

雷达晴空窄带回波的预报及其统计特征研究

付强¹ 杨声¹ 苏丽楠²

1. 民航华北空管局气象中心, 北京, 100621

2. 民航华北空管局气象部, 北京, 100621

摘 要 本文对 2009–2012 年首都机场出现的 8 次雷达晴空窄带回波进行了统计分析, 并分析了其雷达回波特征并对其进行分类, 得出以下结论: 晴空窄带回波是在雷达回波上表现为近似圆弧的弱窄带回波, 这种窄带回波在雷达图上并没有回波母体, 出现在晴朗天气条件下; 是突发性大风及风切变预警的重要判断参考, 可带来机场地区风向突变或风速的突然增大, 进而出现风切变, 严重威胁到飞行安全; 这种弱窄带回波的不同雷达回波特征以及地面观测相结合, 有助于对突发性大风及风切变的临近预报细致分析及预报。

关键词 晴空窄带回波, 多普勒天气雷达, 临近预报, 风切变

1 引言

晴空窄带回波是指天气雷达在晴朗少云天气条件下探测的近似圆弧的弱窄带回波。晴空窄带回波的突发性强, 容易造成近地面的大风和较大的垂直风切变。低空风切变对飞机的起飞和着陆有着很大影响, 是国际航空界公认的飞机起飞和着陆阶段的“隐形杀手”。由于晴空窄带回波发生和消亡的速度快、尺度小而难以跟踪, 利用常规资料很难对其进行监测和预报, 因而多普勒天气雷达具有不可替代的作用, 有利于及早做出突发性大风造成的风切变的临近预报。

近年来, 很多学者对产生风切变的原因及其应对措施进行了讨论, 例如: 郭卫刚等(2008)建立了微下冲气流工程化模型, 并应用建立的风切变运动方程对飞机穿越微下冲气流风场进行仿真, 分析了风切变对飞机飞行性能的影响。程勇(2008)阐述了风切变产生的天气学条件, 分析风切变对飞行的影响以及在飞行过程中遭遇风切变的处置方法。王楠等(2007)研究了利用多普勒雷达径向速度资料识别低空风切变和辐合线的方法。刘小魏等(2007)利用统计学研究表明, 高时空分辨率的 AMDAR (Aircraft Meteorological Data Relay) 资料可为短时临近预报, 特别是风和温度, 提供更多的参考依据。李秀莲(2010)等对冷锋过境前后的风切变的可预报时效进行了分析。不过, 上述研究均着重探讨风切变的形成原因, 探测方法和面, 更是缺乏指导意义。

本文应用首都机场多普勒雷达回波资料、地面观测站及晴空窄带回波过境前后的各种天气要素对晴空窄带回波进行分析与统计, 以获得晴空窄带回波造成地面风切变及突发性大风天气的特征及预报着眼点, 为临近预报预警提供参考。

2 数据和资料

2009–2012 年, 首都机场 C 波段双极化多普勒气象雷达共观测到 8 次晴空窄带回波过程(表 1)。研究所用资料包括:

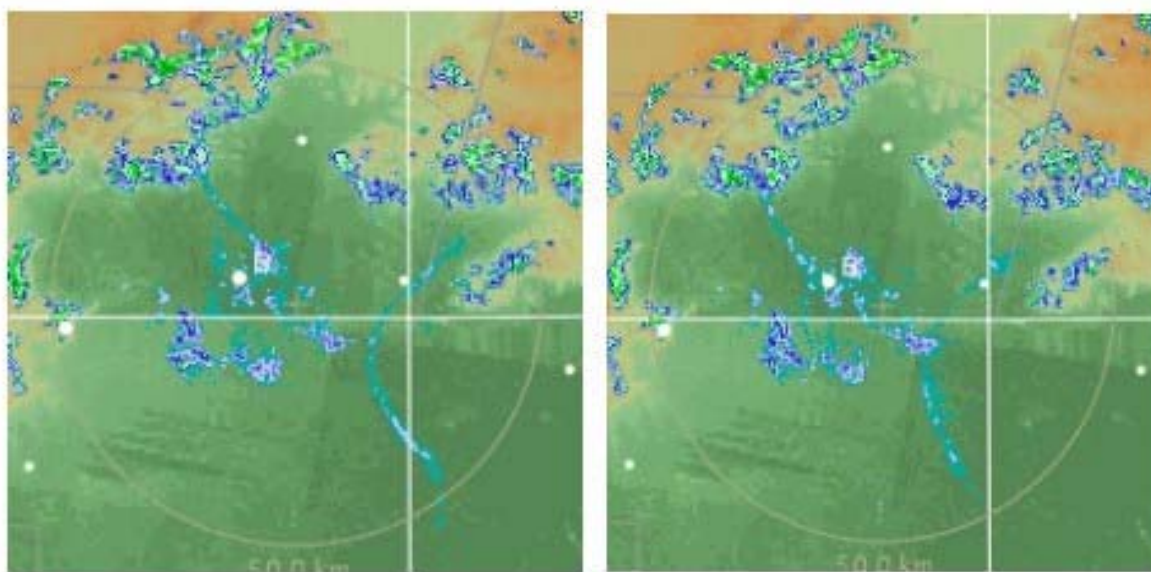
2.1 8 次晴空窄带回波过程的雷达回波强度和径向速度图像, 所用雷达资料为德国 SELEXG 公司生产的 1500c, C 波段双极化多普勒气象雷达;

2.2 首都机场地面自动气象站观测的温度、场面气压、相对湿度、风向和风速资料。研究所用的自动气象站观测资料由芬兰 VAISALA 公司 MIDAS IV 自动观测系统获得，其中：温度、场面气压和相对湿度的观测周期为 10 分钟；风向和风速资料则同时采用了观测周期为 1 分钟和 2 分钟的资料。

3 晴空窄带回波简介

晴空窄带回波多半出现在夏季的下午到傍晚，窄带维持时间常在 1 小时左右，常呈细长带状，也可呈圆弧弯曲状，其长度为 20-30 公里至 150-160 公里，宽度只有 1-2 公里，出现在大气低层。窄带的强度也只有 5-10dBz，个别强度可达 17dBz，所以窄带一般只能在离雷达较近处探测到。

图 1 为首都机场 C 波段双极化多普勒气象雷达在 2009 年 5 月 9 日 04:00-04:40UTC（如无特别说明均为世界时）观测到的的一次“双”晴空窄带回波过程。从图中可以看出，在半径 50km 的雷达探测范围内，同时出现了两条晴空窄带回波，两条窄带回波的最大回波强度 5-10dBZ，长度均为 30-40 公里，一条自东北方向向首都机场方向移动，另一条自东南方向向首都机场方向移动。最终，只有东北方向的窄带回波影响到了首都机场，造成首都机场风切变。由于这次晴空窄带回波过境前后的风向大致一致，但是风速的突然加大，还是造成了首都机场 3 架航班复飞。



(a)

(b)

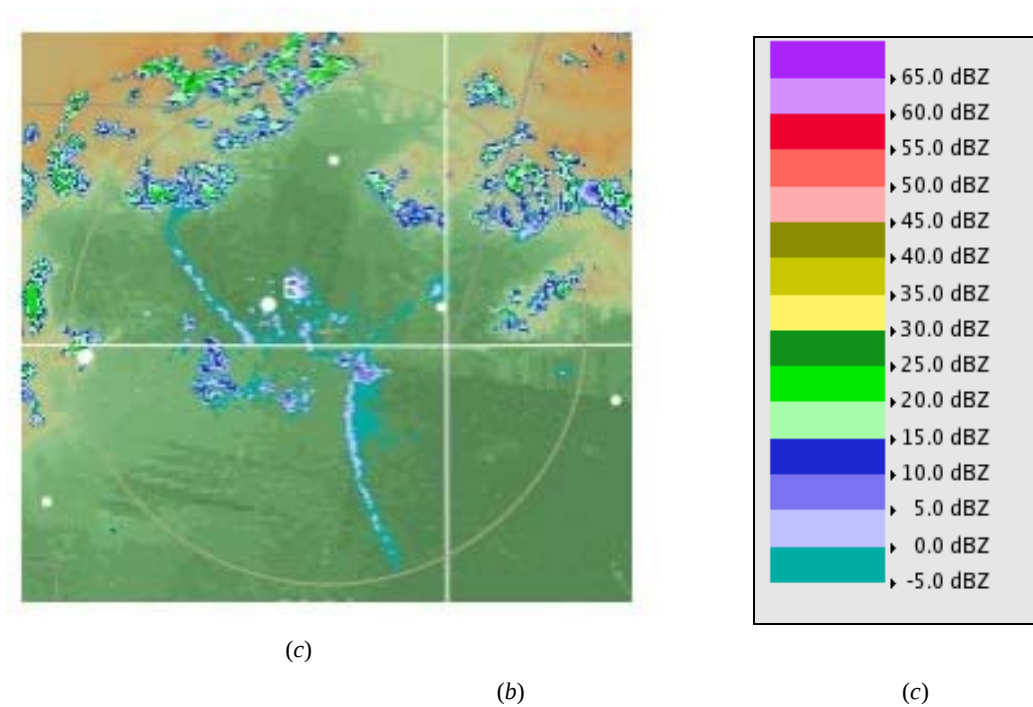


图1 2009年5月9日04时00分至40分雷达回波强度图
(0.5度仰角, 距离圈为50公里; a、b、c分别为04:00、04:26和04:40的雷达回波强度图)

图2为该雷达在2009年5月9日03时03分观测的150公里雷达回波强度图。从图中可以看到：在晴空窄带回波出现前1小时内，在半径150公里的雷达探测范围内，没有出现雷雨回波或较明显的降水回波。因此，可以排除该回波是由于雷暴天气而产生的阵风锋。图3给出的是当天00时及06时（为窄带回波出现的前后两个时次）的NCEP再分析地面形势图。从中可以看出，北京地区（图中黑点为首都机场测站）受地面低压北部弱辐合区控制，形势较弱。

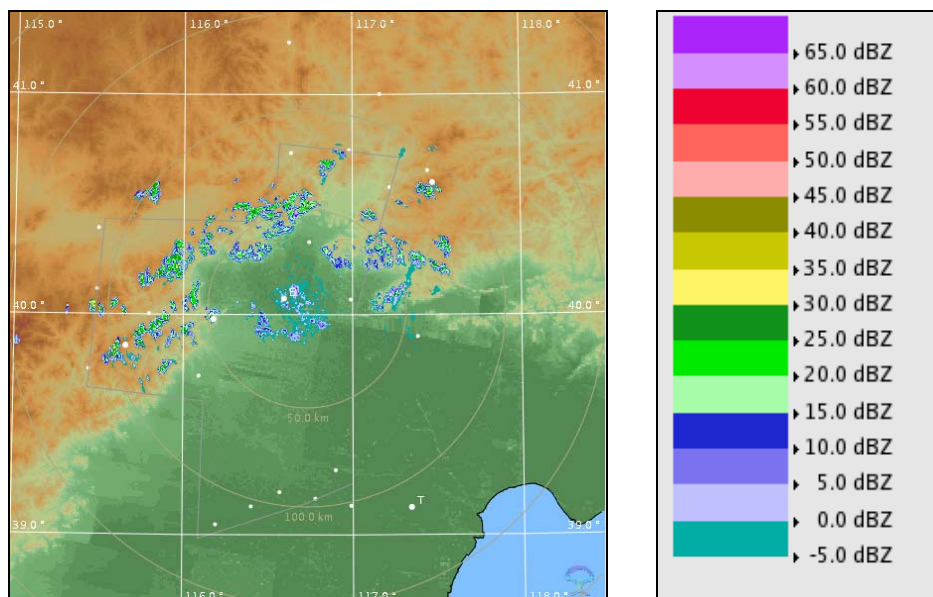


图2 2009年5月9日03时03分雷达回波强度图
(0.5度仰角; 探测范围150公里)

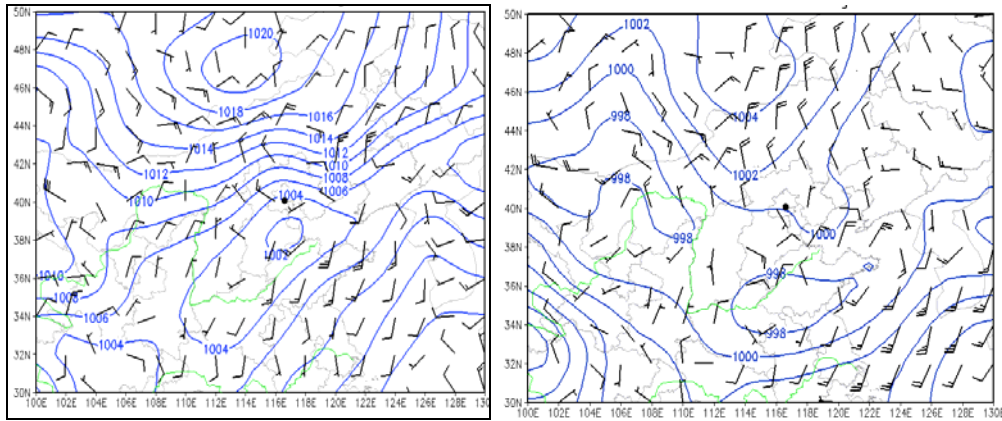
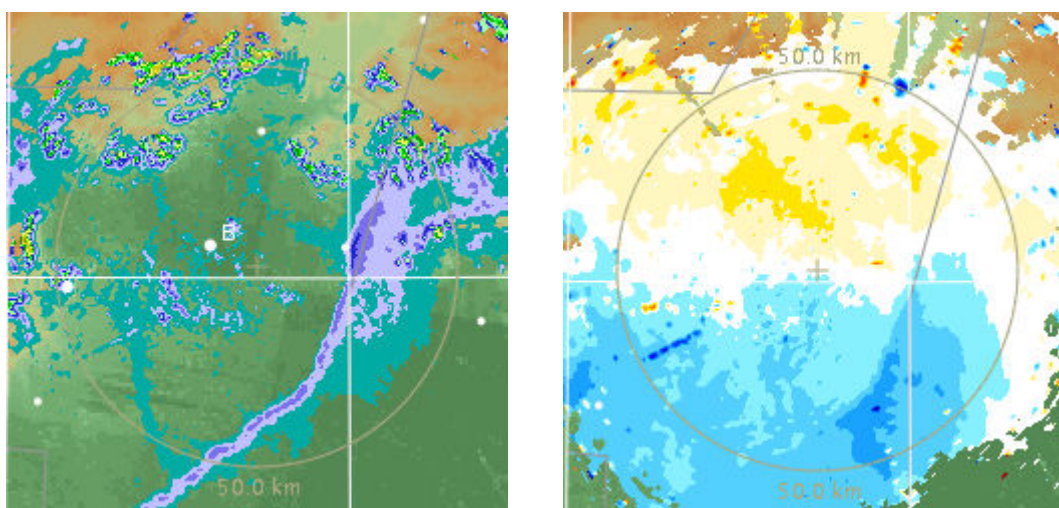


图3 2009年5月9日00时地面形势图

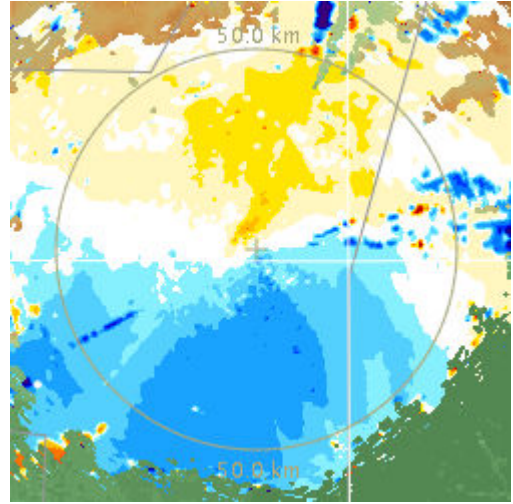
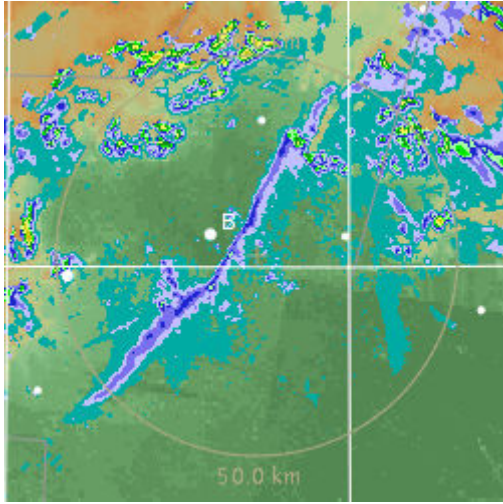
4 个例分析

我们以2009年6月2日为例，简要介绍和分析了晴空窄带回波过境前后，温度、气压、湿度及风向风速变化情况及其雷达特征。

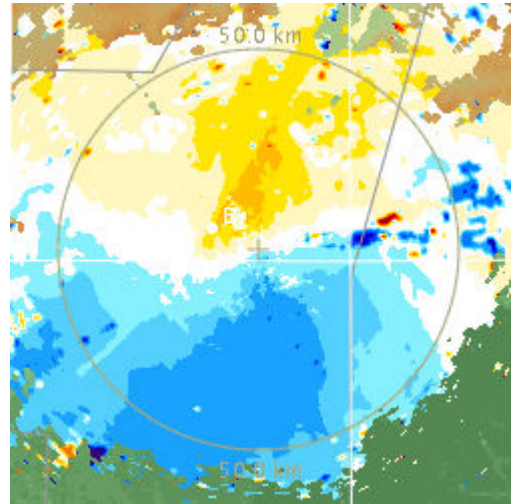
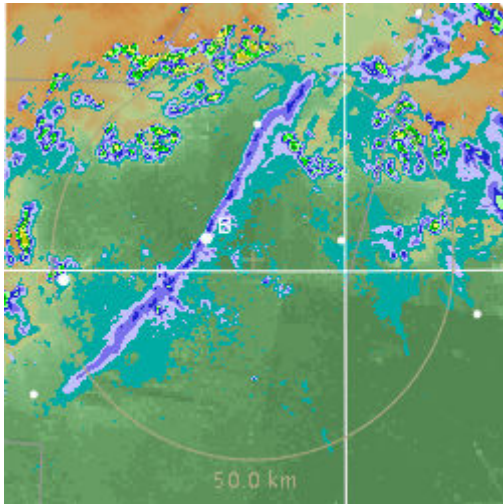
图4为首都机场C波段雷达在2009年6月2日下午观测的一次晴空窄带回波的回波强度和径向速度图像。从图中可以看出：晴空窄带回波大约在9:20UTC出现于北京地区东南部，到13:20UTC消失，持续时间大约4小时，并且窄带回波出现前，在其周围乃至雷达150公里之内没有对流云出现。雷达反射率图中窄带回波表现非常明显，最大回波强度10-15dBZ，长100公里左右。窄带回波自东南向西北方向移动；从多普勒径向速度图中也可以看出，低层为东南风，风核最大速度在10-14米/秒，大约11:15UTC时经过本场首都机场观测点，使得首都机场风速突然增大。值得注意的是：此次窄带回波过境后的首都机场测站的风向与窄带回波的来向一致，可是与最大径向速度风核的方向并不完全一致，而是有一定的夹角。



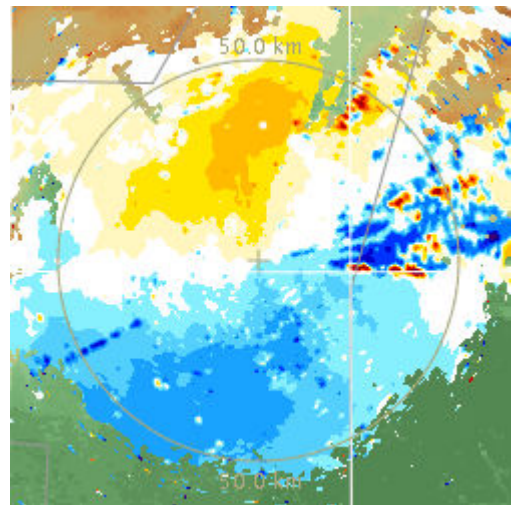
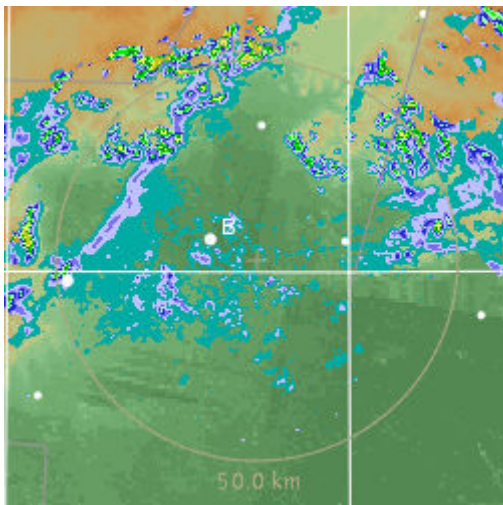
(a) 09:47时雷达图像，左图为回波强度图，右图为径向速度图



(b) 11:02 时雷达图像，左图为回波强度图，右图为径向速度图



(c) 11:17 时雷达图像，左图为回波强度图，右图为径向速度图



(d) 12:07 时雷达图像，左图为回波强度图，右图为径向速度图

(a)

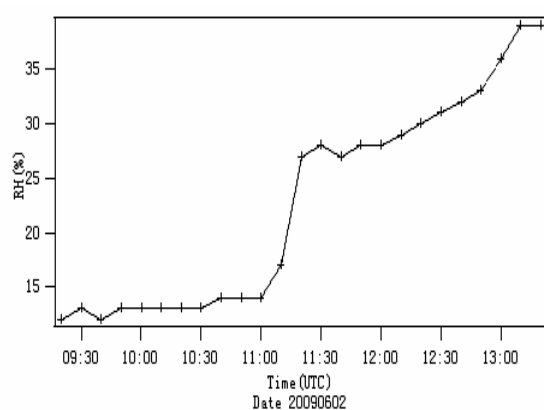
(b)

(c)

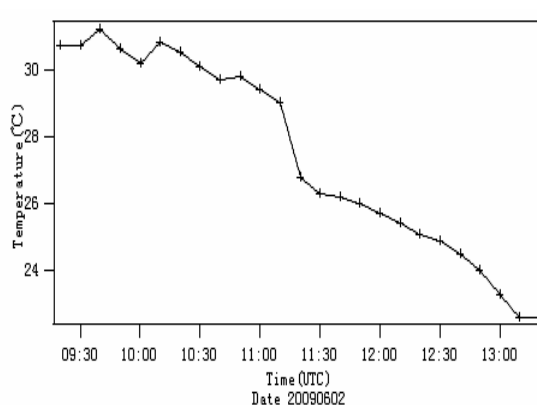
(d)

图4 2009年6月2日首都机场一次晴空窄带回波的回波强度和径向速度图
(a-d 的观测时间分别为 09:47、11:02、11:17 和 12:07; 左图为回波强度图, 右图为径向速度图)

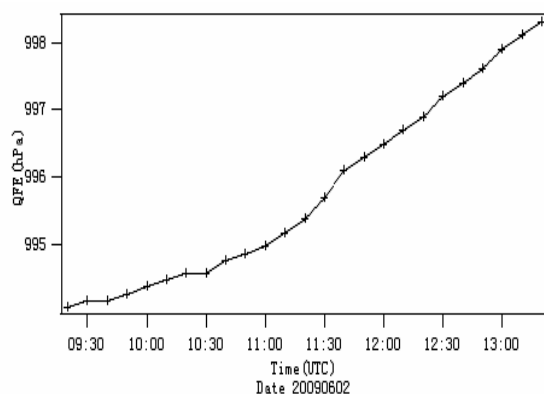
图5为当天9点30分至11点30分期间首都机场温度、相对湿度、场面气压及风向和风速等气象要素的时序变化图。在11点00分至11点30分期间, 即晴空窄带回波过境前后, 各气象要素有着较为显著的变化, 相对湿度由13%骤升至28% (图5a); 温度从29.4℃下降至26.3℃, 下降幅度为3.1℃ (图5b); 场面气压逐步上升, 半小时内上升约1hPa (图5c); 风速变化则更为显著, 大约11点左右晴空窄带回波过境前, 风速为2m/s, 晴空窄带回波过境时, 风速骤然增加到10m/s (图5d); 同时, 风向从190°变化到140° (图5e)。综合分析各气象要素的变化情况, 晴空窄带回波过境前后, 它们具有很好的对应关系, 相对湿度和场面气压显著上升, 气温显著下降, 风速加大、风向突变。如果缺乏及时有效的临近预报, 这样的风向风速变化对于起飞着陆中的飞机是非常危险的。



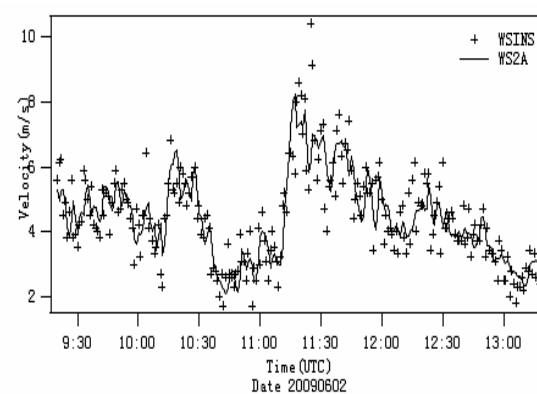
(a)



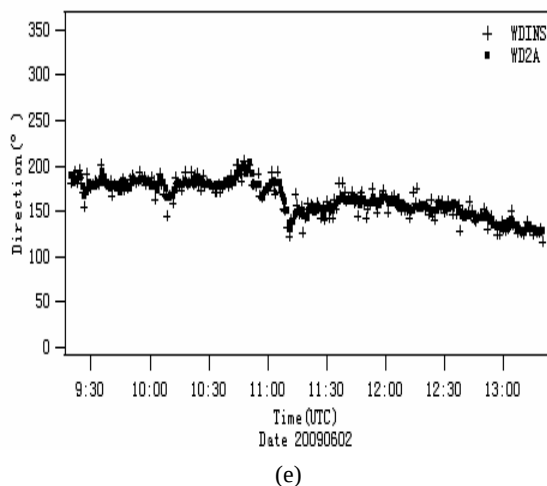
(b)



(c)



(d)



(e)

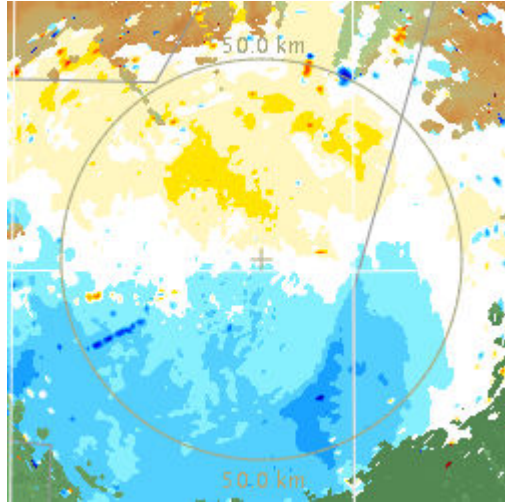
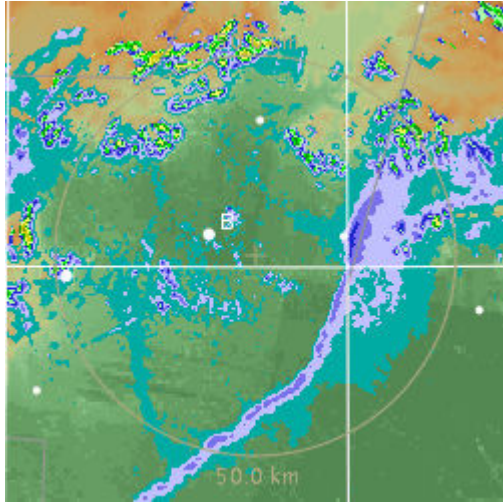
图5 2009年6月2日首都机场一次晴空窄带回波过程的地面气象要素时序变化图
(a 为相对湿度, b 为场面温度, c 为场面气压, d 为风速, e 为风向)

5 晴空窄带回波的雷达图像特征分析

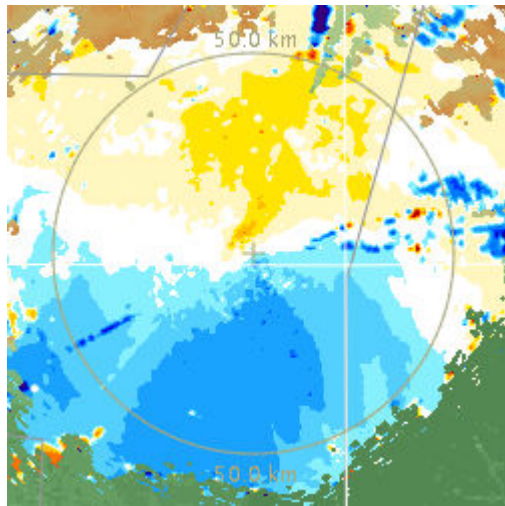
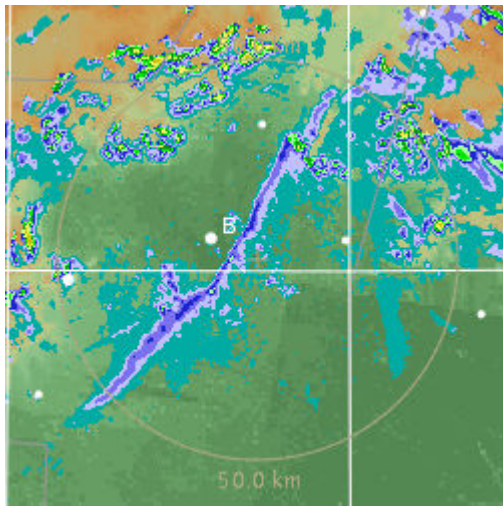
晴空窄带回波虽然产生的风力并不是很强,但是它可以在短时间内造成风速忽然加大及风向突然变化, 非常容易引起飞机在起飞降落过程中遭遇顺风超标, 进而发生事故。结合实际工作中的经验及雷达图像的对比分析后, 根据晴空窄带回波在雷达径向速度图像中的不同特征, 我们将其分为窄带回波来向与径向速度图一致、窄带回波来向与径向速度反向、窄带回波径向速度与冷空气对峙等三种类型。在这三种类型的晴空窄带回波中, 第一类较为多见, 后两种则较为少见。

5.1 窄带回波来向与径向速度图一致型

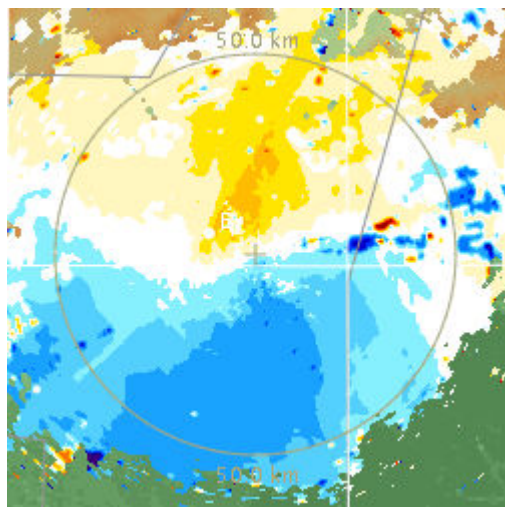
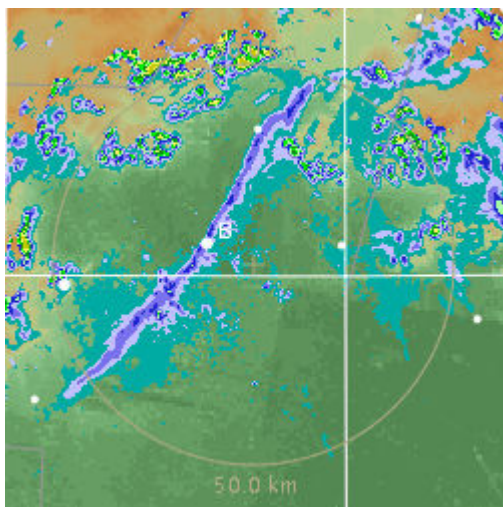
这类窄带回波的特点是: 窄带回波过境时, 其来向与相应的径向速度方向基本一致, 只风速突然加大, 容易引起飞行事故。图6给出的是2009年6月2日的一次窄带回波过程。从图中可以看出, 窄带回波在回波强度图上呈带状; 而在相应的径向速度图像中, 窄带后部有明显的速度核, 最大风核速度一般在10-14米/秒。如图所示: 2009年6月2日雷达图, 图中显示, 窄带回波从东南方向移向西北, 长度约100公里; 而径向速度图中主导风向为南风, 当窄带回波临近本场时, 南部风核范围明显加大, 风向也从南风转为东南风。



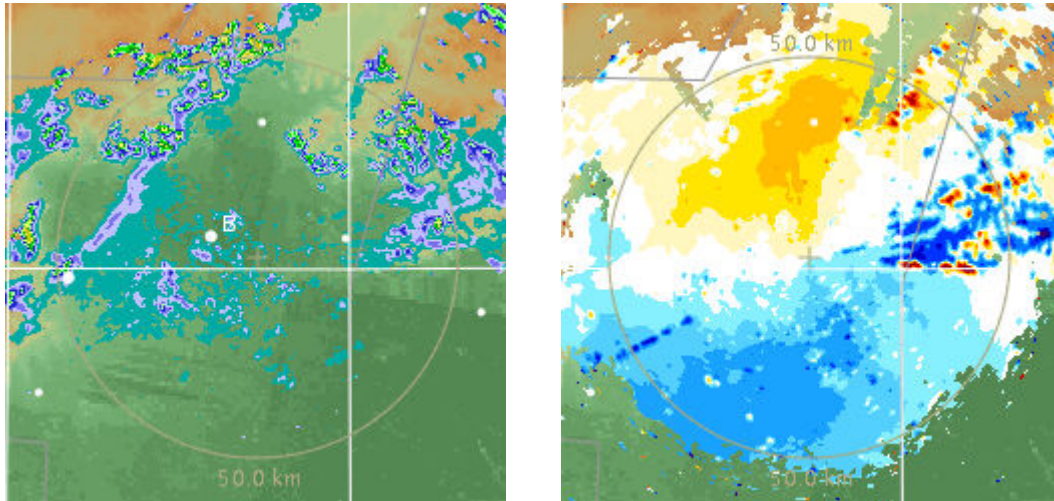
(a) 09:47 时雷达图像，左图为回波强度图，右图为径向速度图



(b) 11:02 时雷达图像，左图为回波强度图，右图为径向速度图



(c) 11:17 时雷达图像，左图为回波强度图，右图为径向速度图



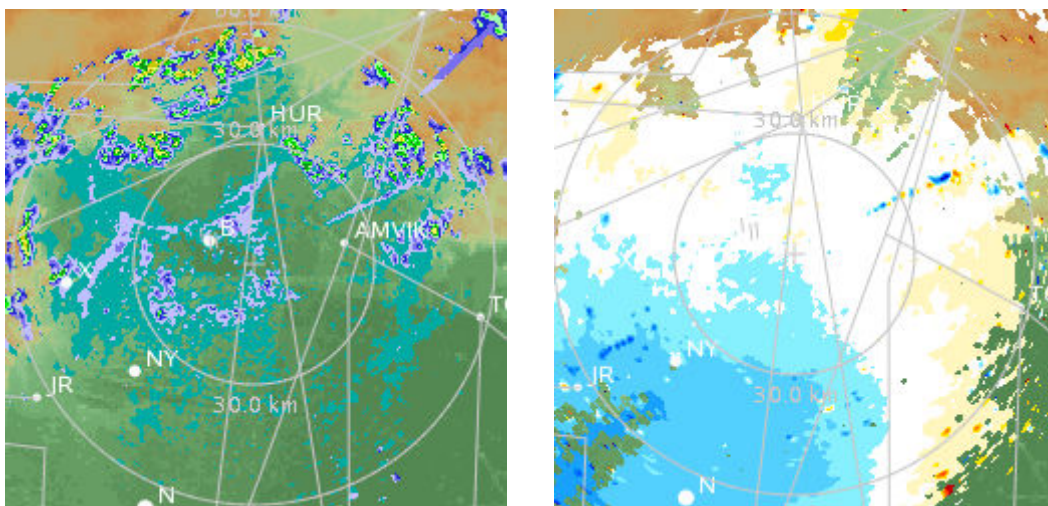
(d) 12:07 时雷达图像，左图为回波强度图，右图为径向速度图

图 6 2009 年 6 月 2 日 09:47、11:02、11:17、12:07UTC 回波雷达强度图和径向速度图

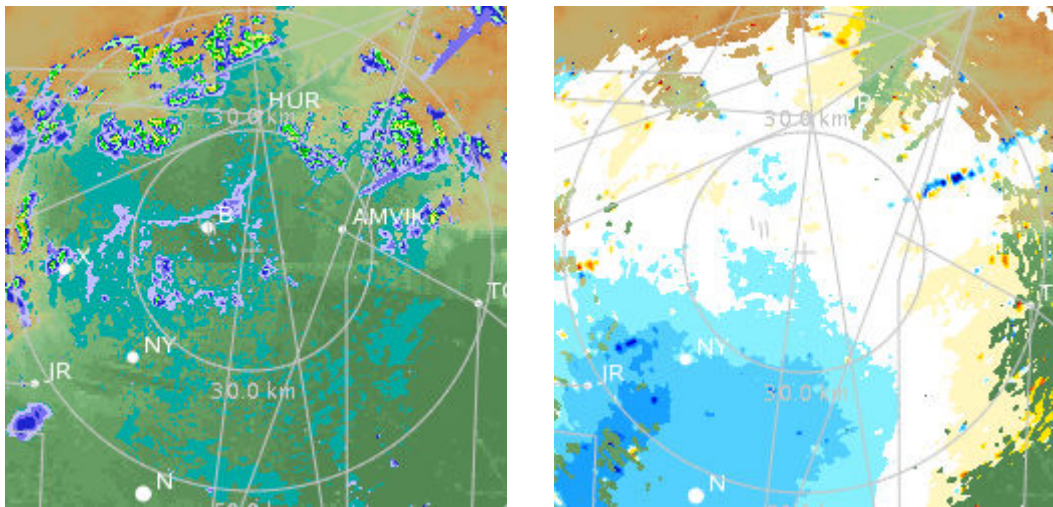
5.2 窄带回波来向与径向速度反向型

这类窄带回波的特点是风向过境前后，窄带回波的来向与相应的径向速度方向向过境前后相反，虽然它的风速不大，但是会引起的风向突变，而对飞行造成严重影响的正是它的风向突变，进而造成飞行的顺风超标。

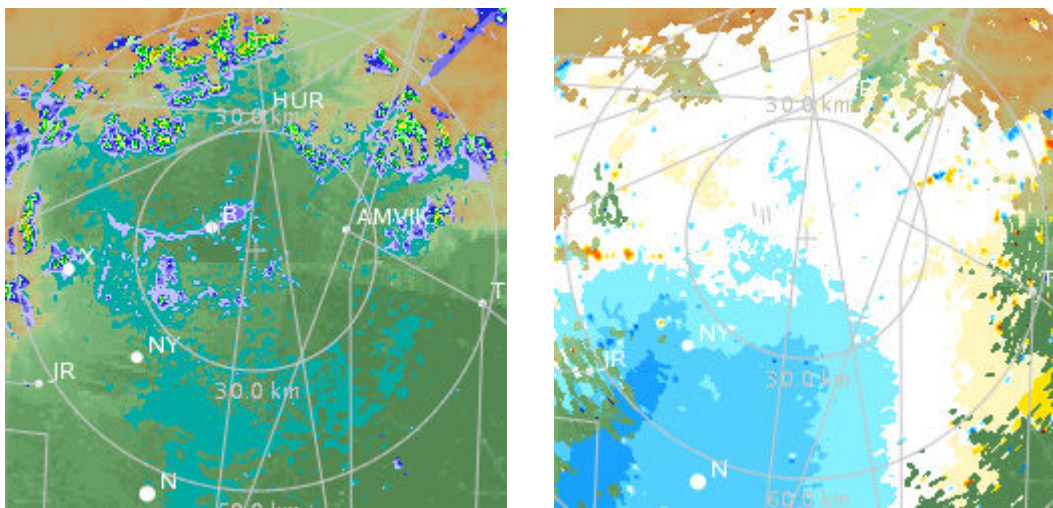
强度型窄带回波的特征是：仅仅在强度图中呈明显的弧状，雷达径向速度图像中并没有明显的特征。图7给出的是2012年7月1日的一次窄带回波过程。从雷达强度图及径向速度图可以看出，窄带回波出现后，逐渐向东南方向移动，而径向速度图中主导风向却是偏南风，出现了回波移向与回波径向速度相反的现象。



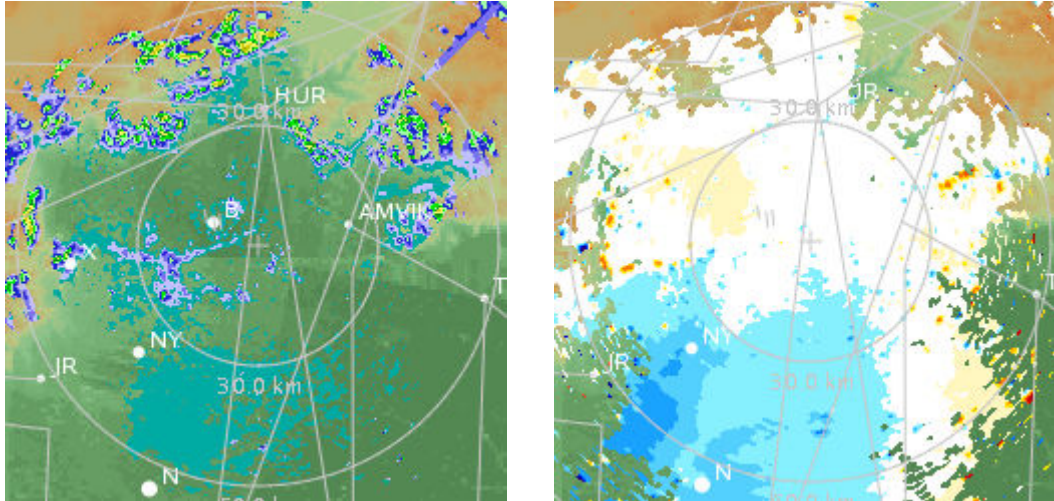
(a) 09:32 时雷达图像，左图为回波强度图，右图为径向速度图



(b) 09:47 时雷达图像，左图为回波强度图，右图为径向速度图



(c) 10:12 时雷达图像，左图为回波强度图，右图为径向速度图



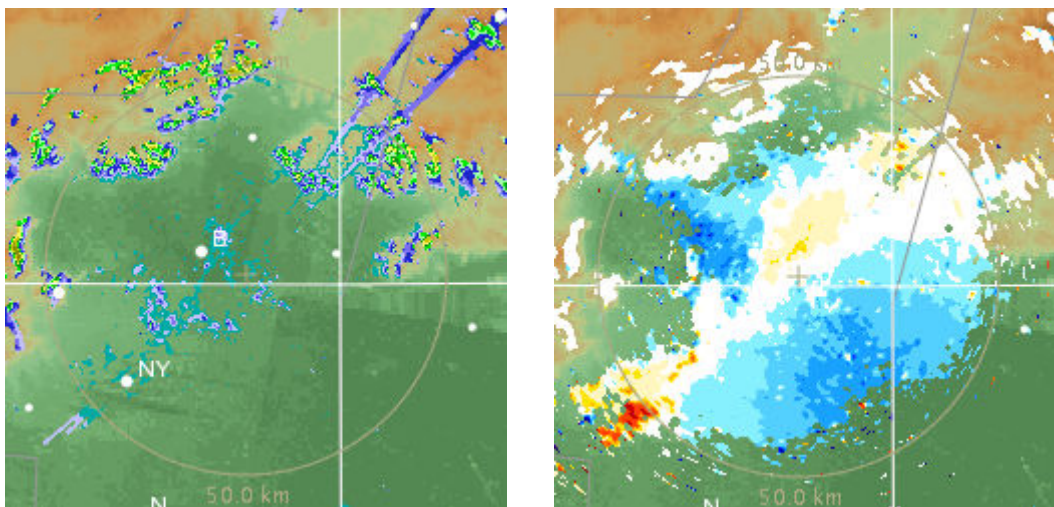
(d) 11:02 时雷达图像，左图为回波强度图，右图为径向速度图

图7 2012年7月1日09:32、09:47、10:12、11:02UTC强度图和速度图

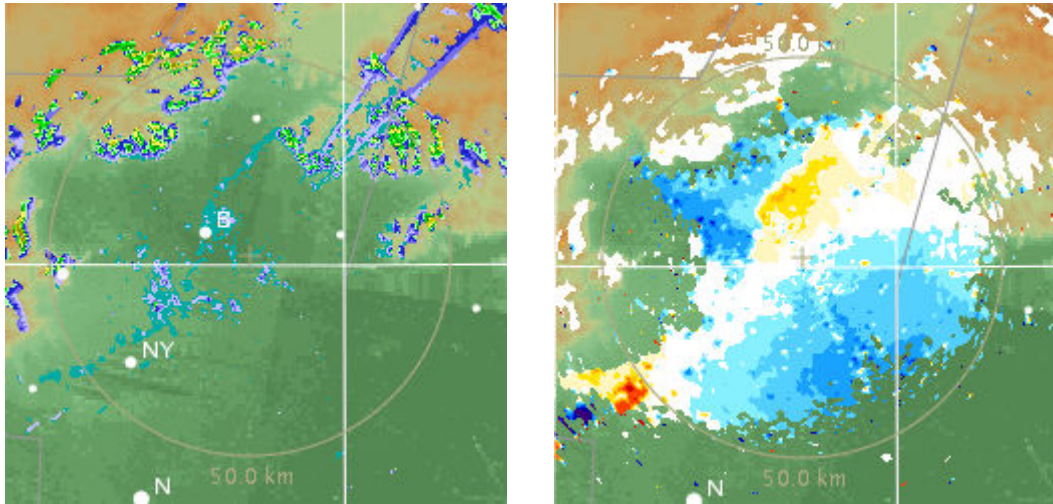
5.3 窄带回波径向速度与冷空气对峙型

这类窄带回波的特点是径向速度图中有相对的两个风核，由于两股冷空气强度相仿，有时窄带回波相对静止；这种情况发生时，预报员判断其移动方向较为困难，近地面层因风向相反，形成风切变，对起降航班影响极大，甚至可以导致机场关闭的严重后果。

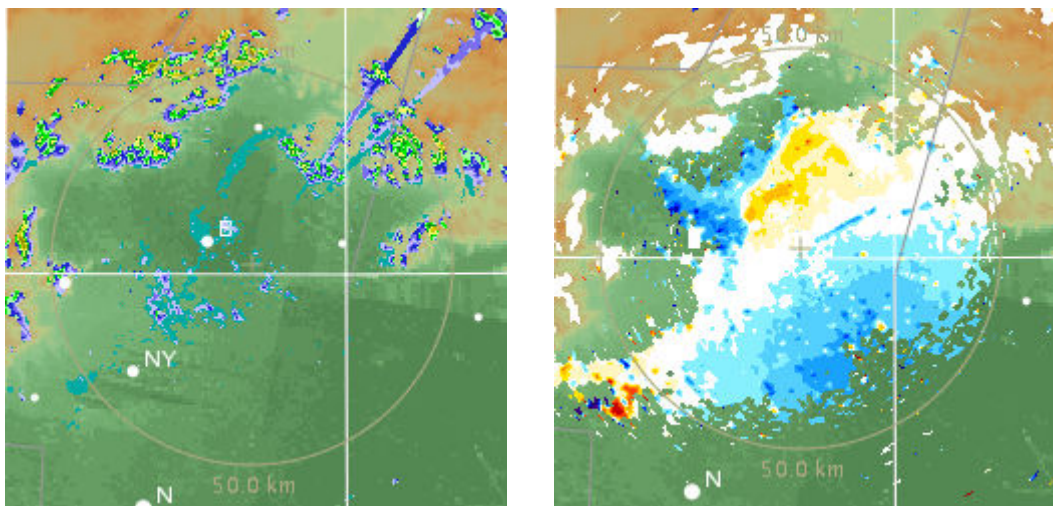
晴空窄带回波也会出现和弱冷空气相遇的情况，雷达径向速度图中弱冷空气与窄带回波后部风核有明显的特征。此时应该对两股气团强弱做出判断，才能判定未来的主导风向。例如：图8为2012年4月15日的一次窄带回波。



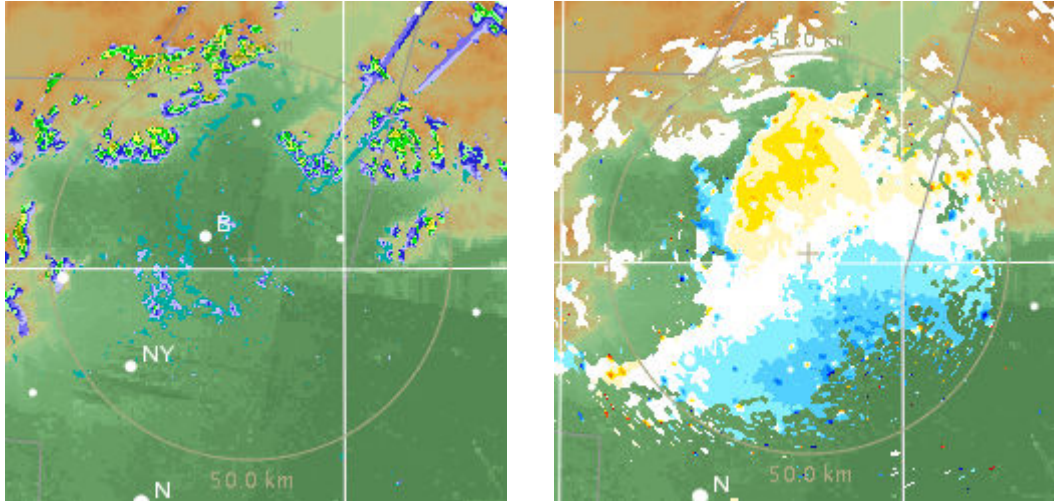
(a) 07:12 时雷达图像，左图为回波强度图，右图为径向速度图



(b) 07:37 时雷达图像，左图为回波强度图，右图为径向速度图



(c) 07:52 时雷达图像，左图为回波强度图，右图为径向速度图



(d) 08:32 时雷达图像，左图为回波强度图，右图为径向速度图

图8 2012年4月15日07:12、07:37、07:52、08:32UTC强度图和速度图

6 统计分析

针对 2009-2012 年首都机场 C 波段双极化多普勒气象雷达观测的 8 次晴空窄带回波过程，对其过境前后的各种天气要素进行统计分析（表 1），力求找出一些对于临近预报有用的规律和指标。

6.1 风向风速

我们可以发现，并非每次窄带回波过境后风向都与原来的风向差不多，有时也会出现风向相反的现象。对此我们可以规定，风向出现反向的风速，风速的变化量为前后风速叠加。而后我们可以看到，首都机场出现的窄带回波大多出现在南部或东南部（以窄带回波的来向为准），共有 6 次，偏北部有 2 次；窄带过境后，风向变化为垂直于窄带回波的来向，风速大多数都会有突然明显的增大，部分个例中风速减少应该这是由于较弱的窄带回波带来的风切变比较小，从而和原来的风速风向矢量叠加之后的结果。

从表中可以看出：几乎所有个例风速矢量叠加后的风速变化都有 6-11 米/秒，这样的风速变化对于起降航班是致命的；而窄带回波过境后风向的突然变化及风速的突然增大，更会引起航班顺风超标进而导致事故。大量事实证明，飞机起飞及着陆阶段是最容易受到风切变影响而造成事故的。晴空窄带回波带来的风切变对于我们民航气象来说应该特别的关注，非常容易使得顺风或者侧风超标，对飞行安全造成严重影响。如果可以提前预报，哪怕半小时的时间，将未来趋势通知管制部门，对于起降航班的安全作用也是非常显著。

表 1 晴空窄带回波过境前后各气象要素的统计特征

编号	日期	时间(UTC)			风速(m/s)		风向		温度(°C)		相对湿度(%)		气压变化(hpa)	
		开始时间	结束时间	持续时间(min)	过境前	过境后	过境前	过境后	过境前	过境后	过境前	过境后	过境前	过境后
1	20090509	04:30	05:00	30	4.0	8.0	20°	40°	26.8	24.0	44	47	1000.1	1001.5
2	20090527	11:10	11:50	40	3.5	3.0	200°	120°	27.2	26.3	41	50	1009	1009.4
3	20090602	11:00	11:30	30	2.0	10.0	190°	140°	29.4	26.3	13	28	995.2	996.3
4	20090628	07:00	07:40	40	7.0	11.0	160°	180°	35.5	34.7	17	21	993.4	993.1
5	20100620	08:40	09:10	30	2.5	7.0	170°	180°	34.9	32.4	22	38	1002.5	1002.5
6	20100708	09:50	11:00	70	3.0	6.0	160°	180°	36.0	33.0	20	26	1000	1000.6
7	20120415	06:30	08:00	90	2.0	7.0	360°	150°	27.8	23.0	12	33	1004.2	1004.8
8	20120701	10:10	10:40	30	3.5	2.5	180°	30°	34.5	32.1	50	65	993.5	993.7

6.2 温度

从表 1 中可以看出，我们统计的 8 次窄带回波过程中，每次窄带过境都会给本场带来较为明显的降温，具体降温的多少跟回波的强度并没有太大的关系，但是所有个例均为降温这一特征可以猜测，窄带回波可能是尺度较小的冷气团的前沿的低层辐合线。

6.3 湿度

从表 1 中可以看到窄带过境后，本场首都机场相对湿度都会有不同程度的上升，上升幅度最小的为 3%，而最大的则有 21%，这一点分析得出窄带回波后部为相对较湿的冷气团。

6.4 气压

从表 1 中可以看到窄带过境后，本场首都机场观测点的气压大部分有不同程度的上升，上升幅 0.2-1.1hpa 不等；另外一次与过境前持平，一次气压出现下降，下降幅度为 0.3hpa。

7 结论

晴空窄带回波大多出现在夏季午后到傍晚，常呈细长带状，也可呈圆弧弯曲状，其长度为 20-30 公里至 150-160 公里，宽度只有 1-2 公里，出现在大气低层。窄带的回波强度只有 5-15dBZ，个别强度可达 17dBZ，所以窄带一般只能在离雷达站较近处才能被探测到。

从以上对晴空窄带回波过程的统计资料及雷达资料分析来看，当雷达强度图中出现晴空窄带回波时，便是风向风速发生改变的征兆，对临近预报有很好的指导意义。结合实际工作中的经验，我们得出以下几点预报指标，一共大家参考：

7.1 从实际工作中的卫星及较大范围的雷达资料显示，晴空窄带回波的出现与对流天气无关，往往出现在弱形势场，天空状况为无云或少云；另外，在研究中也并没有发现窄带回波触发对流天气的个例。

7.2 从统计数据来看，晴空窄带回波过境前后，风向风速会有明显的变化，这也是会对飞行造成严重后果的原因。不论窄带回波之前测站的风向风速如何，只要回波到达测站，那么测站的风向风速会随之变化，过境后的风向为窄带回波的来向，平均风速一般为 6-9 米/秒，阵风 12-15 米/秒。

7.3 统计资料看，晴空窄带回波过境后，温度一般会呈下降趋势，相对湿度上升，气压变化也为上升趋势。这些温压湿的变化特征与雷暴外流边界有较大的相似，只是强度有所不及。由此可以推测：晴空窄带回波可能是由相对较湿的冷气团引起的，这一点有待进一步的研究。

7.4 造成的后果：晴空窄带回波不仅会造成的地面的风速突然加大，还会引起风向突然改变，而风向风速的突然变化引起的风切变，容易造成飞机顺风超标，容易引发事故；另外，其引起的气压的突然增加，也会使飞机的滑跑距离变长，从而造成飞机滑出跑道等事故。

7.5 从雷达强度图来看，表现为一条或几条细而窄的带状回波，移动速度较快；雷达多普勒径向速

度图中，多数窄带回波后会有10-14米/秒的大风区，但是并不是每一次窄带回波都会在速度图中有明显的特征体现。

7.6 从服务效果看，从发现窄带回波后，经过分析，临近预报一般可以提前30-60分钟预报其到达机场的时间，这对管制部门提前做好准备，避免飞行事故的发生是行之有效的。晴空窄带回波是雷达在晴空情况下探测到的弱窄带回波一般都对应大气边界层内的辐合线，产生这些辐合线的原因有可能是局地环境或地形所导致的风向辐合线；但是由于晴空窄带回波尺度小，出现突然，教材中并没有对于它的具体预报方法。笔者在研究中发现，只有在雷达图像中出现窄带回波后，结合相关资料，才可以对其进行有效分析及临近预报，但它何时出现及出现的内在原因还不得而知，如需要深入研究，需要更多的高分辨率观测资料和模拟研究。

参考文献

- [1] 张培昌, 杜秉玉, 戴铁丕, 等. 雷达气象学[M]. 北京: 气象出版社, 30-31, 2000.
- [2] 大气科学辞典编委会. 大气科学辞典[M]. 北京: 气象出版社, 498, 1994.
- [3] 郭卫刚, 徐彦军, 边若鹏. 风切变对飞行平飞特性的影响分析[J]. 飞机设计, 28(3): 1-3, 2008.
- [4] 程勇. 风切变与飞行[J]. 航空安全, 87, 62-64, 2008.
- [5] 王楠, 刘黎平, 徐宝祥, 等. 利用多普勒雷达资料识别低空风切变和辐合线方法研究[J]. 应用气象学报, 18(3): 314-320, 2007.
- [6] 李秀莲, 付强, 王科, 等. 风切变对飞行的影响及其预报时效分析[J]. 气象科技, 38(2): 170-174, 2010.
- [7] 许健民, 方宗义, 卢乃锰, 等. 卫星与雷达图像在天气预报中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 312-344.
- [8] 刘小魏, 曹之玉, 兰海波. AMDAR资料特征及质量分析[J]. 气象科技, 35(4), 480-483, 2007

作者简介:

付强（1974年2月14日），男，内蒙古，预报工程师 着重于卫星及雷达在预报中的应用等研究