

# 云系模式研究:云场的宏微观结构模拟\*

许焕斌

(北京应用气象研究所,北京,100029)

## 摘 要

用计算物理方法设计构造了一个云系模式,并用一个实例作为初始场进行了模拟,模拟的云场宏观特征与实况观测比较一致,微观结构比较合理,配套的模式输出数据处理和绘图程序包能给出云系的点(粒子谱)、线(垂直廓线)、面(结构剖面)、体(云场,云型,云量,云系形状)的多维宏微观结构的云场图象。

**关键词:** 云场,云系模式,宏微观结构,数值模拟。

## 1 前言

云场的宏微观结构,是航空、航天活动和大气辐射传输、酸雨形成的环境条件,如何正确地掌握云场,具有十分重要的实用意义和理论价值。云场的宏观结构常指一定天空的三维分布(云量,云厚),云的性质(积状,层状,层积状),外形特征(带状,团状,波状,涡状,螺旋状)等,云的微观结构是指组成云粒子群的相态、比含量、比浓度、形状特征、粒子谱分布等。为了描述这些场的结构,需要给出某点的某种粒子的谱分布,某垂直线上的含水量分布廓线,某面上的参数结构,和云体的空间图象,再加上它们随时间的演变,需要云系模式提供点、线、面、体和时变的四维产品体系。

近年来,云场的模拟研究已开始起步,例如,Smolarkiewice 等<sup>[1]</sup>,Proctor 等<sup>[2]</sup>。但这些工作都只着重于云的宏观特征,并未注重描写云的微观结构。并重宏微观结构,且把两者作为一个整体来考虑,针对给定的动力框架,探索两者之间的相互作用的本质性特点,应是进行云场模拟研究的方向。这是由于云系的结构,主导因素是支撑云生成、演变、移动、维持的大气动力和热力条件,而云的微结构又依赖于具体的云-降水微物理过程;从另一方面来说,微物理过程中哪些过程得以激发和运行依赖于宏观大气背景,反过来微观过程在这一条件下对背景尺度动力、热力状态又有反馈作用。由此而知,云场的模拟需要依托一个相互耦合的动力-云物理模式系统,本文首先致力于建立具有描述云场功能的模式,并对一个实例进行了数值模拟试验。

## 2 模式

云场泛指云群或与天气系统相伴的系统性云系。这里关心的是云系,尺度在千公里范

\* 1993年5月27日收到原稿,1993年9月16日收到修改稿。由国家自然科学基金资助。

围,所以可以用准静力模式提供动力-热力框架,再根据云系模拟要求配上与动力框架和尺度分辨率相当的云物理模式。由于是云场模拟,要了解空中云的状况,必须包括云的显式模式,而且应对粒子谱演变有良好的描述功能。这些就是我们选择并构造云系模式的原则。

为此,动力框架选用了 NCAR/PSU MM4 模式<sup>[3]</sup>。对模式的资料输入和处理系统(资料选取,客观分析初始化)作为改造<sup>[4]</sup>,以使该模式利用我国气象资料来源。为了在我国计算机上运行,对模式中一切严重依赖于特定计算机的程序进行了修改,形成了适合在中国运算的模式 NCAR/PSU/MSU。

现有云物理模式多种多样。仅就三相(汽、液、固)模式来说,也是繁简皆备<sup>[5,6]</sup>。问题是如何适应动力框架和云系模式的特点来选配必要的过程。综合来看,用于云场模拟的云模式的设计应考虑以下几点:

(1) 有关水的相变过程力求完善准确,水物质的转换要闭合守恒,因为这是云物理模式与天气动力模式相互作用的主渠道。

(2) 水凝物粒子的单参谱演变方案对谱演变的描述歪曲甚大<sup>[7]</sup>,而分档模式则计算量太大,二者皆不宜用。相对而言,需用双参谱演变方案。

(3) 云中的冰雹,是高落速粒子,支撑它生长要有强上升气流;再者降雹的空间尺度约为 10km,且属小概率事件。因此,对网格距大于 10km 的模式来说,降雹属次网格现象,所以可以不计冰雹过程。

(4) 冻雨霰和雪霰,在除去冰雹以后,它们的尺度上限不为冰雹的下尺度限所制约,这样一来,如果再除去在体积密度上的限制,它们与雨和雪粒子的气动力差异就减小了。因而,降水粒子可以用雨、雪、霰来描述。

(5) 按定义,雨、雪的尺度下限为 200—300 $\mu$ (微米),霰的尺度下限为 1000 $\mu$ ,这在具体计算中会增加麻烦,为此,令其分布皆为 0 $\rightarrow\infty$ 。虽然这是常用的作法,但我们认为,这在物理上使云滴、云冰和雨、雪、霰在尺度上有重叠,可是由于两者的分布截距差别甚大,这种重叠一般不会太严重,而在计算上可方便地直接引用 Gamma 函数。为了能使模式嵌入多维云环境模式中去,在当前计算机上可以运行,这种简化是可以接受的。

基于以上 5 点,我们设计了 M91 模式,该模式包括三相五种(云水、云冰、雪、雨、霰) 36 种微物理过程。且在同一物理框架下,同时具有单参和双参两种谱演变方案,可以描述积状云,也可以适用于层状云。便于作多种模拟试验。

除水汽外,五种水凝物粒子的分布谱给定如下:

云滴:由于云滴谱分布主要源于云核谱。这方面资料尚少,且可以简化处理,只给定比浓度  $A_{nc}$  和谱分布离差  $DR$ ,为了反映  $A_{nc}$  随云水比含量的变化,使  $A_{nc}$  与  $Q_c$  满足下列公式:

$$A_{nc} = A_{nc0} \times (Q_c/Q_{c0})^H$$

其中  $A_{nc0}$  和  $Q_{c0}$  是给定值。在本例中  $\beta=1.0$

$$\text{云冰: } N_i(D)dD = N_{oi}D^2 \cdot \exp(-\lambda_i D)dD$$

$$\text{雨: } N_r(D)dD = N_{or} \cdot \exp(-\lambda_r D)dD$$

$$\text{雪: } N_s(D)dD = N_{0s}D \cdot \exp(-\lambda_s D)dD$$

$$\text{冻雨和霰: } N_f(D)dD = N_{0f} \cdot \exp(-\lambda_f D)dD$$

图 1 给出了模式的三相和六种物质的生成和相互转化的框图。其中数值代号的含义如下:1. 水汽与云水间的相互转化 PMC(量);2. 云水自动转化为雨水(量、数)PMCR, PNCR;3. 雨冻结成冻结雨(量、数)PMFR, PNFR;4. 水汽核化成云冰(量、数)Pmi, Pni;5. 云冰自动转化为雪(量、数)PNIS, PMIS;6. 云冰凝华(量)PMIG;7. 雪凝华(量)PMSG;8. 雨蒸发(量)PRE;9. 雨并云水(量)PMRC;10. 冻结雨并冻雨(量、数)PMFR, PNFR;11. 雨并云冰成冻结雨(量、数)PMRI, PNRI, 云冰减少(量、数)PNRII, PMRII;12. 冻结雨并云水(量)PMFC;13. 雪攀附近云冰(量、数)PMSI, PNSI;14. 雪并冻雨成冻结雨(量、数)PMSR, PNSR, 雪数浓度减少, PNRS;15. 雪并冻云水(量)PMSC;16. 云冰并云水(量), PMCI;17. 冻结雨融化(量、数), PMMF, PNMF;18. 雪融化(量、数)PMMS, PNMS;19. 雨并雨(数)PNRR;20. 雪并雪(数)PNSS;21. 雪并冻雨湿生长判据 PMS;22. 冻结雨并冻雨生长判据 PMF;23. 雨并云冰湿生长判据 PMR。总计 36 种微物理过程,这些发生项的表达式及其导出方法参见文献[4,5]。

NCAR/PSU/MSU 动力模式和 M91 云物理模式,构成了该文的模式体系。

由于云系模式的模拟区域大到千公里以上,因计算量的限制,不仅使用了静力模式,而且格距又不能小到 10km 以下,我们选的格距是 45km。这样一来,在云过程的处理上,用显式来描述云和环境的作用在物理上会有些问题<sup>[8]</sup>。其本质是云的发展这时只能靠格距范围内的平均上升运动来操纵,这个平均值可能与实际的上升气流作用有明显差别,特别是对于对流活动操纵的系统,造成对积状云及其作用描述不足。为了弥补这种不足,又配用了隐式的对流参数方案(Anthes)<sup>[9]</sup>,此即所谓的混合方法。本文对层结不稳定的气柱有水汽辐合时,认为有积云对流发生,产生凝结、加热和加湿,但原来为降水形式的水,改为云水留在空中,参与显式描写的云物理过程(丁正平)<sup>[10]</sup>。

为了把模拟结果以图形产品的形式把云场的宏、微观结构显示出来,我们设计了用于模式后处理的一套数据处理和绘图程序包,可以给出表现云场结构的任意的点、线、面上的结构图,和任一视角方向的立体分布图。

### 3 · 模拟个例

个例是 1986 年 6 月 26—27 日在京津冀地区发生的一次区域性暴雨过程。其特点是西北涡和西南涡在经向上相连接并相互作用;西南涡与西北涡的相连形成了一条长达几千公里的抵达华北的暖湿空气输送带,而西北涡诱导的冷干空气南下,造成了西南涡的斜压发展,再有高低空急流的耦合,促使了华北一个中尺度扰动发展<sup>[11]</sup>。

该过程中 12h 内的降水量和两个时次的云图,给在图 2 和图 3 中。

利用 1986 年 6 月 26 日 12Z 的常规天气资料,经过客观分析和整层无辐散初始化,得到的初始场输入到模式,模拟运行了 12h,每 1h 输出一次计算结果。计算区域为 1350km × 1350km,计算中心点为(38,117),格距  $\Delta X = 45\text{km}$ ,垂直向为 10 层。

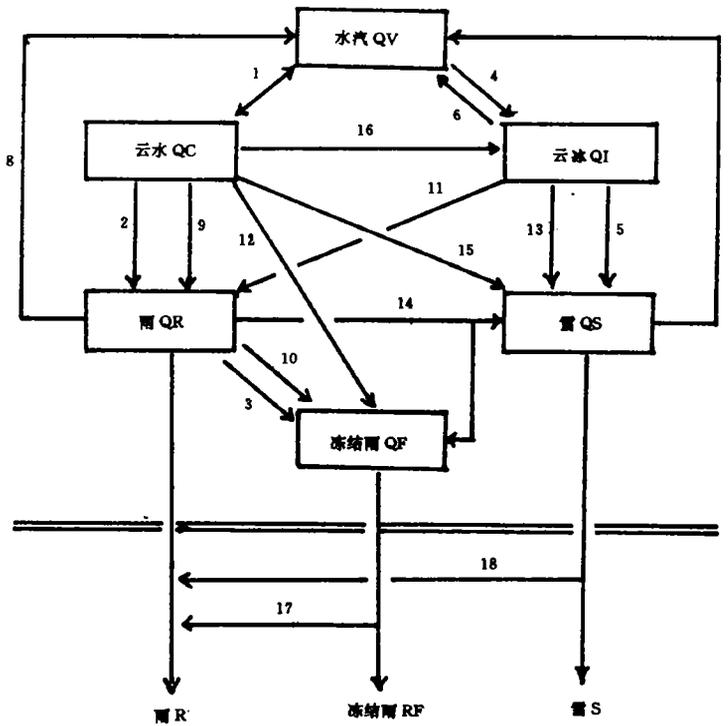


图 1 三相五种水凝物粒子生成和相互转化的框图

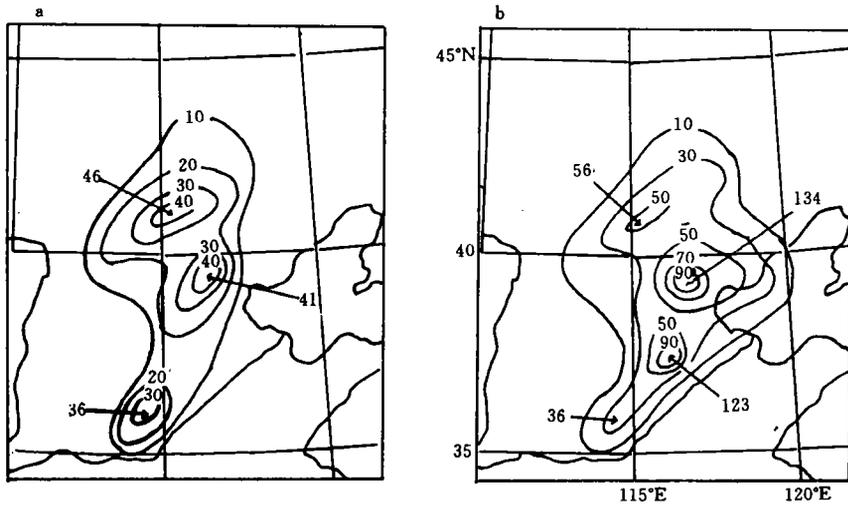


图 2 1986年6月26日12—24Z的降水分布图  
(a, 6h 降水分布, b, 12h 降水分布)

### 4 模拟试验结果

(1) 为了检验模式的能力,先把图 4 中 6h 及 12h 模拟降水与实况(图 2)来对比,可以看出不论从降水分布形状、雨带走向,还是从降水量值的大小,两者都是比较一致的。

(2) 云场的模拟结果给出在图 5 中,由于模式的初始云条件为零,云的生成发展要有一个过程,对比图 3 来看,在模式运行 3h 后给出的云场,与图 3(a)中的实况已相当接近。不仅两者的云分布状态相似,云型也相似。可以看出,实况云图上的东北象限是层状云为主特征,西南象限是对流云;模拟云场也表现出了这样的特征。再把模拟时间为 9h 的云场(图 5e)与实况云图(图 3b)来对比,这时云场已移到东北角处,云型是层状的,两者的基本特征也是一致的。

(3) 三维云场只能提供云量、云分布、云型等宏观状况,云厚的直观图象不清,而且云中的各种量,各类水凝物的分布结构表现不出来,与热力动力框架的配置关系也不易表现,为此要给出云场的二维剖面图。图 6 给出了一些剖面例子。

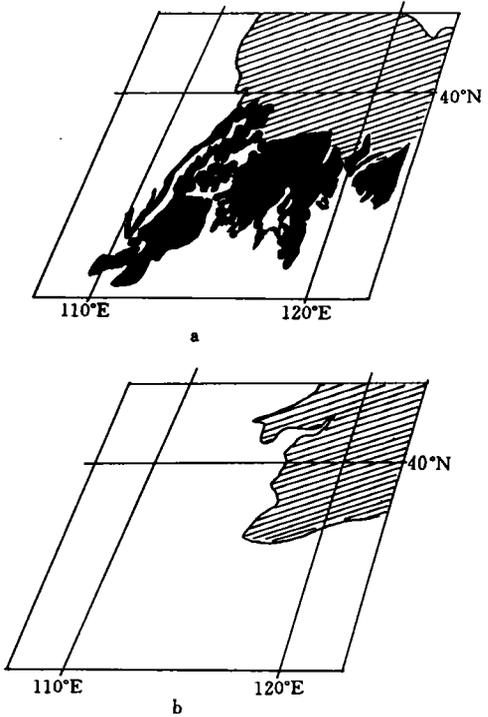


图 3 1986 年 6 月 26 日 12Z(a) 和 21Z(b)的云图

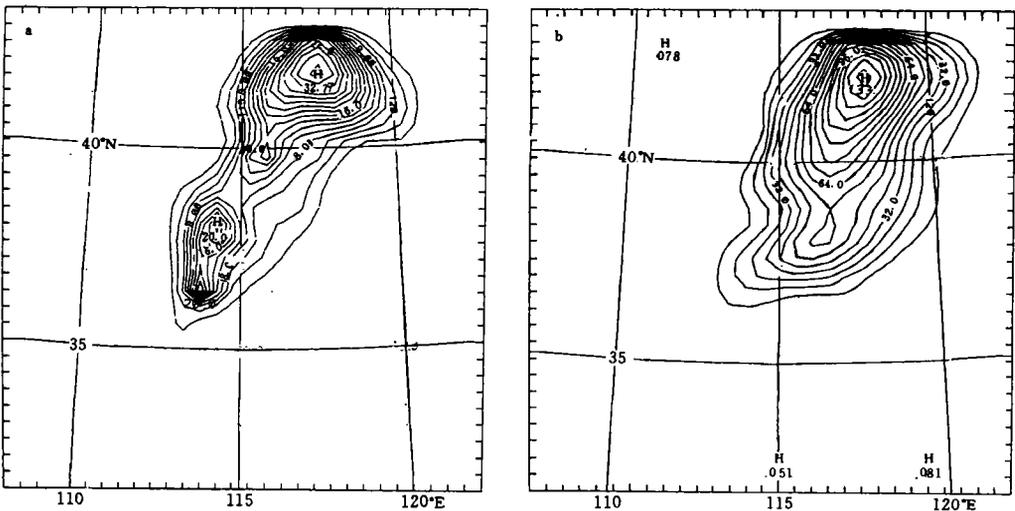


图 4 6h(a)及 12h(b)模拟降水量分布图

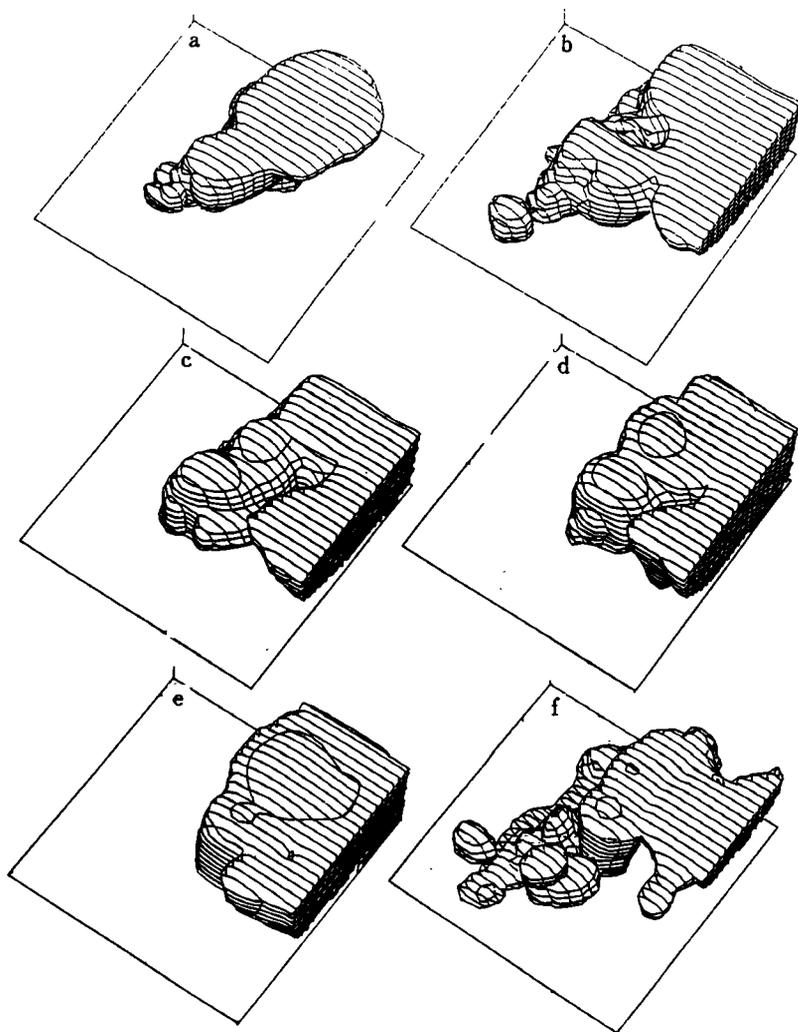


图 5 1—9h 的模拟云场

(a,b,c,d,e 对应着 1,3,5,7,9h, f 是另一混合方案给出的 3h 的云场)

对比图 6 各栏,各种水凝物的结构,它们之间的相互关系以及云场与动力场之间的配置等,都清楚地呈现出来,可以看出,这些结构、关系和配置是合理的。

(4) 对云场微结构的了解,一个重要图象是单站上空的水凝物比含量随高度的分布廓线,它与降水降度、辐射传输和航天活动有密切关系。图 7 给出了不同时刻给定点的这种一维廓线,当然还可以针对不同水凝物粒子,例如单对雪,给出雪分布廓线。

(5) 水凝物粒子微观结构主要的体现是其分布谱,有了分布谱就可以得到任何有关的微物理参数,例如众多直径、中值直径、散射截面、等效反射率  $dBz(\sum nd^6)$  以及含水量,粒子气动力特征等。为此需要给出云中每个点的不同类型粒子的分布谱。图 8 给出 (18,18)点上,

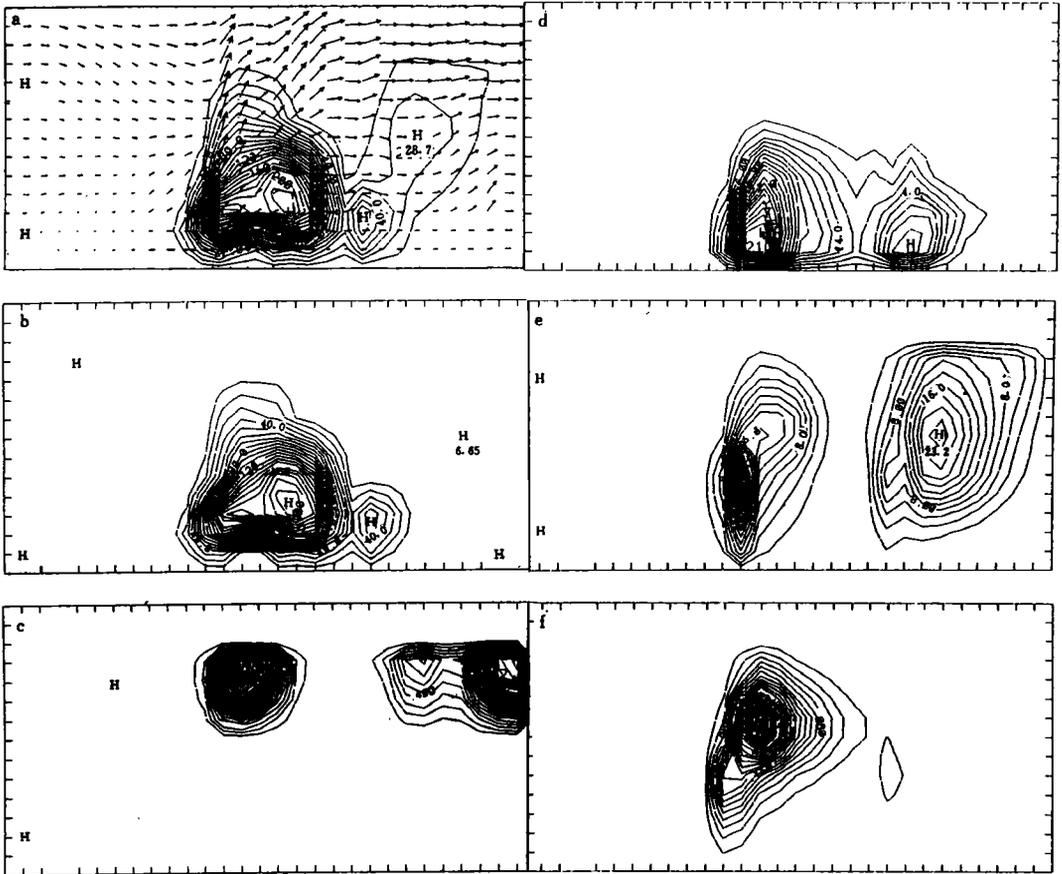


图 6 模拟 3h 云穿过(1,1)和(30,29,8)二点的垂直剖面图

(a, 云凝物比含量结构剖面 and 沿剖面的风矢量图(垂直速度乘 1000); b, 云水剖面;  
c, 云冰剖面; d, 雨水剖面; e, 雪剖面; f, 截剖面)

不同高度层上的雨和雪的粒子分布谱,由于我们的云模式是用了双参谱演变方案,所以给出的谱形,在不同高度处不仅有斜率的变化,而且截距也在变化着,观测到的谱变化就是这样的,这是对单参谱演变方案的重大改进。能反映不同点间的谱分布差异,当然就可以描述同一点上的云粒子谱随时间的演变。由于篇幅的限制,这里只能给出必要的例图。

### 5 结语

综上所述,可以得出以下几点结论:

(1) 云场的宏微观结构及其随时间的演变是大气环境的重要方面,它们与航空、航天活动及辐射传输、酸雨形成密切相关。计算云物理方法已具备配合研究这些课题的能力,可提供可用的云参数场。

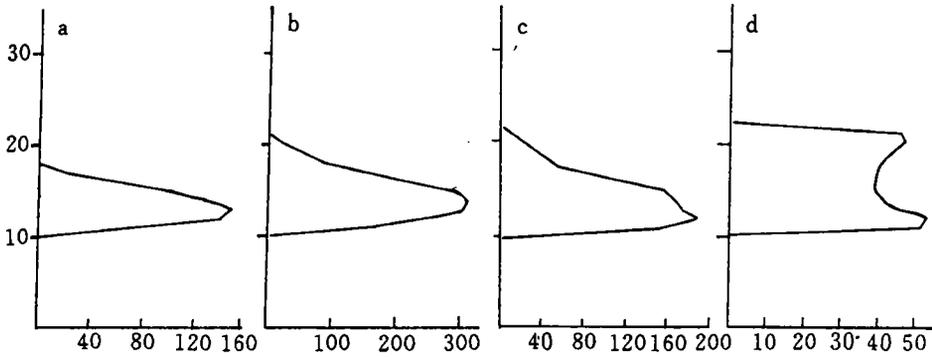


图7 不同时刻在(18,18)点上空的水凝物总比含量高度的分布廓线  
(a,3h;b,5h;c,7h;d,9h)

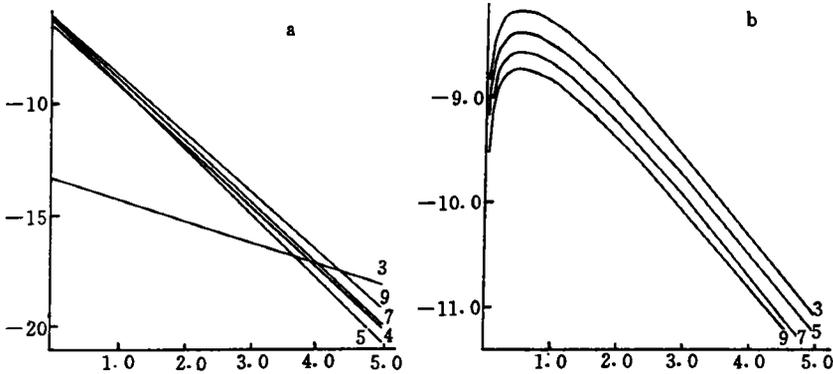


图8 3h在(18,18)点上空不同高度层(线端数值)点上的雨(a)和雪(b)粒子分布谱

(2) 所构造的 NCAR/PSU/MSU 与 M91 云系模式配合适当的云过程的混合方案,可以比较合理地描述云的宏观结构和微观结构,特别值得提及的是,可以区别云型。

(3) 虽然本个例的模拟显示了模式有较好的功能,这只能说明其动力框架和云物理模式是基本合理的,应当争取条件作批量试验,在试验中找不足求完善。

(4) 近期发展起来的根据雷达和卫星观测得到的有关云物理函数量(如反射率因子辐射亮温)来反演云参数的方法中<sup>[12]</sup>,需要一个较好的云模式,由于这一方法有希望由非直接云物理观测来得到实时云参数场,本模式可以用于这一领域的研究中去。

参考文献

[1] Smolarkiewicz P K and Clark T L. Modeling a field of cumulus clouds. WMO/TD No. 139. 1985. 241-244.  
 [2] Proctor F H. Three-dimensional simulation of the 2 August CCOPE hailstorms with the terminal area simulation system. WMO/TD NO. 139. 1985. 227-240.  
 [3] Anthes R A. Hsie E Y and Kuo Y H. Description of the penn State/NCAR Mesoscale Model Version 4 (MM4).

NCAR/TN-282+STR. NCAR Technical Note May. 1987.

- [4] 许焕斌,王思微,潘在桃. NCAR/PSU MM4 中尺度模式移植报告. 气象科学研究院, 1987.
- [5] 许焕斌,王思微. 一维时变冰雹云模式研究(二). 反映融化对雹谱双参数演变的影响. 气象学报. 1985. 43(2): 162-171.
- [6] 许焕斌. 云中水凝物粒子体系的微结构及其演变的数值模拟. 11 届全国云物理会议论文. 承德. 1992.
- [7] 许焕斌,王思微. 一维时变冰雹云模式研究(一). 反映雨和冰雹谱双参数演变. 气象学报. 1985. 43(1): 13-25.
- [8] Molinari J and Dudek M. Cumulus parameterization in mesoscale numerical models: a critical review. MWR 1990. 7.
- [9] Anthes R A. A cumulus parameterization scheme utilizing a one-dimensional cloud model, MWR. 1977, 105: 270-286.
- [10] 丁正平. 中尺度对流系统降水过程的数值模拟. 空军气象学院硕士论文. 1992.
- [11] 吴正华. 华北一次双涡暴雨的分析. 气象科学研究院院刊. 1989. 4(3): 291-299.
- [12] Verlinde J and Cotton W R. Kinematic microphysical retrieval in non-steady clouds. Proceedings of 11th international conference on cloud-precipitation physics. 1992. 309-311.

## A STUDY OF CLOUD-SYSTEM MODEL: MACRO AND MICRO STRUCTURE SIMULATION OF CLOUD FIELD

Xu Huanbin

(*Institute of Applied Meteorology, Beijing, 100029*)

### Abstract

The macro and micro cloud physics structure and their evolution with time are the core of describing cloud fields in essence. They are necessary atmospheric environment not only in aviation and spaceflight activities but also for atmospheric radiation transfer and acid rain formation research. Unfortunately it is difficult to obtain an entire environmental cloud field by using observation methods directly. Thus, by use of computation physics method to build a cloud-system model may be an indispensable way for this topic. This paper presented a cloud-system model for this goal, and simulated a real case. The results of computation showed that the macro structure of the cloud field was better consistent with real observation, and the micro structure was fairly reasonable. The output of model could provide all the information about the cloud field: (1) size-distribution spectrum of hydrometeor particles (point), (2) vertical profile (line), (3) horizontal or vertical section of macro and micro parameters (surface), and (4) cloud cover, pattern of cloud and configuration of cloud, etc. (body).

**Key words:** Cloud field, Cloud-system model, Macro and micro structure, simulation.