

# 对华北锢囚锋个例的数值模拟分析

边志强

王建捷

谈哲敏

(南京大学大气科学系, 210093)

(国家气象中心)

(南京大学大气科学系)

## 提 要

运用非静力中尺度模式(MM5)对1998年11月20~21日的华北锢囚锋形成过程进行数值模拟。结果表明:本次锢囚锋结构在空间尺度上小于典型温带气旋锢囚锋,降水落区与锢囚锋性质(暖性)有关,因此,潜热释放对锢囚锋的维持起一定的作用;去掉太行山后,锢囚锋形成的时间会偏早,地点偏西,强度偏弱,因此,太行山的存在对本次锢囚锋生成发展起至关重要的作用。

**关键词:**华北锢囚锋 MM5 模式 数值模拟

## 引 言

华北锢囚锋是造成我国华北冬、春季降雨的主要天气系统之一。认识其发生、发展的条件,对准确作好预报是有益的。自从50年代在我国华北地区发现了一种“复杂锋面”的空间结构以来,研究人员对它进行了很多分析,徐达生对这类“复杂锋面”的空间结构进行了分析,提出了自己的看法<sup>[1]</sup>。而在同期发表的“1956年春季华北地形锢囚锋分析的讨论”中明确指出这种锢囚是地形与其他因素共同造成的,它把河套附近形成锢囚的可能性归纳为两种,一种为气旋锢囚,另一种为冷锋锢囚<sup>[2]</sup>。到了60年代后期,卫星云图出现以后,人们研究得出,对于华北直接锢囚锋的形成过程,用云图比天气图要早一天发现。而且提出锋面气旋如有逗点云系叠加即可形成锢囚锋,并且提出了锢囚锋生的概念。70年代以后,研究人员通过对一次华北锢囚锋锋生过程的分析,发现锢囚锋的形成过程同冷空气活动的强度、路径及高空形势有密切的联系。地面锋生作用也明显有利于锢囚锋的形成。对回流天气形势下华北锢囚锋生成的地点也有不同的看法。范永祥等认为河套锢囚锋是就地生成的,是一次冷性锢囚转变为暖式锢囚的复杂过程。而扈忠慈对此提出了

不同看法,他认为在东路冷锋从正北方向南下,冷空气过早地进入山西、陕西并倒灌入河西走廊的情况下,东西两路冷锋也可在河套以西先形成锢囚,然后东移影响华北。90年代,肖庆农研究了地形作用下冷锋的变形和锢囚,指出不同的地形作用会使冷锋产生不同的变形和锢囚<sup>[3]</sup>。

由于华北锢囚锋的生命史较短,对其发展演变和结构特征还不象对温带气旋锢囚锋认识的那样清楚。虽然很多研究人员做了大量的工作,有很多基础问题仍需要人们进一步认识。例如,华北锢囚锋垂直结构有什么特点?地形在华北锢囚锋的形成过程中到底起着什么样的作用?凝结潜热的作用如何?本次研究的目的是基于通过实例模拟分析华北锢囚锋的结构特征,进一步探讨地形及凝结释热对其形成的影响和作用。

## 1 模式简介及试验设计

### 1.1 模式简介

本文运用美国宾夕法尼亚州立大学与美国大气科学研究中心(PSU/NCAR)共同发展的非静力原始方程中尺度模式(MM5)进行模拟试验,水平方向采用双向嵌套方式(图1)。

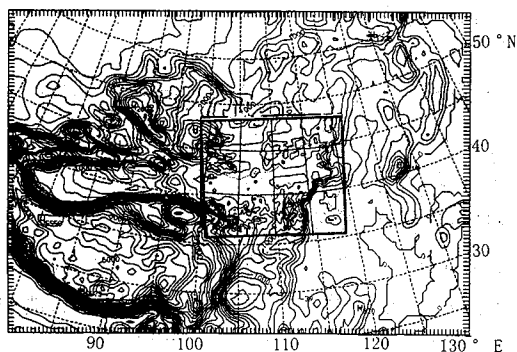


图1 套网格试验区域

实线为地形等高线,间隔为200m

模式的基本参量:模式顶  $P_t = 100\text{hPa}$ , 区域一的水平分辨率为45km,模拟域格点数为  $115 \times 97$ ;区域二的水平分辨率为15km,模拟域格点数为  $119 \times 85$ ;垂直为不等距的23个 $\sigma$ 层,预报区域中心:  $43^\circ\text{N}, 105^\circ\text{E}$ 。

本次试验采用 PSU/NCAR MM5 模式的如下方案①动力过程利用了非静力平衡方案;②显式水汽方案对模式可分辨降水进行模拟,即云水、雨水(含冰相物理过程)也作为预报量,模式不可分辨降水的模拟则选用 Kain-Fritsch 对流参数化方案,行星边界层过程的模拟选择了 Blackadar 高分辨率方案,大气辐射方案采用 Dudhia 的云辐射方案,考虑长波、短波与云及晴空水汽的相互作用。模式层顶利用海绵边界条件,侧边界利用时间流入流出方案。

本次模拟是将国家气象中心中期业务模式 T106L19 的分析场内插到粗网格区域作为初估场,对初估场作再分析(加入实时资料)后形成模式的初始场及粗网格区域的侧边界条件,而细网格区域的侧边界值由同步的粗网格区域的预报值提供。模式起报时间为11月20日08时(UTC,下同),积分36h,最大积分时间步长为120s。

## 1.2 试验设计

三种试验方案如表1所示。

试验 CTRL 是一个控制试验,使用真实

初始场并包含“全”物理过程,试验 DRY 不包含凝结释热作用,NOLAND 与 CTRL 的唯一差别在于前者将地形作了处理,“削平了”太行山。

表1 数值试验方案

试验名称	地形	凝结释热
CTRL	真实	有
DRY	真实	无
NOLAND	削平	有

## 2 天气过程描述及模式结果检验

1998年11月21日,北京、内蒙古中部、河北、天津及山东半岛出现了小到中雪,其中北京中东部、天津西南部、河北东北部的部分地区下了大雪,北京的局部还降了12mm的暴雪。这次降雪过程是由于东路冷空气在回流的过程中与西路冷空气在河套地区上空相遇造成的。

### 2.1 天气过程描述

#### 2.1.1 高空环流形势演变

这次过程前期(20日08时),在700hPa高空图上(图略),在我国黑龙江东部上空为一稳定的大尺度低压控制区,低压西北部不断有冷空气伴随着横槽的下摆而南下,使低涡有明显的加强。同时,在乌拉尔山以东有一短波槽沿弱脊前西北气流向东偏南方向移动,11月20日20时,小槽移至  $110^\circ\text{E}$  一线,21日08时,到达  $115^\circ\text{E}$  附近,强度少变。我国华北地区上空原来的西北气流转变为偏西气流(图略),主要锋区位于  $40^\circ\text{N}$  一带。与700hPa东移小槽相对应,在20日08时的850hPa图上,在乌兰巴托附近有一中 $\alpha$ 尺度低压向东移动,到了21日08时,低压移至河套东部并且加深,同时低压前部暖脊加强,使原来呈纬向的锋区产生波动(图略)。

#### 2.1.2 锢囚锋的形成

在地面图上,11月20日08时,贝加尔湖以东地区被两股冷空气所控制。东路冷空气与高空大尺度低压西北部的横槽相对应,强度较强,其前锋位于哈尔滨至二连浩特一

线,西路冷空气与高空锋区上东移小槽相对应,其前锋位于蒙古中部一带。此后,东路冷空气开始向南移动,20日23时,冷空气由东北平原沿着高压前部的东风气流,经渤海回流进入华北;同时,西路冷空气移至河套地区北部。21日02时,西路冷空气与东路冷空气前锋在二连浩特及其以南地区相遇,形成锢囚锋。此时,在锢囚锋以东开始出现降水,锢囚锋形成以后,沿东路冷空气所形成的冷垫上部东移,降水也随之东扩。21日08时,在北京西部上空出现锢囚锋结构,北京地区降水加剧。21日17时,东西两股冷空气完全合并,在地面上形成一条新的冷锋向东南方向移去,锢囚锋已消失(图略)。从21日02时到21日17时,锢囚锋共持续15小时。从以上分析我们可以看到,华北锢囚锋与经典温带气旋锢囚锋在形成过程、空间和时间尺度上都有着明显的不同。

2.2 模拟结果与实况的对比检验

从天气学过程分析可以看出,这次华北降水的出现与700、850hPa锋区上低压槽的东移和地面锢囚的形成发展有关。因此,模拟结果与实况的对比检验的重点放在700hPa、850hPa环流形势以及地面锢囚锋和降水方面。

2.2.1 地面锢囚锋和降水

通过将完全控制试验与每隔3h的地面客观分析进行比较,可以发现在锢囚锋的形成时间、移动速度和强度演变方面,两者之间是相当一致的。图2a给出1998年11月21日08时地面气压和降水实况。

图2b显示了1998年11月21日08时(即在锢囚锋出现后的6h)模式海平面气压场形势、锢囚锋位置以及过程总降水量。此时,地面锢囚锋位于北京西部,近于北-南向,锢囚点位于北京以西。降水区呈南北走向,主体在锢囚锋东侧,最大中心出现在北京。与实况相比(图2a),MM5比较成功地

模拟了降水落区及其分布特征,模式不仅给出了与实况相近的大于5mm降水的分布,还模拟出9mm的12h最大降水量(实况值为12mm)。同时,也报出了胶东半岛的5~9mm的降水区。模拟的暴雪区出现在模拟的锢囚锋东侧,特别是模拟的暴雪位置与锢囚点相对应,这说明锢囚锋的出现与暴雪的发生发展是相联系的。虽然模式比较精确地模拟出两个雨量中心,但是强度却与实况相差几毫米。

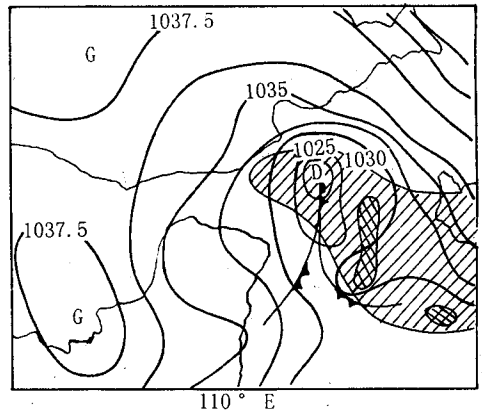


图2a 1998年11月21日08时地面气压  
阴影区的降水区

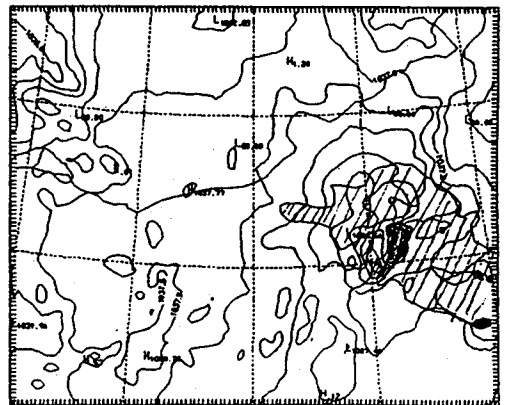


图2b 1998年11月21日08时 CTRL  
试验的地面气压图

阴影部分为过程总降水量(斜线部分为降水量 $\geq 1\text{mm}$ 的区域,全黑部分为降水量 $\geq 10\text{mm}$ 的区域)

分析每6h降水量实况可知,锢囚锋降水

从21日02时开始,至21日23时结束,前6h华北北部出现了不足3mm的降水,而在其后的6h(21日08~14时)里,在多伦多至天津一线出现了5~8mm的大雪区,21日14~20时,主要降雨带到达胶东半岛一带。MM5模式则比较准确地模拟出了降水的这一时间分布特征(图略)。

### 2.2.2 700hPa 的环流系统

在控制试验模拟中,西西伯利亚为一低槽,贝加尔湖地区上空为一浅槽,在我国以东为一比较深厚的低压槽。20日08时,在西西伯利亚低压槽外围有小槽分裂东移,到了21日08时,低槽已经移到115°E附近;21日20时,低槽移出大陆,与我国以东的低压槽合并,中高纬度受一致的西北气流控制,这与实况图中环流形势的演变相当一致(图略)。

### 2.2.3 850hPa 的环流系统

初始时刻,在贝加尔湖上空有一中 $\alpha$ 尺度低压槽存在,模拟的中尺度低压同实况一样是随着时间连续向东南偏东方向移动的,并且其在东移的过程中逐渐加深,低压中心12h、24h以及36h的预报误差均在100km以内。从温度场看(图3a),模式准确地模拟出了暖舌出现的时间和位置,它是锢囚锋开始生成的标志,同时两股冷空气的位置和强度模拟的也比较准确。锢囚锋的消失,暖舌的消失也比较准确地模拟出来了。

## 3 锢囚锋的空间结构

### 3.1 水平结构特征

地面锢囚锋形成以后,我们可以看到,对流层低层存在一个比较明显的暖舌与之对应,图3为850hPa高空图,在西路冷空气和暖脊附近为西西北风,在暖脊东侧吹偏南风,而在925hPa(图略)的东路冷空气中吹一致的偏东风,说明本次锢囚锋是两股冷空气相向运动而形成的。从冷空气分布可以看到,东路冷空气比西路冷空气低2~3°C,此时,地面锢囚锋位于109°E附近,位于暖舌以西,锢

囚锋向东倾斜,说明西面冷空气沿东路冷空气向上爬升,形成暖式锢囚锋。另外,我们还可以看到,华北锢囚锋水平方向是呈近于南北走向的,与地形走向比较一致,而与典型锢囚锋的低压中心弯曲的走向明显不同。

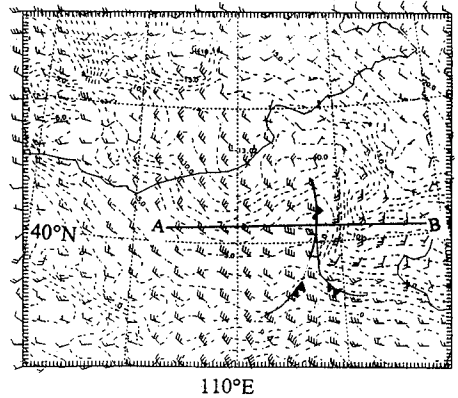


图3 1998年11月21日08时CTRL试验的850hPa高空图

图中虚线为等温线,温度单位为°C,等温线间隔为1°C。  
直线AB为随后的垂直剖面基线

### 3.2 垂直结构特征

21日08时,即锢囚锋达到最强时,沿着垂直于锢囚锋的方向做了剖面图(图4),从分析中可以看出,东西两路冷空气首先在地面相遇,暖空气沿着冷空气上升,在垂直方向形成一漏斗状区域,漏斗状区域从地面一直伸展到约700hPa,其水平宽度约500km;在地面到850hPa层之间形成逆温,暖中心位于800hPa层附近。这些特征与典型温带气旋锢囚锋类似,但在水平尺度上明显要小,东路冷空气中心比西路冷空气中心偏冷7°C左右,冷中心位置东高西低正是地形高度东高西低所致。从沿剖面的风矢量可以看出,偏东风主要是在925hPa以下的近地面层;锢囚锋附近的偏西气流准水平的运动到锢囚锋附近后,沿东路冷空气形成的冷垫倾斜上升,上升气流在650hPa达到最强,强上升区正对应于地面的强降水区。从垂直于剖面的风

速等值线分析可知,锢囚锋东侧是偏南风,其中心位于 800hPa 附近,其风速达  $12.43\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,而其西侧的偏北风也有类似的特征。

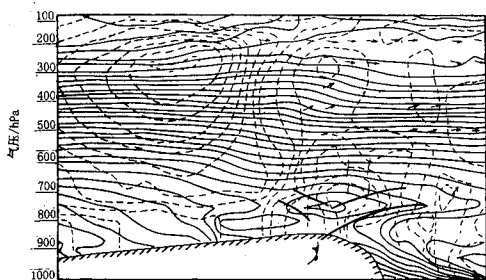


图 4 1998 年 11 月 21 日 08 时沿图 3 中直线 AB 的垂直部面图

图中实线为等温线,等温线间隔为  $2^{\circ}\text{C}$ ;虚线为垂直于剖面的等风速线,其间隔为  $3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;阴影处为地形,粗实线为锋区

#### 4 敏感性试验结果及分析

CTRL 试验与客观分析场两者之间比较一致,为我们进行的 CTRL 与 DRY 和 NOLAND 之间的比较提供了可靠的基础。

##### 4.1 凝结潜热的作用

许多研究表明,温带气旋迅速发展直至锢囚都伴随着气旋北部到东北部大范围的较强降水<sup>[4,5]</sup>,凝结潜热为气旋风暴提供了重要能源<sup>[6,7]</sup>。与温带气旋在锢囚锋形成之前已有大范围降水不同,华北锢囚锋形成之前并没有降水出现,降水是在地面冷空气相遇后(21 日 02 时),在锋面东侧开始出现的;在锢囚锋移至北京西侧结构最明显时(21 日 08 时),最强降水出现。

为了解在这种情况下凝结释热对锢囚锋系统有什么作用。我们进行了一个敏感性试验(DRY)试验(图 5),其中去掉了凝结潜热的加热作用。比较 CTRL 和 DRY 试验的模拟结果可以看出,没有凝结释热的参与,尽管系统位置、风和温度等分布特征比较接近(图 3、5),地面锢囚锋低压系统和 850hPa 锋区短波低压槽减弱的要快一些,这一点可以从

两试验每 3h 预报变量之差的分布来加以说明。在东西两路冷空气相遇前,两试验基本没有差别(图略),而在锢囚锋形成、降水发生之后,差别就显示出来了。可以看到,在大雪降水出现以后(21 日 11 时)(图 6),地面锢囚锋东侧降水区上空,凝结过程加热了对流层中层空气,而冷却了低层空气,这对东路冷空气的变性起到缓解作用。从 CTRL 和 DRY 的 850 hPa 水平风场之差可以看出,凝结潜热也对风场产生了影响,使原低压系统上叠加了一个气旋式环流,即有加速原低层低压环流的作用。从以上分析可以说明,凝结释热过程对锢囚锋的维持起到了作用。

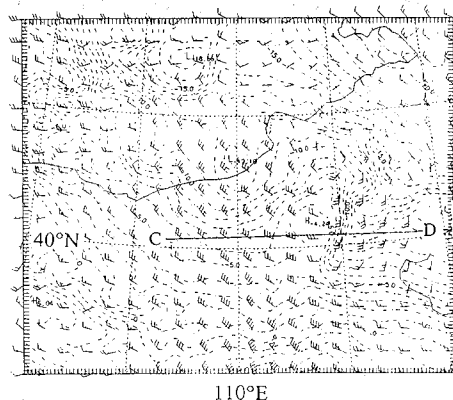


图 5 1998 年 11 月 21 日 08 时 DRY 试验的 850hPa 温度场、风场

图中虚线为等温线,等温线间隔为  $1^{\circ}\text{C}$ ,直线 CD 为随后的垂直剖面基线

##### 4.2 地形对华北锢囚锋的作用

地形对锋面的作用一直是天气学上的一个重要的研究课题,下面就让我们看看在这次锢囚锋形成过程中,地形的作用到底如何。

将太行山削平变为与华北平原同样的高度,预报区域内黄土高原、蒙古高原等其他地形不变,平原(华北)与高原(黄土)结合部在  $110^{\circ}\text{E}$  附近。试验 NOLAND 模拟的东路地面冷高压直接由蒙古东部向南扩,20 日 20 时,低压中心位于  $112^{\circ}\text{E}$  附近,地面锢囚锋位于  $109^{\circ}\text{E}$  附近,对应于 850hPa 有一弱的暖舌

开始出现(图略),比 CTRL 试验早 6h,到 21 日 02 时,弱锢囚锋仍然可见,之后就消失了。查看此时的垂直剖面图(图 7)中可知,在 CTRL 试验中两股冷空气相遇表现出暖空气在漏斗状区域内被抬升的特征,在 NOLAND 试验中明显减弱,西路冷空气减弱明显,因此,锢囚锋结构很弱。从垂直于剖面的等风速线看,锢囚锋东侧低空偏南风 and 西侧偏北风场均弱于 CTRL 试验,减弱了  $3 \sim 5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

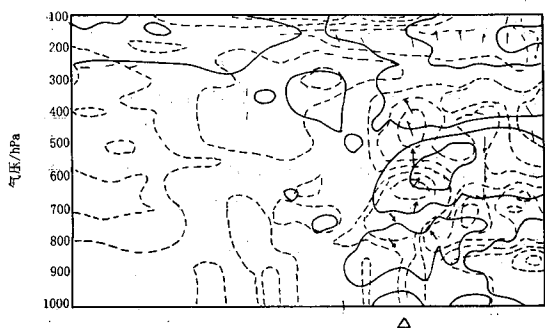


图 6 1998 年 11 月 21 日 11 时沿图 5 中直线 CD 的 CTRL 与 DRY 试验的温度差图

图中实线为温度差的等值线,等值线间隔为  $1^\circ\text{C}$ ;虚线为两者垂直于剖面的等风速差线,其间隔为  $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $\Delta$  所指为最大降水区,阴影处为地形

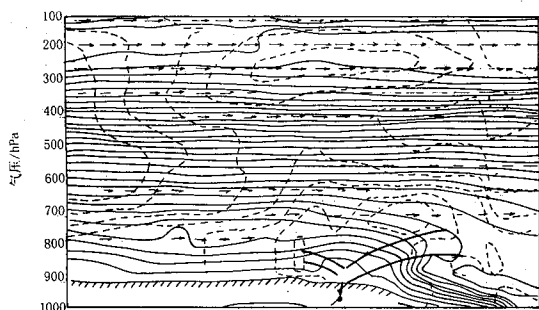


图 7 1998 年 11 月 21 日 02 时 NOLAND 试验的沿与锢囚锋垂直方向的垂直剖面

实线为等温线,等温线间隔为  $1^\circ\text{C}$ ;虚线为垂直于剖面的等风速线,其间隔为  $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;阴影处为地形,粗实线为锋区

锢囚锋在 NOLAND 试验中出现时间偏

早、位置偏西、结构偏弱,这与太行山削平有关。一方面,东路冷空气不受太行山阻挡,回流路径变长,冷空气易变性,使水平梯度减弱;另一方面,东路冷空气不受阻挡,较快地伸到比较偏西位置,而此时,高空锋区上的短波低压槽尚未加深发展到它的最南位置(CTRL 试验中是 21 日 08 时强度最强,位置最南)就与东路冷空气相遇,因而锢囚锋较弱。因此,太行山的存在,对这次华北锢囚锋的出现,起着至关重要的作用。

### 5 总结

经过以上分析,可以归纳以下几点结论:

(1)本次锢囚锋是西路冷空气与东路冷空气相遇时,相对偏弱的西路冷空气沿着东路冷空气垫向上爬升,形成一暖式锢囚锋。其在空间尺度及形成机制上都与经典的锢囚锋有着明显的不同。

(2)潜热释放对锢囚锋的维持是有一定作用的。

(3)去掉太行山,锢囚锋虽能出现,但时间偏早,地点偏西,强度偏弱。太行山的存在,对这次华北锢囚锋的出现起着至关重要的作用。

(4)MM5 中尺度模式是用来研究华北锢囚锋结构和特征的一个比较好的工具。

### 参考文献

- 徐达生. 1956 年 2 月 22~25 日的华北锢囚结构和降水.《天气月刊》,1957,(5):5~10.
- 湖南省岳阳县气象台预报组. 1956 年春季华北地形锢囚锋分析的讨论.《天气月刊》,1957,(5):11~12.
- Xiao qingnong. Distortion and occlusion of cold fronts under the influence of orography. Acta Meteorologica Sinica, Beijing, China, 1994, 8(4):440~449.
- Johnson D. R., and W. K. Downey. The absolute angular momentum budget of an extratropical cyclone: QuasiLagrangian diagnostics 3. MON. Wea. rev., 1976, 104:3~14.
- Kocin P. J., and L. W. Uccellini. Snowstorms Along the Northeastern coast of the United States: 1955 to

1985. Meteor. Monogr. , 1990,22(44):280.
- 6 Dare P. M. and P. J. Smith, A comparison of observed and model energy balance for an extratropical cyclone system. Mon. Wea. Rev. ,1984, (112):1289~1380.
- 7 Chang C. B. ,D. J. Perkey and C. W. Kreitzberg, Latent heat induced energy transformations during cyclogenesis. Mon. Wea. Rev. ,1984, (112):357~367.

## A Numerical Simulation of the Occluded Front in North China

Bian Zhiqiang

(Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University, 210093)

Wang Jianjie

(National Meteorological Center, 100081 Beijing)

Tan Zhemin

(Nanjing University, 210093 Nanjing)

### Abstract

By using the non-static mesoscale model MM5, the forming process of the occluded front in North China during the period of November 20—21, 1998 was numerically simulated. It is shown from the sensitivity tests that the spatial scale of the occluded front in North China is smaller than that of the ideal. The area of precipitation is contact with the character of the occluded front, and the condensed latent heat affect the maintaining of the occluded front in North China. The topography played a determinant role in maintaining the occluded front in North China. If no topography, the occluded fronted which is weaker will form earlier at the western side of normal place.

**Key Word:** occluded front in North China numerical simulation non-static mesoscale model MM5