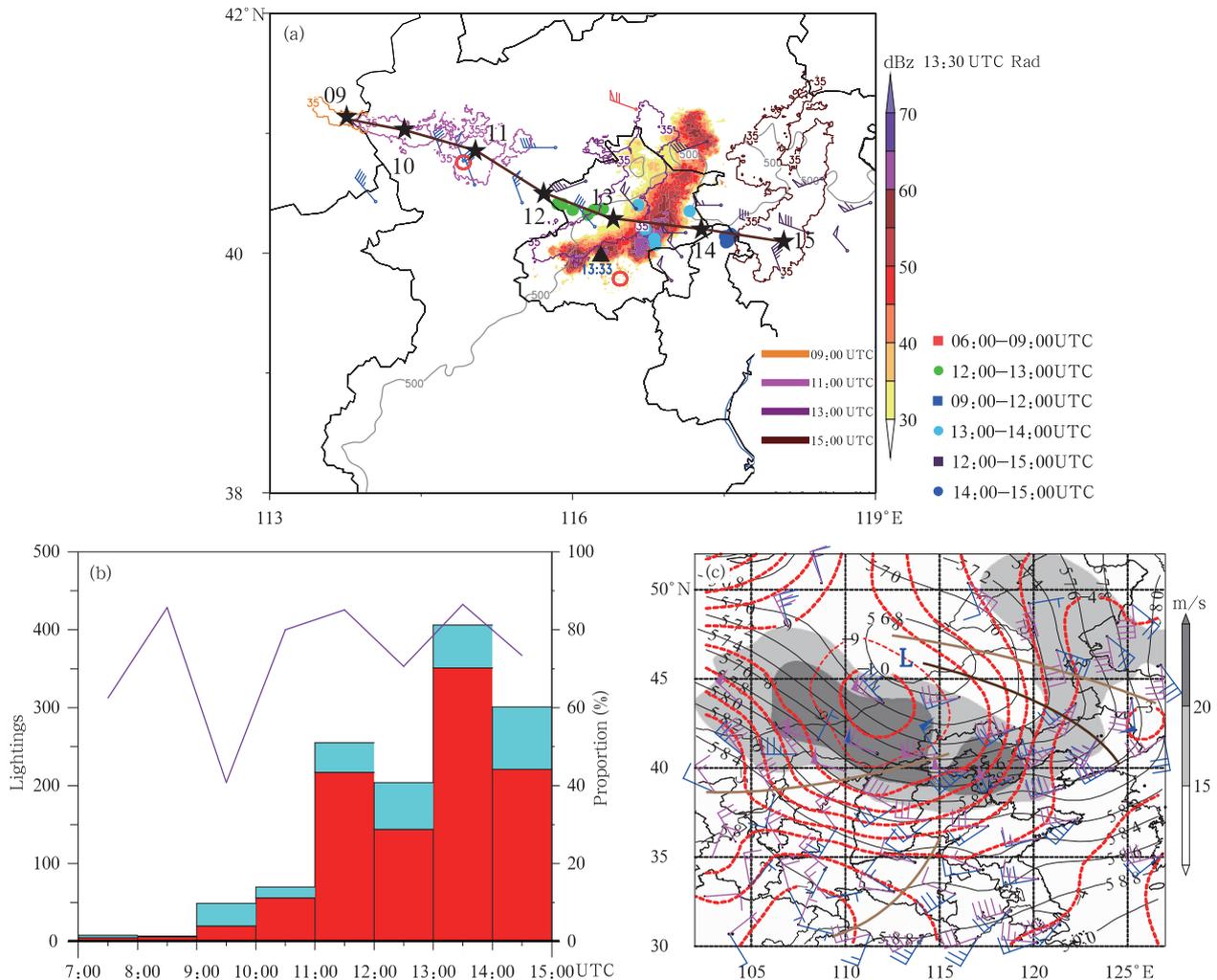


图1 天气实况、飑线移动路径、闪电分布和天气形势

(a. 7月7日09—15时受飑线影响区域逐时自动气象站 $\geq 20$  mm/h短时强降水(圆点)和逐3 h中国国家级地面气象站 $\geq 17$  m/s大风(自动气象站观测的大风未给出),红色圆圈为张家口和北京探空站位置,黑色三角表示冰雹和发生时间;逐时最强反射率因子核心的移动路径和35 dBz等值线(黑色五角星为最强反射率因子核心,棕色线为移动路径;色阶为13时30分 $\geq 30$  dBz反射率因子);灰色实线为500 m地形高度等值线;  
 b. 08—15时飑线影响区域(38°—42°N, 113°—119°E)逐时闪电时间演变(红色柱形:正地闪;蓝色柱形:负地闪;紫色折线:正闪占总闪比例;左侧纵坐标为地闪发生次数;右侧纵坐标为正闪比例,单位:%);  
 c. 由探空资料分析的12时天气形势,黑色实线为500 hPa位势高度等值线,单位 dagpm,间隔 2 dagpm;红色虚线为500 hPa温度等值线,单位:℃,间隔 1℃;色阶为500 hPa风速;紫红色风羽为500 hPa风场;蓝色风羽为850 hPa风场;浅棕色线为850 hPa切变线;深棕色线为500 hPa槽线)

Fig. 1 Convective weather, path of the squall line, cloud-to-ground lightning and synoptic situation

(a. convective weather and squall line path during 09:00–15:00 UTC 7 July (dots with different colors represent hourly precipitation of no less than 20 mm; red circles represent sounding stations at Zhangjiakou and Beijing, respectively; black triangles indicate hails; the gray solid line denotes 500 m terrain height; the solid line with black pentagrams shows the path of the core of the strongest reflectivity of the squall line, 35 dBz radar reflectivity contour is marked by colorful solid lines); shaded areas represent 13:30 UTC radar reflectivity of no less than 30 dBz;  
 b. hourly cloud-to-ground lightning (38°–42°N, 113°–119°E) during 08:00–15:00 UTC 7 July (blue bars represent negative cloud-to-ground lightning, red bars are for positive cloud-to-ground lightning, and the polyline shows the proportion of positive cloud-to-ground lightning to total);  
 c. synoptic situation at 12:00 UTC 7 July (black solid lines are contours of geopotential height at 500 hPa, the unit is dagpm and interval is 2 dagpm; red dotted lines are contours of temperature at 500 hPa, the unit is ℃ and interval is 1 ℃; gray shaded areas show wind speed at 500 hPa; purple barbs are for 500 hPa winds; blue barbs are for 850 hPa winds; light brown solid lines are shear lines at 850 hPa; the dark brown solid line is the trough line at 500 hPa)

## 2 对流实况和天气形势

### 2.1 对流天气实况

2017年7月7日这次飊线天气过程持续时间超过7 h;其于08—09时(世界时,下同)在河北西北部与内蒙古交界区域附近初生,进入北京区域后以约70 km/h平均移速迅速向东南偏东方向移动,其最强反射率因子核心的移动路径如图1a;其不同发展阶段具有不同的组织模态,成熟阶段表现出明显的弓形回波特征。图1a给出了08—15时河北西北部、北京中北部等地强对流天气分布,多个中国国家级地面气象站观测的最大瞬时风力超过8级,最强超过20 m/s,自动气象站观测的最大瞬时风力将近12级(32.2 m/s);总体来看,强对流天气以雷暴大风为主,冰雹和短时强降水为辅。

从闪电的演变来看,10—11时闪电次数明显增多,11时以正地闪为主,且飊线主要影响区域(38°—42°N, 113°—119°E)正地闪比例一直超过40%(图1b),在飊线成熟阶段更是接近90%。这种较高比例的正地闪分布特征表明,对流系统中含有较多的冰相粒子,是产生风雹天气的重要特征之一(Carey, et al, 1998; 冯桂力等, 2007; 郑永光等, 2017; 公衍铎等, 2019)。

### 2.2 天气形势

该次飊线过程发生在蒙古冷涡的西南部。7月7日00时,500 hPa冷涡中心位于内蒙古中部偏东与蒙古国的交界区域附近;06和12时冷涡中心略向东北方向移动,冷涡中心范围扩大,河北北部和北京等地位于冷涡西南部,其上空500 hPa有显著冷平流,强度达 $-30 \times 10^{-5}$  K/s,较00时( $-5 \times 10^{-5}$  K/s)显著加强;存在明显的 $\geq 20$  m/s高空急流,12时较06时范围有所缩小。12时(图1c)500 hPa槽线位于850 hPa槽线前方,前倾槽特征较为明显。河北中南部和北京等地925和850 hPa西南气流显著增强,最大风速达18 m/s,出现强低空急流;在海平面气压场上存在显著的低压环流。

此次飊线过程发生在500 hPa冷涡西南部和低槽显著前倾以及显著冷平流、高低空存在明显急流、地面存在显著低压的天气背景下。

## 3 飊线发展环境条件

如前所述,06和12时,河北北部、北京及周围

地区500 hPa有显著冷平流。同时,850 hPa有显著暖平流(图2a)。北京探空显示,00时北京大气低层为明显冷平流,但至12时(图2e)1000—600 hPa层次转变为风随高度顺转,有明显的暖平流。从NCEP分析资料计算的850与500 hPa温差演变来看(图略),对流发生区域由00时的24—27℃升至12时的28—34℃,垂直减温率的增大表明静力不稳定性显著增强,这与后文给出的北京探空垂直减温率的变化一致。

NCEP分析资料显示,00—12时北京及周边地区低层湿度逐渐增大,925 hPa比湿从00时12 g/kg增至12时的14 g/kg左右;大气可降水量由00时20—30 mm增至12时的30—35 mm(图2b)。12时北京探空(图2e)计算的大气可降水量约为34 mm,与NCEP分析资料(图2b)给出的35 mm数值基本一致。湿度增大为强对流天气发展提供了更为有利的水汽条件。

00与06时NCEP分析资料给出的北京、河北北部及周边地区对流有效位能较小,最大值未超过1000 J/kg;至12时(图2b),对流有效位能明显增大,最大值超过1600 J/kg。12时北京探空(图2e)资料计算的对流有效位能达2600 J/kg,这与图2b中NCEP分析资料计算的北京附近的地表对流有效位能存在一定偏差,NCEP分析资料较观测资料计算的对流有效位能数值偏小,这与NCEP分析资料的湿度数值偏小有关(王秀明等, 2012)。

NCEP分析资料计算的06时北京及周边地区的对流抑制能量(CIN)最大80 J/kg左右,河北北部对流抑制能量数值更小,有利于对流在该地触发。12时对流抑制能量有所增大,北京中北部最大数值超过了150 J/kg,北京探空资料计算得到的对流抑制能量也达到了120 J/kg,这表明需要较深厚的低层空气辐合抬升才能克服对流抑制能量发展为自由对流。

12时北京探空(图2e)925、850和700 hPa的风速均超过了12 m/s,有明显强低空急流,在其作用下,暖湿空气由西南方向向北京及周边地区输送,为对流发展提供有利的水汽和热力条件。据NCEP分析资料计算,北京及周边地区深层(500—1000 hPa)和浅层(700—1000 hPa)的风垂直切变(图2c、d)从00至12时逐渐增大,强切变区域范围明显扩大;12时风垂直切变均超过15 m/s,最大超

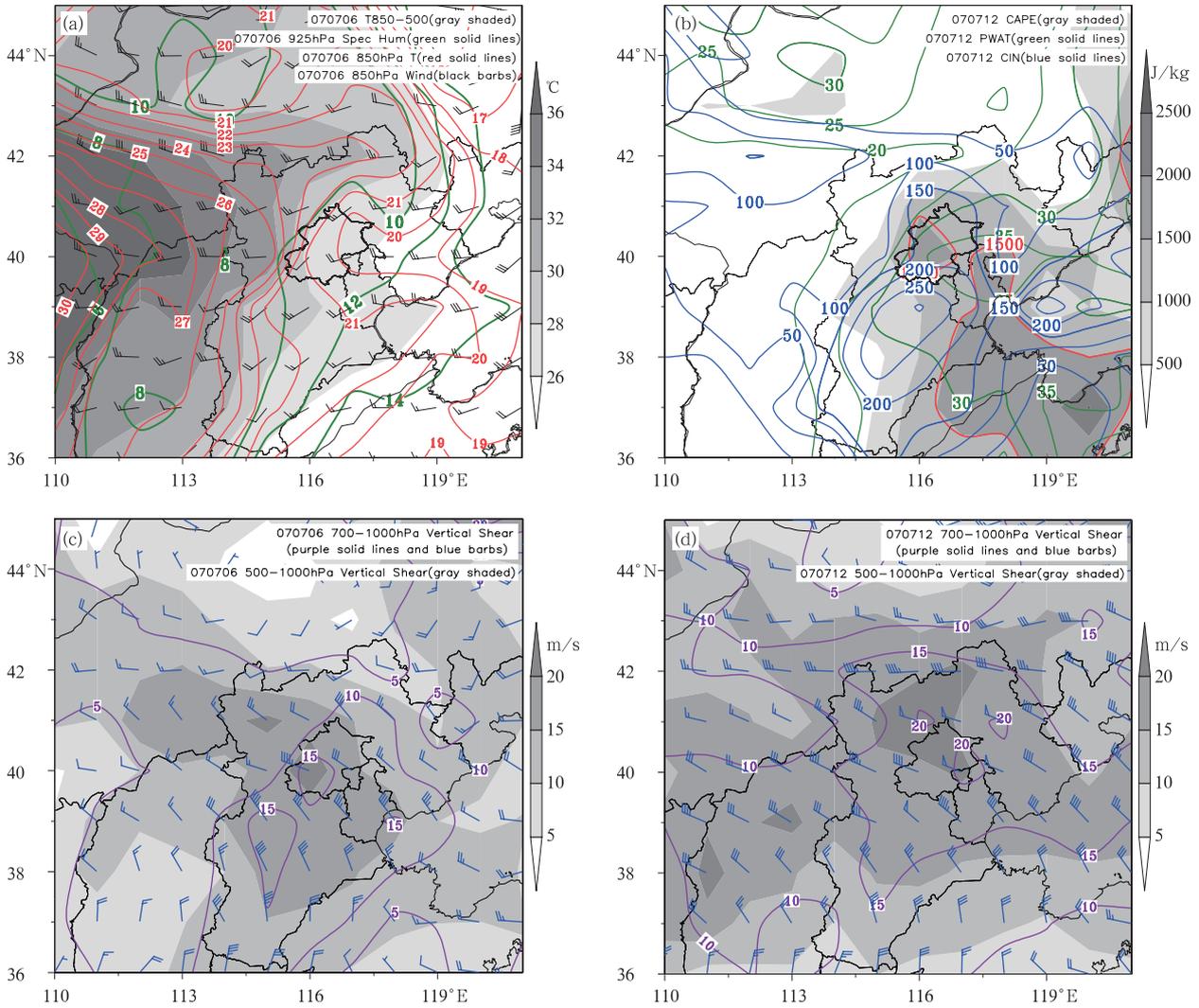
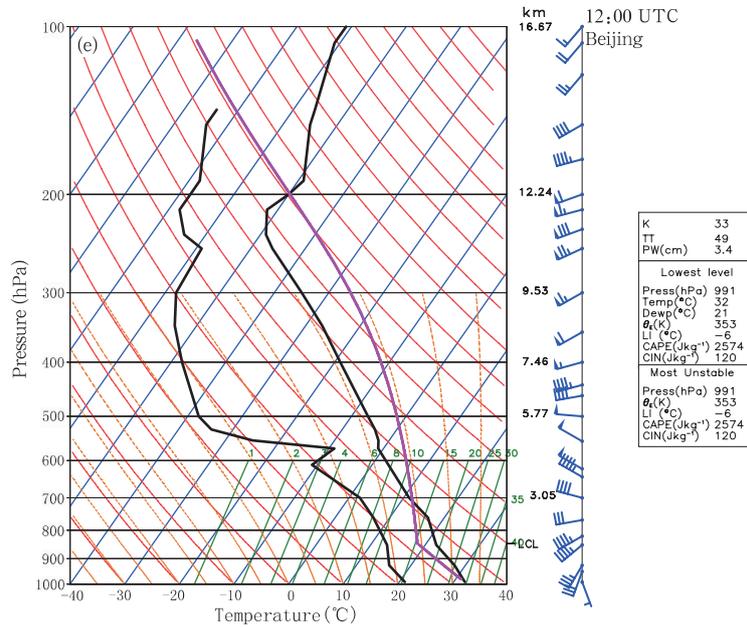


图 2 飏线发展环境条件

(a. NCEP 分析资料 06 时低层温、湿度分布(色阶为 850—500 hPa 温差,单位:  $^{\circ}\text{C}$ ; 绿色等值线为 925 hPa 比湿, 单位  $\text{g}/\text{kg}$ ; 850 hPa 黑色风羽; 红色等值线为 850 hPa 温度等值线, 间隔  $1^{\circ}\text{C}$ , 单位:  $^{\circ}\text{C}$ ); b. NCEP 分析资料 12 时不稳定能量和水汽分布(色阶为对流有效位能, 单位  $\text{J}/\text{kg}$ , 间隔  $500 \text{ J}/\text{kg}$ , 红色实线为  $1500 \text{ J}/\text{kg}$  等值线; 蓝色等值线为对流抑制能量, 单位  $\text{J}/\text{kg}$ , 间隔  $50 \text{ J}/\text{kg}$ ; 绿色等值线为大气可降水量, 单位  $\text{mm}$ , 间隔  $5 \text{ mm}$ ); c, d. 分别为 NCEP 分析资料 06 和 12 时深层及浅层切变(紫色等值线、蓝色风羽为 700—1000 hPa 风垂直切变, 间隔  $5 \text{ m}/\text{s}$ , 单位  $\text{m}/\text{s}$ ; 色阶为 500—1000 hPa 风垂直切变, 单位  $\text{m}/\text{s}$ ); e. 12 时北京探空站  $T\text{-lg}p$  斜交图 (紫红色粗实线为抬升曲线; 右侧黑色粗实线为温度廓线; 左侧黑色粗实线为露点廓线))

Fig. 2 Environmental conditions for the squall line

(a. Low-level temperature and humidity at 06:00 UTC 7 July (areas shaded in gray show temperature difference between 850 hPa and 500 hPa, the unit is  $^{\circ}\text{C}$ ; green solid lines are contours of specific humidity at 925 hPa, the unit is  $\text{g}/\text{kg}$ ; black barbs are for 850 hPa winds; red solid lines are contours of temperature at 850 hPa, the unit is  $^{\circ}\text{C}$  and interval is  $1^{\circ}\text{C}$ ); b. convective instability energy and moisture (gray shaded areas represent CAPE, the unit is  $\text{J}/\text{kg}$  and interval is  $500 \text{ J}/\text{kg}$ , and red solid lines are contours of  $1500 \text{ J}/\text{kg}$ ; blue solid lines are contours of CIN, the unit is  $\text{J}/\text{kg}$  and interval is  $50 \text{ J}/\text{kg}$ ; green solid lines are contours of precipitable water content, the unit is  $\text{mm}$  and interval is  $5 \text{ mm}$ ); c and d. vertical shears at 06:00 and 12:00 UTC, respectively (purple solid lines are contours of vertical shear from 700 hPa to 1000 hPa, blue barbs are for vertical shear wind from 700 hPa to 1000 hPa, the unit is  $\text{m}/\text{s}$ , interval is  $5 \text{ m}/\text{s}$ ; gray shaded areas represent vertical shear from 500 hPa to 1000 hPa, the unit is  $\text{m}/\text{s}$ ); e. skew  $T\text{-lg}p$  diagram at Beijing sounding station (the magenta thick solid line is the lifting curve, the black thick solid line on the right denotes temperature profile and the black thick solid line on the left represents dewpoint profile))



续图 2

Fig. 2 Continued

过了 20 m/s, 达到了强风垂直切变等级, 为该区域对流系统的发展及飑线的组织提供了有利的环境条件, 这不同于 2009 年 6 月 3 日河南(王秀明等, 2013)和 2018 年 6 月 30 日河北和山东飑线过程(公衍铎等, 2019)的弱风垂直切变条件。

该次过程虽然只有北京海淀气象站在 13 时 33 分观测到直径 1.5 cm 的冰雹, 但整个飑线过程中 GR2Analyst 软件在多个地点识别出了大冰雹, 最大直径达 5 cm, 且雷达反射率因子分布呈现出了显著的冰雹天气特征。不太高的融化层高度和较大的垂直减温率是有利于冰雹天气的重要环境条件(章国材, 2011; 俞小鼎等, 2012; 樊李苗等, 2013; 曹艳察等, 2018)。根据 12 时北京探空资料(图 2e)计算的 0°C 层高度约为 4.6 km 或 580 hPa; 但实际上, 湿球温度 0°C 层才是冰雹融化层的近似高度, 而北京湿球温度 0°C 层高度更低, 约为 3.8 km 或 639 hPa, 是有利于大冰雹形成的高度(俞小鼎, 2014); -20°C 层高度为 390 hPa 或者 7.6 km, 这是适宜冰雹发展的高度(曹艳察等, 2018); 湿球温度 0°C 层与 -20°C 层之间厚度为 3.8 km, 这个厚度有利于雹胚在云内过冷水区域增长为大冰雹(Doswell III, 2001)。850 与 500 hPa 温差达 29°C, 换算为垂直减温率约为 6.6°C/km, 较 00 时的 6.2°C/km 数值增大, 较大的

垂直减温率(Craven, et al, 2004; 郑永光等, 2017)有利于冰雹和雷暴大风天气。

12 时北京  $T$ - $\lg p$  图的温度和露点廓线呈现为典型的 V 形结构, 整层大气较为干燥, 相对湿度低, 低层温度露点差  $\geq 8^\circ\text{C}$ , 中层最大达  $30^\circ\text{C}$ , 这些特征非常有利于对流风暴中产生强下沉气流形成下击暴流从而导致地面雷暴大风天气(Johns, et al, 1992; 俞小鼎等, 2012; 郑永光等, 2017)。由 12 时北京探空数据计算的下沉对流有效位能约为 1676 J/kg, 较 00 时的 1200 J/kg 显著增大, 超过 2015 年“东方之星”翻沉事件的相应值(郑永光等, 2018b)。

#### 4 初始对流的触发

该次飑线过程的初生对流约于 08 时 18 分在内蒙古和河北交界处的内蒙古一侧生成(图 3a), 为两个孤立的对流系统, 强度不是太强, 但超过 30 dBz 的反射率因子垂直发展高度已达 10 km 左右; 约在 09 时形成东西向线状对流系统, 但尺度较小, 未达到飑线的 100 km 尺度要求。

对流发生区域位于内蒙古高原, 地势较高, 有一定起伏, 海拔高度约 1500—1800 m, 地面气压在 850 hPa 左右。08 时该区域气温升至 28—30°C, 对流抑制能量显著降至 10 J/kg 左右, 接近于消失(图

略);露点温度在 10—14℃,比湿约为 10 g/kg。在中国高原地区,发生雷暴甚至强对流时的低层水汽常在 8 g/kg 以下(郑永光等,2017)。虽然此时湿度较低,但完全满足上述雷暴发展所需的水汽条件。根据该地面温、湿度条件订正 00 时张家口探空资料,计算得到的对流有效位能超过 1000 J/kg,较 00 时的约 300 J/kg 显著增大。

在地面低压和 500 hPa 蒙古冷涡作用下,05 时之后,内蒙古中部与河北交界区域受到补充南下弱冷空气影响。05—08 时,在对流发生区域维持一支

西北风与西南偏西风之间的地面辐合线,二者风速都较大,最大达 8 m/s 左右。飊线的初生对流系统就在该地面辐合线附近生成(图 3b)。05 时,静止气象卫星 FY-2G 可见光云图上可见该区域存在积云线;08 时对流云顶的黑体亮温(TBB)已低于 -32℃(图略),但尺度很小。由于该辐合线在该区域一直较为稳定地维持,又有新的对流发展,约于 09 时使得这些对流发展为与该辐合线走向基本一致的、接近东西向的线状对流系统。

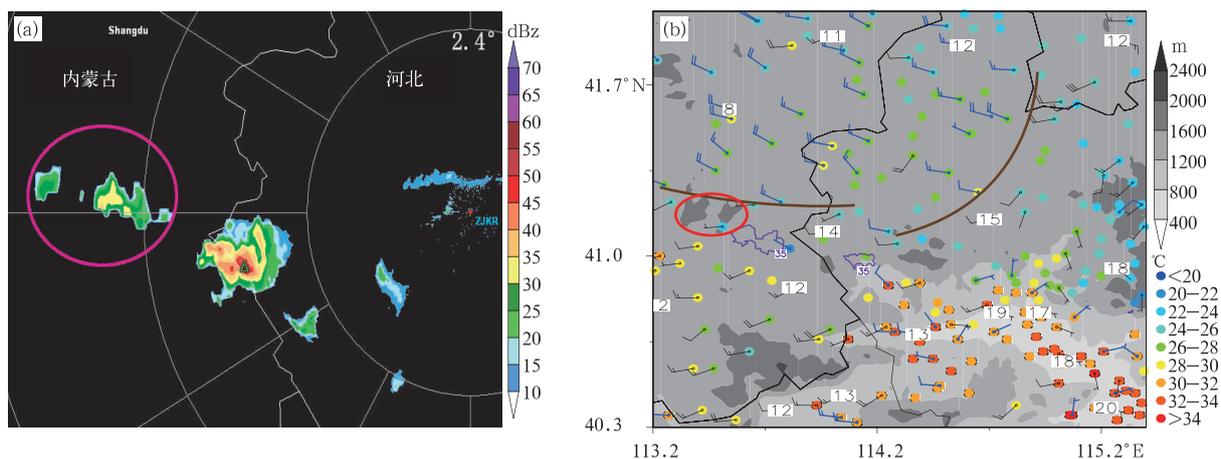


图 3 张家口雷达 7 月 7 日 08 时 18 分 2.4° 仰角反射率因子(a,紫红色椭圆中为飊线触发阶段初始对流)和 08 时地面自动气象站观测(b,灰阶为地势高度,不同颜色圆点表示气温,标值数字为露点温度,蓝色为偏北风,黑色为偏南风,紫色实线为 ≥35 dBz 雷达回波区,棕色实线为地面辐合线,红色椭圆指示初始对流触发地点)

Fig. 3 Radar reflectivity at 2.4° elevation at Zhangjiakou radar station for 08:18 UTC 7 July 2017 (a, the magenta ellipse denotes the location of the initial convective system) and observations from AWS for 08:00 UTC (b, dots in different colors denote temperature, areas shaded in gray show terrain height, numbers represent dewpoint temperature, blue barbs denote northerly winds, black barbs denote southerly winds, purple solid lines are contours of 35 dBz radar reflectivity, brown solid lines are contours of surface convergence lines, and the red ellipse denotes the location of the initial convective system)

## 5 飊线演变和机理讨论

### 5.1 飊线演变

雷达组合反射率因子演变表明,08 时 18 分—09 时是飊线形成前对流初生阶段;09 时—12 时 12 分为飊线前期发展阶段;12 时 18 分—15 时为飊线成熟阶段,其中 12 时 30 分—14 时弓形回波特征明显;此后飊线进入减弱阶段。本部分综合静止气象卫星、雷达和闪电观测等给出飊线不同阶段演变特征。

如前所述,对流初生阶段 FY-2G 观测(图略)展示 08 时在内蒙古和河北交界处有黑体亮温低于 -32℃ 的小尺度圆形云团出现;08 时 18 分,对流的 最大反射率因子已达到 35 dBz 以上,满足了对流初生标准,但为孤立的 2 个对流系统;此时尚未观测到闪电。在此阶段对流系统空间尺度较小,未达到美国气象学会定义的飊线尺度标准,因此,将该阶段称为飊线形成前对流初生阶段。

飊线前期发展阶段,对流云团由 09 时的 β 中尺度对流系统(MβCS)至 11 时发展为近似圆形的 α 中

尺度对流系统(M $\alpha$ CS),12时黑体亮温低于 $-52^{\circ}\text{C}$ ,并已影响北京西北部地区。闪电空间分布形态的演变与雷达回波空间分布的演变有一定的相似性。10时后,对流系统开始发展加强,闪电出现的次数明显增多,且多为正地闪,主要位于低黑体亮温处,这都表明系统中冰相粒子显著增多。雷达反射率因子分布显示,09时—10时48分对流系统呈现为西北—东南向的线状,向东南偏东方向缓慢移动,前期水平尺度小于100 km;09时54分(图4a)在对流系统的后侧有对流新生,其迅速发展并与前侧的线状对流合并,使对流系统的空间水平尺度达到135 km左右,满足了飏线的尺度标准;10时42分最大反射率因子已超过60 dBz,垂直剖面分布显示最强反射率

因子主要位于低层2 km以下;11时,线状对流系统前部与其东南侧的对流合并,而其后部的对流活动则逐渐减弱, $\beta$ 中尺度线状对流系统逐渐转变为 $\beta$ 中尺度团状对流系统;11时54分,对流系统最强反射率因子依然达60 dBz以上,垂直剖面分布显示的最强反射率因子主要位于3—6 km高度,表明对流活动在垂直方向上加强,对流发展更加强烈。此外,11—12时正地闪较10—11时明显增多(图1b)。

飏线成熟阶段,13—15时,对流进一步增强,对流活动发展旺盛。同时正地闪次数增加也更为显著(图1b),表明系统中冰相粒子仍在显著增多。雷达反射率因子演变显示,12时18分,团状对流系统演变为东北—西南走向的 $\beta$ 中尺度飏线对流系统。

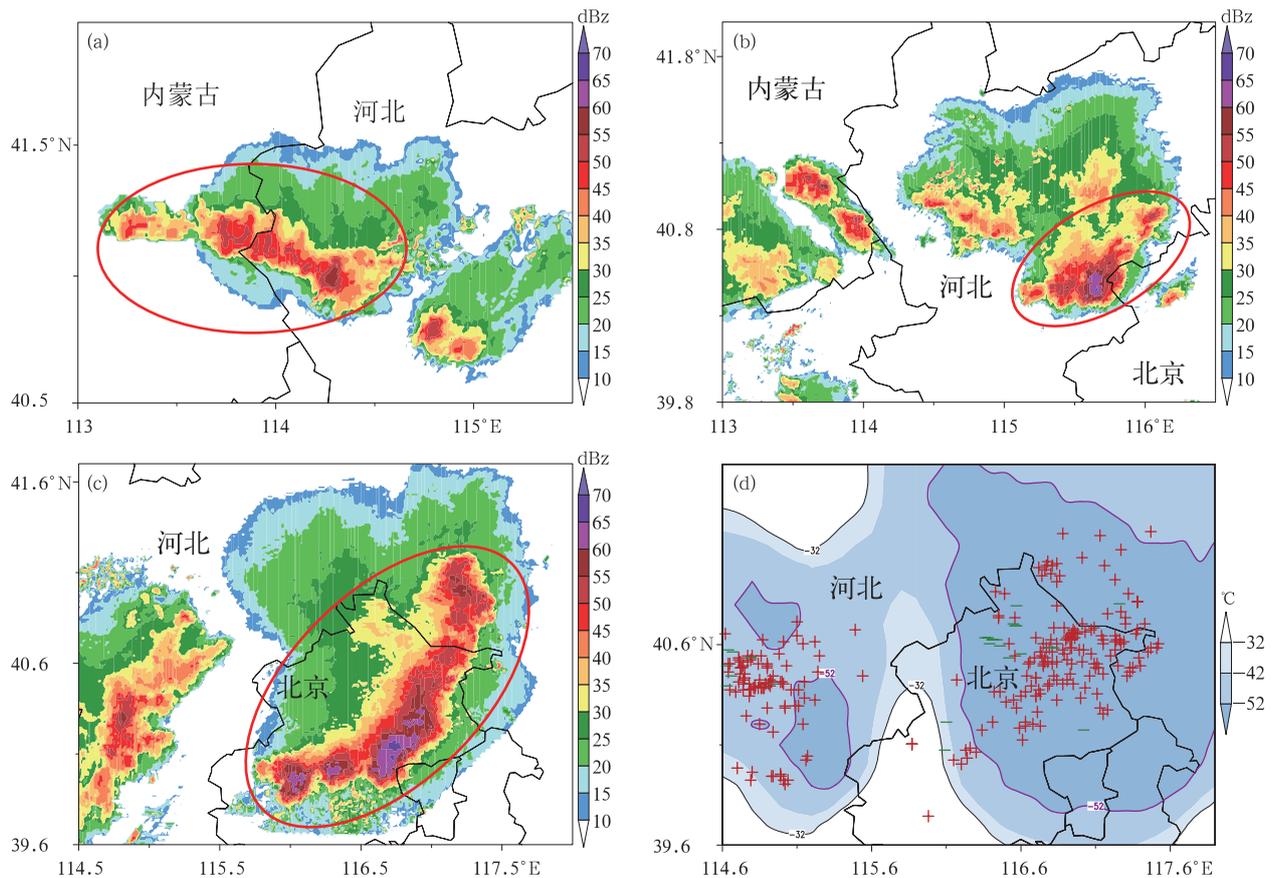


图4  $\geq 10$  dBz 雷达拼图组合反射率因子(a. 09时54分,b. 11时54分,c. 13时30分;红色椭圆指示不同阶段的飏线对流系统所在位置)及14时黑体亮温(色阶;黑色等值线为 $-32^{\circ}\text{C}$ ,紫色等值线为 $-52^{\circ}\text{C}$ )与13—14时1 h地闪分布(d)

Fig. 4 Radar reflectivity no less than 10 dBz (a. 09:54 UTC, b. 11:54 UTC, c. 13:30 UTC; red ellipses denote the locations of convective system at different periods) and TBB (shaded areas represent TBB, the unit is  $^{\circ}\text{C}$ ; black solid lines are contours of  $-32^{\circ}\text{C}$ , purple solid lines are contours of  $-52^{\circ}\text{C}$ ) of FY-2G at 14:00 UTC and lightning (d) during 13:00–14:00 UTC

12时30分—14时30分,飑线具有显著的东北—西南向弓形回波特征,较大范围区域的雷达反射率因子超过了60 dBz。14时30分之后,虽然飑线中的对流单体仍然旺盛,但弓形回波特征较之前已明显减弱。

飑线的不同阶段、组织模态会不同(Bluestein, et al, 1985; Parker, et al, 2000; Zheng, et al, 2013)。本次飑线的演变过程为,09—11时,其为尾随层状降水线状对流模态(TS型);11—12时发展为有大片尾随层状降水的团状对流模态;12—15时发展为接近东北—西南走向的逗点状平行层状降水的线状对流模态,与2016年6月30日一次影响河北和山东的飑线组织模态类似(公衍铎等,2019)。尚需指出,此次飑线过程强反射率因子、闪电和地面大风并非分布于黑体亮温大梯度处,而是黑体亮温低值处,这也与前述的2016年6月30日飑线过程类似。

### 5.2 飑线前期结构和发展机制

飑线前期发展阶段的09时,线状对流的雷达最大反射率因子达55 dBz以上,其垂直结构显示,强反射率因子核心较高,达4—10 km高度,具有一定的悬垂结构,虽然气象测站没有观测到冰雹,但由于气温0℃层高度仅约4 km,因此具有产生冰雹天气的可能,且GR2Analyst雷达资料分析软件也识别出了冰雹天气。从张家口雷达观测的径向速度分布来看,具有一定的中层径向辐合特征,这虽然是产生雷暴大风天气的雷达特征,但由于高度较高,约为8 km,径向风速较小、辐合较弱,地面自动气象站并没有观测到超过17 m/s的大风天气;自动气象站气温演变显示对流活动使得地面气温下降仅2—4℃,表明这时地面冷池还不是太强(图5c),不利于产生大风天气。

至10时42分(图5a),对流系统东移至张家口市区附近,线状分布特征减弱,但强度显著加强,强

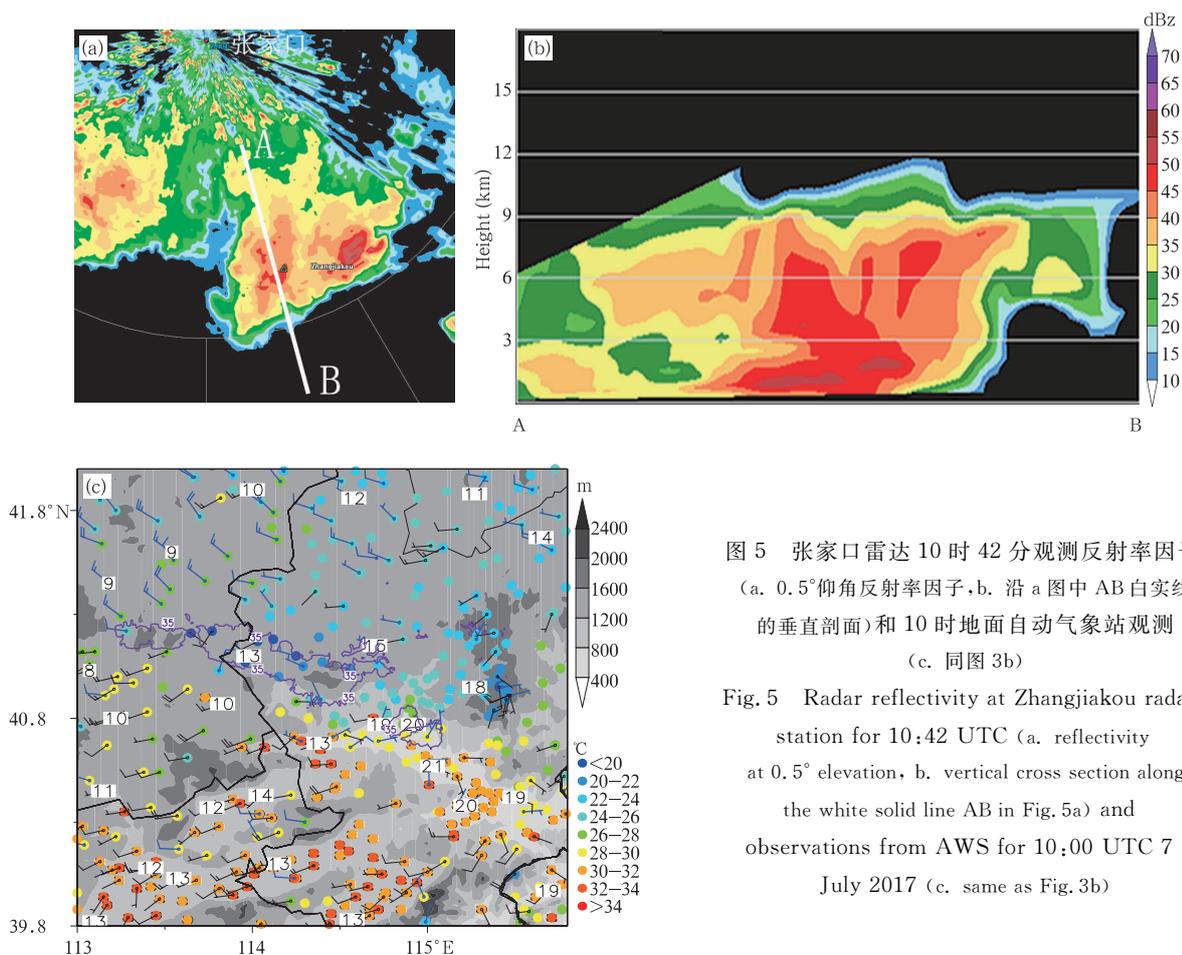


图5 张家口雷达10时42分观测反射率因子 (a. 0.5°仰角反射率因子, b. 沿a图中AB白实线的垂直剖面)和10时地面自动气象站观测 (c. 同图3b)

Fig. 5 Radar reflectivity at Zhangjiakou radar station for 10:42 UTC (a. reflectivity at 0.5° elevation, b. vertical cross section along the white solid line AB in Fig. 5a) and observations from AWS for 10:00 UTC 7 July 2017 (c. same as Fig. 3b)

反射率因子大梯度区位于其前沿,最大反射率因子达60 dBz左右,强反射率因子核心位于低层,具有明显的悬垂结构,GR2Analyst(图5b)同样识别出了

冰雹天气;同时地面自动气象站观测到了达23 m/s的瞬时大风(图略),从自动气象站气温演变来看,对流活动使地面气温显著下降了7—8℃(图5c、6g),

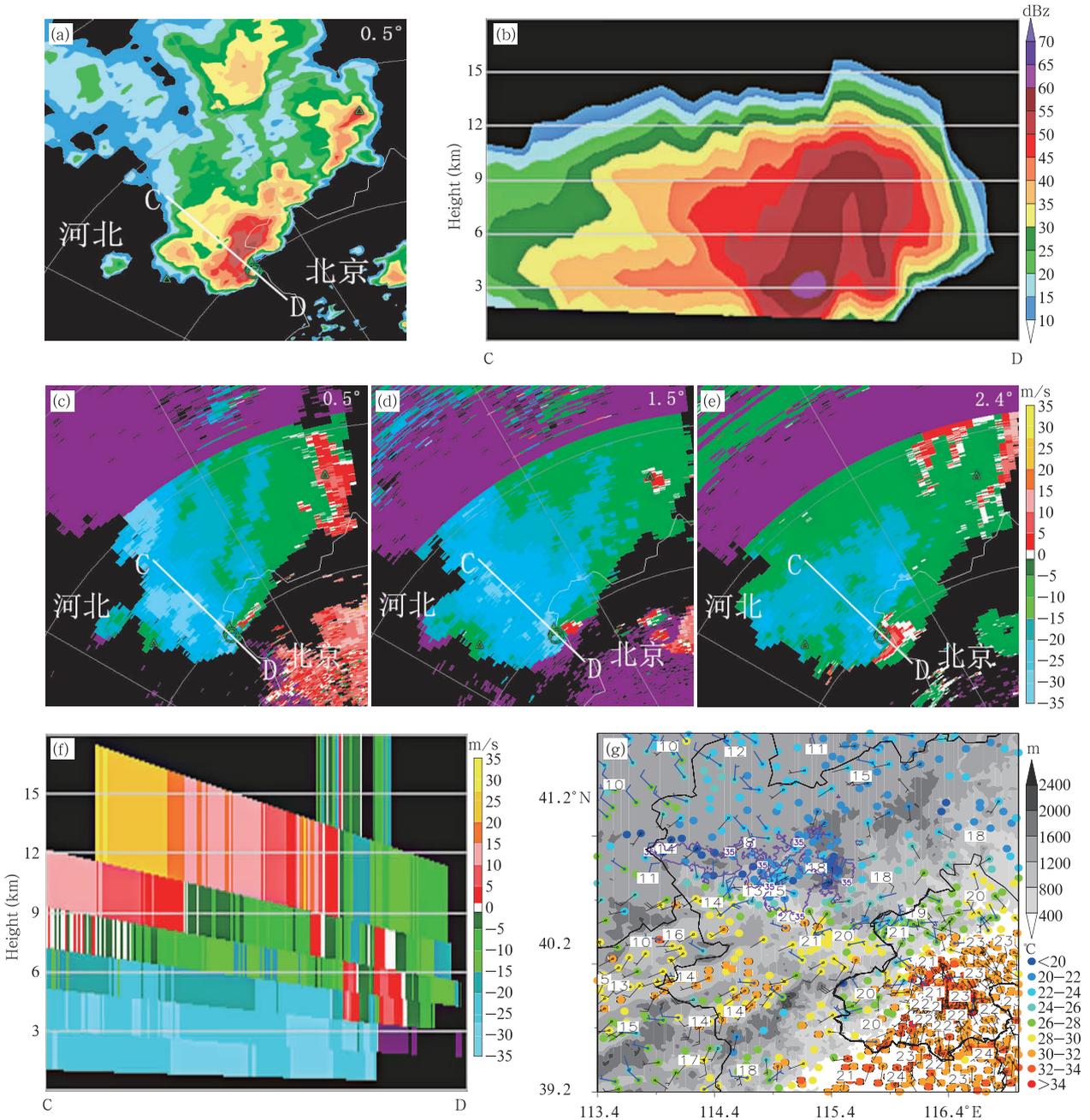


图6 北京雷达11时54分观测(a. 0.5°仰角观测反射率因子,b. 沿a图中CD线的垂直剖面, c、d、e. 0.5°、1.5°、2.4°三个仰角的径向速度(三角形代表冰雹,圆圈代表中气旋),f. 沿c图中CD线的垂直剖面)和11时地面自动气象站观测(g. 同图3b)

Fig. 6 Radar reflectivity and radial velocity at Beijing radar station for 11:54 UTC (a. radar reflectivity at 0.5° elevation; b. vertical cross section along the solid line CD shown in Fig. 6a; c, d, e. distributions of radial velocity at 0.5°, 1.5°, 2.4° elevations; f. vertical cross section along the solid line CD shown in Fig. 6c) and observations from AWS for 11:00 UTC 7 July 2017 (g. same as Fig. 3b)

说明地面冷池显著加强。

至11时48分和54分,对流系统东移至河北怀来官厅水库附近,张家口雷达观测的反射率因子特征变化不大(图略);但北京大兴S波段雷达(图6a、b)观测的最强反射率因子超过60 dBz,超过50 dBz反射率因子最大高度将近12 km,远超过气温 $-20^{\circ}\text{C}$ 层7.5 km高度,具有突出的高悬回波特征;反射率因子的垂直剖面则显示对流系统前侧存在回波悬垂、有界弱回波区等特征,这些均符合产生大冰雹的典型特征,GR2Analyst软件识别的冰雹直径达5 cm。雹胚在对流系统强上升气流中生长;由于冰相粒子是雷暴云中最重要的电荷携带者,其携带正电荷至层状云区,有利于正闪形成(郟秀书等,2014)。 $0.5^{\circ}$ 仰角径向速度场有明显的速度模糊,退模糊后最大径向速度约为37 m/s,并在多个仰角有明显的中气旋特征(图6c—e),反射率因子则显示存在钩状回波,这都表明对流系统已发展为超级单体风暴。

自动气象站气温演变也表明地面冷池显著加强,最大地面气温降幅达 $10^{\circ}\text{C}$ 以上,最大瞬时风速达29 m/s。径向速度的垂直分布(图6d)显示,在风暴前沿6 km以下的中低空存在强烈的气流辐合区,高层辐散,超级单体前沿有一支强的近似垂直的上升气流。北京探空 $T\text{-lg}p$ 图(图2e)表明,在对流层中层露点温度差非常大,达 $30^{\circ}\text{C}$ ,加之垂直减温率大,下沉对流有效位能将近1700 J/kg,强的后侧入流把干冷空气输入超级单体风暴,使得液态过冷水、冰相粒子等混合相态水物质蒸发、融化或者升华,形成后侧入流缺口。同时,水凝物相变过程中吸收大量热量,使得后侧大气剧烈降温形成强下沉气流(下击暴流)从而导致地面气温剧烈下降、形成冷池和强风(图6g)(Przybylinski, 1995; Weisman, 2001; Atkins, et al, 2005; 公衍铎等, 2019)。

前期飏线是由冷涡影响下弱冷空气南下形成的地面辐合线所触发和演变而来。早年,美国总结的飏线发生条件就强调了飏线和地面锋密切相关(Johns, et al, 1987)。08时18分—10时,沿地面辐合线不断有对流发生,逐渐发展为线状对流系统;由于该区域地面露点较低,仅为 $12\text{—}14^{\circ}\text{C}$ (图5c),对流有效位能较小,因此对流发展相对不够旺盛,所导致的地面冷池也较弱;随着对流系统的东移,系统西部对流逐渐减弱消散,而东部对流由于移动到了地

面露点达 $20^{\circ}\text{C}$ 的区域,水汽较为充沛,对流有效位能超过2000 J/kg,加之强的风垂直切变条件,因此,对流显著加强,并由线状对流发展为团状模态的超级单体对流风暴。

### 5.3 飏线成熟阶段结构和发展机制

随着超级单体风暴向北京延庆移动,该风暴同其北侧对流风暴产生的冷池和出流西北风与北京区域的近地面西南风和东南风、边界层内西北风与西南低空急流形成显著辐合抬升,加之该区域有利的水汽、不稳定能量和风垂直切变条件,从而在超级单体北侧进一步触发形成新的对流,使得原来较为分散的对流风暴在12时18分进一步组织形成具有弓形回波特征的且呈现出明显波动状的东北—西南向弓状飏线系统,超级单体就镶嵌于其中。

12时30分—14时30分是弓形回波最为显著的时段。12时24分—14时18分,北京雷达 $0.5^{\circ}$ 和 $1.5^{\circ}$ 仰角反射率因子显示在最强弓形回波前沿存在明显的阵风锋回波,这表明飏线导致的冷池强、风力大、近地面空气湿度较高等特征,但也说明仅仅依靠近地面的空气辐合不能触发强对流,这是因为近地面存在较大的对流抑制能量。11时48分形成的超级单体风暴维持至12时30分,这段时间里正是由于超级单体发展、移动速度快于周围单体,从而组织形成弓形回波结构。之后至14时北京雷达观测的径向速度场虽然仍有明显中涡旋特征存在,但GR2Analyst软件未能识别出中气旋。

13时,最强弓形回波对流虽然没有识别出中气旋,但 $1.5^{\circ}$ 以上仰角存在显著的中涡旋(图未给出);最强反射率因子达65 dBz,超过50 dBz反射率因子最大高度达9 km,同样超过了气温 $-20^{\circ}\text{C}$ 层7.5 km高度,这些特征也是产生大冰雹的典型特征,GR2Analyst软件识别出了多个对流风暴的冰雹天气,最大冰雹直径达4.5 cm;反射率因子的垂直剖面(图7c、e)显示对流单体前侧同样存在回波悬垂、弱回波区、后侧入流缺口等特征。径向速度的垂直剖面(图7d、f)上,2 km以下的近地面层有大于35 m/s的西北风在飏线前缘与近地面的西南风、东南风以及边界层的西南风低空急流形成强烈的辐合抬升,图7d显示弓形回波对流前缘的近地面层以上的正、负径向速度交界处近似垂直,表明最强的垂直上升运动区近似垂直,有些类似Rotunno等(1988)提出的RKW理论中的最优飏线维持模态,有利于

该对流系统的维持。需要说明的是,由于该飢线系统结构的复杂性,RKW 理论是否适用于解释该次飢线的维持机制,还有待使用高分辨率的数值模拟结果结合观测资料做进一步的详细分析。

06—15 时,北京大部分地区的平均露点温度一直维持在  $22^{\circ}\text{C}$  左右,最高达  $24^{\circ}\text{C}$  以上;至 13 时,尽管北京区域地面气温下降,但未受对流影响区域的温度仍达  $30^{\circ}\text{C}$  左右;12 时北京探空计算的对流有效

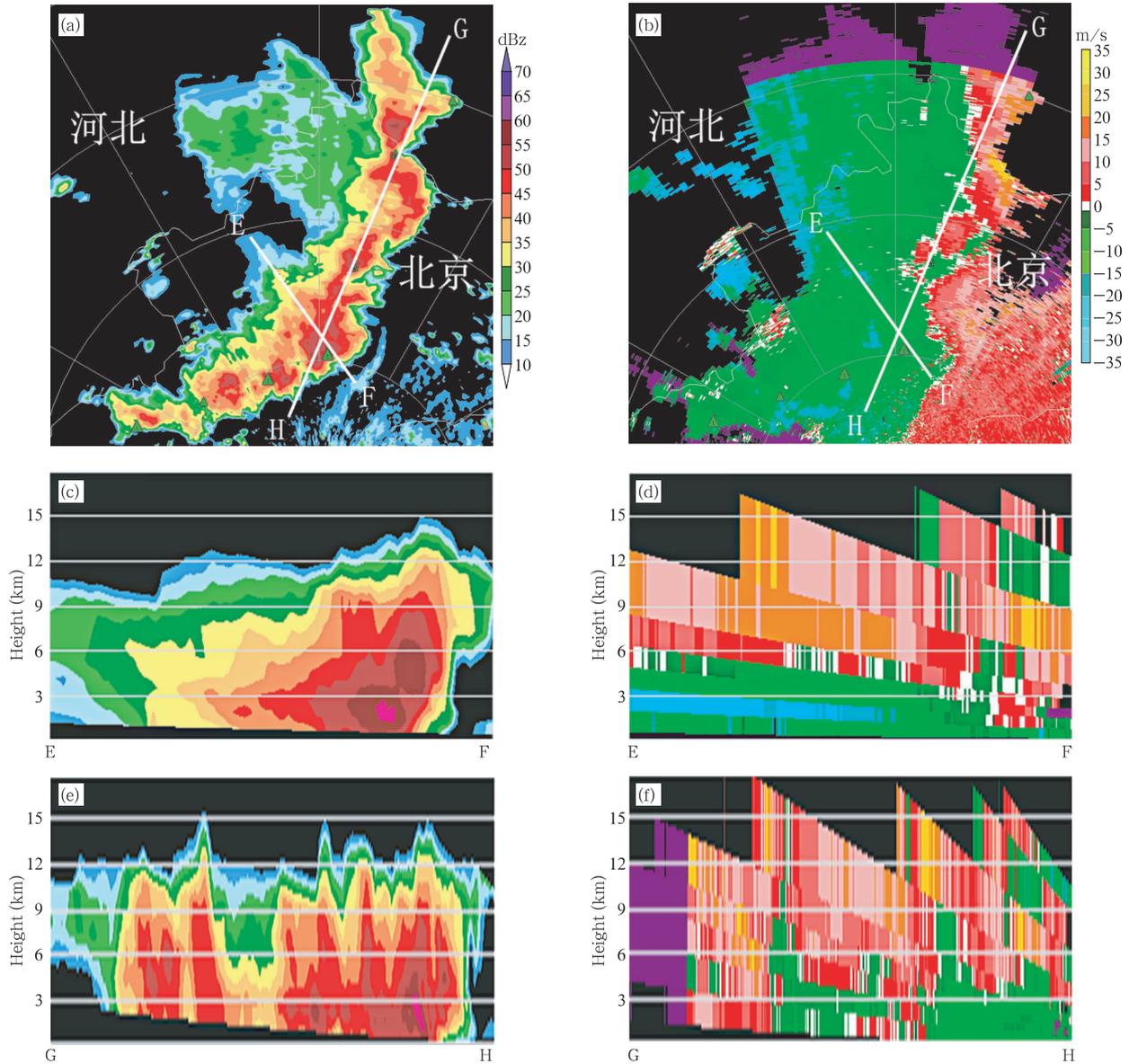
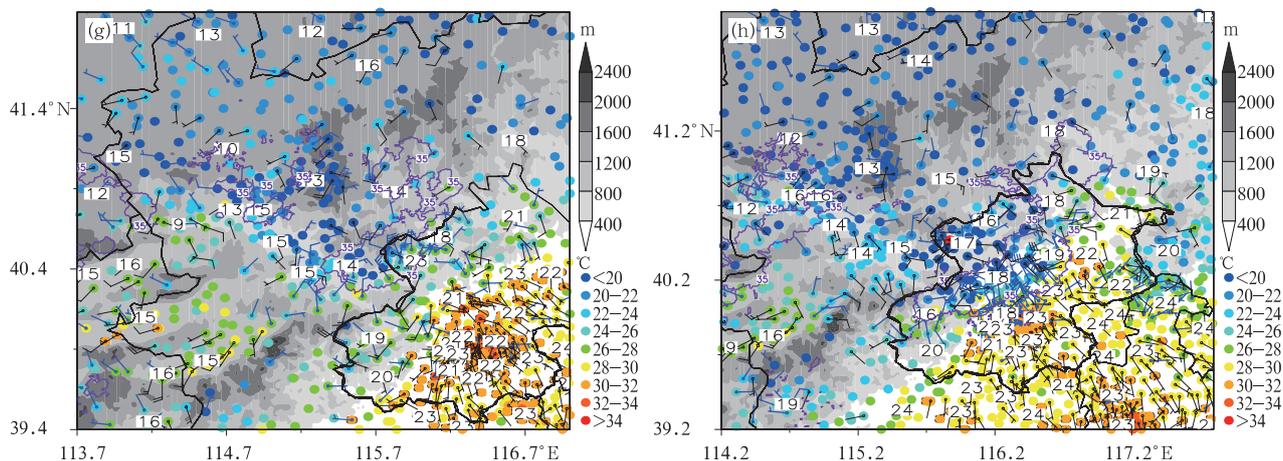


图 7 北京雷达 13 时观测(a.  $0.5^{\circ}$  仰角反射率因子;b.  $0.5^{\circ}$  仰角径向速度(三角形代表冰雹);  
c,d. 沿(a)和(b)EF 白实线的垂直剖面;e,f. 沿(a)和(b)GH 白实线的  
垂直剖面)和 12(g)、13(h)时地面自动气象站观测(同图 3b)

Fig. 7 Radar reflectivity (a) and radial velocity (b) at  $0.5^{\circ}$  elevation at Beijing radar station for 13:00 UTC;  
(c) and (d) vertical cross sections along the white solid line (EF) shown in (a) and (b); (e) and  
(f) vertical cross sections along the white solid line (GH) shown in (a) and (b)

(In (a), (c) and (e), the unit is dBz; in (b), (d) and (f), the unit is m/s)  
and observations from AWS for 12:00 (g) and 13:00 (h) UTC 7 July 2017  
(same as Fig. 3b)



续图 7

Fig. 7 Continued

位能约  $2600 \text{ J/kg}$ , 大气低层有最大风速达  $17 \text{ m/s}$  的强低空急流和显著暖平流;  $4 \text{ km}$  高度以上空气干冷; 环境风垂直切变也非常强,  $0\text{--}3 \text{ km}$  的环境风垂直切变大于  $15 \text{ m/s}$ ,  $0\text{--}6 \text{ km}$  的环境风垂直切变大于  $20 \text{ m/s}$ , 这些都是非常有利于飊线发展的环境条件。强的中层气流有利于中层干冷空气进入对流风暴, 加强风暴中的下沉气流和低层冷空气外流, 再通过强迫抬升使得入流的暖湿气流更强烈地上升, 从而加强对流。强风垂直切变有利于上升气流和下沉气流在相当长的时间内共存, 形成类似 Rotunno 等 (1988) 提出的 RKW 理论中的最优飊线维持模式, 从而利于飊线的发展和维持 (俞小鼎等, 2006)。

北京雷达径向速度 (图 7d) 分布显示, 12 时 30 分—13 时在弓形回波后侧高度  $3 \text{ km}$  左右持续存在最大风速达  $30 \text{ m/s}$  强后侧西北入流急流; 承德雷达  $0.5^\circ$  仰角径向速度场 (图略) 则显示该时段对流系统后侧高度  $5 \text{ km}$  左右同样持续存在最大风速达  $30 \text{ m/s}$  强后侧西北偏西入流急流; 12 时北京探空 (图 2e) 也显示  $600\text{--}400 \text{ hPa}$  存在达  $20 \text{ m/s}$  强西风气流; 虽然西风气流在北京雷达径向速度场上数值较小, 但其最大实际风速依然达  $20 \text{ m/s}$  及以上, 该急流使得大量干冷空气进入飊线系统, 从而导致系统内液态过冷水、软雹、冰雹、冰粒、冰晶、雪片等混合相态水物质强烈蒸发、融化或者升华, 形成后侧入流缺口; 其吸收大量热量, 使得后侧大气剧烈降温形成强下沉气流 (下击暴流) 从而导致地面气温急剧下降、形成冷池和强风 (Przybylinski, 1995; Weisman, 2001; Atkins, et al, 2005; 公衍铎等, 2019); 自动气

象站观测的气温显示降温幅度普遍达  $10^\circ\text{C}$  左右。强后侧入流、强的中层环境气流和强下沉气流使得飊线该部分的对流风暴和地面冷池移动速度显著超过其他部分, 从而形成前凸状的弓形回波结构。

如引言中所述, 此次飊线过程较为罕见地仅影响了北京中北部等地, 但此次飊线过程发生时北京南部和河北中南部同样具有有利于强对流天气发展的环境条件 (图 2)。文中分析表明, 这次飊线过程由南下弱冷空气作用在河北西北部形成, 从河北怀来进入北京延庆后, 受高空  $700\text{--}500 \text{ hPa}$  西北偏西气流的引导, 加之  $925$  和  $850 \text{ hPa}$  非常强盛的西南偏西低空急流北压到了北京北部 (图 2)、形成较大尺度的辐合抬升有利条件, 再根据 Corfidi 等 (1996) 提出的对流系统的移动由引导气流和低空急流反方向矢量所决定的关系, 可判断这次飊线过程的移动方向为东南偏东方向, 并且由于引导气流强、飊线系统移速快 (约  $70 \text{ km/h}$ ), 其在尚未到达北京南部时就已经移出了北京区域, 因此该罕见飊线过程在北京中北部形成后未能影响北京南部区域。

## 6 结论和讨论

2017 年 7 月 7 日午后至午夜, 河北西北部和北京中北部等地先后出现了由较为罕见的强弓形回波飊线导致的、以雷暴大风为主、伴随短时强降水和大冰雹等的强对流天气。综合多种观测资料和 NCEP 分析资料, 本文详细分析了该次飊线过程的环境条件、触发、演变、弓形回波形成和维持机制等, 主要获得如下结论。

此次罕见飚线过程的天气背景为位于 500 hPa 冷涡西南部和显著前倾低槽后部,高低空存在明显急流,地面存在显著低压;850 hPa 暖平流和 500 hPa 冷平流明显;地面高温、高湿,对流有效位能较大(2600 J/kg)、0—3 km 和 0—6 km 强风垂直切变、垂直温度递减率和下沉对流有效位能都很大、湿球温度 0℃ 层高度仅为 3.8 km 等环境条件非常有利于对流系统发生、发展和地面强风与大冰雹天气形成。

飚线初生对流区域太阳辐射导致的地面升温使得对流有效位能增大、对流抑制能量减小;受地面低压和 500 hPa 蒙古冷涡影响下的补充南下弱冷空气作用,该区域持续维持一支西北风和西南偏西风之间的地面辐合线,使得沿该辐合线不断有对流发生、发展为线状对流系统。地面大风主要分布于低黑体亮温和正闪为主的闪电密集处。

雷达回波则显示飚线初期为一个接近东西向的线状对流系统,然后发展成为一个团状超级单体对流系统,最后演变为一个东北—西南向的、镶嵌有超级单体或者中涡旋的强弓形回波飚线系统,其成熟阶段组织为逗点状平行层状降水线状对流模态。

强弓状飚线形成前的超级单体风暴具有明显的钩状回波特征。超级单体阶段和飚线成熟阶段都具有显著的回波悬垂、弱回波区、中气旋(飚线成熟后期为中涡旋)、强后侧入流和后侧入流缺口等结构特征;超级单体还具有明显的有界弱回波区;强的后侧入流和对流层中层大的温度露点差形成强下沉气流使得飚线的超级单体风暴及其冷池移速显著超过其他部分,从而形成弓形回波结构。大的对流有效位能和下沉对流有效位能、强后侧入流、强中层和低层风垂直切变等共同作用使得飚线前缘的垂直上升运动区近似垂直,进而使飚线和弓形回波特征得以维持。初始对流位置、有利的环境条件、中层引导气流和低空急流分布决定了本次飚线过程未能影响到北京南部地区。

文中虽然对飚线过程的环境条件、触发机制、演变和移动、结构特征和机理等进行了分析,但尚有待采用高分辨率的中尺度数值模式进行模拟,利用模拟结果作进一步的深入分析验证,尤其是飚线的演变和维持机制、RKW 理论的适用性等均有待更深

入的研究工作。

## 参考文献

- 白人海, 谢安. 1998. 东北冷涡过程中的飚线分析. 气象, 24(4): 37-40. Bai R H, Xie A. 1998. Analysis of squall lines occurring in cold vortexes over Northeast China. Meteor Mon, 24(4): 37-40 (in Chinese)
- 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. 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 second-step terrains of China. Plateau Meteor, 37(1): 185-196 (in Chinese)
- 陈明轩, 王迎春. 2012. 低层垂直风切变和冷池相互作用影响华北地区一次飚线过程发展维持的数值模拟. 气象学报, 70(3): 371-386. Chen M X, Wang Y C. 2012. Numerical simulation study of interactional effects of the low-level vertical wind shear with the cold pool on a squall line evolution in North China. Acta Meteor Sinica, 70(3): 371-386 (in Chinese)
- 陈淑琴, 章丽娜, 俞小鼎等. 2017. 浙北沿海连续 3 次飚线演变过程的环境条件. 应用气象学报, 28(3): 357-368. Chen S Q, Zhang L N, Yu X D, et al. 2017. Environmental conditions of three squall lines in the north part of Zhejiang province. J Appl Meteor Sci, 28(3): 357-368 (in Chinese)
- 戴建华, 陶岚, 丁杨等. 2012. 一次罕见飚前强降雹超级单体风暴特征分析. 气象学报, 70(4): 609-627. Dai J H, Tao L, Ding Y, et al. 2012. Case analysis of a large hail-producing severe supercell ahead of a squall line. Acta Meteor Sinica, 70(4): 609-627 (in Chinese)
- 丁一汇, 李鸿洲, 章名立等. 1982. 我国飚线发生条件的研究. 大气科学, 6(1): 18-27. Ding Y H, Li H Z, Zhang M L, et al. 1982. A study on the genesis conditions of squall-line in China. Chinese J Atmos Sci, 6(1): 18-27 (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. 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. Plateau Meteor, 32(1): 156-165 (in Chinese)
- 冯桂力, 鄯秀书, 袁铁等. 2007. 雹暴的闪电活动特征与降水结构研究. 中国科学 D 辑: 地球科学, 37(1): 123-132. Feng G L, Qie X S, Yuan T, et al. 2007. Lightning activity and precipitation structure of hailstorm. Sci China Ser D: Earth Sci, 50(4): 629-639
- 公衍铎, 郑永光, 罗琪. 2019. 冷涡底部一次弓状强飚线的演变机理. 气象, 45(4): 483-495. Gong Y D, Zheng Y G, Luo Q. 2019. Evolution and development mechanisms of an arc-shaped strong squall line occurring along the South side of a cold vortex. Meteor Mon, 45(4): 483-495 (in Chinese)

- 郝秀书, 刘冬霞, 孙竹玲. 2014. 闪电气象学研究进展. 气象学报, 72(5): 1054-1068. Qie X S, Liu D X, Sun Z L. 2014. Recent advances in research of lightning meteorology. *Acta Meteor Sinica*, 72(5): 1054-1068 (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. 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 Appl Meteor Sci*, 23(2): 139-146 (in Chinese)
- 王秀明, 周小刚, 俞小鼎. 2013. 雷暴大风环境特征及其对风暴结构影响的对比研究. 气象学报, 71(5): 839-852. Wang X M, Zhou X G, Yu X D. 2013. Comparative study of environmental characteristics of a windstorm and their impacts on storm structures. *Acta Meteor Sinica*, 71(5): 839-852 (in Chinese)
- 杨珊珊, 湛芸, 李晟祺等. 2016. 冷涡背景下飚线过程统计分析. 气象, 42(9): 1079-1089. Yang S S, Chen Y, Li S Q, et al. 2016. Analysis of squall lines under the background of cold vortex. *Meteor Mon*, 42(9): 1079-1089 (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. 北京: 气象出版社, 93pp. Yu X D, Yao X P, Xiong T N, et al. 2006. *The Principles and Business Applications of Doppler Weather Radar*. Beijing: China Meteorological Press, 93pp (in Chinese)
- 俞小鼎. 2011. 基于构成要素的预报方法: 配料法. 气象, 37(8): 913-918. Yu X D. 2011. Ingredients based forecasting methodology. *Meteor Mon*, 37(8): 913-918 (in Chinese)
- 俞小鼎, 周小刚, 王秀明. 2012. 雷暴与强对流临近天气预报技术进展. 气象学报, 70(3): 311-337. Yu X D, Zhou X G, Wang X M. 2012. The advances in the nowcasting techniques on thunderstorms and severe convection. *Acta Meteor Sinica*, 70(3): 311-337 (in Chinese)
- 俞小鼎. 2014. 关于冰雹的融化层高度. 气象, 40(6): 649-654. Yu X D. 2014. A note on the melting level of hail. *Meteor Mon*, 40(6): 649-654 (in Chinese)
- 章国材. 2011. 强对流天气分析与预报. 北京: 气象出版社, 19-24. Zhang G C. 2011. *The Analysis and Forecasting of Severe Convective Weather*. Beijing: China Meteorological Press, 19-24 (in Chinese)
- 张宁, 苏爱芳, 史一丛. 2017. 2014年一次飚线的发展维持原因分析. 气象, 43(11): 1383-1392. Zhang N, Su A F, Shi Y C. 2017. Causation analysis of evolution of a squall line in 2014. *Meteor Mon*, 43(11): 1383-1392 (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. 气象, 43(6): 641-652. Zheng Y G, Tao Z Y, Yu X D. 2017. Some essential issues of severe convective weather forecasting. *Meteor Mon*, 43(6): 641-652 (in Chinese)
- 郑永光, 田付友, 周康辉等. 2018a. 雷暴大风与龙卷的预报预警和灾害现场调查. 气象科技进展, 8(2): 55-61. Zheng Y G, Tian F Y, Zhou K H, et al. 2018a. Forecasting techniques and damage survey of convectively driven high winds and tornadoes. *Adv Meteor Sci Technol*, 8(2): 55-61 (in Chinese)
- 郑永光, 朱文剑, 田付友等. 2018b. 2015年“东方之星”翻沉事件和2016年阜宁EF4级龙卷对流风暴环境条件、结构特征和机理. 气象科技进展, 8(2): 44-54. Zheng Y G, Zhu W J, Tian F Y, et al. 2018b. Environmental conditions, structures, and mechanisms of convective storms of 2015 "Oriental Star" capsizing event and 2016 Funing EF4 tornado. *Adv Meteor Sci Technol*, 8(2): 44-54 (in Chinese)
- Atkins N T, Bouchard C S, Przybylinski R W, et al. 2005. Damaging surface wind mechanisms within the 10 June 2003 Saint Louis bow echo during BAMEX. *Mon Wea Rev*, 133(8): 2275-2296
- Bluestein H B, Jain M H. 1985. Formation of mesoscale lines of precipitation: Severe squall lines in Oklahoma during the spring. *J Atmos Sci*, 42(16): 1711-1732
- Carey L D, Rutledge S A. 1998. Electrical and multiparameter radar observations of a severe hailstorm. *J Geophys Res*, 103(D12): 13979-14000
- Coniglio M C, Stensrud D J, Wicker L J. 2006. Effects of upper-level shear on the structure and maintenance of strong quasi-linear mesoscale convective systems. *J Atmos Sci*, 63(4): 1231-1252
- Corfidi S F, Meritt J H, Fritsch J M. 1996. Predicting the movement of mesoscale convective complexes. *Wea Forecasting*, 11(1): 41-46
- Craven J P, Brooks H E. 2004. Baseline climatology of sounding derived parameters associated with deep moist convection. *Natl Wea Dig*, 28: 13-24
- Davis C A, Trier S B. 2007. Mesoscale convective vortices observed during BAMEX. Part I: Knematic and thermodynamic structure. *Mon Wea Rev*, 135(6): 2029-2049
- Doswell III C A, Brooks H E, Maddox R A. 1996. Flash flood forecasting: An ingredients-based methodology. *Wea Forecasting*, 11(4): 560-581
- Doswell III C A. 2001. *Severe Convective Storms*. Boston: American Meteorological Society, 223-253
- Forbes G S, Wakimoto R M. 1983. A concentrated outbreak of tornadoes, downbursts and microbursts, and implications regarding vortex classification. *Mon Wea Rev*, 111(1): 220-235
- Fujita T T. 1978. *Manual of downburst identification for project NIMROD*. Satellite and mesometeorology research paper No. 156, department of geophysical sciences. Chicago: University of Chicago, 1-104
- Hamilton R E. 1970. Use of detailed intensity radar data in mesoscale surface analysis of the 4 July 1969 storm in Ohio//Preprints, 14th Conf on Radar Meteor. Tucson, AZ: Amer Mete-

or Soc, 339-342

- Johns R H. 1982. A synoptic climatology of northwest flow severe weather outbreaks. Part I: Nature and significance. *Mon Wea Rev*, 110(11): 1653-1663
- Johns R H, Hirt W D. 1987. Derechos: Widespread convectively induced windstorms. *Wea Forecasting*, 2(1): 32-49
- Johns R H, Doswell III C A. 1992. Severe local storms forecasting. *Wea Forecasting*, 7(4): 588-612
- Markowski P M, Richardson Y P. 2010. *Mesoscale Meteorology in Midlatitudes*. Chichester, West Sussex, UK: Wiley-Blackwell, Publication, 245-272
- Meng Z Y, Yan D C, Zhang Y J. 2013. General features of squall lines in east China. *Mon Wea Rev*, 141(5): 1629-1647
- Parker M D, Johnson R H. 2000. Organizational modes of midlatitude mesoscale convective systems. *Mon Wea Rev*, 128(10): 3413-3436
- Parker M D, Johnson R H. 2004. Structures and dynamics of quasi-2D mesoscale convective systems. *J Atmos Sci*, 61(5): 545-567
- Przybylinski R W. 1995. The bow echo: Observations, numerical simulations, and severe weather detection methods. *Wea Forecasting*, 10(2): 203-218
- Rotunno R, Klemp J B, Weisman M L. 1988. A theory for strong, long-lived squall lines. *J Atmos Sci*, 45(3): 463-485
- Weisman M L. 2001. Bow echoes: A tribute to T. T. Fujita. *Bull Amer Meteor Soc*, 82(1): 97-116
- Zheng L L, Sun J H, Zhang X L. 2013. Organizational modes of mesoscale convective systems. *Wea Forecasting*, 28(5): 1081-1098