

# 一次伴随强沙尘暴天气飑线的 多普勒雷达回波特征

韩经纬<sup>1,2</sup> 孟雪峰<sup>1</sup> 宋桂英<sup>1</sup>

(1. 内蒙古气象台, 呼和浩特 010051 ; 2. 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室)

**提 要：**利用新一代天气雷达和 T213 数值预报产品资料对 2005 年 4 月 1 日发生在内蒙古中部偏南地区的一次局地强沙尘暴和雷雨大风天气过程进行了连续的监测和分析。诊断分析表明：局地强沙尘暴发生前，动力、热力场条件和系统结构有利于强对流天气的发生发展，沙尘暴发生区域，低层散度的辐合中心和垂直运动的上升中心有很好的对应关系，并与雷达资料的逆风区相对应。物理量场的强度达到甚至超过了当地暴雨或强对流天气的强度，而在沙尘暴发生区域上空整层的相对湿度均特小，低层尤为干燥。进一步结合新一代天气雷达的探测结果，在对雷达回波逆风区沿入流方向（SW—NW）的空间剖面分析表明，沙尘暴区域的低层 850hPa 有强辐合中心，高层存在辐散中心，700hPa 附近存在强上升中心，且上升高度一直达到 350hPa 附近。局地强沙尘暴和强风主要是雷暴内中- $\gamma$  尺度系统强的辐合旋转造成的，反射率最大区与正负速度最大区接近或重叠，并由正速度区过渡到负速度区，产生了强烈的风切变，使中- $\gamma$  尺度系统的辐合旋转加强，加之低层较强的垂直运动，造成了局地强沙尘暴天气。沙尘暴区域以外的强风是雷暴系统外部产生的，其最大风速出现在弓形回波突出的部位、出流回波区域及径向速度图上速度模糊区域，而强沙尘暴天气却出现在中- $\gamma$  尺度的逆风区中。

**关键词：**新一代天气雷达 沙尘暴 中- $\gamma$  系统 速度模糊区

Analysis of Doppler Radar Echoes of a Thunderstorm with  
Local Sandstorm in Inner Mongolia

Han Jingwei<sup>1,2</sup> Meng Xuefeng<sup>1</sup> Song Guiying<sup>1</sup>

(1. Inner Mongolia Autonomous Meteorological Observatory ,010051 Huhhot ;

2. State Key Laboratory of Severe Weather , Chinese Academy of Meteorological Sciences )

**Abstract :** With the CINRAD/CD Doppler radar and T213 numerical production , a thunderstorm with sandstorm , and strong wind was continuously monitored and analyzed in the central-southern areas of Inner Mongolia autonomous. It shows that before the sandstorm appeared , the convergence center of the low level divergence coupled with the center of the vertical rising movement , and with the rebellious wind area of radar data. The intensity of physical field approached or even exceeded the ones of local heavy rain or strong convection weather. The relative humidity is badly poor above the sandstorm region , especially at the lower level.

The analysis of CINRAD/CD Doppler radar data indicates that the severe sandstorm and wind appeared because of the strong converging and revolving of the meso- $\gamma$  scale system. The great reflectivity area overlapping the heaviest positive/negative speed area , and the strong shear between the positive speed and the negative ones , strengthen the converging and revolving of the meso- $\gamma$  scale system. The strong sandstorm emerged in the converse wind area of the meso- $\gamma$  scale system , while the strongest wind beside the sandstorm appeared in the projecting position of the bow-shape echo , the outflow or in the radial speed picture.

**Key Words :** CINRAD/CD sandstorm meso- $\gamma$  scale system the speed blurred area

## 引 言

内蒙古春季经常发生大范围高强度的沙尘暴天气，这些大范围沙尘暴天气均和强冷空气的活动有关。许多专家应用数值模式、卫星云图和常规气象资料对沙尘暴天气进行了广泛的分析，取得了很多研究成果。王式功等<sup>[1]</sup>指出，冷锋活动是造成大范围大风沙尘暴的主要天气系统。赵光平<sup>[2]</sup>认为强冷空气的加强和整体东移是产生强沙尘暴天气的必要条件，春季西北地区变化剧烈的热力条件是中小尺度天气系统发展和上下层冷暖空气交换的主要物理原因之一。项续康，江吉喜<sup>[3]</sup>利用 GMS 静止气象卫星红外资料，对我国西北地区 1990 年以来爆发的 6 次强沙尘暴天气的成因做了中尺度分析，认为强沙尘暴是由一些中尺度强对流系统形成和发展而造成的。<sup>三方数据</sup> 大气中垂直环流和水平方向上

风速的切变对沙尘暴形成有重要作用<sup>[4]</sup>。胡隐樵等<sup>[5]</sup>认为黑风暴有一系列飑线的基本特征。由强冷锋前低层风辐合发展的中尺度低压，低压环流强水平辐合使上升运动加强，层结趋于位势不稳定，从而发展干对流，并认为干飑线是一种特殊的中尺度天气系统。

在天气雷达探测和应用研究方面，许多专家应用新一代天气雷达对雷暴、大风、冰雹等强对流天气进行了研究。伍志方<sup>[6]</sup>利用 CINRAD/SA 进行了夏季热带飑线的特征分析，张一平等<sup>[7]</sup>进行了雷暴外流边界与强天气雷达回波的关系研究，分析了严重风灾的雷达回波特征。邵玲玲等<sup>[8]</sup>对多普勒雷达中气旋产品在强风预报中的应用进行了研究，给出了局地灾害性强风的预报着眼点。

上述对沙尘暴的研究大都基于大尺度强冷空气爆发背景，或利用卫星云图对中尺度

强对流系统进行了分析，而新一代天气雷达的应用主要集中在暴雨、雷暴、大风、冰雹等强对流天气上。本文利用新一代天气雷达 CINRAD/CD 对发生在内蒙古中部偏南地区一次中小尺度强沙尘暴天气进行了分析，希望能够得到一些利用新一代天气雷达监测、预警干对流和局地沙尘暴的有益启示。

## 1 天气概况

2005 年 4 月 1 日，在内蒙古自治区中部偏南地区产生了入春以来第一场强对流天气。许多测站是首次闻雷，由于前期干旱少雨，强对流造成了内蒙古中部大范围的干雷暴、大风和局地沙尘天气，部分测站伴有微量降雨和冰雹（图略）。大风主要发生于下午 14—17 时飑线和弓形回波过境时，以 15 时前后为主要发生期，有 18 个测站产生了大于  $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的瞬时大风，其中：希拉木仁、凉城、丰镇、集宁和察哈尔右翼中旗还出现了大于  $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的大风。

特别是呼和浩特市南部的和林格尔在 15—16 时伴随大风出现了局地强沙尘暴天气，和林格尔及其南部近邻测站清水河，从 14 时开始到 16 时， $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以上的大风风向由偏南（ $246^\circ$ ）逆时针转为西北风（ $337^\circ$ ），17—18 时风向转为东北风。和林格尔的微量降水出现在 16 时以后，也就是在局地沙尘暴天气之后。

14—20 时，主要是 15 时以后，沙尘暴以外区域有 15 个站出现了微量至 6mm 的降雨，其中两站最大雨量为 5mm 和 6mm。截止到当日 20 时，与内蒙古接壤的山西北部、河北北部多站出现了雷暴天气。

## 2 大尺度天气背景和影响系统

在 2005 年 4 月 1 日 08 时 500hPa 高空

图（图略）上，由中亚分裂的短波小槽，沿脊前西北气流东移至内蒙古西部至河套上空，配合有冷平流南下，08 时 700hPa 高空图（图略）上，槽线位于呼和浩特到陕西省北部，槽后为一支呈加强趋势的西北气流，08 时 850hPa 高空图（图略）上，河套附近存在弱的切变，切变线沿内蒙古中西部偏南地区延伸于内蒙古中东部的偏南地区，切变线南侧有弱的偏南气流输送，内蒙古西部为一支西北风急流区。14 时地面图（图略）上，内蒙古中西部偏南地区处于低涡暖区前部的辐合区域。地面、850hPa、700hPa 上槽线近为重合，500hPa 槽线略后倾。强干对流天气就是在这样高层冷槽，低层干暖切变（低涡）的大尺度空间配置下产生的。

造成干对流天气的主要影响系统是干暖切变线上的中尺度低压即干飑线。低压环流强水平辐合，较强的上升运动和位势不稳定，促使了干对流发展。强的干雷暴系统是局地沙尘暴天气的直接影响系统。

## 3 动力、热力场条件

由数值预报产品物理量场的分析可以看出这次天气过程的动力和热量场特征。图 1 是 2005 年 4 月 1 日 14 时 850hPa 垂直速度（虚线）和 700hPa 涡度平流（实线）图。从 850hPa 垂直速度图中可以看出，位于  $38 \sim 41.5^\circ\text{N}$ 、 $110 \sim 112^\circ\text{E}$  范围内，存在较强的上升运动中心。从连续演变看，上升运动在该地区是不断加强的，低层的分布强度远大于高层。700hPa 涡度平流图上，在  $39^\circ\text{N}$ 、 $112^\circ\text{E}$  和  $39^\circ\text{N}$ 、 $113^\circ\text{E}$  分别存在一对涡度平流正负对偶中心。正涡度平流最大输送中心和 850hPa 上升区域相对应，从连续演变看，正涡度平流区域一直维持在这一地区，并呈加强趋势。从垂直结构看，从低层到高层此区域均为正涡度平流区域，低层的

输送大于高层，尤以 850hPa 为最大。垂直分布还表明，低层中心区域位于内蒙古中部偏南地区的西南部，随高度增高向东北方向倾斜。整层正涡度平流输送配合低层较强的上升运动，为这次强干对流天气提供了动力抬升条件。

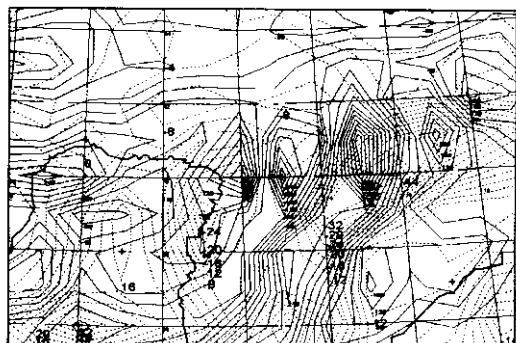


图 1 2005 年 4 月 1 日 14 时 850hPa 垂直速度（虚线）和 700hPa 涡度平流（实线）

图 2 是 2005 年 4 月 1 日 14 时 850hPa 假相当位温和 500hPa 温度平流图，从 850hPa 假相当位温图上可以看出，由内蒙古鄂尔多斯及山西省伸向呼和浩特方向的高能舌，连续变化是加强的。850hPa 相对湿度图上（图略），有一弱水汽输送带，由山西输送到内蒙古中部地区，在呼和浩特附近形成一相对的大值中心，但湿层极浅薄。而同时次的 500hPa 温度平流图上，上述区域正好叠加着一个负温度平流中心，形成了上干冷、下干暖的空间配置。由图 2 分析表明，内蒙古中部地区存在着有利于强对流发展的热力抬升条件。综上所述，在 2005 年 4 月 1 日 14 时呼和浩特附近的内蒙古中部偏南地区具备了强对流发生、发展的动力和热力场环境条件。

#### 4 雷达回波的演变

图 3（见彩页）为 4 月 1 日 12 时 32 分

到 16 时 06 分雷达回波演变图。在 4 月 1 日 12 时 23 分的反射率因子图上（天线仰角  $0.5^\circ$ ，距离 100km），在测站西北部  $340^\circ$ 、 $100\text{ km}$  和  $350^\circ$ 、 $100\text{ km}$  处，各有一强的对流单体回波。其中：在  $350^\circ$ 、 $100\text{ km}$  处的强回波中心达到  $45\text{ dBz}$ 。其后雷达回波不断发展为有多个孤立对流云团组成的具有弓形回波特征的带状回波带并向东南方向移动，到 14 时 04 分形成了较为完整的回波云带。其中在测站西北  $280^\circ$ 、 $20\text{ km}$ ， $15^\circ$ 、 $40\text{ km}$ ， $30^\circ$ 、 $15\text{ km}$  处各形成三个强中心，强度分别为  $40\text{ dBz}$ 、 $45\text{ dBz}$ 、和  $45\text{ dBz}$ ，并且呈增强趋势。14 时 37 分，云带压过测站。从同时次的速度图上可以看出，零速度线的分布在测站西南部（低层）为暖平流，在测站西北部（高层）为冷平流，同时可以看出，在云带前后零速度线附近，正、负速度均较大（速度梯度）。特别是在  $30^\circ$ 、 $40\text{ km}$  处存在一逆风区，对应在反射率因子图上，为一大于  $45\text{ dBz}$  的强中心。径向速度图上，测站正西方向  $270^\circ$ 、 $10\text{ km}$  处出现了  $-24\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的大风，到 15 时 06 分，回波带位于测站东南方  $20\text{ km}$  处呈东北—西南向，径向速度图上最大风速区出现在测站正东  $90^\circ$ 、 $30 \sim 40\text{ km}$  处，为  $24\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

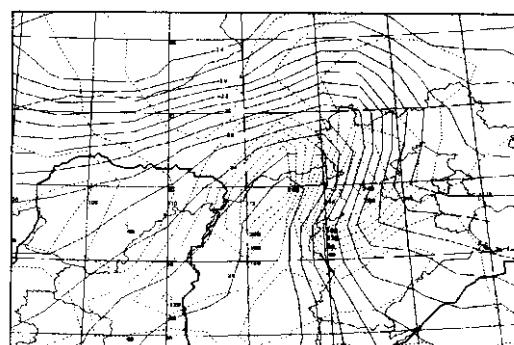


图 2 2005 年 4 月 1 日 14 时 850hPa 假相当位温（虚线）和 500hPa 温度平流（实线）

在正速度区域内个别地区出现了速度模糊区。这期间由于云带的快速发展，云带的突出部分和强对流云团前缘有出流云线的生成，并伴有阵风锋<sup>[9]</sup>，回波云带和强对流中心经过地区许多测站出现了大于  $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的偏南转偏北大风和干雷暴过程，个别测站还出现了冰雹和少量降水。到 15 时 06 分，在测站东南方  $200^\circ$ 、 $30 \sim 40 \text{ km}$  处又出现了一个中- $\gamma$  尺度的逆风区，正是这一系统造成了和林格尔附近局地的强沙尘暴和大风。

取雷达测站上下游  $50 \text{ km}$  附近资料分析，从上游站武川（图略）、土左可以看出，主要天气均是在 1 日 14 时以前过境的，此二站距雷达测站约  $50 \text{ km}$  左右，当天气在此二站过境时，气压略升，湿度呈波动状，气温在过境前后起伏不大，风向和风速均有切变。说明在此区域中，属于局地锋生前期。呼和浩特和和林格尔要素变化较上述二站剧烈，当云带过雷达测站时，气温上升、气压下降明显，风向和风速的变化均较大，说明锋区是在过测站时及以后加强的，雷达的跟踪也表明，回波在过大青山雷达测站时及以后显著加强。在和林格尔和集宁的要素变化图上，更明显的表现出气温骤降、气压陡升、风速激增的弱飑线特征了。1 小时内气温下降了近  $7^\circ\text{C}$ ，气压升高了近  $5 \text{ hPa}$ 。雷达站下游各站要素突变主要出现在 1 日 15—16 时。若用自记数据分析要素变化，可能更能说明问题。由上分析可以看出，回波云带应是辐合线上的飑线云带。

## 5 雷达反射率因子和径向速度场特征

对雷达测站到东南  $50 \text{ km}$  处的和林格尔之间，造成局地强沙尘暴天气的中- $\gamma$  尺度系统进行了雷达分析。图 4（见彩页）是 4 月 1 日 15 时以后造成局地沙尘暴、强对流云团的反射率因子和对应时次的径向速度

图。

由图 4a（见彩页）可以看出，在雷达测站南  $30 \text{ km}$ 、 $190^\circ$  处和  $20 \text{ km}$ 、 $170^\circ$  处各存在一强对流回波中心 A 和 B，强度都为  $45 \text{ dBz}$ ，其中 A 回波为一逗点状回波，在 A 突出的前沿处有一弱的出流回波线，强回波中心后部有一个“V”型槽口（箭头 C 处）。在弓状回波前部北端有一如流槽口，箭头 D 处。对应同时次的径向速度图上（图 4b（见彩页）），在这一区域为一逆风区，正速度中心在左，负速度中心在右，中心连线与其间零速度线成  $10^\circ$  夹角，“V”型槽口 C 对应于径向速度图上正速度区域后侧，而入流槽口 D 对应于负速度中心区域，正负速度中心的距离大约有  $6 \text{ km}$ ，最大平均转动速度达  $13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，可以认为，这是一个具有明显气旋性旋转和辐合的中- $\gamma$  尺度的系统。另外，图 4a（见彩页）E 处，回波云带突出的部位，存在发展中的出流回波带。到 1 日 15 时 13 分，强中心 A 向着原回波前侧入流 D 处发展和移动，强度维持在  $45 \text{ dBz}$  左右，回波后部的入流槽口继续维持，同时次径向速度图上，正速度区和负速度区的中心连线与其间零速度线夹角增大为  $45^\circ$ ，最大平均转动速度变化较小，正速度区面积略有增加。到 15 时 23 分，强中心 A 进一步加强，且移动到了原入流槽口 D 处，强度达  $45 \text{ dBz}$  以上，前侧“V”型入较强流槽口嵌入强回波云体中。径向速度图上，正速度区从负速度区的左侧，进入负速度区域，将负速度区域分割为两个中心。在 1 日 15 时 27 分，回波 A 进一步增强，正速度区和负速度区又发展加强并东南移动。此间反射率最大区与正负速度最大区重叠，并由正速度区过渡到负速度区，表明了此处产生了强烈的风切变。在此期间径向速度图上，低层和高层分别存在带状分布的两个最大风速区，风速达  $18.5 \sim 22.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，和  $22.3 \sim$

$24.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，局部地区还出现了速度模糊，表明高层辐散较强。但在逆风区域附近，径向速度只有  $\pm (3.7 \sim 7.4) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，最大时也只有  $\pm (7.4 \sim 11.1) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，由此可见和林格尔附近的局地强沙尘暴，是由于逆风区强烈的风切变，旋转、辐合和垂直运动造成的。

图 5 是沿雷达回波逆风区沿入流方向 (SW—NW) 物理量空间剖面图。从图 5a 中可以看出，在产生沙尘暴区域的低层有一个  $-48 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$  的辐合中心，辐合区域从地面一直扩展到 600hPa 附近，在该区域的高层 500hPa 附近存在一个  $24 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$  辐散中心，其上的辐散区域沿入流方向 (NE) 倾斜着伸向 200hPa，高层的辐散区域对应于雷达径向速度图上的强风速区。低层强的辐合，高层辐散，形成了较好的抽吸作用，有利于低层气流的汇合和沙尘的垂直输送。另外从图中还可以看出，在沙尘暴发生区域上

空整层的相对湿度均较小，特别低层较为干燥。

在图 5b 中，沙尘暴发生区域上空 700hPa 附近存在一个  $-4.8 \times 10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$  的上升中心，上升高度一直达到 350hPa 附近，而在中低层均为正涡度区域，主要分布于上升区域的前部，并偏向于东北方向，即未来雷达回波的移动方向。雷达回波和物理量场的空间结构分析表明，高层辐散区域沿入流方向超前于低层辐合区域，由辐合、辐散构成的耦合轴线以及正涡度的分布区域倾向于沿入流方向的前方，这一方向与雷达回波及径向速度场逆风区的移动方向一致。沙尘暴发生区域与低层散度的辐合中心和垂直运动的上升中心有很好的对应关系。低层的辐合，高层的辐散，较强的上升运动和干燥的低层大气和下垫面，是局地沙尘暴天气产生的主要原因。

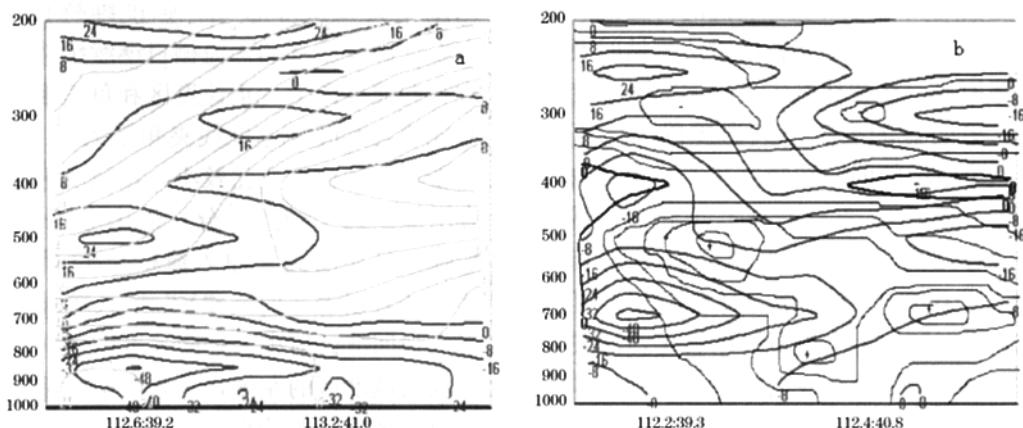


图 5 2005 年 4 月 1 日 14 时沿雷达回波入流方向空间剖面图

- a. 散度 (实线, 单位:  $10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ) 和相对湿度 (虚线, 单位: %)
- b. 垂直速度 (实线, 单位:  $10^{-2} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 和涡度 (虚线, 单位:  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ )

在 A 回波的发展移动过程中，主回波带上的其他突出部位还出现了多条间断的出流回波线。与地面阵风锋的发展过程相对

应<sup>[10]</sup>，在地面造成了瞬时大风，在  $0.5^\circ$  的径向速度图上，还出现了速度模糊区域，对应于地面  $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以上的大风区域。1 日

16 时 06 分，当另一条弓形回波带由正西方向移过雷达站后，本过程结束。

## 6 结 论

(1) 环境场条件有利于强对流天气的发生发展，但由于前期少雨干旱，对流发生前，环境场中水汽输送不足，造成了内蒙古中部 2005 年第一场以干雷暴天气为主的强对流天气。地面要素分析表明，影响系统主要为冷锋前的弱飑线（或中尺度辐合线）。

(2) 低层辐合，高层辐散，较强的上升运动和干燥的低层大气和下垫面，是局地沙尘暴天气产生的主要原因。

(3) 当飑线回波进入到逆风区中，反射率最大区与正负速度最大区接近或重叠，并由正速度区过渡到负速度区，产生了强烈的风切变，使中- $\gamma$  尺度系统的辐合旋转加强，造成了局地强沙尘暴天气。最大风速区域出现在弓形回波突出的部位及出流回波区域或径向速度图上速度模糊区域，而强沙尘暴天气仅出现在中- $\gamma$  尺度的逆风区中。

应当说明的是，当时呼和浩特新一代天气雷达还处于调试阶段，只得到了  $0.5^\circ$  的反射率因子和径向速度图，尽管如此，此次

过程的分析结果仍对监测和预警局地沙尘暴具有很好的参考意义。

## 参 考 文 献

- 1 王式功，杨德保，孟梅芝等. 甘肃河西“5.5”黑风天气系统结构特征及其成因分析 [M]. 中国沙尘暴研究. 北京：气象出版社，1997：62-64.
- 2 赵光平，王凡，杨勤. 宁夏区域特强沙尘暴天气成因及其预报方法研究 [M]. 中国沙尘暴研究. 北京：气象出版社，1997：52-58.
- 3 项续康，江吉喜. 西北地区强沙尘暴成因的中尺度分析 [J]. 高原气象，1996，15（4）：448-455.
- 4 肖贤俊，刘还珠. 2002 年 3 月 19 日沙尘暴爆发条件分析 [J]. 应用气象学报，2004，15（1）：1-9.
- 5 胡隐樵，光田宇. 强沙尘暴发展与干飑线—黑风暴形成的一个机理分析 [J]. 高原气象，1996，15（2）：178-185.
- 6 伍志方. CINRAD/SA 新一代天气雷达观测夏季热带飑线的特征分析 [J]. 气象，2003，29（3）：38-40.
- 7 张一平，牛淑贞，席世平等. 雷暴外流边界与郑州强对流天气 [J]. 气象，2005，31（8）：54-56.
- 8 邵玲玲，孙婷，邬锐等. 多普勒天气雷达中气旋产品在强风预报中的应用 [J]. 气象，2005，31（9）：34-38.
- 9 戴建华，徐秀芳，王坚捍. 用 WSR-88D 多普勒雷达资料分析上海飑线 [C]. 中美强对流天气临近预报技术国际研讨会文集. 北京：气象出版社，2004：86-87.
- 10 张培昌，杜秉玉，戴铁丕. 雷达气象学 [M]. 北京：气象出版社，2001：400-405.

# 韩经纬等：一次伴随强沙尘暴天气飑线的多普勒雷达回波特征

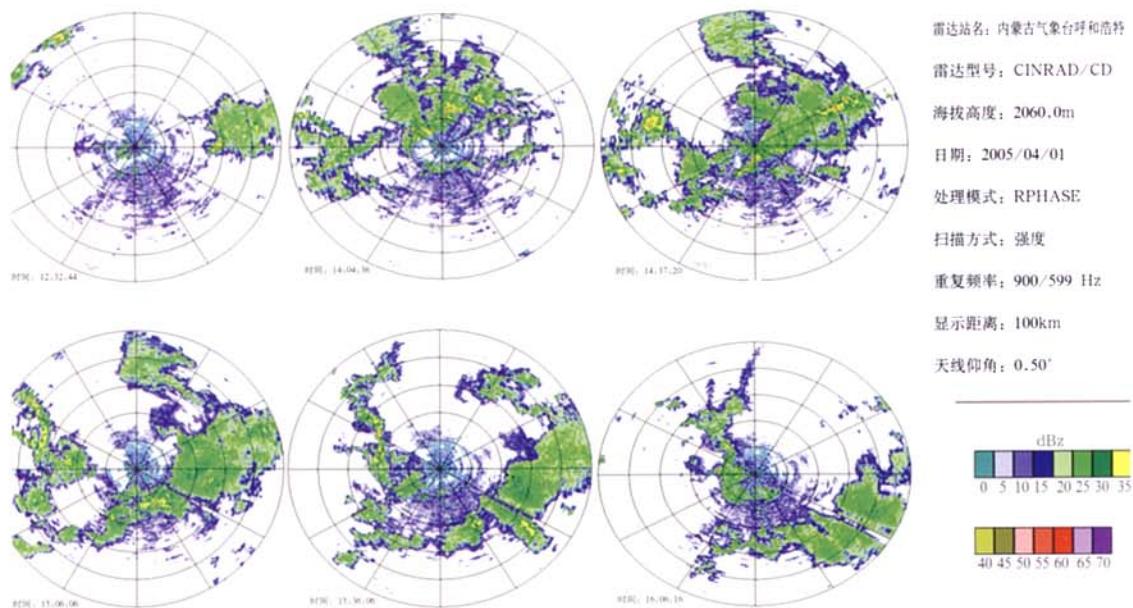


图3 2005年4月1日12时32分到16时06分雷达回波演变图（0.5°，100km）

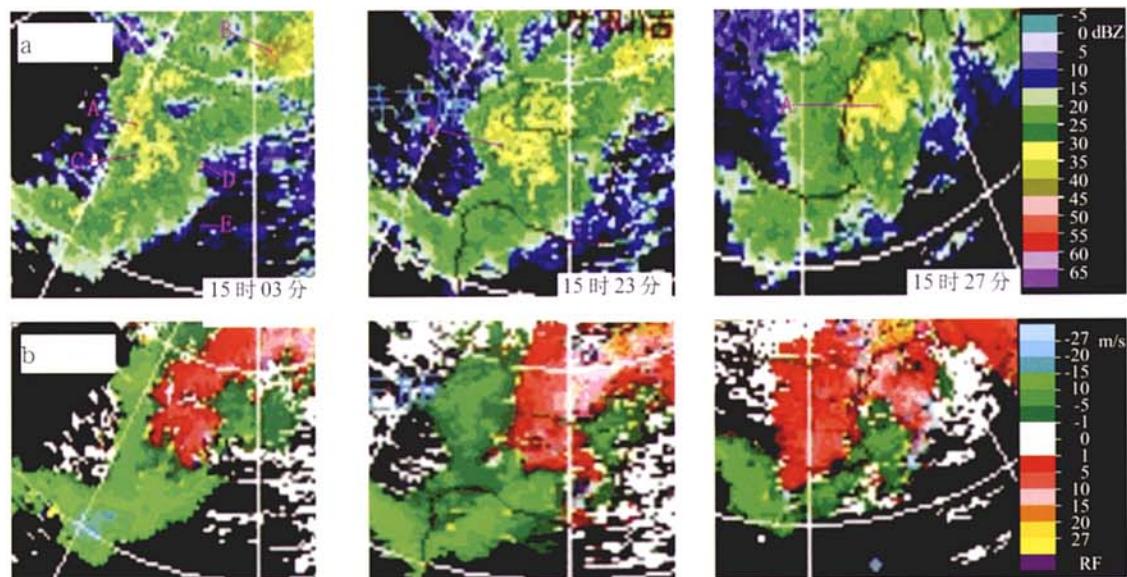


图4 2005年4月1日15时03分到15时27分反射率因子(a)和径向速度(b)图(距离100km, 仰角0.5°)  
万方数据