

东北冷涡引发的局地暴雨数值模拟研究

李丹 王昌双 刘伟

(民航东北地区空中交通管理局气象中心, 辽宁 沈阳 110169)

摘要:根据 CDAS-NCEP/NCAR 再分析资料,应用 Penn State/NCAR 的高分辨率中尺度模式 MM5V3-7,成功模拟出 2005 年 7 月 9—12 日东北冷涡诱发的一次连续雷雨过程,重点分析了 7 月 9 日造成沈阳及周边地区的一次局地暴雨过程,并对其中的一个连续发展的中 β 尺度对流系统的演变、中尺度结构特点进行了研究。结果表明:冷涡总是以水平旋转的中高层的干冷空气堆作为其结构特点。在冷涡的东南侧高空干冷堆的边缘区域,轨迹呈直立状,从行星边界层向上穿越整个对流层,显示出该地区存在强对流。干冷堆的边缘区域下方的低层暖湿输送是冷涡局地强对流发展的关键。局地对流发展时,出现干冷堆的边缘区域的 θ_{se} 上下层接近或者打通现象。

关键词:东北冷涡;连续雷雨;数值模拟

中图分类号:P458.1⁺21.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1673-503X(2009)06-0029-05

1 引言

对东北冷涡及其引发的天气现象一直是气象科技工作者关注和研究的重点,我国对东北冷涡暴雨的研究可追溯到 1950 年^[1]。近年来,东北地区气象工作者在借鉴前辈研究成果的基础上,针对东北冷涡强对流天气的预报问题,开展对东北冷涡诱发中尺度系统的机制及其演变规律的研究,希望通过研究,揭示东北冷涡的内部结构特征及其中尺度系统发生发展的物理机制、东北冷涡中尺度对流系统的结构特征等,提高东北冷涡强对流天气的整体预报水平。2005 年 4 月 6 日在辽宁大部分地区发生的强雷暴天气,是典型的东北冷涡降水过程。有气象工作者曾通过用 WRF 模式和 MM5 模式模拟分析东北冷涡天气系统的结构,模拟雷暴过程中天气系统的变化,讨论比较模拟的结果,揭示出发生强雷暴的天气系统特征,从而为预报强雷暴天气的发生提供参考依据^[2-4]。

东北冷涡作为具有东北地区标志性特点的天气系统,其诱发的局地强对流天气一直是东北航空气象预报业务的重点和难点。由于其尺度小(中 β 或中 γ 尺度)、突发性强,当前的预报技术只能依赖卫星、雷达观测做出临近预报,要做出有意义的更长时效的预报还缺乏相应的理论研究。受观测资料分辨率及研究工具的限制,目前对东北冷涡的气候特征、天气尺度特征、中尺度系统发生发展的天气尺度背景及诊断分析等方面研究较多^[5,7-8]。大量研究表明,MM5 模式对东北冷涡产生的暴雨强对流天气具有一定的模拟效果^[6-9]。低层暖湿条件是冷涡强对

流预报的关键,强大的冷涡由于冷性层结深厚难以诱发强的对流性天气^[10]。

切断低压(cut-off low,简称 COLs)属于冷低压的一种普通类型。根据美国气象学会(American Meteorological Society,简称 AMS)的定义,所谓 COLs,是从西风带中发展并向赤道方向位移出来的低压系统,从对流层中层到高层都有表现。1947 年 COLs 首次由芝加哥学派提出,Heish 直接称 COLs 为冷涡(AMS 大气科学词典)。冷涡与 COLs 的关系就像欧洲国家的冷空气池(cold air pool)与 COLs 的关系:冷空气池强调是一个低压,并且这个低压来源于较冷的空气堆;或者,在有些例子中,冷空气池可从近地面层的冷低压发展而来,并能在高空持续数天,这样的例子可占 9%(1974—1983,西班牙地区)。COLs 肯定是冷空气池,但冷空气池不一定是 COLs。近二三十年,COLs 被认为是对流层和平流层之间物质传输的重要通道^[11-15],对于 COLs 高层大气的研究是一个热点。

本文应用非静力模式(MM5V3-7)对 2005 年 7 月 9—12 日东北冷涡诱发的沈阳地区局地强雷雨进行数值模拟,成功模拟出中 β 尺度对流系统,并分析了中 β 尺度系统演变过程和结构特点,为民航气象业务预报提供了相关的理论依据,从而为航空安全提供保障。

2 资料与方法

模拟选用方案:双向网格嵌套的正定平流方案;Reisner 多相显式水汽方案计算可分辨尺度降水,其中包含水汽、云水、雨水、云冰、雪水、雹和冰晶数的

预报方程;Grell 积云参数化方案计算次网格尺度降水^[16];模式的预备场为美国国家环境预报中心(NCEP)每6 h 1次的CDAS-NCEP/NCAR再分析资料。海温采用NCEP精度为一个经纬度的Reynolds海水表面温度资料。

边界层采用了MRF高分辨率行星边界层方案计算行星边界层的感热、潜热、动量和湍流混合的垂直通量;其他物理过程包括多层土壤模式;包含长波及短波的云辐射方案。模拟使用了MM5的两重嵌套网格,水平范围以40°N,115.0°E为中心,网格(粗网D01)81×81,格距为45 km,细网格(D02)91×91格距为15 km,垂直方向分为33层。两重网格的模拟起始时间粗、细网格均从2005年7月8日0000世界协调时(UTC)开始,积分120 h至7月13日0000UTC为止。

3 典型东北冷涡诱发暴雨过程的数值模拟

3.1 天气实况

2005年上半年发生的暴雪、大雾、大风、低温、短时雷雨大风和冰雹等强对流天气数十次,其中因冷涡天气系统的频繁出现而产生的强对流天气之多,在近年来的气象史上是不多见的。受东北冷涡影响,2005年7月9—12日东北三省连续4 d出现强对流天气,发生时间多集中在早晨到傍晚,发生地点基本在沈阳附近。其中7月9日强对流过程最强,沈阳桃仙机场的降水时段为04:54—12:45,持续7 h 11 min,过程雨量为51.2 mm,达到暴雨标准。其中,在05:55—07:15这1 h 20 min时间段雷雨最强。本次过程的特点是降水尺度小,雨量集中,强降水历时短,强度大。7月10日中午至傍晚沈阳桃仙机场又发生雷雨天气,降水量为9.3 mm。7月11—12日连续两天为雷暴天气。这种在同一地点附近连续4 d出现强对流天气是非常典型的东北冷涡特征。

本次天气过程冷涡个体发展完整,影响面积大,其主要降水影响区域并不在东北区域,而是从山东半岛南部(包括秦皇岛地区)经长江流域北部,一直延伸到西南地区的东北冷空气与南方暖空气交汇的广大区域内。也正因为如此,沈阳地区的小尺度暴雨的预报难度才具有挑战性。本文对7月8日08时至13日08时(北京时)过程进行了数值模拟。

3.2 天气形势分析

500 hPa高空图上,等高线冷涡的低压中心位于45°N内蒙古境内,最低值为566 dagpm。冷中心位于低压中心西部的中蒙交界处,冷空气中心低值为-12℃,冷中心落后于低压中心。500 hPa高空图上,此切断低涡于7月9日夜间低压中心移动至东北

东部,并入东北方的大低涡系统中,在东北地区表现为东北西南走向的低槽形势,一直维持到7月13日。

700 hPa高空图上,整个东北和内蒙古地区的东北区域恰好被一个发展完好的冷涡覆盖。700 hPa等高线冷涡的低压中心位于吉林与内蒙古交界处,最低值为300 dagpm。与之配合的冷中心位于低压中心西北部的中蒙交界处,冷空气中心低值为3℃。冷中心落后于低压中心,说明冷涡处于发展期。辽宁西北至山东半岛东端有一个发展较强的深槽。槽后有较明显的冷平流,槽前有较明显的暖平流,符合形成“切断低涡”的条件。在这个槽的东部前方是另外一个位于黄海上空的低涡系统,中心强度也为300 dagpm,但此低涡在700 hPa和500 hPa无冷中心与之配合。这两个低涡呈西北东南走向的一个倾斜的阿拉伯“8”字分布。

2005年7月9日08时850 hPa高空图上,等高线冷涡的低压中心位于辽宁与内蒙古交界处,最低值为140 dagpm。对应的暖中心与低压中心重合,暖空气中心高值为17℃。

3.3 模拟结果

主要考虑中小尺度过程的模拟效果。模拟结果表明,MM5V3—7较好地模拟出东北冷涡的降雨过程及在沈阳的中 β 尺度的局地暴雨过程。

3.3.1 实况云图与模拟云区的对比

2005年7月9日06时是本次沈阳局地暴雨发生的时间。从图1的实况云图与模拟云区的对比来看,沈阳强对流云区几乎达到精确的地步,其发展演变也相当吻合(其他时次对比略)。通过对模拟结果与实况对比来看,模拟的沈阳地区(云区水平尺度在100—200 km,属于中 β 尺度对流系统)包括其他主要降水区域的对流云区演变发展与实况卫星探测云区位置相当接近(图1,其他时次对比图略)。因此表明,可以利用模式输出的高分辨率结果来研究中 β 尺度对流系统的发展演变和结构特征。

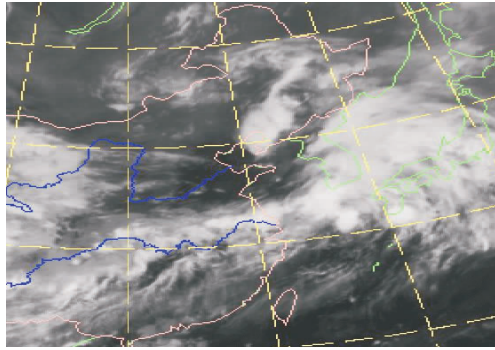
3.3.2 低层水汽

从2005年7月9日08时850 hPa和700 hPa水汽通量散度图可知,低层暖湿条件是冷涡与冷涡的局地强对流发展密切相关,是强对流预报的关键。强大的冷涡由于冷性层结深厚难以诱发强的对流天气,而其分裂的次涡度中心或弱的冷性低涡配合低层暖湿气流常常产生突发性强对流天气。

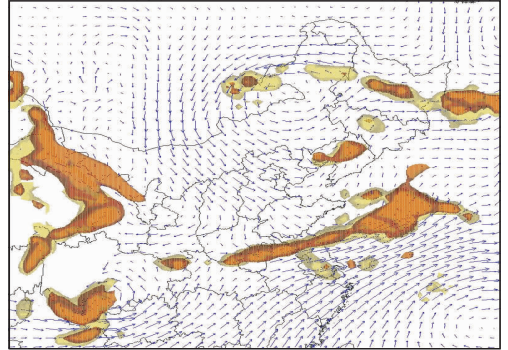
从图2可知,7月9日08时850 hPa在沈阳地区发生强对流的地区,包括其他发生强对流的区域,均为水汽通量散度的负值区,在沈阳附近有 $-4 \times 10^{-7} \text{ g}/(\text{s} \cdot \text{hPa} \cdot \text{cm}^2)$ 的负值中心。700 hPa在同样位置也有 $-4 \times 10^{-7} \text{ g}/(\text{s} \cdot \text{hPa} \cdot \text{cm}^2)$ 的负值中心存在。

3.3.3 500 hPa 涡度大值区特点

从2005年7月9日08时500 hPa 涡度分布(图3)



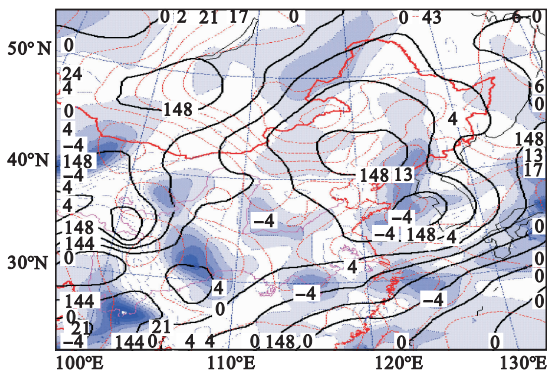
(a) 2005年7月9日06时FY2C中国陆地红外通道1卫星云图



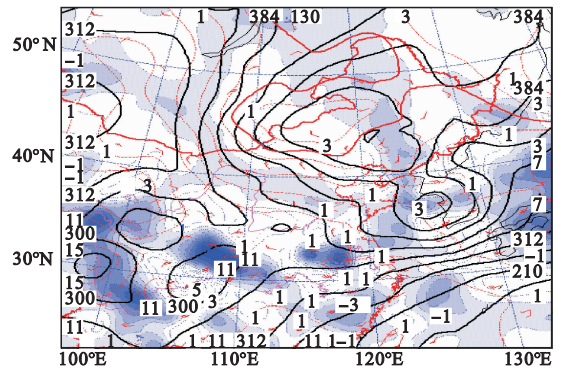
(b) 2005年7月9日06时数值模拟云图

雨水(淡黄色)和雪水(褐色)混合比大于 $0.02 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 区域代表模拟云区

图1 实况云图与模拟云图对比



(a) 850 hPa



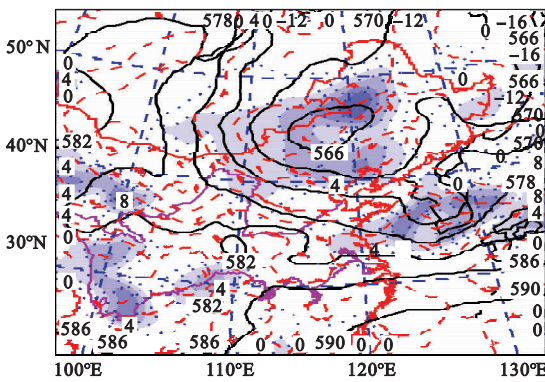
(b) 700 hPa

间隔为 $2 \times 10^{-7} \text{ g}/(\text{s} \cdot \text{hPa} \cdot \text{cm}^2)$;蓝色区域为水汽通量散度负值区

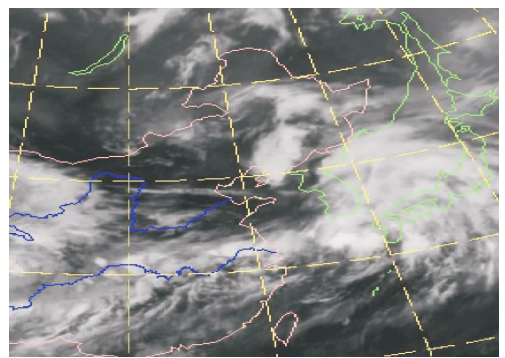
图2 2005年7月9日08时850 hPa和700 hPa高度场和水汽通量散度场

可知,在局地对流发展的强盛时期500 hPa最大涡度

中心周围反而无对流云。图3a中,东北地区西北、



(a) 2005年7月9日08时500 hPa高度场



(b) 2005年7月9日08时FY2C中国陆地红外通道1卫星云图

等高线间隔为 2 dagpm ;等温线间隔为 $2 \text{ }^\circ\text{C}$;等涡度线间隔为 $2 \times 10^{-8} \text{ s}$;蓝色区域为涡度正值区

图3 2005年7月9日08时500 hPa形势与实况卫星云图对比

西南有两个涡度大值中心,中心值分别为 $6 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 和 $4 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。但对应同时刻的卫星云图,并不像通常概念中的大的涡度中心对应大的上升中心,而是没有对流云。其原因可能是由于涡度中心只是对应着高空冷空气旋转转向的一个折角区域,是东北冷涡依靠自身旋转保持“自我维持”的一种机制。

3.3.4 冷涡垂直结构特点

从2005年7月9日06时 θ_{se} 的剖面图看(图4b),冷涡明显的结构特点就是在中高层存在深

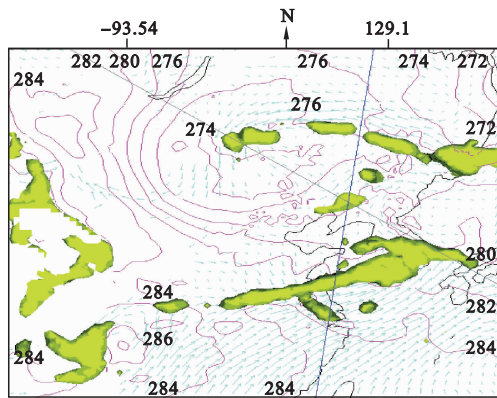
厚的干冷空气堆,干冷空气堆就像一个厚厚的盖子覆盖在东北地区上空,而发生在沈阳区域包括沈阳南、北三个区域的强对流区域都位于冷空气堆的边缘区域,对应三个不同区域的强对流的发生,总是有 θ_{se} 上下层接近或者打通的区域与之对应。雨区位置分布不是在干冷盖的正中间,而是发生在冷空气的周边位置。

3.3.5 冷涡的触发机制

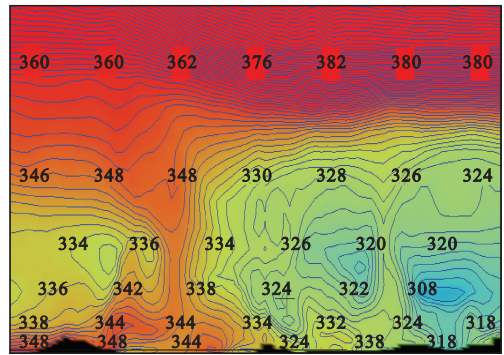
图5中的黄色区域为模拟对流云区,蓝色箭头

为 3.3 km 水平面上的风矢量,红色线为 3.3 km 水

平面上的等涡度线,间隔为 $5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,沈阳区域对



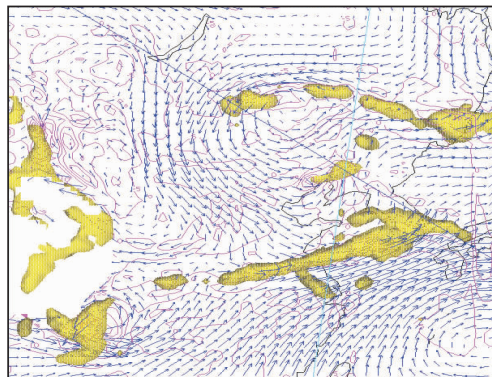
(a) 模拟结果的顶视图



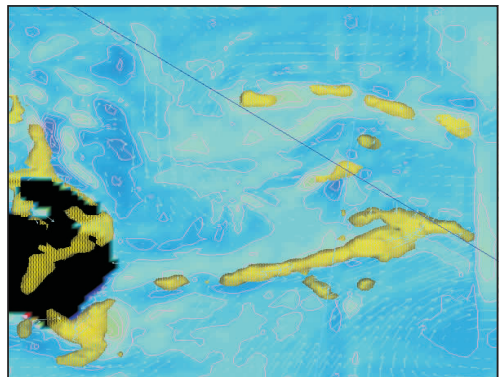
(b) 剖面图

蓝线为剖面;等 θ_{se} 线间隔为 2°K ;冷色代表相应低值区;暖色代表相应高值区域;剖面与北部纬线和南部纬线的交叉点经度分别为 129.1°E 和 119.2°E ;十字叉位置代表沈阳上空

图4 2005年7月9日06时模拟的垂直剖面角度和等假相当位温 θ_{se} 场



(a) 模拟结果



(b) 彩色填充图

图5 2005年7月9日06时模拟3.3 km水平剖面的涡度场

流云区对应涡度大值中心值为 $15 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,其他云区也与相应的涡度大值中心对应。需要指出的是,在沈阳对流云区南部 100 km 处又有 $10 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 负涡度中心存在,它可能与冷空气的下沉有关,其形成机制有待研究。从各时次对流云发展演变过程来看,强对流的发生发展均与气流的折向汇聚相联系。

4 结论与讨论

(1) 使用 NCEP 再分析资料,MM5V3-7 可以较好地模拟出东北冷涡的降雨过程及在沈阳的中 β 尺度的局地暴雨过程。

(2) 通过模拟结果和实况云图与模拟云区的对比结论,可以利用模式输出的高分辨率结果来研究中 β 尺度对流系统的发展演变和结构特征。

(3) 低层水汽输送是冷涡局地强对流发展的关键。

(4) 冷涡总是以水平旋转的中高层的干冷空气堆作为其结构特点,强对流区域位于冷空气堆的边缘区域,雨区位置一般在冷空气的周边位置。

(5) 夏季冷涡天气关注中低层流场非常重要,中

低层气流的辐合很有可能就是引发局地强对流的触发机制。

参考文献

- [1] 朱抱真. 从平流动力分析论春季东北低压的发展[J]. 气象学报,1953,24(3):157-159.
- [2] 邹旭东,杨洪斌. MM5 和 WRF 模拟东北冷涡雷暴天气过程对比分析[J]. 气象与环境学报,2007,23(6):20-25.
- [3] 刘煜,何金海,李维亮,等. MM5 对全新时期中国地区气候的模拟研究[J]. 气象学报,2009,67(1):35-49.
- [4] 张立祥,李泽椿. 一次东北冷涡 MCS 边界层特征数值模拟分析[J]. 气象学报,2009,67(1):75-82.
- [5] 朱平盛. 东北冷涡下的山东强对流天气[J]. 山东气象,1986(3):38-41.
- [6] 朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等. 天气学原理与方法[M]. 北京:气象出版社,2000:649.
- [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[J]. 气象学报,2005,63(2):173-183.

- [8] 宋新辉, 鄢志宇. 一次东北冷涡暴雨过程数值模拟分析[J]. 气象与环境学报, 2004, 20(1): 23-24.
- [9] 张春喜, 廖晓农, 郑永光, 等. 北京雷暴大风的天气气候分析//中国气象学会 2005 年年会文集[M]. 北京: 气象出版社, 2005: 2181-2190.
- [10] 陈力强, 张立祥, 杨森. 东北冷涡诱发的一次连续强风暴环境条件分析[J]. 气象与环境学报, 2006, 22(6): 1-5.
- [11] Anthes R A, Kuo Y H, Benjamin S G, et al. The evolution of the mesoscale environment of severe local storms: Preliminary modeling results [J]. Monthly Weather Review, 1982, 110(9): 1187-1213.
- [12] Grell G A, Dudhia J, Stauffer D R. A description of the fifth generation Penn State/NCAR mesoscale model (MM5) [R]. National Center for Atmospheric Research, Boulder, 1994: 138.
- [13] Johnson W B, Viezee W. Stratospheric ozone in the lower troposphere- I. Presentation and interpretation of aircraft measurements [J]. Atmospheric Environment, 1981, 15(7): 1309-1323.
- [14] Levy H, Mahlman J D, Moxim W J. A stratospheric source of reactive nitrogen in the unpolluted troposphere [J]. Geophysical Research Letters, 1980, 7(6): 441-444.
- [15] Holton J R, Haynes P H, McIntyre M E, et al. Stratosphere-troposphere exchange [J]. Reviews of Geophysics, 1995, 33(4): 403-439.
- [16] Price J D, Vaughan G. The potential for stratosphere-troposphere exchange in the Royal Meteorological Society, Quarterly Journal of cut-off low systems [J]. 1993, 119(510): 343-365.

Numerical simulation on local storm caused by northeast cold vortex

LI Dan WANG Chang-shuang LIU Wei

(Weather Center, Northeast Air Traffic Administration Bureau, Shenyang 110169, China)

Abstract: Based on the CDAS-NCEP/NCAR reanalysis data, a sequence thunderstorm process caused by northeast cold vortex from 9 to 12 July, 2005 was simulated by mesoscale model MM5V3-7 of Penn State/NCAR. The local storm process in Shenyang and the surrounding areas on 9th July, 2005 was analyzed, and the evolution of β mesoscale convective system and its structure features were discussed. The results indicate that cold vortex always has a biggish bound cold air pool in middle and high level. On the southeast side of cold vortex, the margin area of high level dry and cold pool takes on erect shape from boundary layer to troposphere layer. It indicates that there exists a strong convection. Warm and wet air flow in lower level below the margin areas of dry and cold pool plays an important role in the local strong convection of cold vortex. The up layer and down layer of θ_{se} in margin areas of dry and cold pool can approach or get through when the local convection develops.

Key words: Northeast cold vortex; Sequence thunderstorm; Numerical simulation