一次飑线过程多普勒雷达资料分析

李淑玲[1] 刁秀广[2] 朱 敏[1] 刘爱荣[3]

(1. 山东省淄博市气象局 255048; 2. 山东省气象中心; 3. 山东省桓台县气象局)

提 要: 利用济南CINRAD/SA多普勒雷达产品,针对2006年7月5日飑线天气过程,分析回波发展演变、流场结构,讨论外流边界、强下沉气流与大风的关系,分析组合反射率因子、垂直液态含水量、中气旋产品特征。结果发现,飑线过境时风速出现两个极大值,一个出现在外流边界影响时段,另一个发生在强回波下沉气流影响时段;在横槽南下过程中,飑线后部强入流不断补充,前侧暖湿气流沿着后部入流爬升,不断产生新的单体,使得风暴得以维持发展;在垂直流场结构上表现为前侧暖湿气流倾斜上升,然后主体部分向后倾斜,后部有冷空气注入,形成下沉气流,下沉气流在地面附近辐散,与前侧入流形成低层阵风锋,是造成地面破坏性大风的主要因素。在水平流场结构上表现为低层存在气流辐合上升运动,中层有气旋性旋转气流,风暴高层为辐散气流。飑线消散阶段后期中层出现MARC,带来大风天气,而同时伴有冰雹天气的风灾产生在飑线达到最强至开始减弱的时段。当回波强度≥50dBz,且垂直液态含水量≥35kg·m^{-2},当有中气旋时,有利于产生冰雹和大风天气;外流边界的出现,反映了强对流回波后部下沉气流较强,是灾害性大风的前兆。

关键词: 飑线 流场结构 大风 中气旋

Analysis on the Feature of Doppler Radar Data about a Squall Line Process

Li Shuling[1] Diao Xiuguang[2] Zhu Min[1] Liu Airong[3]

(1. Zibo Meteorological Office, Shandong 255048; 2. Meteorological Center of Shandong Province; 3. Huantai Meteorological Station, Shandong)

Abstract: By using Jinan CINRAD/SA Doppler radar products, the weather process of squall line on July 5, 2006, evolution of echo and flow structure were analyzed, the relations between the outflow boundary, sinking air currents and strong wind were discussed, and the portfolio reflectivity factor, the vertical liquid water content, the mesocyclone product characteristics were analyzed. The results showed that two maxima of wind speed occurred during

收稿日期: 2008年1月22日; 修定稿日期: 2009年1月25日

the squall line passing, one appeared in an outflow boundary impact sessions, another in strong echo sinking airstream affected periods. As the transverse trough moves southward, the inflow continuously added to the rear of squall line, the warm and wet air flow climbed along the rear of inflow, which constantly created new cells and maintained the development of storm. In the vertical flow structure, the warm air for the front side was tilted upwards, and the main part tilled backwards. In the rear there was the cold air injected and the downward flow formed. The sinking air near the ground diverged, together with the lateral inflow formed the lower gust front, which was the major factor causing the ground destruction. In the horizontal flow structure there was an upward motion of convergence at low level and a cyclone rotational flow at the middle level. At high-level there was a divergence flow. In the dissipating period of squall line, MARC appeared at middle level, which brought strong winds and hail weather. The wind disaster with hail produced in the period when the squall line was the strongest and began to weaken. When the echo intensity≥50dBz and vertical liquid water content ≥35 kg • m^{-2}, the meso-cyclone is favorable for generating of hail and strong wind. The emergence of outflow border reflected that the strong sinking flow in the rear of strong echo is a precursor of the disastrous wind.

Key Words: squall line　flow structure　strong wind　mesocyclone

引　言

飑线也称不稳定线或气压涌线,是中尺度天气系统之一。飑线是一种带(线)状的深厚对流系统,是一条规则活跃的风暴线,由许多雷暴单体排列呈带状的狭长云带,水平尺度通常为几百公里,宽 20～50km,水平长度与宽度的比例至少为 5:1。典型生命期远大于雷暴单体的生命期,约为 4～18 小时。飑线过境处,风向急转、风速剧增、气压陡升、气温骤降,常伴有雷暴、暴雨、大风、冰雹或龙卷等剧烈天气现象。

2006 年 7 月 5 日傍晚到夜间,山东因飑线影响,遭受历史上罕见的冰雹大风侵袭,造成了重大经济损失和社会危害。近年来,多普勒雷达在冰雹和雷雨大风灾害性天气探测和应用方面出现了许多研究成果:梁爱民等[1]指出雷雨大风与雷达回波形状关系密切,与弓形回波伴随的低仰角强速度带会产生雷雨大风;朱君鉴[2-3]认为中气旋维持时间越长越有利于产生强对流天气,通过分析冰雹风暴中相对速度产品,揭示中气旋发生发展与消亡的过程,指出垂直液态含水量、中气旋产品对冰雹有很好的识别和预报能力;郑媛媛[4]给出了超级单体风暴的"钩状特征"和外流边界的图像识别特征。飑线天气过程分析方面,俞小鼎等[5]给出了典型飑线的流场结构,提出中层径向辐合 MARC 及识别图像的意义;王莉萍等[6]分析风暴强度、外流边界、径向速度辐合;伍志方[7]解释了速度模糊现象,分析了反射率因子与径向速度垂直剖面结构。

本文利用济南多普勒雷达资料产品分析产生飑线发展演变、流场结构、以及产生冰雹大风天气时雷达资料的统计特征。

1　实　况

1.1　天气实况

2006 年 7 月 5 日 20—24 时,山东出现大范围强对流天气,德州、济南、泰安、淄博共

14个区(市)遭受冰雹大风的侵袭。20时至22:30,庆云、乐陵、宁津、德州、陵县、武城、夏津、平原先后产生冰雹大风,其中乐陵、宁津、德州受灾,宁津县长官、时集、宁津镇部分村庄灾情严重,大部分棉花、玉米减产或绝产;22—23时、22:30至24:00济南市济阳、济南和泰安市的泰安、泰山分别出现大风。极大风速为11级(23:44,32.0 m·s^{-1},于泰山)。

1.2 气象要素变化

以德州和平原两站的分钟数据文件为代表分析飑线天气过程温度、气压、风速变化(图1):当飑线过境时,三气象要素变化剧烈:气压存在2个涌升的时段,即20:46至20:54和21:13至21:33,在8分、20分时间内气压分别上升2.4hPa、4.6hPa;气压2次涌升后分别出现两个极大值;风速20:49明显增大,21:06和21:31出现两个极大值,分别为10.7m·s^{-1}、9.5m·s^{-1};气温在20:52至21:40,即48分下降7.2℃。分析三要素出现剧烈变化的时间顺序:首先气压涌升,随后风速增大,气温骤降,时间间隔均为3分钟。平原站(图略)与德州温压风变化类似,风速出现两个极大值,后者较大。

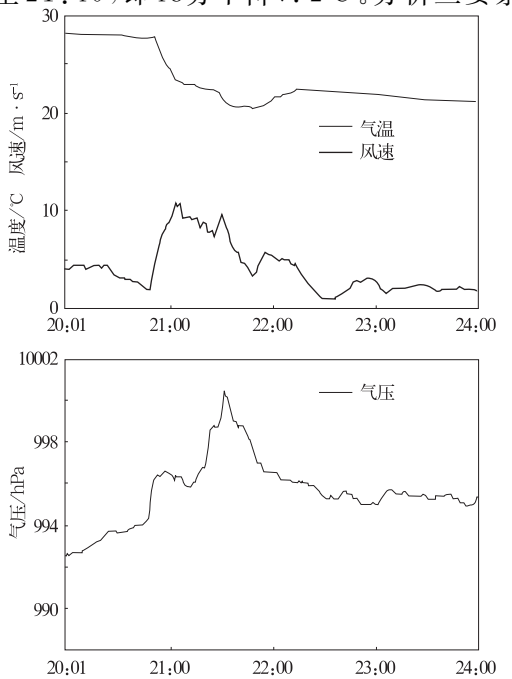


图1 2007年6月5日20:01至24:00德州温压风变化

2 有利的环流形势

2.1 高空横槽

5日20时500hPa图上,横槽位于40°N以北,呈东西向分布,山东受横槽前部西北气流控制;同时,低层850hPa低槽与高空槽相配合,处于500hPa槽南部,山东处于槽前的西南气流中。由高空槽上下层的配置看,高空槽为后倾结构。5日夜间,高空横槽转竖东移。

2.2 地面切变线

分析山东加密站观测资料(图2)可知:5日白天山东大部地区受暖气团控制,南风为主,5日20时,鲁西北有一条呈东西向分布切变线,自北向南移动,持续至23时,24时消失,德州、济南冰雹大风出现在切变线南压的过程中。

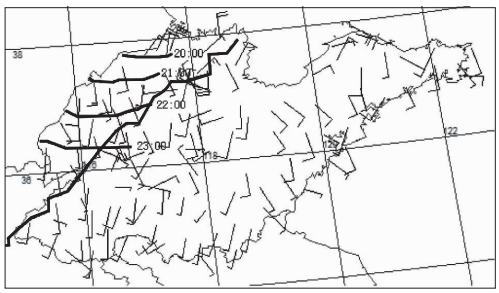


图2 2006年7月5日20时山东省地面加密天气图

粗实线为20、21、22、23时地面风切变线

2.3 不稳定层结

分析5日山东章丘和河北邢台的探空曲线,08时章丘CAPE值为零;而处于上游的

河北省邢台站,自 760hPa 至 230hPa,为大面积正的有效位能;5 日白天由于低层暖湿气流的输送,20 时章丘有效位能明显增加。

5 日 20 时章丘探空曲线(图 3)显示,大气为对流不稳定层结,对流有效位能 CAPE 值为 686.9J·kg^{-1},由温度露点曲线的差值可发现 700hPa 以下的大气比较潮湿,700hPa 至 300hPa 之间除 580hPa 附近外,温度露点差明显增大,表示大气对流层低层暖湿中上层干冷的垂直热力分布特征。分析风的垂直分布,地面为南风(图略),850hPa 为西南风,700hPa 至 500hPa 西北风,随着高度风向顺时针旋转,有暖平流;深层垂直风切变为 16.3m·s^{-1}。

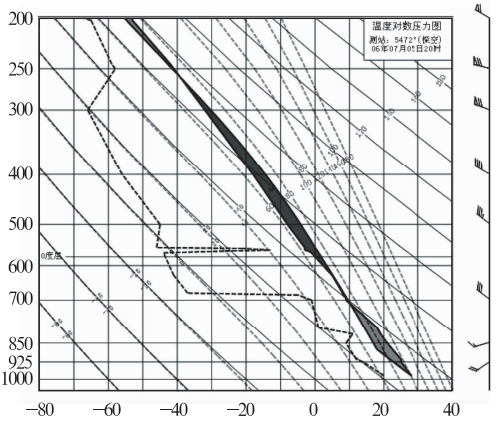


图 3　2006 年 7 月 5 日 20 时章丘 t-log$p$ 探空曲线

3　多普勒雷达特征分析

3.1　飑线过程分析

飑线在河北境内生成并发展。5 日 15 时以后,北京—唐山和天津—沧州一带各有多个对流回波发展,16 时前后对流单体合并呈线状分布,呈现弓形特征,之后,弓形回波向南移动过程中与前部对流单体合并,得到加强。

图 4 为最强阶段弓形回波及衰减阶段的组合反射率因子和 1.5°径向速度图(见彩页)。由图 4 可见弓形回波最强阶段外形特征和衰减演变特征。

弓形回波进入山东后,于鲁北 20:51 达到最强(图 4a 和 e,见彩页),呈线形分布,长约 600km,宽约 100km,由一系列对流单体有组织排列而成,顶部回波最强,东西两侧向北部翘起,基本呈对称分布。此时,强回波中心位于弓形回波顶部,反射率因子中心达 65dBz;速度图上正负速度交界线明显,表现为一辐合线,呈东西向分布,与自动站加密图(图 2)对比,辐合线南侧为西南风,对于雷达站是出流,后部为偏北风,对于雷达为入流,可见,速度场上的辐合线与地面图上的风切变相对应。德州宁津、乐陵的冰雹大风天气出现在强回波影响的时段。

弓形回波顶部 21:15 到达德州(图 4b 和 f),前部对流单体与弓形回波合并,大致保留弓形特征。此时,弓形回波东西两侧强度减弱明显,速度辐合线仍清晰可见。强回波 22:47 影响济南(图 4c、g),顶部强回波与济南附近对流回波合并得以维持,西段减弱消失,回波带失去弓形特征;由速度图可见,入流急流逼近雷达站,范围变窄;雷达方位角 60°附近为零速度带,因雷达和实际风向速度的位置和方向引起,非风切变线原因。23:35 强回波影响泰安(图 4d、h),强度进一步减弱,范围缩小;速度场上后部入流减弱明显。

可见,飑线弓形回波在对流单体合并过程中发展,顶部回波最强;冰雹大风天气产生在飑线弓形回波顶部。

3.2　飑线流场结构

图 5 为 20:51 反射率因子和径向速度剖面图(见彩页)。由图 5 可见对流云上升气流、下沉气流、以及空间的辐散辐合特征。

对流云团前部正速度区随高度向出流方向倾斜,表示上升气流从地面开始,高达 12km;对流云团后部负速度最大中心随高度向下倾斜,表示下沉气流。径向速度剖面低层 2.8km 以下下沉气流达到最强,在地面附

近辐散，与前侧西南暖湿气流辐合形成低层阵风锋。高层（9km以上）为辐散。风暴后部的下沉气流是造成地面大风的主要原因。

图6给出了飑线后期的空间流场结构（见彩页）。对流云团前部负速度区随高度向入流方向倾斜，表示上升气流（用蓝线表示），从地面开始，上升气流高达12km；对流云团后部正速度最大中心随高度向下倾斜，表示下沉气流。下沉气流中心出现模糊现象，速度剖面图显示最大中心速度为$-15m \cdot s^{-1}$，换算成实际径向速度为$35m \cdot s^{-1}$。

下沉气流演变：下沉气流垂直范围逐渐向上向下扩展，23:05最大高度为9km（图6b），23:41扩展到10km左右的高度（图6f）。最大速度中心范围逐渐变大，此时影响泰山。泰山海拔1536.5m，极大风速为$32m \cdot s^{-1}$，出现时间为23:44，与下沉气流最大中心影响时间基本一致。

分析可知，飑线发展演变阶段具有相似的流场结构特征：前侧暖湿气流倾斜上升，然后主体部分向后倾斜，后部有冷空气注入，形成下沉气流。下沉气流在地面附近辐散，与前侧入流形成低层阵风锋，阵风锋是造成地面破坏性大风的主要因素。

3.3 中层径向速度辐合

根部MARC定义[5]，分析图5和图6径向速度剖面可知，对流层中层（2～9km）上升气流与后部入流之间过渡区为集中的径向速度辐合，其中当飑线处于消散阶段后期的23:17（图6d），在距离雷达中心52～58km范围内，速度差值达到$40m \cdot s^{-1}$，即出现MARC。出现MARC后，受飑线回波影响的测站岿出现大风天气，而同时伴有冰雹天气的风灾产生在飑线达到最强至开始减弱的80分钟时段内。

3.4 外流边界

外流边界又叫出流边界，由于下沉冷空气在地面附近向外流出，与较暖较潮湿的环境大气之间形成的界面。

图7为1.5°仰角基本反射率因子图（见彩页）。由图7可见外流边界出现时间和影响范围。强回波20:51达最大强度之后6分钟，即20:57，在其前部产生外流边界，外流边界最初形成于德州、陵县，南移的过程中经过平原、临邑、禹城、济阳、齐河，之后，外流边界开始减弱，至22:17影响济南以后消失。

外流边界与出现大风天气的关系：外流边界依次经过8个测站（表1），其中5个测站出现8级以上大风，2个测站极大风速与外流边界影响时间相吻合，3个测站极大风速与强回波下沉气流影响的时段相对应，3个测站极大风速小于8级。外流边界出现时62.5%=(5/8)产生大风。分析禹城、临邑、齐河未出现大风的原因：强对流回波向南移动过程中，3个测站处于飑线断裂处。

表1 外流边界一览表

外流边界		实况（极大风速）		
经过测站	影响时间	出现时间	风速（风力）$m \cdot s^{-1}$（级）	大风出现时段
德州	20:57—21:09	21:04	18.0(8)	外流边界
陵县	20:57—21:09	21:08	21.9(9)	外流边界
平原	21:21—21:40	21:59	20.8(9)	强回波下沉气流
禹城	21:21—21:59		—	
临邑	21:21—21:40		—	
齐河	21:40—22:17		—	
济阳	22:05	22:00	23.6(9)	强回波下沉气流
济南	22:29	22:56	18.4(8)	强回波下沉气流

可见，外流边界影响反映强对流回波产生大风的潜势，是大风灾害的前兆。

4 其他产品特征

4.1 回波强度、液态含水量

对横槽过程的回波强度、液态含水量和回波顶进行了统计（表略）。最大反射率因子

≥50dBz 的区县 23 个,16 个出现冰雹大风,占总数 69.6%;垂直液态含水量≥35kg·m^{-2}区县有 22 个,其中 16 个出现冰雹或大风,占总数的 72.7%。

4.2 中气旋

横槽过程中 5 日 20:09 至 6 日 0:17 产生了 16 个中气旋(表略),其中 12 个出现在弓形回波的顶部;中气旋维持时间长,12 分钟以上的中气旋占 44%,最长的 y1 号中气旋共维持了 30 分钟;V9 中气旋自 20:22 开始维持了 12 分钟后,20:39 至 21:34 开始又维持了 12 分钟,这与中气旋的算法有关。16 个中气旋 14 个产生了冰雹或大风天气,占总数中气旋的 87.5%。

5 结　论

(1) 飑线天气过程发生在高空横槽转竖和地面切变线南移的天气背景下,飑线发生前大气层结不稳定,不稳定能量有一个增加的过程,对流层中上层有明显干层,具有较强深层垂直风切变。飑线过境时气压、风、温度依次突变,时间间隔几分钟,风速有两个极大值,一个出现在外流边界影响时段,另一个发生在强回波下沉气流影响时段。

(2) 飑线发展演变阶段具有相似的流场结构特征:前侧暖湿气流倾斜上升,然后主体部分向后倾斜,后部有冷空气注入,形成下沉气流。下沉气流在地面附近辐散,与前侧入流形成低层阵风锋,阵风锋是造成地面破坏性大风的主要因素。在横槽南下过程中,不断补充飑线后部强的入流,前侧暖湿气流沿着后部入流爬升,不断产生新的单体,使得风暴得以维持发展。

(3) 基本速度图和速度剖面图上反映了低层的气流辐合上升运动,风暴高层为辐散气流;飑线消散阶段后期出现中层径向速度辐合,出现 MARC 后,受飑线强回波影响的测站均出现大风天气,而同时伴有冰雹天气的风灾产生在飑线达到最强至开始减弱的时段。

(4) 外流边界影响时 62.5%出现大风;当最大反射率因子≥50dBz,且垂直液态含水量≥35g·kg·m^{-2}时,中气旋影响时发生冰雹大风百分比分别为 69.6%、72.7%和 87.5%。外流边界的出现,反映了强对流回波后部下沉气流较强,是灾害性大风的前兆。

参考文献

[1] 梁爱民,张庆红,申红喜,等. 北京地区雷暴大风预报研究[J]. 气象,2006,32(11):73-79.

[2] 朱君鉴,王令,黄秀韶,等. CINRAD/SA 中尺度气旋与强对流天气[J]. 气象,2005,31(2):38-42.

[3] 朱君鉴,刁秀广,黄秀韶. 一次冰雹风暴的 CINRAD/SA 产品分析[J]. 应用气象学报. 2004,15(5):579-589.

[4] 郑媛媛,俞小鼎,方翀,等. 一次典型超级单体风暴的多普勒天气雷达观测分析. 气象学报. 2004,62(3):317-328.

[5] 俞小鼎,姚秀萍,熊延南,等. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京:气象出版社, 2006:122-124,169-170.

[6] 王莉萍,崔晓东,常英,等. 一次飑线天气的非常规气象资料特征分析[J]. 气象,2006,33(10):88-93.

[7] 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.

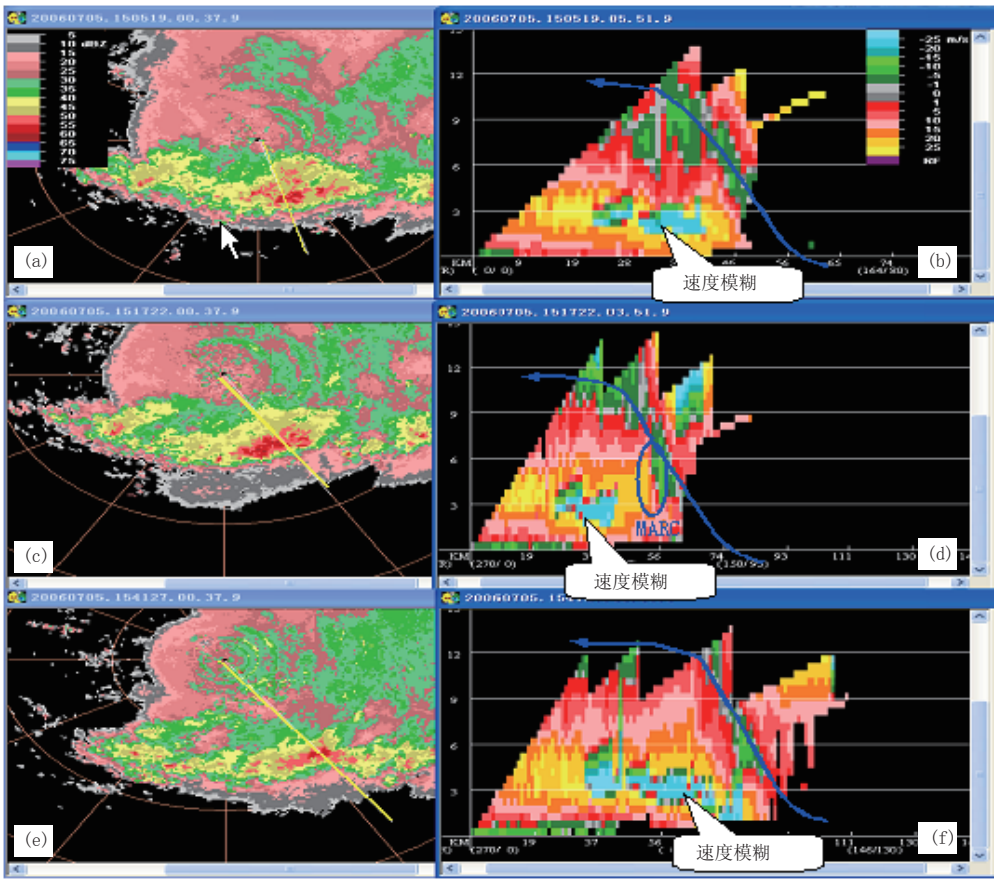


图 6　2006年7月5日飑线消散阶段流场
(a、c、e分别为23:05、23:17和23:41组合反射率因子,单位:dBz;
b、d、f分别为23:05、23:17和23:41通过强回波中心速度垂直剖面，单位:m·s^{-1})

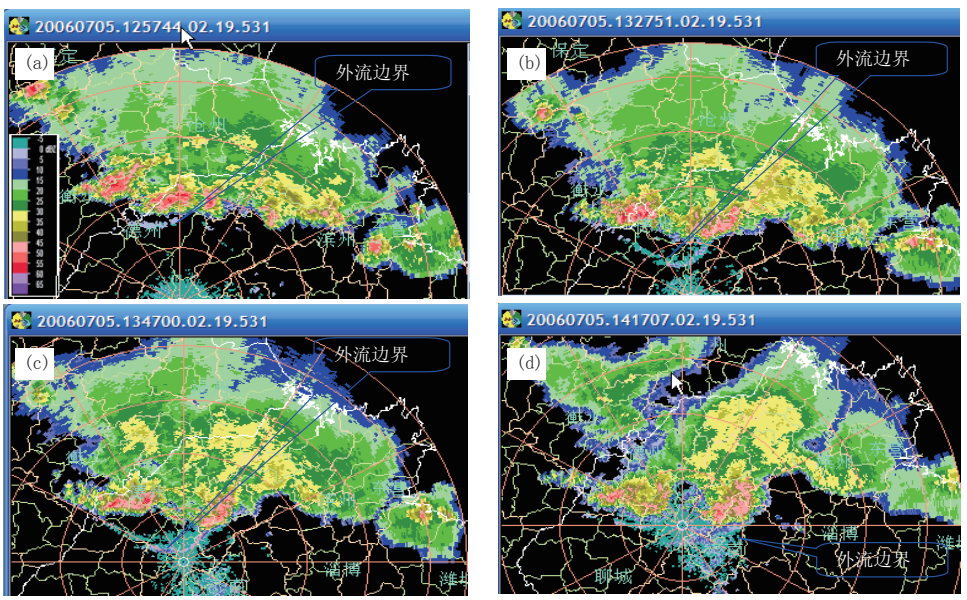


图 7　2006年7月5日飑线过程外流边界图(1.5°仰角基本反射率因子,单位:dBz)

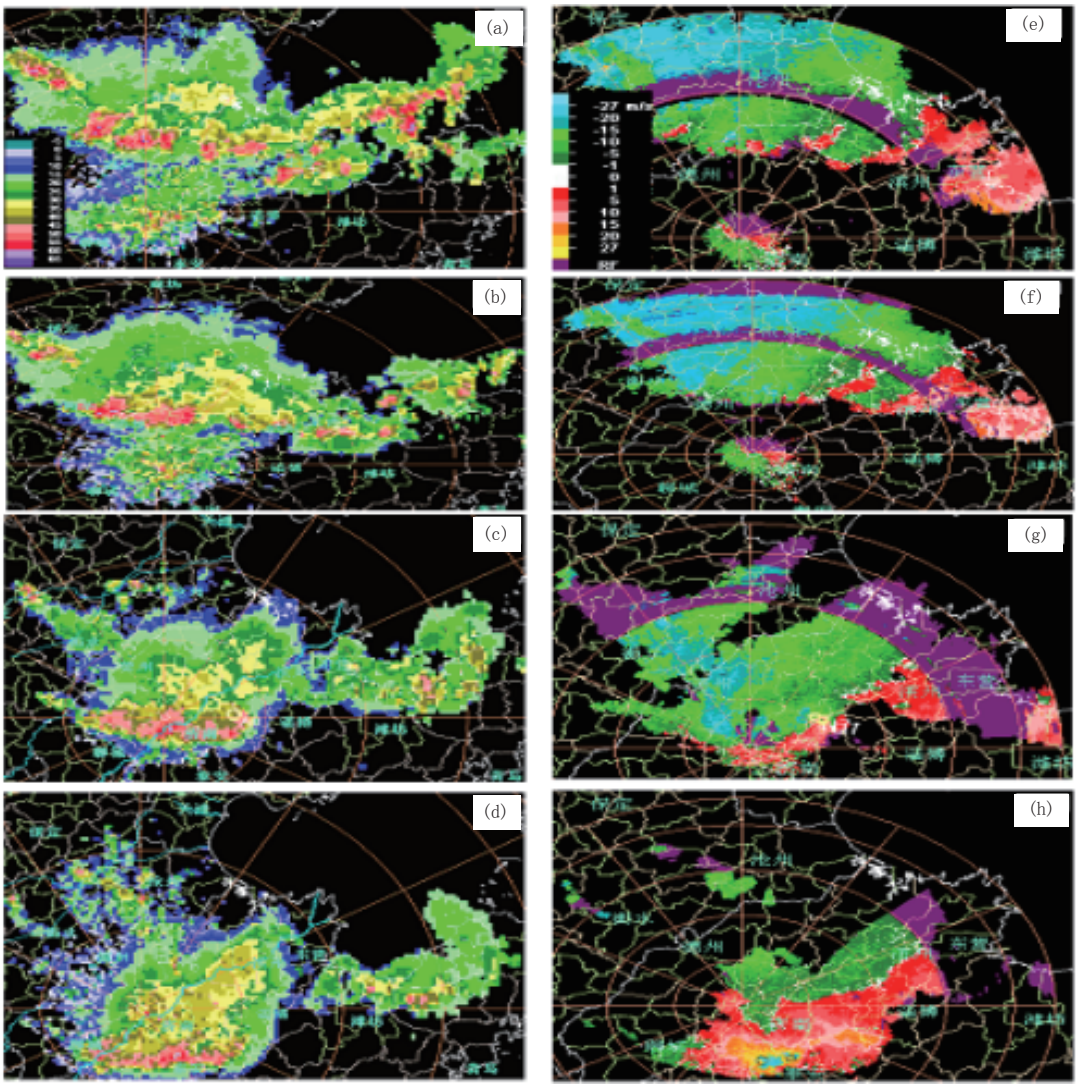


图 4　2006年7月5日飑线最强阶段弓形回波及衰减演变
(a、b、c、d分别为460km20:51、21:15、22:47、23:35组合反射率因子，单位：dBz；
e、f、g、h分别为230km的1.5°仰角基本速度，单位：m·s^{-1})

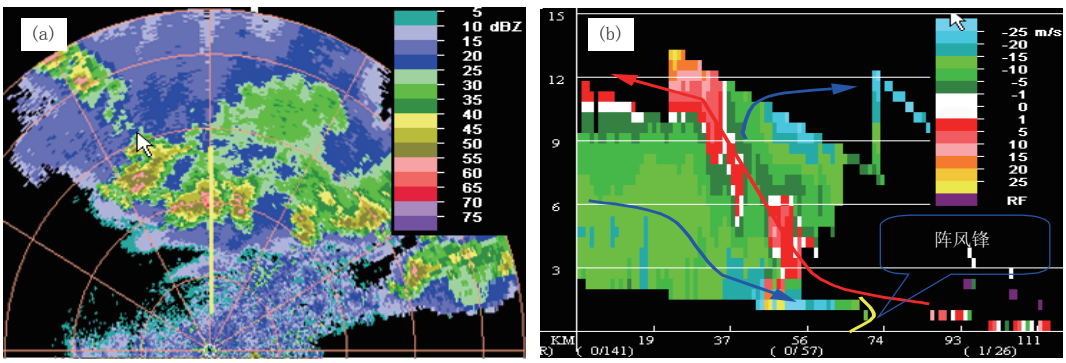


图 5　2006年7月5日20:51反射率因子(a，单位：dBz)和速度剖面(b,单位：m·s^{-1})