

吴瑞姣,陶玮,周昆,等,2019.江淮灾害性大风飏线的特征分析[J].气象,45(2):155-165. Wu R J, Tao W, Zhou K, et al, 2019. General features of squall lines with disastrous gale in the Yangtze-Huaihe Area[J]. Meteor Mon, 45(2):155-165(in Chinese).

江淮灾害性大风飏线的特征分析^{*}

吴瑞姣 陶 玮 周 昆 邱学兴

安徽省气象台,合肥 230031

提 要: 本文利用 2000—2017 年 4—9 月的多普勒雷达资料、地面和高空探测资料,识别出江淮地区 35 条飏线。空间分布显示,飏线主要形成于长江以北的平原地区。时间分布显示,40% 的飏线发生在 7 月,其中 7 月下旬有一峰值;约 37% 的飏线形成于中午到下午,在午后到傍晚成熟,在下午至夜间消亡。较多的飏线向东南方向移动,移速集中于 $8\sim 16\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 长度为 $200\sim 250\text{ km}$, 强度为 $60\sim 65\text{ dBz}$, 生命史为 $3\sim 4\text{ h}$ 。飏线的主要形成方式为离散区型(broken areal 型),组织方式以后部层状云型(trailing stratiform 型)居多,主要消散方式为逆向断线型(reversed broken line 型)。把飏线的天气背景分成五种类型:浅槽型、深槽型、高压边缘型、槽后型和冷涡型。江淮飏线多出现在西风槽前;深槽型飏线引起的地面降温幅度最大;深槽型和冷涡型飏线的雷达回波核较高,天气也更为剧烈,除了降水和雷暴大风外,还可出现冰雹或龙卷。五种天气型的相同之处是对流有效位能大于 $1300\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$, $0\sim 6\text{ km}$ 的垂直风切变大于 $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 抬升凝结高度多低于 930 hPa , 即低层为高温潮湿的环境。

关键词: 飏线,特征,天气形势

中图分类号: P456

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2019.02.002

General Features of Squall Lines with Disastrous Gale in the Yangtze-Huaihe Area

WU Ruijiao TAO Wei ZHOU Kun QIU Xuexing

Anhui Meteorological Observatory, Hefei 230031

Abstract: Based on the Doppler radar data, surface observation and rawinsonde data collected from April to September during 2000—2017, 35 squall line cases in the Yangtze-Huaihe Area are identified. These squall lines occur most frequently in the plain to the north of the Yangtse River. The squall lines peak in July and a large proportion of them generate in early afternoon, mature in late afternoon, and dissipate in evening. The squall lines have a dominant southeast motion at the speed of $8\sim 16\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. They are characterized by the maximum length of $200\sim 250\text{ km}$, the maximum intensity of $60\sim 65\text{ dBz}$, and the duration of $3\sim 4\text{ h}$. The squall lines commonly form in a broken-areal pattern, display a trailing-stratiform pattern, and dissipate in a reversed broken-line pattern. The ambient flows of the squall lines are classified into five synoptic patterns, which are pre-short trough, pre-long trough, cold vortex, around subtropical-high and post-trough patterns. About 62.9% of the squall lines form in the dominant pre-trough pattern. Pre-long trough squall line causes the largest surface cooling. The radar echo cores of pre-long trough and cold vortex squall lines are higher and the weather is more severe. Besides precipitation and thunderstorms, hail or tornado can also occur. Favorable conditions for the different patterns have been analyzed in the terms of

^{*} 安徽省气象局气象科技发展基金(KM201801)和安徽省气象局预报员专项(KY201611)共同资助

2017 年 11 月 17 日收稿; 2018 年 11 月 30 日收修定稿

第一作者:吴瑞姣,主要从事中尺度天气动力学和数值模拟研究. Email: ruiji.ao@163.com

通信作者:周昆,主要从事短时天气预报和研究. Email: old_chen@sohu.com

instability, vertical wind shear and so on.

Key words: squall line, general feature, synoptic pattern

引 言

由于雷暴大风、短时强降水、冰雹甚至龙卷等灾害性天气常出现于飑线中,国内外气象学者对飑线的研究在不断持续和深入,并且随着数值模式和计算机的发展,在飑线特征统计及形成机理、飑线内部结构等多个方向展开。对于飑线,众多学者如 Chen and Chou(1993)、Geerts(1998)、Parker and Johnson(2000)在研究时进行了各种定义。在天气学上,朱乾根等(1992)指出,飑线是指范围小、生命史短、气压和风发生突变的狭窄强对流天气带。它来临时会出现风向突变、风力急增、气压猛升、气温骤降等强天气现象。Meng et al(2012)的定义:(1)一个连续的或者准连续的 40 dBz 反射率带延伸至少 100 km,持续 3 h 以上;(2)线性或者准线性对流区有一个明显的边界;(3)镶嵌有 40 dBz 区域的 35 dBz 区域是严格连续的。飑线形成时间为雷达反射率 40 dBz 区域连成线状时,反之为消散时间。

在飑线的特征统计方面,杨珊珊等(2016)统计了 6 年冷涡背景下的河北 17 个飑线特征,其中 EA 型形成方式占 58.8%。冯晋勤等(2017)在 2002—2013 年春季 26 次强对流天气过程中,针对春季西南急流暖湿强迫背景下形成的 12 例,统计静力稳定度、水汽、抬升和垂直风切变条件及相应物理量要素,建立了此类强对流天气流型的识别方法。姚晨等(2012)对比江淮地区两个飑线过程,分析其不同特征及大气斜压性和高低空急流的耦合等天气系统在飑线发展中的作用。唐明晖等(2017)分析两次台风外围飑线指出,与西风带飑线相比其雷暴高压弱,存在冷池以及明显的温度梯度和气压梯度。孟智勇等(2002)研究了华南飑线,发现其冷池与中纬度飑线的冷池相比弱很多,这与两者热力条件不同有关。在飑线的天气背景分析方面,丁一汇等(1982)选取了 18 个飑线个例,将中国飑线发生的大尺度背景场总结为槽后型、槽前型、高压后部型和倒槽型四种,河北有 50% 的个例发生在槽后。Meng et al(2013)对中国东部 96 个飑线统计表明,飑线多发生在西风

浅槽前,形成方式以断线型和离散型最多。物理量的分析表明,湿斜压性强和垂直风切变大为强对流运动提供有利环境。张宁等(2017)研究豫北一次飑线过程,指出冷空气侵入高空槽前与低层发展的暖湿气流在对流潜势区叠加建立不稳定层结,随后由东移高空槽和发展的地形辐合线触发本次对流活动。李英等(2010)对登陆台风 Rananim(0414)环流内中尺度辐合线与台风环流相互作用的诊断表明,中纬度冷空气自对流层中低层侵入台风环流,与台风偏东风暖湿气流相遇,激发了中尺度辐合线在其西北象限的生成。中尺度辐合线从台风低层获得动能和垂直涡度而发展,而其发展又为台风环流提供动能和高层正涡度,减缓了台风衰减。在飑线的形成机理方面,Weisman(1993)给出了飑线发展的概念模型:垂直风切变和冷池是影响飑线维持时间和强度的主要因子,两者的相互作用激发了垂直运动和后侧入流,进而形成了弓形回波。俞小鼎等(2006)分析飑线中的涡度演变,指出垂直风切变产生水平涡度,其在随着低层入流逐渐转变为上升气流的过程中被扭曲为垂直涡度,随后垂直涡度在上升气流中被拉伸加强,形成中层中气旋。如果探测到中等强度($16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)以上的中气旋,其底部到地面的距离小于 1 km 者,龙卷生成的概率可达 40% 以上。Stoelinga et al(2003)指出对于由高空冷锋产生的飑线,冷池对其维持不是必要的条件。在飑线的其他研究方面也取得一定进展,如高梦竹等(2017)探讨了特殊地形杭州湾对飑线的影响,曹治强等(2008)初步分析了 2007 年 7 月皖苏北部飑线中的龙卷风。

目前尚未看到针对江淮飑线系统性的特征分析。从 1999 年合肥多普勒雷达运行开始,高时空分辨率的探测可以监测到飑线的发生、发展、成熟和消散,为系统性研究江淮飑线提供了数据支撑。本文将统计 2000 年以来的江淮飑线,并对其时空分布、移动特征、形成、消散方式以及飑线和天气背景的关系等方面进行详细分析,以提高对江淮飑线的短临预报能力。为了重点分析风灾最为严重的飑线,本文在统计飑线个例时,在天气学和 Meng et al(2012)的定义之外,要求在雷达反射率图上有弓形

回波特征。

1 数据和方法

飊线是一种线状对流系统,在其成熟阶段气温骤降、气压涌升、风向急变、风速剧增、阵雨达到最大强度,或出现其他激烈天气,有尾流低压(陆汉城和杨国祥,2004)。根据飊线的天气学特征来统计江淮飊线的样本个例。首先根据危险天气报选出雷暴大风个例共79个,然后根据江淮地区除高山站外的87个站点逐3 h的地面观测资料(由于2005年以前无逐小时资料,为保持资料一致性,故使用时间间隔为3 h的资料),从以上79个个例中选出气压、温度、风和降水的变化符合飊线特征的样本。值得注意的是,由于21世纪初测站选址较为稀疏且分布不均,难以呈现飊线的水平分布特征,故选取受飊线影响的代表站,研究其气象要素的时间变化特征。为了滤去日变化和大尺度信息,定义了变压和变温的异常指数:

$$adP_{ki} = dP_{ki} - \overline{dP_i} \quad (1)$$

$$adT_{ki} = dT_{ki} - \overline{dT_i} \quad (2)$$

式中, adP_{ki} 和 adT_{ki} 分别为站点 k 在 i 时次的变压异常指数(单位:hPa)和变温异常指数(单位:K),表示该站点与同时段其他站点相比所表现出的变压和变温异常; dP_{ki} 和 dT_{ki} 分别为站点 k 在 i 时次的3 h变压和变温; $\overline{dP_i}$ 和 $\overline{dT_i}$ 分别为 i 时次江淮地区87个

站点变压和变温的平均值。根据陆汉城和杨国祥(2004)对飊线的统计分析,选取有一个以上代表站出现 $adP \geq 2$ hPa, $adT \leq -5$ K并伴随 $10 \text{ mm} \cdot (3 \text{ h})^{-1}$ 以上降水的个例为备选飊线。为了确定该备选飊线是线状的中尺度对流系统,对比了合肥多普勒天气雷达每6 min一次降水回波,要求有一个连续的或者准连续的40 dBz反射率带通过代表站,该反射率带须延伸100~300 km,并维持3 h以上。由此确定了35个飊线个例。

进一步合成分析了35个飊线个例变压异常指数和变温异常指数的时间序列(图1)。以飊线过境时刻为0 h,大部分个例都是在0 h出现2~4 hPa的异常正变压和5~14 K的异常负变温,说明有雷暴高压和地面冷池与飊线同时存在。另有8个样本正变压和负变温峰值出现在飊线过境前3 h(即-3 h),这可能是由系统倾斜导致的。此外,大多数个例在-6~-3 h显示出明显的正变温,最大的可达8 K,这与飊线前部的暖区相对应。以上特征表明,选出的35个飊线样本符合飊线的定义,将用于后文的统计分析。

飊线的移动速度以雷达上飊线回波的整体移动来统计。根据飊线形成12 h内的探空资料的高度场、低层风场和温度场进行天气形势分型。从阜阳、安庆、南京、徐州、杭州、南昌探空站中选择离飊线300 km内的探空站埃玛图进行物理量分析。最后诊断分析飊线特征与天气背景之间的关系。

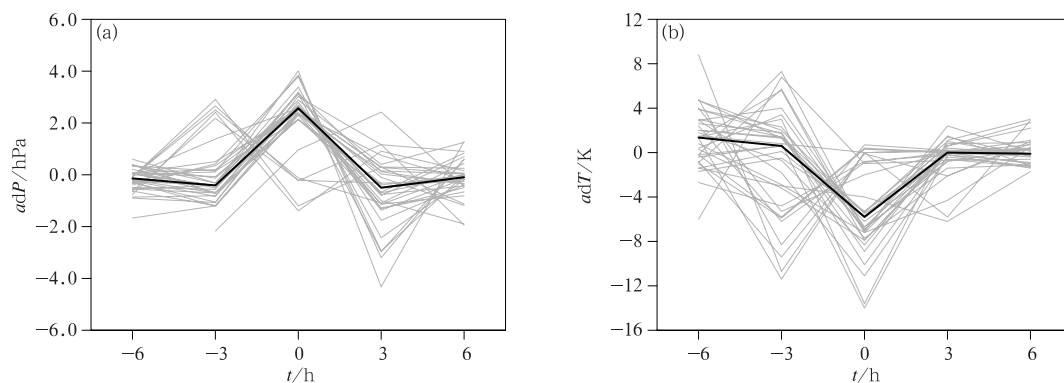


图1 变压异常指数(a)和变温异常指数(b)的时间序列图
(图中灰线为35个飊线样本中代表站的时间序列;黑线为所有样本的平均值;
横坐标负值表示飊线过境前,正值表示飊线过境后)

Fig. 1 Time series of pressure change anomaly index (a) and temperature change anomaly index (b)

(Gray lines are time series of the 35 sample squall lines, black line is the average of all sample squall lines,
the negative abscissa value means the time prior to squall lines,
the positive value means the time after squall lines)

2 飊线的空间分布特征

在飊线形成期间,选择不同时刻 0.5°仰角雷达图上飊线的几何中心点,将其连接成线,绘制飊线路径(图 2)。

在统计的 35 个飊线中,总体上,发生在长江以北的多,且多向东南移动;长江以南的少,多向西北移动。按流域分,江淮之间出现的飊线较多,有 12 个,约占 34.3%;其次为从淮河以北移到江淮之间和从江淮之间移到江南的飊线;仅在淮河以北和沿江江南活动的飊线少。从下垫面区分,绝大多数飊

线出现在平原地区。从移向和天气形势分,飊线向偏东方向移动的最多,有 28 个;其余的向偏西方向移动。向偏东移动的飊线出现在西风槽附近;向偏西移动的飊线多处于副热带高压边缘,其中发生在 2014 年 7 月 24 日的飊线直接受台风北侧环流的影响,飊线的移动方向与 850~500 hPa 的平均引导气流方向较一致。特殊例子为 2009 年 6 月 5 日飊线,它发生在西风槽后,低层中尺度环境流场与风暴的相互作用使风暴向暖区一侧传播,此次温度场东北低、西南高,与常年平均不同,飊线向西南方向传播。在 4 和 9 月,飊线多发生在 32°N 以南;而在 5—8 月,江淮地区从北到南均有可能出现飊线。

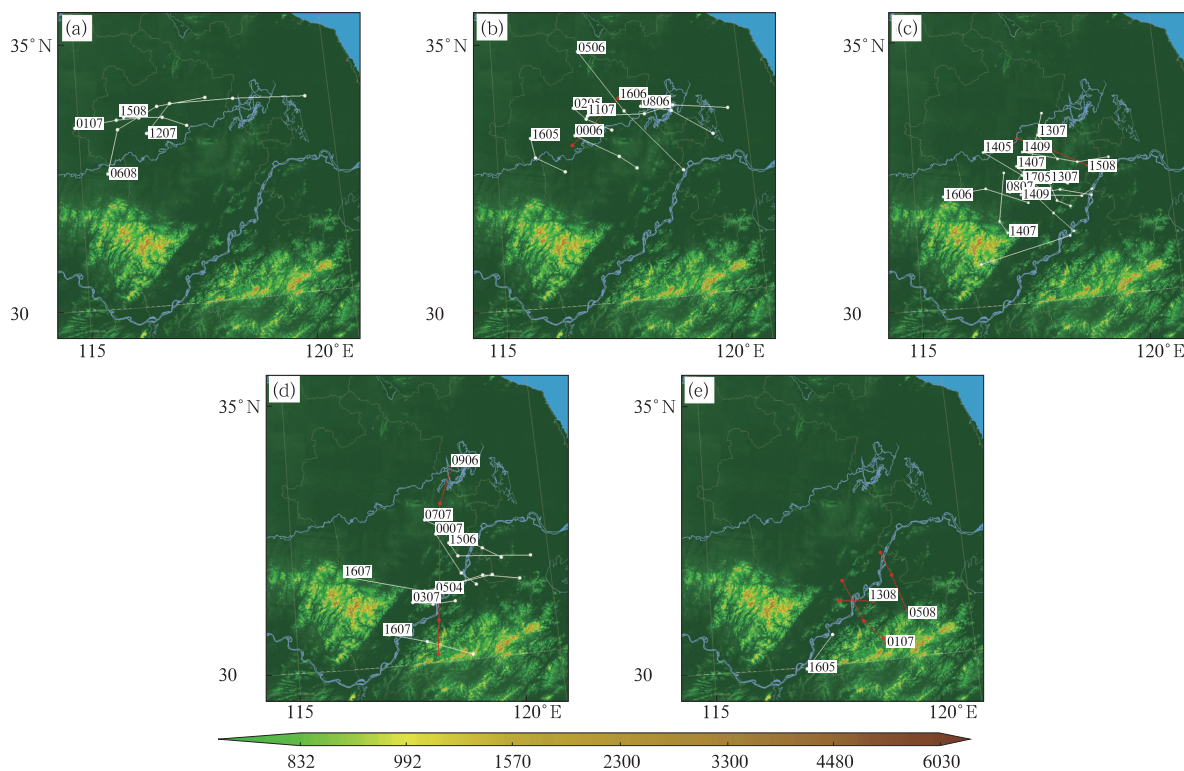


图 2 飊线路径示意图

(a)淮河以北,(b)沿淮地区,(c)江淮之间,(d)沿江地区,(e)长江以南
(填色为海拔高度,单位:m;图中编号为年月;红色表示移动有向西的分量,
白色表示移动有向东的分量;飊线出现具体日期见表 1)

Fig. 2 Tracks of squall lines

(a) north to Huaihe River, (b) along Huaihe River,
(c) between Huaihe River and Yangtze River,
(d) along Yangtze River, (e) south to Yangtze River

(Colors are for terrain, unit: m; numbers for years and months of squall lines;
red lines for squall lines with westward movement component, white lines for
squall lines with eastward movement component; the occurrence
time of squall lines is shown in Table 1)

3 飊线的时间分布特征

3.1 月变化

统计表明,2000—2017年江淮地区出现35个飊线,4—9月均可发生(图3)。其中7月是飊线的高发期,出现14个,占40%,尤其是7月下旬,出现了6个。其次是6月,飊线为7个,占20%;5和8月各5个,接近于平均数,最少的是4和9月,均为2个。根据下文的天气形势统计分析,4、5、9月对流有效位能(CAPE)较小,平均约为 $630 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,但0~6 km垂直风切变大,平均约为 $13.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。8月CAPE较大,约为 $1980 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,但垂直风切变略小,约为 $12.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。6、7月月平均CAPE约为 $1810 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,不仅具有与8月相当的不稳定大气层结,而且0~6 km垂直风切变平均约为 $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,大于其他月份,成为飊线高发月份。

3.2 日变化

由图4可知,飊线有明显的日变化特征。飊线的形成时间在13—16时的次数达到峰值,为13次,约占37%。在上午、傍晚和前半夜也时有发生。飊线的成熟时间在16—19时的最多,有9个;次之在13—16时,为8个。04时左右,飊线最少。飊线一般在午后到前半夜发展成熟,多在下午至夜间减弱消失。图4显示,飊线日变化趋势与温度日变化线一致,地面温度越高越有利于飊线的产生。

4 飊线特征

4.1 飊线中尺度特征

由图5可见,江淮飊线的生命史较短,绝大多数飊线生命史在6 h以内,极少数生命史可超过6 h,如2012年7月4日;以3~4 h的居多,有15个,约占42.9%;生命史长于4 h的飊线多发生在6、7、8月。飊线长度为200~250 km的最多,有10个,占28.6%,次之为150~200 km。最大强度为60~65 dBz的有18个,占51.4%,次之为55~60 dBz。移速为 $8 \sim 16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的飊线较多,约占57.1%。

同一个飊线不同位置最大反射率因子的高度不同,即使针对同一个对流单体其在不同时间高度也

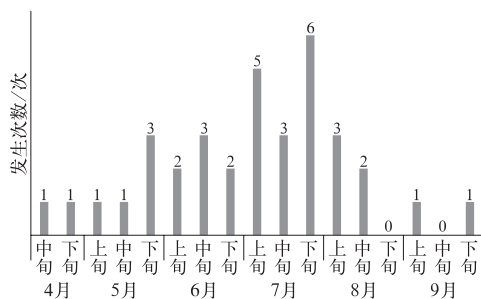


图3 2000—2017年飊线发生

次数月变化(单位:次)

Fig. 3 Monthly variation of the squall line cases from April to September in 2000—2017

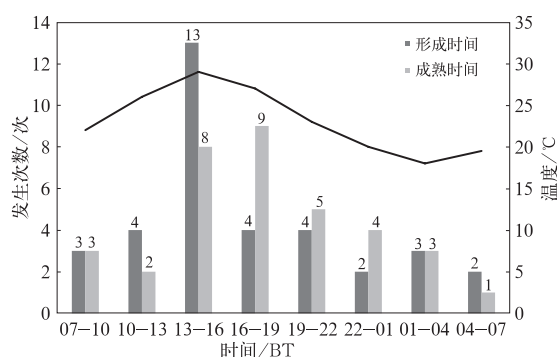


图4 2000—2017年飊线发生次数

日变化

(折线为4—9月平均温度的日变化)

Fig. 4 Diurnal variation of the squall lines cases (histogram) and temperature (black line) in 2000—2017

是变化的。为了比较飊线最大反射率因子的高度,取雷达第58号风暴跟踪信息产品中在飊线上编号单体的最大反射率因子所在高度的平均值,将其作为飊线雷达回波核高度(图6)。飊线成熟期,40%的雷达回波核高度为4~6 km,多为5 km左右。飊线引起的地面降温,约51.4%为5~7℃,随着地面降温幅度增大,概率减小。

4.2 飊线的形成、组织与消散方式

根据Bluestein and Jain(1985)提出的中纬度飊线四种形成方式,即断线型(broken line, BL)、后向发展型(back building, BB)、离散区型(broken areal, BA)和镶嵌区型(embedded areal, EA)来区分江淮地区飊线的形成方式可知:BA型形成的飊线最多,有16个,约占45.7%(图7a);BL型形成的飊

线次多,13 个,约占 37.1%;BB 型和 EA 型形成的
飚线最少,均为 3 个。

Parker and Johnson(2000)指出飚线的组织方
式可分为三种:后部层状云型(trailing stratiform,

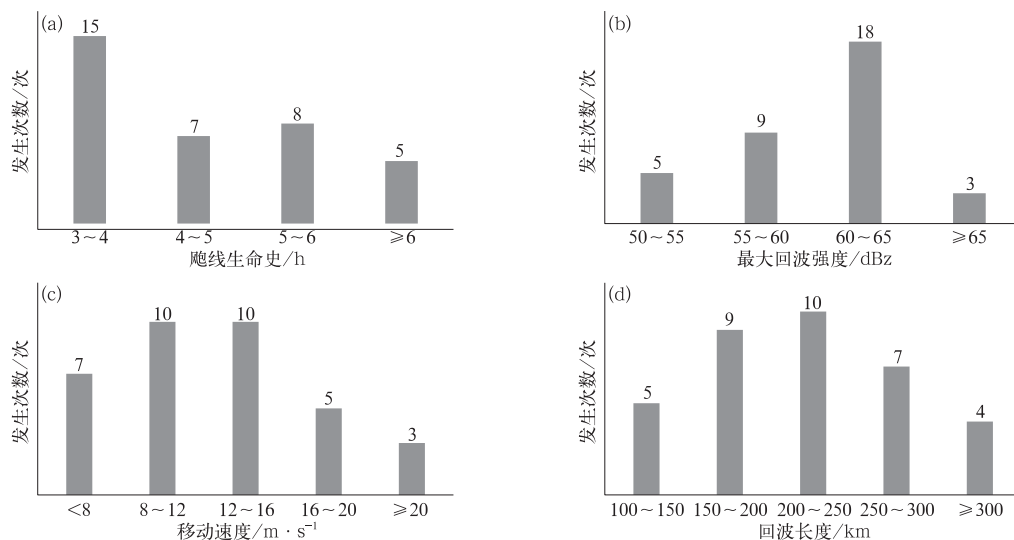


图 5 飚线特征

(a) 生命史, (b) 最大回波强度, (c) 移动速度, (d) 40 dBz 以上的回波长度

Fig. 5 Squall lines feature counts

(a) lifetime, (b) maximum reflectivity, (c) moving speed,
(d) length of the echoes above 40 dBz

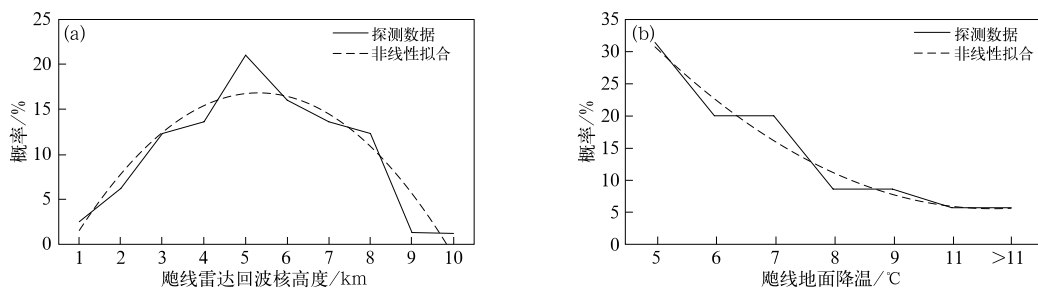


图 6 飚线雷达回波核高度(a)和地面降温(b)的概率分布

Fig. 6 Probability distribution of radar echo core heights of squall lines (a)
and drop in surface temperature (b)

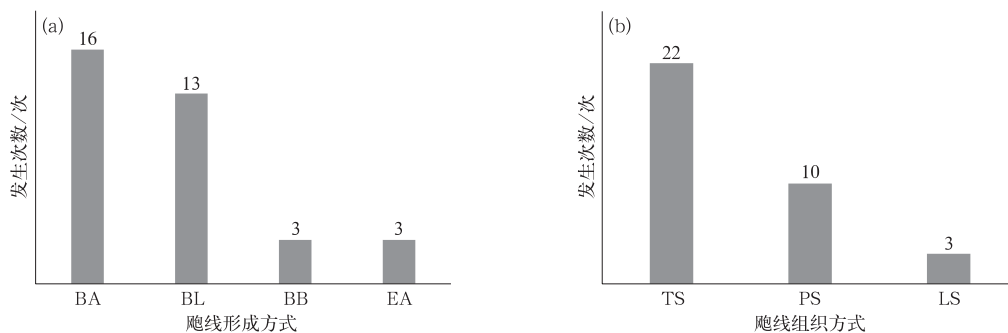


图 7 飚线的形成(a)和组织(b)方式

Fig. 7 Squall lines formation (a) and organization (b) patterns

TS)、平行层状云型(parallel stratiform, PS)和前部层状云型(leading stratiform, LS)。从江淮飊线的统计上看,组织方式为TS型的飊线最多,有22个,约占62.9%(图7b)。另外两型较少。消散方式为逆向断线型(reversed broken line, RBL)的最多,有16个(图略)。

5 天气背景

参照丁一汇等(1982)和 Meng et al(2013)的做法,根据飊线发生时12 h内高、低空环流特征以及天气系统的差异,可将飊线大致分为浅槽、深槽、高压边缘、槽后、冷涡等五种类型,并分别对各种天气型统计了平均的CAPE、对流抑制能(CIN)、沙氏指数(SI)、抬升凝结高度(LCL)和K指数(KI)(各类中典型个例的天气背景等如图8)。因探空站多与飊线发生地有一定距离,根据探空资料计算的统计结果只能在一定程度上代表飊线发生的天气背景特征。

由表1和表2可知,浅槽型飊线最多,有15个,发生在4—9月高空西风浅槽前580~584 dagpm附近。除了5个发生在夜间,一天中多出现在中午前后,天气以强降水和雷暴大风为主。雷达上回波核高度的变化最大,平均为4.8 km。地面降温多为6.5℃。飊线移速同样变化最大,平均为11.8 m·s⁻¹。天气形势为:西风浅槽缓慢东移,副热带高压维持,安徽上空高空槽前有正涡度平流。850 hPa有低涡或切变线配合,同时伴有西南急流,虽然有时高空冷平流弱,但低层暖平流明显,因而有利于位势不稳定层结的建立。CAPE平均为1350 J·kg⁻¹,虽然是所有类型中的最小值,但CAPE值变化最大,其中35个个例中CAPE最大值(3520 J·kg⁻¹)便出现在此型个例中;CIN较小,平均为71.1 J·kg⁻¹;0~6 km垂直风切变的平均值为11.3 m·s⁻¹。LCL较低,平均为948 hPa,其中35个个例中LCL最低值(1004 hPa)也出现在浅槽型个例中。湿度条件较好。

深槽型飊线次多,有7个,发生在6月下旬至7月高空深槽前584 dagpm附近。一天中发生在午后较多,天气以短时强降水和雷暴大风为主,其中4个飊线出现了梅雨背景下的龙卷。雷达上回波核高

度略高,平均为6.2 km。地面降温明显,平均为9.5℃。飊线移速较快,平均为14.2 m·s⁻¹。高空有长度超过10个纬距的深槽从西北移来,受强大的西北太平洋副热带高压的阻挡,形势稳定。与浅槽型相比,850 hPa的低涡或切变线两侧的风速更大,常有20 m·s⁻¹左右的急流出现,暖平流更强,形成明显的位势不稳定层结。CAPE平均为2020 J·kg⁻¹;CIN平均为70 J·kg⁻¹;0~6 km垂直风切变的平均值为12.2 m·s⁻¹;LCL较低,平均为960 hPa。湿度条件非常好。

高压边缘型飊线有7个,其中1个出现在台风北侧倒槽中,多发生在7月下旬到8月副热带高压边缘588 dagpm附近。一天中经常出现在午后,天气以强降水为主。雷达上回波核高度低,平均为3.8 km,其中台风倒槽中飊线回波核高度最低,为1.2 km。地面降温幅度大,为8.1℃。飊线移速慢,平均为9.6 m·s⁻¹。西北太平洋上高压强大,西部有时伸向陆地控制华东地区,其西脊点在32°N左右,西风槽东移减速并向南延伸,高压的南侧有台风活动。台风对大气环流的维持、低层水汽的输送、低层风场辐合的增强等均有利于飊线的发展和维持。此型飊线的CAPE平均为1520 J·kg⁻¹;CIN略大,平均为122.5 J·kg⁻¹;0~6 km垂直风切变最小,平均值为10.7 m·s⁻¹;LCL低,平均为931 hPa。湿度条件最好,潜热释放对飊线的维持更重要。但当有台风倒槽直接影响并有中纬度冷空气侵入时CAPE却很大,CIN很小;如2014年7月24日出现在台风麦德姆北侧倒槽内的飊线,CAPE达2820 J·kg⁻¹,CIN仅为2.2 J·kg⁻¹。

槽后型飊线有4个,主要发生在5月高空槽后576 dagpm附近。一天中出现在傍晚的较多,天气多雷暴大风,无明显降水。雷达上回波核高度平均为5.3 km。地面降温平均为7.5℃。飊线移速平均为12.2 m·s⁻¹。这种天气型在空间上具有前倾结构,850 hPa槽线在500 hPa槽线以西约3个纬距。500 hPa槽后西北气流叠加在850 hPa槽前偏南暖湿气流上,有利于位势不稳定层结的建立和维持。CAPE平均为1400 J·kg⁻¹;但CIN较大,平均为176 J·kg⁻¹;0~6 km垂直风切变的平均值为17.9 m·s⁻¹;LCL较高,平均为890 hPa。湿度条件一般。

冷涡型飚线有 2 个,均发生在 6 月,在高空槽后 572 dagpm 附近。一天中出现在夜里,天气剧烈,有

雷暴大风或冰雹,也无明显降水。雷达上有明显阵风锋,回波核高度平均为 6 km。地面降温约为

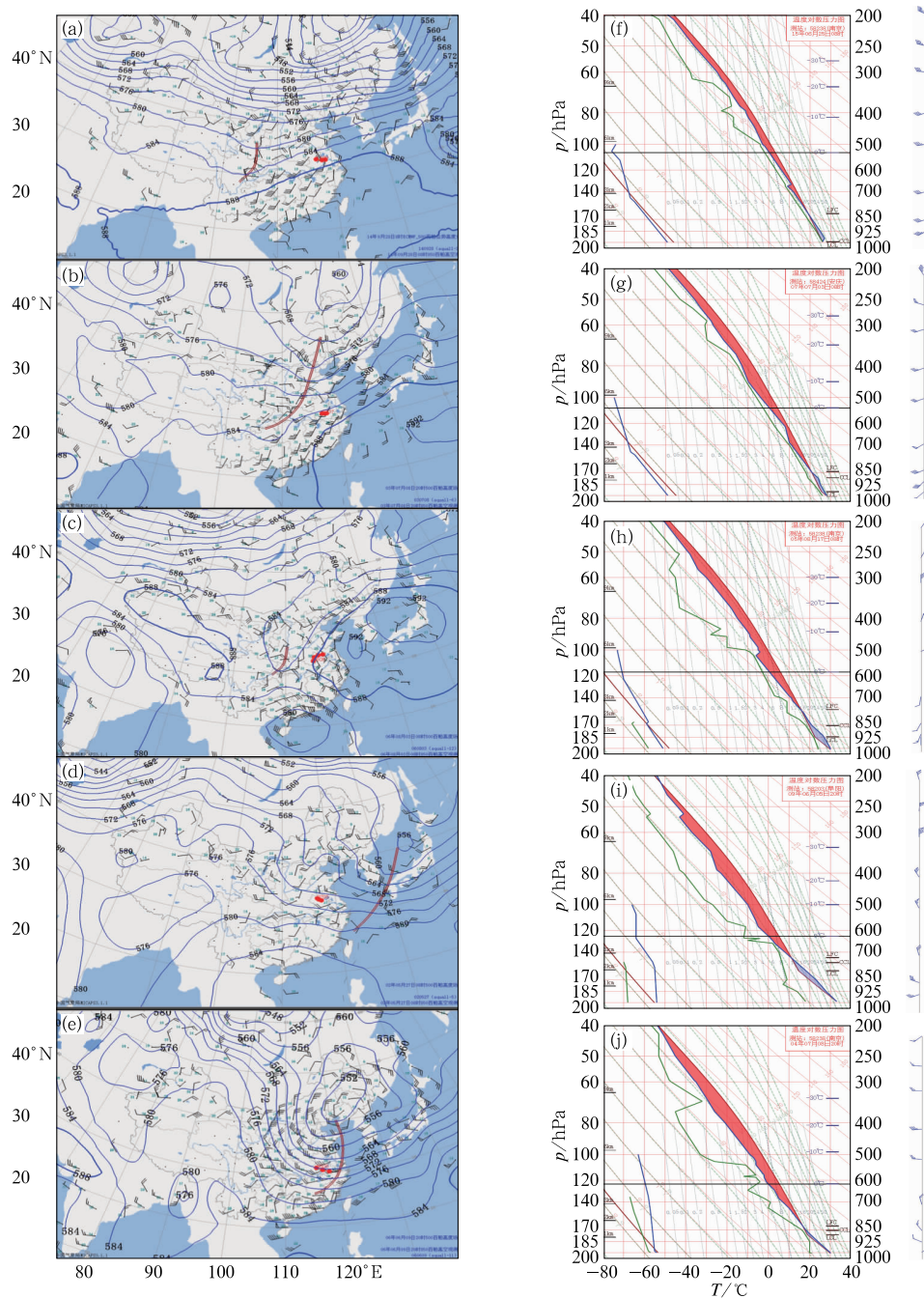


图 8 五种类型飚线典型个例的天气背景(a,b,c,d,e)和 $T\text{-}\log p$ 图(f,g,h,i,j)

(a,f)浅槽型,(b,g)深槽型,(c,h)高压边缘型,(d,i)槽后型,(e,j)冷涡型

(图 8a~8e 中,蓝色实线:500 hPa 高度;红色短线:飚线位置)

Fig. 8 Synoptic background (a, b, c, d, e) and $T\text{-}\log p$ (f, g, h, i, j)

of the typical squall line cases of five patterns

(a, f) pre-short trough, (b, g) pre-long trough, (c, h) around high, (d, i) post trough, (e, j) cold vortex

(in Figs. 8a—8e, blue solid lines: 500 hPa geopotential height; red short line: location of squall line)

表 1 飊线的五种天气型个例

Table 1 Cases statistics of squall lines classified into five synoptic patterns

类型	发生时间/BT	发生地区	类型	发生时间/BT	发生地区
浅槽型	2005 年 4 月 30 日 08:02—14:16	从江淮之间到江南	深槽型	2000 年 6 月 22 日 15:00—18:20	从淮北到江淮之间
	2008 年 6 月 20 日 19:40 至 21 日 00:40	从淮北到江淮之间		2001 年 7 月 13 日 15:56—20:33	从江南到江淮之间
	2011 年 7 月 25 日 14:30—20:41	从淮北到江淮之间		2001 年 7 月 30 日 09:42—12:34	淮北
	2012 年 7 月 4 日 14:03 至 5 日 00:35	淮北	高压边缘型	2003 年 7 月 9 日 03:00—07:56	从江淮之间到江南
	2013 年 7 月 5 日 04:00—09:00	江淮之间		2007 年 7 月 3 日 14:28—19:48	从江淮之间到江南
	2013 年 7 月 20 日 12:30—15:30	江淮之间		2014 年 7 月 30 日 21:00 至 31 日 01:00	江淮之间
	2014 年 6 月 1 日 01:00—04:30	江淮之间		2016 年 4 月 16 日 01:00—04:00	江淮之间
	2014 年 9 月 2 日 12:30—15:30	江淮之间		2000 年 7 月 28 日 14:39—19:40	从江淮之间到江南
	2014 年 9 月 28 日 14:00—18:00	江淮之间		2005 年 8 月 17 日 15:05—20:04	从江南到江淮之间
	2015 年 6 月 25 日 13:30—17:00	从江淮之间到江南		2006 年 8 月 3 日 08:02—15:14	淮北
	2015 年 8 月 5 日 13:00—16:30	淮北		2008 年 7 月 26 日 18:20—22:10	从江淮之间到淮北
	2016 年 5 月 6 日 21:30 至 7 日 01:00	江南		2013 年 8 月 19 日 13:54—16:40	从江南到江淮之间
	2016 年 6 月 5 日 13:00—17:00	江淮之间		2014 年 7 月 24 日 11:30—14:30	江淮之间
	2016 年 7 月 1 日 04:20—15:23	从江淮之间到江南		2015 年 8 月 8 日 16:00—19:00	江淮之间
	2016 年 7 月 15 日 14:00—18:00	从江淮之间到江南	槽后型	2002 年 5 月 27 日 18:01—22:00	从淮北到江淮之间
冷涡型	2009 年 6 月 5 日 17:04—22:56	从江淮之间到江南		2005 年 6 月 14 日 22:19 至 15 日 00:44	从淮北到江淮之间
	2016 年 6 月 15 日 00:00—03:00	从淮北到江淮之间		2016 年 5 月 31 日 19:30 至 6 月 1 日 02:00	从淮北到江淮之间
				2017 年 5 月 14 日 12:00—15:22	江淮之间

表 2 五种天气型对应的物理量

Table 2 Physical statistics of squall lines classified into five synoptic patterns

类型	数量/个	CAPE /J · kg ⁻¹	CIN /J · kg ⁻¹	SI/K	0~6 km 垂直风 切变/m · s ⁻¹	LCL/hPa	KI/K
浅槽	15	1350	71.1	-1.08	11.3	948	35.8
深槽	7	2020	70	-0.86	12.2	960	37.2
槽后	4	1400	176	-1.19	17.9	890	31.7
冷涡	2	2036	163	1.96	27.4	840	25.5
高压边缘	7	1520	122.5	-1.79	10.7	931	37.3
平均值		1860	101	-0.67	15	922	34.4

6.3℃。飊线移速最快,平均为 17.6 m · s⁻¹。此型与槽后型相似,有前倾结构,850 hPa 槽线在 500 hPa 槽线以西约 5 个纬距。其明显特征是冷涡

位于东北,高空很强的冷平流叠加在低空暖湿区上空,形成明显的位势不稳定层结。CAPE 平均为 2036 J · kg⁻¹;0~6 km 垂直风切变在所有天气型

飊线中是最大的,平均值为 $27.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。虽然在所有类型中,此型的 CIN 是最大的、LCL 是最高的、湿度条件是最差的,但低层风场辐合强,上升运动一旦触发对流发生,对流会发展得特别旺盛。

统计显示,这五种天气型飊线 CAPE 均大于 $1300 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,850 hPa 温度大于 20°C ,LCL 多低于 930 hPa,0~6 km 垂直风切变均大于 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。说明这五种天气型的温度、气压、风场等为飊线的产生提供了低层高温高湿,层结位势不稳定,有利于上升运动触发和维持强对流的环境。

6 结论与讨论

(1) 2000—2017 年 35 个飊线的时空特征统计显示,江淮飊线主要形成于长江以北的平原地区;飊线的发生有明显的月变化和日变化,约 40% 的飊线发生在 7 月,约 37% 的飊线发生在中午到傍晚。飊线形成于中午到下午,在午后到傍晚成熟,下午至夜间消亡。

(2) 约 42.9% 的飊线生命史为 3~4 h,约 28.6% 的长度是 200~250 km,约 51.4% 的最大雷达回波强度集中在 60~65 dBz,飊线雷达回波核高度多在 5 km 左右,约 51.4% 的地面降温为 5~7℃。

(3) 江北的飊线多向东南方向移动,江南的飊线多向西北移动;移速较集中于 $8\sim 16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

(4) 飊线的主要形成方式为 BA 型;组织方式以 TS 型居多;主要消散方式为 RBL 型。

(5) 江淮飊线多出现在西风槽前。深槽型飊线引起的地面降温幅度最大,约为 9.5°C 。深槽型和冷涡型飊线的雷达回波核较高,约为 6 km,天气也更为剧烈,除了降水和雷暴大风外,还可出现冰雹或龙卷。

(6) CAPE 大于 $1300 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,850 hPa 温度大于 20°C ,LCL 低于 930 hPa,0~6 km 垂直风切变大于 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,即低层高温潮湿、层结位势不稳定、一定的风场切变等有利于出现飊线。

本文统计飊线个例仅 35 个,而且对 2000 年以来江淮发生的飊线个例统计难免会有疏漏,因此分析的江淮飊线特征仅有一定的代表意义。探空站多与飊线发生地有一定的距离,根据探空资料计算的统计结果只能在一定程度上代表飊线发生的天气背景特征。飊线是中尺度系统,受观测时空分辨率和数值模拟能力的限制,无法统计分析飊线的细节特

征,如冷池、内部流场等。但本文对 2000 年以来江淮飊线特征的归类分析有助于天气预报员了解其发生发展的环流背景、时空特征、雷达中尺度特征和相伴随的剧烈天气,对于今后研究江淮飊线的形成机理和结构特征具有重要意义,对于飊线的临近预报也具有重要指导价值。

参考文献

- 曹治强,方宗义,方翔,2008. 2007 年 7 月皖苏北部龙卷风初步分析[J]. 气象,34(7):15-19. Cao Z Q, Fang Z Y, Fang X, 2008. Analysis of tornado events in north Anhui and Jiangsu Provinces in July 2007[J]. Meteor Mon, 34(7):15-19(in Chinese).
- 丁一汇,李鸿洲,章名立,等,1982. 我国飊线发生条件的研究[J]. 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[J]. Sci Atmos Sinica, 6(1):18-27(in Chinese).
- 冯晋勤,俞小鼎,蔡菁,等,2017. 福建春季西南急流暖湿强迫背景下的强对流天气流型配置及环境条件分析[J]. 气象,43(11):1354-1363. Feng J Q, Yu X D, Cai J, et al, 2017. Flow pattern and ambient condition analysis of spring Southwest low-level jet warm sector severe convection in Fujian[J]. Meteor Mon, 43(11):1354-1363(in Chinese).
- 高梦竹,陈耀登,章丽娜,等,2017. 对流移入杭州湾后飊线发展机制分析[J]. 气象,43(1):56-66. Gao M Z, Chen Y D, Zhang L N, et al, 2017. Analysis on influence of convection after moving into Hangzhou Bay on the development of squall line[J]. Meteor Mon, 43(1):56-66(in Chinese).
- 李英,陈联寿,钱传海,等,2010. 登陆台风 Rananim(0414)环流内中尺度辐合线的形成和发展研究[J]. 气象学报,68(5):640-651. Li Y, Chen L S, Qian C H, et al, 2010. A study of the formation and development of a mesoscale convergence line within Typhoon Rananim(0414)[J]. Acta Meteor Sinica, 68(5):640-651(in Chinese).
- 陆汉城,杨国祥,2004. 中尺度天气原理和预报[M]. 北京:气象出版社:108-110. Lu H C, Yang G X, 2004. Mesoscale Weather Theory and Nowcast[M]. Beijing: China Meteorological Press: 108-110(in Chinese).
- 孟智勇,徐祥德,陈联寿,2002. 9406 号台风与中纬度系统相互作用的中尺度特征[J]. 气象学报,60(1):31-39. Meng Z Y, Xu X D, Chen L S, 2002. Mesoscale characteristics of the interaction between TC Tim(9406) and mid-latitude circulation[J]. Acta Meteor Sinica, 60(1):31-39(in Chinese).
- 唐明晖,姚秀萍,王强,等,2017. 不同强度台风相伴随的内陆台前飊线对比分析[J]. 气象,43(8):912-923. Tang M H, Yao X P, Wang Q, et al, 2017. Contrastive analysis of inland pre-TC squall line accompanied by typhoons with different intensities[J]. Meteor Mon, 43(8):912-923(in Chinese).
- 杨珊珊,湛芸,李晟祺,等,2016. 冷涡背景下飊线过程统计分析[J]. 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[J]. Meteor Mon, 42(9):1079-1089(in Chinese).
- 姚晨,郑媛媛,张雪晨,2012.长生命史飏线在强、弱对流降水过程中的异同点分析[J].高原气象,31(5):1366-1375. Yao C, Zheng Y Y, Zhang X C, 2012. Analyse on different and common points of long life squall line in severe, weak convection precipitation processes[J]. Plateau Meteor, 31(5):1366-1375(in Chinese).
- 俞小鼎,郑媛媛,张爱民,等,2006.安徽一次强烈龙卷的多普勒天气雷达分析[J].高原气象,25(5):914-924. Yu X D, Zheng Y Y, Zhang A M, et al, 2006. The detection of a severe tornado event in Anhui with China New Generation Weather Radar[J]. Plateau Meteor, 25(5):914-924(in Chinese).
- 张宁,苏爱芳,史一丛,2017.2014年一次飏线的发展维持原因分析[J].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 [J]. Meteor Mon, 43(11):1383-1392(in Chinese).
- 朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等,1992.天气学原理和方法[M].北京:气象出版社:574-586. Zhu Q G, Lin J R, Shou S W, et al, 1992. Synoptic Meteorology Theory and Method[M]. Beijing: China Meteorological Press:574-586(in Chinese).
- Bluestein H B, Jain M H, 1985. Formation of mesoscale lines of precipitation; severe squall lines in Oklahoma during the spring[J]. J Atmos Sci, 42, 1711-1732.
- Chen G T J, Chou H C, 1993. General characteristics of squall lines observed in TAMEX[J]. Mon Wea Rev, 121(3):726-733.
- Geerts B, 1998. Mesoscale convective systems in the southeast United States during 1994-95: a survey[J]. Wea Forecasting, 13(3):860-869.
- Meng Z Y, Yan D C, Zhang Y J, 2013. General features of squall lines in east China[J]. Mon Wea Rev, 141(5):1629-1647.
- Meng Z Y, Zhang Y J, 2012. On the squall lines preceding landfalling tropical cyclones in China[J]. Mon Wea Rev, 140(2):445-470.
- Parker M D, Johnson R H, 2000. Organizational modes of midlatitude mesoscale convective systems[J]. Mon Wea Rev, 128(10):3413-3426.
- Stoelinga M T, Locatelli J D, Schwartz R D, et al, 2003. Is a cold pool necessary for the maintenance of a squall line produced by a cold front aloft[J]. Mon Wea Rev, 131(1):95-115.
- Weisman M L, 1993. The genesis of severe, long-lived bow echoes [J]. J Atmos Sci, 50(4):645-670.