

一次次天气尺度系统降水预报的数值试验

王晓林 阎秉耀

(北京大学地球物理系) (兰州气象学校)

提 要

本文应用实测资料,探讨了夏季次天气尺度扰动的数值预报问题。利用细网格五层原始方程模式,成功地报出了产生暴雨的气旋的发生和低空急流的加强。对比干、湿模式的不同结果后,论证了水汽在这类系统发生发展中起的重要作用,初步结果表明,这类系统基本上是由湿对流驱动的。另外,还讨论了初始水汽场的变动对降水和形势预报的影响。使用卫星云图资料修正初始水汽场后,对降水预报有所改进。

一、引 言

1977年8月2—3日,我国华北、东北地区有一次暴雨过程,过程总雨量达200毫米以上。图1是这段时间的地面图。2日12Z,在黄河中下游地区有一个倒槽,12小时后,

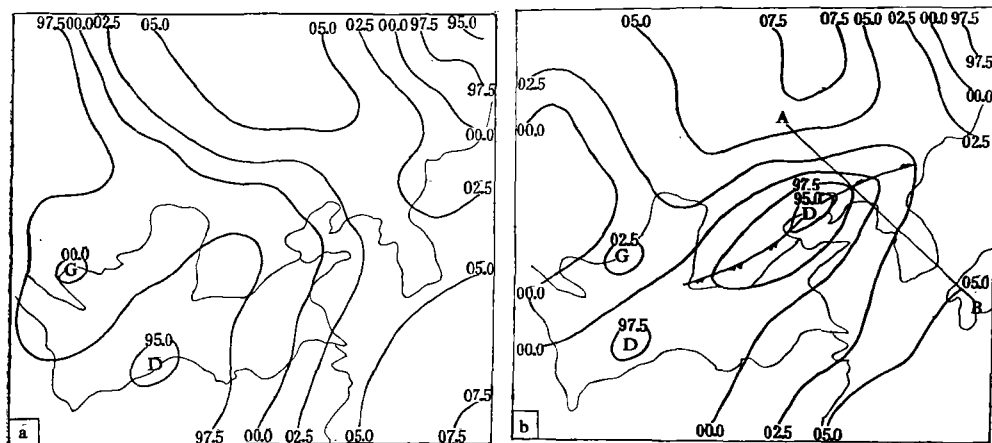


图1 地面形势实况图

a 1977年8月2日12Z

b 1977年8月3日00Z

倒槽东移,在渤海湾附近产生一个水平尺度约500公里、中心气压为995毫巴的气旋,暴雨则出现在气旋的东北部,12小时累计雨量最大达100毫米以上,与之相联系的低空急流随着暴雨的发生而发展、增强。对这次天气过程,陶祖钰^[1]已作过详细的天气学分析。类似图1的天气过程在我国夏半年是常见的,因此对这种次天气尺度扰动发生发展的研

* 本文于1979年10月17日收到,1980年12月22日收到修改稿。

究有重要的意义。为了研究夏半年降水预报问题,北京大学数值预报组曾设计了一个五层原始方程模式,本文应用修改后的模式对这类系统的动力学特征和数值预报问题作了一个初步的探讨。

二、数 值 模 式

这个模式采用 σ 坐标系和通量形式的原始方程组,垂直方向将大气自 $\sigma=1$ 到 $\sigma=0.1$ 均匀分成五层, $\Delta\sigma=0.18$,各层变量如图2所示。有限差分方程保持在积分区域内质量、动量和总能量守恒。凝结潜热的处理包括大尺度稳定性降水和对流调整。根据一系列的试验,对流调整方案对暴雨系统的预报比其他参数化方案更为有效^[2]。稳定性降水潜热释放引起的增温反馈给热力学方程的方法同^[3]。模式的最下层考虑为边界层,边界层内只考虑地面摩擦。输入1000、700、500、300和100毫巴的高度场和500、700、850毫巴的温度露点差,用拉格朗日插值公式内插到相应的 σ 面上。初始风场用 σ 面上的平衡方程解出。水平格距取150公里,积分区域如图1所示的范围,共 21×23 个格点。时间积分采用交替的欧拉后差和中央差,时间步长为5分钟。

1	—————	$\dot{\sigma}, \phi$	—————	$\sigma=0.10$
2	-----	u, v, T	-----	0.19
3	—————	$\dot{\sigma}, \phi$	—————	0.28
4	-----	u, v, T	-----	0.37
5	—————	$\dot{\sigma}, \phi$	—————	0.46
6	-----	u, v, T, θ	-----	0.55
7	—————	$\dot{\sigma}, \phi$	—————	0.64
8	-----	u, v, T, θ	-----	0.73
9	—————	$\dot{\sigma}, \phi$	—————	0.82
10	-----	u, v, T, θ	-----	0.91
11	—————	$\dot{\sigma}, \phi_s$	—————	1.00

图2 数值模式的垂直分层和变量分布

三、积 分 结 果

1. 次天气尺度扰动的预报

图1中扰动的发展是很快速的,所以积分12小时已能显示出模式的预报能力。为了便于讨论水汽的作用,分别用不包括大范围凝结和对流降水的干模式和考虑大范围凝结和对流降水的湿模式,以77年8月2日12Z为初值进行数值计算。

干模式只考虑了大气的正压与斜压过程,图3a为12小时后的地面图预报结果。可以看出,除了川东北地区的低压仍维持少动外,黄河中下游地区的倒槽虽向东北伸展,却没有发展成气旋,预报的形势与实况有很大差别,特别在渤海湾一带,偏高了近5毫巴。

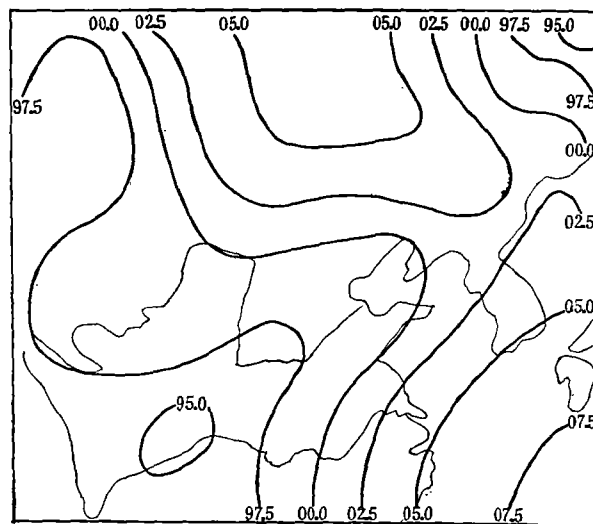


图 3a 干模式 8 月 3 日 00Z 地面形势预报图



图 3b 干模式 8 月 3 日 00Z $\sigma=0.73$ 面垂直运动分布图
(图中正区为下沉运动, 负区为上升运动, 单位: 10^{-7} 秒 $^{-1}$, 等值线间隔为 10 单位, 粗线为零线。)

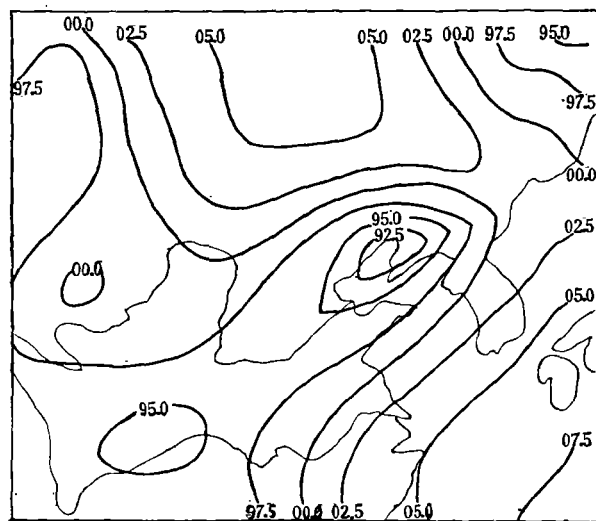


图 3c 湿模式 8 月 3 日 00Z 地面形势预报图



图 3d 湿模式 8 月 3 日 00Z $\sigma=0.73$ 面垂直运动分布图
(在 -175 的中心处等值线隔 30 单位一条, 其他说明同 3b。)

这个结果表明,单纯考虑大气的斜压性并不能报出次天气尺度扰动的发生。当然,这并不是说可以忽略斜压性的效应。图 3 b 给出了对流层下层 $\sigma=0.73$ 面上垂直运动($\dot{\sigma}$)的分布情况,可以看出,在地面倒槽的北部有一片 $\dot{\sigma}$ 的负值区,中心极值为 $-1.4 \times 10^{-6} \text{秒}^{-1}$ (相

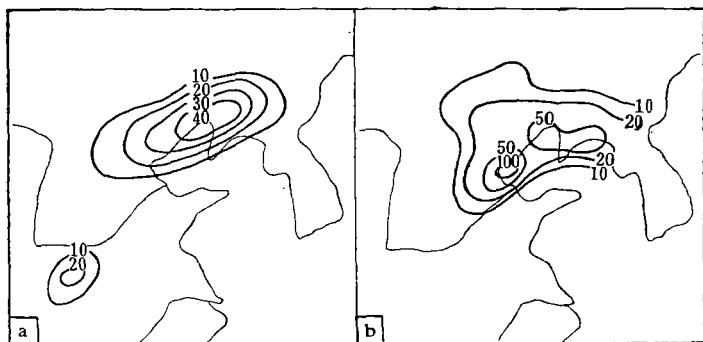


图 4 8月2日12Z—3日00Z累计雨量图(单位:毫米)
(a 湿模式预报结果, b 实况。)

当于 $\omega = -1.4 \times 10^{-3} \text{毫巴} \cdot \text{秒}^{-1}$)。对产生暴雨的强烈上升运动而言, $\dot{\sigma}$ 的量级是不够的,

但如果这部分上升运动发生在条件性不稳定的湿斜压大气中,则凝结潜热与不稳定能量的释放与反馈可能使运动状态发生质的变化。

包含凝结过程的湿模式预报结果示于图 3 c。可以看出,渤海湾附近预报出的气旋的强度、位置与实况(图 1 b)都很接近,等压线走向也近似,相应的气压预报的偏差在这一带下降到 2.5 毫巴以下,与图 3 a 比较,预报质量的改善就在这个地区,而其他地区则和干模式不相上下。图 3 d 为湿模式预报的 8 月 3 日 00Z $\sigma=0.73$ 面上垂直运动($\dot{\sigma}$)分布情况,和图 3 b 比较有显著的差别,产生了强烈的上升运动集中区域,在辽宁一带 $\dot{\sigma}$ 最大达 -1.75×10^{-5} (相当于 $\omega = -1.75 \times 10^{-2} \text{毫巴} \cdot \text{秒}^{-1}$)。比干模式大了一个量级, $\dot{\sigma}$ 小于 $-3.0 \times 10^{-6} \text{秒}^{-1}$ 的覆盖面积有 15×10^4 平方公里以上,和暴雨区的面积相当。

预报的 12 小时累计降水量如图 4 a,与实况(图 4 b)比较位置是一致的,但雨量偏小,这是数值模式中一般存在的问题,进一步提高预报雨量的可能方法将在后面讨论。

图 5 8月3日00Z地面气旋上空1000—700毫巴厚度场
(实线为地面等压线,虚线为等厚度线,其中 a 为湿模式预报的结果, b 为实况。)

图 5 a 是湿模式预报的 8 月 3 日 00Z 地面气旋上空 1000—700 毫巴的厚度场,可以明显地看出,低压上空平均温度比四周高出 2 度左右,与实况(图 5 b)很类似,很好地显示了这类次天气尺度扰动在对流层下层所具有的

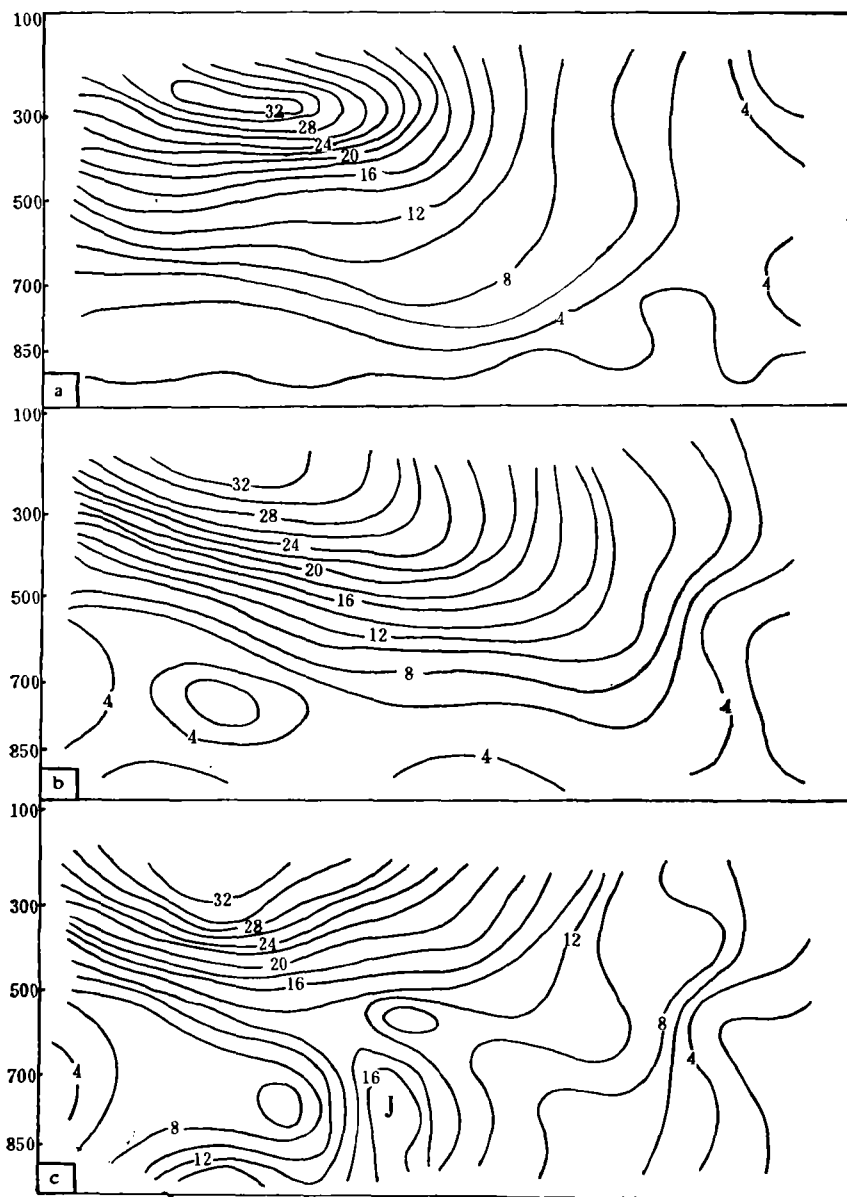


图 6 通过暴雨区的风场垂直剖面图(剖面基线示于图 1 b)
(a 8 月 2 日 12Z 实况, b 干模式预报 3 日 00Z 的风场, c 湿模式预报 3 日 00Z 的风场, 图中等风速线单位: 米·秒⁻¹。)

“暖心”结构,而相比之下,干模式预报的结果则完全没有这个特征(图略)。

上述结果表明,次天气尺度扰动的生成中水汽凝结潜热起着重要作用。谢义炳曾指出考虑水汽作用后能缩短斜压不稳定波的波长^[4],用简单的对流参数化方案,新田得到最大的不稳定波长在 500 公里左右^[5],活跃于这次天气过程的气旋就是属于这类不稳定波的。应用湿模式预报这种次天气尺度系统的位置、强度与结构和实况很一致,说明在夏半年降水预报中,不仅因预报降水才考虑水汽方程,更重要的是只有考虑水汽凝结与反馈

才能使预报的运动场与质量场有显著的改进, 所以设计数值预报模式时深入考虑水汽凝结反馈的物理过程及湿对流的作用是一个重要的课题。

2. 低 空 急 流

早在五十年代已有人注意到低空急流对暴雨的作用。近年来, 低空急流已逐渐被公认为暴雨过程的重要天气系统, 但对低空急流的形成与加强的物理机制仍有各种不同的看法, 一个重要问题是湿斜压大气中水汽对低空急流的维持与加强究竟有没有作用? 为回答这个问题, 我们用干、湿两种模式对急流进行了计算。

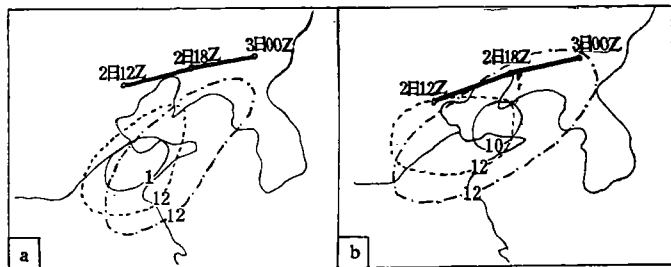


图 7 低空急流与饱和区中心随时间的变化

(a $\sigma=0.91$ 面, b $\sigma=0.73$ 面, 图中急流区的等风速线实线为 2 日 12Z, 虚线为 2 日 18Z, 点划线为 3 日 00Z, 线上的数值表示风速, 单位: 米·秒⁻¹, 粗线为饱和区中心活动路径。)

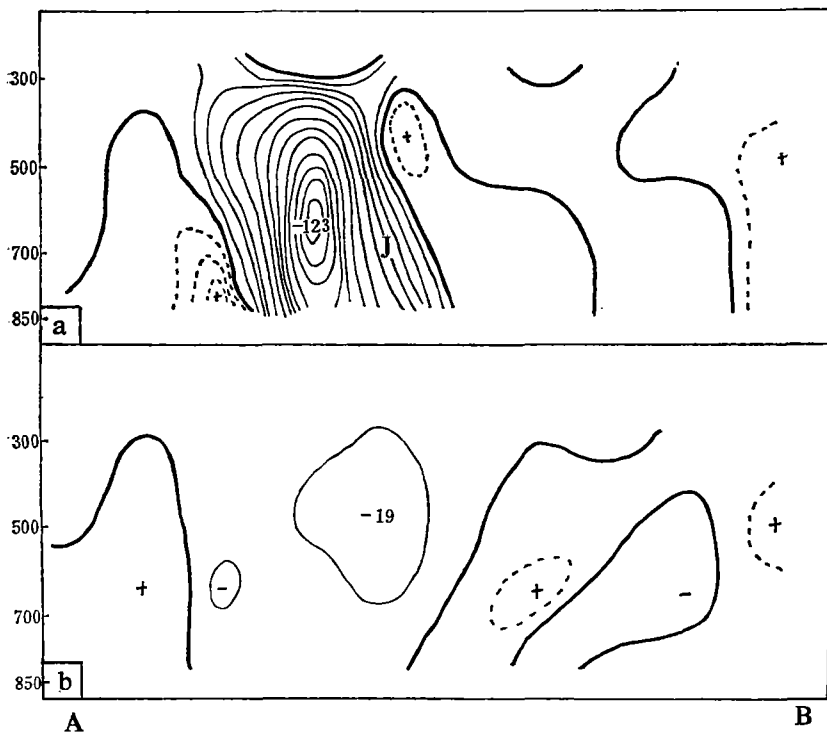


图 8 8 月 3 日 00Z 通过暴雨区的垂直剖面图上垂直运动(σ)分布情况

(a 湿模式预报的结果, b 干模式预报的结果, 图中粗线为零线, 实线区为上升运动, 虚线区为下沉运动, 单位: 10^{-7} 秒⁻¹, J 为低空急流的位置。)

图 6 是通过暴雨区的风场垂直剖面图, 剖面基线与低空的西南急流垂直(已示于图 1 b)。可以看出, 在初始时刻(图 6 a)700 毫巴附近有一个很微弱的急流, 积分 12 小时后, 在干模式中(图 6 b)没有算出急流的加强, 而在湿模式中(图 6 c)低空急流在 12 小时内有显著的加强。

图 7 还给出了湿模式中低空急流随时间的变化情况。在 $\sigma=0.91$ 面上, 初始时刻(2 日 12 Z)急流区只能分析一条 $4 \text{ 米} \cdot \text{秒}^{-1}$ 的等风速线, 6 小时后(2 日 18 Z)风速增大, 可分析出 $12 \text{ 米} \cdot \text{秒}^{-1}$ 的等值线, 又过 6 小时(3 日 00 Z), 中心风速增大至 $16 \text{ 米} \cdot \text{秒}^{-1}$, 每秒 12 米的线向东北方向伸展了约 300 公里。在 $\sigma=0.73$ 面上, 同样可以看到风速不断增大以及急流向东北方向伸展的现象。这种伸展是和饱和区中心的移动一致的。比较图 7 这两张不同高度 σ 面上等风速线的位置发现, 在三个时刻里, 急流前沿都是随高度向东北方向倾斜的, 这点和这个个例的天气学分析是相一致的。

湿模式中的垂直运动与环流远较干模式强, 在和图 6 取相同位置的剖面图 8 上可以看出二者的差别。在图 8 a 的湿模式剖面上, 低空急流附近呈现一个反环流, 急流北侧为上升运动, 南侧为下沉运动, 这个反环流对急流的维持起重要的作用^[6]。在对流层中下层, 潜热释放大增强低空急流北侧的上升运动, 导致下层辐合, 在急流附近产生顺气压梯度力的运动, 有利于动能的产生, 这或许是急流加强的一个原因。

以上结果从数值试验的角度支持了谢义炳的观点, “潮湿空气按湿绝热过程运动带来了水汽, 也带来了风(低空急流)”^[4]。

四、水汽作用的进一步分析

为了进一步了解水汽的作用, 我们又设计了两个试验, 想通过改变初始的水汽分布状态考察对预报结果的影响。

试验 I 初值为均匀的相对湿度场。

将 $\sigma=0.55, \sigma=0.73, \sigma=0.91$ 三层各网格点的相对湿度分别取为 0.56, 0.71, 0.72 (该值为原先各层上相对湿度的平均值)。这样的湿度场显然与实况有很大差别, 但用它作为初值可以考察湿度场初始分布在预报中的相对重要性。图 9 a 为积分 12 小时后 $\sigma=0.73$ 面上的相对湿度场, 为了便于比较同时给出了湿模式的结果(图 9 b)。可以看出, 二者的基本形势是比较类似的。比湿场的变化同样是非常明显的, 在比湿原先比较均一的河南、山东一带, 随着时间积分增加, 出现了一个湿舌, 12 小时后湿舌已发展得相当完善, 中心最大值达 $16 \text{ 克} \cdot \text{千克}^{-1}$, 湿舌伸展的地区比初值高出 2—3 $\text{克} \cdot \text{千克}^{-1}$ (图 9 c), 与湿模式的结果(图 9 d)相比, 强度接近, 但位置偏南。湿舌的发展变化说明垂直运动在湿度场的调整中起重要作用。由这个试验可得出结论: 在给定的流场作用下, 均匀的湿度场能调整成与实况相近的湿度场, 或者说, 湿度的分布某种程度上取决于流场。J. Smagorinsky^[7]曾作过全球性湿度场调整的试验, 积分一天后湿度场可和他的对照过程相一致, 我们的结果表明, 对尺度较小的系统, 这种调整可能更为迅速。

在这个试验里, 降水是积分开始后不到四小时发生的, 12 小时累计雨量图(图 10)表明, 雨区位置和实况(图 4 b)一致, 但量偏小, 这显然是和下层相对湿度过小有关。

值得注意的是地面气压场的预报结果, 应用这样粗略的湿度场, 在渤海湾附近仍报出

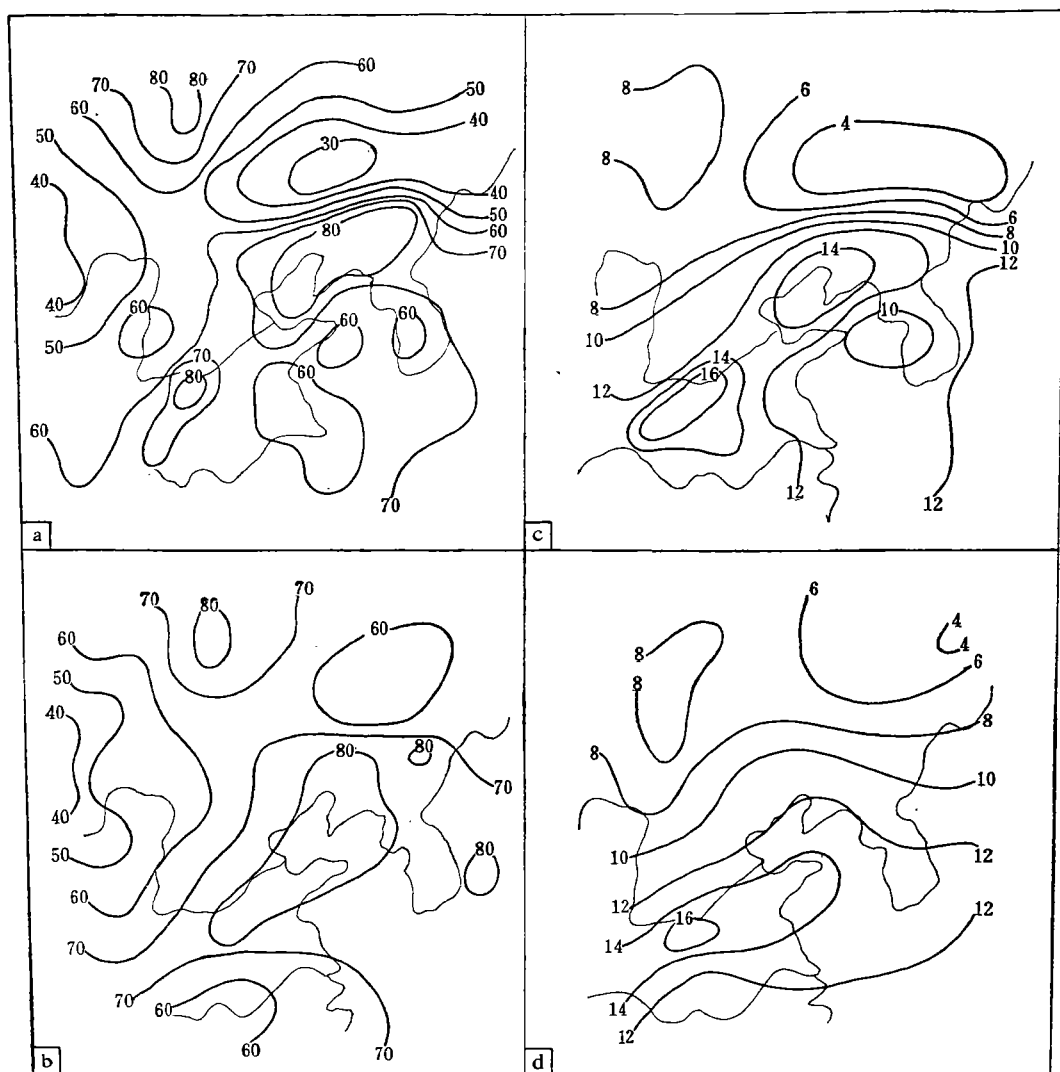


图 9 8 月 3 日 00Z $\sigma=0.73$ 面湿度场

(a 试验 I 预报的相对湿度场, b 湿模式预报的相对湿度场, c 试验 I 预报的比湿场, d 湿模式预报的比湿场。)

一个弱低压(图 10), 中心强度为 997.5 毫巴, 这比干模式的结果(图 3 a) 有了明显的改进, 说明只要考虑水汽的作用, 即使十分粗略, 也能大幅度提高预报质量。

从实际工作的角度出发, 当然不能满足于用极简单的水汽分布场去作天气预报, 因此我们又设计了试验 II, 试图用更精确的水汽场来改进预报的效果。

试验 II 用卫星云图资料补充订正后的湿度作为初始场。

天气分析的结果指出, 水汽的空间尺度比风场还小。因此, 在海洋上空以及其他高空记录稀少的地方想详尽地描绘湿度场特别困难, 改进的一个办法是补充卫星云图的资料。

图 11 a 是一张 77 年 8 月 2 日 19 时 56 分(北京时)扫描结束的红外云图示意图, 为了

将该云图提供的资料补充入 2 日 12Z 的探空资料中去, 我们根据云图反映的云体亮度, 形态等将其分成四级, 对流发展旺盛的区域划为 I 级, 在该区域取 $\sigma=0.55, \sigma=0.73, \sigma=0.91$ 三层相对湿度均为饱和; 中低云分布浓密的区域划为 II 级, 取 $\sigma=0.73, \sigma=0.91$ 二层饱和; 低云分布浓密的区域划为 III 级, 取 $\sigma=0.91$ 层饱和; 高云分布的区域划为 IV 级, 它和其他无云区一样不作处理。不作处理的区域和层次相对湿度都取原来的数值。图 11 b 是 $\sigma=0.73$ 层上经过卫星云图补充资料后和补充前的相对湿度差值图, 可以看出, 在内蒙古和东北东部探空记录稀少的地区湿度场有了明显的修改。将修改后的湿度场作为 2 日 12Z 的初始场进行预报, 12 小时后的累计降水量如图 11 c, 与湿模式的结果 (图 4 a) 相

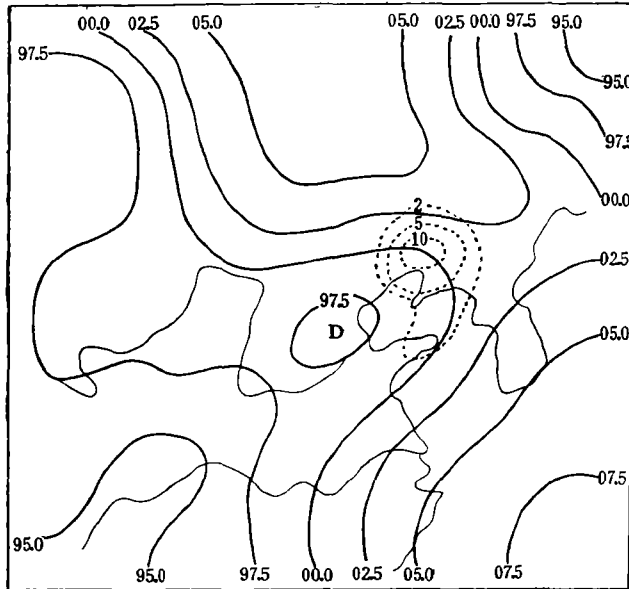


图 10 试验 I 预报的 3 日 00Z 地面形势图和 2 日 12Z—3 日 00Z 12 小时
累计雨量图
(图中虚线是雨量等值线, 单位: 毫米。)

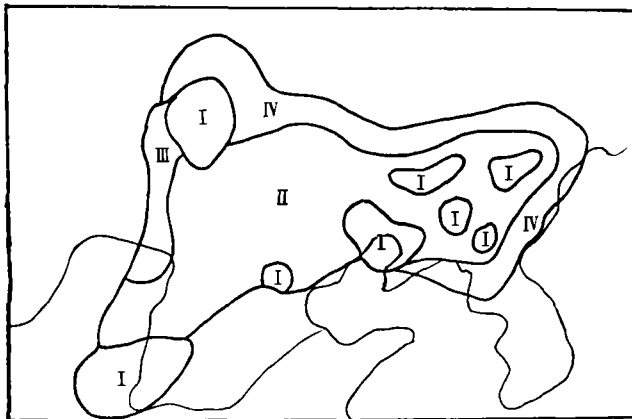


图 11a 卫星云图示意图
(图中数字表示划分的级别)

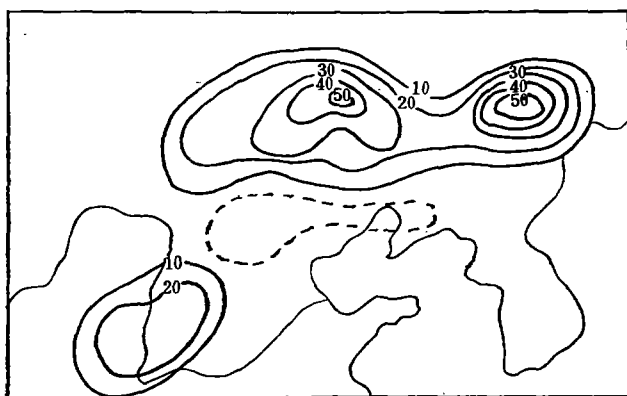


图 11b $\sigma=0.73$ 层补充卫星后与补充前相对湿度差值图
(虚线为负值区)

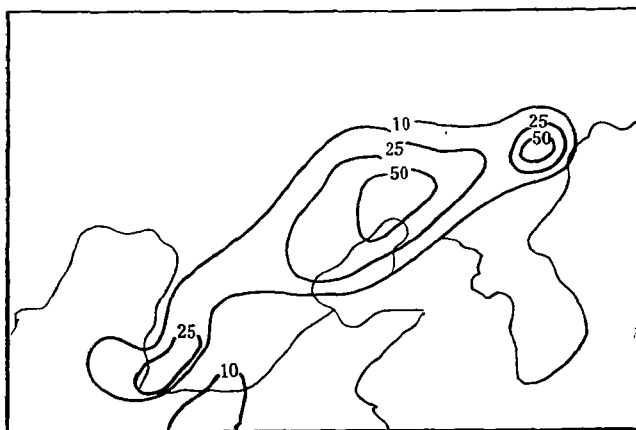


图 11c 试验Ⅱ预报的 2 日 12Z—3 日 00Z 12 小时累计雨量图(单位:毫米。)

比,雨区中心雨量增大了近 20 毫米,与实况更加接近。预报的 3 日 00Z 地面形势跟湿模式的结果也十分接近(图略),据统计,二者高度差的均方差仅 5.4 位势米。加入卫星资料后,预报的雨量增大,但地面形势却少变,低压并未加深,这是一个很值得深入研究的现象。

五、结论和进一步的工作

由前面的结果可以得出如下几点结论:

1. 在细网格原始方程模式中,应用目前通用的处理潜热释放和对流调整方法对次天气尺度扰动有一定的预报能力。
2. 水汽对次天气尺度气旋的生成和低空急流的发展起重要的作用,对这类系统的数值预报必须研究湿斜压大气动力学,改进湿对流宏观影响的参数化方法。
3. 在影响天气变化的诸因子中,和流场相比水汽场虽属第二位,但要做好降水预报,精细地描述水汽初始场仍然是必要的。引入卫星云图资料可能是改进降水预报质量的一个简单而有效的方法。

本文仅是次天气尺度扰动数值预报问题的一个初步探讨,个例的计算结果不一定是这类系统的普遍特征,结论将有待于实践的进一步验证。关于模式中的能量学,初值影响等问题将在以后的报告中给出。

致谢:承蒙陈受钧、张玉玲二同志对本文提出宝贵意见,宋小美、成秋影二同志协助数值计算和制图,特在此表示谢意。

参 考 文 献

- [1] 陶祖钰, 湿急流的结构和形成过程, 气象学报 38, No.4 331—340, 1980。
- [2] 张玉玲, 对流参数化在暴雨预报中的个例试验, 气象学报, 39, No. 1, 10—17, 1981。
- [3] 北京大学地球物理系数值预报协作组, 一个用于降水预报的五层原始方程模式, 第二次全国数值天气预报会议论文集, 科学出版社, 1980。
- [4] 谢义炳, 能量天气分析, 预报方法的现状和将来的可能发展, 气象科技资料, 2, 5—9, 1978。
- [5] Hitta, T., On the development of the relatively small scale cyclone due to the release of latent heat by condensation, *Journ. Met. Japan*, 42, 260—268, 1964.
- [6] Matsumoto, S., K. Ninomiya and S. Yoshizumi, Characteristic features of "Bain" front associated with heavy rainfall, *Journ. Met. Japan*, 49, 267—281, 1971.
- [7] Smagorinsky, J., K. Miyakoda and R. F. Strickler, The relative importance of variables in initial conditions for dynamical weather prediction, *Tellus*, 22, 141—157, 1970.

AN EXPERIMENT OF NUMERICAL FORECASTING OF SUBSYNOPTIC SYSTEM

Wang Xiao-lin

(Department of Geophysics, Peking University)

Yan Bing-yao

(Lanzhou Meteorological School)

Abstract

In this paper, making use of observational data, the problem of numerical prediction for subsynoptic disturbance in summer is studied. By using the fine-mesh prediction model of five level primitive equations the formation of subsynoptic cyclone which cause the heavy precipitation and the intensification of low level jet stream have been predicted successfully.

After the comparison of the different results of dry and moist model, the important effect of vapor in producing and developing of these circulation systems is proved. The preliminary result indicates this disturbance is driven mainly by moist convection.

In addition, the influence of initial vapor field on the prediction of precipitation and surface situation is also discussed. It is shown that an accurate description of vapor field is necessary.

An experiment shows that the prediction results of precipitation will be improved if corrections and modifications of the initial vapor field are made by using the satellite cloud photograph.