施春华,李慧,郑彬等.基于 Cloudsat 探测的一次非典型东北冷涡结构及其降水.地球物理学报,2013,56(8):2594-2602,doi: 10.6038/cjg20130809.

Shi C H, Li H, Zheng B, et al. An atypical cold vortex structure and its precipitation over Northeast China based on Cloudsat detection. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2013, 56(8):2594-2602, doi:10.6038/cjg20130809.

基于 Cloudsat 探测的一次非典型 东北冷涡结构及其降水

施春华¹,李 慧²,郑 彬³,郭 栋¹

1 南京信息工程大学大气科学学院,气象灾害教育部重点实验室,南京 210044

2 南京信息工程大学语言文化学院,南京 210044

3 中国气象局广州热带海洋气象研究所,热带季风重点开放实验室,广州 510080

摘 要 采用 ERA-Interim 气象分析资料、云顶亮温 TBB 资料、Cloudsat 云雷达资料、降雨量资料等,对 2009 年 6 月 10 日至 12 日我国东北地区的一次冷涡天气过程进行研究,重现了该冷涡的精细三维结构和演变过程.分析表 明冷涡发生前,东北亚地区处于南北双槽结构之间,随后北槽向赤道发展切断后形成东北冷涡.南槽背景的冷涡热 力结构特殊,强冷空气集中在涡内西北象限,暖湿空气在东北象限,南部为相对中性空气,该配置导致北部暖锋强 盛,西部冷锋仅在发展初期较强,冷涡过程没有经典挪威学派的气旋锢囚锋出现.冷涡发展初期,狭长冷舌快速入 侵南下,冷舌前冷锋对流降水较强,冷舌后部左侧还有暖锋降水;冷涡发展后期,冷锋减弱,冷锋上的高层云停止降 水,系统内主要为冷涡北部的暖锋雨层云降水;冷涡成熟后,中心辐合加强,有较强的对流性降水.

关键词 东北冷涡,切断低压,对流降水,锋面降水,南槽

doi:10.6038/cjg20130809

中图分类号 P407

收稿日期 2012-10-25,2013-06-30 收修定稿

An atypical cold vortex structure and its precipitation over Northeast China based on Cloudsat detection

SHI Chun-Hua¹, LI Hui², ZHENG Bin³, GUO Dong¹

1 Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, School of Atmospheric Science, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China

2 School of Languages and Cultures, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China

3 Key Open Laboratory for Tropical Monsoon, Guangzhou Institute of Tropical and Marine Meteorology,

 $China\ Meteorological\ Administration\ ,\ Guangzhou\ 510080\ ,\ China$

Abstract ERA-Interim reanalysis meteorological data, black body temperature data, Cloudsat cloud profiling radar data and rainfall data are comprehensively utilized to study the weather process of a cold vortex over Northeast China and reproduce its three-dimensional structure and evolution from June 10 to June 12, 2009. The result shows that Northeast Asia lay between the northern trough and southern trough before that weather system, then the northern trough developed equatorward and was cut off to form a cold vortex over Northeast China. The cold vortex with southern trough background has a special structure. At the early stage of

基金项目 国家重点基础研究发展计划(2010CB428600),国家自然科学基金(41040038、40705015)和江苏高校优势学科建设工程资助项目 (PAPD)资助.

作者简介 施春华,男,1978年生,副教授,主要从事大气遥感资料的应用研究. E-mail:shich1997@gmail.com

development, strong cold air concentrated in the northwest quadrant, and warm and moist air was in the northeast quadrant, the relatively neutral air lay in the south of the cold vortex, which resulted in the strong northern warm front and the weak western cold front. The narrow cold tongue rapidly intruded southward and convective precipitation occurred ahead of the cold front. At the late stage of development, precipitation mainly occurred on warm front. When the cold vortex matured, convergence was strengthened and the shallow convective precipitation occurred

at the center. No occluded front appeared in all the stages of the cold vortex.

Keywords Cold vortex over Northeast China, Cutoff low, Convective precipitation, Frontal precipitation, Southern trough

1 引 言

东北冷涡是指在 500 hPa 天气图上,115°E-145°E,35°N-60°N 范围内出现闭合等高线,并有冷 中心或冷槽相配合,持续3天及以上的低压天气尺 度系统^[1]. Nieto 等^[2]和 Reboita 等^[3]分别研究了北 半球和南半球切断低压的气候特征,指出我国东北 地区是全球切断低压的高发区之一.东北地区的切 断低压由于动力、热力学上的特点,常符合东北冷涡 的定义.近年来,学者们从多方面研究了东北冷涡的 发展特点、冷涡降水特征等[4-6].对于东北冷涡自身 发展中的动力、热力结构,也有相当研究[7-9],但同步 结合冷涡云系和降水的精细三维结构分析,由于缺 乏大范围高分辨率探测资料,比较少见.齐彦斌 等[10]利用飞机穿云观测资料对一次东北冷涡对流 云带的宏微物理结构进行了探测,但类似研究仅限 于特定时刻观测,可用观测资料有限. Posselt 等^[11] 通过分析一次北美温带气旋过程,认为新的卫星云 雷达资料 Cloudsat 的出现,能改善温带气旋结构的 认识. 钟水新^[12]尝试把 Cloudsat 云廓线雷达的卫星 资料应用到东北冷涡的结构分析,观测到了一次类 似经典温带气旋(Norwegian Cyclone Model^[13])的 冷涡结构及其演变.由于冷涡本身的形态变化多端, 一些非经典结构的冷涡常造成天气预报上的困难. 如 Singleton 等^[14]分析了南非一次强切断低压与低 空急流作用引起破纪录的降水灾害.因此,针对某些 区域性背景环流的非经典结构冷涡的研究,对提高 冷涡天气灾害预测水平有积极意义.

2009 年 6 月 10 日至 12 日,我国东北地区经历 了一次冷涡天气过程,这次冷涡具有特殊的天气形 势,发展演变后冷涡本身的三维结构和降水形态也 与经典冷涡有较大的差异.本文将采用多种常规和 遥感资料,对本次天气过程进行全方位的分析,弄清

本次冷涡的三维精细结构,揭示冷涡内不同位置降 水的属性和强度.

2 资料介绍

ERA-Interim 资料是 ECMWF 一种新的全球 分析资料,文中采用水平分辨率 0.75°×0.75°,垂直 方向 37 个气压层(从 1000~1 hPa)的逐 6 小时资 料.该资料相对 ERA40 资料有较大改进^[15].做垂直 剖面时,采用距离反比法插值到轨道剖面.

云顶黑体温度(Black Body Temperature,简称 TBB)能很好地反映各种尺度的对流活动,本文所使 用的由国家卫星气象中心提供的 FY2C 逐时 TBB 产品,分辨率是 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$.

中国自动站与 CMORPH 降水产品融合的逐时 降水量数据集,由中国气象科学数据共享服务网提 供,基于全国 3 万余个自动观测站(包括国家级自动 站和区域自动站)逐小时降水量和 CMORPH 卫星 反演降水产品相互融合的中国区域逐小时、0.1°× 0.1°分辨率的降水量融合产品.地理范围:70°E— 140°E;15°N—59°N.

2006 年发射的 Cloudsat 卫星,搭载了唯一有效 载荷是云剖面雷达 CPR(Cloud Profile Radar),该 雷达为 94 GHz 的毫米波(3 mm)雷达,它的灵敏度 是标准天气雷达的 1000 倍^[16]. Cloudsat 卫星主要 提供两类数据,标准数据和辅助数据,标准数据按反 演程度分为两个等级,初级产品是通过卫星搭载的 云雷达直接得到的数据产品,二级产品结合初级产 品其它卫星产品反演得到的云参数资料,包括雷达 后向散射剖面、云的几何剖面、云分类、云水含量、云 光学路径、云光学厚度、长短波辐射通量及本文用到 的云液态水含量及冰水含量资料.目前,该资料在天 气分析和云观测分析中已经得到广泛使用^[11-12,17-18]. 本文主要用到了 2B-GEOPROF,2B-CWC-RO,2B- CLDCLASS, ECMWF-AUX 资料.

由于本文使用了多种资料,为了统一资料时间, 文中给出的时间均为国际标准时.降水是指该时刻 之前一段时间内的降水总量.

3 研究结果

3.1 环流形势分析——南槽背景下的北槽切断

本次冷涡天气与中纬度大气长波异常调整相联 系的.500 hPa 形势演变图(图 1)表明,该天气过程 中,500 hPa 的经向流场异常发展.9日 00 时(图 1a),贝加尔湖以东南地区为一倒"Ω"位势场所控 制,其南端底部 5720 位势米(gpm)的浅槽,位于华 北上空.贝加尔湖北侧的高纬度系统在东移过程,受 东、西方向鄂霍次克海高压和乌拉尔高压的阻挡作 用,向赤道异常发展,形成北槽.10日 00 时北槽快 速向南发展后切断,形成闭合低压(图 1b)并逐渐加 强东移至我国东北地区.该低压中心在南槽后部北 风气流作用下快速南下与南槽合并加强,11 日 00 时(图 1c)开始,冷涡逐渐成熟,移动减慢.由于冷涡





的发展和成熟阶段是其暴雨的多发段,10日开始 处于发展中的冷涡,主体已位于东北上空,其锋面降 水成为影响本地的关键.

3.2 冷涡各阶段的三维结构和云系、降水特征

从图 1 发现,10 日开始,冷涡逐步形成并影响 我国东北地区. 根据冷涡的定义^[1],把 10—11 日 500 hPa 位势高度场的演变趋势作为划分冷涡不同 阶段的依据,如果 500 hPa 低位势中心有减弱趋势, 定义为冷涡发展增强阶段;反之为冷涡消亡减弱阶 段;若 500 hPa 低位势中心较前后时刻增强减弱趋 势不明显,则认为是冷涡成熟维持阶段. 考虑到本次 冷涡过程的特点,主要从冷涡发展阶段的初期、冷涡 发展阶段的后期(即由发展到成熟的过渡阶段)、成 熟阶段来分析.

3.2.1 冷涡发展初期,冷舌入侵与冷锋降水

根据卫星观测资料的匹配和阶段区分标准,选 取 2009 年 6 月 10 日 06 时作为发展初期的代表时 期.从本时期图 2a 的 500 hPa 高度场看,在渤海湾 地区原来存在一个南槽,而高纬的北槽异常发展后 已经切断,中心 5440 gpm,抵达内蒙古东部,槽的后 部对应了冷中心,温度场落后于高度场.

图 2b,850 hPa 图上,低压中心南北走向,东西 两侧的风速较大.由于受前期南槽下低空南风的影 响,低压东部外围为暖湿空气带.低压西北内部在强 北风的温度平流作用下,细长冷舌从北部进入气旋, Cloudsat 云雷达探测到了该冷舌区的垂直剖面.低 压南部,是相对中性的空气.

图 2e 的 TBB 资料显示,Cloudsat 轨迹经过处, 黑体亮温多在-20 ℃至-32 ℃之间,说明有云系发 展,并且在图 2b 冷舌前方右侧,有 TBB 小于-32 ℃的 温带锋面对流云带.

由于图 2a 中北侧的切断冷低压在南槽后北风 的引导而快速南下,在地面高速推进的冷锋前,图 2c Cloudsat 云雷达反射率剖面和假相当位温剖面 中,低层锋面(假相当位温线密集带)陡立,锋前云系 表现为急性冷锋的对流云系特点,比 NCM 挪威气 旋模型的冷锋云系更为迅猛^[13].44°N—46°N 附近 低层冷锋前的对流云柱得到发展,主要为深对流云 和雨层云,在结构上体现为多个相对孤立的回波系 统,反射率达到 10 dBz 的云柱能发展到 6 km,上方 0 dBz 的回波带一直延伸到 9 km 以上高度.该冷锋 随高度变化较大,低层等位温线的陡立主要在 4 km 以下,4 km 以上的冷锋坡度要缓得多.47°N 以北, 厚约 2 km 的高层云带从对流云系统的云顶向北延 伸,漂浮在高空 6 km 高度的平缓的锋面上.此外, 在冷锋对流云系的前方,低层的假相当位温表现为 对流不稳定,还有若干更小尺度的积云对流在发展.

图 2d 同时给出了 Cloudsat 探测的云的水凝物 的含量,在冷锋对流云系及高层云漂浮带中,分别分 布着平均浓度为 200 和 100 mg/m³ 的冰晶.相对较 低的冰晶含量,与细长结构冷舌的移向有关,此时冷 锋纵向移动,锋前水凝物很容易滑移到相对缓慢的 冷舌侧边界锋面上,但在横移冷锋前,该对流云系要 强得多,如图 2b 的 42°N 附近卫星轨道右侧的冷舌 推进的冷锋对流会更强,图 2e 也反映了该区一32 ℃的 TBB 范围较大.在图 2d 卫星轨道探测的冷锋前方 的更小尺度对流云团中,除了冰晶外,还分布有较多 的液态水.卫星轨道的地表有效降水位置,主要在地 面冷锋前的云系下,尤其是急性冷锋对流云系下方.

图 2f 的自动站雨量计的分析资料给出了 2 小时(前后各 1 小时)累积降水量,发现在轨道地面冷锋的前部及右侧的冷锋区,有 7 mm/2 h 的降水区,集中在辽宁省(从辽东半岛向北延伸).冷锋的后部,图中黑龙江北部的降水主要发生在冷舌左翼的暖区 交界面上,是暖锋降水,本次云雷达轨道剖面并没有捕捉到该云系.图中其余部位的雨带,是冷涡影响下东亚季风雨带的延伸.

总之,本次冷涡形成初期,是由冷舌快速推进形 成急性冷锋,陡立锋面前的对流云系产生了降水.地 面测站发现,9日12时一10日12时,嫩江、富裕、齐 齐哈尔,从北向南依次出现50mm左右的日降水. 3.2.2 冷涡发展后期,暖锋降水

选取 2009 年 6 月 10 日 18 时作为发展后期的 代表时期分析. 冷涡发展到本阶段,图 3a 500 hPa 低压切断后位势高度进一步降低到 5400 gpm,低压 长轴在南移中随气旋逆时针旋转,冷空气脱离低槽, 主体位于低压中心及偏西北地区. 850 hPa 上(图 3b),冷涡的冷中心处于低压的西北象限,东半部为 暖空气,冷中心东界北部的暖平流显著,冷中心南侧 和西南侧边界则为冷平流.

Cloudsat 云雷达卫星扫过冷中心的北部,从轨 道剖面的雷达反射率与假相当位温剖面图可以看出 (图 3c),此时低涡的近地面靠中心部位存在低温结 构,比两侧低 10 ℃左右,8 km 以上是暖中心,对流 层顶在此下凹,图 3d 的等温线表明该温度结构基本 对称.地面冷中心的北侧是暖锋,南侧是冷锋.暖锋 的锋面坡度较缓,其上方有连绵 500 多公里的包含 众多弱对流形成的雨层云,比NCM挪威气旋模型



图 2 2009 年 6 月 10 日 06 时,(a)500 hPa 温度(阴影,间隔 1 K),位势高度(蓝线,单位:gpm)和风矢量;(b)同(a),但为 850 hPa;(c)Cloudsat 轨道垂直剖面:云雷达反射率(彩色阴影,单位:dBz)和假相当位温(黑实线,单位:K);(d)同(c),但 为冰水含量(彩色阴影,单位:mg/m³),液水含量(黑点区表示大于 50 mg/m³),温度(黑实线,单位:℃),雨顶高度(红叉), 地表降水位置(蓝叉);(e)FY2C 的 TBB(绿线、蓝线和红线分别代表-20, -32, -50 ℃);(f)自动站与 CMORPH 融合 的 2小时(前后各1小时)累积降水量(绿线、蓝线、桔色线、红线和黑线分别代表1,3,5,7,10 mm),品红实线为Cloudsat轨迹. Fig. 2 At approximately 0600 UTC 10 Jun 2009, (a) 500 hPa isotherms (shaded, interval value of 1 K), geopotential height (gpm, blue lines) and wind vector; (b) As in (a), but on 850hPa isobaric surface; (c) Cloudsat observed radar reflectivity (dBz, color shaded), overlaid with ECMWF analyzed equivalent potential temperature (K, solid black lines); (d) As in (c), but for ice water content (mg/m³, color shaded), liquid water content (greater than 50 mg/m³ marked with black spot), temperature (℃, solid black lines), rain-top height (red cross), surface precipitation position (blue cross); (e) TBB from FY2C (green, blue and red line denoting -20, -32, -50 ℃ respectively); (f) Two-hour rainfall from integration of automatic station rain gauges and CMORPH (green, blue, orange, red and black line denoting 1, 3, 5, 7, 10 mm respectively). Magenta solid line is Cloudsat ground track.

的 300 km 暖锋降水云系更宽广^[13],高度能达到 9 km,其中主体 10 dBz 回波的云层从地面发展到 6 km.云系结构表现为暖锋特征^[11,19-20],与传统的

暖锋对流云结构有所差异,表现为多回波系统的雨 层云.由于图 2a 中原南槽前南风的引导,冷涡东侧 的暖空气能到达更北的位置,相比NCM挪威气旋



图 3 同图 2,但为 2009 年 6 月 10 日 18 时 Fig. 3 As in Fig. 2, but at approximately 1800 UTC 10 Jun 2009

模型,地面暖锋主要处于地面气旋的北部(图 3b), 而非中部^[13].

冷锋云系分布相对孤立,水平覆盖范围较小,且 相对前一阶段大为减弱,冷锋的迎风坡上,45°N附 近有一列飘在半空的高层云,从3km到6km,厚约 3km,回波强度在10dBz.在42°N附近,低层的假 相当位温表现为对流不稳定,有若干个发展相对强 烈的积云对流系统,高度达到8km,回波强度达 20dBz.在冷暖锋之间,冷中心部位,则是无云的晴 空区.图3eTBB图中,沿轨道温度低于一20℃的三个 区域,分别对应了以上的三个云系.

从图 3d 的水凝物含量来看,冷锋云系内,尤其 是前方的对流系统中,冰水含量可达 400 mg/m³ 以 上,且有较多的过冷水分布;而暖锋云系的冰水含量 小得多,最大接近 200 mg/m³,没有过冷水分布.从 云雷达给的地表降水分布来看,集中在暖锋的雨层 云和冷锋前的积云中,而冷锋上的高层云基本无降 水.图 3f 的地面自动站 2 小时降水监测证实了暖锋 雨带,黑龙江省内的降水带,就是该暖锋云系降水. 图中外侧日本上空的雨带,是冷涡影响下东亚季风 雨带的延伸.

3.2.3 冷涡成熟阶段,中心辐合抬升,对流降水

冷涡成熟阶段,11 日 18 时低涡中心 500 hPa 位势高度维持在 5400 gpm(图 4a),低涡中心移动到 我国吉林和朝鲜边境;强风速中心位于低涡南部,冷 涡后部冷空气不再侵入,冷中心与低涡中心重合.



图 4 2009 年 6 月 11 日 18 时,(a)500 hPa 温度(阴影,间隔 1 K),位势高度(蓝线,单位:gpm),风矢量和 Cloudsat 轨迹 (品红直线);(b)沿Cloudsat轨迹的垂直剖面,垂直速度(阴影,单位 Pa/s),等位温线(蓝色,间隔 2 K),散度(红色曲线, -2×10⁻⁵ s⁻¹到-8×10⁻⁵ s⁻¹);(c-f)同图 2(c-f),但为 2009 年 6 月 11 日 18 时

Fig. 4 At approximately 1800 UTC 11 Jun 2009, (a) 500-hPa isotherms (shaded, interval value of 1K), geopotential height (gpm, blue lines), wind vector and Cloudsat ground track (magenta solid line); (b) Vertical section along Cloudsat track, vertical speed (Pa/s, shaded), isotherms (interval of 2 K, blue line), divergence (red lines for -2×10⁻⁵s⁻¹ to -8×10⁻⁵s⁻¹); (c-f)As in Fig. 2(c-f), but at 1800 UTC 11 Jun 2009

图 4b 沿卫星轨道的垂直剖面,位温资料表明, 冷中心在 350 hPa 以下,其以上为暖中心.此阶段气 旋中心等高线更密集,中心风速加强,在近地面摩擦 辐合加强,41°N 附近的气旋中心,低层散度达-6× 10⁻⁵ s⁻¹,低层的水平辐合促使上升运动加强, 700 hPa附近最大上升速度达-1.1 Pa/s,为对流降 水提供了条件.

TBB 资料(图 4e)显示冷涡中心和外围有被分

割开的小于一30 ℃的云层.从扫过冷涡中心的 Cloudsat轨道剖面看(图 4c),该阶段相对集中的对 流云系主要分布在冷涡中心处,厚度从地面到对流 层顶7 km 处,回波强度在20 dBz 左右,大于前两个 阶段的云系.副热带锋面以南有冷涡外云系,冷涡北 部边远处有高层云和雨层云的多层结构云系.

从云中水凝物的含量分析(图 4d),中心对流云 冰水含量能达到 600 mg/m³,北部多层浅薄层云中, 在零度层以下分布着较多的液态水. Cloudsat 地表 降水分析表明此时冷涡中心的集中降水由对流云团 提供,北部的层云降水相对零星分散. 图 4f 的地表 2 小时降水资料证明了这两类降水的特征,对流区降 水强度在 7 mm/2 h 以上.

图 4c、4d 的位温线和等温线分布表明,该阶段 冷涡中心的中下层依然为冷空气所占据,没有暖舌 结构的 NCM 挪威气旋模型中的锢囚锋^[13].此外, 本次北槽切断的冷涡与南槽叠加后,低层气旋锋面 和高层副热带锋面重合,导致东亚副热带锋面异常 发展,受强大副热带锋面影响,冷涡热力结构不再对 称,中心冷轴随高度北倾.而在仅由北槽自身切断发 展的阶段(图 3c)则是热力对称结构.

4 结论与讨论

综合利用 Cloudsat 卫星云雷达等多种新一代 遥感资料,分析了一次南槽背景的非典型东北冷涡 的精细三维结构及演变特征.本次非典型冷涡的特 殊锋面结构与背景环流有关.

与传统挪威气旋模型的锋面结构相比,由于南 槽前、后的南、北风引导,冷低压初始切断后快速南 下阶段,冷锋偏强;南下稳定后,锋前原南槽内的旧 弱冷空气削弱了冷锋,无锢囚锋结构出现;暖锋的位 置偏北.这直接导致了本次冷涡的非经典降水结构: 发展初期,急性冷锋的深对流降水较强;发展后期, 冷锋降水减弱,北部暖锋降水持续较强;成熟后,中 心摩擦辐合加强诱发对流降水.

由于东北冷涡多变无常,其预报水平相对其它 天气系统较低,难点在于冷涡背景的差异对冷涡锋 面结构影响很大,难以用经典挪威气旋模型简单描 述.通过对更多类型的非典型冷涡结构和演变的研 究和归类,有助于提高对冷涡天气的认识.

致 谢 感谢 NASA, ECMWF, 中国气象科学数据 共享服务网, 国家卫星气象中心提供的数据服务.

参考文献(References)

- [1] 郑秀雅,张延治,白人海.东北暴雨.北京:气象出版社, 1992.
 Zheng X Y, Zhang Y Z, Bai R H. The Rainstorm in Northeast China (in Chinese). Beijing: Meteorological Press, 1992.
- [2] Nieto R, Gimeno L, De La Torre L, et al. Climatological features of cutoff low systems in the Northern Hemisphere. *Journal of Climate*, 2005, 18(16): 3085-3103.

- [3] Reboita M S, Nieto R, Gimeno L, et al. Climatological features of cutoff low systems in the Southern Hemisphere. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2010, 115 (D17), doi: 10.1029/2009JD013251.
- 【4】 朱其文,黄秀娟,刘实. 东北冷涡大型环流演变特征以及系统配置关系的研究. // 东北冷涡研究文集. 沈阳: 辽宁出版社,1997:14-29.
 Zhu Q W, Huang X J, Liu S. The evolution characteristics of large-scale circulation and system configuration relations in cold vortex over Northeast China. // The Study Series of Cold Vortex over Northeast China (in Chinese). Shenyang: Liaoning Press, 1997: 14-29.
- [5] 白人海,孙永罡. 东北冷涡中尺度天气的背景分析. 黑龙江 气象, 1997, (3): 6-8.
 Bai R H, Sun Y G. The background analysis study of mesoscale weather of the cold vortex in northeast China. *Heilongjiang Meteorology* (in Chinese), 1997, (3): 6-8.
- 【6】 张立祥.东北冷涡中尺度对流系统研究[博士论文].南京: 南京信息工程大学,2008.
 Zhang L X. A study on MCS in cold vortex over Northeast China [Ph. D. thesis] (in Chinese). Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2008.
- [7] 陈力强,陈受钧,周小珊等.东北冷涡诱发的一次 MCS 结构 特征数值模拟. 气象学报, 2005, 63(2): 173-183.
 Chen L Q, Chen S J, Zhou X S, et al. A numerical study of the MCS in a cold vortex over northeastern China. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 2005, 63(2): 173-183.
- [8] 陈文选,王俊,刘文. 一次冷涡过程降水的微物理机制分析. 应用气象学报,1999,10(2):190-198.
 Chen W X, Wang J, Liu W. Analysis of the microphysical precipitation mechanism for a cold vortex process. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 1999, 10 (2):190-198.
- [9] 寿亦萱,许健民. "05.6"东北暴雨中尺度对流系统研究 II: MCS动力结构特征的雷达卫星资料分析. 气象学报, 2007, 65(2):171-182.
 Shou Y X, Xu J M. The rainstorm and mesoscale convective systems over northeast China in June 2005 II: a synthetic analysis of MCS's dynamical structure by radar and satellite observations. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 2007, 65(2):171-182.
- [10] 齐彦斌,郭学良,金德镇.一次东北冷涡中对流云带的宏微物理结构探测研究.大气科学,2007,31(4):621-634.
 Qi Y B, Guo X L, Jin D Z. An observational study of macro/microphysical structures of convective rainbands of a cold vortex over Northeast China. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2007, 31(4):621-634.
- [11] Posselt D J, Stephens G L, Miller M. CloudSat: Adding a new dimension to a classical view of extratropical cyclones. *American Meteorological Society*, 2008, 89(5): 598-609.
- [12] 钟水新. 东北冷涡结构特征及其强降水形成机理研究[博士 论文]. 北京: 中国气象科学研究院, 2011.

Zhong S X. Structural features of cold vortex and its formation mechanism of heavy rainfall over Northeast China [Ph. D. thesis](in Chinese). Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2011.

- Bjerknes J, Solberg H. Life cycle of cyclones and the polar front theory of atmospheric circulation. Geofysiske publikationer. GrÃ, ndahl & sÃ, ns boktrykkeri, 1922, 3(1): 1-18.
- [14] Singleton A T, Reason C J C. A numerical model study of an intense cutoff low pressure system over South Africa. *Monthly Weather Review*, 2007, 135(3): 1128-1150.
- [15] Simmons A, Uppala S, Dee D, et al. ERA-Interim: New ECMWF reanalysis products from 1989 onwards. ECMWF Newsletter No 110, 2007: 25-35.
- [16] Stephens G L, Vane D G, Boain R J, et al. The CloudSat mission and the A-train. Bull. Amer. Meteor. Soc., 2002, 83(12): 1771-1790.
- [17] 周毓荃,赵妹慧. Cloudsat卫星及其在天气和云观测分析中

的应用. 南京气象学院学报,2008,31(5):603-614.

Zhou Y Q, Zhao M H. Cloudsat satellite and its application in weather and cloud observation. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 2008, 31(5): 603-614.

- [18] 陈英英,武文辉,唐仁茂等.利用 Cloudsat 卫星资料分析冻
 雨天气的云结构. 气象,2011,37(6):707-713.
 Chen Y Y, Wu W H, Tang R M, et al. Analysis on the cloud structure of freezing precipitation using Cloudsat satellite data. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 2011, 37(6):707-713.
- [19] Mailier P J, Stephenson D B, Ferro C A T, et al. Serial clustering of extratropical cyclones. Mon. Wea. Rev., 2006, 134(8): 2224-2240.
- [20] Posselt D J, Martin J E. The effect of latent heat release on the evolution of a warm occluded thermal structure. Mon. Wea. Rev., 2004, 132(2): 578-599.

(本文编辑 何 燕)