

陶岚,戴建华,李佰平,等. 2016. 上海地区移动型雷暴阵风锋特征统计分析. 气象, 42(10):1197-1212.

# 上海地区移动型雷暴阵风锋特征统计分析<sup>\*</sup>

陶 岚 戴建华 李佰平 陈 雷

上海中心气象台, 上海 200030

**提 要:** 文章利用常规天气资料、双多普勒雷达资料、GFS 3 km 分辨率分析场资料以及地面自动站资料等, 统计分析了上海地区 2009—2014 年共 18 次移动型雷暴产生的阵风锋的个例, 包括天气背景、温湿环境特征以及阵风锋在雷达图上的特征等。根据阵风锋生成的时段以及与其母体雷暴的相互作用和影响, 将移动型雷暴产生的阵风锋分为两类: (1) 一类出现在雷暴发展、成熟阶段, 阵风锋通常与雷暴保持一定的距离同向运动, 出现阵风锋的雷暴主体通常伴有高悬的后侧入流急流, 生命史长达 2 h 以上; (2) 另一类出现在雷暴的减弱消亡阶段, 出现后即逐渐远离雷暴, 出现阵风锋的雷暴主体通常伴有从雷暴系统后侧倾斜向下正好到达雷暴前侧阵风锋处的后侧入流急流。阵风锋出现后, 逐渐远离雷暴运动, 大部分阵风锋(12 个个例) 出现在雷暴移动方向的前侧, 与雷暴移动同向, 少数阵风锋(4 个个例) 出现在雷暴移动方向的异侧, 与雷暴移动不同向。统计分析结果表明: 第一类阵风锋一方面与雷暴同向移动, 不断将其前侧低层的暖湿空气抬升, 并沿着阵风锋输送到雷暴中去; 另一方面, 由于较强的垂直风切变和较强的对流有效位能对后侧入流急流高度的维持起到了关键作用, 高悬的后侧入流急流和垂直风切变共同产生的正涡度和冷池产生的负涡度平衡, 有利于维持雷暴的发展传播。因此, 阵风锋后侧的雷暴持续稳定的发展, 并在其后侧可观测到雷暴的新生。第二类阵风锋生成后即逐渐远离雷暴主体, 仅以孤立波的形式传播, 受经过的环境的影响, 其后侧的干冷气流的性质逐渐减弱。与雷暴同向运动的阵风锋切断了暖湿气流向雷暴的输送, 不利于雷暴的发展; 同时在弱-中等切变和弱-中等对流有效位能的环境中, 从雷暴后侧向前侧倾斜向下的后侧入流急流和冷池共同产生的负涡度强于垂直风切变产生的正涡度, 强冷池前沿的上升气流向后倾斜, 不利于新对流单体发展, 雷暴大都在阵风锋出现 2 h 内消亡。

**关键词:** 阵风锋, 后侧入流急流, 窄带回波

**中图分类号:** P446

**文献标志码:** A

**doi:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2016.10.004

## Characteristics' Statistical Analysis of Gust Front Generated by Moving Thunderstorms in Shanghai

TAO Lan DAI Jianhua LI Baiping CHEN Lei

Shanghai Central Meteorological Observatory, Shanghai 200030

**Abstract:** Using conventional weather observations, dual Doppler radar data, Global Forecast System (resolution is 3 km) analysis field data, automatic weather station data, characteristics including synoptic background, sounding and radar features of 18 gust fronts generated by moving thunderstorms from 2009—2014 in Shanghai are analyzed. According to the mutual interaction between gust front and its original thunderstorm, these gust fronts are divided into two types. The first type tends to appear during the developing period of the original storm, moving in the same direction with the thunderstorm while keeping a certain distance, usually accompanied by the elevated rear-inflow jet (RIJ) and its lifetime is longer than two hours. The other type usually occurs during the dissipating period of its original thunderstorm, moving far away from the thunderstorm in the same direction (12 cases) or different direction (4 cases). Statistical analysis shows that, as for the first type of gust front, it continuously lifts the warm and moist air

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金项目(41175050)和公益性行业(气象)科研专项(GYHY201006002)共同资助

2015 年 10 月 21 日收稿; 2016 年 8 月 4 日收修定稿

第一作者: 陶岚, 主要从事中尺度天气研究. Email: fairylan1123@126.com

in front of the storm while moving in the same direction with the storm. In addition, since the relative strong vertical wind shear and convective available potential energy (CAPE) play an important role in the maintenance of the height of the RIJ, the balance between the positive vorticity generated by RIJ and vertical wind shear and the negative vorticity generated by the cold pool is favorable for the development of the thunderstorm, so the thunderstorms develop and sometimes new storms initiate at the rear side of the gust front. As for the second type, because the gust front moves away from the original storm, and propagates as isolated waves, the cold and dry air at its rear side gradually weakens while affected by the environment. Gust front moving far away from the storm in the same direction cuts off the transport of the warm and wet air into the storm. Simultaneously, in the weak-to-middle vertical wind shear and weak-to-middle CAPE environment, the negative vorticity generated by the downward RIJ and cold pool is stronger than the positive vorticity generated by vertical wind shear, and the updraft leans back over the cold pool. These are unfavorable for the development of the storm. The lifetime of the storm is usually less than 2 hours.

**Key words:** gust front, rear-inflow jet (RIJ), narrow band echo

## 引 言

Byers 等(1949)第一次对雷暴及其相关的现象进行了全面的分析,他们称雷暴的出流为“first gust”,并且认为其影响范围比雷暴本身要大得多。在雷达最初用于探测天气时就曾观测到在有些雷暴的前进方向上出现的宽度仅有 2~3 km,长度达 10 km 左右的带状回波,当时并不清楚这种回波的生成机理,称它为窄带回波(Battan, 1973)。Wakimoto(1982)定义阵风锋是雷暴水平传播的冷性下沉出流和周围的环境气流之间形成的一个边界,并且将阵风锋的生命史分为四个阶段:形成阶段、成熟早期、成熟后期和消散阶段;由于阵风锋是雷暴出流强风的前缘,它常与气压跳跃、风向转变、风速突增、温度降低等现象相联系,特别是地面强风,常造成重大人员伤亡和财产损失。

国外的气象研究者对阵风锋的相关研究主要关注于三个方面:阵风锋的动力结构和发生发展(Wakimoto, 1982; Klinge et al, 1987; Martner, 1997; May, 1999)、阵风锋相互之间以及阵风锋与其他边界层辐合线之间的相互作用对雷暴的触发(Knupp et al, 1982; Wilson et al, 1986; Mahoney, 1988; Carbone et al, 1997),以及阵风锋和低层环境风切变等对雷暴的发展维持的作用(Thorpe et al, 1982; Rotunno et al, 1988; Weisman, 1992; Wilson et al, 2006)。

葛润生(1986)曾将北京地区和俄克拉何马(Oklahoma)地区雷达探测到的窄带回波分为两类,

一类窄带回波呈运动状态,伴随着风暴回波迅速移动;另一类窄带回波移动非常缓慢,所伴随的风暴大部分已经处于发展的后期,窄带回波出现后,风暴很快减弱、消散。近年来国内的气象工作者对阵风锋开展的相关研究多以个例分析为主(刘勇等, 2007; 夏文梅等, 2009; 郑丽娜等, 2016),并对阵风锋的形成机制和精细结构进行了相关分析(黄璇璇等, 2008; 袁子鹏等, 2011; 张涛等, 2013; Quan et al, 2014; 席宝珠等, 2015; 徐芬等, 2016)。如黄璇璇等(2008)对一次阵风锋过程的形成机制进行了探讨,认为高空冷空气堆的下沉扩散是窄带回波(阵风锋)形成的一个重要因子,其后并不一定有主体回波相伴随,而倾斜的下沉气流前侧不利于窄带回波的形成。袁子鹏等(2011)对一次中尺度飚线的阵风锋发展特征进行了分析,并对此次过程中两次阵风锋形成的不同原因进行了分析。张涛等(2013)对三次雷暴导致的阵风锋过程进行了分析,并给出了阵风锋的形成机制。Quan 等(2014)利用天津地区的边界层铁塔资料对一次飚线产生的阵风锋的精细结构进行了分析,并给出了包含精细结构特征的阵风锋模型。席宝珠等(2015)总结了近些年我国学者对阵风锋所开展的相关研究,阐明了阵风锋的空间结构、类型及其特征,探讨了阵风锋窄带回波的形成机制,提出了阵风锋的主观识别方法。

阵风锋形成机制复杂,既能在其边界上产生致灾强风,也能新生雷暴单体,与中尺度对流系统之间存在着相互作用和影响的复杂关系,因此,对阵风锋开展系统的研究具有重要的意义。本文统计了上海

地区 2009—2014 年共 18 次移动型雷暴产生的阵风锋的个例,分别对产生阵风锋的移动型雷暴的天气背景和温湿环境特征进行了分析,并统计了阵风锋在雷达上的一些特征。根据阵风锋生成的时段以及中尺度对流系统之间的相互作用和影响,将移动型雷暴产生的阵风锋分为两类,并对产生两类阵风锋的雷暴特征以及阵风锋与雷暴的相互作用进行了分析,以提升对灾害性强对流天气的预警能力。

## 1 资料的选取和分析方法

通过对 2009—2014 年上海南汇多普勒雷达 (WSR-88D) 的低层反射率因子图进行甄别,共观测到 30 次(资料缺失个例不计)雷暴移动方向前侧或四周出现明显窄带回波的过程,并通过分析自动站温、压、湿、风在窄带回波经过前后的变化,确定其为阵风锋。其中静止型雷暴产生的阵风锋 12 次(不在

本文中详述),移动型风暴产生的阵风锋共有 18 次。利用常规天气资料、常规探空资料以及 GFS 3 km 分辨率分析场资料对产生阵风锋的雷暴的天气背景和温湿环境特征进行了分析;利用南汇和青浦两部多普勒雷达资料分析了阵风锋的雷达特征以及阵风锋和其母体雷暴系统之间的相互作用和影响;自动站资料等用于阵风锋的热动力特征分析。

## 2 产生阵风锋的移动型雷暴的天气背景和温湿环境特征

图 1 是产生 18 次移动型中尺度对流系统(雷暴单体、多单体和飑线)分类型[副热带高压(以下简称副高)边缘型和高空槽型]的平均高度场和风场,采用 GFS 3 km 分辨率分析场资料进行合成平均。移动型雷暴通常发生在副高边缘或者高空槽前的大尺度环流背景下(表 1),仅有 2009 年 6 月 5 日的个例

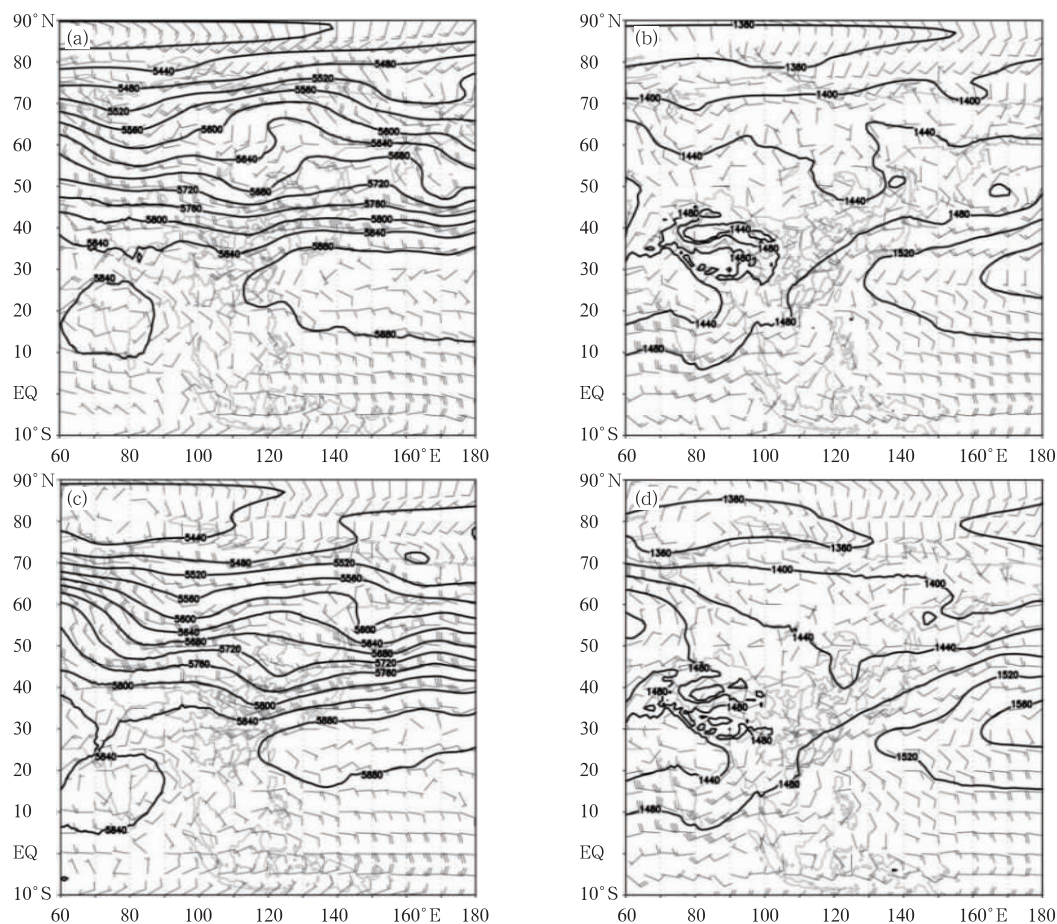


图 1 500 hPa (a,c)、850 hPa (b,d) 副高边缘型(a,b)和高空槽型(c,d)高度场及风场合成平均  
Fig. 1 The 500 hPa (a,c) and 850 hPa (b,d) edge type (a,b) and upper-level trough type (c,d) of subtropical high, and the 500 hPa and 850 hPa geopotential height and wind field



### 3 阵风锋的雷达回波特征统计

表 1 为 18 次移动型雷暴生成的阵风锋的统计数据。阵风锋多数出现在母体雷暴(右移雷暴)移动方向的前侧(右侧),少数出现在母体雷暴移动方向的不同侧。在反射率因子场上,阵风锋通常表现为弱的窄带回波(Klinglet et al, 1987),目前国际上关于阵风锋形成窄带回波的主要解释是由昆虫对雷达波的粒子散射导致(Wilson et al, 1994)。统计显示,阵风锋的反射率因子强度一般在 5~15 dBz(图 3a, 3d, 3g),最大为 30 dBz。阵风锋的高度是根据雷达反射率因子图上(所有仰角)所观测到的最远距离阵风锋(窄带回波)计算得出的(表 1)。18 次过程中,阵风锋的最大高度为 2.57 km(2012 年 8 月 21 日);最低高度为 0.75 km(2010 年 7 月 3 日),平均高度为 1.26 km。径向速度图上,由于速度信息采集于更弱的信号,有时候会先于反射率因子图观测到弱的阵风锋(图 3e)。径向速度图上,阵风锋主要

有两种表现形式:一种是正负速度交界带(辐合带)(4 个个例,图 3b),通常锋后的负速度值明显大于锋前正速度(环境风)的值;一种为窄带回波形式(8 个个例,图 3e 和 3h),阵风锋在径向速度上表现为窄带回波主要和雷暴的移动和环境风场有关。如 2012 年 7 月 12 日的个例,阵风锋前侧环境风场为偏西风,与阵风锋后侧的风向基本一致,因此表现为弱的窄带回波。少数个例由于距离折叠的影响(6 个个例),无法观测到阵风锋在径向速度图上的特征。产生阵风锋的移动性单体或多单体雷暴大都会出现辐散特征或者风速大值区,移动型的飑线系统则通常为风速大值区。谱宽图上,与周围的降水回波相比,阵风锋表现为谱宽值相对增强的窄带回波(图 3c, 3f, 3i),最大的谱宽值可达到 10~12  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,主要原因是阵风锋上的扰动相对较大。

移动的中尺度对流系统,由于雷暴的移动、相互作用以及雷暴和雷达之间的距离(即低层辐散和大风核距离地面高度不同)等原因,对最大阵风的强度和出现时刻的预报均较为困难,通常情况下,阵风锋

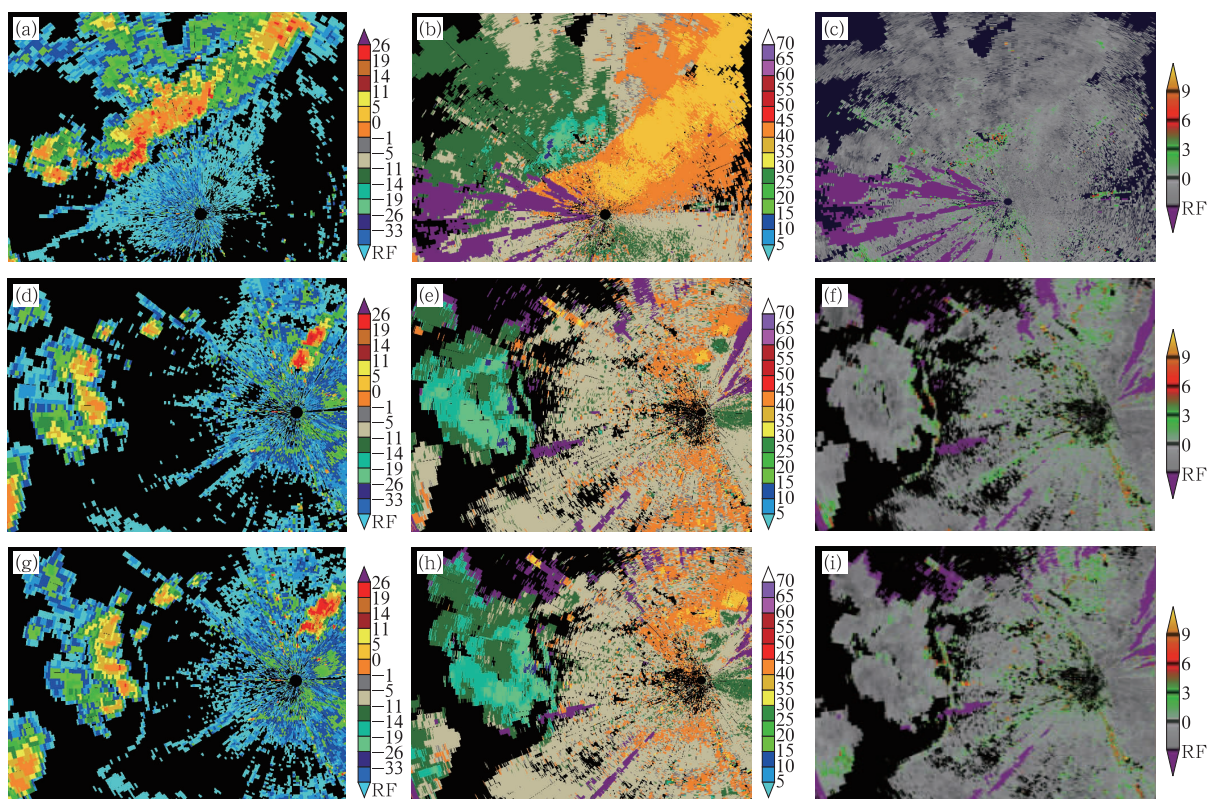


图 3 2009 年 6 月 20 日 15:50(a,b,c)、2012 年 7 月 12 日 14:58(d,e,f)和 15:09(g,h,i)南汇雷达 0.5°仰角反射率因子图(a,d,g;单位: dBz)、径向速度图(b,e,h;单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )和谱宽(c,f,i;单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

Fig. 3 Base reflectivity (a,d,g, unit: dBz) and radial velocity (b,e,h, unit:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) and spectrum width (c,f,i, unit:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) of Nanhui Radar at 15:50 BT 20 June 2009 (a,b,c), and 14:58 BT (d,e,f) and 15:09 BT (g,h,i) 12 July 2012

锋后低层辐散的强度(即沿径向的最大正负速度差)和风速大值区的强度与地面最大阵风风速成正相关。阵风锋是下沉辐散气流的前沿,其产生的最大阵风通常是雷暴消亡下沉气流爆发的时刻,不一定是阵风锋被观测到的初始时刻。

4 阵风锋的移动与中尺度对流系统发展演变

本文根据葛润生(1986)和 Weisman(1992)的研究,将移动型雷暴产生的阵风锋分为两类,一类出现在雷暴发展、成熟阶段,出现后即与雷暴保持一定距离的同向运动,出现阵风锋的雷暴主体通常伴有高悬的后侧入流急流(rear inflow jet, RIJ),阵风锋出现后雷暴持续发展,阵风锋的生命史长达 2 h 以上;另一类阵风锋出现在雷暴的减弱消亡阶段,出现后即逐渐远离雷暴,出现阵风锋的雷暴主体通常伴有从后侧倾斜向下正好到达雷暴前侧阵风锋处的 RIJ,雷暴逐渐减弱消亡,阵风锋的生命史通常在 2 h 以内。

4.1 雷暴发展、成熟阶段出现的阵风锋

雷暴发展、成熟阶段出现的阵风锋个例仅有两

个,两个个例中出现阵风锋的雷暴主体均伴有高悬的 RIJ。表 2 是相关天气要素及物理量参数统计,其中在 2012 年 7 月 13—14 日的个例中,虽然 0~2 km 的垂直风切变只有  $7.55\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,但是根据计算 0~3 km 的总切变为  $16.88\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。由于对流有效位能值(convective available potential energy, CAPE)位于较低水平,冷池强度中等,RIJ 持续较强的原因之一是由于弓形回波整体发展的高度不高,因此在同样的雷暴顶部辐散和底部下沉气流辐散情况下,雷暴后侧中层的补偿气流就强,从而加剧了 RIJ(陶岚等,2014)。在 2014 年 8 月 24 日的个例中,强垂直风切变和强的 CAPE 对 RIJ 高度的维持起到了关键作用(Weisman,1992)。

4.1.1 2014 年 8 月 24 日典型飏线阵风锋过程分析

2014 年 8 月 24 日 08 时,500 hPa 中纬度  $115^{\circ}\text{E}$  附近有西风槽东移,上海本地位于副高边缘,高空槽前中低层 700 和 850 hPa 有低涡切变线存在,切变线南侧有  $16\sim 20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  西南低空急流向东北伸展至江苏中部沿海(图略)。地面图上上海处在地面低压槽内暖区控制下,白天为多云天气,上海全市最高气温在  $32\sim 36^{\circ}\text{C}$ 。

表 2 阵风锋出现在雷暴成熟阶段的天气要素及相关物理量参数统计  
Table 2 Statistics of synoptic elements and convective parameters when gust front generated in the mature stage and thunderstorms

| 日期                 | $K/^{\circ}\text{C}$ | $\text{CAPE}$<br>$/\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ | $\text{DCAPE}$<br>$/\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ | $(T-T_d)_{500\text{ hPa}}$<br>$/^{\circ}\text{C}$ | $(T-T_d)_{700\text{ hPa}}$<br>$/^{\circ}\text{C}$ | $T_{500\text{ hPa}} - T_{850\text{ hPa}}$<br>$/^{\circ}\text{C}$ | $T_{500\text{ hPa}} - T_{925\text{ hPa}}$<br>$/^{\circ}\text{C}$ | $WS_{0\sim 2\text{ km}}$<br>$/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ | $WS_{0\sim 6\text{ km}}$<br>$/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ |
|--------------------|----------------------|-------------------------------------------------|--------------------------------------------------|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| 2012 年 7 月 13—14 日 | 37                   | 424                                             | 226.91                                           | 2                                                 | 4                                                 | 24                                                               | 27                                                               | 7.55                                                      | 5.99                                                      |
| 2014 年 8 月 24 日    | 34                   | 2475                                            | 245.82                                           | 19                                                | 6                                                 | 24                                                               | 29                                                               | 9.76                                                      | 13.53                                                     |

受高空槽东移影响,16 时南汇雷达观测到飏线在江苏海安到金坛一线生成后向东移动。18:33,在南汇雷达  $0.5^{\circ}$  仰角反射率因子图上和径向速度图上(图略)均观测到飏线中部雷暴前侧阵风锋的窄带回波,该窄带回波呈东北—西南向,反射率因子的强度为  $5\sim 10\text{ dBz}$ ,径向速度值为  $-5\sim -1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,高度约为 1.20 km,长度约 19~20 km。19:08,飏线南段雷暴的移动前方观测到阵风锋,反射率因子强度为  $5\sim 10\text{ dBz}$ ,径向速度值为  $-5\sim -1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,高度约为 1.3 km,初始时刻长度约为 15 km。飏线系统中段和南段的阵风锋被观测到后,始终紧贴其生成的主体雷暴共同向东北偏东方向移动。19:26,中段和南段的阵风锋连成一线,由于飏线主体在移动过程中,不断有下沉气流在低层扩散,阵风锋的南段不断伸展,整个飏线前侧的阵风锋长度伸展到 96

km 左右,19:31,在伸展的阵风锋后侧观测到有雷暴的新生(图 4a,白色椭圆处)。对产生阵风锋的飏线中南部的雷暴(后侧层状云飏线)做反射率因子和径向速度剖面(图 4c 和 4d),雷暴的回波顶高达到 15~16 km,反射率因子核心的高度在 8 km 以下,从观测到 RIJ 开始(图 4d 白色箭头处),RIJ 到达对流系统前沿时一直维持在 4~8 km 左右的高度,RIJ 的最大速度为  $19\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。RIJ 通过将干、冷的中层空气引导到地面,造成并加强了对流风暴尺度的下沉运动(Smull et al, 1987)。共 5 个自动站出现 7 级以上大风,其中以松江永丰街道  $23.3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (风向  $296^{\circ}$ )为最大。20—21 时飏线中南段造成了上海西部和市区的强降水天气,共有 8 个自动站降水量在  $30\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$  以上,最大短时降水为华漕农管中心的  $40.8\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 。

19:31, 上海西北部崇明、嘉定开始受到飑线系统的北段影响(前部层状云型飑线, 图 4a), 由于层状云降水的影响, 低层没有观测到阵风锋, 飑线系统向东北偏东方向移动, 造成了崇明明珠湖  $27.4 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  的短时强降水, 层状云后侧的飑线主体在径向速度图上呈现出风速大值区特征, 造成了石洞口最大  $14.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  (风向  $288^\circ$ ) 的阵风。

到 20:30, 阵风锋始终紧贴着雷暴向东北偏东方向移动(图 4e), 雷暴回波顶高维持在  $15 \sim 16 \text{ km}$ , 反射率因子核心强度维持在  $50 \sim 55 \text{ dBz}$  (图 4g), 说

明雷暴在持续稳定的发展; 高悬的 RIJ 的特征(图 4h)一直维持。20:36, 阵风锋开始远离雷暴, 反射率因子强度逐渐减弱, 且距离南汇雷达逐渐减小, 受雷达站附近杂波的影响, 阵风锋的反射率因子特征逐渐不清晰, 但是径向速度图上仍然可以观测到正负速度交界的特征, 其后侧的入流趋于减弱, 窄带回波的长度也越来越短。

选取永丰街道(阵风锋过境风速最大, 没有气压、露点资料)和金山(阵风锋南段, 没有降水影响)两自动站分析阵风锋过境前后的各气象要素的变化

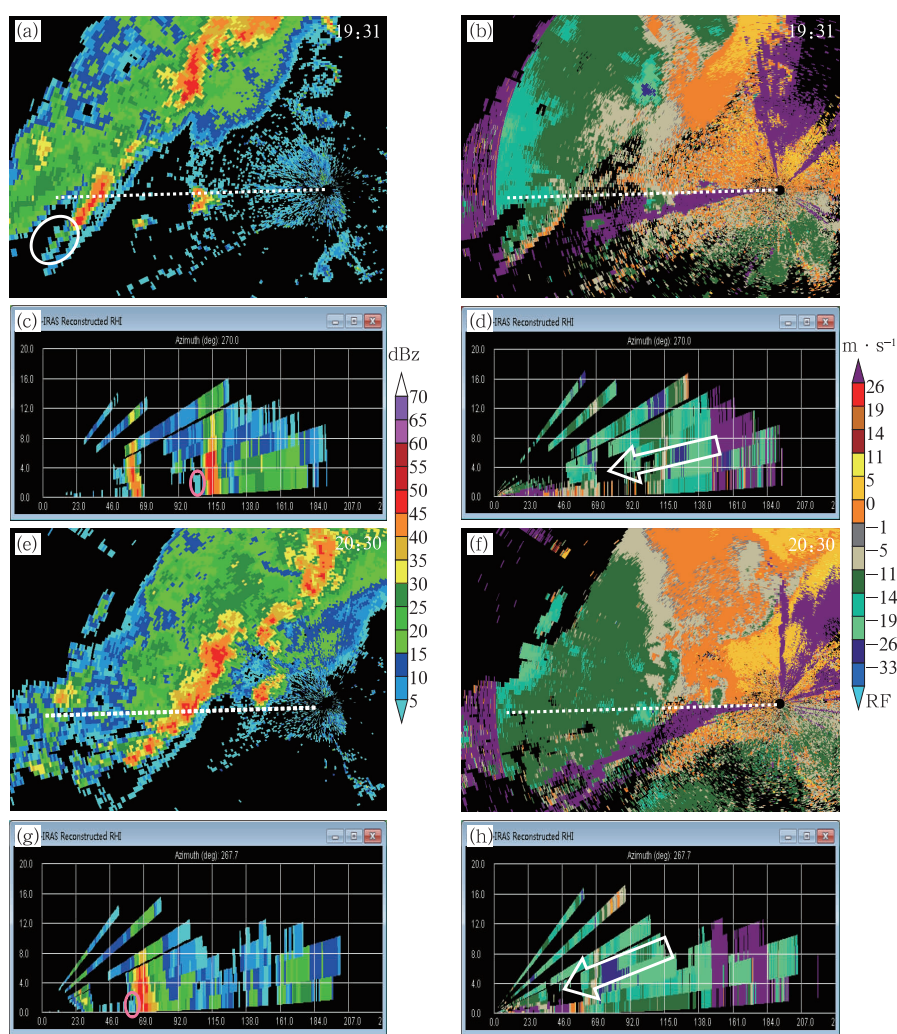


图 4 2014 年 8 月 24 日 19:31(a~d)和 20:30(e~h)南汇雷达  $0.5^\circ$  仰角反射率因子图(a,e;单位: dBZ)、径向速度图(b,f;单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )及沿白色虚线的相应垂直剖面(c,d,g,h)  
(白色虚线为剖面位置, 白色箭头表示 RIJ, 粉色椭圆标记阵风锋, 白色椭圆标记新生雷暴)  
Fig. 4 Base reflectivity (a,e, unit: dBZ), radial velocity (b,f, unit:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) of Nanhui Radar and corresponding cross section (c,d,g,h) along the white dashed lines at 19:31 BT (a~d) and 20:30 BT (e~h) 24 August 2014  
(White dashed lines represent the angle of cross section, white arrows represent RIJ, pink ellipse is for gust front and white ring refers to thunderstorms)

情况(图 5)。永丰街道在阵风锋经过前,由于局地雷暴出现过降水,气温有所下降;阵风锋经过时(20:36,图 5 中虚线表示时刻)出现最大阵风风速  $23.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  (风向  $296^\circ$ ),气温开始下降。20:38 开始受飚线影响出现降水(由于飚线主体的移动迅速,与其前侧的阵风锋距离较近,对自动站的风、雨影响时间仅相差 2 min)。2 min 平均最大风速出现在

20:42,为  $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。20:36 开始,阵风锋逐渐远离雷暴,雷暴进入减弱阶段。金山站受南段阵风锋影响,其后侧的飚线系统逐渐减弱且向东北偏东方向移动,因此金山站没有出现降水。21:14—21:16,受飚线后侧冷性下沉气流影响,2 min 温度和露点分别下降  $0.5^\circ\text{C}$  和  $2.5^\circ\text{C}$ ,气压涌升  $0.4 \text{ hPa}$ 。21:35,金山站的最大阵风为  $9.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  (风向  $319^\circ$ )。

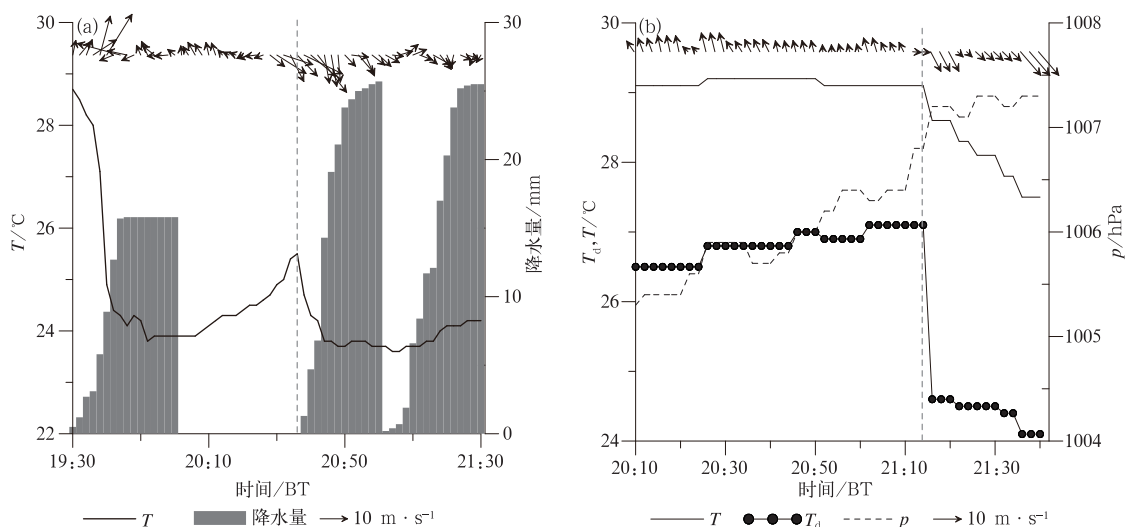


图 5 2014 年 8 月 24 日 19:30—21:30 永丰街道(a)和金山(b)自动站温度、降水量、露点、气压和 2 min 平均风向风速图  
(灰色虚线为阵风锋经过自动站时刻)

Fig. 5 Temperature (black line), rainfall (gray histogram), dew point (dotted line), pressure (dashed line), wind speed (2 min average, black line) and wind direction (2 min average, black arrow) of AWS at Yongfengjiedao (a) and Jinshan (b), during 19:30—21:30 BT 24 August 2014  
(Gray dashed lines mean the time when gust front is passing)

#### 4.1.2 阵风锋对雷暴发展的作用

阵风锋出现后,紧贴着雷暴同向运动,并不断将其前侧低层的暖湿空气抬升,沿着阵风锋输送到雷暴中去,因此,其后侧的雷暴持续稳定的发展(葛润生,1986)。此外,在阵风锋与雷暴共同移动过程中,由于冷性下沉气流在低层的扩散,即阵风锋处于发展阶段,阵风锋的长度不断向南伸展,并在南伸的阵风锋后侧观测到雷暴的新生,这也是由于阵风锋的后侧的冷性下沉气流将前侧的暖湿空气抬升造成的,阵风锋起到了类似锋面的作用。

Weisman(1992)模拟研究了不同结构类型的 RIJ 对长生命史中尺度对流系统演变的影响,发现 RIJ 的强度和所处的高度受到环境的 CAPE 和垂直风切变共同影响,在高 CAPE 和强垂直风切变的环

境中,RIJ 到达对流系统前沿时仍维持在较高的高度,并导致阵风锋上有强烈和垂直发展的对流单体发展并维持。此次过程发生在高 CAPE ( $2475 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 和中等强度强垂直风切变 ( $9.76 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 的环境中,从雷达观测到飚线中南段(后侧层状云飚线)的 RIJ 开始,RIJ 到达对流系统前沿时一直维持在  $4 \sim 8 \text{ km}$  左右的高度(图 4h,白色箭头处),阵风锋与飚线主体维持一定的距离共同运动,持续时间长达 2 h 以上。

根据 Weisman(1992)的研究结果,高悬的 RIJ 只在冷池的环流大于垂直风切变的环流的情况下产生,其生成的正涡度与冷池产生的负涡度方向相反,因此它的发展平衡了冷池产生的负涡度和高悬的 RIJ 和垂直风切变共同产生的正涡度(Rotunno et al,1988),

使得强的上升气流沿着冷池边缘发展,有利于维持雷暴的发展传播。

4.2 雷暴减弱阶段出现的阵风锋

雷暴减弱阶段出现的阵风锋个例较多,阵风锋出现后即逐渐远离雷暴运动,大部分阵风锋(12 个个例)出现在雷暴移动方向的前侧,与雷暴同向移动;少数阵风锋(4 个个例)出现在雷暴移动方向的不同侧,与雷暴移动异向。阵风锋移动过程中,其后侧也会伴有雷暴的生消,新生雷暴的生命史较短,大都在阵风锋出现后 2 h 内消亡。

表 3 是雷暴减弱阶段出现阵风锋个例的天气要素及相关物理量参数统计,其中前 12 个个例为阵风

锋出现在雷暴移动方向的前侧,后 4 个个例为出现在雷暴运动的不同侧,均按照最大阵风风速的大小进行排列。风速最大的两个个例(2014 年 7 月 27 日和 2010 年 7 月 3 日),中层干空气的夹卷是重要的特征;风速最小的两个个例(2012 年 8 月 21 日和 2013 年 9 月 10 日),整层的湿度都比较大,低层垂直风切变也属于较弱水平。在所有的 16 次个例中,13 次的 CAPE 和垂直风切变都属于弱-中等的水平,有 2 次个例(2010 年 8 月 26 日和 2012 年 8 月 15 日)的 CAPE 超过了  $2000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,但是相应的低层垂直风切变都属于较弱水平,仅有 1 次个例(2012 年 7 月 2—3 日)CAPE 和低层垂直风切变都属于较高的水平。

表 3 阵风锋出现在雷暴减弱阶段的天气要素及相关物理量参数统计

| Table 3 Statistics of synoptic elements and convective parameters when gust front generated in the dissipated stage of thunderstorms |                      |                                           |                                            |                                                     |                                                     |                                                                     |                                                                     |                                                               |                                                               |                                                |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| 日期                                                                                                                                   | $K/^{\circ}\text{C}$ | CAPE<br>/ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ | DCAPE<br>/ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ | $(T-T_d)_{500 \text{ hPa}}$<br>/ $^{\circ}\text{C}$ | $(T-T_d)_{700 \text{ hPa}}$<br>/ $^{\circ}\text{C}$ | $T_{500 \text{ hPa}} - T_{850 \text{ hPa}}$<br>/ $^{\circ}\text{C}$ | $T_{500 \text{ hPa}} - T_{925 \text{ hPa}}$<br>/ $^{\circ}\text{C}$ | $W_{SR0\sim2 \text{ km}}$<br>/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ | $W_{SR0\sim6 \text{ km}}$<br>/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ | $V_{\max}$<br>/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ |
| 2014 年 7 月 27 日                                                                                                                      | 41                   | 389                                       | 205.97                                     | 9                                                   | 1                                                   | 25                                                                  | 28                                                                  | 1.93                                                          | 13.93                                                         | 27.9                                           |
| 2010 年 7 月 3 日                                                                                                                       | 45                   | 1597                                      | 258.6                                      | 3                                                   | 1                                                   | 25                                                                  | 28                                                                  | 12.22                                                         | 5.09                                                          | 25.8                                           |
| 2009 年 6 月 5 日                                                                                                                       | 33                   | 1                                         | 732.9                                      | 19                                                  | 6                                                   | 30                                                                  | 34                                                                  | 8.72                                                          | 7.94                                                          | 23.3                                           |
| 2012 年 7 月 14 日                                                                                                                      | 40                   | 131                                       | 265.46                                     | 2                                                   | 3                                                   | 24                                                                  | 28                                                                  | 10.08                                                         | 18.36                                                         | 22.3                                           |
| 2012 年 8 月 15 日                                                                                                                      | 34                   | 2419                                      | 484.47                                     | 20                                                  | 10                                                  | 25                                                                  | 30                                                                  | 5.6                                                           | 5.57                                                          | 20.5                                           |
| 2010 年 9 月 14 日                                                                                                                      | 40                   | 986                                       | 166.01                                     | 10                                                  | 2                                                   | 24                                                                  | 26                                                                  | 7.27                                                          | 12.19                                                         | 18.9                                           |
| 2012 年 7 月 12 日                                                                                                                      | 44                   | 883                                       | 359.55                                     | 3                                                   | 1                                                   | 25                                                                  | 32                                                                  | 5.09                                                          | 9.57                                                          | 18.8                                           |
| 2009 年 6 月 20 日                                                                                                                      | 38                   | 784                                       | 394.8                                      | 10                                                  | 5                                                   | 24                                                                  | 30                                                                  | 7.37                                                          | 9.93                                                          | 17.8                                           |
| 2010 年 7 月 20 日                                                                                                                      | 38                   | 922                                       | 0                                          | 21                                                  | 4                                                   | 26                                                                  | 30                                                                  | 4.1                                                           | 4.42                                                          | 17.6                                           |
| 2012 年 7 月 2—3 日                                                                                                                     | 38                   | 2445                                      | 292.78                                     | 16                                                  | 4                                                   | 24                                                                  | 32                                                                  | 11.91                                                         | 23.39                                                         | 16.9                                           |
| 2010 年 8 月 26 日                                                                                                                      | 27                   | 2343                                      | 479.95                                     | 15                                                  | 13                                                  | 27                                                                  | 29                                                                  | 7.56                                                          | 5.07                                                          | 15.4                                           |
| 2012 年 8 月 21 日                                                                                                                      | 19                   | 407                                       | 0                                          | 15                                                  | 17                                                  | 25                                                                  | 29                                                                  | 3.45                                                          | 2.09                                                          | 12.3                                           |
| 2012 年 7 月 6 日                                                                                                                       | 37                   | 1655                                      | 511.79                                     | 4                                                   | 6                                                   | 27                                                                  | 34                                                                  | 12.88                                                         | 14.52                                                         | 22.5                                           |
| 2010 年 8 月 16 日                                                                                                                      | 32                   | 84                                        | 475.44                                     | 2                                                   | 5                                                   | 28                                                                  | 31                                                                  | 7.2                                                           | 8.06                                                          | 21.2                                           |
| 2011 年 8 月 11 日                                                                                                                      | 40                   | 1635                                      | 253.68                                     | 1                                                   | 3                                                   | 26                                                                  | 30                                                                  | 0.82                                                          | 9.4                                                           | 18.0                                           |
| 2013 年 9 月 10 日                                                                                                                      | 30                   | 8                                         | 0                                          | 18                                                  | 7                                                   | 23                                                                  | 28                                                                  | 4.92                                                          | 13.97                                                         | 11.9                                           |

4.2.1 与雷暴同向运动的阵风锋

阵风锋出现在雷暴运动方向前侧的个例共有 12 个,阵风锋出现后即不断远离雷暴,雷暴逐渐减弱消亡,选取典型飑线个例(2012 年 7 月 20 日)进行详细分析。

2010 年 7 月 20 日 08 时,500 hPa 中高纬欧亚地区呈两槽两脊形势,副高中心位于日本南部附近,副高脊线位于  $25^{\circ}\text{N}$  左右,华东大部受副高控制,上海高度 589 hPa;中纬度地区  $115^{\circ}\text{E}$  附近有一狭长的低压槽从河北北部向南伸展到陕西南部;700 hPa 切变线从辽宁北部经京津地区伸向陕西南部,850 hPa 切变线位置与 700 hPa 切变线基本一致(图略)。地面图上,上海位于低压槽区内,白天升温明

显,最高气温在  $32\sim37^{\circ}\text{C}$ 。

下午开始,太湖西面有雷暴生成,为线性排列的风暴单体形成的飑线,基本呈现南北带状分布,其前侧有着较强的反射率因子梯度,其后侧为回波强度较为均匀的层状云降水。飑线以  $30\sim40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  的速度向东移动过程中,其前侧不断有雷暴新生发展。飑线影响上海前,即在其运动方向前侧观测到阵风锋,随着阵风锋的不断远离,飑线逐渐减弱,受其影响,上海的西部和南部地区有 2 个自动站出现了短时强降水(金山廊下  $34.9 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  和青浦商塌  $29.6 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ),3 个自动站出现了 8 级大风,12 个自动站出现了 7 级大风。

2010 年 7 月 20 日 19:21,在南汇雷达  $0.5^{\circ}$  仰角

径向速度图上雷暴运动的前方开始观测到阵风锋(图 6d),虽然有距离折叠的影响,但是仍可观测到窄带回波的特征,阵风锋后侧对应为入流速度(负速度)的大值区。阵风锋高度约在 1.21 km,南北尺度约在 50 km,反射率因子图上阵风锋窄带回波的特征没有径向速度图显著(图 6a)。对产生阵风锋的雷暴主体做剖面分析发现(图 6g),雷暴发展到 15 km 左右,反射率因子核心强度为 55 dBz,高度在 6 km 以下,RIJ 在雷暴的低层(图 6h,白色箭头处),中层有径向辐合特征(图 6h,黑色椭圆处);19:32(图略),阵风锋在反射率因子图上呈现清晰的窄带回波特征,反射率因子强度在 5 dBz。19:50 开始,0.5°仰角径向速度图上阵风锋在距离折叠中显现出正负速度交界的特征,阵风锋后侧为负速度的大值

区,而前侧的正速度(环境风场)则在  $-5 \sim -1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。20:01,0.5°仰角反射率因子显示飚线组织结构开始松散,阵风锋在雷暴移动方向的前侧 6~8 km,窄带回波的强度在 5~10 dBz(图 6b);垂直剖面图显示回波顶高开始下降,低层反射率因子强度减弱,在雷暴前侧可看到低层的阵风锋(图 6i 粉色椭圆标注),径向速度垂直剖面显示中层径向辐合明显减弱,低层的负速度(出流)的强度也明显减弱(图 6j)。20:42,阵风锋的最大反射率因子增强到 15 dBz,并且出现了较为明显的弓形结构;20:42,阵风锋的弓形结构更加显著;雷暴强度减弱地更为明显(图 6c 和 6k),回波顶高明显下降,阵风锋距离雷暴的距离逐渐增大,约为 20~22 km(图 6c 和 6k)。

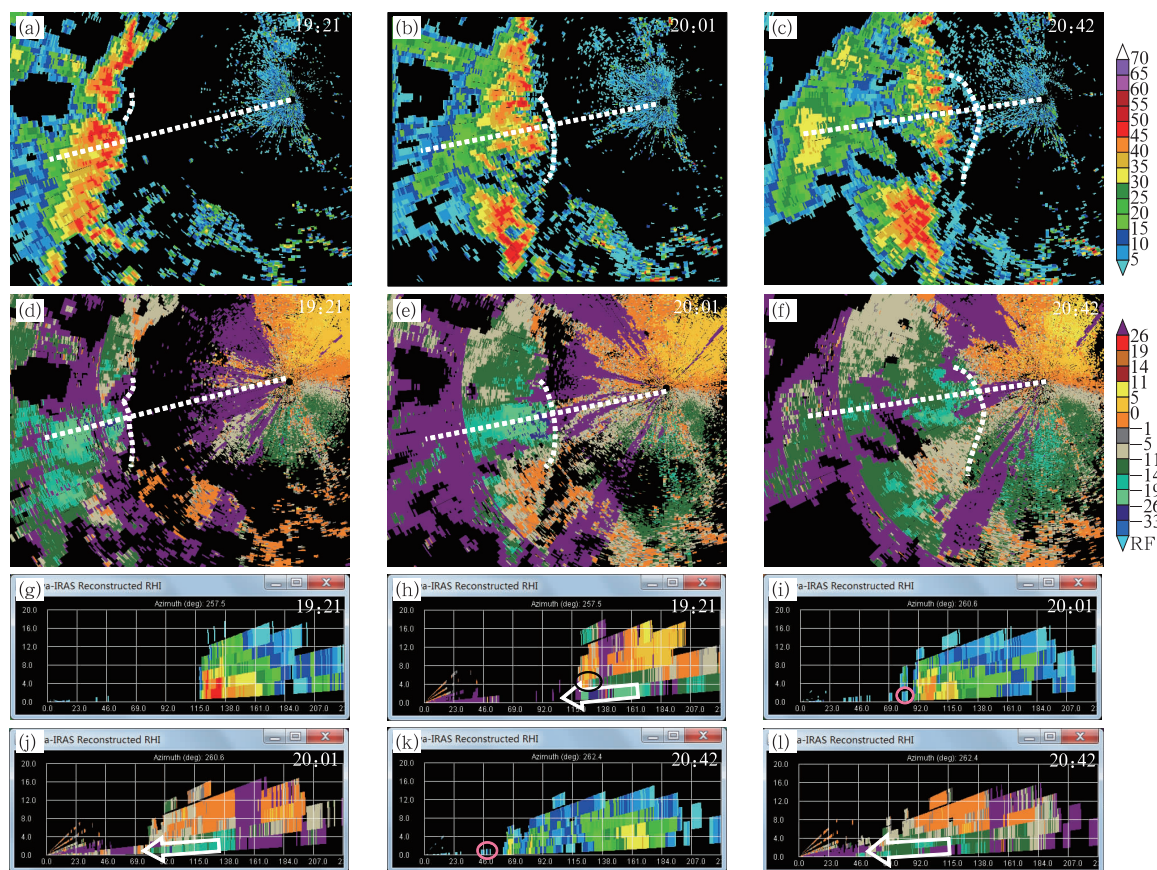


图 6 2010 年 7 月 20 日 19:21(a,d,g,h)、20:01(b,e,i,j)和 20:42(c,f,k,l)南汇雷达 0.5°仰角反射率因子图(a,b,c;单位: dBZ), 径向速度图(d,e,f;单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )及过白色虚线的相应剖面(g~l)

(白色虚线为垂直剖面位置及阵风锋,粉色椭圆标注阵风锋,黑色椭圆标注中层径向辐合,白色箭头标注后侧入流急流)

Fig. 6 Base reflectivity (a,b,c, unit: dBZ), radial velocity (d,e,f, unit:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) and corresponding of Nanhui Radar cross section (g~l) at 19:21 (a,d,g,h), 20:01 (b,e,i,j) and 20:42 (c,f,k,l) BT 20 July 2010

(White dashed lines represent gust front and the radial angle of cross section, pink ellipse represents gust front, black ellipse represents MARC and white arrows represent RIJ)

从阵风锋出现在雷暴移动的前方(19:21)开始,阵风锋的发展经历了显著三个阶段。首先是形成初期,阵风锋的强度为 5 dBz,形态为较为平直的弧形;其次是发展期,由于雷暴的冷性下沉气流的不断补充,反射率因子强度有所增加,最强达到 15 dBz,且由于下沉气流在各个方向的强度不同从而影响阵风锋形态的发展,阵风锋呈现中部向前凸起的弧形;最后是减弱消亡阶段,此时母体雷暴已减弱消亡,没有了下沉气流的供应,阵风锋反射率因子强度逐渐减弱,且宽度增加。阵风锋距离雷暴前沿的距离最远大约 36~38 km,生命史约为 2 h。

图 7 和图 8 是阵风锋先后经过青浦站(20:24)和金山站(20:36)的示意图和自动站要素的变化图。由于阵风锋和雷暴主体之间有一定的距离,因此在阵风锋经过一段时间之后,两站才出现降水。表 4 是青浦和金山自动站要素变化的情况。阵风锋分别造成了青浦  $14.4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (风向  $270^{\circ}$ ) 和金山  $11.9\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (风向  $272^{\circ}$ ) 的最大阵风,其中青浦的最大阵风不是阵风锋本体造成的,而是阵风锋经过后造成的。阵风锋经过后,青浦和金山均出现了温度下降、露点降低和气压涌升的特点,风向均从阵风锋经过前的西南气流转为偏西气流。青浦站的温度、露点和气压的要素变化幅度均比金山站都要小。主要原

因可能是雷暴的冷性下沉气流在地面辐散,可能会受位置、地形等因素的影响而分布不均;雷暴的冷性下沉影响的时间有差别。青浦站在阵风锋本体经过后 20 min 出现了降水,而金山站出现降水是在阵风锋主体经过后 30 min,金山站受到的冷性下沉气流的影响时间更长。

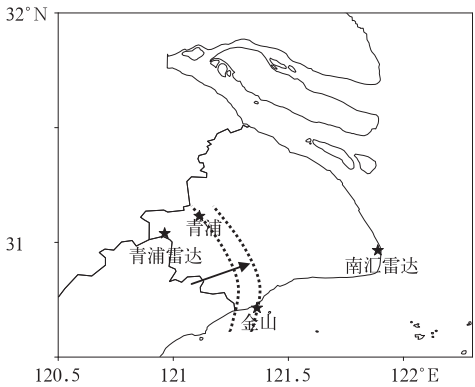


图 7 2010 年 7 月 20 日阵风锋经过青浦、金山站示意图  
(虚线表示阵风锋,箭头指向为阵风锋移动方向)  
Fig. 7 Illustration of gust front passing Songjiang and Jinshan on 20 July 2010  
(Dashed line represents gust front, and arrow refers to the moving direction)

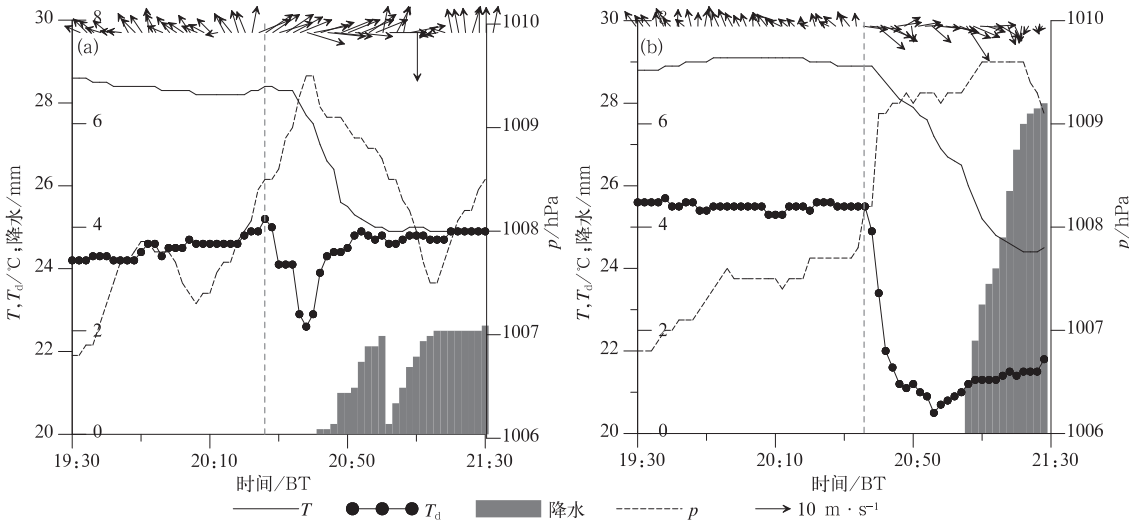


图 8 同图 5,但为 2010 年 7 月 20 日 19:30—21:30 青浦(a)和金山(b)  
Fig. 8 Same as Fig. 5, but at Qingpu (a) and Jinshan (b) during 19:30—21:30 BT 20 July 2010

表 4 青浦和金山自动站要素变化

Table 4 Synoptic elements of AWS at Jinshan and Songjiang

| 站名 | 降水前温度降幅/ $^{\circ}\text{C}$ | 过程温度降幅/ $^{\circ}\text{C}$ | 露点降幅/ $^{\circ}\text{C}$ | 气压升幅/hPa | 最大阵风/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ |
|----|-----------------------------|----------------------------|--------------------------|----------|------------------------------------|
| 青浦 | 1.3                         | 3.4                        | 2.3                      | 1.0      | 14.4                               |
| 金山 | 2.5                         | 4.6                        | 5.1                      | 1.9      | 11.3                               |

#### 4.2.2 与雷暴运动方向不同的阵风锋

阵风锋产生后出现在雷暴运动方向不同侧的个例共有 4 个,雷暴以自西向东移动为主,由于受阵风锋移动前方环境的影响,仅在雷暴的南侧观测到阵风锋,阵风锋不断向南扩散,逐渐远离雷暴。选取 2013 年 9 月 10 日的个例进行分析。

2013 年 9 月 10 日 08 时上海位于副高边缘,中纬度西风槽位于内蒙古中部到湖北中部一线,中低空切变线位于渤海湾到湖南一线,切变线南侧有较强的西南急流,上海附近西南气流较弱;地面上华东大部位于低压倒槽中,上海位于低压倒槽东侧,以偏南风为主。

12 时前后,上海北部嘉定和宝山的中北部沿着长江一线出现了西北—东南向的海风锋,海风锋北侧以偏东风为主,南侧为西南风,海风锋两侧温度和露点都相差在  $5\sim 6^{\circ}\text{C}$ ,对应南汇雷达低层反射率因子图上有一条  $5\sim 10\text{ dBz}$  的窄带回波(图略)。随着时间的推移,海风锋逐渐往西南方向移动(向陆地推进)。

14 时起,江苏昆山和太仓交界附近开始有雷暴生成,雷暴生成后往东北偏东方向移动逐渐进入上海的北部地区。15:18,青浦雷达(南汇雷达距离较远)的径向速度图首先观测到雷暴的低层辐散特征,最大辐散速度差大约为  $9\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (图略)。15:36 青

浦雷达反射率因子图上开始观测到雷暴的出流阵风锋,阵风锋为  $5\sim 10\text{ dBz}$  的弱窄带回波,并且出现在雷暴的南侧,距离雷暴大约  $5\sim 6\text{ km}$ 。径向速度图上雷暴呈现低层辐散特征,辐散速度差在  $5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  左右,阵风锋呈现为正负速度交界的特征,阵风锋南北两侧的径向风速均在  $1\sim 5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。对该时刻雷暴做垂直剖面分析发现(图略),强反射率因子核心已下降到地面,说明雷暴已处于减弱阶段;低层辐散的速度场较弱,没有出现 RIJ。之后雷暴往东北偏东方向移动,阵风锋往南远离雷暴,且逐渐呈现清晰的半圆环状(图略),生命史约近 2 h。

由于雷暴南移逐渐靠近青浦雷达,受雷达附近杂波的影响,采用南汇雷达进行观测。阵风锋的高度为  $0.91\text{ km}$ ,且距离南汇雷达较远,南汇雷达实际观测到阵风锋的时间晚于青浦雷达近 40 min (16:08),但阵风锋的反射率因子特征相对清晰。阵风锋出现时为一弧形窄带回波,强度为  $5\text{ dBz}$ (16:08 图 9d);随着雷暴下沉气流的扩散,阵风锋逐渐南移,强度有所增强,16:32(图 9e),反射率因子很快增强到  $15\text{ dBz}$ ,且西侧的宽度明显增大;16:55(图略),母体雷暴已东移减弱消失,阵风锋中部和西部的宽度明显增宽,反射率因子有所减弱,说明阵风锋的中西部由于没有雷暴下沉气流的供应,开始进入减弱阶段;但是其东部还与新生雷暴相连,下沉气流

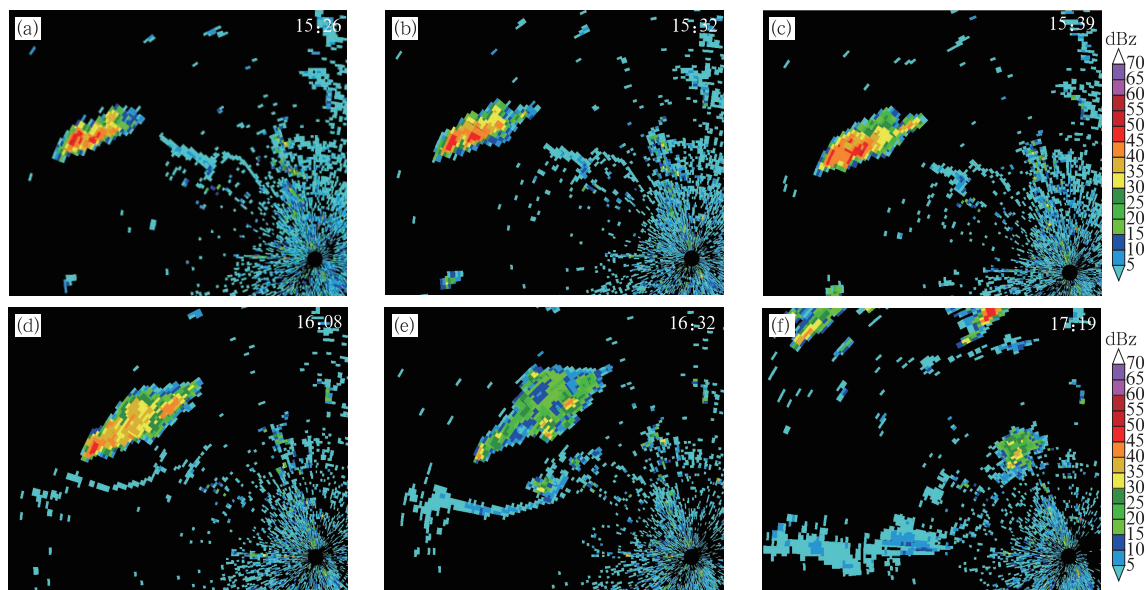


图 9 2013 年 9 月 10 日 15:26(a)、15:32(b)、15:39(c)、16:08(d)、16:32(e)和 17:19(f)南汇雷达  $0.5^{\circ}$  仰角反射率因子图

Fig. 9 Base reflectivity (unit: dBz) of Nanhui Radar at 15:26 (a), 15:32 (b), 15:39 (c), 16:32 (d), 16:32 (e) and 17:19 (f) BT 10 September 2013

的补充使得阵风锋的强度和形态没有明显变化。从青浦雷达观测到阵风锋开始,到阵风锋减弱消散(宽度变宽,形状不规则),阵风锋距离雷暴前沿的距离最远大约 45 km,生命史约为 2 h。

阵风锋南移过程中先后经过了嘉定、安亭和青浦等站,由于其移动方向的前侧为海风锋的北侧,为相对湿冷的气团,与阵风锋后侧的干冷气团两侧温度差异不大,因此在其移动方向的前侧(宝山站)没有观测到阵风锋,图 10 和图 11 分别为阵风锋影响上海的示意图和各自动站的气象要素变化图。15:18 开始,嘉定站出现了温度下降、露点下降和气压上升(图 11),风向由西南风转为西北风,说明嘉定站此时已受到了雷暴的干冷下沉气流在地面的扩散影响。15:26,雷暴本体开始影响上海的嘉定地区。随着雷暴向东北偏东方向移动,南汇雷达 0.5° 仰角上海北部的窄带回波(海风锋)自西向东逐渐变

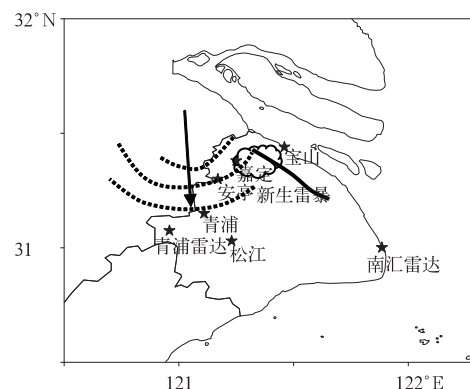


图 10 2013 年 9 月 10 日阵风锋和海风锋示意图  
(虚线表示阵风锋,实线表示海风锋,  
箭头指向为阵风锋移动方向)

Fig. 10 Illustration of gust front and sea breeze front on 10 September 2013

(Dashed line refers to gust front, black line is for sea breeze front and arrow for the moving direction)

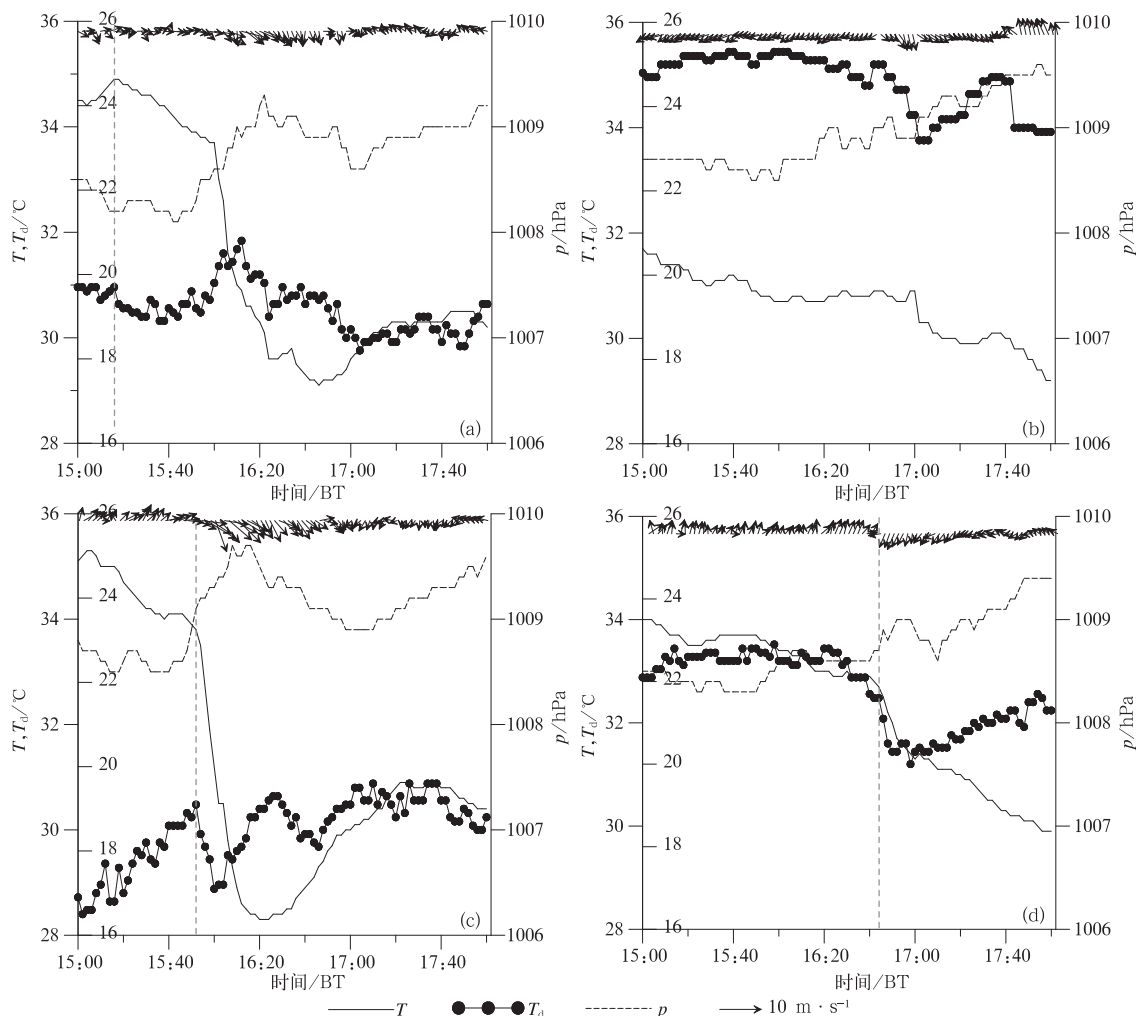


图 11 同图 5b, 但为 2013 年 9 月 10 日 15—18 时嘉定(a)、宝山(b)、安亭(c)和青浦(d)  
Fig. 11 Same as Fig. 5b, but at Jiading (a), Baoshan (b), Anping (c) and Qingpu (d),  
15:00—18:00 BT 10 September 2013

短,到 15:50 基本消失不见。即随着雷暴往东北偏东方向移动,雷暴低层扩散的干冷下沉气流影响了海风锋两侧的气团,海风锋两侧气团性质逐渐均一,因此海风锋逐渐消失。嘉定站和宝山站原来分别位于海风锋南侧和北侧,分别处于相对干暖和相对湿冷的气团中,由于受雷暴的干冷出流影响,气团性质逐渐改变,均转为干冷气团,嘉定站在雷暴的下沉气流影响前后的温度变化比露点变化更为显著,而宝山的露点变化明显大于温度的变化。

15:48,安亭站受雷暴冷性下沉气流前沿影响(即阵风锋),风向转为西北风,同时观测到温度、露点明显下降以及气压的明显升高,2 min 平均阵风最大为  $9.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。当阵风锋南移到达青浦后(16:44),青浦的风向发生了明显的改变,由西南风转为偏北风,2 min 平均阵风最大仅为  $3.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,温度、露点和气压的变化值明显小于阵风锋出现初期。阵风锋减弱消亡时,松江自动站的风向、温度、露点和气压几乎没有明显变化。由此可见,阵风锋自北向南南移过程中,其后侧的干冷出流的性质逐渐减弱。

16:14,在阵风锋南移的过程中,位于阵风锋最北端与海风锋交汇处有雷暴新生发展(图略),新生雷暴的生命史约为 100 min,造成了上海市区的局地的短时降水天气(最大雨强  $13.5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ,最大阵风  $11.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )。

#### 4.2.3 远离雷暴的阵风锋对雷暴发展的作用

出现后即远离雷暴的阵风锋主要分为两类,一类出现在雷暴移动方向前侧(12 个个例)且与雷暴同向移动;另一类出现在雷暴移动方向的不同侧(4 个个例),与雷暴移动异向。由于阵风锋是雷暴的冷性下沉气流在地面扩散开来与雷暴周围环境的暖湿空气之间的一个交界面,因此阵风锋的出现与环境的温度和湿度密切相关。如 2013 年 9 月 10 日,由于雷暴移动方向的前侧为海风锋的北侧,为相对湿冷的气团,与阵风锋后侧的干冷气团的温度差异较小,因此在其移动方向的前侧没有观测到阵风锋。

与雷暴同向运动并逐渐远离的阵风锋,切断了雷暴前侧暖湿气流向雷暴的输送,不利于雷暴的发展(葛润生,1986),雷暴系统大都在阵风锋出现 2 h 内消亡。出现在雷暴运动方向异侧的阵风锋,由于与雷暴移向不同,阵风锋逐渐远离雷暴,对其母体雷暴的发生发展没有直接影响。大部分阵风锋后侧没有不断补充的冷性下沉气流,阵风锋仅以孤立波的

形式传播(葛润生,1986),受经过的相对暖湿环境的影响,其后侧的干冷气流的性质逐渐减弱。

出现阵风锋的雷暴主体通常伴有从后侧倾斜向下正好到达雷暴前侧的阵风锋处的 RIJ,雷暴逐渐减弱消亡,阵风锋的生命史通常在 2 h 以内。根据 Weisman(1992)的研究结果,从飚线系统后侧向前侧的倾斜向下的 RIJ 与冷池同样产生负涡度,因此加强了冷池的环流,强于垂直风切变的正涡度,强冷池前沿的上升气流向后倾斜,不利于新对流单体发展(Rotunno,1988)。

阵风锋在远离雷暴的过程中,后侧的干冷气流会对移动方向前侧的暖湿气流有所抬升,从而触发雷暴的新生。但是由于阵风锋逐渐远离主体雷暴,没有强的干冷下沉气流的补充,其后侧的干冷气流性质逐渐减弱,因此远离主体雷暴过程中触发的新生雷暴通常发展不是特别强烈。

## 5 结 论

本文统计了上海地区 2009—2014 年共 18 次移动型雷暴产生的阵风锋的个例,分别对产生阵风锋的移动型雷暴的天气背景和温湿环境特征进行了分析,并统计了阵风锋在雷达上的一些特征,并根据阵风锋生成的时段以及中尺度对流系统之间的相互作用和影响,将移动型雷暴的阵风锋进行了分类,结论如下:

(1)移动型中尺度对流系统(单体、多单体雷暴或者飚线)通常发生在副高边缘或者高空槽前的天气形势背景下,仅有 2009 年 6 月 5 日的个例发生在东北冷涡低槽后侧西北气流控制的天气背景下。雷暴在午后至夜间在上海以西地区或上海附近新生、发展,并东移影响上海。两种天气形势背景下,上海整层受西南气流控制,高温高湿,K 指数、SI 指数等不稳定能量指数均为较高值,有利于雷暴的新生发展。此外,白天升温,中低层接近干绝热递减率,也利于保持下沉气流在下沉增温过程中和环境温度的负温差,使得下沉气流保持向下的加速度。

(2)反射率因子场上,阵风锋通常表现为弱的窄带回波。径向速度场上,由于速度信息采集于更弱的信号,有时候会先于反射率因子图观测到弱的阵风锋。径向速度场的阵风锋主要有两种表现形式,一种是正负速度交界带(辐合带),另一种为窄带回波形式。径向速度图上表现为正负速度交界(辐合)

的阵风锋,正负速度的差值越大,则阵风锋的反射率因子强度越强。谱宽图上,与周围的降水回波相比,阵风锋表现为谱宽值相对增强的窄带回波,最大的谱宽值可达到  $10\sim 12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,阵风锋是下沉辐散气流的前沿,其产生的最大阵风通常是雷暴消亡下沉气流爆发的时刻,并非阵风锋被观测到的初始时刻。通常情况下,雷暴低层辐散的强度或者负速度区的强度与地面阵风风速的大小成正相关。阵风锋反射率因子的强度与地面风速没有直接的关系。

(3)出现在雷暴发展、成熟阶段的阵风锋,阵风锋通常出现在雷暴运动方向的前侧,阵风锋紧贴着雷暴同向运动,出现阵风锋的雷暴主体通常伴有高悬的 RIJ。强垂直风切变和强的对流有效位能对 RIJ 高度的维持起到了关键作用。在雷暴的发展过程中,一方面,高悬的 RIJ 只在冷池的环流大于垂直风切变的环流的情况下产生,其生成的正涡度与冷池产生的负涡度方向相反,因此它的发展平衡了冷池产生的负涡度和高悬的 RIJ 和垂直风切变共同产生的正涡度,有利于维持雷暴的发展传播;另一方面阵风锋不断将其前侧低层的暖湿空气抬升,并沿着阵风锋输送到雷暴中去;因此,阵风锋后侧的雷暴主体不断生消,雷暴持续稳定的发展,阵风锋的生命史长达 2 h 以上。

(4)出现后即逐渐远离雷暴移动的阵风锋,通常预示着雷暴的减弱消亡。大部分阵风锋(12 个个例)出现在雷暴移动方向的前侧,与雷暴移动同向;少数阵风锋(4 个个例)出现在雷暴运动方向的异侧,逐渐远离雷暴。出现阵风锋的雷暴主体通常伴有从后侧倾斜向下正好到达雷暴前侧的阵风锋处的 RIJ。阵风锋切断了暖湿气流向雷暴的输送,从飑线系统后侧向前侧倾斜向下的 RIJ 和冷池的负涡度强于垂直风切变的正涡度,强冷池前沿的上升气流向后倾斜,不利于新对流单体发展,雷暴系统大都在阵风锋出现 2 h 内消亡。由于逐渐远离雷暴(特别是与雷暴移动不同向的阵风锋),其后侧没有不断补充的冷性下沉气流,阵风锋仅以孤立波的形式,受经过的暖湿环境的影响,其后侧的干冷气流的性质也逐渐减弱。

此外,阵风锋在移动过程中,会对周围环境产生一定的影响,如导致雷暴近环境的垂直风切变增大、地面辐合强度增强等,从而促进了周边雷暴的新生、发展等(陶岚等,2016),本文不再详述。

阵风锋形成机制复杂,既可以抬升其前进方向

上的暖湿空气,使母体风暴维持,也能触发雷暴单体新生,且与其母体雷暴之间存在着复杂的相互作用和影响,是科学研究的重点和难点。在短时临近预报中,对于观测到阵风锋的雷暴主体,除了雷暴本身的反射率因子的结构特征,还需关注 RIJ 的结构特征,阵风锋的移向、移速等,分析雷暴主体的发展或减弱趋势,以提高短时临近预报的准确性和预报时效。对于冷池、不同结构的 RIJ 和垂直风切变三者产生的涡度及其对雷暴发生发展的影响还需通过数值模拟等进行计算分析,以此促进中尺度对流系统产生的灾害性天气预警能力的提升。

## 参考文献

- 葛润生. 1986. 阵风锋的雷达探测和研究. 应用气象学报, 1(2): 113-122.
- 黄璇璇, 何彩芬, 徐迪锋, 等. 2008. 5·6 阵风锋过程形成机制探讨. 气象, 34(7): 20-26.
- 刘勇, 王楠, 刘黎平. 2007. 陕西两次阵风锋的多普勒雷达和自动气象站资料分析. 高原气象, 26(2): 380-387.
- 陶岚, 戴建华, 孙敏. 2016. 一次雷暴单体相互作用与中气旋的演变过程分析. 气象, 42(1): 38-49.
- 陶岚, 袁招洪, 戴建华, 等. 2014. 一次夜间弓形回波特征分析. 气象学报, 72(2): 220-236.
- 袁子鹏, 王瀛, 崔胜权, 等. 2011. 一次中纬度飑线的阵风锋发展特征分析. 气象, 37(7): 814-820.
- 席宝珠, 俞小鼎, 孙力, 等. 2015. 我国阵风锋类型与产生机制分析及其主观识别方法. 气象, 41(2): 133-142.
- 夏文梅, 慕熙显, 徐芬, 等. 2009. 南京地区初夏一次阵风锋过程的分析与识别. 高原气象, 28(4): 836-845.
- 张涛, 李柏, 杨洪平, 等. 2013. 三次雷暴导致的阵风锋过程分析. 气象, 39(10): 1275-1283.
- Battan L J. 1973. Radar Observation of the Atmosphere. Chicago: University of Chicago Press.
- Byers H R, Braham R R Jr. 1949. The Thunderstorm. Washington D C: U S Govt Print Off, 287.
- Carbone R E, Keenan T D, Wilson J W, et al. 1997. Boundary layer structures and the role of breezes in forcing deep island convection. Preprints, 28th Conf on Radar Meteorology, Austin, TX, Amer Meteor Soc, 565-566.
- Klingbe D L, Smith D R, Wolfson M M. 1987. Gust front characteristics as detected by Doppler radar. Mon Wea Rev, 115(5): 905-918.
- Knupp K R, Cotton W R. 1982. An intense, quasi-steady thunderstorm over mountainous terrain. Part II. Doppler radar observations of the storm morphological structure. J Atmos Sci, 39(2): 343-358.
- Mahoney W P. 1988. Gust front characteristics and the kinematics associated with interacting thunderstorm outflows. Mon Wea Rev, 116(7): 1474-1491.

- Martner B E. 1997. Vertical velocities in a thunderstorm gust front and outflow. *J Appl Meteor*, 36(5):615-622.
- May P T. 1999. Thermodynamic and vertical velocity structure of two gust fronts observed with a wind profiler/RASS during MCTEX. *Mon Wea Rev*, 127(8):1796-1807.
- Quan Wanqing, Xu Xin, Wang Yuan. 2014. Observation of a straight-line wind case caused by a gust front and its associated fine-scale structures. *J Meteor Res*, 28(6):1137-1154.
- Rotunno R, Klemp J B, Weisman M L. 1988. A theory for strong, long-lived squall lines. *J Atmo Sci*, 45(3):463-485.
- Smull B F, Houze R A. 1987. Rear inflow in squall lines with trailing stratiform precipitation. *Mon Wea Rev*, 115(12):2869-2889.
- Thorpe A J, Miller M J, Moncrieff M W. 1982. Two-dimensional convection in non-constant shear: A model of midlatitude squall lines. *Quart J Roy Meteor Soc*, 108(458):739-762.
- Wakimoto R M. 1982. The life cycle of thunderstorm gust fronts as viewed with Doppler radar and rawinsonde data. *Mon Wea Rev*, 110(8):1060-1082.
- Weisman M L. 1992. The role of convectively generated rear-inflow jets in the evolution of long-lived mesoconvective systems. *J Atmos Sci*, 49(19):1826-1847.
- Wilson J W, Roberts R D. 2006. Summary of convective storm initiation and evolution during IHOP: Observational and modeling perspective. *Mon Wea Rev*, 134(1):23-47.
- Wilson J W, Schreiber W E. 1986. Initiation of convective storms at radar observed boundary-layer convergence lines. *Mon Wea Rev*, 114(8):2516-2536.
- Wilson J W, Weckwerth T M, Vivekanandan J, et al. 1994. Boundary layer clear-air radar echoes: Origin of echoes and accuracy of derived winds. *J Atmos Oceanic Technol*, 11(5):1184-1206.