

# 长江中下游中尺度云团演变过程的数值模拟

何溪澄\*                  党人庆

(南京大学大气科学系)

## 提 要

本文用中尺度五层原始方程模式,模拟了长江中下游中尺度云团的生成、强盛和减弱。结果表明,由这个模式,用实测大尺度资料,可以模拟出伴有暴雨的云团演变过程。

此外,对于原模式作了一些改动,加进了地形作用。与无地形的数值试验相比,地形作用有利于在长江中下游形成一条近于东西方向的切变线,对系统的发展有促进作用。

## 一、引 言

中尺度云团是夏季江淮流域的主要暴雨系统之一<sup>[1]</sup>,由于常规资料的时空密度不足,以及该系统的中尺度环流易被大尺度环流背景掩盖等原因,给研究工作和业务预报带来一定的困难。近年来, Akiyama<sup>[2,3]</sup>综合利用卫星、雷达和探空等资料,详细分析了云团的演变过程和中尺度结构,认为云团是由一些云胞组成,每个云胞又含有几个对流核,并指出大气的斜压性是梅雨锋上中间尺度扰动发展的基本因子。夏大庆和郑良杰<sup>[4]</sup>从大尺度背景场出发,适当增加低空湿度,模拟出了江淮气旋暖区里的中尺度对流系统,他们认为这种中尺度系统发生在位势不稳定能量不断得到补充,位势不稳定层结能够经常得到恢复的地方。上述工作中,都认为这类系统在尺度上往往达不到 Maddox<sup>[5]</sup>对于美国 MCC 的定义,但在结构上与 MCC 很相似。

本文以 1982 年 7 月 18—19 日皖苏中部一次暴雨过程为例,说明伴有暴雨的中尺度云团系统虽然在常规天气图上难以反映出来,但还是可以完全用实测常规资料(对湿度场不作改动)由数值模式预报出生成和发展。并通过有无水汽以及有无地形的对比试验,说明大气的斜压性,潜热释放以及地形等是系统生成与演变的基本因子。并用滤波等方法研究了中尺度环流的结构。

## 二、模式及计算方案

本文采用周晓平等<sup>[6]</sup>五层中尺度模式,水平格距为 100 公里,计算区域为 99—130°E, 20—40°N,共 30×24 个水平格点。采用海绵边界条件,对流参数化取郭晓岚方法。初始值用欧洲中心分析的 2.5°×2.5°的网格点资料由两维拉格朗日插值得到(包括高原和

本文 1987 年 4 月 17 日收到,6 月 28 日收到修改稿。

\* 南京大学研究生

海洋)。

为了便于检验地形作用,对原模式作了一些改动,其中地面气压用样条插值得到,气压梯度力的计算采用钱永甫<sup>[7]</sup>的方法,即:

$$PG = \nabla_{\sigma} [\phi - R(T + \frac{\gamma}{2} \ln \frac{P_0}{P}) \ln \frac{P_0}{P}] \quad (1)$$

其中  $\gamma$  为温度递减率,  $\phi$  为位势高度,  $P_0$  为中央差的中心点气压,其它均为气象上常用符号。

模式的基本方程组为

$$\frac{\partial U}{\partial t} + L(u) = fV - \frac{P_2}{m} f v_r + \frac{P_2}{m} F_r \quad (2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + L(v) = -fU + \frac{P_2}{m} f u_r + \frac{P_2}{m} F_r \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_2 C_p T}{\partial t} + L(C_p T + \phi) = & -\frac{1}{m} \frac{\partial \sigma \phi \partial P_2}{\partial \sigma \partial t} + (U f v_r - V f u_r) \\ & + \frac{P_2}{m} C_p T + \frac{P_2}{m} L Q_n \end{aligned} \quad (4)$$

$$\frac{\partial P_2 q}{\partial t} + L(q) = \frac{P_2}{m} \dot{Q} + \frac{P_2}{m} F_r \quad (5)$$

$$\frac{\partial P_2}{\partial t} = \frac{-1}{1 - \sigma_r} \int_{\sigma_r}^1 m^2 (\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y}) d\sigma \quad (6)$$

$$\frac{\partial W}{\partial \sigma} = -\frac{1}{m} [m^2 (\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y}) + \frac{\partial P_2}{\partial t}] \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial \phi}{\partial \ln \sigma} = -R \frac{\partial T}{\partial t} \quad (8)$$

其中  $\sigma = P/P_0$ ,  $P_0$  是地表气压,

$$(U, V, W) = \frac{P_2}{m} (u, v, \dot{\sigma}) \quad (9)$$

$$L(A) = m [\frac{\partial}{\partial x} (AU) + \frac{\partial}{\partial y} (AV)] + \frac{\partial AW}{\partial \sigma} \quad (10)$$

$A$  是任一物理量,  $F$  是湍流交换项,  $Q_n$  是非绝热加热,  $\dot{Q}$  是水汽凝结。其它都是气象常用符号。

表 1 试验的四种方案

代号	特点	模式积分时间
A	无地形,有水汽,未改动的原模式	24 小时
D	无地形,无水汽,未改动的原模式	24 小时
T	有地形,有水汽,改动后的模式	24 小时
H	无地形,有水汽,改动后的模式	24 小时

以北京时 7 月 18 日 20 时为模式起始时刻,我们试验了四种方案(表 1)。在本文所采用的模式中,没有包含大气辐射过程和云的影响。主要原因是使计算量不很大,以便逐

步与实用相结合。此外,在中尺度模式中考虑这两种作用的并不多,例如,在美国的 Anthes—Warner<sup>[8]</sup>的模式中,也没有包含这两个因子。

### 三、模拟结果分析

#### 1. 云团过程概述及 A 方案的结果

图 1 是 1982 年 7 月 18 日 20 时至 19 日 20 时的卫星云图(素描)。在 18 日 20 时,仅在 115°E 以西有一些分散的对流云块。至 19 日 05 时,这些云块迅速聚集增长,19 日 08 时至 14 时达到最强。19 日 20 时,云团内的中  $\beta$  尺度云胞已散开,外形由椭圆形变成带状,显示这系统开始减弱。整段时间长江中下游普降暴雨。

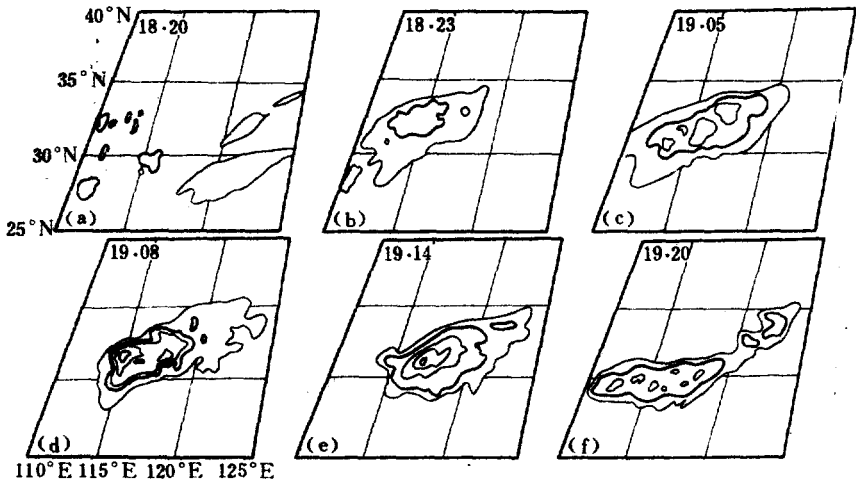


图 1 增强显示的红外云图(素描)。图左上角为日与时。  
经纬度都与图 1(a,d)上所注相同。

在 18 日 20 时至 19 日 20 时这段时间内,大尺度场变化较小(图略)。图 2 是用 A 方案由 18 日 20 时预报 19 日 08 时的场(简称为 A12,下类同)。与实况<sup>[注]</sup>相比,可以看出,200hPa 反气旋轴线和 500hPa 短波槽位置都模拟得较好,850hPa 切变线已基本模拟出,但低空急流中心及位于河套的小低压没有能模拟出来。由于初始场上西边界 30°N 附近低空接近饱和,可能因为固定边界使它作为一个水汽源不断地向东输送,在四川盆地辐合使大量潜热释放以致形成一个虚假低压。与 19 日 08 时实况场一样,在 A12 场中,中尺度云团系统也仅表现为大尺度背景中的一个不明显的扰动。因此,需要利用带通滤波把中尺度场分离出来。

[注]:因缺少 08 时欧洲中心网格点资料,这里的 08 点实况都是用探空资料经模式初始化得到的值。

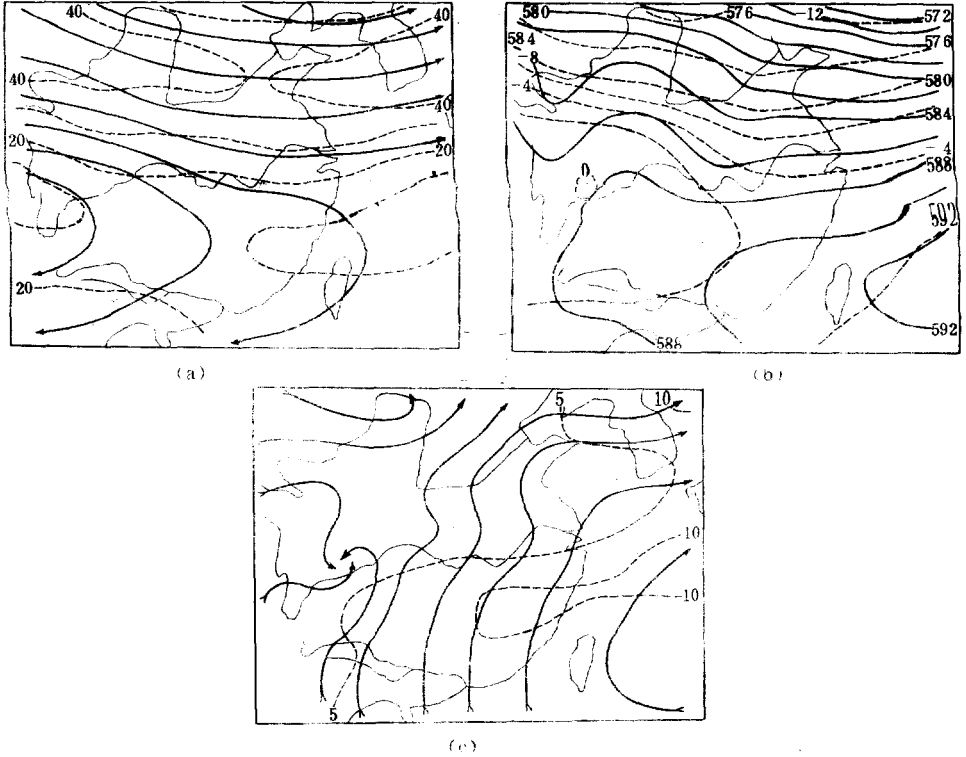


图 2 a, b 与 c 依次为用 A 方案作 12 小时数值试验得到的 200hPa 流场 (虚线为等风速线, 实线为流线), 500hPa 高度及温度场, (实线为等高线, 虚线为等温线), 850hPa 流场 (说明同 a)。

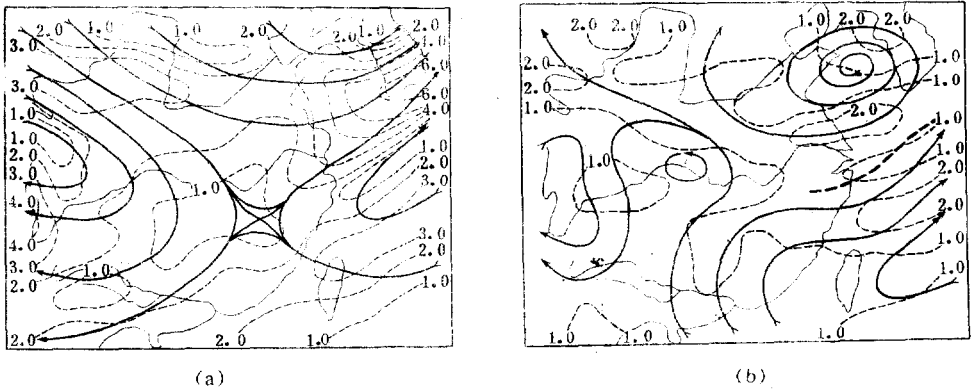


图 3 带通滤波初始场的流线(实线)与等风速线(虚线)  
(a)200hPa, (b)850hPa

取党人庆<sup>[9]</sup>采用的滤波方法, 考虑到初始场和预报场都进行过平滑处理, 高频波在原始场 (指未进行滤波处理的场, 下同) 中已不存在。我们用原始场减第 2 次滤波场代替常用的第 1 次滤波场减第 2 次滤波场。图 3 为模式初始时刻 200hPa 与 850hPa 滤波后的风场。与原始场相比, 200hPa 上的南亚高压分开成两个中心, 850hPa 上的副高, 华北高压以及两高之间的切变线更为清楚, 与卫星云图 (图 1a) 上的一些分散云块对应着在

850hPa 上有一个很弱的中低压, 长江中下游区域在高空与低空都没有明显的辐散与辐合中心。

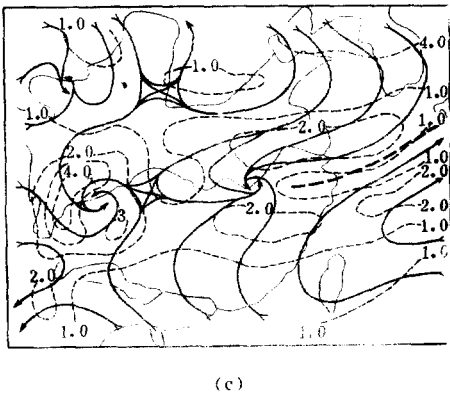
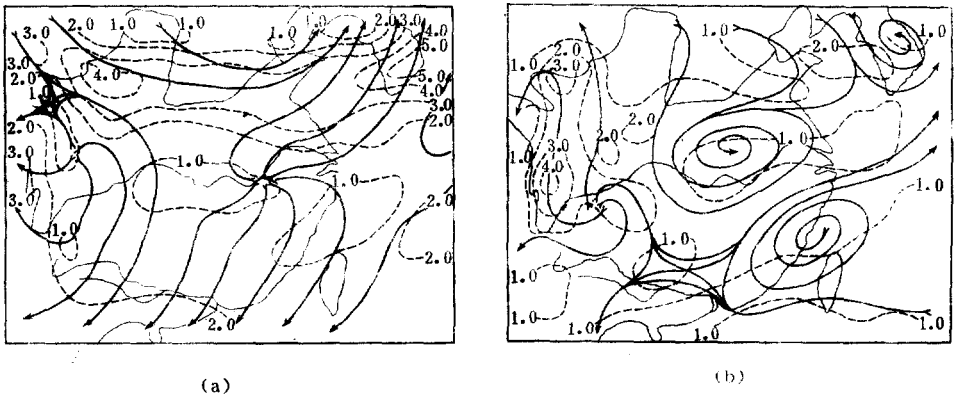


图 4 a, b 与 c 依次为用 A 方案积分 12 小时 200hPa, 500hPa, 850hPa 滤波后的流场。(虚线是等风速线)

图 4 是用 A 方案积分 12 小时的 200, 500, 850hPa 滤波后的流场, 它们与同时时间实况值滤波后的流场(图略)很接近。从而说明, 可以由前期的常规实测资料用本文采用的模式模拟出这个云团的生成和发展。它的中尺度环流场表现为高层是反气旋式辐散, 低层是气旋式辐合, 500hPa 是辐合辐散耦, 这与 Cotton<sup>[10]</sup>以及 Akiyama<sup>[4]</sup>的结论是一致的。图 4 还表明, 虽然云团的范围不算大, 但与它相联系的辐合与辐散气流却覆盖较大的范围。这也可能意味着这种中尺度系统的形成在较大程度上依赖于大尺度温、压、湿场的配置, 依赖于大气内部的非线性与非绝热物理过程。

在 A12 场滤波后的 200 与 850hPa 上, 在系统中心附近的散度依次为  $1.15 \times 10^{-5}$  与  $-1.04 \times 10^{-5}$  秒<sup>-1</sup>, 与其对应的实况值为  $3.07 \times 10^{-5}$  及  $-1.84 \times 10^{-5}$  秒<sup>-1</sup>, 可见在数量级上是一致的, 但数值上还是较小, 可能由于中尺度云团系统的演变过程相当复杂的缘故。

## 2. 潜热的作用以及湿减干分析

凝结潜热释放在中尺度对流系统发生发展中的重要性, 至今已有许多讨论<sup>[11,12]</sup>。他们认为对非绝热加热的静力调整产生出对流层低层的中低压与高空的中高压。在本文 D12, 即不计水汽的试验(图略)中, 没有能模拟出低层辐合气流, 高空辐散也比 A12 场弱得多(见表 2)。为了看出潜热效应, 我们采用 Maddox<sup>[13]</sup>湿模式场减干模式场的分析方法。图 5 是 A12(湿)减 D12(干)的 200hPa 及 850hPa 风场图。与图 4 相比, 在图 5 中同

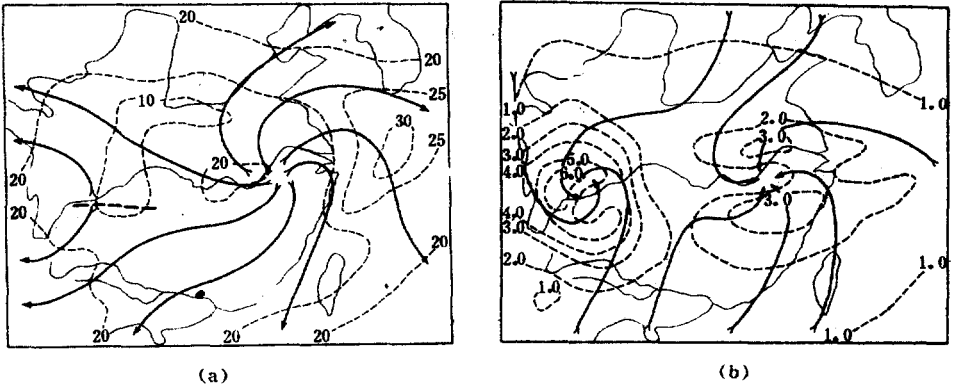


图5 (a)与(b)依次为200与850hPa湿A12减去干D12的流线及等风速线(虚线).

样能较好地把中尺度云团的流场呈现出来。由此可说明凝结潜热在模拟中尺度云团中的重要性。

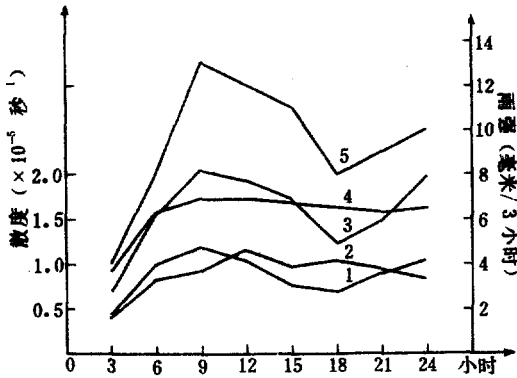


图6 模拟24小时中,系统的高低空散度以及雨量(曲线5)的变化。

模拟的后12小时,高层散度缓慢下降,低层辐合值呈起伏变化,对应的实况是云团系统维持与开始减弱。

(3)降水曲线5与850hPa散度曲线同位相,意味着降水量的大小与低层辐合的关系密切。

### 3. 地形的作用

观测事实表明,美国的MCC和我国的中尺度云团多发生在大地形的东侧。Cotton等<sup>[14]</sup>详细分析了山脉对一个长生命史MCC生成与发展的影响。胡伯威<sup>[15]</sup>研究了青藏高原对其下游中尺度对流系统可能起的作用。因此,本文用实例就地形对于模拟云团系统的影响作一些初步研究。

为了便于看出在模拟的24小时中系统的演变情况,图6绘出系统中心附近滤波后(曲线1与2依次为用A方案模拟并滤波后的850hPa辐合与200hPa辐散)以及湿减干(曲线3与4为湿减干的850与200hPa散度)两种方法所得的散度极值随时间演变,可以看出:

(1)两种方法得到的演变曲线中,升降趋势相似。滤波得到的值小于湿减干的值,这在一定程度上反映出滤波对中尺度分量也有削弱作用。

(2)模拟的前12小时,高低层散度增长,对应的天气系统实况是云团加强(见图1a至

1c)。

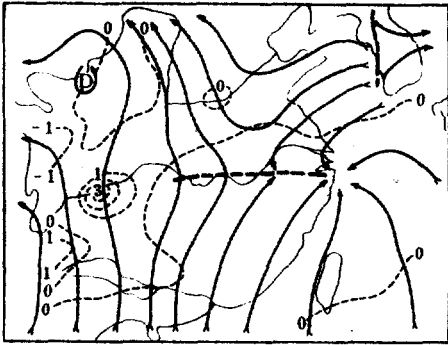


图7 850hPa有地形的12小时模拟场T12减去无地形的H12的流场(实线)与散度(虚线)。

可以看出,地形有助于在长江中下游模拟出一条近于东西向的切变线。它在 $115^{\circ}\text{E}$ 以西表现为暖式切变,以东为辐合带,在辐合带上还有弱辐合中心。在散度场上也可看出,地形有利于中尺度云团的发展。另一方面,地形对四川盆地的虚假低压具有较明显的抑制作用。可能由于如前面已提及的,该低压是由潜热释放引起,现在考虑地形后,使等 $\sigma$ 面上抬,也使高空上层大气的含水量减少,释放的潜热相应减少,抑制了虚假低压。

滤波后的T12风场(图略)与A12场(图4)相仿,但高低层的散度中心值都有一些增强(见表2)。在表2中,列出了四种数值试验方案在系统中心附近的一些物理量的12小时预报值及实况。

表2 五种情形中一些物理量的极值

	200hPa 辐散 ( $10^{-3}\text{秒}^{-1}$ )	850hPa 辐合 ( $10^{-3}\text{秒}^{-1}$ )	500hPa 垂直速度 ( $10^{-3}\text{百帕}\cdot\text{秒}^{-1}$ )	850hPa 比湿 (克/千克)
A12(湿模式积分12小时)	2.12	-1.37	-7	14
D12(干模式积分12小时)	0.97	近于零	-1	0
T12(有地形积分12小时)	2.96	-1.65	-8	14
H12(无地形,用改动的方案)	2.38	-1.41	-7	14
实况(19日08时)	4.47	-2.30	-10	14

#### 四、小 结

由上述四个试验,可归结出下列几点:

(1) 用格距为 $2.5^{\circ}\times 2.5^{\circ}$ 的大尺度实际资料经插值后作为初始值,由本文采用的模式能较好地模拟出一定类型的中尺度云团系统的演变。

(2) 滤波能把中尺度云团系统从原始场中分离出来。另一方面,由于潜热释放有较明显的作用,湿减干场也能较清楚地显示出云团系统。

(3) 中尺度云团系统在高层表现为反气旋式辐散气流,低层为气旋式辐合气流,在500hPa上为一辐合辐散耦。

(4) 滤波和湿减干的散度随时间变化表明,系统在生成与增强阶段,高低层散度的绝

对值都迅速上升,红外云图上白亮区的面积也迅速增长。在强盛阶段,高层辐散值稳定或缓慢下降,低层辐合值呈波状起伏变化,红外云图上白亮区面积维持少变。

(5)地形对系统的生成与发展有促进作用,它有利于在长江中下游地区上空形成一条近于东西方向的切变线。

本文用实例对长江中下游中尺度云团的影响因子作了初步研究,但还有一些问题需今后解决。如上述第4点,在系统达到强盛后,低层辐合值呈波状变化,是什么原因引起的。再如边界层对中尺度是有影响的,如何在模式中进一步考虑边界层的作用,而又不使整个计算时间太长,以便逐步与业务短时预报相联系,这些问题,都有待以后研究。

致谢: 本文工作得到陶诗言先生和周晓平,钱永甫,倪允琪等同志的关心和提供宝贵意见,作者谨表衷心的感谢。

### 参 考 文 献

- [1] 陶诗言等,中国之暴雨,科学出版社,1980年。
- [2] Akiyama, T. A medium-scale cloud cluster in a Baiu front, Part I., *J. Met. Soc. Japan*, **62**, 485—504, 1984.
- [3] Akiyama, T. A medium-scale cloud cluster in a Baiu front. Part II., *J. Met. Soc. Japan*, **62**, 505—521, 1984.
- [4] 夏大庆, 郑良杰, Numerical simulation of the generation of mesoscale convective systems in large-scale environment. *Adv. Atm. Sci.*, **3**, 360—370, 1986.
- [5] Maddox, R. A., Mesoscale Convective Complex. *Bull. A. M. S.*, **61**, 1374—1387, 1980.
- [6] 周晓平等, 细网格天气数值模式的说明, 大气物理研究所, 油印本, 1985年。
- [7] 钱永甫, A five-layer primitive equation model with topography. 高原气象, **4**, 2(增刊), 1985.
- [8] Anthes, R. A., and T. T. Warner, Development of hydrodynamic models suitable for air pollution and other meteorological studies. *Mon. Wea. Rev.*, **106**, 1045—1078, 1978.
- [9] 党人庆, 中尺度滤波方法及其对中间尺度云团分析的初步应用, 气象科学, 9—13, 1984.
- [10] Cotton, W., et al., A long live mesoscale convective complex. Part II., *Mon. Wea. Rev.*, 1919—1937, 1983.
- [11] Fritsch, J. M. et al., Numerical prediction of convectively driven mesoscale pressure system. II., *J. Atm. Sci.*, **37**, 1734—1762, 1980.
- [12] Houze, R., Cloud clusters and large scale vertical motions in the tropics. *J. M. S. Japan*, **60**, 396—410, 1982.
- [13] Maddox, R. et al., Evolution of upper tropospheric features during the development of a MCC. *J. Atm. Sci.*, **38**, 1664—1674, 1981.
- [14] Cotton, W., et al., A long live mesoscale convective complex. Part I. *Mon. Wea. Rev.*, 1893—1919, 1983.
- [15] 胡伯威, 对我国梅雨天气尺度系统的一些认识, 气象科技, 第2期, 1986年。



**NUMERICAL SIMULATION OF THE EVOLUTION OF  
A MESOSCALE CLOUDCLUSTER OVER THE MIDDLE  
AND LOWER REACHES OF THE CHANGJIANG RIVER**

He Xicheng Dang Renqing

*(Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University)*

**Abstract**

A five level mesoscale primitive equation model has been used to simulate the initiation, mature and weakening stages of a mesoscale cloudcluster over the middle and lower reaches of the Changjiang River in 1982. The results show that the evolution of the cloudcluster with heavy rainfall can be simulated by this model with observed large scale regular data.

Furthermore, the model has been modified to incorporate the orographic effects. In comparison to the numerical experiment without terrain influences, the orographic effects in the model would contribute to the formation of E-W shear line and promote the development of the cloudcluster.