

# 华北地区一次中- $\alpha$ 尺度强涡旋发展的数值模拟

朱翠娟 张金善 李兴生

(国家气象局气象科学研究所)

## 提 要

本文用 PSU/NCAR-MM4 三维中尺度模式模拟一次华北地区冷锋越过太行山进入华北平原后,中尺度气旋的发展过程及其三维结构。当锋区移过太行山后可以形成若干个中- $\alpha$  尺度涡旋,当涡旋进入华北平原时,涡旋的低层位于干线前缘的湿中心处,同时由于有低层冷空气的侵入,涡旋处在很强斜压状态中。最大正涡度区位于涡旋前部,强辐合是该中尺度系统涡度加强的重要原因。

## 一、前 言

1987年8月25日至27日一次冷锋进入华北平原后在平原地区形成中尺度强涡旋并造成强降水。本文用 PSU/NCAR-MM4 三维数值模式模拟这次过程,研究华北地区强天气过程的某些特征。在26日00时的850hPa图上,从北部大兴安岭经河套至四川盆地为一条SSW—NNE走向的低压带,其上有若干个低涡中心,华北平原处在来自西南的低空急流及东南潮湿气流的辐合区中。河套地区的低涡越过太行山进入京津平原后,低涡明显加深,华北平原中的大暴雨就发生在这个系统中。

8月26日06时有一条SW—NE走向的锋面雨带进入华北平原,之后由带状结构发展为与涡旋相应的一块雨区,强度明显加强。26日00时至27日00时的总雨量大于100mm的大暴雨区分为二个,一个在济南附近,另一个在天津附近。以济南为中心的暴雨区是济南地区近廿年来最大的一次成灾暴雨,范围涉及20多个县,最大暴雨发生在济南市,济南解放桥附近的雨量达340mm,在济南市的西南方还有龙卷出现<sup>[1]</sup>。天津附近的暴雨区其部分伸入到渤海海湾地区,从沿海岸地区的塘沽测得日降水量为170mm,南堡农场的日降水量为190.9mm。有关暴雨的模拟结果参见文献[2],本文着重模拟分析华北地区中尺度低涡发展的三维特征。

## 二、模拟方案的选择

本文采用美国 PSU/NCAR-MM4 三维中尺度套网格模式<sup>[3-5]</sup>。该模式具有多种可供选

择的组合方案,在本模拟中边界层部分采用高分辨边界层模式<sup>[6]</sup>来预告动量、热量和水汽通量的垂直输送,积云对流参数化采用 Kuo<sup>[7]</sup>和 Anthes<sup>[8]</sup>的方案。边界处理采用海绵边界条件:

$$\left(\frac{\partial \alpha}{\partial t}\right)_n = c(n)\left(\frac{\partial \alpha}{\partial t}\right)_{MC} + (1 - c(n))\left(\frac{\partial \alpha}{\partial t}\right)_{LS} \quad (1)$$

其中  $n=1, 2, 3, 4$  代表靠近边界的格点数(其中 1 代表边界),  $\alpha$  代表任一物理变量,下标  $MC$  表示模式计算倾向,  $LS$  表示大尺度倾向,由观测值确定,  $c(n)$  为权重函数。

计算过程中,垂直方向从地面至模式顶分成 10 层,计算区域中心置于  $115^\circ\text{E}, 38^\circ\text{N}$ , 所取格点数为  $28 \times 31$ , 格距为 90km。在模拟区域的中心镶嵌一个细网格区,细网格的中心位置与粗网格中心位置相同,格点数为  $31 \times 31$ , 格距为 30km。粗细网格距的比例为 3:1, 计算的时间积分步长亦为 3:1。计算过程中粗细网格间具有双向互反馈作用<sup>[9]</sup>。即每当粗网格完成一个时间步长的计算后,就向细网格提供一次边值倾向。然后,细网格独立地连续计算三个时间步长,等达到粗网格所具有的时间积分步长时,将粗网格与细网格重合点上的值,用细网格场的 9 点平均值代替。由此达到粗细网格场的互向反馈。

### 三、中尺度强涡旋发展的温湿场结构

在积分初期的等温线基本是 WNW—ESE 走向(图略),随着积分时间的增加,在网格区的中西部从 10 时开始逐渐转为南北向。西部呈现一个暖脊,尤其在太行山地区,等温线几乎与地形等高线相平行且密集。这是大尺度暖脊对本地区的影响以及太行山地区强西北气流沿山下滑所造成的绝热增温共同作用的结果;在平原的中、东部等温线走向少变(如图 1a)。这种温度场分布形势出现的高度较低,仅在 700hPa 及其以下,在 700hPa 以上便逐渐消失,计算区西部的暖脊已明显减弱,尤其在 500hPa 以上等温线分布基本上呈现

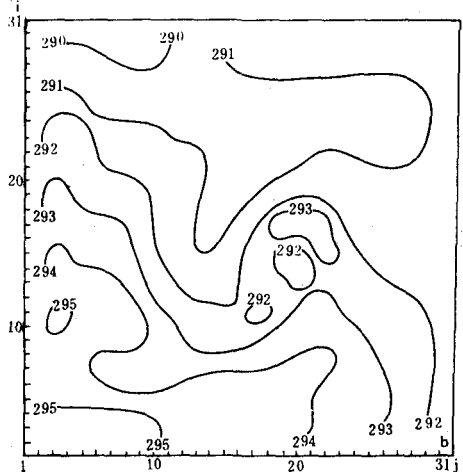
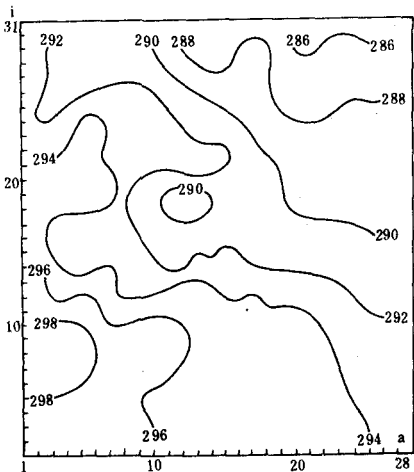


图 1a 1987 年 8 月 26 日 17 时 850hPa 高度粗网格温度场分布(单位:K)

图 1b 1987 年 8 月 26 日 12 时 850hPa 高度细网格温度场分布(单位:K)

一个由西南向东北伸展的弱暖舌。显然,这种热力场结构是与大尺度系统分布一致的。

值得注意,在计算区西部形成明显的暖区时,在低层 850hPa 高度上,一个浅冷舌从东北部向中部伸展,06 时开始在太原附近形成一个几百公里的冷舌,至 12 时已形成 290K 的冷中心,约位于 39°N、115.5°E,尺度仅 300km 左右。为了进一步描述这个浅冷中心的结构,以下给出用细网格计算的 12 时 850hPa 的温度场分布(图 1b)。由图可见,在太行山地区维持一暖脊,而在细网格的中部,温度场上呈现为一个扰动,即沿石家庄至邢台一带,有一个弱冷舌从北向南沿山脚南伸,与沿黄河向东北方向伸展的暖舌交锋,造成冷暖空气交锋的局面。这种弱冷空气有利于对平原中低层对流不稳定大气的触发和对流发展。

图 2 给出 17 时 850hPa 用粗网格计算的相对湿度场。在太行山的西侧为干区,东侧为潮湿区;华北平原低层的相对湿度大于 90%,沿着太行山地形线的东麓是一条等相对湿度的密集带,图上用阴影点标出。这是一条干线,在 700hPa 及 500hPa 的相对湿度场上,干线仍显著。

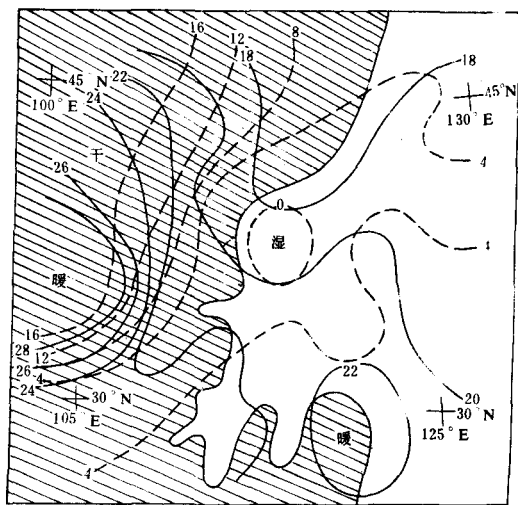
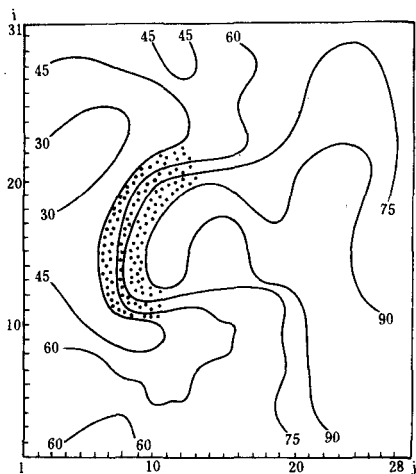


图 2 1987 年 8 月 26 日 17 时 850hPa 用粗网格计算的相对湿度场(%)

图 3 1987 年 8 月 26 日 12 时 850hPa 温、湿场 (实线为等温线,虚线为温度、露点差,斜线区为海拔高于 500 米的山区)

在这次过程中,太行山西侧是强的暖干区,在低层,华北平原的中尺度强低涡正位于干线前缘的湿中心附近,低层有冷空气的侵入,这使低涡地区具有很强的斜压结构。

分析表明,温、湿场的模拟结果与实况能比较好的吻合,我们对实况天气图进行了分析。图 3 便是 26 日 12 时 850hPa 的温、湿分布。由于每天只有两个时次的探空,无法跟踪温、湿场结构的中间演变过程。但从 12 时的图上可以看到,在研究区的西部有一个暖干区建立,暖干区的东缘,即太行山东麓等温线及等湿度线呈准南北分布并密集,形成一条

清楚的干线。太行山东侧的平原中,与一冷舌相配合为一个湿中心。湿中心的位置与中低涡之位置基本一致。观测结果的分析与数值模拟的结果十分相近。

### 四、中尺度强涡旋发展的流场特征

850hPa 初始场上京津平原中的这个中涡旋,其长轴横跨太行山及京津平原约 1 千公里(如图 4a),在它的东南侧为急流区。经过数值积分,环流内部的结构逐渐发生变化,并分裂成两个尺度更小的涡旋。到 08 时,两个小涡旋结构已十分清楚(图 4b),它们的位置与上述低层冷湿中心的位置一致。在以后的十几小时中,它们的位置移动缓慢,强度逐渐加强。积分至 12 和 17 小时(图 4c、4d),北边的涡旋明显加强,中心位置略向东北方向移

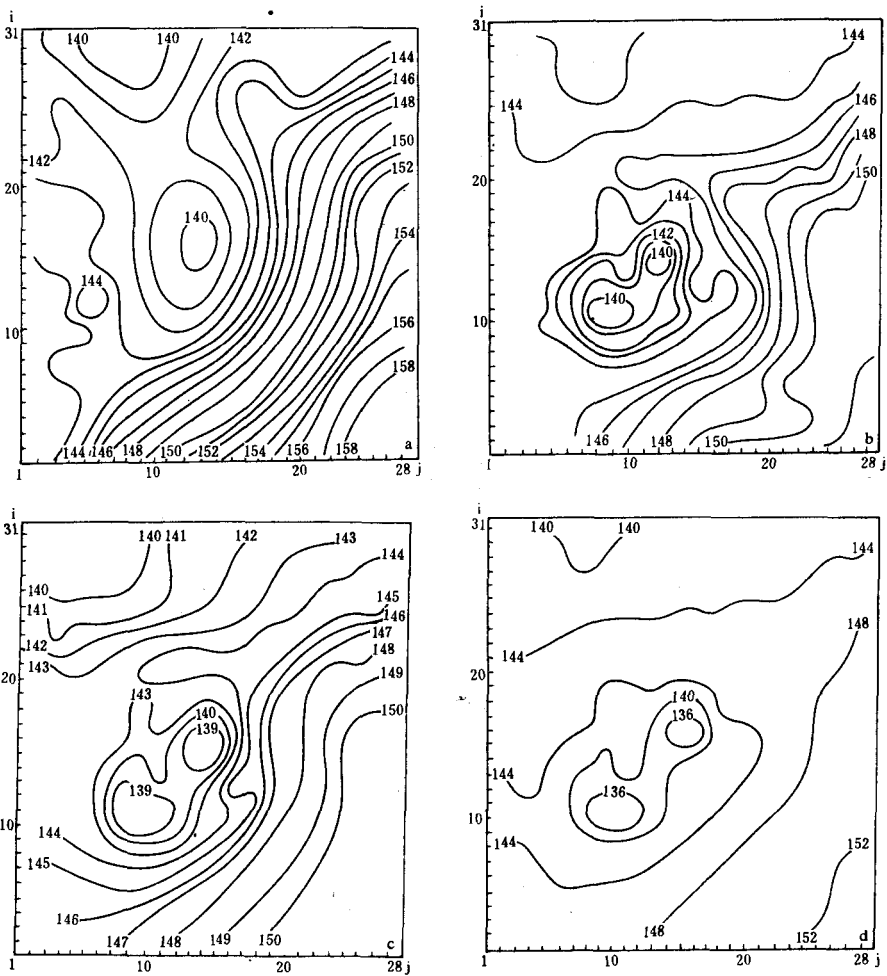


图 4 1987 年 8 月 26 日 850hPa 用粗网格计算的高度场时间演变图(a)初始 00 时高度场分布(位势什米,下同)(b)08 时高度场分布(c)12 时高度场分布(d)17 时高度场分布

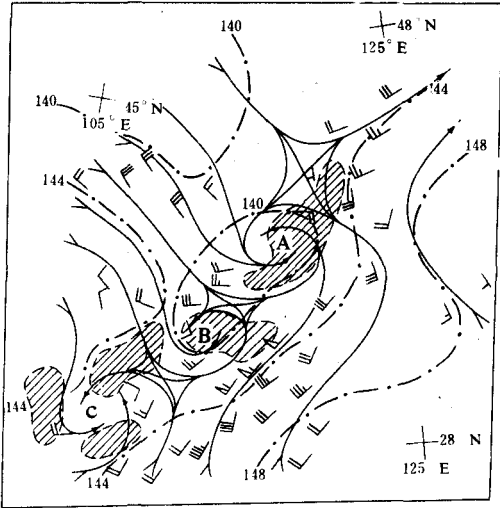


图5 1987年8月26日12时850hPa形势图  
(实线为流线,斜线区为雨区,点划线为等高线)

为了进一步分析中涡旋的发生发展过程,我们根据地方台站的资料(引文[1])可看到,暴雨区内,雨轴的走向是从太行山南端黄河切割山地后的出口处开封菏泽一带往泰山北侧沿黄河谷地呈SW—NE方向伸展。龙卷的移向也是沿泰山北侧山脚由西南向东北方向移动(图略)。为此,我们在下面给出用粗网格计算的一系列风场垂直剖面结构来追逐越山气流的移动路径。其结果也确实证明了它主要是绕道太行山南端黄河河谷经洛阳、郑州、菏泽等地进入平原,沿泰山北侧东去,并逐步影响其北部地区。图6便是风速 $u$ 分量沿 $j=14$ (即大约 $116^\circ\text{E}$ 附近)作的时间剖面。26日02时(图略),在对流层下部 $40^\circ\text{N}$ 附近以及在开封到菏泽一带的黄河河谷平原中分别有两个西风等值线的下凹及密集区。到06时,西风风速密集区开始明显加强,东风的最大风速中心略有加强并北移。08时,上述密集区继续北移且加强并逐步下传。12时(图6)这个密集区达到最强,且西风及地,使原来的东风分裂为两个中心。由于西风动量下传,低层低涡中心加强。这种形势直至21时的图上仍维持。这支沿太行山南端与秦岭北侧间黄河谷地东流的西风气流是切穿山地的最主要的一支气流,当它越山后沿泰山北侧进入平原时,在风场结构上表现出若干个风速等值线密集区。这种动量传递过程中的不均匀性是造成若干个中尺度天气过程的直接原因。

图6给出的风速 $u$ 沿 $j=14$ 的垂直剖面中,位于 $38^\circ\text{N}$ 、 $116^\circ\text{E}$ 附近的中尺度涡旋在发展过程中的中层风向具有明显的切变,中低层为偏东气流,而高层为偏西气流。这种垂直方向的东风切变带在南北方向的宽度只有500—800km。从风速 $u$ 分量的东西方向 $i=17$ 垂直剖面图(图7)可以看到,上述的中层风向垂直切变的東西方向范围更宽。在模拟区域内这个南北宽度只有几百公里。东西范围较长的风向垂直切变的狭长带将给中尺度涡旋提供强烈的动力不稳定能量。

通过涡旋中心所作的南北和东西方向的垂直剖面,可以看出,在涡旋区有很强的斜压

动。这个涡旋积分24小时的结果中仍能看到。涡旋的水平尺度大约400—500km,属中- $\alpha$ 尺度系统。模拟结果中的两个中- $\alpha$ 尺度系统在实测风场中依然可以分析出来。我们作了一张850hPa形势图(图5),阴影区为日雨量大于10mm的雨区,此外还标明了风箭头。可以看到在一个140位势什米等高线的闭合环流圈中,风向环流有两个明显的气旋性环流圈A和B,并且有两片雨区与之相配合。与环流A相配合的雨区强度很大,中心最大日总量达340mm,与环流B相配合的雨区强度比较小,中心最大日总雨量为37mm。观测结果提供了进一步的事实。即在8月26日16时10—30分之间,济南市西南方观测到龙卷的产生,龙卷的移向为西南—东北向,龙卷从发生到发展最强约半小时左右。

性,水平温度梯度很大(温度等值线间隔为 5K),约 10K/450km(图略)。

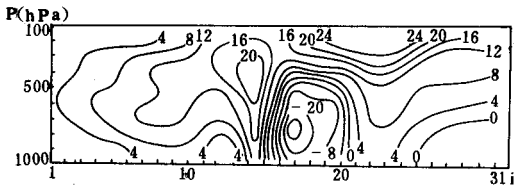


图 6 1987 年 8 月 26 日 12 时用粗网格计算  
风速  $u$  分量的南北垂直剖面(单位: m/s)

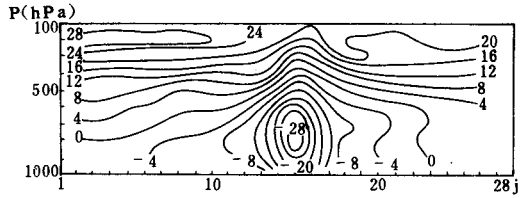


图 7 1987 年 8 月 26 日 15 时用粗网格计算的  
风速  $u$  分量时的东西垂直剖面(单位: m/s)

### 五、物理量场特征

中尺度涡旋的形成和发展与涡度场和散度场的分布有密切关系。我们用粗细网格计算了涡度和散度场的时空分布,发现与上述中尺度涡旋相配合的涡度场和散度场随着模式的积分时间而增强,至 17 时达最强,且在结构上出现显著的变化,正涡度区和辐合区逐渐变成长条形,并分裂成两个中心。图 8a 是用细网格计算的 15 时 850hPa 上的涡度场分布。中尺度涡旋的中心位置在细网格区位于  $38^{\circ}\text{N}$ 、 $116^{\circ}\text{E}$  附近,与之相配合的正涡度区分为两片:一个在涡度中心的西北方,另一个在其东南方。后者强度更大,其最大中心值达  $6.3 \times 10^{-5}\text{s}^{-1}$  (17 时最大中心达  $7.0 \times 10^{-5}\text{s}^{-1}$ )。有意思的是,与正涡度区相配合,在其相邻侧存在一对中尺度负涡度区。在 200hPa 上的涡度场分布,它和低层有类似的正负涡度区成对结构。但值得指出的是,在低层中心值较大的正涡度区的高层恰是一个与之配合的负涡度区,其中心值达  $-5.4 \times 10^{-5}\text{s}^{-1}$ 。17 时以后涡度区强度逐渐减弱,中心向东北方向缓慢移动。

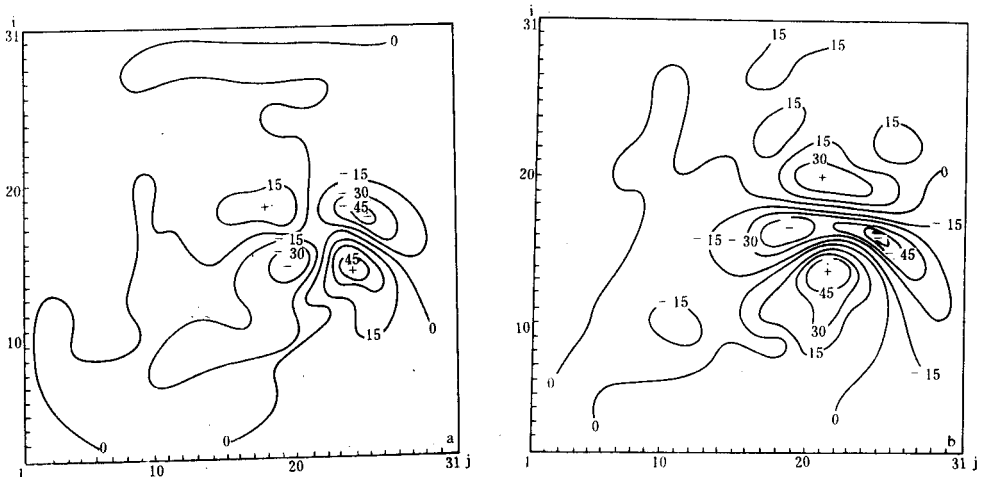


图 8 1987 年 8 月 26 日涡度和散度分布( $10^{-5}\text{s}^{-1}$ )

(a)850hPa15 时细网格区涡度场分布 (b)850hPa15 时细网格散度场分布

图 8b 给出 15 时 850hPa 上细网格区散度场的计算结果。与中尺度涡旋中心相配合的辐合区成长条形分布并分裂成两个中心,分别位于低涡中心的东、西两侧。且东侧的辐合

中心的强度较西侧大,中心值达  $5.6 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ 。与涡度场有相类似的水平结构,在辐合区的相邻侧是一对辐散区。这是质量连续的结果。辐合区的长轴在低层呈东西向,至高层呈西北—东南向。由此,形成低层强辐合高层强辐散。200hPa 高度上与之配合的辐散中心达  $4.3 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ 。

对照 850hPa 上的涡度分布与散度分布可见,强辐合中心位于强正涡度中心的东北方向约 70—80km 处,即对流层低层的强辐合中心正处在强正涡度中心的前方。这样的散度场结构对局地涡度的加强和发展是十分有利的。从涡度方程出发:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \zeta}{\partial t} = & -m(u \frac{\partial \zeta_a}{\partial x} + v \frac{\partial \zeta_a}{\partial y}) - w \frac{\partial \zeta}{\partial p^*} - \zeta_a D \\ & - m(\frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial p^*} - \frac{\partial w}{\partial y} \frac{\partial u}{\partial p^*}) \end{aligned} \quad (2)$$

其中

$$\zeta_a = \zeta + f$$

$$D = m^2[\frac{\partial}{\partial x}(\frac{u}{m}) + \frac{\partial}{\partial y}(\frac{v}{m})]$$

除涡度平流项外,散度项和扭转项是使中尺度正涡度加强的重要因素。以上的计算表明,散度项使低层产生正涡度,上层形成负涡度,它加强了中尺度涡旋的发展。另外,中尺度涡旋的正涡度区正处在泰山北侧的平原中,西南气流沿黄河谷地向东北方向进入华北平原时,与平原中的偏东气流之间形成强的气旋性切变。而且中涡旋东南侧是一支较强的低空急流。所以扭转项同样十分有利地支持了低层正涡度的发展。计算结果还表明,这类中尺度涡旋系统在发展强盛时期,不仅垂直结构深厚,而且水平辐合辐散梯度很大。济南地区的大暴雨和龙卷就产生在上述正涡度区内。

## 六、结 语

1. 与大尺度冷锋相伴随的中气旋越过太行山时,受地形的影响结构发生明显变化,中心产生分裂。太行山西侧是很强的暖干区,与太行山东麓地形走向相一致形成一条很强的干线,两侧高低湿度中心分明,两中心相距仅 500—600km。

2. 在华北产生大暴雨的中- $\alpha$  涡旋,其低层位于干线前缘的湿中心区,同时受 700hPa 以下低层冷空气的侵入,低涡地区加强了动力不稳定性。

3. 越山气流在低层首先沿切割山地的河谷进入华北平原,这种气流在风场垂直剖面上使低涡的结构具有若干个风速等值线密集区,由此,造成动量传递过程中的不均匀性而导致若干个中尺度天气过程。

4. 中- $\alpha$  涡旋位于风向垂直切变很强的狭长带区,涡旋区具有很强的斜压性,水平温度梯度很大。

5. 低层正涡度区与中- $\alpha$  涡旋相配合,最大涡度中心位于涡旋区的前方,低层的强辐合中心处在强涡度中心的东北方,强辐合是该中尺度系统涡度加强的重要因素。低层正涡度中心的高层是一个与之相配合的强辐散区。

致谢:本文承陶诗言,周秀骥、丁一汇教授提出宝贵意见。\*美国国家大气研究中心(NCAR)的 Dr. Kuo Yinghua 和 Dr. Zhang Daling 在本模式的应用过程中给予很大帮助,作者深表谢意。

### 参 考 文 献

- [1] 朱官忠、李性真,气象,14,30—34,1988。
- [2] 朱翠娟、李兴生、瞿渊舟、周秀骥,“87.8”济南地区特大暴雨的中尺度数值试验,科学通报,20,1561—1564,1989。
- [3] Anthes, R. A., Hsieh Eirh-Yu, and Kuo Ying-hua, NCAR Technical Note, NCAR/TN-282-STR, pp. 66, 1987.
- [4] Anthes, R. A., and T. T. Warner, Development of hydrodynamic models suitable for air pollution and other mesometeorological studies, *Mon. Wea. Rev.*, **106**, 1045—1078, 1978.
- [5] Warner, T. T., R. A. Anthes, and A. L. McNab, Numerical simulations with a three-dimensional mesoscale model, *Mon. Wea. Rev.*, **106**, 1079—1099, 1978.
- [6] Da-Lin Chang and R. A. Anthes, A high-resolution model of the planetary boundary layer sensitivity tests and comparison with SESAME-79 data, *J. Appl. Meteor.*, **21**, 1594—1609, 1982.
- [7] Kuo, H. L., Further studies of the parameterization of the influence of cumulus convection on large scale flow, *J. Atmos. Sci.*, **31**, 1232—1240, 1974.
- [8] Anthes, R. A., A cumulus parameterization scheme utilizing a one-dimensional cloud model, *Mon. Wea. Rev.*, **105**, 270—286, 1977.
- [9] Da-Lin Chang, Ph.D. Thesis, Nested grid structure and evolution of the Johnstown flood of July 1977, 1985.

## A THREE DIMENSIONAL NUMERICAL MODELING FOR THE DEVELOPMENT OF A MESO- $\alpha$ SCALE STRONG VORTEX IN NORTH CHINA

Zhu Cuijuan Zhang Jinshan Li Xingsheng

(Academy of Meteorological Science, SMA)

### Abstract

When a cold front passes through the Taihang mountain down to the north China plain, it is found that there are several meso- $\alpha$  scale vortexes occurred in the frontal zone at the same time. The developing process and the 3-dimensional structure of a mesoscale cyclone have been simulated using a 3-dimensional numerical model. The vortex in the lower troposphere is located at the moisture center in front of the dry line, where exists a strong dynamic instability and baroclinic. The maximum positive vorticity center occurs in the ahead of the vortex. The intensification of the mesoscale vortex caused by the strong convergence is an important role of heavy rainfall in summer.