

袁子鹏,王瀛,崔胜权,等. 一次中纬度飑线的阵风锋发展特征分析[J]. 气象,2011,37(7):814-820.

一次中纬度飑线的阵风锋发展特征分析^{* 1}

袁子鹏 王 瀛 崔胜权 陈艳秋 黄 阁

沈阳中心气象台,沈阳 110016

提 要: 2009 年 8 月发生在辽宁省中部的一次飑线前部出现了两次特征不同的阵风锋发展过程,并伴随有灾害性大风和冰雹等强对流天气。应用多普勒雷达数据、常规探空、地面加密观测及飞机观测(AMDAR)数据对飑线系统进行了综合分析。结果显示环境场中强的风垂直切变促进飑线上对流单体发展并使飑线倾斜。西路冷空气进入飑线使对流加强,形成第一次阵风锋。而北路冷空气与飑线的暖心间温度梯度增大,造成地面风速增大是第二次阵风锋发展的直接诱因。最终飑线系统母体中的线状辐合带转移到第二次阵风锋上,该阵风锋形成新的飑线。

关键词: 飑线,阵风锋,AMDAR,强对流

Analysis on the Characteristics of a Mid-Latitude Squall Line

YUAN Zipeng WANG Ying CUI Shengquan CHEN Yanqiu HUANG Ge

Shenyang Central Meteorological Observatory, Shenyang 110016

Abstract: A squall line with two different gust fronts occurred in central Liaoning in August 2009, accompanied by strong convective weather phenomena such as disastrous wind and hail. The developing processes of the two gust fronts were analyzed based on Doppler radar data, radiosonde data, surface meteorological observation data and Aircraft Meteorological Data Acquisition and Relay (AMDAR) data. The results indicate that the strong vertical wind shear in background field intensified the growth of convective cells in the squall line and made its inclining. The westerly cold flow, entering the back of squall line, stimulated the convective activities of the cells and gave birth to the first gust front. The acceleration of westerly surface flow, produced by the great temperature gradient of a northerly cold flow and the warm core of the squall line is the instant cause for the genesis of the second gust front. The line-shaped convergence zone was formed in the major body of the squall line moved to the second gust front, which became a new squall line finally.

Key words: squall line, gust front, AMDAR (aircraft meteorological data acquisition and relay), strong convection

引 言

对流风暴有时会引发阵风锋,这是一种高层下沉的干冷空气在环境场中近地面层相对暖湿空气的辐合边界。之前的研究发现阵风锋有多种对流强度

特征。有的阵风锋在雷达基本反射率因子图像上有类似于飑线的窄带回波^[1-2],但并没有对流性降水等天气相伴随。而有的阵风锋则可能伴随着雷雨大风和冰雹等强对流天气^[3]。而发生在中纬度陆地上的飑线作为一种有组织的中尺度对流系统,阵风锋是其常见的特征,与其相伴生的还有后部入流,尾流锋

* 公益性行业(气象)科研专项“华北、东北暴雨发生发展特点及预报技术研究”(GYHY200906011)和辽宁省气象局科研课题“强对流天气短期客观潜势预报方法研究”共同资助

2010 年 10 月 10 日收稿; 2011 年 4 月 20 日收修定稿

第一作者:袁子鹏,主要从事短期和短时天气预报研究工作。Email: lnsyyp@sina.com

区等^[4]。Biggerstaff 等^[4]和 Houze 等^[5]在研究中纬度飊线的垂直运动特征时,发现在对流线和层状云降水区之间有一个过渡带。Johnson 等^[6]在飊线前后分别发现了中尺度低压和高压系统。中国的中纬度地区在每年的春夏秋三季经常出现飊线,并造成雷雨大风、冰雹或龙卷等强对流天气,如 2009 年 6 月,受东北冷涡影响,在淮河地区 11 天内便连续发生三次强飊线,伴随着强雷暴、冰雹和瞬时大风等剧烈天气,造成了 59 人死亡的严重后果,是近年来影响较大的一次强对流天气^[7]。在这三次过程中,共同特点便是均有弓状回波的发展及外流边界的出现。对于这种灾害性天气的预报和预警目前仍然希望通过多种观测资料的综合分析^[8]、发展精细化的数值预报模式及快速更新同化系统来实现^[9],但是在技术上仍然面临一系列的挑战,尤其是对飊线及其相伴生的阵风锋观测特征仍未形成比较完整的概念模型。这首先需要飊线这种中小尺度的天气系统进行更多的个例研究,从而探寻其内在的发展规律。

2009 年 8 月 27 日发生在辽宁中部的一次飊线过程伴随着两次阵风锋的发展过程,其回波形态和相伴生的天气现象有较明显区别。本文应用多普勒雷达探测数据,气象探空和地面加密观测数据,飞机观测数据综合分析这两次阵风锋的发展和演变过程,尝试寻找阵风锋发展的共性规律和个体差异,从而加深对这一现象的物理理解。

1 实况

2009 年 8 月 27 日 14—20 时(北京时,下同),辽宁省受一条带状对流云带自西向东移动的影响,出现了强对流天气(如图 1 所示),沈阳、阜新、铁岭、辽阳、鞍山、锦州共 6 个市的 14 个县(区、市)均出现短时雷雨大风天气,瞬时地面最大风速出现在辽中县为 $24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。沈阳市区建筑物外墙砖和广告牌被大风吹落,共砸死 2 位行人,另有 11 人受伤;新民市 2 人被大风刮倒的树木砸死;康平县在 17 时左右观测到了直径 15 mm 的冰雹。强对流天气还造成了大田作物倒伏、建筑物损毁,经济损失巨大。

2 环流背景

从 27 日 08 时的高空图(图略)分析可知,辽宁

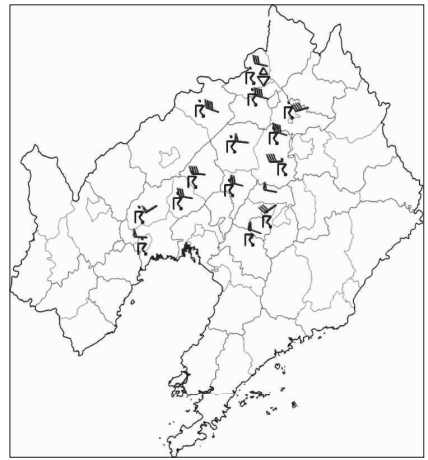


图 1 2009 年 8 月 27 日 14—20 时
辽宁省强对流天气分布图

Fig. 1 The distribution of convective weather phenomena observed in Liaoning from 14:00 BT to 20:00 BT, 27 August 2009

省位于 500 hPa 高空槽区底部的偏西气流之中,在 850 hPa 上处于温度脊中。沈阳探空站观测显示,对流层中层附近有弱的位势不稳定。对流层低层的西南风风速为 $2 \sim 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,850 hPa 温度露点差在 7°C 以上,600~500 hPa 为明显干层,仅在近地面层有较浅薄湿层,而南方也没有明显的暖湿空气的平流输送,但是具有较强的风场的垂直切变(如图 2a),0~6 km 的切变达到了 $21.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。经计算,对流有效位能(CAPE)仅为 $338 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,对流潜势较弱。但是在上游地区,河套西部高空槽沿西风带东移。同时,贝加尔湖区东部有横槽在偏北气流驱动下加速转竖下摆。至 20 时,2 个高空槽结合加强为 1 个高空槽并东移,槽线到达辽宁西部。此时,辽宁省内 4 个探空站数据显示对流层低层具有明显的气流加速,风速平均增大了 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,同时气温也下降了 3°C 以上。在这次强对流天气发生的过程中,天气尺度环流出现了明显调整,有 2 股冷空气自对流层低层先后侵入辽宁。应用上海中心气象台戴建华提供的探空订正软件对近地面层温湿度廓线进行订正,即用当日 14 时沈阳观测站地面 2 m 的气温(29°C)与露点温度(21°C)代替 08 时的相应数据(22°C 和 20°C),可以得到 1 个不稳定性很高的探空剖面图,其中的对流有效位能达到了 $2273 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。这说明了干冷空气的入侵及与近地面层西南气流的增温增湿作用有利于提高对流潜在能量,在辐合抬升条件

较好的地区将容易出现对流。

另外,分析地面自动站观测资料可知,自 14 时起,有 1 条东北—西南向辐合线开始自西向东移动(如图 2b)。辐合线附近出现 6 级以上大风及最大

每小时 26 mm 的对流性降水天气。而至 17 时,该辐合线北段出现向东的弯折,显示北部有气流进入辽宁省。地面辐合线的出现,与河套冷空气东移相联系。而地面辐合线的变化,则可能与贝加尔湖冷

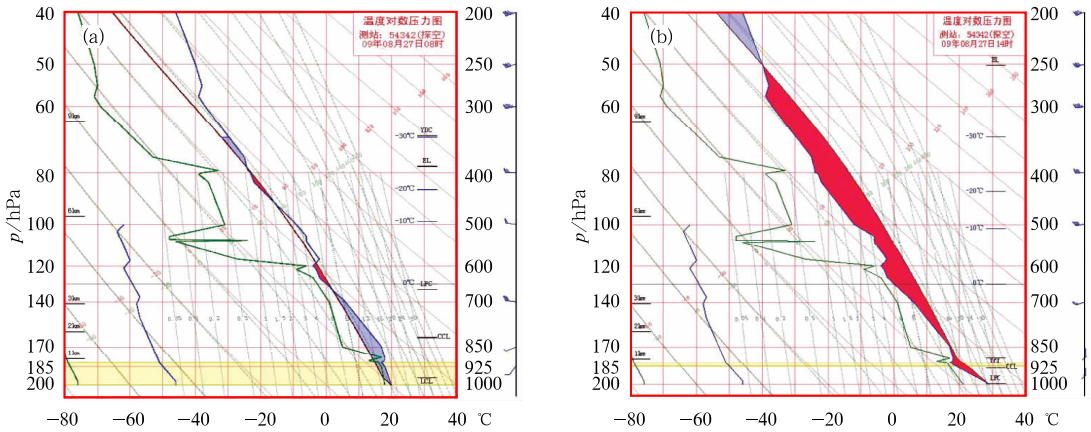


图 2 2009 年 8 月 27 日 08:00 时(BT)沈阳探空站的 T - $\log p$ 图(a)及地面气温和露点温度被 14 时数据代替的 T - $\log p$ 图(b)

Fig. 2 The original T - $\log p$ profile at 08:00 BT 27 August 2009 (a) and the revised T - $\log p$ profile by the surface temperature and dew point at 14:00 BT in place of that at 08:00 BT 27 August 2009 (b), at Shenyang Station

空气的南下相关。

3 多普勒雷达特征分析

3.1 飊线发展过程

在 27 日 15:50 的雷达基本反射率因子图上显示,自内蒙古的通辽至辽宁省中部有一条东北—西南向的飊线回波向偏东方向移动,长约 400 km,宽约 80 km(图 3a)。飊线前沿的回波强度梯度较大。强回波中心上下垂直位于飊线的北段,飊线中有多个对流单体呈线状排列,各层中心强度均在 53~55 dBz 之间。飊线的北段和中段后部均存在有入流缺口。回波形状在底层近似于直线,但随着高度超过 4 km,飊线两端回波向系统移动方向内弯,在 4.3°以上仰角显示的便是“豆荚状”回波(图 3b),在飊线中段后部仍可观测到后侧入流缺口,该缺口的高度达到了 8.3 km 以上。

应用当日 09:41 在沈阳起飞的 B2648 号航班的 AMDAR 探空资料(图 4)可以看到环境风场的精细结构。对比图 2 和图 3 所示的探空风场结构,可以看到 2 km 左右是风向切变层,其下是偏南风到

东南风,风速均不超过 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,其上为偏西风,风速随高度的升高而增大,但在 5~7 km 范围内,风速比 08 时观测下降了 $4 \sim 6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。对前 10 日内 B2648 号航班的探空资料作质量检验,通过北京、沈阳和郑州 3 个站共 11 个探空观测时次(08 时和 20 时)前后各 30 分钟内的数据对比,平均风向差异在 30°以内,风速差异在 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以内,因此其数据可信度较高。弱的风垂直切变通常会引引起风暴移动缓慢,并有利于保持风暴结构垂直^[10]该飊线系统处于较强的风切变环境场中,在 4 km 以上受到较强西风的平流作用,从而形成了前倾结构,但是并没有出现强回波的悬垂结构。这种环境风场结构也有利于高层辐散,从而使飊线这种有组织的对流系统得以维持或加强。同样应用图 2 中采用的近地面层温湿度廓线构建方法,取沈阳观测站 09:40 的地面 2 m 气温(24°C)和露点温度(20°C),应用飞机观测的探空温度及风场资料可以构建成 09:40 的温度对数压力图(图略),计算得到 $CAPE$ 达到了 $1852 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。这说明环境场的层结此时已经具有了明显的不稳定层结。

由图 2 可知,环境场中 2 km 以上是干燥的偏西风。但在飊线内部,偏西风与飊锋前的偏南风开始辐合上升,并在 300 hPa 高度形成向后的出流,同

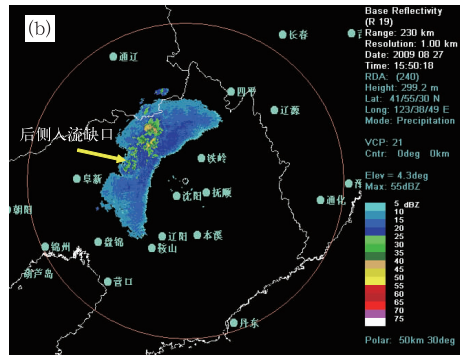
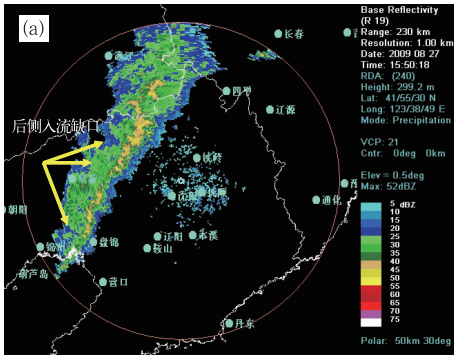


图 3 2009 年 8 月 27 日 15:50 沈阳多普勒雷达基本反射率因子图

(a) 探测仰角 0.5°; (b) 探测仰角 4.3°

Fig. 3 The base reflectivity observed by Shenyang Doppler radar at 15:50 BT 27 August 2009

(a) at 0.5° elevation and (b) at 4.3° elevation

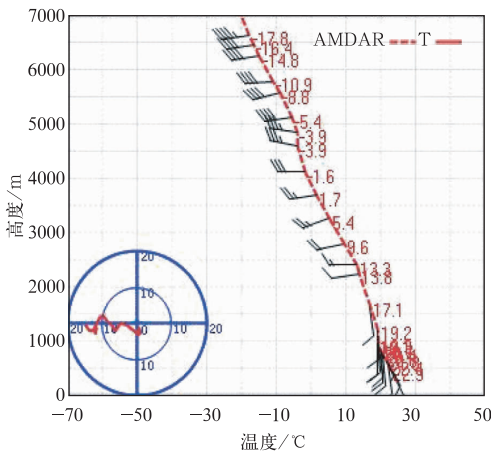


图 4 2009 年 8 月 27 日 09:41 在沈阳起飞的 B2648 号航班的 AMDAR 探空图

Fig. 4 The AMDAR-profile observed by airplane No. B2648 taking off from Shenyang Airport at 09:41 BT 27 August 2009

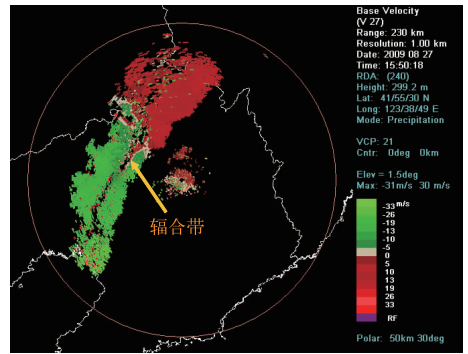


图 5 2009 年 8 月 27 日 15:50 沈阳多普勒雷达基本径向速度图
探测仰角 1.5°

Fig. 5 The base radial velocity observed by Shenyang Doppler radar at 15:50 BT 27 August 2009 at 1.5° elevation

3.2 阵风锋第一次发展

时在 200 hPa 高度形成向前的出流^[1]。由于水分集中在飊锋前部,所以 200 hPa 上向前出流的湿空气平流后形成图 3b 所示的豆荚状回波,而向后的出流以干空气为主,故形成了图 3b 所示的最强对流中心后部高层的出流回波缺口。随着飊线的继续东移,低层回波仍保持直线状,中高层回波两端进一步内弯,表明环境风场在风暴承载层中的垂直结构仍未出现明显变化。分析此时段的基本速度图(图 5)可以看到与最强对流中心对应有一条线状的速度辐合带,辐合最强的区域为飊线中段,辐合带的高度为 2.8~6.0 km。辐合带前侧暖湿气流倾斜上升,后部有冷空气注入,形成下沉气流。下沉气流在地面附近辐散,与前侧入流形成低层外流边界。

16:08 开始,距离飊线南段约 60 km 处开始出现 3 个对流单体,排列成线状并与飊线边界相平行(图 6a)。至 16:34,对流单体从中上部开始发展并组织化,逐渐形成一条直线型外流边界。对应飊线主体上部的“豆荚状”回波进一步内弯成“C”型回波并有与外流边界相连接的趋势(图 6b)。外流边界回波进一步加强发展,回波强中心位于 3 km 以上,强度最强达到 63 dBz。在基本反射率因子图像分析来看,外流边界的发展的位置与飊线主体回波前倾的位置相重合。这种结构,一方面有利于高层气流辐散,促进外流边界上的对流单体垂直运动的加强和维持;另一方面,来自飊线主体的水汽平流促进了中层以上水汽的凝结过程,因而有利于对流单体

在中层的加强发展。

从速度图上可见(图 6c),中层径向辐合带仍然维持并略有展宽,这表明对流上升运动的加强。同时,外流边界的出现本身也是飚线系统对流加强的信号。在飚线主体后部,可以看到楔形的较强的负

速度中心开始出现,这说明有大风速从高层开始下沉。这就是对流层低层水平运动加速的开始。值得注意的是,飚线南段的速度辐合带呈直线状,与其平行出现了外流边界。而飚线北段的速度辐合带呈“S”型,未观测到明显的外流边界。

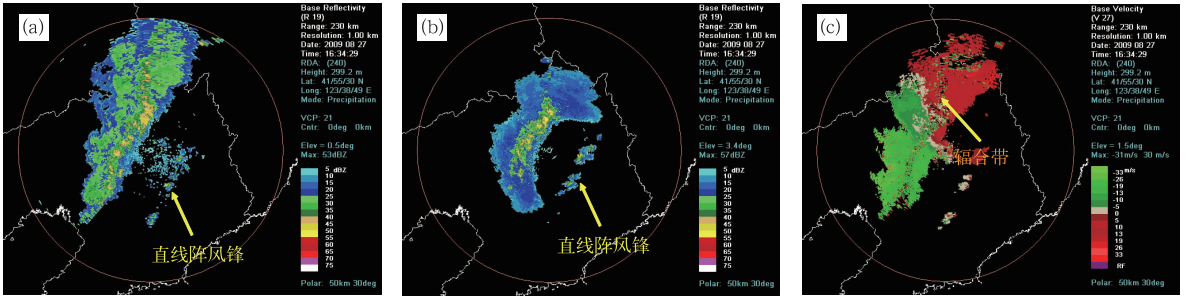


图 6 2009 年 8 月 27 日 16:34 沈阳多普勒雷达基本反射率因子(a,b)和基本径向速度(c)图

(a) 探测仰角 0.5°; (b) 探测仰角 3.4°; (c) 探测仰角 1.5°

Fig. 6 The base reflectivity (a, b) and base radial velocity (c) observed by Shenyang Doppler radar at 16:34 BT 27 August 2009 (a) at 0.5° elevation, (b) at 3.4° elevation, and (c) at 1.5° elevation

3.3 阵风锋第二次发展

17:11(图 7a),直线型外流边界上的 3 个对流

单体加速减弱东移,而在飚线北段开始出现弧状外流边界,南端也有外流边界发展,在此后的约 20 分钟内,两部分弧状回波由两端向中央沿一条弧线加

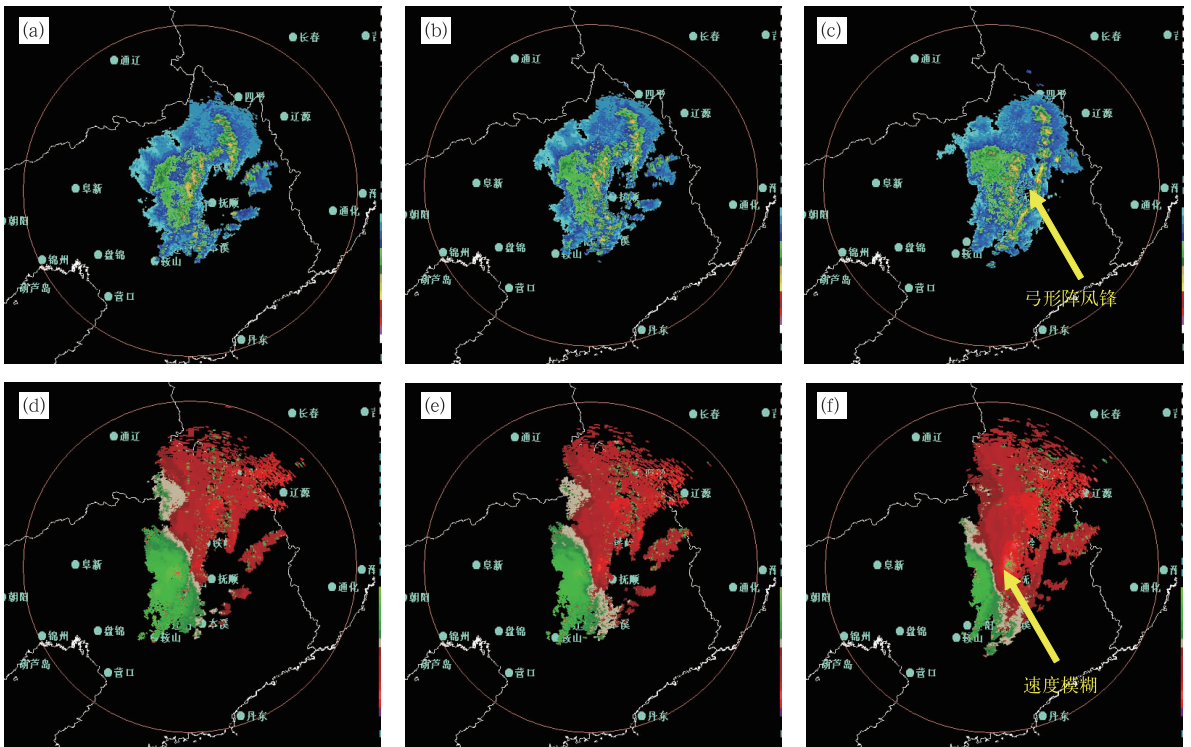


图 7 2009 年 8 月 27 日 17:11(a 和 d),17:17(b 和 e)和 17:23(c 和 f)沈阳多普勒雷达基本反射率因子

(a,b 和 c, 探测仰角 3.4°)和基本径向速度(d,e 和 f, 探测仰角 1.5°)图

Fig. 7 The base reflectivity (a,b,c, at 3.4° elevation) and base radial velocity (d,e,f, at 1.5° elevation) observed by Shenyang Doppler radar at 17:11 BT (a,d), 17:17 BT (b,e), 17:23 BT (c,f) 27 August 2009

强发展(图 7b)并在 17:29 形成由多个密实小尺度对流单体组成的近似光滑弧线回波(图 7c)。与此同时,地面气温下降明显,出现灾害性大风,沈阳、新民、辽中等 10 个站出现 6 级以上大风,同时在抚顺和本溪的 4 个加密自动站观测到超过 $10 \text{ mm} \cdot (10 \text{ min})^{-1}$ 的降水。此时出现雷雨大风是因为随着飊线上对流系统的发展在强上升气流的前方出现干冷下沉气流,这是风暴内部降水质粒的重力拖曳和云下的融化、蒸发冷却过程驱动并加强下沉气流的结果,强下沉气流到达地面后形成很强的地面出流,造成强的阵风^[12]。出流空气与前方的暖湿空气相遇形成了外流边界。此时,在速度图(图 7d~7f)上可以看到,原有的速度辐合带被破坏消失,在弧线回波带上生成了新的较弱的线状辐合带。原有飊线结构由线状变为块状并减弱,1 km 左右出现偏西大风,出现了明显的牛眼对结构和出流区内的速度模糊,说明最大出流速度超过了 $31 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[13],高于地面观测的最大阵风风速($24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)。

沿弧状回波制作剖面图(图略)可以看到,弧状对流带从两端向中央发展,对流单体处于不同的发展阶段。两端的回波中心高度较高,向中心处依次降低。这是比较典型的一条新的飊线发展过程。北端的外流边界发展对应于贝加尔湖冷空气的东南下,在地面图上北部的自动站风向由偏南转偏西再转偏北可以说明这一点。而南段外流边界的发展则在偏西气流加速的背景下完成,通过对自动站观测中的辐合线自西向东的移动可以证明。

这说明,随着冷空气的东移和南下,对流层低层水平运动加速,原有飊线结构被破坏,并以产生外流边界的形势来完成新飊线结构的产生。

3.4 阵风锋两次发展的异同点及机理分析

2009 年 8 月 27 日发生在辽宁省的中尺度飊线具有两次阵风锋发展过程,共同点是:(1)所处环境场具有很强垂直风切变且近地面层有明显的加温加湿作用;(2)其成因均是飊线上对流系统发展后地面辐散气流加强并与飊线前暖湿空气相遇产生辐合对流发展;(3)从现象上看均发生在飊线高层前部出流两端的连线上,即位于高空出流的前缘,并从飊线一端或两端向中央波状发展,同时随着飊线东移。

两次阵风锋发展也具有明显的不同点:(1)第一次阵风锋为直线型,第二次为弧形;(2)第一次阵风锋加强后东移减弱消失,第二次加强后取代原飊线

发展为新的飊锋主体,原飊线减弱;(3)第二次阵风锋发展后出现了线状的速度辐合带,而第一次没有出现;(4)第一次阵风锋上的对流单体由南向北依次发展,第二次由南北两端向中间发展。

根据上述分析,考虑到环境场中西路和北路冷空气进入的时间和方位,可以分析认为,产生两次阵风锋发展的原因在于环境场中风场结构的变化。文献[8]指出:随着飊线的发展,对流活动加强,在对流层中层由于凝结潜热的释放会形成暖心,因而形成与周围达到 3°C 以上的温差。第一次阵风锋的发展是处于西风气流进入飊线后部的情况之下,没有明显的温度平流,但会增强中层入流和辐合上升,因而有助于加强对流,促进暖心进一步发展。由于西风气流偏南,所以第一次阵风锋发展初现于南部并且由于偏西风风场均匀而使新生的对流单体与飊线主体平行呈现直线型。第二次阵风锋发展则出现在北部冷空气进入的 17 时之后,此时,飊线中的雷暴北侧水平温度梯度增加,在其西北或北缘可建立一强风速区或风速最大值区,此时在新生的阵风锋上对流由于风速的不均匀而排列为弧形,风速最大值区对应于弧顶。随着冷空气的南移,原飊线结构被破坏,风速加大,形成如图 7f 所示的风速中心,从而演变成阵风锋的后部入流,使阵风锋上辐合对流发展,从而成为新的飊线主体。因此,可以说,西路冷空气从后部进入南北向飊线不会破坏原飊线的热力场和风场的结构,只会促进对流发展;北路冷空气进入南北向飊线会加大温度梯度,产生风速大值区,最终破坏原飊线的主体结构,促进飊线的新生。

4 结 论

8 月 27 日发生在辽宁省的飊线过程造成了雷雨大风和冰雹天气,其典型特征是出现了两次阵风锋的发展。第一次阵风锋为直线型,发展后东移减弱消失;第二次阵风锋为弧线型,加强后出现了线状中层径向辐合特征,取代原飊线主体成为新的飊线并继续东移。通过对地面和探空观测及雷达产品的分析可得到以下结论:

(1) 此次飊线过程中对流不稳定条件在当日 08 时的探空数据中并未得到明显体现,而 12 小时内两股冷空气的影响促进了不稳定条件的发展并产生了飊线系统。这说明应用探空资料判断层结稳定度要注意变化趋势,可以辅以 AMDAR 等非常规资料并

可以应用地面气温和露点温度来订正近地面层温湿度廓线,会得到更有利的对流发展潜势指示。

(2) 飊线的垂直结构受到环境风场的制约,当有强的风垂直切变时,既能够促进飊线上对流单体发展,也可能造成飊线垂直结构的倾斜。阵风锋的发展表明飊线发展的强盛,如果阵风锋与倾斜的飊线回波顶相重合时,会促进外流边界的发展。

(3) 西路冷空气从后部进入南北向飊线不会破坏原飊线的热力场和风场的结构,只会促进对流发展;北路冷空气进入南北向飊线会加大温度梯度,产生风速大值区,最终破坏原飊线的主体结构,促进飊线的新生。

致谢:上海中心气象台戴建华首席提供探空订正软件并给予深入全面的技术支持。

参考文献

- [1] 朱敏华,周红根. 多普勒天气雷达在阵风锋监测中的应用[J]. 气象科学,2006,26(1):97-102.
- [2] 黄旋旋,何彩芬,徐迪峰,等. 5.6 阵风锋过程形成机制探讨[J]. 气象,2008,34(7):20-26.
- [3] 吴芳芳,王慧,韦莹莹,等. 一次强雷暴阵风锋和下击暴流的多普勒雷达特征[J]. 气象,2009,35(1):55-64.
- [4] Biggersta M I, Jr Houze R A. Kinematics and microphysics of the transition zone of the 10-11 June 1985 squall line[J]. J Atmos Sci, 1993, 50:3091-3110.
- [5] Jr Houze R A, Rutledge S A, Biggersta M I, et al. Interpretation of Doppler weather-radar displays in midlatitude mesoscale convective systems[J]. Bull Amer Meteor Soc, 1989, 70:608-619.
- [6] Johnson R H, Hamilton P J. The relationship of surface pressure features to the precipitation and airow structure of an intense midlatitude squall line[J]. Mon Wea Rev, 1988, 116:1444-1472.
- [7] 曲晓波,王建捷,杨晓霞,等. 2009 年 6 月淮河中下游三次飊线过程的对比分析[J]. 气象,2010,36(7):151-159.
- [8] 代刊,何立富,金荣花. 加密观测资料在北京 2008 年 9 月 7 日雷暴过程分析中的综合应用[J]. 气象,2010,36(7):160-167.
- [9] 郑永光,张小玲,周庆亮,等. 强对流天气短时临近预报业务技术进展与挑战[J]. 气象,2010,36(7):33-42.
- [10] 陶岚,戴建华,陈雷,等. 一次雷暴冷流出流中新生强脉冲风暴的分析[J]. 气象,2009,35(3):29-35.
- [11] 张杰. 中小尺度天气学[M]. 北京:气象出版社,2006:76-79.
- [12] 张德林,马雷鸣. “0730”上海强对流天气个例的中尺度观测分析及数值模拟[J]. 气象,2010,36(3):62-69.
- [13] 俞小鼎,姚秀萍,熊延南,等. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京:气象出版社,2006:122-124.