

# 一次东北冷涡暴雨过程的数值模拟试验<sup>①</sup>

姜学恭 孙永刚

沈建国

(内蒙古气象台, 呼和浩特 010051) (内蒙古气象局)

## 提 要

利用MM5非静力模式成功地模拟了1998年8月8~9日一次东北冷涡切变型暴雨过程。发现本次过程中,低涡西北象限的强降水中心的产生是由于高层形成的强辐散,切变降水的产生由于偏南急流与偏东急流的交汇,切变带上升运动层次明显低于低涡。同时,通过对比试验发现,偏南急流是本次过程主要水汽输送带。且对切变降水影响较大。偏南急流区水汽的减弱对系统(低涡、切变)的降水强弱有直接影响;西路冷空气加强主要使大气斜压作用增强导致低涡强度及降水增强;东路冷空气主要通过阻挡偏南气流形成抬升从而主要影响切变强度和降水。阻高则通过对上游低值系统的阻挡影响其位置和强度进而影响过程降水。

关键词: 低涡 暴雨 数值模拟

## 引 言

1998年7月下旬至8月,鄂霍次克海阻高极其强盛,我国东北松嫩流域持续受到其上游东北冷涡影响,连降暴雨,汛期降雨量达到历年同期平均降雨量的1.5~2倍,形成严重洪涝灾害。

为了深入了解这一时期东北冷涡致洪暴雨的产生机制,大尺度及天气尺度系统对暴雨形成的贡献及改变其强度对暴雨过程可能产生的影响,利用MM5非静力模式对1998年8月8~9日的暴雨过程作了数值模拟分析和对比试验,揭示出了主要影响系统在本次暴雨过程中的作用和贡献。

## 1 暴雨天气过程概况

本次过程是一次东北冷涡发展加深产生暴雨的天气过程,欧亚大陆的中期形势为两脊一槽,在鄂霍次克海附近维持一稳定的阻塞高压。8月6日有低槽东移发展加深,并在中低层形成低涡,低涡轴线随高度向西倾斜。8日08时700hPa图上在(43.5°N、113°E)和

(46°N、118°E)形成两个低涡中心。其后上游低涡逐渐减弱消失,而下游低涡则北抬发展加深,并在低涡前部形成东西向的暖湿切变,且降水逐渐加大。切变南侧低层(850hPa)为中心值 $21.0\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的低空急流区,与高湿区配合;切变北侧为偏东急流区(图略)。其后低空急流进一步加强,暖湿切变缓慢北抬,低涡沿NNW方向移动,降水强度逐渐达到最大。雨带分布为西西北—东东南向,与暖湿切变走向较为一致,最强中心位于低涡西北侧(图1a)。本文选取低涡加强阶段(即8日08时至9日08时)进行了48小时模拟。

## 2 模式和资料及试验方案

### 2.1 模式简介

MM5是由美国国家大气研究中心(NCAR)和美国宾州大学(PSU)在MM4的基础上研制的新一代中尺度模式。MM5中除保留了静力平衡方案外,还增加了非静力平衡方案选择,对水汽、辐射等物理过程的处理更加详尽和完善,大大提高了预报和模拟

<sup>①</sup> 本研究由内蒙古自治区科委课题(No. 99121)和内蒙古自治区气象局课题(No. 9906)联合资助。

效果<sup>[1]</sup>。本文模拟试验采用的主要物理过程有(1)动力过程采用了非静力平衡方案。(2)边界层采用 blackdar 高分辨率行星边界层参数化方案。(3)可分辨尺度降水采用包含冰相(简单冰相)的显式水汽方案。(4)积云对流参数化采用 Grell 方案。(5)侧边界采用时变出入流方案。

## 2.2 资料来源

所用资料为国家气象中心 HLAFS 资料。以 8 日 08 时 A 场为初估场,8 日 08 时 C

场、9 日 08 时 A 场、C 场(A 为分析场,C 为 12 小时预报场)分别为 12、24、36 小时侧边界。资料水平分辨率为  $1^\circ \times 1^\circ$ ,从 100~1000hPa 共分为 10 层。模拟区域以 ( $45^\circ\text{N}$ 、 $110^\circ\text{E}$ ) 为中心,格距为 50km,格点数  $79 \times 77$ ,地形以 NCAR ( $1^\circ \times 1^\circ$ ) 地形资料线性插值并进行九点平滑生成。模式层顶取为 100hPa,模式垂直方向分为不等距 23 层。积分时间 48 小时,积分步长 150 秒。

## 2.3 控制试验及对比试验设计方案

表 1 主要的模拟试验方案

试验方案	试验方案主要内容
控制试验(A)	包括 2.1 中物理过程的模拟试验
减弱低空急流试验(B)	将低空急流所在区( $35 \sim 45^\circ\text{N}$ 、 $120 \sim 130^\circ\text{E}$ 范围内) $U$ 、 $V$ 、 $T$ 、 $H$ 进行各层平滑(九点平滑,次数为 80 次) <sup>[2]</sup>
减弱湿度场试验(C)	将( $35 \sim 45^\circ\text{N}$ 、 $120 \sim 130^\circ\text{E}$ )低空急流所在区域内各层的相对湿度场减半
减弱阻塞高压试验(D)	将 $45^\circ\text{N}$ 以北、 $120^\circ\text{E}$ 以东范围内的 $H$ 、 $T$ 减去适当值(约 $60\text{gpm}$ 、 $4^\circ\text{C}$ )再对温度、高度场进行各层平滑(平滑次数为 20 次)。
西路冷空气加强试验(E1)	将 $45^\circ\text{N}$ 以北、 $95 \sim 115^\circ\text{E}$ 区域内的 $T$ 减去一适当值(约 $4^\circ\text{C}$ ),并将此区域内的北风( $V < 0$ )和西风( $U > 0$ )风速加强一倍,再进行各层平滑(20 次)。
东路冷空气加强试验(E2)	将 $45 \sim 55^\circ\text{N}$ 、 $125 \sim 135^\circ\text{E}$ 区域内 $T$ 减去约 $6^\circ\text{C}$ 。

## 3 数值试验

### 3.1 试验 A:控制试验

#### 3.1.1 降水量的强度和落区

图 1a、b 分别是 8 日 08 时~9 日 08 时 24 小时实况和模拟的降水量。可以看出模拟的雨区范围和形状都与实况基本相符,强降水的范围和形状及走向也类似于实况。模拟降水的两个中心分布与实况较为一致,中心强度稍弱(实况分别为  $62.4\text{mm}$  和  $34.0\text{mm}$ ,模拟为  $51.6\text{mm}$  和  $25.5\text{mm}$ ),基本模拟出了实况的量级,另外,模拟降水东西两侧的中心较实况有一定偏离(西侧偏西、东侧偏东)。这可能与资料缺乏,实况降水中心不能准确定位有关,但总的来说,模式对此次过程降水总体的模拟效果较好。

#### 3.1.2 系统强度与位置

试验较好地模拟出了低涡中心的移动和演变过程。8 日 08 时两个低中心,比实际位置偏向西南约 50km 左右,强度相近,3 小时后,模拟显示,上游低涡逐渐减弱消失,而下游低涡开始加强北抬,至 8 日 20 时,到达  $46^\circ\text{N}$ 、 $117^\circ\text{E}$ ,位置基本与实况相符。至 9 日 08 时,移至  $47^\circ\text{N}$ 、 $106^\circ\text{E}$  附近,中心强度  $3010\text{gpm}$ ,稍弱于实况的  $3005\text{gpm}$ ,位置较实况偏东约 30km。可以看出,试验较好地模拟出了低涡的移动和演变过程。

#### 3.1.3 急流

实况 9 日 08 时(HLAFS 的 9 日 08 时分析场)在高层( $200 \sim 300\text{hPa}$ )有一条西西南向急流区,其入口右侧辐散区与低层上升运动区相叠置,控制试验在  $200\text{hPa}$  也模拟出一条西西南急流,位置与实况基本吻合,急流

核强度随积分时间增强,至积分 24 小时达到最大( $24\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ),较实况( $29.8\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )稍弱。

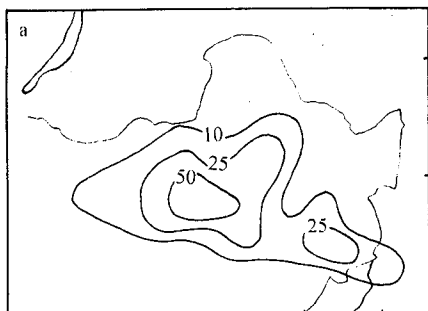


图 1a 8 日 08 时~9 日 08 时实况降水量  
(单位:mm)  
等值线值分别为 10,25,50

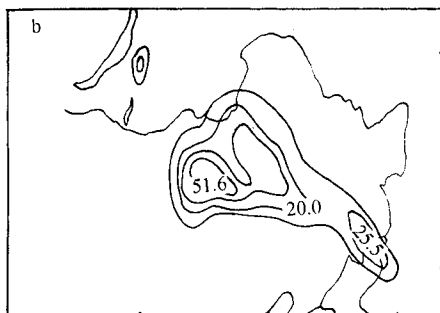


图 1b 8 日 08 时~9 日 08 时模拟降水量  
(试验 A,单位:mm)

### 3.1.4 低涡和切变线的上升运动

低涡的西北象限和切变线是本次过程产生降水的主要区域,试验较好地模拟出了低涡的切变线的上升运动(图 2),从图 2 可以看出,偏南气流和偏东气流在切变线相遇,并在交汇的区域产生强烈的抬升,还可看出,上升运动主要在 300~700hPa 之间。对于低涡,其西北象限的上升运动明显强于切变线附近的上升运动,并且主要在高层(200~300hPa)形成了较强的辐散(图 3),辐散区范

围较小,具有一定的中尺度特征,相应的上升运动的层次也较高。总之,低涡的西北象限降水中心的形成,高空辐散起到很大的作用,而切变线的上升运动主要由偏南气流和偏东气流间的切变产生。

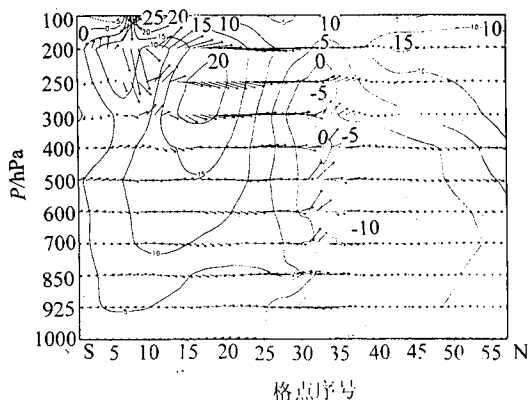


图 2 积分 12 小时流场沿 118~119°E 附近  
垂直剖面图(试验 A 切变线)

矢量为  $v, w$  合成,细实线为西风等风速线,流出,虚线为东风等风速线,流入,单位  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,间隔 5.0,其中  $w$  扩大 10 倍,N,S 表示方向,下同

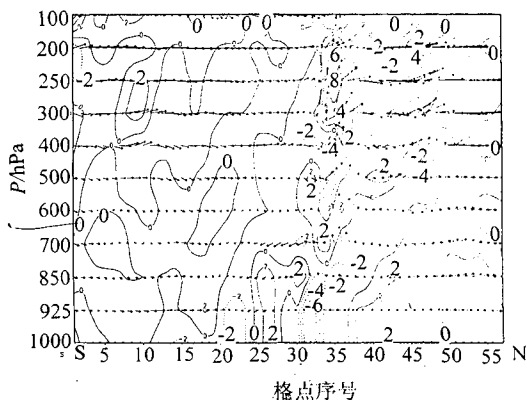


图 3 积分 12 小时流场沿 118~119°E 附近垂  
直剖面图(试验 A 低涡)

矢量为  $v, w$  合成,等值线为散度,单位:  $10^{-5}\text{s}^{-1}$ ,间隔 2.0,其中  $w$  扩大 10 倍

## 3.2 试验 B: 减弱低空急流试验

### 3.2.1 降水

减弱低空急流后,模拟降水量明显减弱,00~12 时暖锋雨带没有模拟出来;12~24 时

暖锋雨带尽管模拟出来,但强度已大大减弱,两个中心消失,西部的低涡中心附近的 24 小时雨量中心从试验 A 的 51.6mm 减小到 32.5mm,影响是巨大的。

由于低层偏南急流的减弱,切变线的上升运动明显减弱,同时,也使切变线的湿度较试验 A 有明显减弱(图略),另外,试验 A 中的与两个雨强中心配合的两个湿位涡强负值区已大大减小。从试验 B 和 A 的 925hPa 湿位涡的差值图(图略)可以看出,在整个切变线上存在一较强的湿位涡差值正中心,显示低层的热量及不稳定能量的减弱。因此,低层偏南急流减弱,一方面使偏南与偏东气流的动力辐合作用减弱,导致上升运动减弱,另外,也使其对水汽和热量的输送大为减弱,导致低涡及切变线降水减弱。可见,偏南低空急流在此次过程中,提供了充足的水汽来源,是降水产生的关键。

### 3.2.2 高空急流

减弱低空急流后,12~24 小时的高空急流有所减弱,对应的高层辐散强度也有所减弱,上升运动中心由  $1.68 \times 10^{-3} \text{hPa} \cdot \text{s}^{-1}$  减小到  $1.00 \times 10^{-3} \text{hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ 。可见,低空急流减弱,不仅使水汽输送减小,导致低涡区降水减弱,另一方面也由于高空急流的减弱导致降水减弱,这一影响的内在机制有待进一步研究。

## 3.3 试验 C:偏南气流区湿度场影响试验

### 3.3.1 降水

减弱低空急流区湿度场后,积分 24 小时,降水量已大大减弱,不同于试验 B 的是,暖切变雨带已完全消失,低涡中心雨量减弱至 25.3mm,可见,偏南气流是暴雨过程的主要水汽输送途径,左右着低涡及切变降水的多少。

### 3.3.2 低涡

减弱湿度场后,低涡中心的强度明显减弱,积分至 12 小时,700hPa 低涡中心强度为

3040gpm (46°N、117°E) (试验 A 为 3000gpm),位置较试验 A 略偏南。可见,湿度场不仅直接影响降水的多少,也通过形成降水产生一定的反馈的机制间接影响系统强度。另外减弱湿度场后,积分 12 小时 700hPa 涡度中心由试验 A 的  $19.7 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$  减小到  $10.0 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$  (图略),切变线涡度中心由  $12.0 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$  减小到  $8.0 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ ,对系统强度的影响是巨大的。可见,湿度场不仅直接关系到降水的多少,对低涡的强度也有重要影响。

### 3.3.3 急流

减弱湿度场积分 12 小时后,低空偏南急流由  $21.0 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  减小到  $17.8 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,偏东急流由  $18 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  减小到  $11 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,已达不到急流强度。

## 3.4 试验 D:减弱阻塞高压试验

### 3.4.1 低涡

减弱初始场的阻塞高压,积分 12 小时后,500hPa 阻高中心则由 5861gpm 降至 5800gpm。高压中心位置较试验 A 偏东北约 500km。冷涡前 12 小时移动路径基本类似于控制试验,以北抬为主;12~15 小时东移至 125°E,并停滞下来,强度较控制试验偏弱;至 24 小时,中心位置较试验 A 偏东 300km 左右,700hPa 中心强度 3014gpm,较试验 A 弱 4gpm(图略)。阻高的减弱使低涡位置偏东。对降水的影响是使雨强中心明显偏东(图略),位置类似于低涡的位置变化,强度稍有减弱。可见阻塞高压在此次暴雨过程中主要起到对上游低值系统的阻挡作用,其强度和位置直接关系到上游低值系统的影响范围和强降雨带位置。

### 3.4.2 急流

阻高减弱导致低空偏东急流核由  $21 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  减弱至  $18 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,位置偏东 400km。基本上与阻高的位置改变相近。可见,阻高与其底部偏东急流有某种程度的共存关系,其强弱

和位置直接制约其底部急流的位置和强度。

### 3.5 试验 E: 冷空气影响试验

#### 3.5.1 西路冷空气加强试验(E1)

##### 3.5.1.1 降水

西路冷空气加强之后,使低涡中心附近的降水明显加强(图略),中心值由控制试验的 51.6mm 增至 68.9mm,增强近 40%,而暖切变雨带强度和范围基本未变。

##### 3.5.1.2 低涡

西路冷空气加强之后,低涡中心强度明显加强,较控制试验(时间平均)加强约 20gpm 左右,而中心位置在合并之后,以北拾为主,西移不很明显。另外,从穿过低涡中心的垂直剖面图(图略)上可以看到,积分 12 时低涡中心附近的垂直速度场由  $1.68 \times 10^{-3} \text{hPa} \cdot \text{s}^{-1}$  (试验 A) 增到  $2.59 \times 10^{-3} \text{hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ 。从温度剖面图可看到由于强冷空气的加强,使低涡中心附近的温度梯度明显加强,斜压性增大,因而引起涡度和上升运动的加强。可见,冷空气强度在低涡发展加强过程中起着重要的作用。

#### 3.5.2 东路冷空气加强试验(E2)

##### 3.5.2.1 降水

东路冷空气加强之后,暖切变雨带明显加强,图 4 为 24 小时雨量差值图,可以看到低涡附近的雨量明显减弱,而在切变线附近有所增强(暖切变东段的雨量中心由 25.7mm 增至 31.0mm,而西部低涡雨带略偏东并减弱到 46.7mm)。

##### 3.5.2.2 低涡

东路冷空气增强使低涡强度有所减弱并略偏东于试验 A,另外图 4 中区域 A 附近的正值中心也表明低涡北拾变缓,可见,东路冷空气增强不仅使切变线降水增强,同时也影响低涡的北拾速度。

##### 3.5.2.3 切变线

东路冷空气的加强,使切变线明显加强,从沿  $128^\circ\text{E}$  垂直于暖锋的经向垂直剖面图

(图 5) 可以看到,上升运动较试验 A 显著加强,积分 12 时上升运动的强度由  $2.30 \times 10^{-3} \text{hPa} \cdot \text{s}^{-1}$  增至  $2.83 \times 10^{-3} \text{hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ ,且上升运动达到 250hPa 左右。可见,东路冷空气的存在和加强,对暖切变产生和发展有着重要影响。

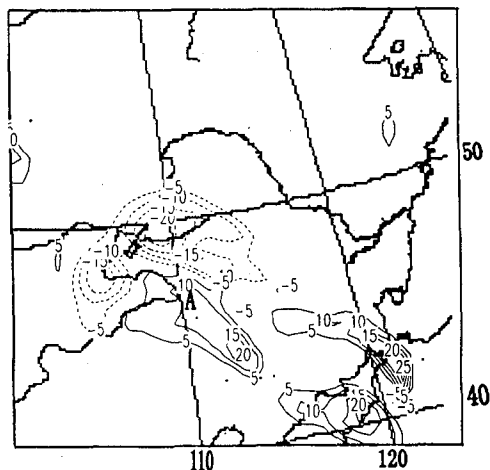


图 4 积分 24 小时雨量差值图(试验 E2-A)  
单位: mm, 间隔 5.0

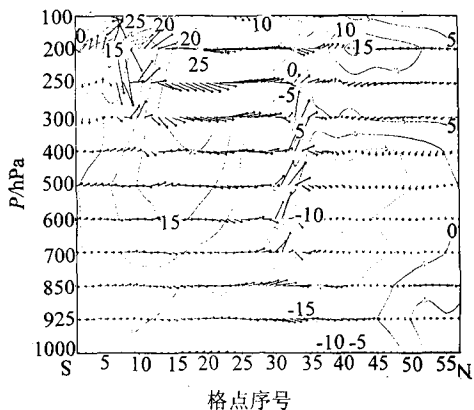


图 5 积分 12 小时流场经向垂直剖面图  
(试验 E2 切变线)

矢量为  $v, w$  合成, 细实线为西风等风速线, 流出, 虚线为东风等风速线, 流入, 单位  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 间隔 5.0, 其中  $w$  扩大 10 倍

## 4 结论

(1) 利用 MM5 非静力模式, 采用 HLAFS( $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ )分析场和 12 小时预报场分别做为初估场和侧边界, 即使使用 50km 格距分辨率, 仍能较好地模拟出此次低涡切变型暴雨过程, 雨带分布和降水中心位置的预报较为理想, 并且能够揭示出此次过程中一些中尺度特征。

(2) 低涡区与切变线上的上升运动有着不同的特点, 低涡西北象限的强降水中心的产生是由于高层形成的强辐散, 切变降水的产生由于偏南急流与偏东急流的交汇, 切变线上升运动层次明显低于低涡。

(3) 低层偏南气流是本次过程的主要水汽输送带, 这一气流也通过与偏东气流间的辐合抬升作用决定着切变的强度。

(4) 偏南急流区湿度条件的强弱, 对过程

降水多少有至关重要的作用, 尤其对于切变线降水。

(5) 阻高与其底部偏东急流有一定的共存关系; 阻高通过阻挡上游低值系统并影响其位置从而影响暴雨强度和落区。

(6) 东西路冷空气在此次暴雨过程中扮演着不同的角色, 西路冷空气主要影响系统斜压性, 从而影响低涡强度及降水强弱; 东路冷空气主要通过阻挡偏南气流形成辐合抬升从而主要对切变强度及降水产生影响。

## 参考文献

- 1 Georg A Grell, Jimy Dudhia and David R Stauffer. A Description of the Fifth-Generation Penn. State/NCAR Mesoscale Model (MM5). NCAR Technical Note, NCAR/TN-398+STR. 1994.
- 2 葛明等. 一次黄河气旋暴雨大尺度高低空急流影响的数值试验. 暴雨、灾害, 1997. 1.

## A Numerical Simulation and Contrast Test on A Northeastern Vortex Rainstorm

Jiang Xuegong SunYonggang Shen Jianguo

(Inner Mongolia Meteorological Bureau, Huhhot 010051)

### Abstract

By using MM5 nonhydrostatic mode, a numerical simulation was made successfully to a northeastern vortex and shear caused rainstorm occurring from August 8th to 9th in 1998. The numerical simulation revealed follow results; the strong divergence formed in upper air lead to the strong precipitation center in the northwestern part of the low vortex, the shear formed by convergence of the southerly jets with the easterly ones also contributed a lot to the precipitation, ascending motion with the shear was apparently lower than one with the low vortex. Meanwhile, the contrast test shows that the southerly jets play the most important role in transporting water vapor to the precipitation area. The weakening or strengthening of water vapor within the southerly jet zone had a direct impact on the precipitation, especially to the shear caused precipitation. The strenthening of westerly cold air made the baroclinic function become stronger, further lead to the enhancement of both the low vortex and the precipitation. While the southerly air current was detained by the easterly cold air, which resulted in the ascending motion and influenced on the shear intensity and its resultant precipitation. The blocking high made an obstruction to its upsteam low-pressure systems and influenced both their position and intensity, thus had further influence on the precipitation.

**Key Words:** low vortex rainstorm numerical simulation