

冷涡内部中尺度变形场的 多普勒雷达观测和分析

王会山¹ 张云峰¹ 王承伟² 安英玉¹ 徐 玥²

(1. 黑龙江省人工影响天气办公室, 哈尔滨 150030; 2. 黑龙江省气象台)

提 要: 2005年4月20日, 哈尔滨新一代天气雷达观测到东北冷涡内部具有中尺度的变形场结构, 即在雷达速度图上, 存在两负两正且互为准对称的现象。在变形场中通常会引起锋生效应, 而雷达观测具有高时空分辨率, 可以及时发现这种中尺度的变形场。本文应用实时雷达资料, 配合卫星云图及常规资料场, 对该次过程进行分析。说明变形场在冷涡发展的过程中起到了重要作用。

关键词: 多普勒天气雷达 速度场 变形场 锋生 东北冷涡

Doppler Radar Observation and Analysis of Mesoscale Deformation Field in Cold Vortex

Wang Huishan¹ Zhang Yunfeng¹ Wang Chengwei² An Yingyu¹ Xu Yue²

(1. Weather Modification Center of Heilongjiang Province, Harbin 150030;
2. Meteorological Observatory of Heilongjiang Province)

Abstract: On April 20, 2005, a mesoscale deformation field structure in cold vortex was found in the Doppler velocity picture which showed a symmetrical structure. Frontogenesis was usually caused in the deformation field which could be found timely in radar observation with high spatial-temporal resolution. By using the real-time radar data, satellite image and conventional data, the synoptic process was analyzed. It indicated that the deformation field played an important role in the course of development of the cold vortex.

Key Words: Doppler radar velocity field deformation field frontogenesis northeast vortex

引 言

东北冷涡是影响东北地区的主要天气系

统之一, 是大尺度环流形势在东北地区特定条件下的产物, 是东亚地区重要的天气系统^[1]。近年来随着全国天气雷达布网, 对于东北冷涡的内部结构研究不断完善, 开始从

基金项目: 黑龙江省气象局重点技术研究项目“黑龙江省人工影响天气业务系统”资助。

收稿日期: 2008年2月29日; 修定稿日期: 2009年4月3日

天气尺度向中小尺度转变。与其他雷达相比,多普勒天气雷达不仅能探测到雷达回波的强度特征,更重要的是对速度场的探测结果可以用来对系统内部结构进行研究。目前,对于多普勒雷达的速度场研究主要是观测某些典型流场在径向速度场上的特征^[2]以及对速度场的单部或多部的雷达反演风场^[3-4],钟卓约等^[5]对 9914 号台风多普勒雷达资料进行了分析,提出了不同强度的台风其回波特征也不同。而刘峰等^[6]对台风的径向速度特征进行了详尽分析。刘敏^[7]利用兰金模式,通过径向速度特征找出东北冷涡的中心,并判断冷涡中心的移动方向。而对于变形场结构特征,也主要是针对台风的研究,韩桂荣^[8]利用 MM5 模式对 0108(桃芝)台风温带变性特征及暴雨发生发展机制进行了诊断分析,表明变形场产生锋生,结果加强了风场的非地转性并强迫出锋面垂直次级环流,造成强烈的辐合上升运动,引起台风暴雨的增幅。隆霄等^[9]通过利用观测资料和中尺度数值模拟结果,对 2002 年 6 月 18—19 日("02.6")的一次梅雨锋暴雨 β 中尺度系统结构和演化及其发展机理进行了研究,分析发现两个 β 中尺度对流云团位于对流层低层鞍型场的膨胀轴上和对流层高层的中尺度反气旋式环流中。大气低层和高层的相互作用、低层中尺度扰动低涡和鞍型场的相互作用,以及对流发展过程中动力和热力的相互作用促进了中尺度低涡的发展。但到目前为止,对于冷涡中心附近的中尺度结构,以及冷涡的中尺度发展机制研究比较少。

2005 年 4 月,在一次东北冷涡发展东移的过程中,雷达观测到中尺度变形场特征,这也是黑龙江省雷达首次观测到冷涡的中尺度变形场。4 月 20 日 07 时至 19 时,在以层状云降水回波为主的背景下,在冷涡中心经过哈尔滨的多普勒雷达观测到低层速度场上的中尺度变形场,它对研究东北冷涡的发展和

加强有重要意义。本文从常规资料及云图资料进行初步分析,利用雷达资料对这一过程进行详细的分析,试图找出本次东北冷涡中心附近内部的特征和中尺度发展机制,这对东北冷涡的内部结构及发生机理的进一步研究有一定的意义,同时在业务中对于短时临近预报有很好的指示意义。

1 降水实况

本次过程降水以层状云的连续性降水为主,雨量及雨强比较均匀。在低涡中心附近,6 小时降雨量基本在 5~8mm(见表 1),而在冷涡的前部有个别站 6 小时降雨量超过 10mm,就季节而言,属于较大的降水。

表 1 2005 年 4 月 20 日哈尔滨及周边地区 6 小时降水量(单位:mm)

时次	02	08	14	20	02
哈尔滨	14	5	6	5	2
绥化	14	9	6	3	0.4
肇州	5	0.7	5	10	9

2 天气背景

2.1 高空形势场特征

从 500hPa 形势场上看,这是一次东北冷涡发展东移的天气过程。冷涡于 19 日 08 时形成于贝加尔湖与黑龙江省之间,并在 20 日白天发展东移,冷涡中心移过哈尔滨雷达站,20 日夜间,冷涡发展至最强并继续东移。

从 850hPa 形势场上看,20 日白天,哈尔滨雷达站一直位于低涡中心的一、二象限(以哈尔滨雷达站为中心,按照平面直角坐标系划分四个象限,右上角为第一象限,右下角为第二象限,左下角为第三象限,左上角为第四象限,文中提到的象限均按此标准划分,后文中不再提及),20 日 20 时,本站的位势高度在周围测站中最低,达 121dagpm,较上一时

次下降了 5dagpm,并由 08 时的东南风转为东北风。21 日 08 时,冷涡中心强度已经有所减弱。雷达图上变形场出现在 20 日白天,即高空冷涡东移加强的过程中,此时哈尔滨雷达站位于低涡中心。

2.2 地面环境场特征

与高空低涡相配合的是地面蒙古气旋东移进入黑龙江省并进一步加强,20 日 14 时气旋发展到最强,最低气压值出现在哈尔滨测站,达 986.4hPa,在 20 时以前,哈尔滨均为东北风,处在低压的前部,20 时,哈尔滨转为西北风,处在低压的后部,低压逐渐移出雷达观测范围。

2.3 流场特征

从图 1 和图 2 可以看到,哈尔滨位于流场的辐合中心附近,东南和偏东风从第四象限向第一、二象限伸展,而偏西及西南风则由第二象限向第三、四象限流场伸展。同时, U 分量的零风速等值线,在本站附近经过时,本站的北部为偏东风,南部为偏西风。由图中还可以看到,流场的辐合区域与 6 小时降雨量配合得非常好,较大降雨量,均出现在流场辐合中心附近。在地面 V 分量场上也基本

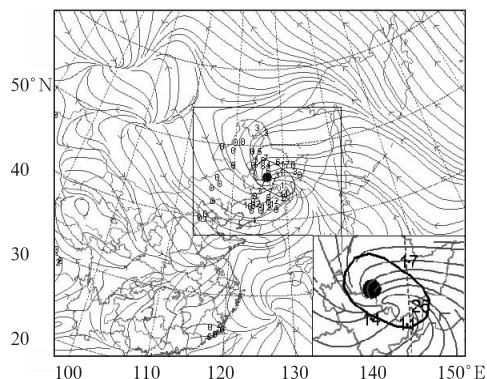


图 1 20 日 14 时地面流场与 08—14 时 6 小时降水量(单位:mm)

(闭合等值线为地面低压的最内圈等值线,值为 992hPa;右下方框中为 6 小时降水量 $>10\text{mm}$ 降水站点的放大显示;黑色实心圆点为哈尔滨站的位置)

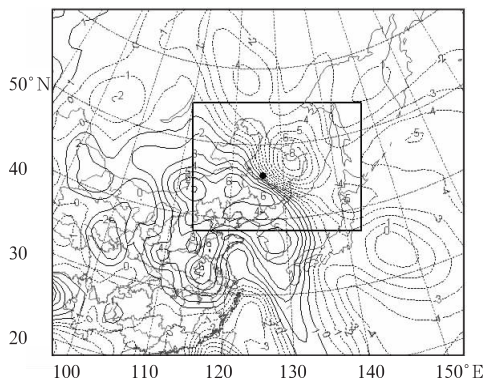


图 2 20 日 14 时地面 U 分量场(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

上可以看到与 U 分量相近的特征:零风速线在本站附近经过,本站西部为偏北风,东部为偏南风。

2.4 物理量场特征

从物理量场上来看,在哈尔滨雷达站附近,各物理量符合层状云降水特征:低层辐合、高层辐散,从 700hPa 到 300hPa 均为无辐散层,存在上升运动;在低层,黑龙江省有水汽通量的大值区,并有弱的水汽辐合;在哈尔滨附近有 θ_w 的暖舌,但中心值只有 30°C 左右,说明不稳定能量较小; $SI>0$,也说明此次降水过程为非强对流性质。

3 卫星云图分析

3.1 红外云图

在红外云图上可以看到,哈尔滨雷达站 20 日白天一直处在涡旋云系的中心附近,为松散的低云,涡旋中心外围有螺旋云带,但没有明显的对流云发展。图 3(见彩页)是 20 日 13 时的红外云图。图 4(见彩页)是 20 日 13 时可见光云图,在可见光云图上也可以看到 20 日白天,黑龙江省及吉林的中东部地区主要是结构松散的低云,没有明显的发展,但变形带不明显。

3.2 水汽图像

在当日 08 时的水汽图像上,可以看到在河套以西,有一条干舌伸向黑龙江省的东南部地区,将这个干区带与 200hPa 流场相对应,发现这个干舌与高空急流有很好的对应关系。随后整个干舌的主体逐渐向偏东方向移动,到了 13 时,如图 4 所示,由于涡旋的作用,干舌旋转,干空气逐渐卷入涡旋内部松散的云区中。北部的干区趋于明显,在这一干区的左前方,图中的“D”处明显变暗,此时暗影区覆盖黑龙江省东南部的大部分地区,哈尔滨市也是处在暗影区内。

4 雷达回波特征

4.1 雷达资料说明

本次过程应用的是哈尔滨 C 波段多普勒雷达站的扫描资料,时间间隔为 6min,采用降水模式 VCP21,9 层仰角扫描,分别为 0.5° , 1.5° , 2.4° , 3.4° , 4.3° , 6.0° , 9.9° , 14.6° , 19.5° ,探测范围为 150km。

20 日凌晨开始,雷达探测范围内以稳定的层状云降水回波为主,回波较弱,强度低于 30dBz。随着西北部冷空气的南下,在 07:37 初步出现变形场,而后变形场不断发展,在 13:02 变形场特征达到最强,最大高度为 2km,在 0.5° , 1.5° , 2.4° 三个低仰角上都显示出这一特征,19:04 变形场完全消失,历时近 12h。下面具体分析变形场的雷达回波结构特征。

4.2 变形场初生阶段

02:30 回波强度在 30dBz 以下,整层的风向风速都变得均匀,风速较 19 日有所减小,在 $25\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右,整层风向变为南风,但此时在西北方向, 0.5° 仰角的速度场上出现了负速度,即出现了向着雷达站的速度,说明此时有较弱的西北方向的速度分量。由于距

离较远,只有在 0.5° 仰角上才出现。

如图 5(见彩页)所示,03:03 在正负速度交界处由于西北方向的风与东南方向的风向的辐合使云体发展^[1],形成带状云带,强度较弱在 25dBz 左右,在 0.5° 、 1.5° 仰角上都有清晰的反应。此后该云带不断发展,半小时后,回波强度达到最强,之后与前方的云体合并。

07:37 东南方向的速度转为东南风,由于东南方向的速度分量较强,水汽条件充沛,在雷达站的东侧出现了较强的回波,在图 5c 中,a 点最大强度在 30dBz 左右,且有弧状零度层亮带形成(图略),说明此时的降水回波为稳定性的层状云降水回波。

在西北方向的负速度此后逐渐加强,即向站的西北分量加强,与东南方向的东南风形成对吹的形势,初步形成变形场结构。

4.3 变形场发展阶段

如图 6a、6b(见彩页)所示,09:32 在雷达扫描区,出现明显的两条零速度线、有两个正速度中心和两个负速度中心,两个正速度中心分别位于哈尔滨站的正北方向和西南方向,而两个负速度中心分别位于西北方向和东南方向,且互为对称,但只有在 0.5° 仰角上出现该特征。

如图 6c、6d(见彩页)所示,随着冷空气的推进,变形场结构明显,西侧的风速加大,西北方向的负速度前边界进一步靠近测站,按照前边界的移动速度外推得到推进速度约为 $10\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$, 0.5° 仰角上两个正负速度中心更加明显,同时在 1.5° 仰角上与 0.5° 仰角相对应的位置上也出现了负速度,说明随着冷空气的向南推进,变形场的特征已经垂直延伸到 1.5° 仰角。

4.4 变形场强盛阶段

随着冷空气不断向东南方向侵入,使得变形场的结构更加明显,且冷空气的前边界逐渐向东推进,变形场的整体结构也向东推进,如图 7(见彩页)所示。

至13:02,如图8(见彩页)所示,冷空气的前沿已接近哈尔滨雷达站,此时的涡旋中心位于哈尔滨雷达站的西南方向10km左右的位置。在强度场上回波分布均匀,纹理均一,且回波面积覆盖雷达有效观测范围,仍属层状云降水回波。

速度场上,正负速度中心明显,两个负速度中心分别位于东西两侧,两个正速度中心分别位于南北两侧,削北方向的冷空气此时已转为西风,而东南部的暖空气已转为东风,东西风在哈尔滨站交汇,根据多普勒雷达探测速度原理^[12-13]分析其实际风场,可以分析出变形场的风场结构特征。高层的西北风与暖区中的偏东风相交汇,由于是准水平的,因此在南北方向形成拉长轴,在东西方向形成压缩轴,变形场锋生^[14]。在锋生区回波有所加强,较周围回波强3dBz左右,说明变形场激发出锋生,进而促进云体的发展。此时的变形场结构特征已延伸到 2.4° 仰角上,即在垂直方向上进一步发展。

4.5 变形场消亡阶段

16:18, 0.5° 仰角,变形场的结构清晰,但整个风向与前一时次相比,有逆时针的旋转,两个负速度中心分别位于东偏北和西偏南的方向,而两个正速度中心则位于北偏西和南偏东的方向,且南偏东方向的速度中心值增大,北偏西方向的速度中心值减小。强度场上在东部出现了清晰的边界,说明此时的东风强烈。

在 1.5° 、 2.4° 仰角上变形场的结构特征消失,取而代之的是高低层的偏北气流。强度场上零度层亮带增强,为稳定型降水。

18:17 冷空气完全控制,变形场结构消失,东部的边界向雷达中心扩张,边缘齐整清晰。速度上的底层风速减小,高低层的风向切变减弱,零度层亮带变弱,整层转变为偏北气流。

4.6 雷达二次产品分析

在变形场的强盛阶段,从径向速度垂直剖

面图(图略)可以看出在垂直方向上存在强烈的垂直风切变。在哈尔滨雷达站的方位角 $230^\circ\sim 340^\circ$ 范围内,垂直方向上 $0\sim 1\text{km}$ 为离站方向的速度,即正速度,而在 $1\sim 4\text{km}$ 左右的范围内为向站方向的速度,在 4km 以上的高度为离站速度;在方位角 $80^\circ\sim 140^\circ$ 范围内,垂直方向上 $0\sim 1\text{km}$ 为向站方向的速度,即负速度,而在 $1\sim 4\text{km}$ 左右的范围内为离站方向的速度,在 4km 以上的高度为向站速度,因此分析在垂直方向上存在着由低层 $0\sim 1\text{km}$ 偏东风, $1\sim 4\text{km}$ 偏西风, 4km 以上为偏东风。经过敏士达公司的雷达产品处理系统进行分析,其48号产品,即风廓线产品显示的垂直方向的速度与上述分析结果相吻合。

5 综合分析

5.1 速度场上的变形场分析

变形场分为两种,一种为鞍形场,另一种则为狭长区域内风切变近 180° ,由前面流场、 U 、 V 分量及雷达速度图的分析可以看到,本次过程符合前一种变形场模式:图9是本次变形场在水平方向上的概念模型,图中带箭头的实线为流场,在本站及附近产生辐合气流,在雷达速度图上,表现为在本站有东西两侧的辐合气流,及南北两侧的辐散气流,并在东西两侧形成负的速度中心,南北两侧形成正的速度中心,中间的阴影区即为变形场的锋生带。

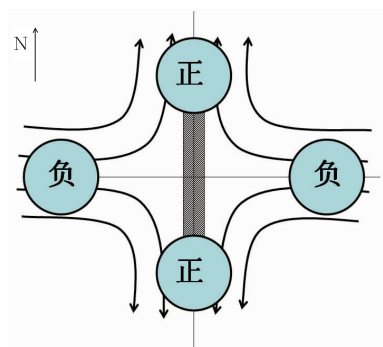


图9 冷涡变形场的概念模型

5.2 中尺度变形场形成原因的探讨

首先,中尺度变形场的形成是高层能量向低层传播的体现。由图3可见,20日08时,哈尔滨雷达站的高层存在明显的非地转风的风速场,300hPa上,是 $30\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的东南风,由水汽图像(图4)分析可知,图中“D”处为随时间变暗最快的区域,湍流最为强烈^[10],因此,高层的偏东风分量通过湍流作用向低层传播,导致低层出现中尺度的变形场,并得到加强。20时,300hPa转为小于 $18\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的偏北风,次日08时,转为偏西风,完成了一次能量在垂直方向的传递过程。

在850hPa(图略)上,哈尔滨站处在冷涡中心附近的第一、第二象限间,冷空气在低涡的第二象限向第三、第四象限伸展,暖空气则在冷涡的第四象限向第一、第二象限伸展,哈尔滨雷达处在冷暖空气间,前方为偏东风分量较大的暖空气,后方为偏西风分量较大的冷空气,与雷达的速度场相近,这种配置也有利于变形场的锋生。

5.3 中尺度变形场对冷涡发展的贡献

在地面图上,从05时至14时,低压中心的最低气压从991.3hPa降至985.6hPa,哈尔滨测站从05时至14时,3小时变压均小于 -1.0hPa ,即低压中心的气压及变压的变化均大于日变化,说明通过变形场锋生作用使得地面低压发展。

在高空形势场上,也可以看到相似的情形。

由上分析可以看到,中尺度变形场的出现和锋生作用是冷涡得以发展的重要机制。高层的非地转能量通过湍流向低层传输,产生变形场,并通过变形场的锋生作用使低层的冷涡得以发展。在东北冷涡的中心北部经常会出现比较强的降水天气,这可能也与变形场锋生有关。

由上面分析也可以看到,此次变形场是一次中等强度的锋生过程,因此,并没有产生强对流天气,只是雨量和持续时间较强。

6 结论

通过以上的分析,可以得出以下几个结论:

(1) 利用多普勒雷达高时空分辨率的观测来探查流场的演变,发现云体的发展和地面的降水增强的线索,可为降水的短时预报提供良好的动力学基础。

(2) 在冷涡中心位于雷达观测范围以内时,在底层的速度场上,并不一定是单纯的辐合气流,有时也会出现变形场结构,引起锋生和冷涡的发展,在锋生处产生较大降水,对于短时临近预报具有很好的指示意义。

参考文献

- [1] 黑龙江省气象局. 黑龙江省天气预报经验和方法[M]. 哈尔滨:黑龙江省气象局,1988:19-74.
- [2] 张晰莹,金凤岭,等. 新一代天气雷达回波图集[M]. 北京:气象出版社,2005:1-13.
- [3] 牟容,刘黎平,许小永,等. 四维变分方法反演低层风场能力研究[J]. 气象,2007,33(1):11-18.
- [4] 杨艳蓉,王振会,杨洪平,等. 多普勒雷达反射率与径向风资料在数值模式中的应用试验[J]. 气象,2008,34(6):58-65.
- [5] 钟卓约,帅方红. 9914号台风多普勒雷达资料分析[J]. 气象,2001,27(7):41-42.
- [6] 刘峰,王明钧. 应用多普勒雷达对9710号台风进行定位跟踪[J]. 广东气象,1999,增刊:46-47.
- [7] 刘敏. 东北冷涡的多普勒雷达资料特征分析[J]. 气象,2005,31(6):35-38.
- [8] 韩桂荣. 变形锋生对0108登陆台风温带变性和暴雨形成作用的诊断分析[J]. 气象学报,2005,63(4):468-476.
- [9] 隆霄,程麟生,文莉娟. “02.6”梅雨期一次暴雨 β 中尺度系统结构和演化的数值模拟研究[J]. 大气科学,2006,30(2):145-158.
- [10] M. G. 巴德等著. 许建民等译校. 卫星与雷达图像在天气预报中的应用[M]. 北京:科学出版社,1998:108-155.
- [11] 王迎春,钱婷婷,郑永光,等. 北京连续降雪过程分析[J]. 应用气象学报,2004,15(1):58-65.
- [12] 张培昌,杜秉玉,戴铁丕. 雷达气象学[M]. 北京:气象出版社,2000:218-224.
- [13] 俞小鼎,姚秀萍,熊廷南,等. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京:气象出版社,2006:47-62.
- [14] 朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等. 天气学原理与方法(第三版)[M]. 北京:气象出版社,2000:93-98.

王会山等：冷涡内部中尺度变形场的多普勒雷达观测和分析

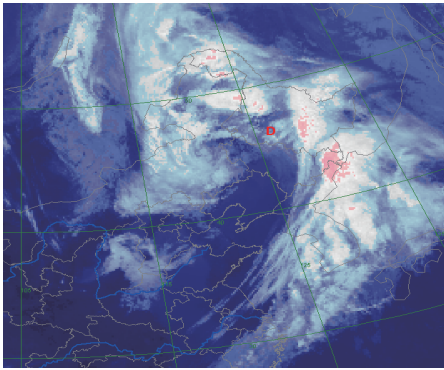


图 3 2005年4月20日13时红外云图

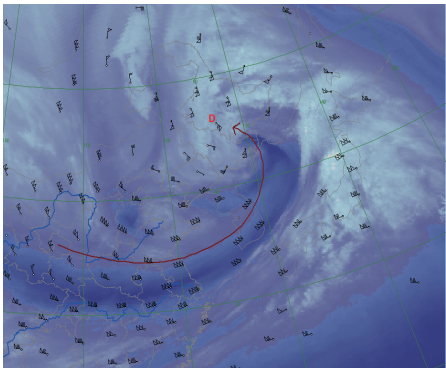


图 4 2005年4月20日13时水汽图像
实线为高空急流，“D”为暗影加深最快区域

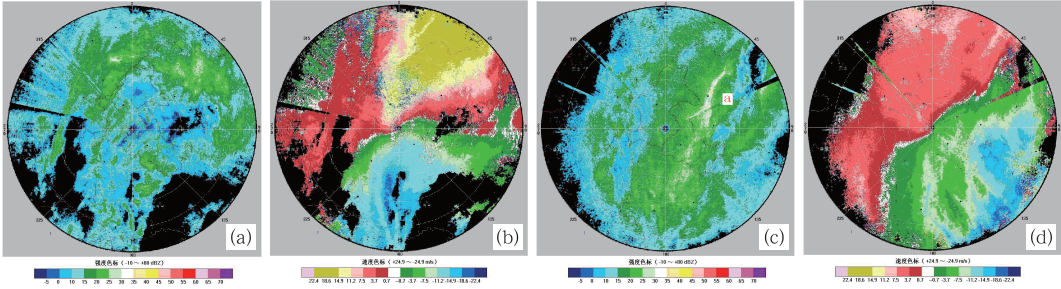


图 5 变形场结构出现

(a) 03:03, 0.5°仰角强度场结构; (b) 03:03, 0.5°仰角速度场结构;
(c) 07:37, 0.5°仰角强度场结构; (d) 07:37, 0.5°仰角速度场结构

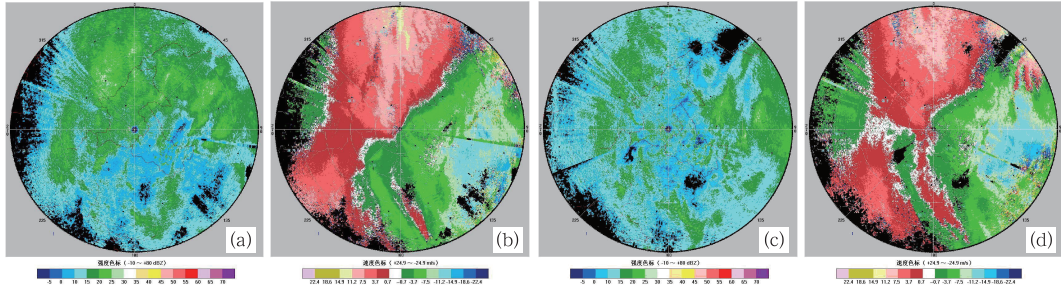


图 6 冷空气侵入，变形场结构特征明显

(a) 09:32, 0.5°仰角强度场结构; (b) 09:32, 0.5°仰角速度场结构;
(c) 10:30, 0.5°仰角强度场结构; (d) 10:30, 0.5°仰角速度场结构

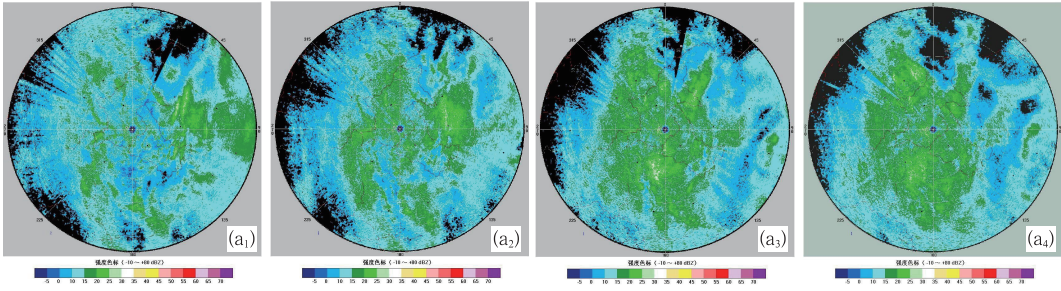


图 7 变形场发展时序图

a列为11:01、11:33、12:09、12:30时的0.5°仰角强度场结构

王会山等：冷涡内部中尺度变形场的多普勒雷达观测和分析

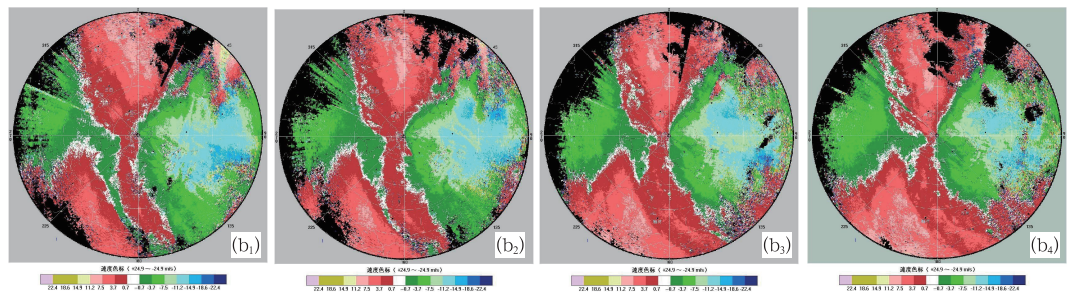


图 7 变形场发展时序图
b列为11:01、11:33、12:09、12:30时的0.5°仰角速度场结构

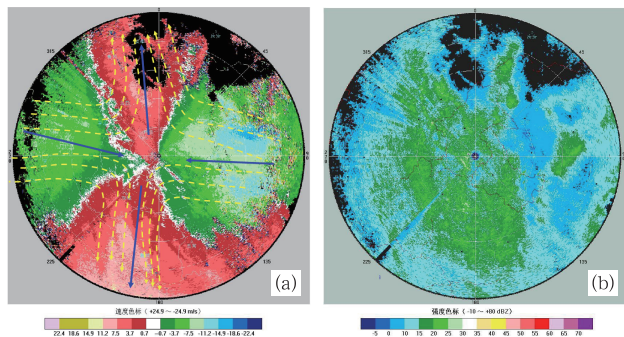


图 8 变形场结构特征