

张晰莹, 吴英, 王承伟, 等. 东北地区 MCC 雷达回波特征分析[J]. 气象, 2010, 36(8): 32-39.

东北地区 MCC 雷达回波特征分析^{* 1}

张晰莹¹ 吴 英¹ 王承伟¹ 赵玉洁²

1 黑龙江省气象台, 哈尔滨 150030

2 黑龙江省大兴安岭地区气象局, 加格达奇 165000

提 要: 2005 年 7 月 16 日在黑龙江省北部地区出现中尺度对流辐合体(MCC), 产生了雷暴、冰雹、龙卷、暴雨等强对流天气, 尤其是齐齐哈尔北部间隔 1 小时 10 分钟发生了 2 个龙卷。利用雷达、FY-2 卫星云图和相关资料, 对这次 MCC 过程进行了分析, 并对比高纬度 MCC 和非 MCC 强降雨的区别。结果表明: 高纬度 MCC 雷达回波速度场上有明显中气旋, 龙卷发生在 MCC 的发展阶段。物理量分析发现高纬度 MCC 比非 MCC 强降雨在水汽条件和动力因子上要求更高。地形在高纬度 MCC 的形成过程中起到很重要的作用, 相同的背景条件下, 在山脉的背风坡系统明显加强。

关键词: 中尺度对流复合体(MCC), 强对流, 雷达回波

Analysis on MCC Echo Characters of Dopple Radar in Northeast China

ZHANG Xiyang¹ WU Ying¹ WANG Chengwei¹ ZHAO Yujie²

1 Heilongjiang Meteorological Observatory, Harbin 150030

2 Daxinganling Meteorological Office of Heilongjiang Province, Jiagedaqui 165000

Abstract: At the night of July 16, 2005, the synoptic process of mesoscale convective complex (MCC) occurred in the north part of Heilongjiang Province. The severe convective weather phenomena including thunderstorm, tornado, hailstone, gust and heavy rainfall were observed. Two tornados occurred in the north part of Qiqihar within 70 minutes. The MCC is analyzed by using the Dopple radar data, the satellite data of FY-2 and other relevant data. The difference is analyzed between MCC and other general heavy rainfall processes in high-latitudes. The result shows that the obvious mesocyclone can be found in the radar echoes of velocity for MCC. The tornado is generated in the developing stage of MCC. The characteristics of physical quantities show that the conditons for vapor and dynamical factors are required to be more critical for MCC than others. The terrain commonly plays an important role in the generation process of MCC in high-latitudes. At the same synoptic situation, the system evolution occurs at the lee side of the mountains.

Key words: MCC (mesoscale convective complex), severe convection, radar echo

引 言

中尺度对流辐合体(mesoscale convective complexes, MCC)是 Maddox^[1]最早定义的典型的 α 中尺度对流系统, 在卫星云图上如何识别这类系统,

Maddox 在尺度、生命史、外形等方面给出 MCC 的判别标准。在雷达上不能观测到 MCC 系统的全貌, 只是监测到其中某一部分, 在卫星云图上观测到的近于圆形云区中, 在雷达观测中发现其云系的强度分布相当不均。由于其天气剧烈, 带来的灾害强, 所以近年来, 全球学者对 MCC 的研究很多; Bradley

* 黑龙江省气象局科研项目《黑龙江省近十年灾害天气预报技术研究》资助

2009 年 9 月 22 日收稿; 2010 年 3 月 25 日收修定稿

第一作者: 张晰莹, 从事卫星、雷达资料应用分析研究。Email: Zhangxiying2001@sina.com

等^[2]对北美的 MCC 进行了多尺度的分析,发现成熟的 MCC 三维流场与显著的对流不稳定促进了降水类型的非对称性;Maddox 指出,MCC 往往与对流层中层向东移动的短波槽相联系,在这个短波槽东南方向相当大的区域内大气呈条件不稳定状态^[3];Laing 在非洲地区也对当地出现的 MCC 进行了研究,发现了与其他地区相似的特征^[4]。在国内,康凤琴等^[5]、吕艳彬等^[6]、覃丹宇等^[7]、杨本湘等^[8]对中国南部、华北、长江中下游、青藏高原东南部出现的 MCC 进行了很深入的分析,都得到了很有意义的结论。但是,上述的研究大多在 35°S~35°N 之间,由于高纬度 MCC 出现得较少,对于 45°N 以北地区的 MCC 研究很少。

2005 年 7 月 16 日傍晚到夜间,在黑龙江省中北部地区(47°~50°N)出现了 MCC,给该地区造成了暴雨、雷暴、冰雹、龙卷等天气,为黑龙江省历年罕见。并且就在前一天,15 日 17 时 03—33 分,内蒙古呼伦贝尔市扎兰屯市也出现龙卷灾害。本文利用天气形势及物理量场对本次过程进行初步分析,重点应用雷达回波资料和 FY-2C 云图,对本次 MCC 云团演变全过程的卫星云图特征和雷达获取的龙卷资料进行分析,也对连续两天在相距不远的地方出现龙卷的主要原因进行了简单探讨。

1 天气背景及产生的原因和条件

1.1 高空形势场特征

在 2005 年 7 月 16 日 08 时的 850 hPa 高度场上,亚欧大陆中高纬维持两槽一脊的形势,巴尔喀什湖以北和外兴安岭地区分别有低涡存在,期间是宽广的脊区,河西走廊至东北地区由暖高脊控制,黑龙江省以偏西气流为主。低层环流经向度加大,850 hPa(图 1)整个东北地区都在暖脊影响之下,贝加尔湖到黑龙江省之间存在弱的短波槽活动。到 20 时,850 hPa 短波槽已经移到黑龙江省西北部地区,从渤海湾附近向黑龙江省有大于 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的西南风低空急流输送水汽。同时 200 hPa 上黑龙江省北部地区有西北风急流, MCC 产生在低槽的东南部,高空急流的右侧、低空急流的左侧。

15 日,内蒙古扎兰屯发生龙卷时影响系统相同,高低空的配置也十分相似。扎兰屯周围几个探空站 08—20 时 850 hPa 风速明显增大,20 时出现了 $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的西南急流。两天的龙卷主要的天气

背景是深厚的低涡系统引导短波槽的东移,高层有干冷平流,低层是暖湿平流,并伴有西南向的低空急流,有利于龙卷的产生。

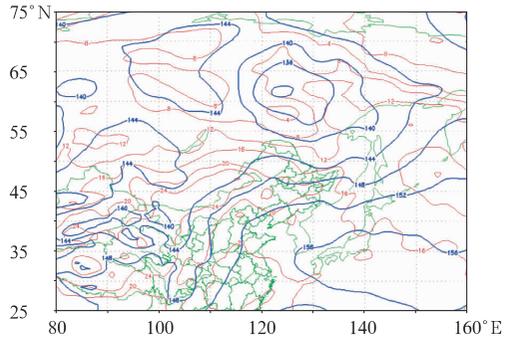


图 1 2005 年 7 月 16 日 08:00 850 hPa 位势高度(蓝色线,单位:dagpm)和温度(红色线,单位:°C)

Fig. 1 Geopotential height (blue line, dagpm) and temperature (red line, °C) at 850 hPa at 0800 BT 16 July 2005

1.2 地面环境场特征

16 日 08:00,我国西部一直到黑龙江省是一个大的低值区,在贝加尔湖南部有低压中心存在,黑龙江省处在低压倒槽的前部,至 20:00(图 2),随着低压中心东北向移动,倒槽伸到黑龙江省北部地区, MCC 发生区处在倒槽的第四象限,3 小时变压在 1~2 hPa 的区域内。

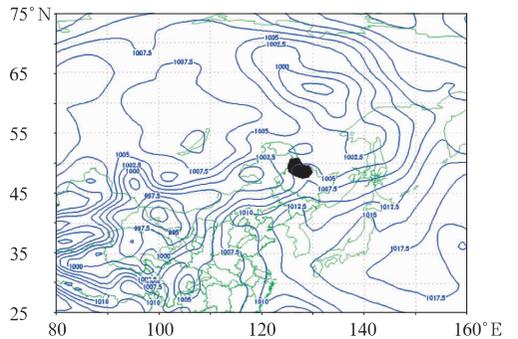


图 2 2005 年 7 月 16 日 20:00 地面图(黑色区为 1 h 降雨量 > 25 mm 的区域)

Fig. 2 Sea level pressure at 2000 BT 16 July 2005 (shaded area: 1 h rainfall > 25 mm)

2 MCC 物理量分析

16 日 20:00 黑龙江省西部地区水汽通量和水汽通量散度值都较大,充足的水汽供应,满足了

MCC 形成暴雨的重要条件;在东北地区北部对流层中层存在较强的正涡度中心,散度场低层辐合,中、高层辐散,为 MCC 对流形成提供了很好的动力背景条件,使对流得以强烈发展; θ_{sc} 高能舌已经伸到黑龙江省的大兴安岭地区,通过高低空 θ_{sc} 的配置可以发现 MCC 发生及发展区满足对流不稳定条件,对 MCC 对流的发生和发展提供了比较好的背景能量场和水汽条件;MCC 在 θ_{sc} 中心偏北 2~3 个纬距的地方发生、发展,在东移过程中也一直处在 K 指数、 SI 指数大值区内,因此使对流得以充分发展。

16 日 20:00,选取出现龙卷最近的齐齐哈尔探空站的探空资料可以发现,低层西南风和高层西北风都很强,说明对流层中上层干冷空气和中低层暖湿空气的垂直配置,上干下湿的环境有利于对流的加强。对流有效位能 $CAPE$ 能较好地反映对流的发展趋势,此刻的 $CAPE$ 值达到了 $2943.8 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,而抑制有效位能(CIN)仅 $506.8 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,大量能量的释放激发对流强烈发展。从以上分析各项指标和条件都有利于强对流天气的产生。

3 卫星云图特征分析

利用 FY-2C 云图来分析本次 MCC 的变化及与天气的关系。在间隔 30 分钟的红外云图上可以直观地发现 MCC 从开始生成至消亡冷云区面积大小的变化,从 16 日 20:00 在黑龙江省的西部有对流性云团生成东移;至 22:00,云团达 MCC 标准, MCC 形成;随后迅速发展、东移,至 17 日 02:00, MCC 发展到最强;随后 MCC 逐渐减弱,变得松散,至 17 日 05:00, MCC 消亡。将天气与 MCC 生命史对应可以发现: MCC 开始形成至发展到强盛是降水最为集

中的阶段,最强的降水出现在 MCC 的中部偏西位置,而强雷暴和龙卷则主要出现在 MCC 最强盛阶段 $< -52 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 的冷云区内,当 MCC 减弱以后,降水与雷暴也随之减弱。

利用每 30 分钟一次的卫星云图资料,对 MCC 的初生—生成—发展—成熟—消亡各阶段的卫星云图特征进行分析。

3.1 初生阶段

7 月 16 日 20:30 时(图 3a),在内蒙古与黑龙江交界处生成两个对流云团 A、B,云团虽然刚刚生成但是强度梯度较大,云团边界清晰,A 云团呈“弓形”,B 云团呈“椭圆形”。

21:00 时,A 云团范围扩大、强度增加,冷云区中心达 $-66 \text{ }^{\circ}\text{C}$,B 云团的面积和强度都没有明显变化。A 云团在增强的同时向东移动,它所带来的降水已经开始,在冷云中心出现阵雨天气,1 小时的站点最大降水量达 8.2 mm ,出现在云团中心附近。

3.2 生成阶段

22:00 时,B 云团强度减弱,冷云区范围缩小,而 A 云团仍在迅速发展,冷云区范围继续扩大,强度梯度增大,云体增长快,中心呈圆形,云系外围的西部呈“)”形,冷云中心已达 $-68 \text{ }^{\circ}\text{C}$,达到 MCC 的尺度标准,同时雨强明显增加。

22:30 时(图 3b),B 云团减弱,与 A 云团完全分离,A 云团仍在加强、发展,云区范围扩大,云团逐渐趋于“圆形”,云团的后边界由原来的“)”形演变成成为平直形。此时,阵雨天气向冷云的第一、四象限发展,最大降雨出现在冷云中心附近,1 小时的站点最大降雨量达 24.0 mm 。

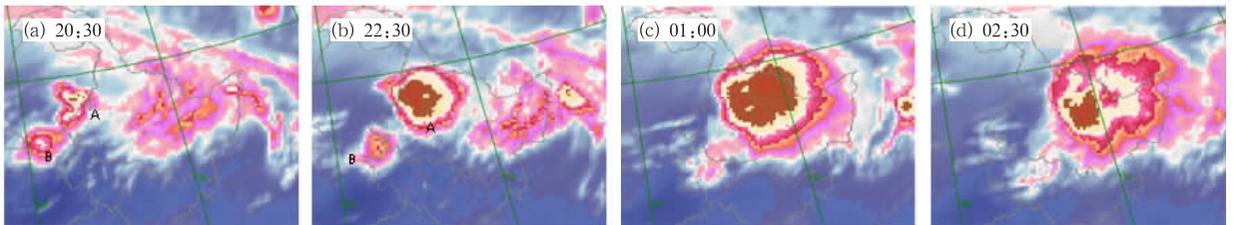


图 3 红外云卫星云图

Fig. 3 MCC infrared images

3.3 发展阶段

23:00 时,云团还在发展,云团后界少动,强度

梯度较大,前界明显东移,面积较前 1 小时扩大近 1 倍,最大降雨区出现在 MCC 冷云中心第二、三象限,1 h 的站点最大降雨量达 55.9 mm ,此时,在冷

云后部、温度梯度最大区域中,个别站点出现雷暴、冰雹天气,22:50 和 23:01 分别出现了两处龙卷。

17 日 01:00 时(图 3c),云团呈“圆形”,后部的强度梯度很大,冷云面积发展速度减慢,较 1.5 小时前扩大近 1 倍,此时,云团仍处在发展阶段,但发展速度减慢。在过去的 1 小时中,冷云覆盖区内基本都降雨,最大降雨量依然出现在 MCC 冷云中心第二、三象限,但站点最大降雨量减弱,为 41.1 mm,中心附近的部分站点出现雷暴、冰雹。

3.4 成熟阶段

17 日 02:00 时,冷云区中心为 $-73\text{ }^{\circ}\text{C}$,到 02:30(图 3d),冷云面积基本维持不变,但中心最大值稍有减弱,系统正处于成熟阶段。雨强明显减弱,随着 MCC 东移阵雨区东移,最大降雨区依然出现在 MCC 冷云中心第二、三象限,1 小时的站点最大降雨量降到 25.4 mm,在 $<-52\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冷云区域内,出现区域性雷暴。

3.5 消散阶段

03:00,云团不再发展,在红外云图上圆形云区变得有些松散,03:30 以后 $<-32\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $<-52\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冷云区的面积都在缩小。阵雨区随着冷云的东移而向东移动,雨强及强雷暴天气都开始减弱,除个别站点 1 小时的降雨量 $>20\text{ mm}$ 外,测站 1 小时的降雨量均 $<5\text{ mm}$ 。

05:00 时后云团的温度、面积、形状等各项指标逐渐不满足 MCC 标准,系统东移减弱。

整个 MCC 过程维持时间是 7 h, $<-32\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $<-52\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冷云区的最大面积分别达到了 564000 km^2 、 394000 km^2 ,冷云区形状是标准的椭圆形,离心率

大于 0.7。

从水汽图与红外云图对比分析:本次 MCC 过程中,红外云团的边界与水汽图中白亮区的边界基本重合,这也从另一个角度说明本次过程中湿层较厚,上升运动较强^[9]。

对比 15 日和 16 日两次龙卷过程的红外云图,二者区别在于扎兰屯龙卷过程云系呈椭圆状,尺度相对较小,生命史短,移动速度快,没有达到 MCC 标准。共同之处是龙卷是在云系的发展阶段,在冷云顶后部,第二或第三象限,温度梯度大的区域出现。

4 雷达回波分析

这次 MCC 的发展过程,在齐齐哈尔市北部产生龙卷,使甘南、讷河两县的 10 个村屯遭受龙卷袭击。16 日 21:50 时和 23:01 时分别有二个龙卷生成,二个龙卷的发生地相距 50 km,时间间隔 1 小时 10 分钟。当时雷达观测只分析出了强降水和冰雹,在灾情报告中发现有龙卷产生,对其雷达资料进行分析,发现了一些龙卷的回波特征,在分析中发现龙卷产生在 MCC 的后部边界处。下面分别对两个龙卷的雷达回波特征进行分析。

4.1 16 日 21:50 时发生在甘南东北部的龙卷

16 日 21:33 时在测站 120~150 km 处有一强对流云团(图 4),其中心回波强度大于 50 dBz,云体的发展高度较高,由于该云团处在雷达观测的边缘范围,受其地球曲率、衰减等影响有些失真,但是可以看出其结构紧密,强度梯度较大,从低层到高层回波的强度范围基本不变。

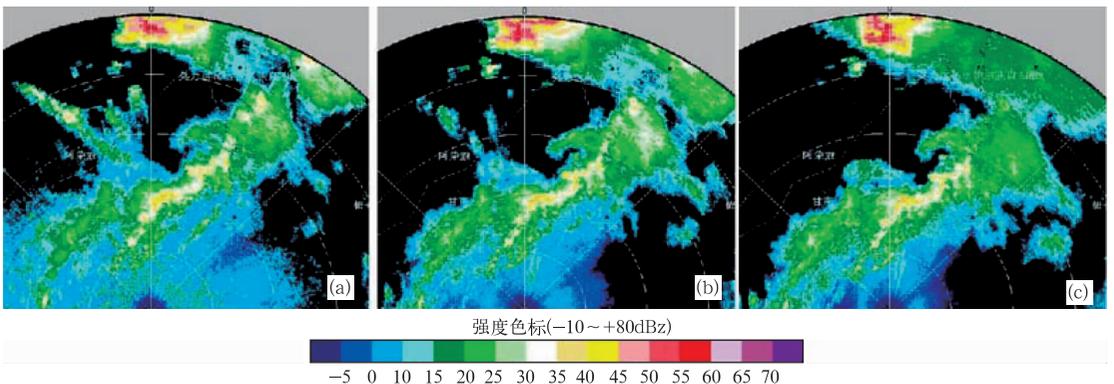


图 4 2005 年 7 月 16 日 21:33 时 0.5° 、 1.5° 、 2.4° 仰角强对流云团特征

Fig. 4 The echoes of the reflectivity at elevation angles of 0.5° , 1.5° and 2.4° at 21:33 BT 16 July 2005

从 21:38 时,RHI 剖面图上(图 5)可见,回波的高度 17 km,其强风暴的特征明显。其回波的演变移动

也较快,由图 6 可见,仅 11 分钟的时间回波结构发展得更紧密集中,强中心的移速约在 $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

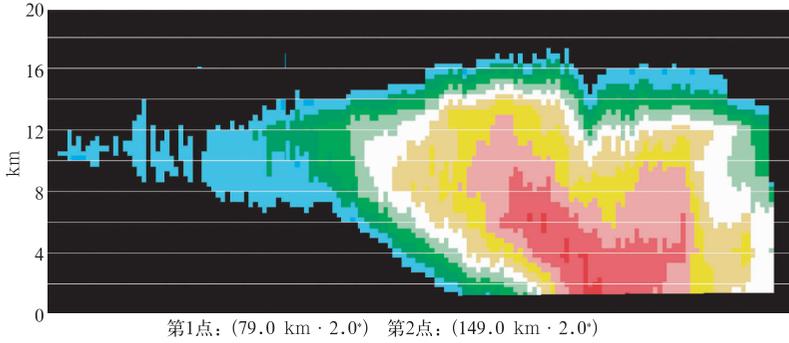


图 5 2005 年 7 月 16 日 21:38 时强对流云团 RHI 剖面图
Fig. 5 The vertical cross section of RHI of strong convective cloud at 21:38 BT 16 July 2005

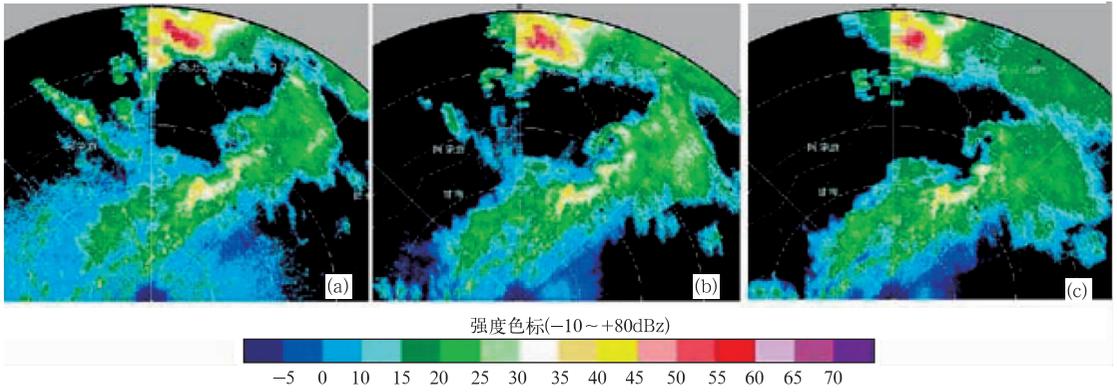


图 6 2005 年 7 月 16 日 21:44 时 0.5° 、 1.5° 、 2.4° 不同仰角强对流云团特征
Fig. 6 The echoes of the reflectivity at elevation angles of 0.5° , 1.5° and 2.4° at 21:44 BT 16 July 2005

21:49 时,强回波面积有些变小,但强中心的红色区域边缘很规则。速度分布图上(图 7a),在强中

心处由低层到高层均可分析出中气旋,中气旋是与强对流风暴的上升气流和后侧下沉气流相联系的小

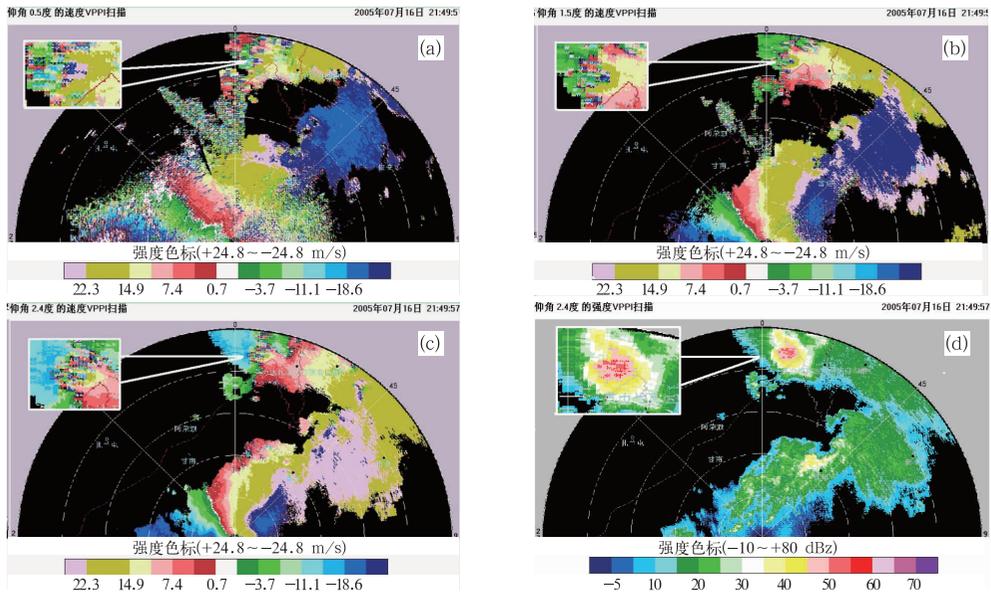


图 7 2005 年 7 月 16 日 21:49 时强对流单体 (a)、(b)、(c) 为速度图,(d) 强度图
Fig. 7 The echoes of the strong convective cloud at 21:49 BT 16 July 2005
(a,b,c,velocities; d: reflectivity)

尺度涡旋^[10],龙卷发生在形成中气旋的位置。

这个龙卷的发生与发展结构特征都是比较典型的,但由于突发性强,尺度小,当时观测并没有认识到,只是事后与实况相联系仔细分析,才认识到这种典型龙卷回波特征和结构。

4.2 16日 23:01 时发生在讷河的龙卷

从回波演变分析,21:50 时的龙卷发生后,其云体减弱后向东南方向移动,在移动过程中又一次加强,在 23:01 出现了第二个龙卷。两个龙卷的

生时间间隔为 1 小时 10 分钟。在 22:30 时的回波图上可见,云体已经减弱,50 dBz 的回波松散分布,22:43 时在仰角 2.4° 的高度层上回波减弱明显,强回波的高度下降。

在 22:49 时(图 8a)和 22:54 时(图 8b)的速度分布图上分析可见,在强回波处有一个中尺度气旋存在。回波强度、结构都远不如 21:50 的龙卷回波强,此时的龙卷回波特征不明显,强回波的分布较前一次稍弱些。

23:00 时强度回波图和速度分布图上(图 9),中

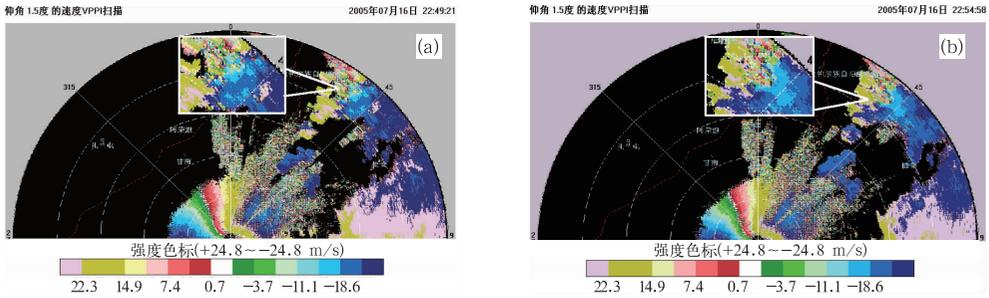


图 8 2005 年 7 月 16 日 22:49(a)和 22:54(b)速度图
Fig. 8 The velocities at 1.5° elevation angle at 22:49 BT (a) and 22:54 BT (b) 16 July 2005

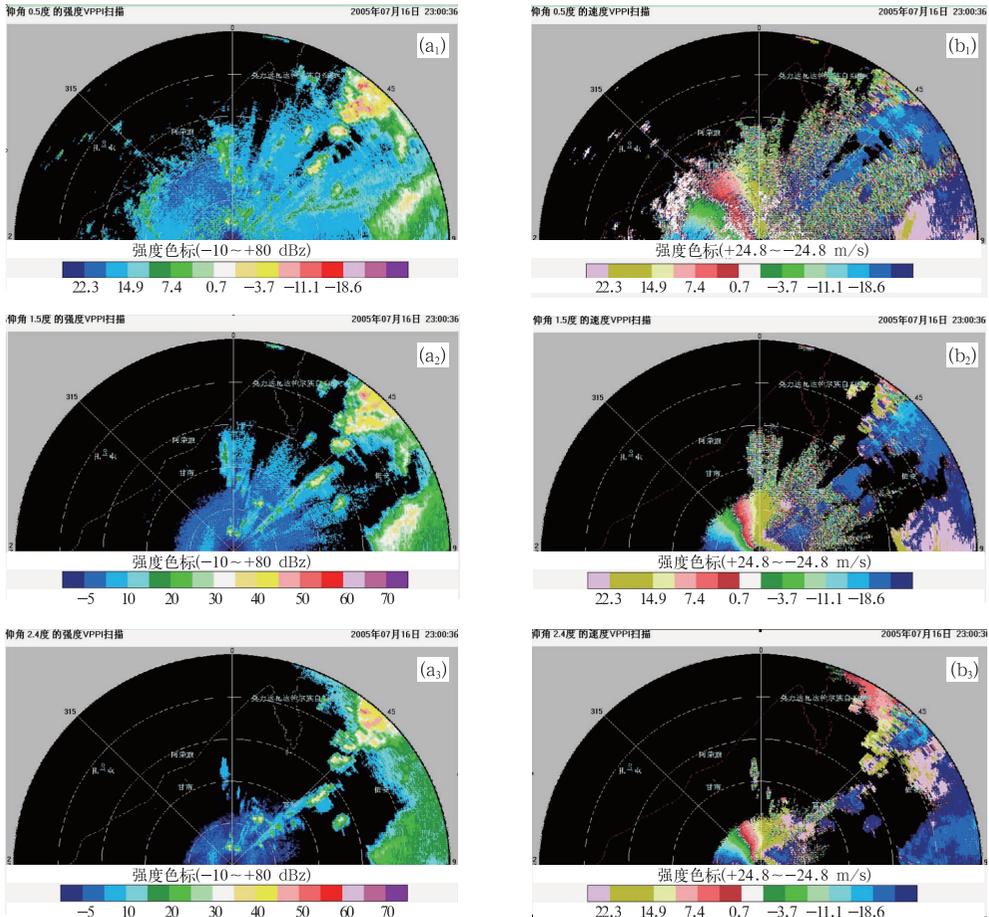


图 9 2005 年 7 月 16 日 23:00 不同仰角强度(a₁、a₂、a₃)、速度(b₁、b₂、b₃)图
Fig. 9 The effectivity (a₁, a₂, a₃) and velocities (b₁, b₂, b₃) at elevation angles 0.5°, 1.5° and 2.4° at 23:00 BT 16 July 2005

气旋明显,但尺度很小。若不是此处产生龙卷,很难注意到这种微小的变化。23:01 时此处发生了龙卷,在回波图上虽然强度不如第一龙卷的特征强度

明显,但在地面发生的龙卷强度是一致的。在回波的高度上也不如上一次龙卷的特征明显(图 10)。

雷达探测表明,在地面龙卷出现前,中气旋就已

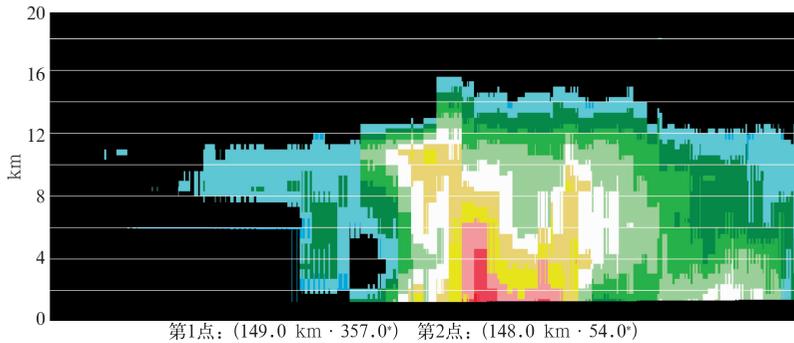


图 10 2005 年 7 月 16 日 21:49 时 RHI 图

Fig. 10 The vertical cross section of RHI at 21:49 BT 16 July 2005

存在,但我们在分析时往往很难能分析出这种小尺度的系统。由于龙卷本身通常比雷达的有效照射体积小,因此利用雷达反射率因子不能准确识别它。但是从这 2 个龙卷的发生发展过程中,也可以找出一些它们的基本特征。

5 对比分析

从天气形势、物理量场、雷达回波特征上将本次 MCC 与低纬度 MCC 及同纬度非 MCC 强降雨过程进行对比分析,可以看到本次 MCC 与它们既有共性,又有其自身的特点。

(1) 在天气形势上,本次 MCC 属于本地非 MCC 强降水天气形势的一个基本类型:不稳定小槽东移发展,分别有高低空的急流与小槽相配合,槽前是大片的大气不稳定层结,蓄积了大量的不稳定能量。特别需要注意的是地形在本次 MCC 过程中起到了非常重要的作用:在卫星云图(图 3)中,有 A、B 两个云团,处于类似的环境场下,但 B 云团后期减

弱,而 A 云团则发展,主要是地形的作用:A 云团的移动路径在大兴安岭的背风坡,在此处有定常的低空背风坡槽产生正涡度^[11],所以系统在此处发展,而 B 云团远离山脉、移动路径是在平原,所以,B 云团后期消散。同样小槽东移到大兴安岭的背风坡受地形影响发展加强,不稳定能量得到释放,同时,在山顶附近边界层偏西风的作用下,为空气强迫抬升在边界层的后卷辐散提供了有力的条件^[12]。

(2) 在物理量场上,由表 1 可以看到:水汽通量散度本次 MCC 较非 MCC 强,说明本次 MCC 过程中本地的水汽异常充沛;在散度场上,低层辐合二者相似,但高层的辐散 MCC 远大于非 MCC,辐合层薄而辐散层厚,最强辐散层在 200 hPa,这就使大气产生了非常强的抽吸作用,导致本次 MCC 的上升运动远远大于非 MCC,涡度平流的对比也同样说明了会产生较强的上升运动;从不稳定指数 SI 指数、K 指数上看,MCC 不稳定程度也远远大于非 MCC。因此,MCC 过程中,大气的层结不稳定、动力条件及水汽条件都明显高于非 MCC 的强降雨天气。

表 1 MCC 与非 MCC 的强降雨天气的物理量对比

Table 1 Comparison of the physical quantities between MCC and other storms

物理量/单位	非 MCC	MCC	物理量/单位	非 MCC	MCC
850 hPa 水汽通量/ $g \cdot s^{-1}$	8~24	24	200 hPa 散度场/ $10^{-6} s^{-1}$	<40	70
500 hPa 水汽通量/ $g \cdot s^{-1}$	<6	12	850 hPa 散度场/ $10^{-5} s^{-1}$	-30 左右	-30
850 hPa 水汽通量散度/ $-10^{-4} g \cdot s^{-1} \cdot hPa^{-1} \cdot cm^{-2}$	10~25	30	低层辐合场达到高度	>700 hPa	<700 hPa
700 hPa 涡度/ $10^{-5} s^{-1}$	40 左右	40	最强辐散层	400 hPa	200 hPa
700 hPa 涡度平流/ $10^{-5} s^{-1}$	<10	10	700 hPa θ_{se}/C	<64	66
SI 指数/C	>-3	-6	K 指数/C	20~32	40

注:非 MCC 的物理量取自黑龙江省的强降雨经验指标

(3) 在多普勒雷达回波特征上:MCC 引起的强降水、冰雹、龙卷主要发生在中气旋中,而非 MCC 引起的较强降水有的是在近距离存在逆风区时^[13];有的是低层零速度线长时间呈“S”型,高层呈反“S”型,这表明长时间的低层暖平流把水汽输送到降水区,形成湿中心,高层冷平流的出现增大了大气层结不稳定性,利于对流发展而产生强降水^[14]。还有的是暖平流和辐合运动相结合的复合风场上,即当低层的多普勒速度回波出现暖平流和辐合运动相结合的复合风场特征时,表现为负速度区面积大于正速度区面积,对应降水增强且维持,当低层的多普勒速度回波出现暖平流和辐散运动相结合的复合风场特征时,表现为负速度区面积小于正速度区面积,相应降水减弱或停止^[15]。

6 结 论

(1) 高纬度发生的 MCC,多普勒雷达回波速度场上有明显中气旋,在雷达 RHI 强度剖面图上,回波顶高大于 15 km,回波移动速度较快,具有强风暴特征,龙卷发生在 MCC 的发展阶段。

(2) 高纬度的 MCC 是全球 MCC 的一个组成部分,具有 MCC 的典型特征:主要出现在夜间,山脉的背风坡,有高低空的急流相配合,暴雨区主要出现在 MCC 冷云中心的右后方、但生命史较低纬度地区的 MCC 平均生命史短。

(3) 高纬度的 MCC 与同纬度非 MCC 强降雨过程在天气形势上没有太大的区别,但是分析物理量,二者有显著的差异,主要体现在水汽条件和动力因子上 MCC 要求更为苛刻。

(4) 地形在高纬度 MCC 的形成过程中起到很重要的作用,相同的背景条件下,在山脉的背风坡系统明显加强。

(5) 在 MCC 的任何位置都可能出现阵雨,雨强与冷云顶的发展速度有关,最大雨强和龙卷出现在

MCC 发展最迅速的阶段,位置则在冷云中心附近的第二、三象限,即多普勒雷达速度场中气旋所在处。

(6) 雷暴主要集中在 MCC 发展最强盛的时段内,出现在冷云中心附近和回波发展最旺盛阶段。

参考文献

- [1] Maddox R A. Mesoscale convective complexes. Bull Amer Meteor Soc[J]. 1980, 61:1374-1387.
- [2] Bradley F S, John A A. Multiscale analysis of a mature mesoscale convective complex [J]. Monthly Weather Review, 1993, 121: 103-132.
- [3] Maddox R A. Large-scale meteorological conditions associated with midlatitude meso-scale convective complexes[J]. Monthly Weather Review, 1983, 111: 1475-1493.
- [4] Laing A G, Fritsch J M. Mesoscale convective complexes in Africa [J]. Monthly Weather Review, 1993, 121: 2254-2263.
- [5] 康凤琴,肖稳安,顾松山. 中国大陆中尺度对流复合体的环境场演变特征[J]. 南京气象学院学报, 1999, 22(4): 720-724.
- [6] 吕艳彬,郑永光,李亚萍,等. 华北平原中尺度对流复合体发生的环境及条件[J]. 应用气象学报, 2002, 13(4): 406-412.
- [7] 覃丹宇,江吉喜,方宗义,等. MCC 和一般暴雨云团发生发展的物理条件差异[J]. 应用气象学报, 2004, 15(5): 590-600.
- [8] 杨本湘,陶祖钰. 青藏高原东南部 MCC 的地域特点分析[J]. 气象学报, 2005, 63(2): 236-242.
- [9] 杨露华,赵明. 水汽图像在短时天气预报和分析中的应用[J]. 大气科学研究与应用, 2001, 2: 46-51.
- [10] 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. 314.
- [11] 陈渭民. 卫星气象学 [M]. 北京:气象出版社, 2003: 370-374.
- [12] 张庆红,刘彦,张玉玲. 中尺度对流复合体的诊断分析[J]. 自然科学进展, 1998, 8(3): 213-219
- [13] 段丽,卞素芬,俞小鼎. 用 SA 雷达产品对京西三次局地暴雨落区形成的精细分析[J]. 气象, 2009, 35(3): 21-28.
- [14] 蔡晓云,焦热光,卞素芬,等. 多普勒速度图暴雨判据和短时预报工具研究[J]. 气象, 2001, 27(7): 14.
- [15] 廖玉芳,唐小新,陈媛,等. 常德市 2002 年 5 月 13 日大暴雨成因解析[J]. 气象, 2009, 35(5): 42-48.
- [16] 王彦,吕江津,周海光,等. 暴雨的多普勒天气雷达速度辐合风场特征[J]. 气象, 2008, 34(3): 63-68.