

# 一次飑线过程中龙卷及飑锋生成的 中尺度分析

刘勇 刘子臣 马廷标 乔旭霞

(陕西省气象台, 西安 710015)

**摘要** 对1983年9月4日发生在陕西中部一次灾害性强风暴过程的天气形势、雷达回波、卫星云图、地面中尺度风场资料及灾情进行了综合分析研究, 结果表明: 此次灾害性强风暴是一次龙卷过程; 龙卷出现在冷锋飑线带状回波尾部, 呈典型的弓状回波(环状回波); 在卫星云图上表现为南北云系交绥处发展旺盛的中尺度涡旋云团, 呈新月状; 龙卷发生在地面“人”字形辐合线交点南部强西北风中; 龙卷是由地面两条冷锋的共同作用造成的; 飑锋回波出现在龙卷雷暴后部, 表现为两条平行的线状回波, 与经典理论有不同之处。

**关键词** 龙卷 飑锋 雷达回波 卫星云图 中尺度辐合线

## 1 引言

龙卷是从积雨云中伸至地面的猛烈旋转的云柱。常见的漏斗状云柱, 其下部直径最小只有几米, 一般为数百米, 最大可达千米以上。上部直径一般为数千米, 最大可达10 km。几乎所有的龙卷都是气旋性旋转, 但反气旋性的也确实可以发生。对发生在陕西中部的这次龙卷过程, 马廷标<sup>[1]</sup>进行了初步分析。由于当时的观测资料较丰富, 使得我们可以描述它在雷达回波、卫星云图、地面流场中的中尺度特征, 为研究中小尺度天气提供了有价值的资料。在对龙卷研究的同时, 发现龙卷雷暴的飑锋回波出现在龙卷雷暴后部, 呈两条平行的线状回波。飑锋回波形成的物理机制及出现的位置与目前经典的飑锋理论有不同之处, 是对经典飑锋理论的修正和补充。

## 2 雨情与灾情

1983年9月4日受冷锋飑线影响, 陕西中部自西向东出现一次以雷暴雨大风为主的天气过程, 其中测站降水乾县58 mm、礼泉44 mm、咸阳47 mm、西安23 mm, 具有“湿”对流风暴特点。15时30分, 当飑线移至咸阳附近时, 出现龙卷天气。龙卷挟带着暴雨、冰雹、大风从咸阳地区沔东、沔西公社向西安西南方向移动, 中心宽度为2~3 km。西安机场观测到的龙卷雷暴, 云底大约60 m高, 风速在几分钟内从微风激增到 $26 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 瞬时最大风速达到 $36 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上, 40 min降水76.9 mm, 并伴有姆指大的冰雹。在不到40 min内, 气温下降 $10.4^\circ\text{C}$ , 相对湿度上升29%, 气压涌升4.6

hPa。此次过程共刮倒树木 32643 株, 电杆 2 570 多根, 倒塌围墙 4 718 多堵, 倒房屋 6 047 间。因窑塌房倒和触电死亡 8 人, 伤 12 人。

此次龙卷直径 150 m, 路径长度约 25 km, 移动方向从西北到东南, 平均最大雨强 20 mm/10 min, 平均最大风速  $27 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 在龙卷形成初期和发展旺盛阶段出现冰雹。

### 3 龙卷生成及其中尺度特征

#### 3.1 天气形势

9 月 4 日 08 时, 850 hPa 银川附近有一低槽, 槽后有较强的冷平流。四川北部有一个 1480 位势米的闭合低压, 并伴有  $20^{\circ}\text{C}$  的暖中心, 这是典型的北槽南涡形势 (如图 1b)。低涡东侧有明显的南风气流。500 hPa 和 700 hPa 层上, 关中西部各有一个低槽, 尤其在 500 hPa 上, 槽线与冷温度槽配合很好, 槽线的南端快速东移。根据 08 时地面冷锋、850 hPa 和 500 hPa 槽线的空间位置来看, 这是一个“前倾”型的空间结构, 850 hPa 槽线在 500 hPa 槽线以西两个纬距左右。这种结构有利于不稳定层结的建立和加强, 有利于局地风暴天气的产生。

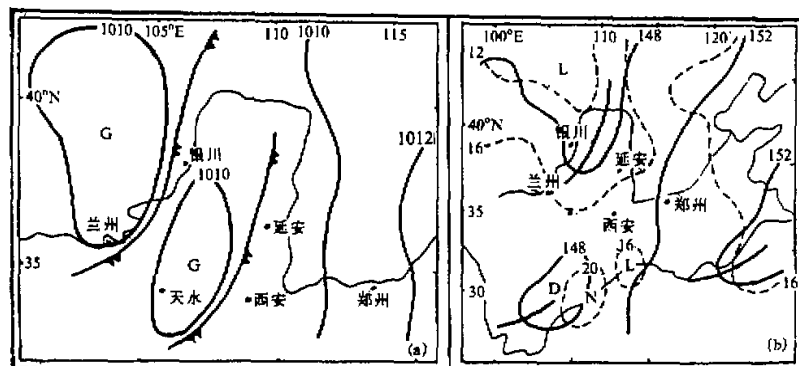


图 1 1983 年 9 月 4 日 14 时地面 (a) 和 08 时 850 hPa (b) 形势图

另外, 在 300 hPa 上, 西安地区恰好处在南亚高压东北侧辐散的西北气流中, 这里是容易产生重力波扰动的地方<sup>[2]</sup>, 有利于不稳定天气的发生。

4 日 08 时地面图上, 银川、兰州之间有一条东北-西南向冷锋, 到 14 时陕西关中地区及西部有两条冷锋东移 (图 1a), 两锋相距 200 km 左右, 每条冷锋后都有一冷高压。尤其是在前部冷锋东移的过程中, 后部的副冷锋快速移动不断向前补充冷空气, 造成冷锋尾部交界面天气的剧烈变化。

#### 3.2 层结及空间风场分析

##### 3.2.1 层结分析

4 日 08 时, 西安地面能级  $\theta_{se}$  为  $71.5^{\circ}\text{C}$ , 850 hPa 达  $64.7^{\circ}\text{C}$ , 而 700 hPa 以上、300 hPa 以下是一个低能区, 最低值  $53.8^{\circ}\text{C}$  在平凉上空, 这个低能气团恰好在西安-平凉间

地面强天气的上空。西安本站 $\theta_{se500} - \theta_{se850} = -10.9^{\circ}\text{C}$ , 这是不稳定大气层结。

分析 3 日及 4 日 08 时 850 hPa 饱和能差温度( $T_s - T_t$ ),  $T_s$  表示饱和湿空气总温度,  $T_t$  表示未饱和湿空气总温度。3 日 08 时表明在西安附近 850 hPa 存在一个  $T_s - T_t \geq 20^{\circ}\text{C}$  的干暖盖, 最大中心位于西安本站( $T_s - T_t = 21^{\circ}\text{C}$ )。到了 4 日 08 时, 850 hPa 的 ( $T_s - T_t$ ) 高值中心已向东移, 并有所减弱, 中心位于郑州附近, 中心最大值为  $19^{\circ}\text{C}$ , 而西安本站为  $15^{\circ}\text{C}$ , 说明西安附近湿度增加, 使高温、干燥的空气减弱, 为这次强对流天气积聚能量并爆发释放提供了有利条件。

从探空曲线分析, 4 日 08 时西安地区从地面到 600 hPa 以下是一个湿层, 以上为干层。在 580~610 hPa 之间是一个近似等温的稳定层, 880 hPa 到地面是一个逆温层。实际上 3 日 08 时, 这个逆温层已经存在, 早晨西安地区有轻雾出现, 从 850 hPa 到地面是一个深厚的逆温层, 而且比当日的逆温层还要厚。当天 08 时, 500 hPa 槽后银川附近已出现了  $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的大风区, 而且有很大的温度梯度, 中空急流干平流很强, 达到  $8.1 \times 10^{-1}^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ 。4 日 19 时西安上空 4000 m 处已出现  $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的西北风。可以认为, 干暖盖的存在, 配合强劲的中空急流干平流, 在产生强对流风暴过程中起到了重要作用。

### 3.2.2 空间风场分析

从 3 日开始西安地区 3000 m 以下出现了偏南风层, 但风速较小。到 4 日 01 时, 在 1500~2000 m 层偏南风风速加强到  $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以上, 而 1000 m 以下几乎都为较强的东南风, 这种状况维持到 4 日 13 时。同时西南风也在向上发展, 到 4 日 07 时就扩展到了 8000 m 高空。很明显, 深厚的南风层有利于输送暖湿空气。而 4 日 07 时, 9000 m 层以上的高空是大于  $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的西北风。高低层风场切变非常大, 这有利于不稳定天气的发展<sup>[3]</sup>。同时这种风随高度顺转的暖平流结构, 具有明显的正值水平螺旋度。到 13 时以后中空 3~5 km 出现了较强的垂直风切变。中层较强的垂直风切变和低层正值水平螺旋度相结合, 构成了龙卷产生的重要动力条件<sup>[4]</sup>。当它们转化为垂直螺旋度后, 有利于龙卷的形成。

### 3.3 龙卷回波的演变特征

雷达回波详细地记录了整个过程, 资料取自西安气象雷达站德卡-43x 型 (3 cm) 雷达回波资料。9 月 4 日, 11:20 在甘肃东部六盘山背风坡一侧出现零星雷暴回波, 12:45 形成一条东北-西南向的带状回波, 组织成一条飚线回波 (图 2a)。飚线中部对流单体的高度为 9.8 km, 尾部 A 处的高度为 5.7 km。由于此时飚线处于发展初期, 相对应的地面上只出现了阵雨天气。飚线尾部的形态特征呈“八”字, A 处具有弓状回波的特征。14:00 (图 2b) 飚线有了明显的发展, 形成一条长 200 km, 宽 10~15 km 的雷雨回波带。回波带南段窄, 结构紧密, 强度大; 北段宽, 结构松散, 强度弱。与地面形势对照, 飚线南段受地面冷锋和副冷锋共同影响, 冷空气强度较北段更强, 它与飚线南侧前的暖湿气流交汇, 使得这里的对流单体得到发展。地面开始出现雷阵雨天气。从回波中还可看出, 飚线回波带的前部不断有新的对流单体生成, 尾部有强的对流单体在发展, A 处弓状回波不明显。14:25 (图 2c) 飚线进一步发展, 整个飚线结构紧密, 北段回波密实, 亮度大, 边缘清晰; 南段强度大, 尾部 A 处弓状回波尤为突出。相对应的地面出现了雷雨大风天气。弓状回波造成乾县 1 h (14~15 时) 降水 24.3 mm、16

$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  的西北风。15:00 弓状回波中的强对流单体出现前悬回波, 云顶高度为 12 km, 呈一窄而强的圆柱体。就是这个强单体在从乾县经礼泉向咸阳移动的过程中, 给沿途造成剧烈天气: 礼泉 1 h (15~16 时) 降水 26.8 mm, 最大风速  $16.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 咸阳 1 h (15~16 时) 降水 20.1 mm, 最大风速  $21 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。15:30 龙卷回波出现。在 PPI 上 (图 2d), 飑线北段形成一条长 80 km、宽 25 km 的带状回波; 南段弓状回波长度为 40 km, 宽度只有 10 km, 非常均匀, 龙卷就出现在弓状回波的北端。RHI 上 (图 2e), 龙卷雷暴垂直高度 14 km, 龙卷云中伸出一个象鼻子袭击大地, 呈羊角状。在地面上出现大暴雨、冰雹和强风。在龙卷东移的过程中, 给沿途带来了巨大的灾害。16:00 (图 2f), 弓状回波仍很明显, 龙卷移至弓状回波的南端, 给西安西郊和南郊造成很大损失。整个飑线带状回波缩短, 长度仅为 70 km, 宽度 20~40 km, 呈“人”字形。

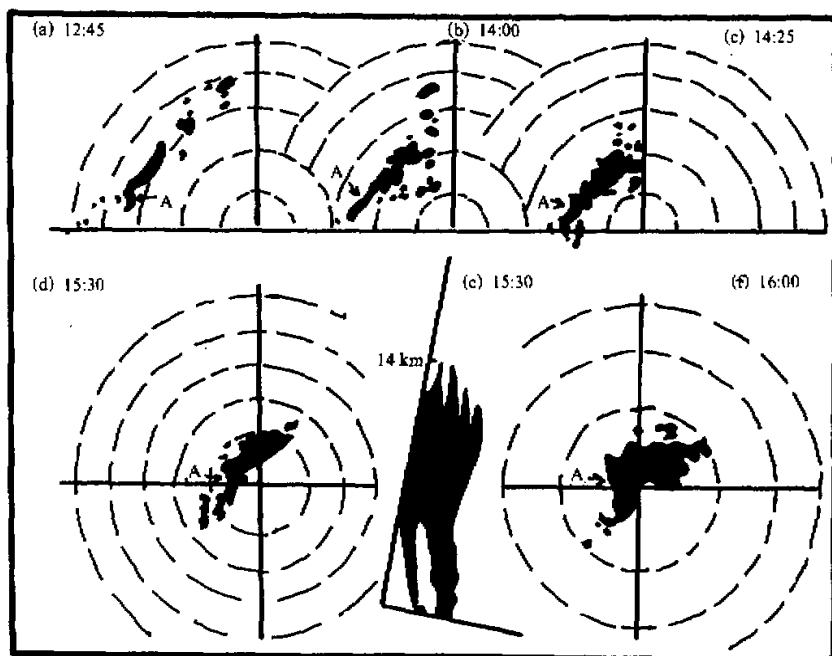


图 2 1983 年 9 月 4 日雷达回波素描图

(a) 仰角  $0^\circ$ , (b)、(c)、(d)、(f) 仰角为  $0.5^\circ$ , (e) 的方位为  $285^\circ$   
每圈半径为 50 km, 回波廓线为 0 dB

此次产生龙卷的弓状回波有以下特点: (1) 弓状回波从生成到消失维持了近 4 h。(2) 弓状回波前后两侧结构紧密, 边界清晰、光滑, 宽度均匀, 因此称环状回波更恰当。(3) 产生龙卷的弓状回波后部有强的冷空气不断补充南下, 这是地面副冷锋造成的。

### 3.4 卫星云图特征

9 月 4 日河西有一条冷锋云系东移, 锋面云带细而长。同时在四川北部有一低涡云系北抬。14:00 (图 3a) 这两条性质不同的云系相碰, 在交绥处即冷锋云系的尾部有一

个中尺度对流云团得到迅速发展, 成为一个长 350 km, 宽 150 km, 具有中尺度环流特征的雷暴, 这个雷暴只在条件十分有利的情况下才能出现龙卷。在图中, A 云团是西南涡发展起来的, 呈气旋性旋转。云团结构松散, 成圆形。与 A 云团形成鲜明对比的是 B 云团结构密实, 色调白而亮, 边缘清晰, 呈新月状, 有明显的弓形。15:21 (图 3b) A 云团继续北抬, 色调较暗, 云团上部覆盖有卷云砧, 云区边界不清晰。中尺度雷暴云团仍然呈新月状, 云团东部有卷云砧, 云区边界不清晰; 云团西部边界清晰、密实, 无卷云砧。这也反映了地面副冷锋对 B 云团有很大作用。

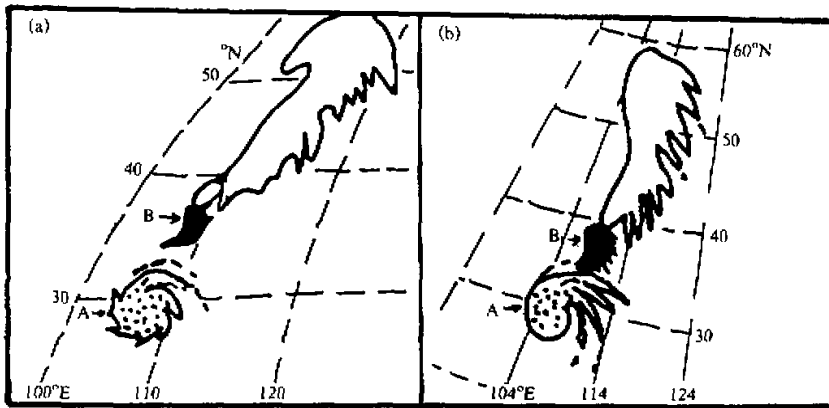


图 3 1983 年 9 月 4 日 14:00 (a) GMS 红外云图和 15:21 (b) NOAA 红外云图

从卫星云图上看, 在冷锋尾部的对流云团尺度很大, 形态特征独特, 与冷锋或静止锋云带尾端断裂处的暴雨云团模式有不同之处, 即地面副冷锋与南部涡旋云团的影响。龙卷容易在冷锋后部的对流风暴中产生, 因为在冷锋后部对流风暴发生之后, 由于扭曲作用, 在其下沉气流前侧边缘是产生龙卷的涡源区<sup>[5]</sup>。

### 3.5 龙卷发生发展与地面流场的关系

9 月 4 日 13 时, 陕西中部沿渭河有一条东西向的中尺度辐合线。辐合线南部为西南风, 北部为东北风。此时宝鸡西部有一条南北向的辐合线东移, 与东西向的辐合线并未相交。14 时 (图 4a) 两条辐合线相交, 成“L”形, 相交处有一中尺度气旋环流形成。与此时的雷达回波对比, 飑线南段位于辐合线交点北部, 而且窄而强。地面上辐合线交点北部的麟游西北风达  $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 而交点南部岐山东北风仅  $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。15 时 (图 4b) 南北向的辐合线继续东移, 中尺度气旋环流消失, 形成一条“人”字形辐合线。辐合线交点南部乾县的西北风风速达  $18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 地面出现雷暴天气, 1 h 降水 24 mm, 与它相邻, 南部的扶风地面西北风风速仅为  $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 仍然呈北部风速远大于南部风速的状态。这里需要说明的是, 由于关中平原南侧为秦岭山脉, 靠近山脉的测站受地形的影响并不能完全代表地面风的实际情况。而秦岭南侧的风对关中平原的影响也是至关重要的。从 15 时的地面风场来看, 西安南部的镇安、山阳、商县等地都吹着东南风, 说明西安南部的山区有一股较强的东南气流。从西安 4 日空间风场来看, 01~13 时,

1000 m 以下几乎均为强的东南气流, 证实了这股东南气流的存在。当这股东南气流与西北部强西北气流交汇时, 在地面就形成了涡旋环流。15:30 龙卷出现在辐合线交点处西侧, 这里也是秦岭南侧东南气流与强西北风的交汇处。16 时 (图 4c) 南北向的辐合线移至长安、渭南、澄城一线, 龙卷附近测站的西北风普遍增大, 咸阳、长安  $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 高陵、三原  $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。与此相对应的是秦岭南侧的东南风仍然存在, 与西北风相聚在西安上空, 形成涡旋环流。16:30 龙卷消失, 但降水仍持续到 17 时。17 时 (图 4d), 地面西北风减弱并消失, 辐合线南压, 此次过程基本结束。

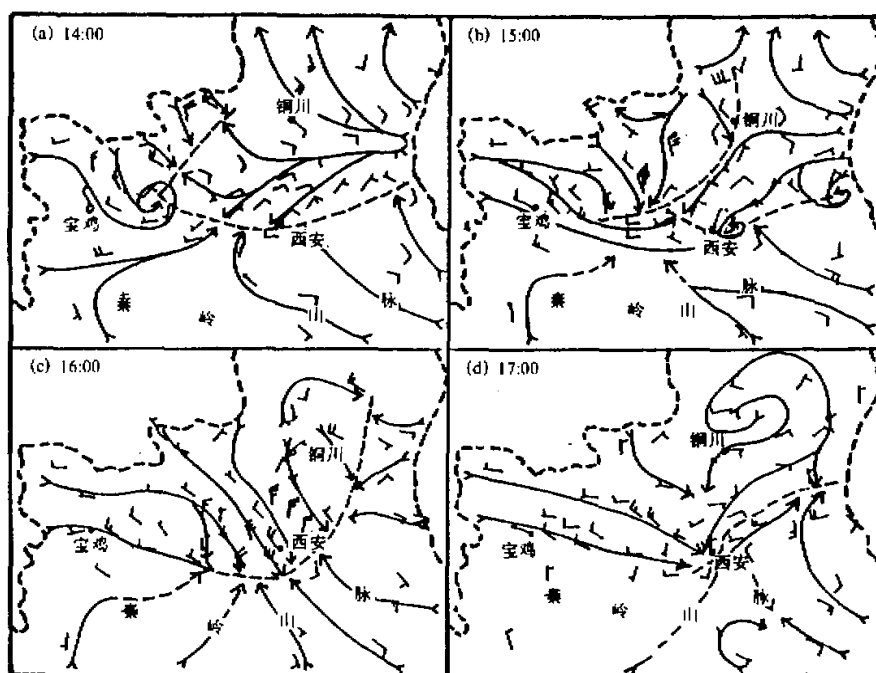


图 4 1983 年 9 月 4 日 14~17 时地面流场

从地面流场的演变过程证实了龙卷在地面“人”字形辐合线交点处生成, 也是西北风和东南风交汇处。

### 3.6 龙卷的生成特征

为了了解该龙卷的生成过程, 将天气图、卫星云图、雷达回波绘制在同一张图上并进行综合分析。如图 5a 所示, 地面有两条冷锋, 每一条冷锋后都存在着一个闭合的冷高压。而处在冷锋云系尾部的弓状云团位于地面冷锋后部的中尺度高压内、地面副冷锋前部。雷达回波中的弓状回波 (环状回波) 处在中尺度雷暴弓状云团的南端, 其强度随时间不断增强, 对应地面的天气也逐渐剧烈, 说明中尺度雷暴弓状云团南端的中尺度涡度是随时间加大, 最终导致了龙卷的出现。15:30 弓状回波中出现龙卷特征 (图 2e), 对应地面流场中气流呈反气旋旋转 (图 5b), 说明该龙卷是在反气旋环流背景下出现

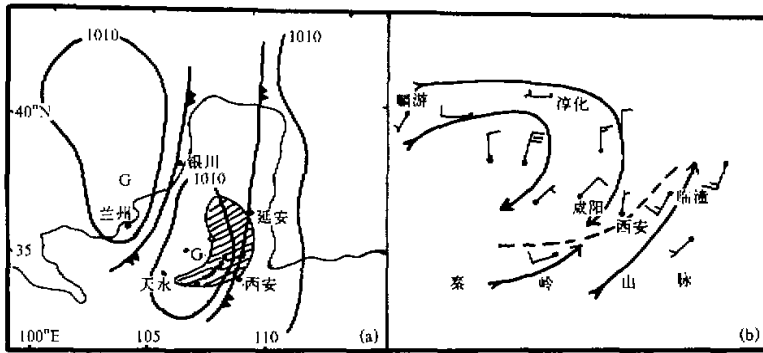


图 5 1983 年 9 月 4 日 14 时综合示意图 (a) 和 15:30 地面流场图 (b)

的, 似乎有反气旋结构特征, 而雷达回波中的弓状回波可能是中尺度反气旋环流在 PPI 上的反映。

## 4 飊锋生成及其中尺度特征

### 4.1 飊锋与龙卷雷暴的相互作用

飊锋是指对流风暴中湿下沉气流到达地面与被抬升的暖空气之间的界面, 是湿下沉气流在低空造成强风的前缘。由于飊锋常扩展到降水前缘几公里或几十公里的地方, 因而在大面积雷达回波的前方, 常观测到一条细线回波, 也呈弧状<sup>[6]</sup>。与经典理论不同的是龙卷雷暴形成的飊锋回波不仅出现在对流风暴母体的前方, 也出现在对流风暴母体的两侧。飊锋回波带对龙卷雷暴系统有显著的负反馈作用。

9 月 4 日 16 时龙卷移至西安西郊, 飊线回波短而宽, 集中在龙卷附近, 雷达回波中还没有出现飊锋回波带。16:25 (图 6a) 龙卷雷暴回波中出现飊锋回波带, 呈线状。从线状回波中可看出一簇积状云排列而成, 出现在龙卷雷暴后部, 准确的说是在雷暴后部的南北两侧。北侧飊锋回波带长 80 km, 宽 5 km, 积云较小。南侧受秦岭山脉影响回波有点误差, 大约长为 50 km, 宽为 8~10 km, 积云较大。飊锋回波带的出现说明此时龙卷正处在崩溃阶段。16:45 (图 6b) 两条飊锋回波带都有不同程度的发展, 南侧飊锋回波带发展得更强, 长度达 60 km, 宽度 20 km, 飊锋上的对流单体比 16:25 有了较大的发展。与此形成鲜明对照的是龙卷雷暴明显减弱, 说明飊锋回波带的出现明显切断了该过程中流向中尺度雷暴的气流, 加速了龙卷雷暴的消亡。显然北侧的飊锋阻挡了西北气流流向龙卷雷暴, 而南侧的飊锋阻挡了东南气流流向龙卷雷暴, 使低层中尺度涡度供给中断, 加速了龙卷的消散。从南侧飊锋对流系统发展得更快, 说明南侧的飊锋比北侧的飊锋强度更大。17 时 (图 6c) 两条飊锋回波带长度缩短, 剩余部分略有发展, 飊锋削弱了龙卷雷暴的发展, 而削弱的龙卷雷暴也进一步削弱了飊锋的发展。龙卷雷暴削弱后, 在雷暴前部的飊锋回波带也显露出来, 但强度弱于后部飊锋。17:35 (图 6d) 雷暴回波已经消失, 而飊锋回波带也开始消散。19:35 两条飊锋已演变成一条飊

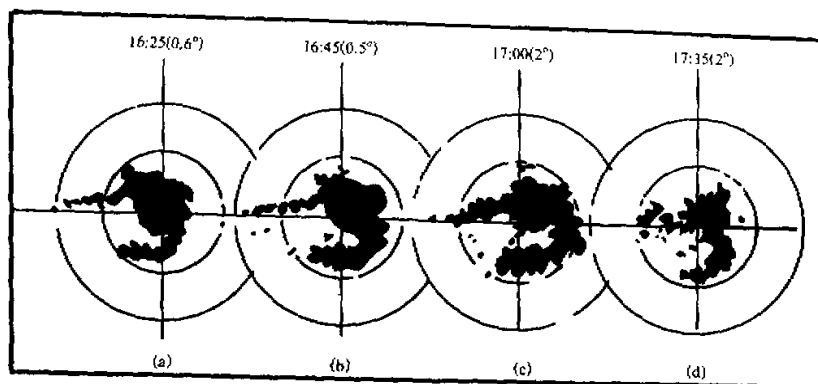


图6 1983年9月4日雷达回波素描图  
仰角  $0.5^{\circ} \sim 2^{\circ}$ ；每圈半径为 50 km；回波廓线为 0 dB

锋，20:25 飊锋消失，飊锋生命史为 4 h。

分析表明，龙卷的飊锋回波带对中尺度雷暴系统有显著的负反馈作用，它不仅出现在雷暴前部，而且出现在雷暴后部，与经典的飊锋理论有不同之处。飊锋回波带形成在什么地方，显然与影响雷暴系统的低层主要气流密切相关。

#### 4.2 飊锋回波带形成的可能机制

分析 4 日 16~17 时地面气象要素场的变化情况，发现出现在对流风暴母体两侧的飊锋回波带形成的物理机制并不相同，其中北侧飊锋回波带的形成机制及天气学意义与目前经典的飊锋理论是不相符的。

16:25 的雷达回波表明在龙卷雷暴南北两侧出现飊锋回波带，表现为两条几乎平行的窄带回波，出现的位置与经典理论有不同之处，图 7 为 16:20 陕西中部地面温度分布。从图中的温度分布情况看，在飊锋回波即将形成之时，在其周围存在两个冷空气中中心，分别位于淳化、长安附近。此时对流风暴母体位于西安南郊，长安县冷中心是由这个对流风暴母体的低层出流造成的。因为飊锋不断向前推进，抬升前面的暖湿空气，因此在长安至蓝田之间出现了新的对流单体，并产生了阵性降水。南侧飊锋回波带形成的物理机制及天气学意义与经典理论相吻合。形成于雷暴北侧的飊锋回波带则不同，16:25 北侧飊锋回波带位于扶风、乾县、礼泉、咸阳一线，呈东西向，在回波带北部存在一个  $15.1^{\circ}\text{C}$  的冷中心，而在回波带的南侧气温约为  $20 \sim 21^{\circ}\text{C}$ ，锋区最强为  $4^{\circ}\text{C} / 25 \text{ km}$ 。这里引起我们注意的是飊锋回波带形成的区域是冷锋飊线刚刚经过的区域，在这个区域内，温度普遍下降。但由于天气的剧烈程度不同，在冷锋飊线过境后的区域内存在着冷热不均现象，尤其是强对流天气发生地，如乾县、礼泉、咸阳温度明显低于南部地区。另外副冷锋的残余部分继续南下，使回波带北侧的冷空气加强。从地面湿度来看，16:20 在回波带北侧相对湿度均在 90% 以上，而在回波带南侧则平均在 80% 以上。从地面风场来看，16:00 地面辐合线已经南压到秦岭山脉与平原地区的交界处，回波带南北两侧都吹着西北风，但到了 16:20 回波带南侧的眉县、周至已由西北风转为西



## 参 考 文 献

- 1 马廷标, 1984, 一次强飑线个例分析, 陕西气象, 第6期, 11~15.
- 2 Steven, E. Koch, 1990, 中尺度天气分析和预报译文集, 北京: 气象出版社, 101~103.
- 3 丁一汇等, 1982, 我国飑线发生条件研究, 大气科学, 6(1), 18~27.
- 4 Johns, R. H. and C. A. Doswell, III, 1992, Severe local storms forecasting, *Wea. Forecasting*, 7, 604~605.
- 5 A. И. 洛莫夫, 1988, 龙卷的形成, 气象科技, 第6期, 11~17.
- 6 杨国祥等, 1991, 中尺度气象学, 北京: 气象出版社, 221~235.

### A Meso-Scale Analysis of Tornado and Squall Front Forming in a Squall Line Process

Liu Yong, Liu Zichen, Ma Tingbiao and Qiao Xuxia

(*Shaanxi Meteorological Observatory, Xi'an 710015*)

**Abstract** Comprehensive analyses and researches on synoptic situation, radar echo, satellite cloud picture, meso-scale surface wind field and disasters were carried out for a disastrous strong thunderstorm at mid-part of Shaanxi Province on September 4, 1983. Results show that this disastrous strong thunderstorm yielded an tornado, appearing at the end of band echo of squall line which was a typical arched echo (cellular echo), on satellite cloud picture, a meso-scale vigorously developed turbulent cloud cluster was seen at cross point of herringbone cloud systems. The tornado took place in strong northwestern wind of rear part at cross of ground convergence lines, caused by mutual effects of two cold fronts on ground. The echo of squall front with two parallel bands appeared at the rear of the thunderstorm. This is different from the theory of squall front.

**Key words** tornado squall front radar echo satellite cloud picture  
meso-scale convergence line