利用双多普勒雷达研究强飑线过程的三维风场结构^{**}

王 俊¹ 朱君鉴² 任钟冬³

1 山东省人工影响天气办公室,济南,250031
 2 山东省气象台,济南,250031
 3 山东省滨州市气象局,滨州,257091

摘 要

山东齐河 CINRAD/SA 和滨州 CINRAD/SC 雷达相距 125.5 km,组成了双多普勒雷达观测网,利用 2004 年 6 月 21—22 日的一次强飑线过程的多普勒天气雷达探测资料,分析了双雷达观测资料的质量控制结果,并根据双多 普勒雷达反演的三维风场研究了飑线的三维结构。结果表明,两部雷达探测的回波在水平位置上有 2.0 km 的差 别,回波强度滨州雷达低 5.2 dBz,回波结构也有一定的差别,径向速度在可比较的区域一致性很好。飑线不同位 置的水平风场结构有很大不同,在飑线北端,低层是气旋性辐合风场,飑线南端是反气旋性辐合风场,而中部沿强 对流窄带的前部是偏西和东南风的风场辐合。中高层云中风逐渐转为西北风,强对流回波带上空对应辐散风场; 垂直于强对流带方向的风场垂直结构表明:成熟阶段,强对流窄带前部的低层是入流气流,即东风气流,它与对流 带后部的西风相遇后向上倾斜上升,在中高层向前流出形成飑前砧状云。减弱阶段,低层的西风分量增强并向前 穿过强对流回波带,导致前面的入流气流风速减弱、下边界抬高,这一垂直风场结构和演变特征与美国中纬度飑线 的结构基本一致。

关键词:双多普勒雷达,飑线,三维风场,强对流带。

1 引 言

利用双多普勒雷达同步观测得到的两个方向上的径向速度资料,结合其他约束条件,可以反演降水 云系的三维风场结构。1970年 Lhermitte^[1]提出了 双多普勒雷达"共面"风场反演方法,1980年 Ray^[2] 提出 ODD(Overdetermined dual-Doppler)技术, Chong^[3]在此基础上提出了 EODD(Extended ODD)风场方法,1990年 Scialom^[4]提出多重解析多 普勒(MANDOP)方法,1998年 Bousguet等^[5]发展 了多部多普勒雷达风场合成和连续调整技术 (MUSCAT)。这些方法已应用于冰雹、暴雨、台风、 龙卷等过程的风场结构研究,对于深入理解云和降 水的中尺度动力学结构发挥了巨大的作用。

中国在双多普勒雷达风场反演算法的开发和应

用方面还处于初步阶段,孔凡铀等^[6]利用模拟的强 雷暴数据分析了直接合成方法反演风场的误差,结 果显示误差分布与位置有关,当两个雷达探测的径 向速度夹角接近90°时误差较小,风速相对误差小 于30%,风向误差小于25°,而上升速度的相对误差 在40%左右;两个径向速度夹角接近0°或180°时误 差超过100%。陶祖钰^[7]对比分析了直接合成法与 单雷达的VAP法反演风场的误差分布特点,为进 一步应用该方法打下了基础。周海光等^[8-9]改进和 扩展了MUSCAT方法,将其用于地基双多普勒雷 达三维风场反演,利用实测资料对比分析了直接合 成法和MUSCAT方法反演的三维风场,结果表明 风场结构两者基本一致,MUSCAT法反演的风场 比较光滑,计算的散度场的变化幅度也要小;两者的 主要差别在垂直速度,直接合成法给出的上升速度

^{*} 初稿时间:2006年3月3日;修改稿时间:2006年6月28日。

资助课题:国家自然科学基金项目(40575012、40505001),山东省自然科学基金项目(Y2006E08)和山东省气象局2005年重点 攻关项目。

作者简介:王俊,主要从事雷达气象学和人工影响天气研究。E-mail:wangjun818@sohu.com

偏大。周海光等^[10-11]、刘黎平等^[12]利用国家重点基 础研究发展规划项目"我国重大天气灾害的形成机 理和预测理论研究"在长江和淮河流域获取的梅雨 锋暴雨观测资料,分析了梅雨锋暴雨不同尺度的动 力学结构,对于研究长江中下游梅雨锋暴雨的形成 机理起到了积极作用^[13]。目前中国大陆利用双多 普勒雷达反演的风场分析强对流云如冰雹、飑线、弓 状回波等中小尺度系统的研究还没有。

2004 年 6 月 21—22 日一次强飑线过程影响山 东中西部,本文主要利用布设在齐河和滨州的双多 普勒雷达反演的这次飑线的 β 和 γ 中尺度三维风场 资料,分析了飑线的中小尺度动力学结构以及演变 特征。

2 双多普勒雷达风场反演方法和资料简介

双多普勒雷达分别为齐河($36^{\circ}48'10''$ N, 116°46′51″E, 0.073 km) CINRAD/SA 和 滨州 ($37^{\circ}22'00''$ N,118°01′00″E,0.07 km)的 CINRAD/ SC 雷达,相距125.5 km,有效反演区域定义为两 个雷达探测的径向速度夹角在 45° —135°所围的范 围,主要反演区域为图1所示的区域 I和区域 II。 坐标系的原点定在齐河雷达站,X 轴与两雷达连线 重合,正方向指向滨州雷达,与正东方向夹角 30.5°,Y 轴正方向指向西北方向。



图 1 齐河、滨州双多普勒雷达观测系统和反演区域 (图中大圆圈是 150 km 的距离圈,长方形与双雷达 重合区为有效反演区域)

Fig. 1 The dual-Doppler radar system

(Qihe and Binzhou; two great circles are their 150 km range circles, respectively) and the dual Doppler radar effective observation and retrieval areas (rectangles) 在利用双多普勒雷达反演三维风场时,首先需 要对两部雷达资料进行回波位置、回波强度和径向 速度对比,并退速度模糊,然后将以球坐标方式表示 的多普勒雷达的原始资料(回波强度和径向速度)用 双线性方法插值到水平格距为1 km,垂直格距为 0.5 km的直角坐标上,垂直方向分 30 层。另外,考 虑到直接合成法反演的风场不太光滑,计算的散度 场偏大的特点,本文对插成网格形式的数据作了 2 次 9 点平滑(3×3)处理。

两部雷达进行体积扫描观测时的模式有所不同, 齐河雷达采用 vcp21 或 vcp11 模式进行扫描观测,一 个体扫分别约需要 6 或 5 min。而滨州雷达根据回波 距离雷达站的远近采用不同的扫描模式,距离较远时 用 6 层扫描模式,扫描仰角分别为 0. 61°、1.55°、 2.54°、3.54°、4.54°、5.56°,一次体扫时间约为 4 min。 中远距离时用 9 层扫描模式,扫描仰角分别为 0. 55°、 1.55°、2.55°、3.46°、4.33°、6.06°、6.56°、7.06°、7.56°, 体扫时间约为 6 min。近距离时采用与 vcp21 或 vcp11 相同的模式进行体扫观测,14 仰角的体扫时间 约为 9 min。在风场反演时,尽量选择时间一致的体 扫资料进行风场反演,一般时间间隔不超过 1 min。

CINRAD/SA 雷达朝向雷达的径向速度为负, 而 CINRAD/SC 雷达朝向雷达的径向速度为正。

本文所用方法与直接合成法^[2]类似,水平速度 u、v通过以下方程组获得

$$\begin{cases} R_1 V_1 = u(x - x_1) + v(y - y_1) \\ + (w - w_t)(z - z_1) \\ R_2 V_2 = u(x - x_2) + v(y - y_2) \\ + (w - w_t)(z - z_2) \end{cases}$$
(1)

 R_1 、 R_2 是计算格点到两雷达的空间距离, V_1 、 V_2 是径向速度。垂直速度通过积分滞弹性的连续方程 $\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} - kw = 0$ 得到, $w_t = 3.8 B^{0.072}$ 为粒子下 落速度,B为雷达反射率因子。

计算采用迭代算法,首先假设 $w^{(0)} = 0$,由式(1) 求出 $u^{(1)}$ 、 $v^{(1)}$,代入连续方程算出 $w^{(1)}$,再代入式 (1)求出新的 u、v,又可由连续方程算出 w,到 max $|w^{(n)} - w^{(n-1)}| < 0.1$ m/s 时停止迭代,n为迭 代次数。

连续方程积分方向从下往上,地面为下边界,垂 直速度w=0。

3 雷达资料质量控制结果分析

由于两部雷达型号、体扫模式不同,观测资料是 否匹配对于风场反演结果的好坏有重要影响,下面 对两部雷达的观测资料进行对比分析。

22日01:46(北京时,下同),两部雷达开始体扫的时间仅相差5s,都采用9层扫描模式,但两者的扫描仰角不同,齐河雷达采用的仰角为0.48°、1.49°、2.46°、3.38°、4.35°、6.06°、9.93°、14.68°、19.56°, 滨州雷达为0.55°、1.55°、2.55°、3.46°、4.33°、6.06°、6.56°、7.06°、7.56°, 两者扫描仰角的差别主要在上面3层。

利用各等高面上的回波强度分布图(图略)对比 分析表明,两雷达探测的回波位置有 2.0 km 的差 别,方位上基本一致,不超过 0.5°,强度滨州偏低 5.2 dBz。不同等高面上回波强度点对点的分析表 明(图略):3.0 km 高度以下,低于 20.0 dBz 的弱回 波对应性不好,大于 30.0 dBz 的强回波一致性较 好。4.0-7.0 km 的中层,两雷达回波强度对应的 较好。7.5 km 以上高度,回波对应不好,特别是 9.0 km以上的点聚图很散。

从齐河和滨州雷达探测的回波强度对比(图 2a) 可以看出:左侧为层状云回波区,两者基本一致;右侧 为强对流云回波区,两雷达探测结果有明显差别,滨 州雷达由于最大探测仰角低,可探测的 20.0 dBz 回 波高度不到 11.0 km,而齐河雷达20.0 dBz回波高度 为 12.5 km。滨州雷达探测的不同强度回波中心比 齐河低,顶高一般相差超过2.0 km,差别明显。

径向速度是矢量,难以进行全面对比分析,只能 考虑一些特殊位置的探测结果进行简单对比。齐 河、滨州两雷达高度、低层的探测仰角基本一致,因 此,在两雷达连线中点处两个雷达探测的径向速度 沿水平线对称,两个径向速度之间的夹角为 2α ,其 差值 $\Delta V = 2w \sin \alpha, \alpha, w$ 分别是探测仰角和垂直速 度,当仰角 $\alpha < 4.5^\circ, w \leq 10$ m/s 时, $\Delta V < 1.5$ m/s, 即在低仰角情况下,两雷达探测的径向速度大小相 差不超过 1.5 m/s。根据这一公式也可以对 ΔV 的 垂直分布进行定性分析,在低层,上升速度比较小而 粒子的下落速度较大,w 为负值, ΔV 也为负值;中 高层,上升速度大于粒子的下落速度时, ΔV 变成正 值。彩图 2b 给出了齐河、滨州雷达探测的径向速度 和两者差值的垂直分布图,3.5 km 以下高度,齐河 雷达探测结果比滨州雷达的探测值小,最大相差 -1.1 m/s,3.5-5.0 km,齐河雷达探测结果比滨 州雷达的探测值大,最大相差1.5 m/s。可以看出, 两个雷达的探测结果在误差范围之内,基本一致。

以上回波强度和径向速度的对比分析表明,两 雷达的探测结果在位置上有一定的差别,回波强度 滨州雷达低 5.2 dBz,回波结构也有差别,因此,在 利用径向速度计算粒子下落速度时,我们主要使用 齐河雷达的回波资料。

径向速度在可比较的区域一致性较好。

4 天气概况和单雷达风场结构分析

2004年6月21日20:00至22日05:00,飑线 自西南向东北方向移过山东中西部。21日20:00, 500hPa图上欧亚中高纬度维持两槽两脊的经向环 流形势,中西伯利亚地区为一高压脊,在日本北部到 远东地区为另一个东南一西北走向的高压脊;在华 北到东北南部被低涡控制,另一低槽位于乌拉尔山 地区,山东处于低涡后部的西北气流中。温度槽落 后于高度槽,且有弱的冷中心出现。相应的850hPa 图上,山东处于槽前西南暖湿气流内,同时,自秦岭 以北地区有一暖脊向东伸展到山东,促使该地区低 层的气温不断上升。本次过程 500hPa冷平流不 强,但低层暖平流十分强盛,这种高低空形势的配 置,为飑线发生地对流活动的发生、发展创造了有利 的环境场。

在齐河雷达站附近从西南、西和西北方向发展 的回波在此相遇,这一地区的回波发展演变得很快。 22日00:00左右,对流系统发展成南北范围超过 400 km的强对流云带,00:45 飑线前锋过齐河雷达 站进入双雷达观测范围,此时大于 45 dBz 的强对流 带的长度约为 110.0 km。图 3 给出了 01:17 和 01:46不同仰角的回波强度和径向速度的 PPI 图。 01:17 的回波强度(图 3a-d)和径向速度(图 3a₁d₁)对比分析可以看出:0.5°仰角(100.0 km 范围内 对应的高度为 0.5—1.6 km)的 PPI 图上,强回波位 于前部,紧接着是出流边界,再前面有零散的低于 5.0 dBz的弱回波,双箭头处有孤立的小块回波。对 应强对流回波带的中间部分为正的径向速度中心, 是远离雷达的速度,最大为 20.0 m/s,而出流边界 的前面对应的零散弱回波区是负径向速度,即朝向 雷达径向速度,最大为-5.0 m/s 左右,双箭头处小 回波的左侧(靠近飑线)是负的径向速度,右侧是正 的径向速度。从径向速度的分布可以判断,飑线中 的强对流回波带对应远离雷达的正速度,而前面是 负的朝向雷达的速度,沿出流边界存在风向辐合。

1.5°仰角(100.0 km 范围内对应的高度为 1.0—3.2 km)的 PPI 图上,径向速度的主要特征 是:强对流回波带的中间部分仍为正的径向速度中 心,前面的零散弱回波区也是正径向速度,但速度很 小。另外,强对流回波带南端的较强回波单体的四 周出现负径向速度(图 3b、b₁ 中双箭头处)。

3.4°仰角(100.0 km 范围内对应的高度为 2.5—6.0 km)的 PPI 图上,强对流回波带的南部出 现γ中尺度的强弓形回波(图 3c、c₁中双箭头处), 对应的是正径向速度,其南面是负的径向速度。强 对流回波带的前沿出现窄的负径向速度,其前面的 弱回波区对应正径向速度。在强对流带前面的大片 弱回波区和正径向速度区,其对应的高度一般超过 4.0 km,它主要是由中高层的向前出流形成的云 砧。在 6.0°仰角(70.0 km 范围内对应的高度为 4.5—7.5 km)的 PPI 图上,对应强对流回波带的基 本是负径向速度。

01:46,系统继续向东北方向移动,回波强度和 径向速度的分布主要有两个特征。一是强对流回波 带的北部形成东北一西南向的强回波中心,0.5°仰 角(对应高度小于1.0 km)的 PPI 图上,对流回波带 对应正径向速度,而其前面、北和西北侧都是负径向 速度,形成辐合风场;1.5°仰角(对应高度小于 2.0 km)的 PPI 图上,对流回波带的前面是正径向 速度,而其北和西北侧都是负径向速度,此外,沿对 流回波带的前沿有很窄的负径向速度;3.4°仰角(对 应高度小于 4.0 km)的 PPI 图上,对流回波带周围 都是负径向速度,到 6.0°仰角(对应高度小于 7.0 km)时,对流回波带基本对应负径向速度。第 2 个特点是对流回波带的南部有新的强对流单体生 成,在中低层单体的前面是正径向速度,而其南、西 南侧为负径向速度,形成反气旋性风场。

5 飑线三维结构分析

5.1 双雷达风场反演结果分析

22日 01:17,飑线前沿的强对流带的南部位于 区域 I中,适合双雷达风场反演。

不同高度回波的 CAPPI 分布(图 4a-d)表明,

在南北 50 km 的范围内存在两个强对流单体,北面 的单体很强,南面的单体较弱。水平风场分布表明: 5.0 km 以下的中低层,飑线的前部沿 x=30 km以 前是东南风;后面的层状区主要是偏西风;对应强对 流回波带中的两个对流单体是辐合风场(图 4a、b), 但组成反气旋性风场的风有明显不同,北面强对流 单体对应的风场风速比较大,辐合特征也明显, 6.0 km高度(图 4c),飑线的前部风转为西北风,弱 对流单体上空为辐散风场,而强对流单体上空仍为 辐合中心,但单体前部已出现辐散区。8.0 km以上 高度(图 4d),反演区域主要以西北风为主,强对流 单体上空为辐散中心。

图 4e、f 是沿 y = -34 km 东西向垂直剖面 u,w速度合成和散度场及 u 场。可以看出,这一时段的 垂直结构具有典型飑线结构特征,即包括飑前砧状 云、强对流带、过渡带和层状云区。 u-w 风场结构 为:层状云中上升速度小,u分量的风都是西风。强 对流带前部的低层(低于 4.0 km)是东风入流气流, 而上升气流与强对流窄带对应,在中高层(大于 6.0 km) 气流向前流出形成飑前砧状云。散度场 (图 4f 中等值线所示)的分布表明, 辐合区位于强回 波中心(大于 50 dBz)的前后,高度低于 8.0 km,强 辐合中心(大于-2.0 s⁻¹)与强回波中心重合,而高 层是辐散区。为了更清楚地分析垂直于飑线的风场 特征,图4f给出了 u分量的分布(图中阴影区),可 以看出存在几支主要气流,一是粗箭头表示的负的 或低的 u 分量, 负的 u 起源于强回波前面的近地层, 向后倾斜延伸到 50 dBz 强回波顶,再向后、向上是 低的u分量(一般小于 4.0 m/s)。另外两支(图中 细箭头所示)是较强的西风分量(或正 u 分量),分别 位于中高层(5.0-7.0 km)和低层(低于3.5 km)。 由于两雷达距离较远,系统又靠近齐河雷达一侧, 2.0 km 以下的风场不能反演出来。

图 4g、4h 是沿 x=28 km 南北向 v、w 速度合成 和散度场。可以看出,对应不同强度的两个对流单 体,风场结构有比较明显的差别。北面强对流单体 的辐合区位于单体的中下部,辐合中心在强回波(大 于 50 dBz)的南部,高度 4.0 km;从 v、w 速度合成 来看,5.0 km 以下南、北风辐合,形成的辐合上升气 流向南倾斜流出。弱对流云的辐合区位于单体的中 下部,辐合强度小;从风场特征来看,2.0 km 以下有 弱北风,2.0-4.0 km 有弱南风,辐合上升气流在 6.0 km 以上与北面强对流单体向南倾斜流出的气 流合并后,向前和向下流出。两个单体之间是弱回 波区,5.0 km 以下风速很小,对应弱的辐散区,而弱 的下沉辐散气流加强了两边对流单体的辐合风场。

22日01:46,飑线继续向东北方向移动,强对流 回波带的南、北两端分别位于双雷达反演区 I、II 中,非常适合双雷达风场反演。图 5 是这一时刻区 域 I 中对流云系的水平和垂直风场、以及回波强度 和散度场结构,与01:17相比,北面的单体减弱,南 面的单体增强。水平风场表明,在低层(图 5a)云中 主要是西南风,但强对流带中的两个单体对应不同 的辐合风场,北面的对流单体是西南风与西北风辐 合,而南面的单体是东南风与西南风辐合。另一方 面,西南风增强增大,在两个回波单体之间,西南风 已经穿过 20 dBz 的弱回波区,再一点是东南风和偏 南风增强。在中高层(图 5b),层状云区中的风转变 为西北风,对流带的前面是转为偏北风,对流带中的 单体仍对应辐合风场,但云中风速都明显减小。到 8.0 km高度风基本都转为西北风(图略)。

图 5c、d 是沿图 y=-33 km 东西向垂直剖面 u、w 速度合成和散度场及 u 场。与 01:17 结果相 比,存在明显的不同:(1)低层的西风分量增强并向 前穿过强对流回波带;(2)东风分量风速减弱、范围 缩小、下边界高度达4.0 km明显增高,这表明入流 气流被抬高,低层水汽输送通道被切断,单体处于减 弱消散阶段。

图 5e、f 是沿 x=58 km 南北向 v、w 速度合成 和散度场。可以看出,两单体之间低层的辐散增强, 对应的下沉气流也明显增强。南面单体的南风入流 增强,辐合中心高度降低。北面单体的南、北辐合风 场都有所减弱,辐合强度降低,但低层的北风分量随 高度降低有所增加。

图 6 是双雷达连线北部、即区域II中对流云系的 水平、垂直风场和回波结构。2.0 km 高度的水平风 场结构(图 6a)主要表现为东北一西南风的辐合,东西 向的强回波中心位于东北风区,而南北向的强回波中 心位于西南风区。3.0—4.0 km 高度的水平风场(图 6b)具有明显的气旋性辐合特征,沿南北向的对流带 及其前部为偏南风。5.0—6.0 km 的中层(图 6c),风 场的主要变化是图中左下侧的西南风转为西北风,强 回波区的前侧和北侧仍是东北风和偏北风。随着高 度的增加,风主要转为西北或偏西风,8.0 km 高度上 (图 6d)主要是西北风,但由于比较强的高空辐散形成的辐散流场,图中左上角有弱东南风。

图 6e 是沿 y=48 km 东西向垂直剖面 u、w 速 度合成和回波强度。与强回波对应的是宽广的强垂 直上升气流,在 7.0 km 以上高度,上升气流向前、 后(东、西)流出,而向前的出流占主导地位;低层(低 于 4.0 km)前面是强的东风入流,而后侧由于系统 没有全进入双雷达观测区,流场特征显示不出来。

沿 x=40 km 南北向 v、w 速度合成和回波强度 的垂直结构(图 6f)表明,辐合上升区位于较强回波 区(大于 40 dBz)的北侧,组成辐合的北风入流比较 深厚,南风入流较浅薄;而高层的出流正好相反,向 南的出流比较强,向北的出流较弱。向西靠近齐河 雷达一侧南北向的垂直风结构这一特点更显著,强 回波北侧的中低层有强而深厚的北风入流,高层是 弱的出流;强回波南侧的低层入流较浅薄(1.0— 4.0 km),而高层的出流比较强。

从区域 II 中的风场分布特征可以看出,由于西 北冷空气的加入,这一区域的风场与区域 I 中风场 有明显不同,偏北气流强且深厚,西南气流基本位于 5.0 km 以下高度,图 6f 南北向风场的分布可以明 显反映出这一特点。

5.2 与典型中纬度飑线结构的对比

Houze 等^[14]给出了利用单多普勒雷达分析出 的拖曳层状型(Trailing stratiform)飑线的概念模 型,云中主要的相对流场为:起源于地面阵风锋的前 向入流沿强对流窄带剧烈上升,在中高层气流的主 要部分沿层状云顶向后倾斜流出,另一小部分向前 流出形成砧状云。后向入流位于层状区的低层,有 时向前伸展到强对流窄带的前面,强度随时间的演 变有所变化。Smull 等^[15]利用双多普勒雷达反演结 果分析了美国一次中纬度飑线的中尺度结构,垂直 风场结构显示云中的相对水平风分量 u 和上升速度 w的分布与上面的概念模型基本一致,反演的低层 后向入流主要位于 2.0 km 以下高度层,随着时间 的演变逐渐向前移动,而强上升气流区主要位于对 流窄带的右上侧。本文分析的飑线水平移动速度约 50.0 km/h, 沿 x 轴 方 向 约 44.0 km/h, 即 12.2 m/s。从图 4f 可以看出成熟期云中的相对速 度的特征是:前向入流的风速轴在对流窄带的前部 倾斜上升,在中高层主流部分继续向后流出,还有一 部分沿砧状云向前流出。低层没有后向入流,主要

原因是这一时次可以反演的最低高度的风场偏高, 给不出近地层风场。根据图 5d 可以分析减弱时期 的相对流场结构,结果与成熟期时基本一致,不同之 处是前向入流的风速轴高度增加,而低层的后向入 流明显。从图 4e 和图 5c 可以看出,强烈的上升气 流区主要位于对流窄带前侧的中高层。这些结果与 美国中纬度飑线的分析结果基本一致。

6 结果与讨论

利用 2004 年 6 月 21—22 日一次强飑线过程的 雷达观测资料,分析了双雷达观测资料的质量控制 结果,根据双雷达反演的三维风场研究了飑线的三 维结构,主要结果为:

(1)两部雷达探测的回波强度和径向速度的对 比分析表明,两雷达的探测结果在位置上有 2.0 km 的差别,回波强度滨州雷达低 5.2 dBz,回波结构也 有一定差别,径向速度在可比较的区域一致性很好。

(2)利用双雷达反演的三维风场对飑线动力学结构进行了分析,水平风场分布表明:成熟期的飑线,地面阵风锋靠近强对流窄带,沿锋线是风场辐合。在飑线的北端,低层是气旋性辐合风场,而飑线南端是反气旋性辐合风场。中高层云中风逐渐转为西北风,强对流回波带上空对应辐散风场。

垂直于强对流带方向的风场垂直结构表明:在 成熟阶段(22日01:17),层状云中上升速度小,u分 量的风都是西风。强对流窄带前部的低层是入流气 流,即东风气流,它与对流带后部的西风相遇后向上 倾斜上升,在中高层向前流出形成飑前砧状云。在 减弱阶段(22日01:46),低层的西风分量增强并向 前穿过强对流回波带,导致前面的入流气流风速减 弱、下边界抬高。这一垂直风场结构和演变特征与 美国中纬度飑线的结构基本一致。

(3)组成双多普勒雷达观测的两部雷达相距 125.5 km,距离偏远,这样在0.5°最低扫描仰角下,在 两雷达中线附近能反演风场的最低高度为1.5 km,其 他区域最低高度为2.0 km,因此2.0 km以下高度的 风场基本反演不出来,不能分析飑线的近地层结构, 特别是不利于分析低层后向入流的变化特征。 **致谢:**本文在写作过程受到刘黎平、许焕斌两位研究员的悉心指导,在此谨表感谢。

参考文献

- [1] Lhermitte R M. Dual-Doppler radar observation of convection storm circulation. Preprints of 14th Conference on Radar Meteor, 1970: 153-156
- [2] Ray P S, Zieler C L, Bumgarner W. Single and multipler Doppler radar observations of tornadic storms. Mon Wea Rev, 1980, 108 (10): 1607-1625
- [3] Chong M, Testud J. Three-dimensional air circulation in a squall line from airbone dual-beam Doppler data: test of coplan methodology software. J Atmos Oceanic Tech, 1996, 13: 36-53
- [4] Scialom G, Lemaitre Y. A new analysis for the retrieval of threedimensional mesoscale wind fields from multiple Doppler radar. J Atmos Oceanic Tech., 1990, 7:640-665
- [5] Bousquet O, Chong M. A multiple-Doppler synthesis and continuity adjustment technique (MUSCAT) to recover wind components from Doppler radar measurements. J Atmos Oceanic Tech, 1998, 15:343-359
- [6] Kong Fanyou, Mao Jietai. A model study of three-dimensional wind field analysis from dual-Doppler radar data. Adv Atoms Sci, 1994, 11(2):162-174
- [7] Tao Zuyu. Error comparision of wind field retrieval from single and dual-Doppler radar observations. Acta Meteor Sinica, 1994,8(3):337-345
- [8] 周海光,张沛源. 笛卡儿坐标系的双多普勒天气雷达三维风 场反演技术. 气象学报,2002,60(5): 585-593
- [9] 周海光,王玉彬. 一次梅雨锋降水系统三维风场双、三雷达对 比研究. 气象,2002, 29(5):13-17
- [10] 周海光,张沛源.一次局地大暴雨三维风场的双多普勒雷达 探测研究.大气科学,2005,29(3):372-386
- [11] 周海光,王玉彬. 2003 年 6 月 30 日梅雨锋大暴雨 β 和 γ 中尺度 结构的双多普勒雷达反演. 气象学报. 2005,63(3): 301-312
- [12] 刘黎平,邵爱梅,葛润生等.一次混合云暴雨过程风场中尺度结构的双多普勒雷达观测研究.大气科学,2004,28(2):278-284
- [13] 倪允琪,周秀骥.中国长江中下游梅雨锋暴雨形成机理以及监测与预测理论和方法研究.气象学报,2004.62(5):647-662
- [14] Houze R A, Rutledge S A, Biggerstaff M I, et al. Interpretation of Doppler weather radar displays of midlatitude mesoscale convective systems. Bull Amer Meteor Soc, 1989,70: 608-619
- [15] Smull B F, Houze R A. Dual-Doppler radar analysis of a midlatitude squall line with a trailing region of stratiform rain. J Atoms Sci, 1987, 44(15):2128-2148



图2 2004年6月22日01:46齐河 - 滨州双雷达观测的回波强度(dBz)、径向速度(m/s)对比分析图
(a. 沿图3f中AB方向回波强度垂直剖面图,阴影区是齐河雷达探测的回波强度,等值线是滨州雷达探测的回波强度;
b. 齐河(实线)、滨州(虚线)雷达探测的沿两雷达连线中点处的径向速度垂直分布情况,点划线是两者之差的垂直分布) Fig.2 Reflectivity (dBz) and radial velocity (m/s) at 01:46 BST 22 June 2004
(a. vertical cross-section of reflectivity (Qihe radar: shadings; and Binzhou radar: contours) along line AB in Fig.3f, b. vertical distributions of radial velocities and their differences (dot and dash line) at the mid-point of line AB detected by Qihe (solid line) and Binzhou radar (dashed line))



图3 2004年6月22日01:17 (a-d、a₁-d₁) 和01:46 (e-h、e₁-h₁)齐河雷达回波强度(dBz)和径向速度(m/s)PPI分布 Fig.3 Reflectivity (dBz) and radial velocity (m/s) at four elevation angles (0.5°:a,a₁/e,e₁; 1.5°:b,b₁/f,f₁; 3.4°:c,c₁/g,g₁; 6.0°:d,d₁/h,h₁, respectively) at 01:17/01:46 BST 22 June 2004 detected by Qihe radar





(a、b、c、d分别是2.5、3.5、6、8 km高度的水平风场(m/s)和反射率因子(dBz),图a中的细实线是近地面飑锋的位置; e是y=-34 km东西向垂直剖面u、w速度合成(m/s)和反射率因子(dBz),三角形对应地面阵风锋位置;f是y=-34 km 东西向垂直剖面的散度场(s⁻¹,等值线)、u场(m/s,阴影);g、h是x=28 km南北向v、w速度合成(m/s)和散度场(s⁻¹))
Fig.4 Wind fields in area I (see Fig.1) at 01:16 BST 22 June 2004 retrieved from the dual Doppler radar data (Horizontal winds and reflectivity at 2.5 km (a), 3.5 km (b), 6.0 km (c) and 8.0 km (d) levels, respectively, and the thin solid line in Fig.4a denotess the position of surface squall front, e. vertical cross-section of reflectivity (shadings) and the resultant winds of u and w at y=-34 km, and the triangle on the abscissa denotes the positon of surface gust front, f. vertical cross section of divergence (s⁻¹, contours)and u (shadings) at y=-34 km, g. vertical crosssection of reflectivity (shadings) and the resultant winds of v and w at x=28 km; h. vertical cross-section of divergence (s⁻¹, contours) and v (shadings) at x=28 km)





(a、b分别是2.5和6 km高度的水平风场 (m/s)和反射率因子 (dBz), c是沿 y=-33 km东西向u、w速度合成(m/s), d是沿 y=-33 km 东西向的散度场 (s⁻¹, 等值线)和u场 (m/s, 阴影), e、f是 x=58 km南北向垂直剖面v, w速度合成 (m/s) 和散度场(s⁻¹))
Fig.5 Wind fields in area I (see Fig.1) at 01:46 BST 22 June 2004 retrieved from the dual Doppler radar data (Horizontal winds and reflectivity at 2.5 km (a) and 6.0 km (b) levels, respectively, c. vertical cross-section of reflectivity (shadings) and the resultant winds of u and w at y=-33 km, d. vertical cross-section of divergence (s⁻¹, contours) and u (shadings) at y=-33 km, e. vertical cross-section of reflectivity (shadings) and the resultant winds of v and w at x=58 km, f. vertical cross-section of divergence (s⁻¹, contours) and v (shadings) at x=58 km)





(Horizontal winds and reflectivity at 2 km (a), 3 km (b), 5 km (c), 8 km (d) levels, respectively; e. vertical cross-section of reflectivity (shadings) and the resultant winds of u and w at y=48 km; f. vertical cross-section of reflectivity(shadings) and the resultant winds of v and w at x=40 km)

A STUDY OF 3-D WIND STRUCTURE OF A STRONG SQUALL LINE USING DUAL-DOPPLER WEATHER RADAR DATA

Wang Jun¹ Zhu Junjian² Ren Zhongdong³

1 Shandong Weather Modification Office, Jinan 250031

2 Meteorological Observatory of Shandong Province, Jinan 250031

3 Binzhou Meteorological Bureau, Binzhou 266000

Abstract

A strong squall line swept all over Shandong Province on 21-22 June 2004, and caused huge losses due to large hailstones, strong surface gust wind and heavy rain. Fortunately two Doppler radars, located at Qihe and Binzhou, synchronously caught the squall line. Therefore, the wind field of the squall line and its evolution can be investigated here using the dual Doppler radar data. It is the first time that the threedimensional wind structure of a squall line is analyzed based on the dual-Doppler radar in China. The two Doppler radar data were compared each other at first, and it was found that there was horizontal displacement of about 2.0 km in the position of reflectivity, and the reflectivity of Qihe radar was 5.2 dBz larger than that of Binzhou radar. However, the patterns of reflectivity measured by the two Doppler radar systems are similar, and there is a good accordance in radial velocities.

The three-dimension wind structure was analyzed by means of dual-Doppler radar data. The results show that the wind convergence mainly took place below the height of 5 km. The low-level wind field displayed cyclonic character on the north part of the squall line, whereas on its south part the wind field pattern was anticyclonic, with clear convergence of westerly and southeast inflows in between. Above the height of 5 km over the strong echo band, the upper wind gradually turned to southeastward, and became evidently divergent.

The vertical cross section of flow field perpendicular to the matured squall line indicates that the width of the deep convective line (reflectivity > 50 dBz) in the front portion of the squall line was less than 20 km, a narrow zone of weak reflectivity (less than 30 dBz) at lower levels located immediately behind the convective region was a transition region, about 10 km in width. The stratiform rain with a radar bright band was widespread. The 2-D wind structure in the vertical section indicates that the lower level easterly inflow in the front met the deep westerly inflow behind of the squall line, ascended slantways upwards, and then flowed out forwards in the mid-high levels, forming an anvil cloud in the front of the squall line passed through the intensive reflectivity band at low levels, resulting in the rapid decay in the easterly inflow a-head and the lifting of the bottom boundary of the easterly inflow, which cut off the supply of low-level moisture to the squall line. The vertical structure of winds and its major evolutional features of the squall line are similar with those in the middle-latitudes region of America.

Key words: Dual-Doppler weather radar, Squall line, Three-dimensional wind field, Strong convective line.