

1

2

北京地区一次飊线的组织化过程及热动力结构特征

3

雷蕾^{1,2} 孙继松^{*2} 陈明轩³ 秦睿³ 荆浩¹

4

1 北京市气象台, 北京 100089

5

2 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

6

3 北京城市气象研究院, 北京 100089

7

摘 要 2015年8月7日华北西北部的一次断线状对流系统向东南方向移动, 并与平原地区

8

多单体雷暴合并、组织, 最终形成强飊线, 造成北京地区出现较大范围的风雹和局地短时强

9

降水天气。基于多源资料的研究结果表明: (1) 飊线形成有三个阶段: 上游线状对流发展移

10

动、平原多个单体雷暴的新生和合并、线状对流并入本地多单体后组织成飊线。第二阶段中,

11

城区北部边缘地面热力分布不均, 配合局地风场辐合, 触发了雷暴。雷暴冷池范围不断扩大,

12

温度梯度区向南扩展, 造成新生对流向南传播。(2) 飊线的组织化过程, 呈现出两支强入流

13

为典型特征的动力结构: 一支位于雷暴冷池后侧中层(4500~5000m), 另一支位于低层飊线

14

前侧, 由强辐合区垂直于飊线指向云内。这两支强入流分别构成飊线前侧和后侧两个独立的

15

顺时针垂直环流圈。后侧入流和前侧入流在同时加强, 造成飊线前侧垂直环流不断加强, 与

16

之对应的环境垂直风切变也同步增强。这一动力过程形成了有利于飊线组织化的中尺度垂直

17

切变环境, 垂直风切变增大的本质实际上是飊线发展反馈的结果, 同时也是驱动飊线快速向

18

前移动和发展的重要因素。当后侧中层入流消失, 前侧垂直环流也随之逐渐减弱, 预示着飊

19

线从成熟开始减弱消亡。(3) 从热力结构看, 下山的线状对流冷池与平原地区多单体雷暴的

20

冷池合并, 形成了扰动温度低于-8℃、厚度加深到1.5km的强冷池, 其前沿的 β 中尺度锋面

21

附近的辐合上升运动加强, 进一步促进了飊线在平原地区发展加强, 并出现阵风锋。

22

关键词 飊线 冷池 β 中尺度锋面 入流 垂直风切变

23

文章编号

中图分类号

文献标识码

24

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2005.19198

收稿日期 2019-08-05; 网络预出版日期

作者简介 雷蕾, 主要从事天气预报和强对流、暴雨天气机理研究。E-mail:fyrd1234@126.com。

通讯作者 孙继松, 主要从事天气预报技术和强对流天气机理研究。E-mail:sunjsc@cma.gov.cn

资助项目 国家自然科学基金(41575050), 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201506006), 中央级公益性科研院所专项基金项目(UMKY201606)。

Funded by National Natural Science Foundation of China (41575050), Meteorological special funds for scientific research on public causes (GYHY201506006), Central institute special funds for scientific research on public causes (UMKY201606).

25 The Organization Process and Thermal Dynamic Structure of a Squall Line in Beijing

26 Lei Lei^{1,2} Sun Ji-song² Chen Ming-xuan³ Qin Rui³ Jing Hao¹

27 1 Beijing Weather Forecast Center, Beijing100089

28 2 State Key Laboratory of severe weather, Chinese Academy of
29 Meteorology Sciences, CMA, Beijing100081

30 3 Institute of Urban Meteorology, CMA, Beijing100089

31 **Abstract** A broken line convective system, appeared in the northwest of North China,
32 moved to southeast and collided with multi-cells in the plain of Beijing, and eventually
33 formed an organizational strong squall line. It caused local flash rain, gust wind and big
34 hail over Beijing area on Aug. 7, 2015. Based on multiple sources data, the analyzes
35 indicated that, first, the squall line formation process had three stages: The developing and
36 moving of broken line convective system in the upstream, the rebirth and consolidation of
37 multiple cells in the plain and the organization of the squall line after the upstream broken
38 line convective system crossed over mountains and merged into multi-cells in plain. During
39 the second stage, the local convection was triggered near the north of urban city by the
40 inhomogeneous temperature distribution together with local convergence; Corresponding
41 with the cold pool and the inhomogeneous temperature area expanded, the reborn
42 convection propagated toward south because of the southward intensified temperature
43 gradient; second, at the squall-line development stage, dynamic structure is characterized
44 by two strong inflows. One was the mid-tropospheric rear inflow at 4500 to 5000m height,
45 another strong inflow was at the squall line moving direction at low-level perpendicular to
46 squall-line orientation. The two inflows induced two separated vertical clockwise circles at
47 the former and behind the squall line. The vertical circulation in the front of squall line was
48 intensified continuously since the rear and front inflows enhanced together, corresponding
49 with strengthening vertical wind shear. This dynamical process induced the advantageous
50 ambient vertical shear for the squall-line organization, which also was a significant factor
51 for the squall-line rapid movement and development. After the rear inflow disappeared, the
52 frontal vertical circulation weakened and squall line dispersed gradually; third, for the
53 thermodynamic structure, a stronger cold pool appeared with the disturbance temperature
54 -8°C , depth 1.5km, when the upstream convection system merged into the multi-cells
55 system in the plain. As a result, upward motion was strengthened in the leading edge of
56 the β -mesoscale temperature gradient. It was favor to squall line intensifying and
57 developing. At last, a long gust front was induced with the strong squall line.

58 **Keywords** squall line, cold pool, β -mesoscale front, inflow, vertical wind shear

59 1 引言

60 飊线作为一种高度组织化、影响范围广、可能产生强风、龙卷、冰雹和强降水灾害天气
61 的一种强对流系统，从 20 世纪中期开始就受到了科学家们的广泛关注。fujita (1955) 对飊
62 线的天气学概念模型进行了细致的描述，包括飊线过境时表现为明显的气压涌升，雷暴高压
63 和尾部弱低压。后来，随着中尺度观测网的逐渐成熟，对应不同强对流现象的不同尺度风暴
64 系统结构逐渐被揭示出来。早期利用探空和天气雷达等资料，科学家对于美国中东部大量的

65 飊线过程进行分析研究,发现飊线有一些共同的结构特征,包括云体内倾斜的上升气流、低
66 层前侧的暖湿入流,后侧中层比较干的、具有低相当位温的入流,即后侧的干冷空气下沉气
67 流(Newton, 1950)。Ogura and Liou (1980)利用 NSSL 春季计划所获取的资料对一次中纬
68 度飊线过程进行了综合分析,给出了成熟时期的飊线内部热动力结构,并且分析了其维持过
69 程中的物理机制,同样发现了上述一些共同的结构特征。随着二维和三维云模式的发展,
70 Rotunno et al. (1988)模拟了多次飊线过程,用来研究长生命史的飊线所具有的环境特征和
71 维持机制,模拟表明大多数飊线都是由若干短生命史单体不断生消演变形成的长生命史飊线,
72 而雷暴冷池和低层风切变之间的相互“平衡”是飊线维持长生命史的重要热动力因素,形成
73 了著名的“RKW 理论”。

74 国内在飊线结构特征研究方面,利用观测资料来分析飊线成熟阶段的中尺度特征和触
75 发条件(蔡则怡等, 1988; 丁青兰等, 2008; 王国荣等, 2010);此外,利用单(双)多普
76 勒雷达反演技术反演降水云系的水平(三维)风场分析飊线中尺度动力学过程和结构演变
77 (刘淑媛等, 2007; 王俊等, 2007; 潘玉洁等, 2012)。近年来,WRF等中尺度模式或ARPS
78 风暴尺度云模式被应用于对飊线进行模拟,从而对于飊线的结构、发生发展的机制及其作
79 用有了进一步的认识(梁建宇等, 2012; 刘香娥等, 2012; 吴海英等, 2013; 张哲等,
80 2016)。

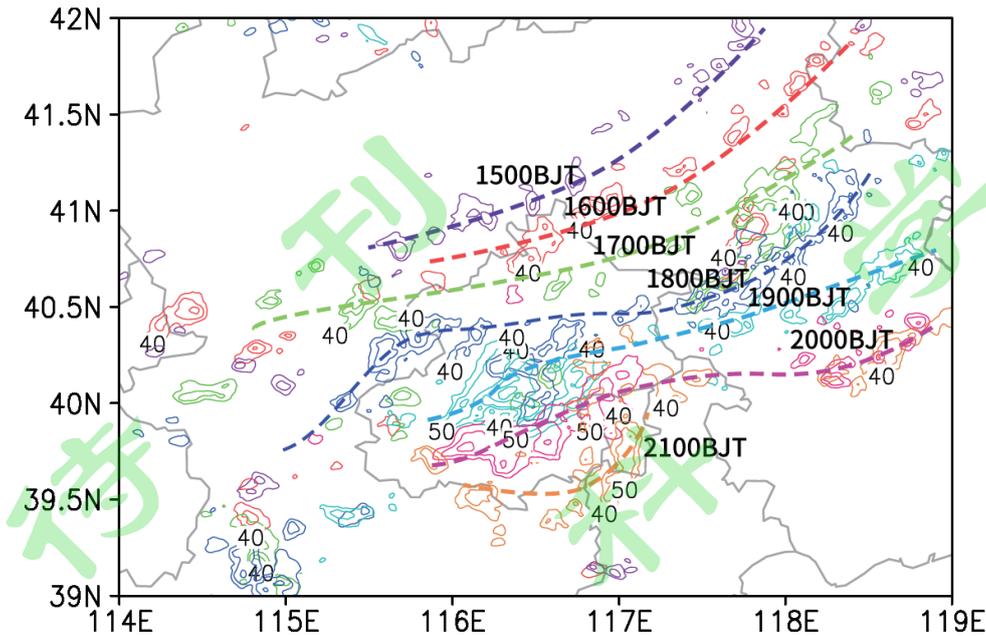
81 华北中南部是仅次于黄淮下游的飊线第二高频多发地区(Meng et al, 2013)。华北地
82 区地形复杂,形成飊线的线状或带状对流系统多发源于河北西部和北部山区(Meng et
83 al, 2013),移动到下游组织成飊线后对大规模城市群产生严重的风、雹、短时暴雨等强对
84 流天气。近年来,上游雷暴下山后加强还是减弱的问题,一直是北京强对流天气短时临近
85 预报中的难点和关键问题,也成为研究热点(Wilson et al, 2010; 陈双等, 2011; 黄荣
86 等, 2012; 肖现等, 2013, 2015; 孙靖和程光光, 2017)。前期研究大多是针对分散的雷暴
87 单体下山强度变化的研究,而对于带状或线状对流系统下山强度如何变化研究相对较少,
88 对于华北地区为什么有的带状对流下山减弱消失,而有些缺乏组织性的对流系统下山后反
89 而能够组织成为飊线?认识还不清楚。揭示对流系统与环境大气之间,风暴单体之间的热
90 动力相互作用过程,不仅关系到对流系统形成和发展机制的理解,同时也是分类强对流天
91 气精细化预报预警的基本物理逻辑。本文将以北北京一次强飊线天气为例,分析初始组织化
92 程度较低的对流单体如何在下山过程中组织成飊线;飊线与环境大气之间、飊线中的风暴
93 单体之间存在怎样的相互作用。

94 2 资料

95 本文采用 (1) 北京观象台 SA 多普勒天气雷达逐 6 分钟体扫观测资料, 用于分析对流系
96 统的演变及中尺度结构。(2) *FY-2G* 卫星可见光图像和相当黑体亮温 (*TBB*) 资料, 用于分析
97 对流发生的环境以及云系的发展强度、结构等图像特征。(3) 北京地区加密自动站资料, 用
98 于分析降水、气温、风等要素。2015 年北京区域自动站约 368 个, 气温和雨量资料均进行
99 质控。(4) *ERA Interim* ($0.125^{\circ} \times 0.125^{\circ}$) 再分析资料, 用于天气尺度形势和物理量诊断。
100 (5) 基于京津冀 6 部雷达观测的四维变分同化系统 (*VDRAS*) 反演高时空分辨率要素场 (*Sun*
101 *et al*, 2001, 2010; *Chen et al*, 2007; 陈明轩等, 2011, 2012, 2016), 已被成熟的应用
102 到华北地区雷暴的研究中 (*Wilson et al*, 2010; 陈双等, 2011; 陈明轩和王迎春, 2012;
103 黄荣等, 2012; 肖现等, 2013, 2015; 刘莲等, 2015), 用于揭示飏线发展过程的热动力结
104 构。

105 3 天气实况及影响

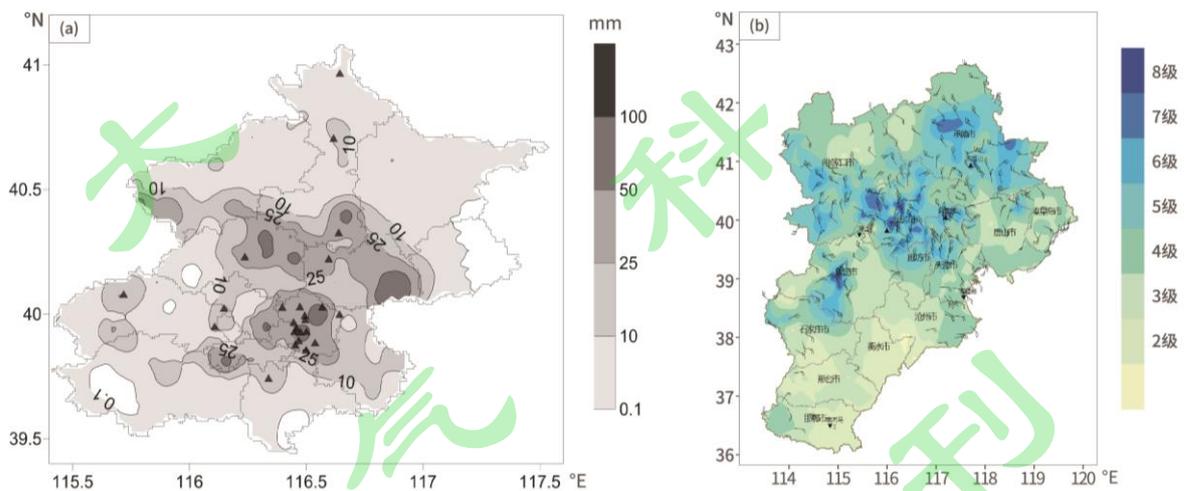
106 2015 年 8 月 7 日午后开始, 华北发生大范围强对流天气。上游断线状对流系统自西北
107 向东南移动, 并且在由山区向平原地区移动过程中与多单体雷暴合并、组织, 最终加强形成
108 强飏线 (图 1)。受其影响, 8 月 7 日 16 时至 22 时 (北京时, 下同), 北京多地出现短时强
109 降水 (图 2a), 雨量分布极不均匀, 最大雨量 85.7mm (朝阳区金盏站), 最大雨强 72.3mm/h
110 (17-18 时, 延庆区东门营站)。对流发展和移动的过程中, 北京自北向南二十余处还上报
111 出现冰雹 (图 2a), 测站上记录的最大冰雹直径为 15mm (朝阳)。此外, 京津冀地区伴有 7~
112 9 级雷暴大风 (图 2b), 北京最大风力 22.8m/s (9 级)。以最大降水朝阳金盏站为例, 17:40-
113 17:50 阵风锋先于降水影响本站, 东南风转为西北风, 风速迅速增大到 5 级 (图 3), 且气温
114 迅速下降; 18:15-18:50, 飏线主体过境, 最大 5 分钟雨量 10.6mm, 并伴有 7 级大风 (18:30-
115 19:55, 16.1m/s), 气温再次下降; 19:00-19:20, 飏线后部雷暴高压影响, 气压快速上升,
116 风速再次增大。这次强对流天气影响非常大, 北京郊区的农作物出现不同程度的毁损, 城区
117 出现严重的道路积水断路、地下通道进水, 首都机场大量航班延误和取消。



118

119 图1 2015年8月7日15-21时逐小时飑线位置(等值线表示40dBZ以上雷达回波,不同颜色代表不同
120 时次;虚线为不同时次飑线位置示意。时间为北京时间)

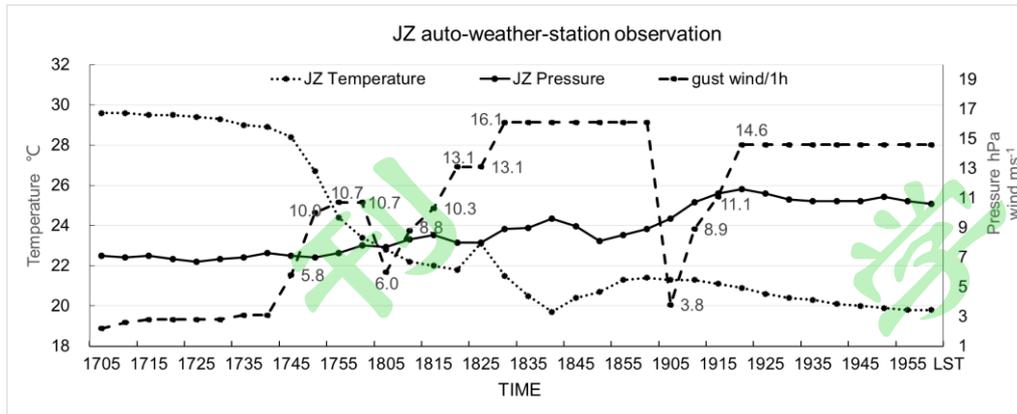
121 Fig.1 The hourly position of the squall line from 1500 BJT to 2100 BJT on Aug. 7, 2015. (The contours
122 showed above 40dBZ radar composite reflectivity, and the colors correspond with time; Dash lines denote
123 the squall line position. Time is the Beijing time(BJT))



124

125 图2 2015年8月7日 a. 16-22时北京地区降雨量(mm)和冰雹位置(黑色三角显示), b. 14-22时京津冀地
126 区极大风速($m s^{-1}$)分布

127 Fig.2 a. Distribution of the precipitation (mm, contour and shaded) and hail position (black tangle) in Beijing
128 area from 1600 BJT to 2200BJT, b. the gust wind ($m s^{-1}$, wind bars and shaded) in Hebei-Beijing-Tianjin
129 from 1400 BJT to 2200 BJT on Aug.7, 2015.

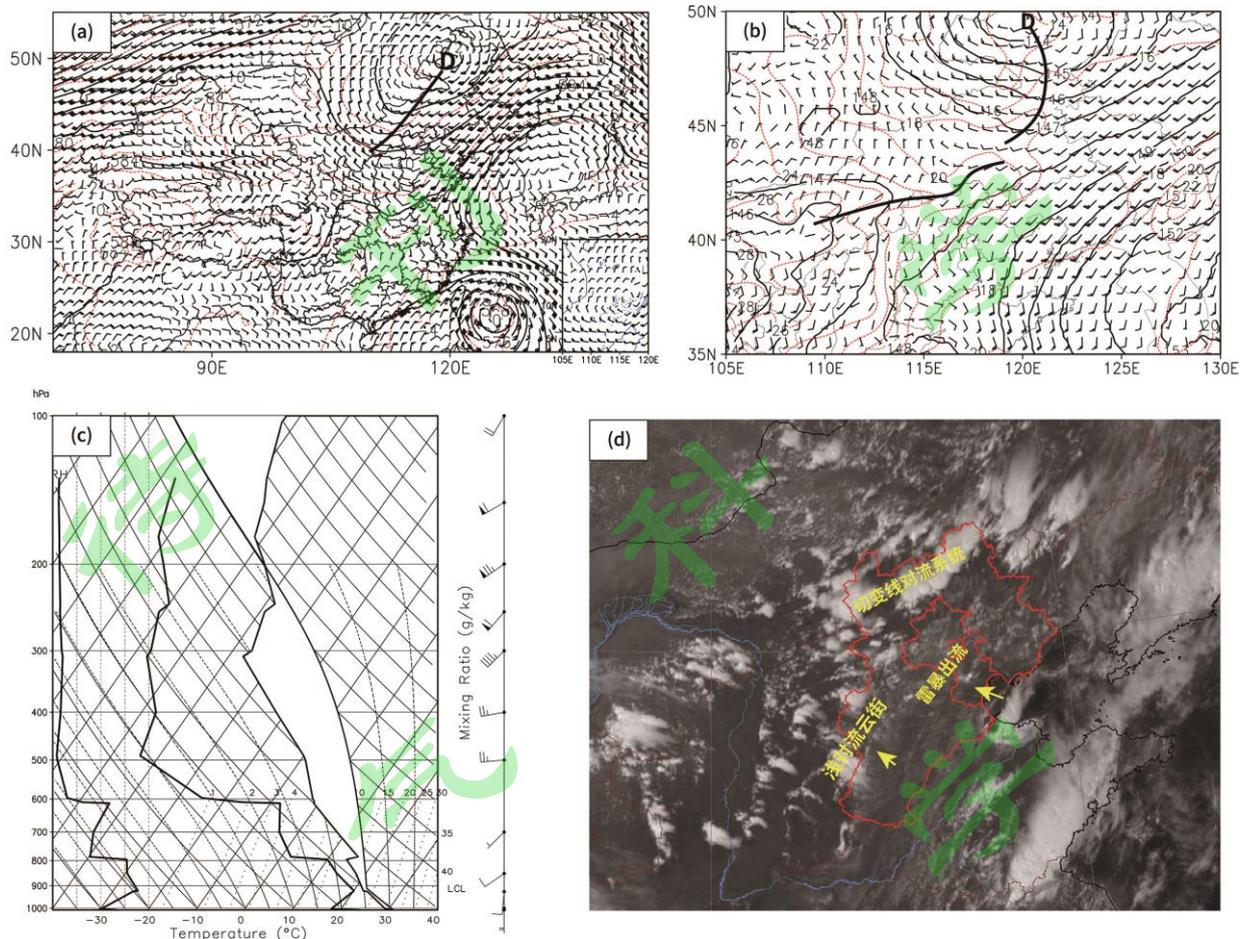


130 图3 2015年8月7日17:05至20:00朝阳区金盏站气温(°C)、气压(hPa)和极大风速($m s^{-1}$)变化
 131 Fig.3 The temperature (°C, dotted line), pressure (hPa) and hourly maximum gust wind ($m s^{-1}$, short
 132 dashed line) at Jinzhan (JZ) auto-weather-station in Beijing from 1705 BJT to 2000 BJT on Aug. 7 2015.
 133

134 4 天气背景及环境特征

135 8月7日08时,500hPa我国中东部有低涡低槽加深发展,低涡中心位于内蒙古东北部,
 136 低涡后部有 $-12^{\circ}C$ 冷中心;西太平洋副热带高压中心位于日本海。京津冀地区位于低涡低槽
 137 前、副高西北侧的西南气流中(图4a)。14时,850hPa内蒙古与河北北部交界地区处于低
 138 压槽区,有切变线并配合暖舌发展,高低空温差超过 $30^{\circ}C$ (图4b)。与850hPa切变线相配
 139 合,地面存在辐合线和干线,京津冀平原受东南风影响,露点温度 $22\sim 24^{\circ}C$,具有高湿的特
 140 征。

141 上述天气背景表明,8月7日午后华北北部存在强对流天气发生的动力、水汽和层结不
 142 稳定条件。FY2G可见光图像(图4d)上,7日午后华北北部较大范围的对流云团正是高空
 143 槽、低层切变线和地面干线附近触发、组织起来的,成为后来演变为飚线的主体。此外,在
 144 云图上华北平原存在浅对流云街,渤海湾的对流系统前侧有小范围积云线(雷暴出流)向北
 145 京地区移动,这些云图特征均表征平原地区大气存在不稳定和有利于雷暴下山的能量条件。
 146 14时探空显示,北京地区CAPE高达 $3270J/Kg$,400~600hPa存在显著干层,但是7km以下
 147 的垂直风切变不足 $10m/s$,3km以下垂直切变更弱,属于弱切变环境(图4c)。



148

149 图4 2015年8月7日 a. 08时500hPa位势高度(gpm, 实线, 间隔20gpm, “D”表示低压中心, 粗黑线
 150 表示槽线), 温度(°C, 虚线, 间隔2°C)及风场($m s^{-1}$); b. 14时850hPa位势高度(gpm, 实线, 间隔
 151 10gpm, “D”表示低压中心, 粗黑线表示槽线和切变线), 温度(°C, 虚线, 间隔2°C)及风场
 152 ($m s^{-1}$); c. 14时北京观象台探空, d. 14时FY2G可见光图像

153 Fig.4 a. Distribution of geopotential heights (gpm, black contoured at 20 gpm intervals) with the trough
 154 axis denoted by black bold lines and low center denoted by “D”, temperature (dash line at 2 °C intervals)
 155 and wind ($m s^{-1}$) in 500hPa at 0800 BJT; b. as in Fig.4a, but for 850hPa (at 10 gpm intervals) at 1400
 156 BJT; c. the radio sounding at Guanxiangtai station (GXT) in Beijing at 1400 BJT; d. FY2G visible spectrum
 157 image at 1400 BJT on Aug. 7, 2015

158 5 飊线的组织化过程及中尺度特征

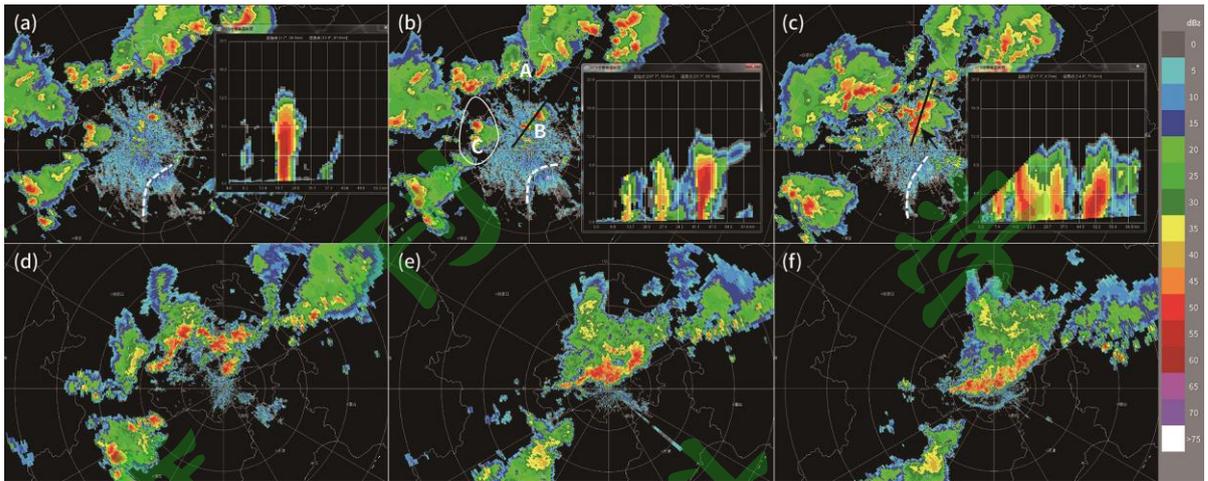
159 付丹红等(2007)研究表明, 80%以上的雷暴合并过程都能使对流发展并使其具有较长
 160 的生命史。本次飊线生命史超过七小时, 其复杂的组织化过程可分为三个阶段: 上游线状对
 161 流的发展、本地多个雷暴的新生和合并、线状对流系统并入本地多单体后组织成飊线。

162 第一阶段: 上游线状对流的发展。8月7日11时之后, 在500hPa高空槽区(冷中心)、
 163 850hPa切变线(暖舌)和地面干线附近, 生成断线状雷暴群(broken line) (Bluestein和
 164 Jain, 1985), 云顶亮温(TBB)低于-40°C。在西北气流引导下缓慢向北京西北部山区移动。
 165 此时, 下游天津也有单体雷暴生成, 北京处于上下游雷暴之间的“空当”区。14:30, 北京

166 朝阳区局地开始有小单体生成,反射率因子强度 50dBZ,从地面向上垂直发展 5~6km。但是,
167 该孤立单体历时 20 分钟左右后减弱消失。此后两小时,河北西北部和天津的对流仍然加强
168 发展,但北京平原地区无任何对流新生,这种状况从某种意义上讲预示着平原地区存在抑制
169 对流的条件,在短临预报中增加了判断上游断线状对流能否下山的难度。

170 第二阶段:平原地区小范围内多个雷暴新生并逐渐合并加强。15 时后,天津地区的雷暴
171 单体出现阵风锋,向北京东南部推进(图 5a 中白色虚线所示);此时上游线状对流也移入北
172 京延庆、怀柔北部地区(图 5a 中 A),在 A 前部和下游阵风锋之间,有孤立的对流单体生成
173 (顺义北部地区),反射率因子强度迅速增强到 60dBZ,回波顶高达到 12km,它距离 A 和阵
174 风锋均为 50km 左右;该单体没有像第一阶段单体雷暴那样减弱消失,反而在其西南侧迅速
175 有雷暴新生、发展,并逐渐形成西南-东北向线状排列的对流系统 B(图 5b),其中成熟单体
176 有“悬垂”结构(图 5b),在顺义造成局地冰雹天气,但降雨不足 2mm,未伴随雷暴大风。
177 与此同时,西部山区回波也在发展东移,形成对流系统 C。此后,C、B 之间不断有雷暴单体
178 新生,17:30 左右 B 的强反射率因子(>55dBZ)高度明显下降,逐渐演变为低质心结构(图
179 5c),但由于边界层相对湿度较差,顺义、朝阳等地雨量不足 5mm,但有小冰雹出现。对应卫
180 星云图上南北两条平行分布的对流云带, T_{BB} 达到-30°C和-40°C以下(图 6a)。

181 第三阶段:18 时之后,上游线状对流并入平原多单体雷暴后高度组织化发展,最终形成
182 飏线。西北部线状对流下山逐渐形成西南-东北向大范围中尺度对流系统,多个对流系统发
183 展成熟, T_{BB} 低于-45°C(图 6b),出现沿地形走向分布的“人字形”回波(图 5d)。东南部
184 阵风锋移动至朝阳区多单体雷暴群附近,其北端与对流系统相接,造成单体新生和对流系统
185 显著加强,金盏站雨强达 60.7mm/h,并伴有雷暴大风。19 时前后,上下游对流系统形成两
186 条线状对流,并逐渐合并组织成强飏线(图 5e)。受嵌在其中的强单体影响,中心城区出现
187 强降水,朝阳区多地出现冰雹天气。强飏线前侧出现阵风锋,水平尺度约 60km,移速约 50km/h,
188 出现大范围 6~8 级大风,最大 18.3m/s。20 时之后,阵风锋逐渐远离飏线,对流系统逐渐
189 减弱, T_{BB} 升高,飏线趋于减弱和消亡(图 5f,图 6c)。

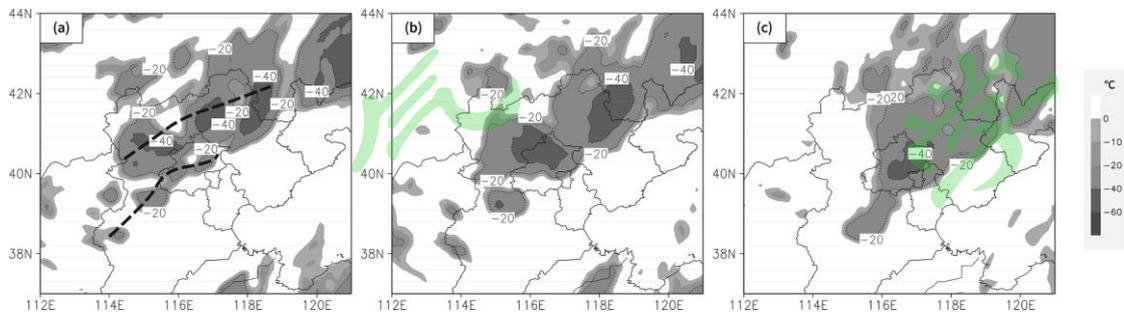


190 图 5 2015 年 8 月 7 日飚线组织化过程中不同时段雷达组合反射率因子 (dBZ)

191 (a. 16:35, b. 16:47, c. 17:35, d. 18:06, e. 19:18, f. 19:42)

192 Fig.5 Distribution of the composite radar reflectivity (dBZ) of the squall line in its different stages on

193 Aug.7, 2015 (a. 1635 BJT,b.1647 BJT,c.1735 BJT,d.1806 BJT,e.1918 BJT,f.1942 BJT)



194 图 6 2015 年 8 月 7 日飚线不同阶段 TBB (°C)

195 (a. 17:00, 发展期, b. 18:00, 成熟期, c. 20:00, 消亡期)

196 Fig.6 Distribution of the Black Body Temperature (TBB, °C) of the squall line in its different stages on

197 6 山前对流的触发与传播

198 午后虽然西北部山区有很好的大尺度动力条件,但是平原地区中高层却处于下沉运动和

199 水汽辐散区域中(图 7a, b),这可能是这一阶段朝阳区孤立对流无法维持的重要原因之一。

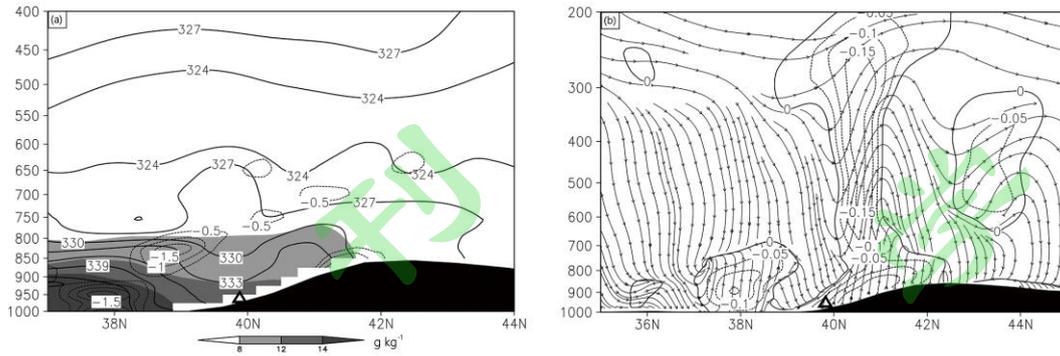
200 但另一方面,探空显示平原地区的能量和层结不稳定条件却非常有利,且抬升凝结高度和自

201 由对流高度非常低(900hPa 以下)(图 4c),在这种环境中,当日午后最高气温升至 30°C以

202 上,就有可能出现热对流,如果配合一定的动力抬升条件使气块抬升至自由对流高度,正浮

203 力作用将迅速使对流获得强烈发展。那么第二阶段中小范围多个单体雷暴是如何被触发并

204 发展起来的?

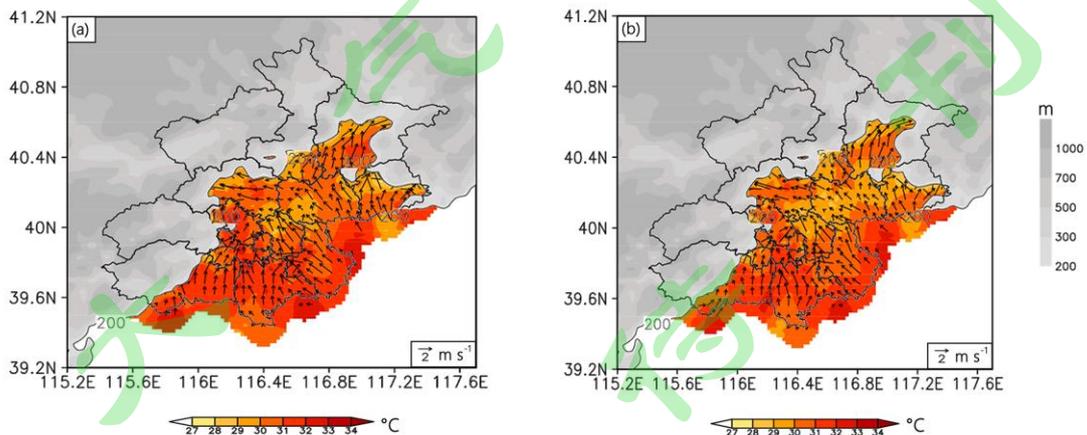


209

210 图7 2015年8月7日14时 a. 假相当位温 θ_{se} (K, 黑色细实线)、比湿 ($g\ kg^{-1}$ 灰度填色) 及水汽通量
 211 散度 ($g\ cm^{-2}\ hPa^{-1}\ s^{-1}$, 黑色细虚线, 负值表示辐合) 剖面, b. 垂直速度 ($pa\ s^{-1}$, 等值线, 负值表
 212 示上升运动) 和流场 (流线) 剖面 (剖面位置 $116.375^{\circ}E$, 黑色三角表示北京位置)

213 Fig.7 a. The equivalent temperature (θ_{se} , K, thin line), specific humidity ($g\ kg^{-1}$, gray shaded) and
 214 water vapor flux convergence ($g\ cm^{-2}\ hPa^{-1}\ s^{-1}$, dash line, negative value denotes convergence), b.
 215 distribution of the vertical velocity ($pa\ s^{-1}$, thin line, negative value denotes upward motion) and
 216 streamline (flow line) along $116.375^{\circ}E$ at 1400BJT on Aug.7, 2015. (black triangle indicates the position of
 217 Beijing)

218 在对流新生前, 地面东南风在顺义、昌平和朝阳交界 (图 8a 圈内) 出现比较明显的局
 219 地风速辐合, 并且温度较周围低 $1\sim 2^{\circ}C$, 尤其南侧温度梯度明显。地面局地热力分布不均配
 220 合风场辐合的状况持续增强, 约 20 分钟后雷暴被触发。造成局地温度差异的原因, 可能与
 221 下垫面物理属性的差异 (南部朝阳区为 CBD 商业区) 导致太阳辐射加热不均或天空云量多寡
 222 有关。此后, 由于北部山前对流造成地面降温 (冷池) 范围进一步扩大, 热力不均的区域进
 223 一步扩大, 温度梯度区和风速辐合区向南发展 (图 8b), 造成新生对流向南传播 (图 5c, d)。
 224 平原地区的对流不断新生发展, 预示着上游线状对流将在下山后可能增强发展成飑线 (Wilson
 225 et al., 2010)。



226

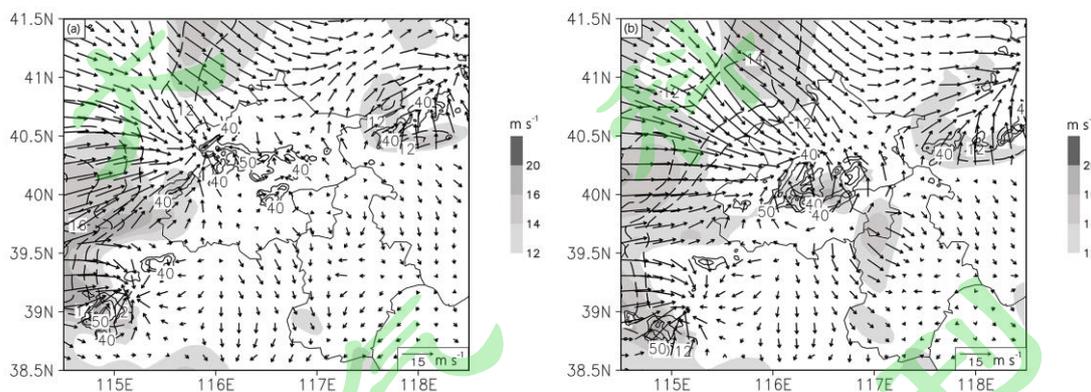
227 图8 2015年8月7日北京加密自动站地面风 ($m\ s^{-1}$)、气温分布 ($^{\circ}C$), 灰度区为地形 (m)
 228 (a. 16:20; b. 16:40)

229 Fig. 8 Distribution of the surface wind (m s^{-1}) and temperature ($^{\circ}\text{C}$) at 1620 BJT (a) and 1640 BJT (b)
230 on Aug.7, 2015. (gray shaded area indicates topography, unit: m)

231 7 垂直风切变与飏线热动力结构变化

232 7.1 垂直风切变的变化

233 Thorpe et al. (1982), Rotunno et al. (1988) 研究表明垂直于飏线的 0~3km 垂直风
234 切变对于形成组织化程度较高的强飏线有重要的影响, 陈明轩等 (2012) 研究表明垂直于飏
235 线的 0~6km 垂直风切变也有一定的指示性作用。但是本次飏线形成前, 0~6km 垂直风切变
236 不足 10m/s , 0~3km 垂直风切变更弱。从雷达回波来看, 18 时前后已经形成了“人字形”
237 回波结构 (图 5e), 其上镶嵌有多个回波强度超过 60dBZ 的雷暴单体。VDRAS 反演的飏线后
238 方垂直风切变矢量的方向为西北-东南方向, 切变大小仍小于 10m/s (图 9a), 其前侧风切变
239 矢量弱且方向性不明显。这与探空得到的弱垂直风切变是一致的, 似乎为不利于飏线组织化
240 的切变条件。19 时前后, 线状对流进入平原地区, “人字形”回波东端逐渐与平原地区的
241 对流系统合并, 移速加快, 此时垂直于飏线的前侧西南风矢量加大, 0~6km 垂直切变显著
242 加大到 17m/s , 0~3km 垂直风切变加强到 14m/s (图 9b), 这显然与对流系统前侧的入流加强
243 有关, 飏线进入成熟期。由此可见, 尽管初期环境垂直风切变较弱, 但是从对流系统合并
244 (对应飏线形成初期) 到飏线成熟期, 垂直于飏线的垂直风切变在同步明显增强。



245

246 图 9 8 月 7 日 0~6km 风切变 (m s^{-1} , 填色)、0~3km 风切变 (m s^{-1} , 长须线表示风速切变, 箭头为风切
247 变矢量) 和大于 40dBZ 的京津冀雷达拼图组合反射率因子 (dBZ , 细实线) (a. 18:30; b. 19:00)

248 Fig. 9 The vertical wind shear above 0-6km (m s^{-1} , shaded) and 0-3km (m s^{-1} , contour indicates
249 shear value, arrows denote wind shear vectors), and the radar composition reflectivity ($\geq 40\text{dBZ}$) on
250 Aug.7, 2015 (a. 1830 BJT; b. 1900 BJT)

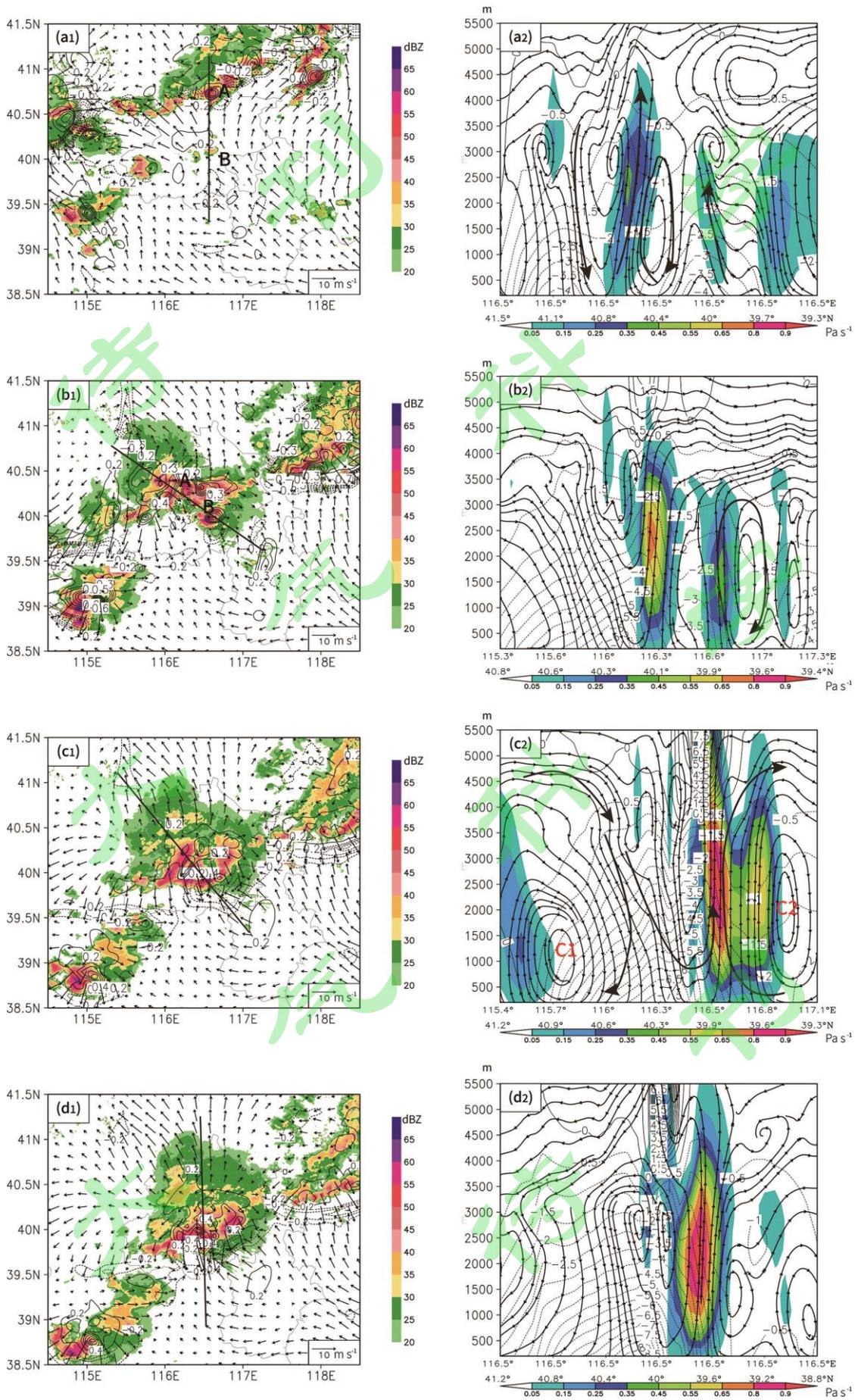
251 7.2 飏线热动力结构的变化及 β 中尺度锋面

252 初始, 北京西北部山区的断线状对流结构松散 (图 10a1-a2), 其上雷暴 A 强度较强, 呈
253 现“TS 型” (Parker and Johnson, 2000)。后侧有弱冷池, 扰动温度 -4°C , 前侧出流较弱,
254 但在地面造成 1 小时负变温超过 2°C (图略), 导致了向平原暖气团一侧的温度梯度加大, 产

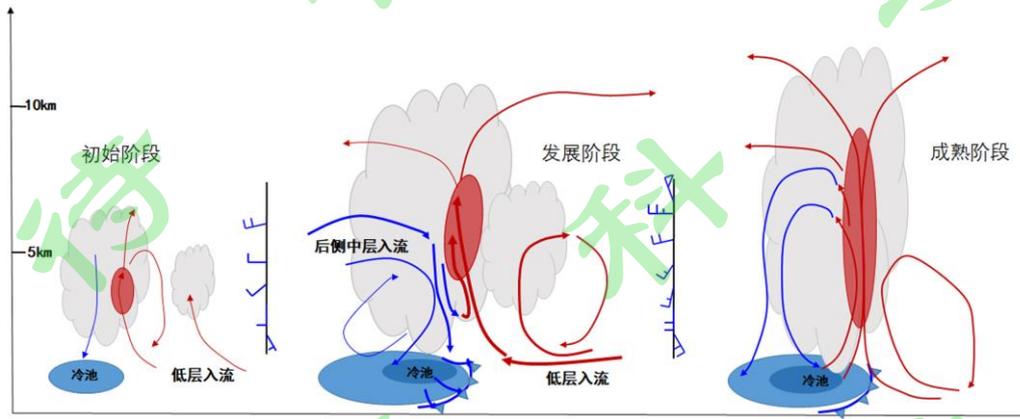
255 生了 β 中尺度锋面（随后出现阵风锋）。与此同时，前部偏南风加大到 $6\sim 8\text{ m s}^{-1}$ ，云体前
256 侧辐合加强，出现显著上升气流，最大上升中心在 2500m 附近，强度约 0.3 Pa s^{-1} 。这支上
257 升气流在高度 3500m 向前流出云体，并形成沿雷暴传播方向的顺时针垂直环流，水平尺度
258 30km，环流中心位于 1000~1500m。 β 中尺度锋区上辐合上升运动加强，进一步促进了线状
259 对流发展，这是一个正反馈的过程。

260 18 时 30 分，线状对流下山后逐渐与平原地区的雷暴 B 结合（图 10b1），冷池强度加强
261 （图 b2, 扰动温度中心 -7°C ）、厚度 1km（参考 Weisman 等，2004，选取从冷池前沿向后的
262 100km 范围内 -5°C 等温线的平均高度作为冷池厚度），线状对流前侧垂直上升速度显著增大。
263 前部垂直环流的下沉支消失，有利于加快与雷暴 B 的合并，之后在其前侧出现新的顺时针垂
264 直环流。

265 图 10c, d 分别代表飏线发展期和成熟期。在飏线发展期，动力结构是以两支强入流为典
266 型特征的。一支位于雷暴冷池后侧中层（4500~5000m），另一支位于低层飏线前侧，垂直于
267 飏线指向云内。这两支强入流分别构成飏线前侧和后侧两个独立的顺时针垂直环流圈 C1 和
268 C2。后侧中层入流进入云体下沉，在低层分为向前侧（飏线移动方向）和后侧两支出流，前
269 侧出流与暖湿气流在飏线移动前方形成强辐合，形成新的垂直上升支和高空出流，逐渐形成
270 前侧的闭合垂直环流圈；而后侧下沉气流与飏线后侧层状云区的弱上升支气流形成后侧垂直
271 环流圈。后侧入流形成的下沉气流造成地面雷暴高压与冷池进一步加强（ -8.5°C ，深度 1.5km），
272 冷池出流与前侧入流在 1500m 以下辐合，垂直方向上表现为在云体前侧两支上升气流合并，
273 造成 2000~2500m 高度上更强烈的上升运动（ $>0.9\text{ Pa s}^{-1}$ ）。在这一过程中，飏线前后两侧
274 不同高度、不同性质的两支入流加强，造成垂直环流和垂直风切变随之加强，即 6.1 节提到
275 的 0~6km 和 0~3km 的垂直风切变增大的本质实际上是飏线发展反馈的结果，也是驱动飏
276 线快速向前移动和发展的重要因素。当后侧中层入流消失、前侧垂直环流减弱时，飏线开始
277 减弱消亡。图 11 给出这次飏线热动力结构概念模型。



279 图 10 a1-d1 为京津冀雷达拼图组合反射率因子 (填色) 叠加 VDRAS 反演的 200m 风场 ($m s^{-1}$) 和散度场
 280 ($10^{-5}s^{-1}$, 虚线); a2-d2 为垂直流场、扰动温度 ($^{\circ}C$, 虚线) 和垂直速度 ($Pa s^{-1}$, 填色) (a1-d1 左图中
 281 细黑线表示剖面位置) (a. 16:29 b. 18:29 c. 19:05 d. 19:23)
 282 Fig. 10 a1-d1 are distribution of Beijing-Hebei-Tianjin combined composed reflectivity (dBZ), retrieved
 283 wind vector ($m s^{-1}$) and divergence ($10^{-5}s^{-1}$) at 200m by VDRAS; a2-d2 are the perturbation
 284 temperature ($^{\circ}C$, dashed line), the steam and the upward speed ($Pa s^{-1}$, shaded) along the black line in
 285 the left Fig.a1-d1 (a. 1629 BJT, b.1829 BJT, c.1905 BJT, d.1923 BJT)



286
 287 图 11 8月7日飚线热动力结构概念模型

288 Fig.11 The conceptually dynamic structure model of the developing squall line on Aug.7, 2015.

289 8 结论

290 这次飚线过程, 初始上游断线状对流形成于高空槽前、低层切变线、地面辐合线和干线
 291 附近, 下山后组织成强飚线影响北京城区。初期, 平原地区中高层存在下沉运动、水汽辐散、
 292 弱垂直风切变等不利条件, 但是又存在高能高湿、层结不稳定等有利的环境条件, 对于线状
 293 对流下山后的强度和形态变化, 临近预报仍存在较大的不确定性。本文基于多源资料的综合
 294 分析, 基本厘清了这次飚线过程的形成、演变机制, 同时也为今后此类天气的临近预报提供
 295 思考。

296 (1) 断线状对流系统逐渐演变为飚线的过程可分为三个阶段: 上游线状对流发展移动、
 297 平原多个单体雷暴的新生和合并、线状对流并入本地多单体后组织成飚线。平原地区近
 298 地面热力分布不均和风场局地辐合导致局地雷暴单体被触发, 形成冷池后, 热力不均的
 299 区域扩大, 温度梯度区与风速辐合区向南发展, 造成新生对流向南传播。由于这些对流
 300 单体处于弱垂直风切变环境中, 其组织化程度相对较差。

301 (2) 飚线的组织化过程, 呈现出两支强入流为典型特征的动力结构: 一支位于雷暴冷池
 302 后侧中层 (4500~5000m), 另一支位于低层飚线前侧, 垂直于飚线指向云内。这两支强
 303 入流分别构成飚线前侧和后侧两个独立的顺时针垂直环流圈。后侧入流和前侧入流的同
 304 时加强, 造成飚线前侧垂直环流不断强化, 与之对应的垂直风切变也同步增强, 这一动

305 力过程形成了有利于飚线组织化的中尺度垂直风切变环境,而垂直风切变增大的本质实
306 际上是飚线发展反馈的结果,也是驱动飚线快速向前移动和发展的重要因素。当后侧中
307 层入流消失,前侧垂直环流也逐渐减弱,预示着飚线从成熟开始减弱消亡。
308 (3) 从热力结构看,下山的线状对流与平原地区多单体雷暴的合并,形成了扰动温度低
309 于-8°C、厚度加深到1.5km的强冷池,其前沿的 β 中尺度锋面附近的辐合上升运动加强,
310 进一步促进了平原地区的飚线发展加强,并出现阵风锋。

311 参考文献 (References)

- 312 Bluestein H B, and M H Jain. 1985. Formation of mesoscale lines of precipitation:
313 Severe squall lines in Oklahoma during the spring [J]. *Atmos. Sci.*, 42, 1711-1732.
314 doi:10.1175/1520-0469(1985)042<1711:FOMLOP>2.0.CO;2
- 315 蔡则怡, 李鸿洲, 李焕安. 1988. 华北飚线的结构与演变特征[J]. *大气科学*, 12 (2) :191-
316 199. Cai Zeyi, Li Hongzhou, Li Huanan. 1988. The structure and characteristics of squall
317 line system in North China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*,
318 12(2):191-199. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1988.02.11
- 319 Chen M X, Sun J Z, Wang Y C. 2007. A frequent-updating high-resolution analysis system
320 based on radar data for the 2008 summer Olympics [C], the 33rd International
321 Conference on Radar Meteorology. Cairns, Australia: Amer Meteor Soc, 4A.7.
- 322 陈明轩, 王迎春, 高峰等. 2011. 基于雷达资料4DVar的低层热动力反演系统及其在北京奥运
323 期间的初步应用分析[J]. *气象学报*, 69 (1) :64-78. Chen Mingxuan, Wang Yingchun,
324 Gaofeng, et al. 2011. A low-level thermal dynamical retrieval system based on the radar
325 data 4Dvar and a preliminary analysis of its applications in support of Beijing 2008
326 Olympics[J]. *Acta Meteorological Sinica (in Chinese)*, 69(1):64-78. doi :
327 10.11676/qxxb2011.006
- 328 陈双, 王迎春, 张文龙等. 2011. 复杂地形下雷暴增强过程的个例研究[J]. *气象*,
329 37(7) :802-813. Chen Shuang, Wang Yingchun, Zhang wenlong, et al. 2011. Intensifying
330 mechanism of the convective storm moving from the mountain to the plain over Beijing
331 area. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 37(7):802-813. doi:10.7519/j.issn.1000-
332 0526.2011.7.004
- 333 陈明轩, 王迎春. 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
334 值模拟[J]. *气象学报*, 2012, (3) :371-386. Chen Mingxuan, Wang Yingchun. 2012.
335 Numerical simulation study of interactional effects of the low-level of vertical wind shear
336 with the cold pool in a squall line evolution in North China[J]. *Acta Meteorological Sinica*
337 (in Chinese), 70(3):371-386. doi : 10.11676/qxxb2012.033
- 338 陈明轩, 肖现, 高峰, 等. 2016. 基于雷达四维变分分析系统的强对流高分辨率模拟个例分析
339 和批量检验[J]. *气象学报*, 74(3) :421-441. Chen Mingxuan, Xiao Xian, Gaofeng, et al.
340 2016. A case study and batch verification on high resolution numerical simulations of
341 severe convective events using an analysis system based on rapid-refresh 4-D
342 variational radar data assimilation [J]. *Acta Meteorological Sinica (in Chinese)*, 74(3):421-
343 441. doi : 10.11676/qxxb2016.031
- 344 丁青兰, 刘武, 朱晓虎, 等. 2008. 一次飚线天气过程多普勒雷达产品分析及临近预报[J]. *气
345 象科技*, 36(2) :160-163. Ding Qinglan, Liu Wu, Zhu Xiaohu, et al. 2008. Analysis and

346 nowcasting of squall line using doppler radar products [J]. *Meteo. Tech.* (in Chinese),
347 36(2):160-163. doi: 10.3969/j.issn.1671-6345.2008.02.007

348 Fujita, T.1955. Results of detailed synoptic studies of squall lines [J].*Tellus*,7,405-436.
349 Newton C.W. 1950. Structure and mechanism of the prefrontal squall line [J]. *J. Meteor.*,
350 7, 210-222. doi: 10.1111/j.2153-3490.1955.tb01181.x

351 付丹红, 郭学良. 2007. 积云并合在强对流系统形成中的作用[J]. *大气科学*, 31 (4): 636-
352 644. Fu Danhong, Guo Xueliang.2007. The Role of Cumulus Merger in a Severe
353 Mesoscale Convective System[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*(in
354 Chinese), 31(4):636-644.

355 黄荣, 王迎春, 张文龙. 2012. 复杂地形下北京一次局地雷暴新生和增强机制初探[J]. *暴雨灾*
356 *害*, 31 (3) :232-241. Huang Rong, Wang Yingchun, Zhang Wenlong. 2012. Initiating and
357 intensifying mechanism of a local thunderstorm over complex terrain of
358 Beijing [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 31(3): 232-241. doi: CNKI:SUN:HBQX.0.2012-
359 03-005

360 刘淑媛, 孙健, 杨引明. 2007. 上海2004年7月12日飑线中尺度分析研究[J]. *气象学*
361 *报*, 65 (1) :84-93. Liu Shuyuan, Sun Jian, Yang Yinming.2007.Structrural analysis of
362 mesoscale convective system in a squall line process on 12 July 2004 in Shanghai [J].
363 *Acta Meteorological Sinica*(in Chinese), 65(1):84-93. doi: CNKI:SUN:QXXB.0.2007-01-
364 007

365 刘莲, 王迎春, 陈明轩. 2015. 京津冀一次飑线过程的精细时空演变特征分析[J]. *气象*,
366 41 (12) :1433-1446. Liu Lian, Wang Yingchun, Chen Mingxuan.2015. Spatial-temporal
367 evolution characteristics of a squall line in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *Meteorological*
368 *Monthly* (in Chinese), 41(12):1433-1446. doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2015.12.001

369 梁建宇, 孙建华. 2012. 2009年6月一次飑线过程灾害性大风的形成机制[J]. *大气科学*,
370 36(2) :316-336. Liang Jianyu and Sun Jianhua. 2012. The formation mechanism of
371 damaging surface wind during the squall line in June 2009[J]. *Chinese Journal of*
372 *Atmospheric Sciences*(in Chinese), 36(2):316-336. doi: 10.3878/j.issn.1006-
373 9895.2011.11017

374 刘香娥, 郭学良. 2012. 灾害性大风发生机理与飑线结构特征的个例分析模拟研究[J]. *大气*
375 *科学*, 36 (6) :1150-1164. Liu Xiang'e, Guo Xueliang. 2012. Analysis and numerical
376 simulation research on severe surface wind formation mechanism and structural
377 characteristics of a squall line case [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in
378 Chinese), 36 (6): 1150-1164. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11212

379 Matthew D. Parker and Richard H. Johnson. 2000. Organizational modes of midlatitude
380 mesoscale convective systems [J]. *Mon. Wea. Rev.* 128, 3413-3416.

381 Meng, Z., D. Yan, and Y. Zhang, 2013. General features of squall lines in East China.
382 *Monthly Weather Review* [J] ,141,1629-1647. doi: 10.1175/1520-
383 0493(2001)129<3413:OMOMMC>2.0.CO;2

384 潘玉洁, 赵坤, 潘益农, 等. 2012. 用双多普勒雷达分析华南一次飑线的中尺度结构特征[J].
385 *气象学报*, 70 (4) :736-751. Pan Yujie, Zhao Kun, Pan Yinong, et al.2012.Dual-Doppler
386 analysis of a squall line in southern China[J]. *Acta Meteorological Sinica* (in Chinese),
387 70(4):736-751. doi: 10.11676/qxxb2012.060

388 Sun J z, Crook N A. 1997. Dynamical and microphysical retrieval from Doppler radar
389 observations using a cloud model and its adjoint:I Model development and simulated data

390 experiments [J]. *J Atmos Sci*, 54(12):1642-1661.doi: 10.1175/1520-
391 0469(1998)0552.0.CO;2

392 Sun J z, Crook N A. 1998. Dynamical and microphysical retrieval from Doppler radar
393 observations using a cloud model and its adjoint: II Retrieval experiments of an
394 observed Florida convective storm [J]. *J Atmos Sci*, 55(5):835-852. doi: 10.1175/1520-
395 0469(1998)055<0835:DAMRFD>2.0.CO;2

396 Sun J Z, Crook N A. 2001. Real-time low-level wind and temperature analysis using
397 single WSR-88D data [J]. *Wea Forecasting*, 16(1):117-132.doi: 10.1175/1520-
398 0434(2001)016<0117:RTLLWA>2.0.CO;2

399 Sun J, Chen M X, Wang Y C. 2010. A Frequent-Updating Analysis System Based on
400 Radar, Surface, and Mesoscale Model Data for the Beijing 2008 Forecast Demonstration
401 Project [J]. *Weather and Forecasting*, 25(6):1715-1735.doi: 10.1175/2010WAF2222336.1

402 孙靖, 程光光. 2017. 北京城区热动力条件对雷暴下山后强度变化的影响 [J]. *高原气象*,
403 36(1) : 207—218. Sun Jing, Cheng Guangguang. 2017. Influence of thermal and
404 dynamical conditions over Beijing city area on strength of down-to-hill thunderstorms
405 [J].*Plateau Meteorology (in Chinese)*, 36(1) : 207-218. doi: 10.7522/j.issn.1000-
406 0534.2016.00007

407 Yoshi Ogura and Ming-Tao Liou. 1980. The structure of a Midlatitude Squall line: A Case
408 Study [J]. *J. Atom. Sci.*, 37, 553-567.doi: 10.1175/1520-0469(1980)0372.0.CO;2

409 Richard Rotunno, Joseph B. Klemp, and Morris L. Weisman. 1988. A theory for strong,
410 long-lived squall lines [J]. *J. Atom. Sci.*,463-485.doi: 10.1175/1520-
411 0469(1988)045<0463:ATFSL>2.0.CO;2

412 Thorpe A J, Miller A J, Moncrieff M W. 1982. Two-dimensional convection in non-
413 constant sheer: a model of mid-latitude squall lines [J]. *Quart J Roy Meteor Soc*,
414 108(458): 739-762.doi: 10.1002/qj.49710845802

415 王国荣, 卞素芬, 王令, 等. 2010. 用地面加密自动观测资料对北京地区一次飚线过程的分析
416 [J]. *气象*, 36(6) :59-65. Wang Guorong, Bian Sufen, Wang Ling, et al.2010. Analysis on
417 a typical squall line case with Surface Automatic Weather Observations [J].
418 *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 36(6):59-65.doi: 10.7519/j.issn.1000-
419 0526.2010.6.009

420 吴海英, 陈海山, 蒋义芳, 等. 2013. “090603” 强飚线过程动力结构特征的观测与模拟分析
421 [J]. *高原气象*, 32(4) :1084-1094. Wu haiying, Chen Haishan, Jiang Yifang, et al. 2013.
422 Observation and simulation analysis on dynamical structure features in a sever squall line
423 process on 3 June,2009 [J]. *Plateau Meteorology(in Chinese)*, 32(4):1084-1094.doi:
424 10.7522/j.issn.1000-0534.2012.00102

425 王俊, 朱君鉴, 任钟冬. 2007. 利用双多普勒雷达研究强飚线过程的三维风场结构[J]. *气象学*
426 *报*, 65(2) :241-251. Wang Jun, Zhu Junjian, Ren Zhongdong. 2007.A study of 3-D wind
427 structure of a strong squall line using dual-Doppler weather radar data[J]. *Acta*
428 *Meteorological Sinica (in Chinese)*, 65(2):241-251.doi: 10.3321/j.issn:0577-
429 6619.2007.02.010

430 Wilson J W, Feng Y, Chen M, et al. 2010. Nowcasting challenges during the Beijing
431 Olympics: Successes, failures, and implications for future nowcasting systems[J]. *Wea*
432 *Forecasting*, 25(6) : 1691-1714. Doi: 10.1175/2010WAF2222417.1

433 肖现, 王迎春, 陈明轩, 等. 2013. 基于雷达资料四维变分同化技术对北京地区一次下山突

434 发性增强风暴热动力机制的模拟分析[J]. 气象学报, 71 (5) : 797-816. Xiao Xian,Wang
435 Yingchun,Chen mingxuan,et al.2013.A mechanism analysis of the thermos-dynamical
436 field of a suddenly intensifying storm from mountains in the Beijing area with the radar
437 data 4DVar[J].Acta Meteorological Sinica (in Chinese),71(5):797-816.doi:
438 CNKI:SUN:QXXB.0.2013-05-001
439 Weisman M L, Rotunno R. 2004. "A theory for the strong long-lived squall lines"revisited
440 [J]. J Atmos Sci, 61(4):361-382.
441 肖现, 陈明轩, 高峰, 等. 2015. 弱天气系统强迫下北京地区对流下山演变的热动力机制
442 [J]. 大气科学, 39 (1): 100-124. Xiao Xian, Chen Mingxuan, Gao Feng, et al. 2015. A
443 thermodynamic mechanism analysis on enhancement or dissipation of convective
444 systems from the mountains under weak synoptic forcing [J]. Chinese Journal of
445 Atmospheric Sciences (in Chinese), 39 (1): 100-124.doi: 10.3878/j.issn.1006-
446 9895.1403.13318
447 张哲, 周玉淑, 邓国. 2016. 2013年7月31日京津冀飑线过程的数值模拟与结构分析[J]. 大气科
448 学, 40 (3) :528-540. 540. Zhang Zhe, Zhou Yushu, Deng Guo. 2016. Numerical
449 simulation and structural analysis of a squall line that occurred over the Beijing-Tianjin-
450 Hebei region of China on 31 July 2013[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences(in
451 Chinese), 40(3):528-540. Doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1507.15127