

上海 2004 年 7 月 12 日飊线系统中尺度分析研究^{*}

刘淑媛¹ 孙 健² 杨引明³

1 空军气象中心, 北京, 100843

2 中国气象科学研究院, 北京, 100081

3 上海中心气象台, 上海, 200030

摘 要

利用上海地基多普勒雷达观测资料反演 2004 年 7 月 12 日 17—19 时(北京时, 下同)上海市一次飊线过程的水平风场结构, 并用自动站观测的风场资料、卫星云图以及根据雷达回波和时间的连续性和径向速度的特征是否吻合等方面进行综合检验, 结果表明反演风场可对飊线进行详尽分析提供可靠的高分辨率资料。在综合多种观测资料的基础上, 对这次飊线过程的中尺度系统进行分析, 结果表明: (1) 这次过程是前倾冷锋前暖区 3 个主要的 β 中尺度对流单体和新生的小单体共同作用所致, 这 3 个主要的 β 中尺度对流单体不是通常个例表现的线状排列, 而是冷锋前的两个单体与相对方向的一个单体共同作用, 在气团的边缘形成强烈风切变; (2) 200 多公里长的飊线是由具有独立结构的较小的对流系统串成。在飊线前部存在中尺度的气旋流场, 飊线北部末端存在一个气旋流场, 南部末端存在一个反气旋流场。而每个单独的弓状回波有自己独立的结构, 包括弓状回波后部很强的辐散气流和飊前低压。文中给出了水平风场和回波的结构示意图; (3) 在飊线出现以前, 低空存在有利于不稳定天气产生的顺时针垂直风切变, 而高层则是逆时针垂直风切变。此外, 低层入侵的浅薄冷空气为飊线过程提供形成低层不稳定的又一有利因素; (4) 飊线中对流单体的移动方向与低层风场方向存在夹角, 与锋面云带整体向东移动的趋势也不同, 但与 1.5 km 以上到 4.5 km 左右的西南气流方向相同, 即整体向东北方向移动。这种特征可以对系统短时间移动方向的预报提供帮助。

关键词: 飊线, 弓状回波, 中尺度云团, 风切变。

1 引 言

飊线是一种中小尺度天气系统, 是气压和风的极度不连续线, 由多个雷暴单体或雷暴群组成狭窄的强对流天气带。沿着飊线可出现雷暴、暴雨、大风、冰雹、龙卷风等强对流天气, 具有突发性强、破坏力大、不可抗拒等特点, 是一种很具破坏力的严重灾害性天气, 常造成巨大的财产损失和人员伤亡。因此对其进行形成机理和结构的研究以便较早地做出预报, 减少其破坏是非常必要的。但飊线的水平范围很小, 长度几十公里到几百公里。维持时间多为 4—10 h。由于形成、发展迅速, 尺度小, 常规观测资料无法对其进行监测, 因此进行预报和中小尺度结

构的分析难度很大。

长期以来对飊线形成的大尺度天气形势已经有了很多的分析结果^[1-2], 观测分析表明通常飊线可能发生在冷暖锋或切变线附近。由于资料的限制, 国内对飊线的风场分析大多利用加密地面观测资料、数值模拟和直接使用多普勒雷达观测的反射率和径向风场资料进行研究^[3-4]。通过对多普勒雷达降水回波的分析, 气象工作者得到了强对流天气发生的一些回波特征(如弱回波带^[5]和逆风区), 并用以提高预报水平。国外因为地基双多普勒雷达布网较密, 故一般利用地基双多普勒雷达或机载雷达资料反演风场进行飊线风场和动力结构分析研究^[6-14], 为飊线预报提供有力的理论依据。Wilson 等^[15]的

^{*} 初稿时间: 2005 年 12 月 28 日; 修改稿时间: 2006 年 6 月 15 日。

资助项目: 国家自然科学基金资助项目(40405002)。

作者简介: 刘淑媛, 女, 1972 年生, 博士, 高工, 研究方向: 雷达气象、中尺度气象。E-mail: shuyliu@water.pku.edu.cn

研究发现,当飊线系统的主体回波带前的狭窄弱回波带远离飊线系统的主体时,预示着飊线系统即将减弱。但双雷达观测有一个时间同步和雷达基本标定要一致的问题,需要两个测站的协同配合,而且两雷达重叠地区面积有限,能捕捉到的个例较少。机载雷达和加密地面观测一般也只能是应用于科学实验中。此外数值模拟方法虽然可以从更广泛的角度对个例进行科研分析,但需要实测资料的检验。

相比较而言,地基单多普勒雷达可以及时得到观测范围内的高分辨率资料。如果能从地基单多普勒雷达高分辨率资料直接反演飊线风场,不仅可以在科研中更好地用于风场研究,也可应用于机场和台站业务,为飊线的监测和预报提供重要手段,做到及早预报,以减轻灾害的发生。但到目前为止还没有使用地基单多普勒雷达径向风场反演出飊线水平风场结构,因此研究利用单多普勒雷达资料分析飊线风场有非常重要的意义。

2004 年 7 月 12 日 15 时(北京时,下同)在江苏溧阳一带发展起来的雷暴云向东北偏东移动,17:30 前后到崇明站后经吕泗东移入海,这次过程强度相对较小。但 17:30 到 19:30 上海市出现第 2 次飊线天气。自西向东突遭 7—11 级雷雨大风袭击,闵行华漕还出现了龙卷风,全市普降小到中雨,个别地方有大雨。这次强对流天气来势迅猛,移速特快,以风灾为主,造成多处房屋倒塌,死亡 7 人,伤多人,部分地区还因高压线损坏而停电^[16]。

本文利用上海地基单多普勒雷达资料经过检验的反演风场结合常规资料的客观分析、自动站观测的风场、卫星云图等资料对 2004 年 7 月 12 日 17:30 到 19:30 造成上海市强烈风灾的飊线过程的中尺度对流系统的分布、水平风场和雷达回波进行详细分析。

2 天气概况

2004 年 7 月 11—12 日副热带高压(副高)缓慢北抬加强,中国东部低槽与副高之间建立了一支强劲的低空西南急流。12 日 20 时在中国东北、华北到长江中下游一带 500 hPa(图略)的高空槽加深,上海处于槽前暖区,副高 588 dagpm 线的西北侧,槽后冷平流。低槽与副高之间强劲的低空西南急流控制上海上空,西南低空急流带来暖湿气流。低层 850 hPa(图 1),河南、山东到大连一带的低涡,形成

了山东—安徽—河南—湖北—湖南一线冷涡后部的偏北气流与西南急流间切变线。这种低涡切变形势是有利于飊线生成的天气尺度系统之一。

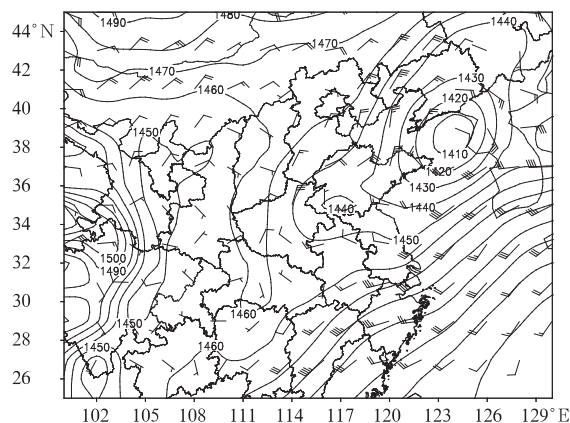


图 1 2004 年 7 月 12 日 20:00 850 hPa 位势高度和风场

Fig. 1 850 hPa geopotential heights and wind vectors at 20:00 BST 12 July 2004

2004 年 7 月 12 日 17 时左右,上海和周边地区最高气温上升到 37℃左右,故在雷暴高压前形成了中尺度强锋区,有利于飊线上的雷暴进一步发展。18 时上海市区出现飊线天气,自西向东扫过。飊线经过处,温度迅速下降 10℃左右。飊线天气给上海中北部地区造成了严重的短时强风灾害,最大雨量出现在崇明县跃进农场为 28.4 mm,青浦区商榻出现了 29 m/s 的雷雨大风,飊线过后风向从偏东南风转为西北风。

3 与飊线相关的中尺度云团演变分析

为了从较大范围和视野分析造成上海此次强风灾害的中小尺度天气系统,首先从 GMS 卫星红外云图进行分析。从 7 月 12 日 16:25—18:13 约半小时一次的红外云图(彩图 2)可以看到,一条东北西南走向的锋面云带,云带前是多个中尺度对流云团,这些中小尺度的对流系统就是直接组成飊线的天气系统。

16:25 的云图上(图 2a),上海西北部即将影响上海的 β 中尺度云团 A 处于发展旺盛期,锋面云带上又有一个 β 中尺度云团向东伸展。

17:01(图 2b) β 中尺度云团 A 与其东北部的一个小的云团合并并略向东南移动,最大直径达到约 200 km。锋面云带上向东伸展的 β 中尺度云团前部

新生一个强盛的 β 中尺度对流系统, 云顶温度 $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下。而在半小时的时间内, 上海南部宁波一带出现了一个云顶温度 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的 β 中尺度的对流云团 C, 虽然直径只有约 30 km , 但从云顶温度看, 显然对流旺盛。在后面的分析也可以看到, 云团 C 在其后影响上海的强风灾害中扮演了重要角色。从两个时次的云图看, 东北—西南走向的锋面云带是向东移动的, 云带前发展起来的一系列中尺度对流云团则整体在向东北方向移动。

17:25(图 2c), A, B 云团略向东北移动, 同时在加强扩展; 上海处于 A, B 两个云团的边缘影响下; 同时东南 β 中尺度的云团 C 正在迅速发展并向北移

动。3 个中尺度云团云顶温度均 $\leq -60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

18:13(图 2d), A 云团在向东北方向移动的同时向东南伸展; B 云团在向东北方向移动, 同时向东南伸展, 由于在不断发展扩大, 其东南部边缘一直在影响上海地区; 在 A、B 云团之间一个尺度很小但强度很强的 γ 中尺度云团迅速发展起来; C 云团在向东北发展、移动, 其北部已经开始影响上海。A、B 云团的东、南部边缘 TBB 等值线密集区, 说明云体边缘陡直、对流非常旺盛, 强降水通常发生在这里。这一位置正好位于上海地区的上空。表 1 给出了根据云团中心最低温度估计的中尺度云团的区域中心位置, 可以清楚地看到云团的移动方向。

表 1 中尺度云团位置
Table. 1 Distribution of meso-scale cloud clusters

云团	16:25	17:01	17:25	18:13
A	32°N, 120.2°E	31.8°N, 120.7°E	32°N, 121°E	32.5°N, 121°E
B		30.8°N, 120.2°E	31°N, 120.5°E	31.5°N, 121°E
C	(未生成)	29.5°N, 121.5°E	29.7°N, 121.5°E	30.5°N, 121.5°E
D			E	31.5°N, 121.5°E

由以上分析可见, 上海 17—19 时强风灾害是 A, B, C, D 4 个中尺度对流系统共同作用的结果, 强风切变发生在气团的边缘。并且, 3 个 β 中尺度系统不是通常爬线个例表现的线状排列个体, 而是冷锋前的两个单体与相对方向的一个单体共同作用, 在气团的边缘形成强烈风切变。

4 雷达资料处理及反演风场检验

4.1 雷达资料处理

上海雷达位于 31.001°N 、 121.885°E , 海拔高度 0.58 km ; 每 6 min 一次立体扫描, 每次体扫描含 9 个仰角, 方位角分辨率为 1° , 径向分辨率为 0.25 km 。径向风风向趋近雷达为正, 远离雷达为负。

首先对径向速度进行消除噪音和速度模糊的处理, 然后使用 VAP (Velocity Azimuth Processing) 方法^[17]反演水平风场。刘淑媛等^[18]对该方法进行系统误差分析和检验表明该方法可用于分析 β 中尺度系统的风场结构。

VAP 反演风场方法为: 径向风 $v_r > 0$ 径向风向趋近雷达, $v_r < 0$ 远离雷达, α 为径向速度与风矢量的夹角, θ 为方位角, $\Delta\theta$ 为所取的两个方位角之差。则水平风速

$$v = \left| \frac{v_{r1} - v_{r2}}{2\sin\alpha\sin\Delta\theta} \right|$$

水平风向

$$\text{tg}\alpha = -\frac{v_{r1} - v_{r2}}{v_{r1} + v_{r2}} \text{ctg}\Delta\theta$$

同时, VAP 方法反演风场的径向分辨率就是雷达探测资料的径向分辨率, 一般小于 1 km 。根据切向分辨率的计算公式 ($3.14\Delta\theta R/180$), 可知在半径 125 km 以内 VAP 方法反演的水平风场切向分辨率值小于 5 km 。因此 VAP 方法反演的水平风场径向和切向分辨率均可满足分辨 $20\text{—}200\text{ km}$ 中尺度天气系统的需求。

需要说明的是, 本个例中 VAP 方法反演风场的水平网格距 1.5 km , 在绘制风场过程中, 为了避免风羽间的重叠, 采用间隔 8 或 10 个点显示。

4.2 反演风场的检验

由于体积扫描资料中高仰角资料覆盖率较低, 而且如果将 PPI 插值成 CAPPI 再反演, 容易引入人为的插值误差, 它会干扰风场的反演结果, 故使用 0.48° 仰角的径向速度进行分析。分析的爬线主要位于距雷达中心约 100 km 范围内, 到 100 km 处距地面只有 0.837 km (其计算公式为 $100\sin 0.48 = 0.837$)。所以可以将 100 km 范围内近似为水平风

分析。

4.2.1 径向速度和反射率回波检验反演风场

从雷达径向风场看(彩图 3a),正负速度的交界区在雷达西南存在折角,表明存在着明显的风切变,从径向速度场看应该是偏西风 and 偏东风的辐合。反演的水平风场表现出一条明显的风切变线(彩图 3a),风切变线前为西南偏南和东南风,线后主要为西北风或西南风。

从反演的风场看,在正径向速度回波区反演风方向都是趋近雷达的,在负径向速度回波区反演风方向都是远离雷达的,与径向风的分布吻合。在回波图像中零速度为黑色线(由于在雷达西北部资料缺测而没有画出零线),而在零速度线的位置(雷达东北和雷达西南部)可以看到两个时次的反演风场是基本与向径垂直的,这与径向速度在零线处的特性(水平风向应该与零线垂直)吻合。

彩图 3b 给出 2004 年 7 月 12 日 17:31 雷达反射率回波及反演水平风场的叠加。反射率图中显示大于 5 dBz 的回波以便更清楚地显示飊线前的弱回波带。从图可见,雷达西北方距雷达中心约 80 km 有一条弱的回波带(长约 200 km,宽不足 5 km),带后有两块强降水回波(中心强度大于 55 dBz)。雷达西北方距雷达中心约 50 km 还有一条弱的回波带,这是条飊线引起的次级涌。反演风场很好地反演出在这两条回波带(辐合线)位置上的风切变线。line1 的风场呈现东南风和西南偏南风的辐合特征;line2 在飊线的后部为偏西风,前部东南为东南风,东北为西南偏南风。

4.2.2 自动站观测风场检验反演风场

17:35(图 4),自动站观测风场上,由于站点限制,只分析出一条风切变线,距雷达约 50 km,前部为东南风和后部为西南偏南风。与回波强度和反演风场(图 3b)的对应分析表明,反演风场很好地反演出回波强度图上两条回波带(辐合线)的位置存在的风切变线。而 line1 风场前部东南风和 line2 后部的西南偏西风与自动站观测风场上的风向吻合。

4.2.3 云图检验反演风场

从 17:25 的云图(图 2c)可以看到,在云带前有多个中尺度对流云团。A 云团的东(位于上海雷达西部约 100 km)、南部和 B 云团南部(位于上海雷达西北部约 130 km)边缘 TBB 等值线密集区位于上海上空。对应 17:31 回波(图 3b)分析,A、B 两个对流



图 4 2004 年 7 月 12 日 17:35 上海市自动气象站观测风和相对湿度
(粗实线为风切变线)

ig. 4 Observed winds and relative humidity by automatic meteorological stations at 17:35 BST 12 July 2004
The thick solid line denotes the shear line)

云团的东南边缘 TBB 等值线密集区相对应两块强降水回波,而雷达南部的强降水回波 3 则与云团 C (雷达南部约 100 km)相对应。

与反演风场(图 3a)对应分析表明,反演出的 line2 回波后部西北部的西南风对应 B 云团南部的流场;雷达南部的气旋性风场对应 C 云团的流场;雷达西部 100 km 处的西南偏西和偏南风对应 A 云团南部和东南部的流场(图 3a 中实线箭头表示流场的主要方向)。反演风向与中尺度对流云团的位置配合很好,也从另一个角度说明了反演风场的正确性。

以上综合检验表明,总的风场分布是正确的,从时间演变上看风场的分布也是合理的,从而为进一步分析飊线的动力学结构提供可靠而详尽的水平风场信息。

5 雷达资料分析

5.1 回波分析

根据雷达 6 min 一次观测到的连续回波移动分析表明(图略),随着飊线回波的不断加强,16:56 在强回波带前开始出现狭窄的弱回波带并且移动缓慢。随着飊线向东北方向移动而与飊线主体逐渐接近。

17:31(图 5a),主体回波带(line2 长约 200 km,宽不足 5 km)在雷达西北方距雷达中心约 80 km,带后有两块强降水回波(中心强度大于 55 dBz),表明这个飇线是由多单体雷暴组成。对应 17:25 的云图(彩图 2c)分析,根据雷达所在位置(31.001°N , 121.885°E)可以估计强降水回波 2 位于雷达西部 100 km 处,大约为 31.1°N , 120.8°E ,与 B 云团南边缘 TBB 等值线密集区相对应;强降水回波 1 位于雷达西北部 100 km 处,大约为 31.9°N , 121.3°E ,与 A 对流云团的东南边缘 TBB 等值线密集区相对应;而雷达南部的强降水回波 3 则与云团 C 相对应。在雷达西北方距雷达中心约 50 km 还有一条狭窄的弱回波带,风场存在辐合。两条线之间为晴空区,没有降水回波,这是飇锋前强烈的低层气流出流,引起该区域空气下沉运动,造成云的消散所致。

18:00(彩图 5b),图中只存在一条弱回波带, line1 回波带已经消失。line2 系统的前沿向东南移动到距雷达约 55 km 处,其中在强回波前沿,仍有一条细的弱回波带。这以前飇线系统以约 60 km/h 的速度快速移动。详细分析可见,整个回波带是由两个弓状回波组合在一起。18:29(图 5c),飇线系统的前沿向东南移动到距雷达约 40 km 处。从回波估计,这段时间飇线系统以约 45 km/h 的速度移动,移动速度较前半小时明显减慢。从回波和移动速度看,此时飇线系统已经进入消散阶段。

由此分析也可以发现,随着飇线回波的不断加强,在强回波带前可能会出现狭窄的弱回波带,而随着飇线系统的减弱,主体回波带前狭窄的弱回波带将消失。进入消散阶段飇线系统移动速度明显减慢。

5.2 反演风场分析

利用第一部分经过验证的多普勒雷达资料反演风场进行飇线近地面层风场的特征分析。17:31(图 5a),对应回波强度图上两条回波带(辐合线)的位置, line1(彩图 3a)风场呈现东南风和西南偏南风的风辐合特征;飇线 line2 的后部为西北风,前部东南为东南风,东北为西南偏南风。对应 17:25(图 2c)的云图分析,17:31, line2 后部的西北部对应 A 云团的西南部流场;前部东南东南风对应 C 云团的北部流场;西偏北部对应 B 云团的东南部流场(图 4a 中空箭头为对应云团的流场)。反演的风向与中尺度对流云团的位置配合很好。

另外,在这一时段闵行(约 31°N , 121.4°E)、华

漕(约 31.25°N , 121.4°E)出现了龙卷风,这两个区域正好位于彩图 3a 中反演出来的两个气旋性流场中,也说明这是两个独立的中尺度对流系统。

18:00(彩图 5b),只存在一条风切变线,后部为偏西风,前部东南为东南风,东北为西南偏南风;两条弓状回波的后部分别存在很强的辐散气流(图 5b 中箭头所示);在两个强回波之间,对应 18:13(图 2d)的在 A、B 云团之间发展起来的 γ 中尺度云团出现一个小的强回波区 4,但此时从反演风场中还看不到它有自己独立的流场结构。

18:29(图 5c),在整个飇线前部存在中尺度气旋流场,这与以前飇线结构分析中提出的飇前中尺度低压相对应^[19];在飇线北部末端 >35 dBz 的强回波后部存在一气旋流场,中间也存在一气旋流场,南部末端存在一反气旋流场,这种流场配置在 Fujita^[20]的研究中也有发现。

详细分析流场,可见整条飇线是由 3 个较小的弓状回波组成,每个弓状回波前对应一个中尺度低压环流。而低压环流中心不是位于弓状中间,而是位于强回波前部。配合 18:00 时刻两个弓状回波后面的独立入流风场分布,可以说明每个单独的弓状回波都有独立的结构。这与 Fujita 等^[20,21]美国科学家到目前为止给出的水平风结构不同。以前的研究中,在弓状回波后部气流不是辐散状的^[21]。而本个例中,反演风场显示每个弓状回波后面的独立入流都是辐散状的,弓状回波南北末端的气旋与反气旋流场结构是在弓状回波内最强回波中心从弓状向逗点状过渡时逐渐形成的。而且可见 200 多公里长的整个飇线实际是由 3 个具有独立结构的较小弓状回波组成的。

综合上述分析结果,根据观测分析给出含有两个弓状回波的飇线二维结构示意图(图 6)。图中是

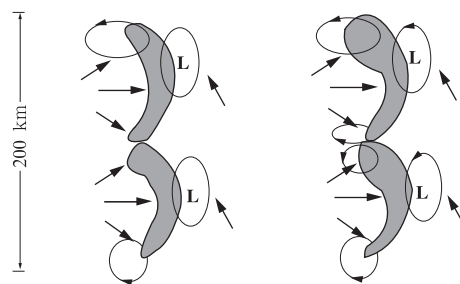


图 6 飇线回波和气流的两维结构示意图
(箭头为风向分布,黑色环状是气旋或反气旋分布,灰色区域为强回波区)

Fig. 6 Two dimensional sketch map for multi-squall lines bow echoes and winds (arrows)

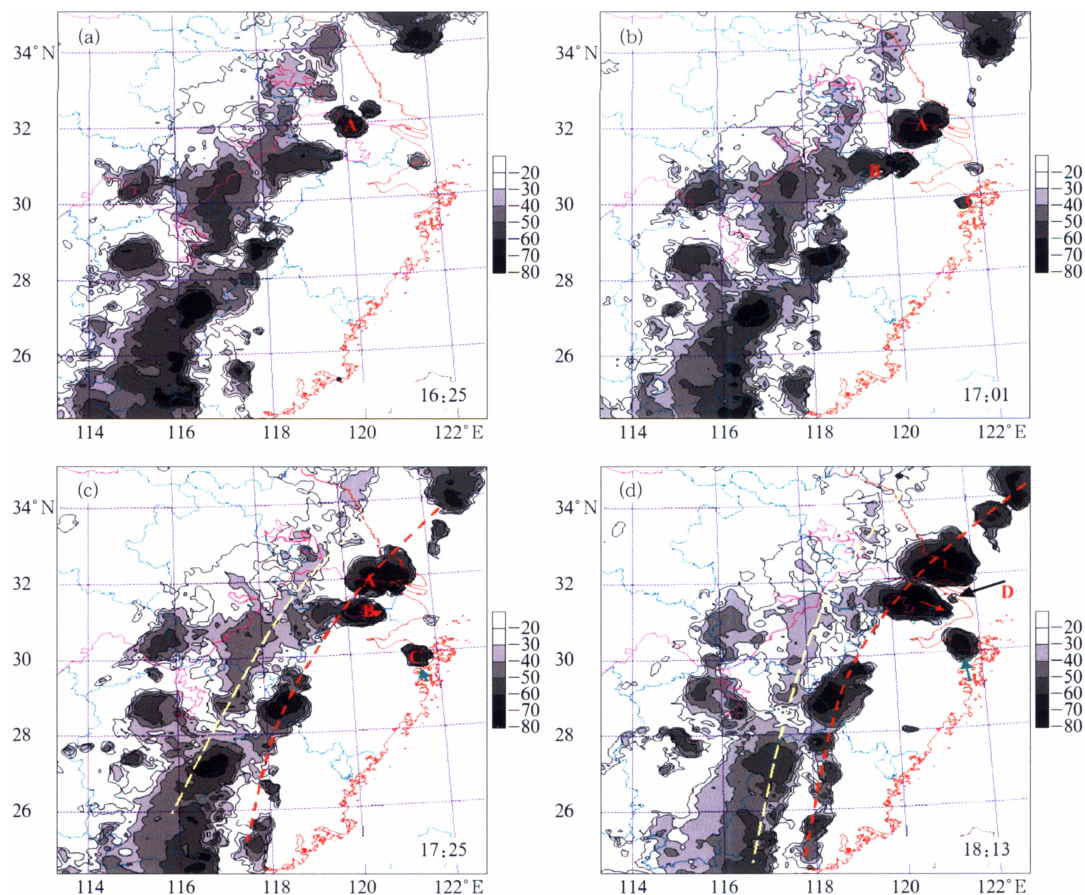


图2 2004年7月12日红外云图 (a. 16:25, b. 17:01, c. 17:25, d. 18:13)

Fig.2 Infrared images at (a) 16:25, (b) 17:01, (c) 17:25 and (d) 18:13 BST 12 July 2004

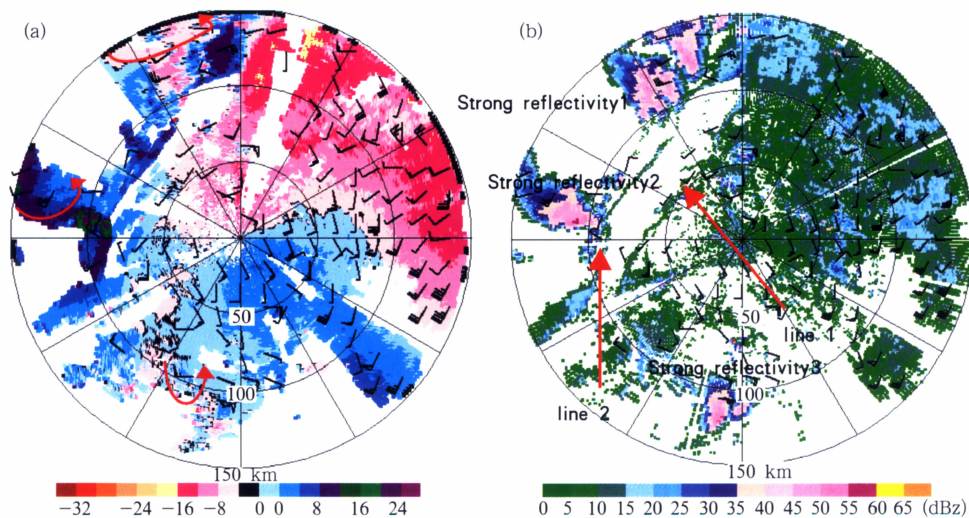


图3 2004年7月12日17:31 (a) 径向速度和反演风场以及(b) 雷达回波和反演风场

Fig.3 (a) Radial velocity (m/s) and (b) reflectivity overlaid with the wind field retrieved from Doppler Radial velocity at 17:31 BST 12 July 2004

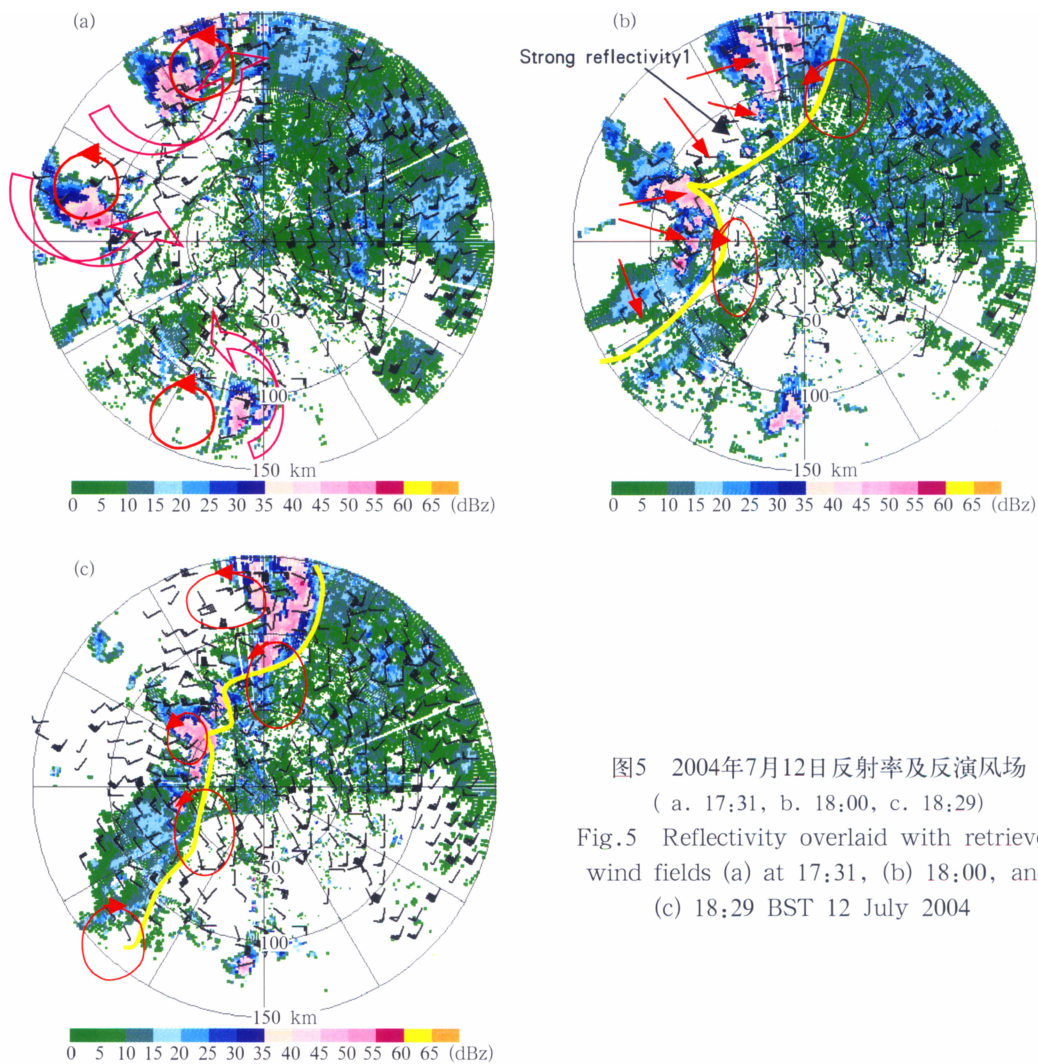


图5 2004年7月12日反射率及反演风场

(a. 17:31, b. 18:00, c. 18:29)

Fig.5 Reflectivity overlaid with retrieved wind fields (a) at 17:31, (b) 18:00, and (c) 18:29 BST 12 July 2004

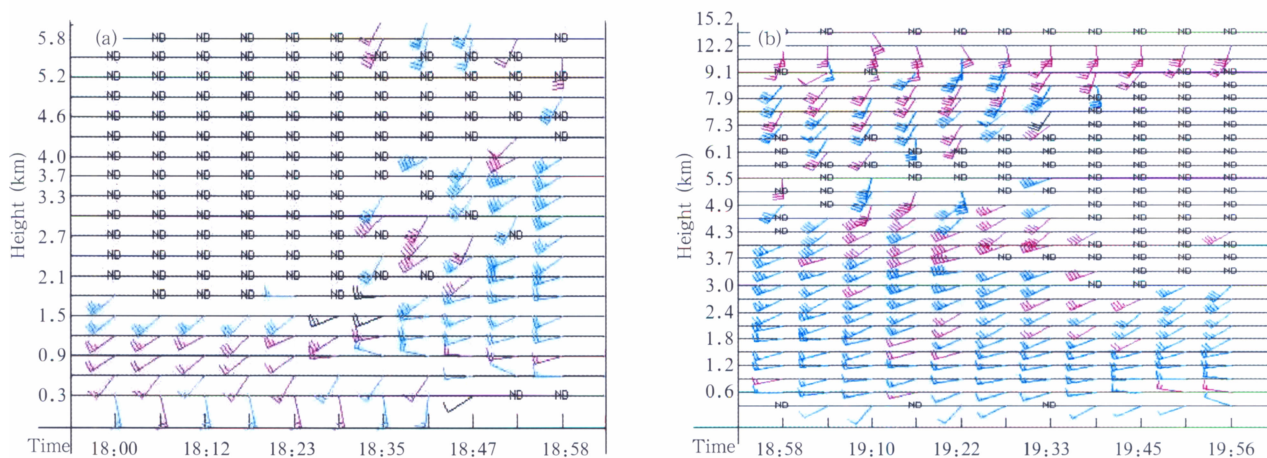


图7 2004年7月12日风廓线 (a. 18:00–18:58, b. 18:58–19:56)

Fig.7 Vertical profiles of winds (a) from 18:00 to 18:58 and (b) 18:58 to 19:56 BST 12 July 2004

回波成为弓状和发展到逗点状时的流场分布状况。

5.3 垂直风廓线分析

从逐小时回波(图略)可以清楚地看到,第 2 次飊线过程在 18:55—19:00 经过雷达所在位置。在风廓线(彩图 7a)中,18:35 在 1 km 高度开始出现西北风,然后逐渐向下传递;18:50—18:58,空中 0.61 km 处的风速减弱,而 0.305 km 处为静风。19:00 地面出现西南风,表明飊线已经移过,此后上海上空为深厚的西南气流。分析在 19:00(图 7b)地面没有出现西北风,是因为整个过程中飊线系统整体向东北方向移动,飊线的尾部扫过雷达所在位置,故飊线移过后(19:00)很快恢复为西南气流控制。

综上所述可见,(1)在飊线出现以前,低空存在有利于不稳定天气产生的顺时针垂直风切变,而高层则是逆时针垂直风切变,并且强度较大。这种切变有利于不稳定天气的产生和加强^[2],为对流的发展提供了有利的环境因素。(2)1 km 高度的西北风表明低层入侵的浅薄冷空气为飊线过程提供了又一种形成低层不稳定的有利因素。(3)飊线中对流单体的移动方向与低层风场方向存在夹角,与锋面云带整体向东移动的趋势也不同,而与 1.5 km 以上到 4.5 km 左右的西南气流方向相同,整体向东北方向移动,这种特征可对系统移动方向的预报提供帮助。

6 结 论

利用上海单多普勒雷达资料对 2004 年 7 月 12 日 17:30—19:30 出现在上海市的一次飊线过程的水平风场进行反演并验证,并综合多种观测资料对这次飊线过程的中尺度系统进行分析表明。

(1)反演的风场是正确的,可以为进一步分析飊线的动力学结构提供可靠而详尽的水平风场信息。

(2)从大尺度环境场分析,上海正处于前倾的地面冷锋前暖区,高层冷空气侵入低层暖空气上空造成锋前不稳定。云图显示,对形成飊线起主要作用的 3 个 β 中尺度对流单体不是通常个例表现的线状排列,而是冷锋前的两个单体与相对方向的一个单体共同作用,在气团边缘形成强烈风切变。

(3)反射率回波分析表明,随着飊线回波的不断加强,飊线系统的主体回波带前出现狭窄的弱回波带,飊线在强盛时期以约 60 km/h 的速度快速移动。随着系统减弱,飊线系统的主体回波带前狭窄

的弱回波带消失,移动速度也逐渐减慢。

(4)反演水平风场分析表明:17:31,对应回波强度图上两条回波带(辐合线)的位置,line1 风场呈现东南风和西南偏南风的辐合特征;line2 在飊线的后部为西北风,前部东南为东南风,东北为西南偏南风。line2 后部的西北部对应 A 云团的西南部流场;前部东南东南风对应 C 云团的北部流场;西偏北部对应了 B 云团的东南部流场。反演风向与中尺度对流云团的位置配合很好。另外,反演出来的两个气旋性流场与当时闵行、华漕出现的龙卷风对应。

200 多公里长的飊线整体是由更小尺度的弓状回波组成的。每个单独的弓状回波有自己的独立结构,包括弓状回波后部很强的辐散入流和飊前低压。在飊线前部存在中尺度气旋流场,飊线北部末端存在一气旋流场,南部末端存在一反气旋流场。而且弓状回波南北末端的气旋与反气旋流场结构是在弓状回波内最强回波中心从弓状向逗点状过渡时逐渐形成的。

(5)垂直风廓线分析表明:在飊线出现以前,低空存在顺时针的垂直风切变,高层逆时针垂直风切变并且强度较大,这种分布有利于不稳定天气的产生和加强;低层入侵的浅薄冷空气为飊线过程提供了又一种形成低层不稳定的有利因素。

(6)飊线中对流单体的移动方向与低层风场方向存在夹角,与锋面云带整体向东移动的趋势也不同,而与 1.5 km 以上到 4.5 km 左右的西南气流方向相同,整体向东北方向移。这种特征可以对系统短时间移动方向的预报提供帮助。

参考文献

- [1] 杨国祥. 中小尺度天气学. 北京:气象出版社,1983: 67-90
- [2] 丁一汇. 高等天气学. 北京:气象出版社,1991: 792pp
- [3] 李鸿洲,蔡则怡,徐元泰. 华北强飊线生成环境与地形作用的数值试验研究. 大气科学,1999,23(6): 713-721
- [4] 漆梁波,陈永林. 一次长江三角洲飊线的综合分析. 应用气象学报,2004,15(2): 162-173
- [5] 漆梁波,陈春红,刘强军. 弱窄带回波在分析和预报强对流天气中的应用. 气象学报,2006,64(1): 112-120
- [6] Frank Roux, Sun Ju. Single-doppler observations of a West African squall line on 27-28 May 1981 during COPT 81: kinematics, thermodynamics and water budget. Mon Wea Rev, 1990, 118(9): 1826-1854
- [7] Biggerstaff M I, Houze R A Jr. Kinematic and precipitation

- structure of the 10-11 June 1985 squall line. *Mon Wea Rev.*, 1991, 119(12): 3034-3065
- [8] Fankhauser J C, Barnes G M, LeMone M A. Structure of a midlatitude squall line formed in strong unidirectional shear. *Mon Wea Rev.*, 1992, 120(2): 237-260
- [9] Caniaux G, Redelsperger J-L, Lafore J-P. A numerical study of the stratiform region of a fast-moving squall line. Part I: general description and water and heat budgets. *J Atmos Sci.*, 1994, 51(14): 2046-2074
- [10] Michel Chong, Jacques Testud. three-dimensional air circulation in a squall line from airborne dual-beam Doppler radar data: a test of Coplane methodology software. *J Atmos Oceanic Technol.*, 1996, 13(1): 36-53
- [11] Jorgensen D P, LeMone M A, Trier S B. Structure and evolution of the 22 February 1993 TOGA COARE squall line: aircraft observations of precipitation, circulation, and surface energy fluxes. *J Atmos Sci.*, 1997, 54 (15): 1961-1985
- [12] Teng J-H, Chen C-S, Chen Wang T-C. Orographic effects on a squall line system over Taiwan. *Mon Wea Rev.*, 2000, 128 (4): 1123-1138
- [13] Montmerle T. A tropical squall line observed during TOGA COARE: extended comparisons between simulations and Doppler radar data and the role of midlevel wind shear. *Mon Wea Rev.*, 2001, 128(11): 3709-3730
- [14] Wilson J W, Mueller C. Nowcast of thunderstorm initiation and evolution. *Wea Forecast.*, 1993, 8: 113-131
- [15] Wilson J W, Roberts R., Mueller C S. 2000 forecast demonstration project: convective storm nowcasting. *Wea Forecast.*, 2004, 19: 131-150
- [16] 陶祖钰, 葛国庆, 郑永光等. 2004 年 7 月北京和上海两次重大气象事件的异同及其科学问题. *气象学报*, 2004, 62(6): 882-887
- [17] 陶祖钰. 从单 Doppler 雷达速度场反演风矢量场的 VAP 方法. *气象学报*, 1992, 50(1): 81-90
- [18] 刘淑媛, 刘黎平, 郑永光等. 单多普勒雷达 VAP 方法反演水平风场的检验. *北京大学学报*, 2005, 41(2): 163-171
- [19] Johnson R H. Surface mesohighs and mesolows. *Bull Amer Meteor Soc.*, 2002, 82(1): 13-31
- [20] Weisman M L. Bow echoes: A tribute to T T Fujita. *Bull Amer Meteor. Soc.*, 2002, 82(1): 97-116
- [21] COMET/UCAR. Mesoscale Convective Systems: Squall Lines and Bow Echoes. 1999

STRUCTURAL ANALYSIS OF MESO-SCALE CONVECTIVE SYSTEMS IN THE SQUALL LINE PROCESS ON 12 JULY 2004 IN SHANGHAI

Liu Shuyuan¹ Sun Jian² Yang Yinming³

¹ *Air Force Meteorological Center, Beijing 100843*

² *Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081*

³ *Shanghai Meteorological Center, Shanghai 200030*

Abstract

The horizontal wind field structure of the squall-line process during 17:00 to 19:00 BST 12th July 2004 was successfully retrieved from the Doppler velocity data observed by the ground-based Doppler radar in Shanghai. Comprehensive compare was made between the retrieved wind field and the observed data from automatic meteorological observation stations and satellite, and results show good agreement between the single Doppler radar-retrieved and observed wind fields, suggesting that the retrieved horizontal wind field can be used to study the wind field structure of the squall line. An analysis for the meso-scale convective systems (MCSs) in the squall line process was performed using the data observed by meteorological satellite and Doppler radar. The following results are drawn: (1) the squall line process was mainly caused by three-MCSs which were located in the warm sector ahead of a leaning-forward cold front, but not lay on a straight line. The strong wind shear line was located in the interspaces of the three MCSs. (2) The analysis on reflectivity shows that the appearance of a weak narrow-echo-band indicated that the squall line system would strengthen, and it's disappearance that the system would weaken. (3) The squall line 200 km in length comprised several smaller convective systems (bow echoes), and each had an independent structure

with a meso-low ahead of and the strong divergent flow rear of the bow. There were a cyclonic flow field ahead of the squall line, a smaller cyclonic circulation in the north end, and a smaller anticyclonic circulation in the south end of the squall line. The sketch map for multi-squall line echoes and winds are given in Fig. 6. (4) The squall line moved along with the southwest flow within 1.5—4.5 km, i. e. in a direction different from the surface wind as well as from the moving direction of the frontal cloud band. 5) The analysis on wind profilers shows that the strong clockwise vertical wind shear in lower levels and anticlockwise shear in upper levels before the occurrence of squall line, and the invasion of weak cold air in the low level provided favorable conditions for the genesis and development of the squall line.

Key words: Squall line, Bow echoes, MCC, Wind shear.

欢迎订阅 2006、2007 年《气象学报》

《气象学报》中文版创刊于 1925 年,是由中国气象学会主办的全国性大气科学学术性期刊,旨在反映我国大气科学领域中最最新科研成果,为大气科学研究提供学术交流阵地,以推动我国大气科学基础研究和理论研究的发展,服务于我国气象现代化建设事业。以气象、水文、海洋及环境等相关学科的科研人员、高等院校师生为主要读者对象,刊登动力气象学、天气学、数值天气预报、大气物理学、大气化学、大气探测、人工影响天气及应用气象学等大气科学各主要分支学科的代表我国研究新水平的创造性论文;国内外大气科学发展动态的综合评述;大气科学新观点、新理论、新技术、新方法的介绍;大气科学研究工作简报及重要学术会议报道;国内优秀大气科学专著的评介。《气象学报》中文版 2003 年和 2005 年连续两次荣获中华人民共和国新闻出版总署颁发的第二届、第三届“国家期刊奖百名重点学术期刊”奖。

《气象学报》全年共 6 期,定价 180 元/年。

邮发代号: 2-368(国内) BM329(国际)

通讯地址: 北京市中关村南大街 46 号 中国气象学会《气象学报》编辑部(邮编 100081)

联系电话: 010-68406942, 68408571(传真)

户 名: 北京市交泰中汇气象科技咨询中心

投稿邮箱: cmsqxxb@263.net

账 号: 0121014140000277

单位主页: <http://www.cms1924.org>

开户银行: 中国民生银行魏公村支行

《气象学报》中文版征订回执单

年 月 日

订户单位全称				经手人	
订户详细地址				邮政编码	
刊物名称	全年订价	订阅份数	总金额	(订户单位盖章)	
《气象学报》中文版	180.00 元				
总金额(大写)	仟 佰 拾 元 角 分				