

2004年7月12日上海飊线天气过程分析^①

张芳华^{1,2} 张涛¹ 周庆亮¹ 杨克明¹

(1. 国家气象中心,北京 100081; 2. 中国气象科学研究院灾害天气重点实验室)

提 要

利用上海自动观测站资料、NCEP $1^\circ \times 1^\circ$ 的逐6小时分析资料、水汽云图和WSR-88D多普勒雷达探测等资料,对2004年7月12日上海飊线天气过程进行天气动力学诊断分析。结果表明:上海处在干冷、下暖湿的不稳定大气层结中,对流层上层干冷空气的侵入和边界层暖湿气流强烈辐合是飊线天气的触发机制。飊线以断续线型与后续线型相结合的形式形成,在对流单体的右侧不断新生单体,最终连接成弓状回波带,给上海带来雷雨大风。

关键词: 飊线 螺旋度 干侵入 弓状回波带

引 言

飊线是一种带(线)状的中尺度深厚对流系统,是非锋面的或狭窄的活跃雷暴带,其水平尺度通常为几百公里,典型生命史约6~12h^[1]。常带来灾害性的大风和局地暴雨,有时还伴有冰雹和龙卷风,是一种具有短时巨大破坏力的天气系统。

2004年7月12日17时30分~19时30分前后,上海市发生了一次飊线天气过程,造成人员伤亡和严重的经济损失。全市大多数自动站均观测到 $12\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上的大风,其中青浦区商塌镇17时38分最大阵风达 $29\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ (11级),闵行华漕地区18时前后还出现了局地龙卷风。崇明跃进农场过程降水量最大,达28.4mm;静安次之,为26.5mm。

本文利用常规观测和自动站观测资料、NCEP $1^\circ \times 1^\circ$ 的逐6小时分析资料以及水汽云图、雷达资料,从天气学条件、物理量场诊断和遥感图像判识等方面全方位分析这次飊线的活动规律和物理成因,力求加强对该类天气过程的认识,提高其预报准确率。

1 地面气象要素变化特征

镶嵌在飊线中的强雷暴常常引起局部地面风向突变、风速剧增、气压涌升、湿度增大和温度骤降,有时还伴有冰雹、龙卷风等灾害

性天气。这次飊线过境时上海各测站的气象要素有下述变化特征。

①带状大风区:12日17~20时,上海市有25个测站出现了 $12\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上的阵风,其余测站也大多为 $7\sim 10\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。从各时段阵风分布图(图略)上可看出,最大风速区呈NE—SW向带状分布,强风出现在17时30分~19时10分,主要影响上海市西部和中北部。②气压涌升:从逐小时变压来看,17时,上海大部 $\Delta P_1 \leq 0$;1小时后,西部部分测站 ΔP_1 突增至 $1.6\sim 2.0\text{hPa}$,其余地区 ΔP_1 均在 0.6hPa 以下;19时,市区气压明显升高, ΔP_1 普遍为 $1.6\sim 2.2\text{hPa}$,中心位于徐家汇,数值达 2.3hPa 。③湿度增大:大部分测站10~30分钟增湿 $15\%\sim 40\%$,相对湿度增大比风速增大持续时间更长,这可能与降水的增湿作用有关。④温度骤降:12日17时,上海市大部地区的气温为 $33\sim 36^\circ\text{C}$,30分钟后西部的青浦区商塌镇、朱家角等地气温明显下降,17时30~42分商塌镇气温从 31.1°C 降至 23.5°C ,12分钟降温 7.6°C ,随后朱家角也出现了同样的降温率。18时12分市区开始大幅度降温,30分钟之后气温即

^① 本文获中国气象局气象新技术推广项目灾害天气国家重点实验室开放课题“对流参数在长江中下游地区强雷暴天气预报中的应用”资助

为25℃左右,普遍下降约8℃。⑤过程降水量分布不均:降水中心位于市区,集中出现在18时18分~19时,其中普陀、静安和徐家汇6分钟最大雨量分别达16.3、15.8和10.7mm,具有很强的局地性和突发性。

从青浦站每分钟观测资料(图1)可见,风速猛然增大至极值后迅速减小,为各要素变化剧烈之首;气压最先开始升高,始终处于增大状态,但变化较平缓,可能与日变化有关;气温和相对湿度变化相当,达到各自极值后便稳定少变。

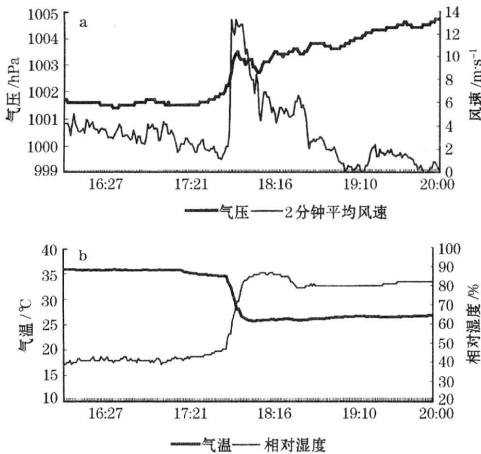


图1 2004年7月12日16~20时上海青浦自动站气压和风速(a)、气温和相对湿度(b)变化曲线

2 大尺度环流背景和影响天气系统

飊线的形成与大尺度环流形势和天气尺度影响系统密切相关。7月中旬前期,500hPa上欧亚中高纬度维持稳定的两槽一脊经向环流形势,我国西北地区到贝加尔湖以东为NE—SW向的阻塞高压脊,两个长波槽分别位于乌拉尔山和我国华北、东北地区至长江中下游一带。西北太平洋副热带高压呈带状分布在南海及台湾以东洋面。11~12日副高缓慢北抬加强,致使我国东部低槽与副高之间建立了一支强劲的低空西南急流。在急流西北侧的河南北部生成一个低涡,低涡后部偏北气流与西南急流在我国东部构成低涡切变形势。低涡切变线是产生飊线的天气尺度影响系统之一。贝加尔湖高压前部横槽中不断有冷空气向西移,而后沿青藏高原东部大举南下与副高西北侧的强西南暖湿气

流交汇于黄河下游至长江中下游一带,较强的冷空气激发暖湿气流产生飊线。在其产生之前,上海测站从低层到200hPa均为槽前西南气流控制,风向变化虽小,但风速垂直切变很大。12日08时,地面风速仅为 $1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,850和700hPa上西南风速却分别达16和 $19\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,地面与850、700hPa层之间的纬向风速垂直切变分别为 $9.0\times 10^{-3}\text{s}^{-1}$ 和 $3.9\times 10^{-3}\text{s}^{-1}$,与过去研究^[2]认为形成强雷暴的纬向风速垂直切变一般大于 $3.5\times 10^{-3}\text{s}^{-1}$ 的结论一致。

10~12日上海最高气温均超过35℃,由12日17时地面图(图略)可见,移至渤海湾的气旋所携带的冷空气前锋已抵达江南北部,锋后的江苏南部出现了阵雨和雷阵雨,3小时降温4~8℃,表明冷空气较强。长江下游沿江一带正处在 $T-T_d$ 等值线密集区中,上海的 $T-T_d$ 等值线梯度最大。正值此时地面冷锋过境,锋后较强冷空气逼近上海,激发了强露点锋上对流扰动发生发展^[3],从而产生雷雨大风强对流天气。

3 物理量场诊断分析

利用NCEP $1^\circ\times 1^\circ$ 的逐6小时分析资料计算物理量场,配合GOES-9水汽云图,对飊线天气过程进行诊断分析,以探讨其成因。

3.1 对流不稳定度

强对流天气的发生发展是不稳定能量积聚和释放的过程。在本次过程中,沿着低空急流在长江下游地区有一向东北方向延伸的高能舌。12日14时之前,高能舌中心位置略偏北,上海市大部地区 $K<35^\circ\text{C}$,14~20时则处于高能舌中心区,随后逐渐减小。分析发现,长江三角洲地区的强对流天气出现在 $K>36^\circ\text{C}$ 的高能舌中心与850hPa低空急流出口区重合的区域。

有研究^[4]指出大气对流不稳定度 $\Delta\theta_{e500-850}$ 的负值中心最容易产生雷暴大风。12日08时上海市处于 $\Delta\theta_{e500-850}$ 负大值区的外缘,14时东南沿海的对流不稳定度迅速增强,形成一条NE—SW向的 $\Delta\theta_{e500-850}$ 负大值区,上海正处于负值中心区域。雷雨大风天气过后,上海 $\Delta\theta_{e500-850}$ 负值减小,大气层结趋于稳定。

上海市对流不稳定度增大是由于12日

14时,1000~850hPa上从江苏东南部到上海盛行一支强暖平流,15时上海市区的气温普遍增至36~37℃,其上空700~500hPa层受低涡南部南下的冷空气控制,盛行明显的冷平流,从而形成上干冷、下暖湿的不稳定层结。高空冷平流冲击低空强暖湿空气区,激发中尺度对流系统飚线形成,产生强对流天气。

3.2 水汽条件分析

从850hPa逐6小时水汽通量演变(图略)可见,从11日20时开始,长江下游沿江地区至江南北部有一NE—SW向的水汽通量大值区,中心值为 $20\sim 26\text{g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$ 。从风场和GOES-9水汽云图可追溯到低层水汽来源于孟加拉湾和南海。这条水汽输送带的北端与涡旋云系相连,西侧为一“Y”型干区,上海位于其东侧的干区内。12日午后湿区缓慢向东北方向移动,在东侧干湿交界处偏于湿区一侧有若干个对流云团组成一条NE—SW向的对流云带。17时,对流云带上A云团接近上海北部开始影响崇明岛(图2a,封二),B云团还在浙江北部。18时,向东北方向移动的B云团迅速加强并已影响上海西部(图2b,封二),青浦站17时45分阵风仅 $6\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,46分急剧增大到 $12.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,47分竟达 $22.2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。19时,A、B两云团合并后继续向东北方向移动,20时移出上海(图略)。在该次过程中,上海位于水汽输送带的边缘,水汽含量不足够充沛,因而降雨相对较弱。

3.3 触发机制分析

3.3.1 边界层辐合上升运动

从 $31\sim 32^\circ\text{N}$, $121\sim 122^\circ\text{E}$ 上海附近平均散度垂直剖面(图略)可见,7月12日14~20时,1000~100hPa层呈现辐合辐散相间分布,850hPa以下为辐合区,辐合中心位于边界层,数值达 $-2\times 10^{-5}\text{s}^{-1}$,850~650hPa层是弱辐散区,650~400hPa层又为弱辐合区,400hPa以上是辐散区,辐散中心在250hPa附近。边界层强烈辐合抬升是对流不稳定能量释放的原因之一,辐合辐散交替出现,揭示了大气运动的复杂性。

3.3.2 局地风暴相对螺旋度的贡献

局地风暴相对螺旋度可以表示为:

$$H_D = \mathbf{V} \cdot (\nabla \times \mathbf{V})$$

对于强对流天气,由于涡度垂直分量比风垂直切变要小一个量级,可以忽略涡度的垂直分量。故上式简化为:

$$H_D = -k \cdot \left[(\mathbf{V}_H - \mathbf{C}) \times \frac{\partial \mathbf{V}_H}{\partial z} dz \right]$$

其中以850~400hPa气层中的平均风向向右偏 40° ,风速大小的75%作为该点的风暴速度 \mathbf{C} 。

采用文献[5]用探空资料根据解析几何性质得出的计算公式:

$$H_D = \frac{1}{h_{n+1} - h_n} [(u_{n+1} - c_x)(v_n - c_y) - (u_n - c_x)(v_{n+1} - c_y)]$$

经对1000~700hPa各层局地风暴相对螺旋度的计算结果分析,发现850hPa上螺旋度与强对流天气出现的时间和落区对应关系较好。12日08时,上海市有正螺旋度发展,14时大值中心增至 $40\times 10^{-3}\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ (图3)。分析螺旋度水平分布(图略)还发现,其大值中心基本位于低空急流区内。这说明环境风场对气旋性涡度输送有积极作用,经低层的辐合上升气流引导,使更多的水平涡度转化为垂直涡度,有利于强对流天气的发生。

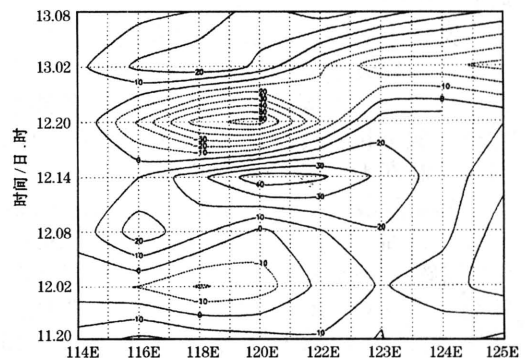


图3 沿 31°N 850hPa局地相对螺旋度纬向-时间剖面(单位: $10^{-3}\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)

3.3.3 干侵入对飚线发生发展的作用

干侵入是源于对流层高层下沉至底层的高位涡低湿空气,它在气旋爆发性发展、暴雨增幅、位势不稳定增强、中气旋的发生发展等方面起重要的促进作用,有利于龙卷、飚线的形成发展^[6]。

本文分别用干位涡PV和假相当位温 θ_w 来表示干冷和暖湿空气。沿 31°N 的PV

与 θ_w 的垂直分布演变表明,12日08时对流层高层的高 PV 柱向东下传至边界层,0.8PVU 的等值线到达 800hPa 层并接近 118°E,伴随的 θ_w 值为 342K(图 4a)。14 时这支高 PV 低 θ_w 气柱整体继续向东下传,而 121°E 附近低层的 θ_w 达 356K 以上(图 4b),

因此这支干冷空气叠加在低层高 θ_w 暖湿气流之上,增强了位势不稳定,容易触发对流。20 时后,虽然 PV 柱继续向东移动,但由于低层 θ_w 减小,使得高低层之间干与湿、冷与暖的对比减小,故难以引发强对流。

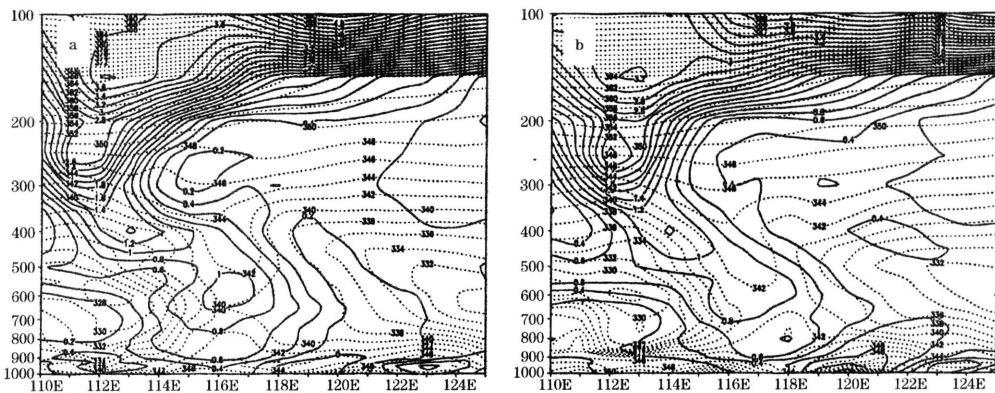


图 4 2004 年 7 月 12 日 08 时(a)、14 时(b)沿 31°N 的干位涡 PV(实线,单位:PVU, 1PVU = $10^{-6} \text{ m}^{-2} \cdot \text{K} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$)和假相当位温(点线,单位:K)垂直剖面

4 雷达资料分析

我们利用上海 WSR-88D 多普勒雷达探测资料,分析了这次飊线过程中中尺度系统发生发展的活动规律。

4.1 组合反射率(CR)的演变

从 CR 演变可看出,这次飊线回波以断续线型与后续线型相结合的形式形成。即在低层辐合线上不断有对流单体生成,并逐渐弥合组成带状回波,而且存在一回波发生源,回波不断新生发展相互连接形成飊线。

初始阶段(图 5a,封二):15 时 57 分,从浙江西北部、江苏东南部到东海海面 NE—SW 向约 330km 的轴线上共有 5 个对流单体或对流单体群。最大的一个 A 位于浙江西北部,直径为 70km;最小的 E 在江苏东南部海上,直径仅 18km;D 也在海上;B 和 C 单体群相距较近。

发展阶段(图 5b~f,封二):回波带上的对流单体在移动过程中不断发展,且有 F、G、H 新对流单体生成,它们出现在原单体的东南方向,是风暴向右传播的结果。17 时 25~48 分,回波带最南端的 A 单体首先发展成弓状,在上海西部青浦一带造成 $22 \sim 29 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的强风。同时,各单体逐渐相连形成飊线带状回波。

成熟阶段(图 5g,封二):18 时前后,A、B、C 三个对流单体再次迅速发展,并与新生单体连接,形成明显的弓状回波带,表明飊线发展成熟阶段。它向 ENE 方向移动,上海市区普遍出现雷雨大风。

减弱阶段(图 5h,封二):19 时 04 分,弓状回波特征仍然很明显,但飊线主体基本移出上海。

4.2 径向速度场分析

从雷达基本径向速度场可看到飊线前沿的阵风锋,表现为一条明显的风向切变线,其西北侧是朝向雷达的西北风,对应风暴前沿的阵风,东南侧是飊线前部的弱西南风(图略)。

风暴相对速度 SRM 是基本径向速度减去风暴移动速度的结果,反映风暴的相对运动状态,相对于基本径向速度而言,能更好地揭示风暴的结构。飊线上几个对流单体约在 17 时前后进入 SRM 可观测区,对应 B 单体有一对正负速度中心,风速绝对值约 $10 \sim 15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,相距约 9km,具有典型的中气旋结构。同时对流单体 B 的东北方约 37km C 单体处也有一个中气旋。因对流单体 A 正处于发展阶段,还未形成中气旋结构,仅有两个辐合入流的速度中心,对比 CR 可以看出,

此时为回波强度加强的阶段,说明风暴在迅速发展。约半小时后,17时27分SRM上A回波前后一对辐合中心前部出现了明显的中气旋结构。此后,A回波右侧前部新生若干个对流单体并爆发性发展,仅20分钟回波强度就增强到60dBz,新生的单体与A回波相连接组成飑线弓状回波的南段,呈“7”字型。B、C回波右侧前方也爆发性发展出多个新对流单体。至此,A、B、C及其周围新对流单体相连接构成飑线鼎盛时期的弓状回波。该回波自西向东影响上海市,造成了7~11级大风和分布不均的雷雨。19时之后飑线主体移入东海,几个爆发性的单体迅速消亡,中气旋结构减弱消失,雷雨大风天气结束。

5 结论

(1)这次飑线天气过程发生在欧亚中高纬度两槽一脊的经向环流形势下,西风槽、低涡切变线和地面冷锋是天气尺度的主要影响系统。中尺度对流系统飑线以断续线型与后续线型相结合的形式形成,在低层辐合线上不断新生对流单体,部分发展具有中气旋结构,它们弥合组成带状飑线回波带,最终连接成弓状回波带袭击上海。

(2)飑线过境短时之内,风速猛然增大至极值后迅速减小,为各要素变化剧烈之首;气压最先开始升高,始终处于增大状态,但变化较平缓;气温和相对湿度几乎同步变化,且达

到各自极值后便稳定少变。

(3)飑线天气过程中,上海市处在上干冷、下暖湿的不稳定大气层结中,对流层高层干冷空气的侵入和边界层的强烈辐合抬升是强对流天气的触发机制。强对流天气出现在 $K > 36^{\circ}\text{C}$ 的高能舌与850hPa低空急流出口区重合的区域。由于气层中水汽含量不够充足,并且低层风速垂直切变大,故上海市风强而降雨相对较弱。飑线天气发生之前850hPa的局地相对风暴螺旋度增大,更多的气旋性涡度转化为垂直涡度,有利于强对流天气的发生。

参考文献

- 1 张培昌,杜秉玉,戴铁丞. 雷达气象学. 北京:气象出版社,2001:420~426.
- 2 丁一汇. 高等天气学. 北京:气象出版社,1991:572~573.
- 3 谢梦莉,黄京平,俞炳. 一次罕见的飑线天气过程分析. 气象,2002,28(7):51~54.
- 4 朱乾根,林锦瑞,寿绍文等. 天气学原理. 北京:气象出版社,2000:448~449.
- 5 Davies-Jones, R., D. Burgess, and M. Foster. Test of helicity as a tornado forecast parameter. Preprints. 16th Conf. on Severe Local Storms, A. M. S., 1990:588~592.
- 6 于玉斌,姚秀萍. 干侵入的研究及其应用进展. 气象学报,2003,61(6):769~778.

Dynamic Diagnosis of a Squall Line in Shanghai on 12 July 2004

Zhang Fanghua Zhang Tao Zhou Qingliang Yang Keming

(National Meteorological Center, Beijing 100081)

Abstract

A squall line weather process occurred in Shanghai on July 12 2004 is diagnosed with various kinds of observational data, such as the automatic meteorological station data, satellite water vapor image and Doppler radar echo, and NCEP reanalysis data of $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ with 6h interval. The results show that Shanghai is located in an unstable stratification and the dry and cold intrusion down from the upper troposphere and the strong convergence of the moist and warm air in the boundary layer are the trigger mechanisms. The radar echo shows that the squall line is shaped by the joint type of line of discontinuity and line of rearward continuity. The bow echo belt causing thunderstorm and gust in Shanghai is the connection of the convective cells and the new ones appearing on the right of them.

Key Words: squall line helicity dry intrusion bow echo