

中期数值天气预报文集

姜达雍 王宗皓 紀立人 等著

气象出版社

中期数值天气预报文集

姜达雍 王宗皓 纪立人 等著

气象出版社

内 容 简 介

本文集共十七篇论文,内容包括中期数值预报模式的试验,初值和边值处理,计算方法,中期天气过程分析和中期预报的物理基础,天气分析预报系统工程的理论模型和全球资料的电子计算机填图方法等。

本文集可供气象研究工作者、气象业务工作者以及气象院校师生参考。

中期数值天气预报文集

姜达雍 王宗皓 纪立人 等著

气象出版社出版

(北京西郊白石桥路 46 号)

新华书店北京发行所发行 全国各地新华书店经售

北京印刷一厂印刷

开本: 787×1092, 1/16 印张: 12.25 字数: 304 千字 印数: 3,000

1982 年 6 月第 1 版 1982 年 6 月第 1 次印刷

科技新书目: 25—78 统一书号: 13194·0072

定价: 1.30 元

前 言

数值天气预报是建立在气象学、流体动力学、数学这三门学科相结合基础上的新兴学科。从第一张数值天气预报图问世到今天，仅仅有三十年，而这门学科本身及其在整个气象科学中的地位，却发生了巨大变化。它的理论基础和由此建立的数值模式，已从最初简单的正压地转模式，发展成为今日结构细致、能够模拟大气中复杂物理过程的原始方程模式，从而，预报准确率得到了显著的提高。例如，目前 500 毫巴位势高度 24 小时预报同 1950 年相比，准确率提高了约 40%。因此，数值天气预报已为世界各国气象部门广泛应用，并日渐成为天气预报的主体。与此同时，随同它发展起来的数值“实验”方法，也渗透到气象科学的各个学科领域。作为研究大气运动规律的强有力的手段，它已促使大气科学成为一门具有数学物理基础的、拥有现代实验手段的科学。

进入七十年代以后，由于生产发展和各方面的需要，国内外都加强了时效达两周的中期数值预报的基础理论和预报应用试验研究，在一定程度上，它已成为大气科学研究中重点攻关的课题之一。它要求研究对流层和平流层物理过程，是为了认识天气演变的瞬时状态，以便提高短、中期的天气预报准确性。气象物理化、数学化、工程化（包括气象资料收集、整理和库存），已经是气象科学发展的现实和总趋势。

应该指出，中期数值天气预报是涉及面广、问题较多的大课题，它具体包括以下六个方面：

1. 中期天气过程和中期预报的物理基础的分析研究；
2. 中期模式的物理和动力学（包括小尺度过程和大尺度之间的相互作用）以及大气化学等的研究；
3. 中期模式方程的计算方法研究；
4. 全球大气观测最佳系统和资料系统的研究；
5. 四维资料同化、资料处理和建立全球资料库；
6. 中期预报产品的检验、评估和应用等。

这些课题既有一定的相对独立性，又是相互联系的。近年来，国际上在中期预报试验方面已经取得了令人鼓舞的成就。例如，在中纬度地区，可以预报第二代、第三代气旋的生成；可以预报低纬度的一些天气现象；已经发现南北半球天气系统相互影响的程度等。从世界范围来看，能够成功地作出时效达两周左右的中期预报实例的，已经不是个别国家、个别单位，也不是少数个例，这足以说明实现中期数值预报不仅是可望而且是可及的。然而，它和短期天气预报相比，毕竟还属年轻，许多问题亟待解决，真正实现业务预报，还有一段历程，要做大量的多方面的研究。除目前延伸预报这一途径外，还应创立新理论、新方法，探索其它途径，弄清中期天气过程的物理规律；弄清中期天气过程的主、次控制因子以及描述方法等。随着大气探测、资料处理、分析预报模式和预报服务自动化系统的发展，以及随着大气动力学理论研究的深入，必然要推进数值模拟实验。从而，使人们更加深入地认识中期天气过程，使中期天气预报的现代科学技术基础更加牢固，把人类预测和防御自然灾害的能力提高到一个更高的水平。

当前，国内有关单位在中期数值天气预报的上述六个方面，广泛地开展了一些研究工作

和试验工作。为了交流经验特将我们近两年来的部分成果汇集成册。

本文集由十七篇论文组成。内容包括中期数值天气预报的有关问题、设想和试验，初值和边值处理问题，计算方法的研究，中期天气过程分析和中期预报的物理基础的探讨，大气数值模式试验的初步结果，气象分析预报系统工程的理论模型和电子计算机在我国气象资料填图中的应用，另外，还概述了大气环流模式在研究和应用中的新成就。

本论文集可供气象研究工作者、气象业务工作者以及气象院校师生参考。

一九八〇年八月于北京

目 录

中期数值天气预报的问题和设想·····	姜达雍 张杰英 王诗文 (1)
关于中期数值预报一些问题的讨论和试验·····	袁重光 (15)
原始方程模式初值处理问题的初步研究·····	纪立人 徐飞亚 (25)
全球高度场和低纬度实测风资料的 Hough 函数协调试验 ·····	吴津生 王宗皓 (39)
不同初值处理和边值情况下的预报试验·····	王诗文 张杰英 (44)
天气预报方程自稳定浮动分裂显式算法·····	王宗皓 (57)
平方守恒型差分格式的构造·····	季仲贞 (77)
离散 Helmholtz 型方程数值解法的比较研究·····	刘金达 (86)
基于联机运算的大气模式设计及其算法的探讨·····	王宗皓 吴津生 (92)
扰动动能波谱的年变化和中期周期变化·····	仇永炎 李鲁阳 (99)
候平均图中期数值预报试验·····	张杰英 陈晓光 姜达雍 (107)
应用滤波方法作旬平均温度预报的试验·····	吕越华 郭裕福 赵汉光 (114)
一次冷空气过程的数值分析·····	纪立人 徐飞亚 游性恬 (120)
一个包括多种物理过程作用的原始方程数值模式·····	
·····	姜达雍 王诗文 张杰英 杨梅玉 朱抱真 (137)
天气分析预报系统工程理论模型·····	王宗皓 (160)
电子计算机在我国气象资料填图中的应用·····	杨梅玉 谢文清 孙 布 (167)
大气环流模式的研究与应用·····	姜达雍 张杰英 (174)

COLLECTED PAPERS RELATED TO MEDIUM RANGE NUMERICAL WEATHER PREDICTION

CONTENTS

Problems and Prospects for Medium Range Numerical Weather Forecasts.....	
.....Jiang Dayong, Zhang Jieying, Wang Shiwen (1)	
Discussions and Experiments on the Medium Range Numerical Weather Prediction.....	
.....Yuan Chongguang (15)	
A Preliminary Study on Initialization for Primitive Equation Model.....	
.....Ji Liren, Xu Feiya (25)	
The Initialization Experiment with Hough Harmonic Analysis on the Global Height Field and Observational Wind Data 20°N-20°S Zone.....	
.....Wu Jinsheng, Wang Zonghao (39)	
A Test of Forecast with Different Initial Value Treatment Schemes and Different Boundary Conditions.....	
.....Wang Shiwen, Zhang Jieying (44)	
On Auto-Stability Floating Splitting Algorithm for Weather Forecasting Equation.....	
.....Wang Zonghao (57)	
The Construction of Difference Schemes of Quadratic Conservation.....	
.....Ji Zhongzhen (77)	
A Comparative Study of Numerical Solutions for the Discrete Helmholtz Equation.....	
.....Liu Jinda (86)	
The Study of Design and Algorithm for Atmosphere Dynamical Model based on Arrangement Computer.....	
.....Wang Zonghao, Wu Jinsheng (92)	
Annual Variation and Medium Range Periodic Variation of Perturbation Kinetic Energy Spectrum.....	
.....Qiu Yongyan, Li Luyang (99)	
Experiments for Extended Numerical Prediction of Five-days Mean Chart.....	
.....Zhang Jieying, Chen Xiaoguang, Jiang Dayong (107)	
Experiment for Prediction Mean Temperature of Ten-days by the Filtering Method.....	
.....Lu Yuehua, Guo Yufu, Zhao Hanguang (114)	
A Numerical Analysis of the Process of an Outburst of Cold Wave.....	
.....Ji Liren, Xu Feiya, You Xingtian (120)	
A Primitive Equation Numerical Model Including Various Physical Processes.....	
.....Jiang Dayong, Wang Shiwen, Zhang Jieying, Yang Meiyu, Zhu Baozhen (137)	
Theoretical Models for the Weather Analysis-forecasting Systematized Engineering.....	
.....Wang Zonghao (160)	
Application of Electronic Computer in Plotting Synoptic Chart in Our Country.....	
.....Yang Meiyu, Xie Wenqing, Sun Bu (167)	
Research and Applications of the General Circulation Models of Atmosphere.....	
.....Jiang Dayong, Zhang Jieying (174)	

中期数值天气预报的问题和设想

姜达雍 张杰英 王诗文

(中央气象局气象科学研究院天气气候研究所)

摘 要

本文首先谈到中期数值天气预报的任务、特点和现状。其次,探讨了中期数值天气预报中的几个重要问题:适当地提高空间分辨率;垂直坐标的选取与地形效应;次网格尺度的物理过程;地面摩擦的影响;大尺度加热和大气波动;中期数值预报模式的特征和差分方案应遵循的原理。第三,对中期数值预报提出了一些设想:不同尺度的扰动影响不同时段的天气过程;考虑高中低层物理过程的不同,模式数学表达式应有所不同;从宏观与微观理论结合的观点来探讨;高中低纬环流的相互联系;中期预报与计算方法。最后,对冯·诺伊曼(John Von Neumann)1959年所预言的“首先尝试短期天气预报,然后长期预报,最后解决中期预报”论点,认为已为现实的中期天气预报实践所突破。

一、中期数值预报的任务、特点和现状

随着国家经济和国防现代化的需要,进入七十年代后,在国内外有关单位都进行了中期数值天气预报的理论研究和试验工作^{[1][2][3][4]}。

中期数值预报的主要任务是:为制作三天到十五天的天气预报提供理论依据,并在这种规律指导下给出具体的业务工作方法,通过相应的组织系统作出三天到十五天逐日的天气预报,供有关单位使用。

超过三天的中期预报,从本质上说,显然不同于二天以内的短期预报。从物理学观点看,应该有一个中期特征作为预报的着眼点。初始场经过几天的演变,已经基本上失去了原来的结构,有些扰动减弱或消失了,同时可能产生或发展新的扰动。因此,中期预报模式必须有能力预报这些发生、发展以及减弱、消失的现象。也就是说,中期预报模式应能真实地描述大气中能量消耗和能量制造的过程。由此看来,中期预报要比仅仅预报时间和空间平均值的延伸预报更困难些。

检验中期预报,不能简单地用均方根误差和相关系数来评定。例如,在三至五天的预报图中,出现主要天气系统有一定规律的超前或落后现象,如按上述度量来检查,则由于位相超前、落后或相反,评分甚低。但从使用者的角度来看,这种预报图是很有使用价值的。另外,从服务观点来看,农业、运输业在安排计划中,虽然也关心各个具体气旋(反气旋)产生的地区、路径以及与此相关的天气现象,即关心具体的个性方面,但对那些准静止的大型天气形势预报,即一般的共性方面,关心的程度要稍重一些。因此,从服务观点来看,短期预报关心具体的个性,长期预报关心一般的共性,而中期预报则应有关心个性和共性适当兼顾的特点。

近年来,美国、英国以及欧洲中期天气预报中心(1975年11月在英国成立,有十七个国家参加,简称ECMWF)等有关研究单位,采用全球大气环流模式在研制中期预报方面,已经取得了初步的进展。已经试验作出了十天的中期天气数值预报图,并和北半球观测实况进

行了比较，在大尺度气旋和反气旋的发展预报中，获得了令人鼓舞的结果。然而，总的说来，目前我们对中期数值预报的认识，还处在类似五十年代初对短期数值预报的认识阶段，是不能令人满意的，研究思路较窄。

二、中期数值预报中的几个重要问题

1. 适当地提高空间分辨率

空间分辨率过低，对天气形势的细微变化反映不灵敏，并且有可能漏掉一些重要的系统差别。在国内外进行不同垂直分辨率和不同水平分辨率下天气预报效果的对比试验中，均发现：适当地提高空间分辨率，对预报效果都有明显的改进。

例如，作者曾用北半球五层原始方程模式作了一次不同水平分辨率的数值预报效果对比。初始场是1975年4月19日20点200、500、700、850和1000毫巴高度场，图1是500毫巴初始场，图2是该模式在粗网格($d=540$ 公里)情况下的24小时预报图，图3是该模式

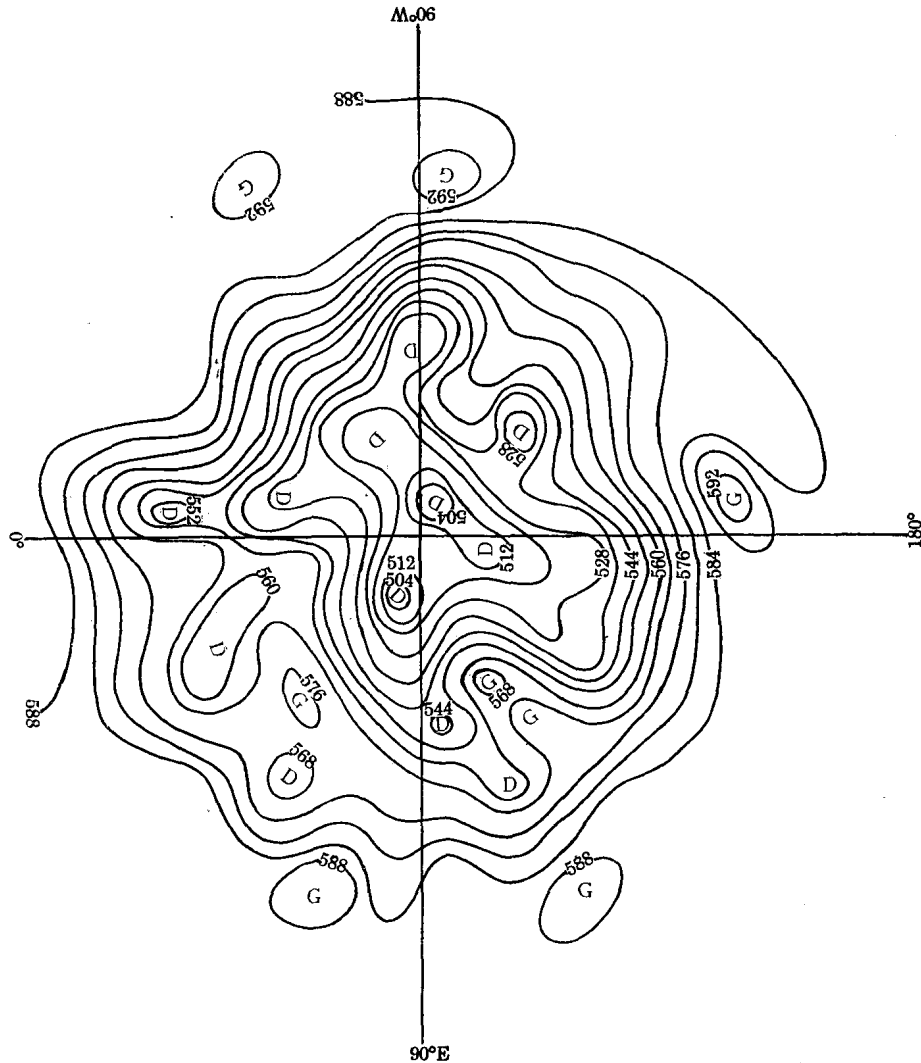


图 1 500毫巴初始场
(1975年4月19日20时)

在较小网格($d=381$ 公里)情况下的 24 小时 预报图, 图 4 是 1975 年 4 月 20 日 20 点实况。
从以上几张图可以清楚地看出: 较小网格情况下的 24 小时预报效果是良好的。

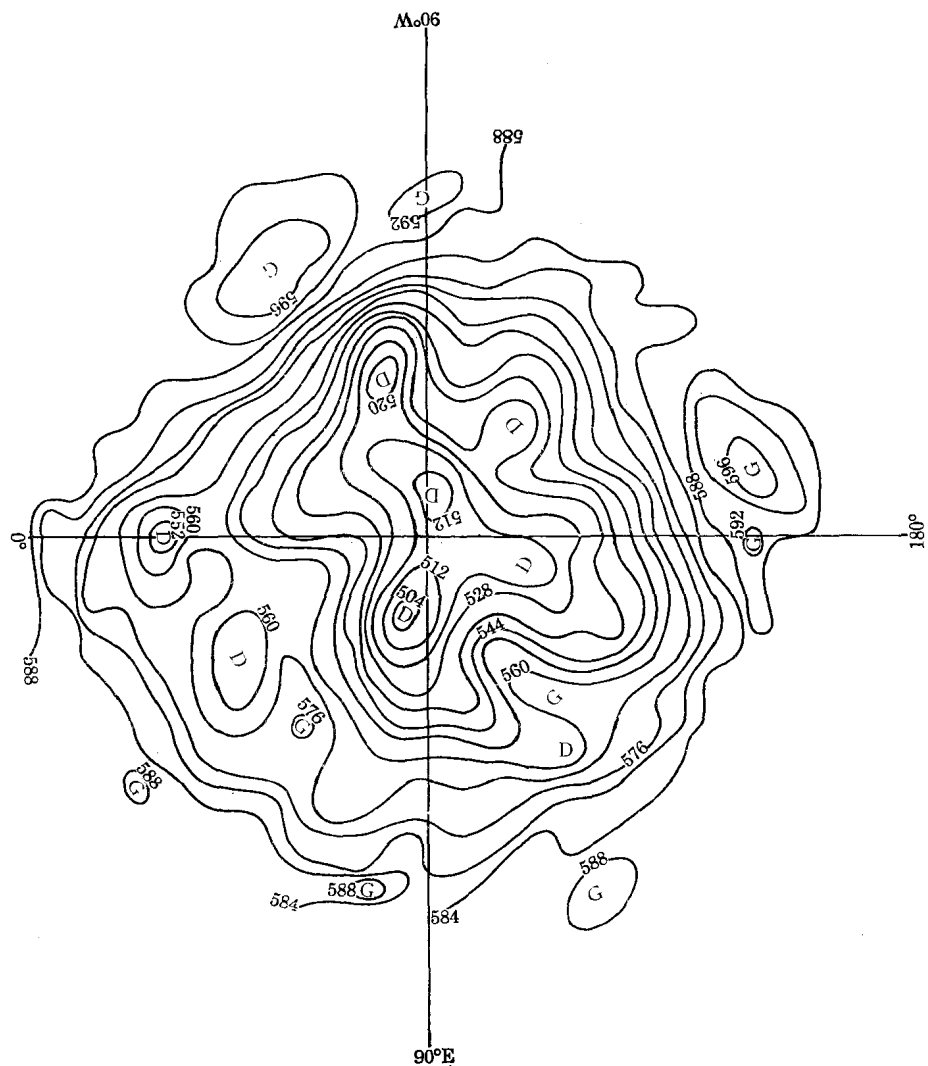


图 2 水平网格 $d=540$ 公里的 500 毫巴 24 小时预报图
(1975 年 4 月 20 日 20 时)

作者还就三个不同垂直分辨率(一个三层, 一个五层, 一个七层)的北半球原始方程模式的短期预报个例试验效果作了对比。

图 5 是三层北半球原始方程模式作出的 24 小时预报, 图 6 是五层北半球原始方程模式作出的 24 小时预报, 图 7 是七层北半球原始方程模式作出的 24 小时预报。将这三张图与实况(图 4)对照, 可以看出: 在中高纬度, 在天气尺度扰动的中心强度方面, 五层垂直分辨率结果较好。说明模式设计较为合理。

对数值预报来说, 究竟需要怎样精细的分辨率? 这是一个实际问题, 但由于它要求考虑各种因素, 从而使得问题复杂化, 所以要给出明确的回答又是不容易的。

然而, 人们在实践中很早就发现截断误差将使得预报的波动传播速度太慢和发生偏离现

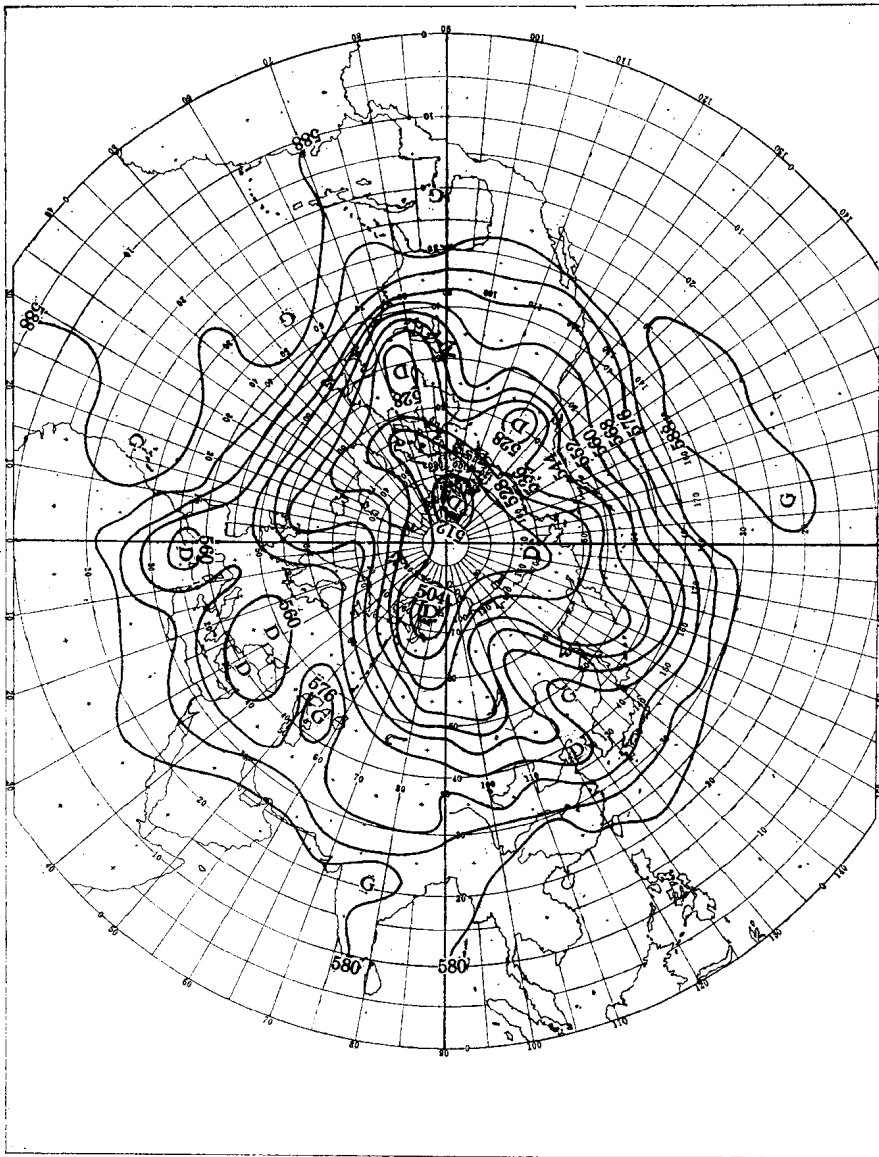


图 3 水平网格 $d=381$ 公里的 500 毫巴 24 小时预报图
(1975 年 4 月 20 日 20 时)

象。并且也进行了大、小网格的天气预报效果对比试验，实践证明正如上述，小网格比粗网格的预报效果有了显著的改进。关于截断误差和水平分辨率之间的关系，罗伯特等在七十年代初期就认为误差与水平网格大小的平方 $(\Delta s)^2$ 成比例。此外，还研究了垂直分辨率(五层到十四层)和垂直截断误差的关系，并且断定八至十层的垂直分辨率对于短期数值天气预报来说，可能是最合适的

在短期预报中，四阶有限差分的优点已被探讨^[5]。将它应用到包括所有物理过程的原始方程模式的研究已经实现。高阶差分的应用必须用到模式中所有各项中去，否则精密方案的优点将会失掉，并且不利的条件还会出现，这就是因为高阶差分常常导致计算不稳定的产生。

水平分辨率和垂直分辨率应该维持怎样的比例才适当？有人认为：对锋面来说，有理由

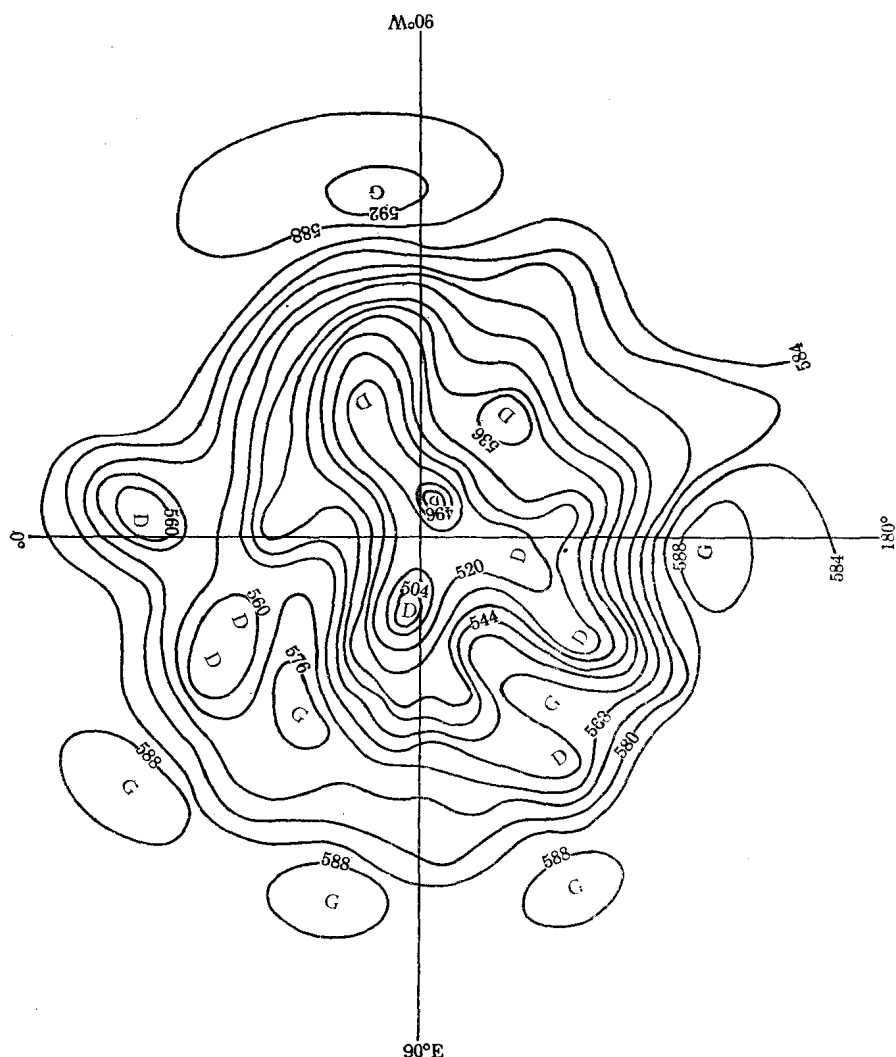


图 4 500 毫巴 24 小时实况图
(1975 年 4 月 20 日 20 时)

要求模式中水平格距和垂直层距之间的比例类似于锋面的斜率关系。即若采用 100 公里网格的水平分辨率，那么在对流层中部垂直分辨率大约为 75 毫巴。

在中期数值天气预报方面，若采用 100 公里量级的水平分辨率，则相应的垂直分辨率为 50—100 毫巴。因此，垂直层次不应低于五层，如何处理得当，还应视计算机的装备条件而定。

2. 垂直坐标的选择与地形效应

在模式设计中，有各种垂直坐标可以描述大气的垂直结构。诚然，各种坐标系中预报方程的最根本特性是：必须满足质量守恒和总能量守恒原理。笠原 (Kasahara^[6]) 曾提出一广义的垂直坐标系，在处理下边界条件考虑地形影响时，设想仿照菲利普斯 (Phillips, 1957) 修正 P 坐标并提出 σ 坐标的思路，把它延伸或推广，提出了修正 Z 坐标、修正 σ 坐标和修正 θ 坐标等。笠原渴望通过这些新的坐标系，将能进一步有助于人们在预报模式中处理地形作用的效应。

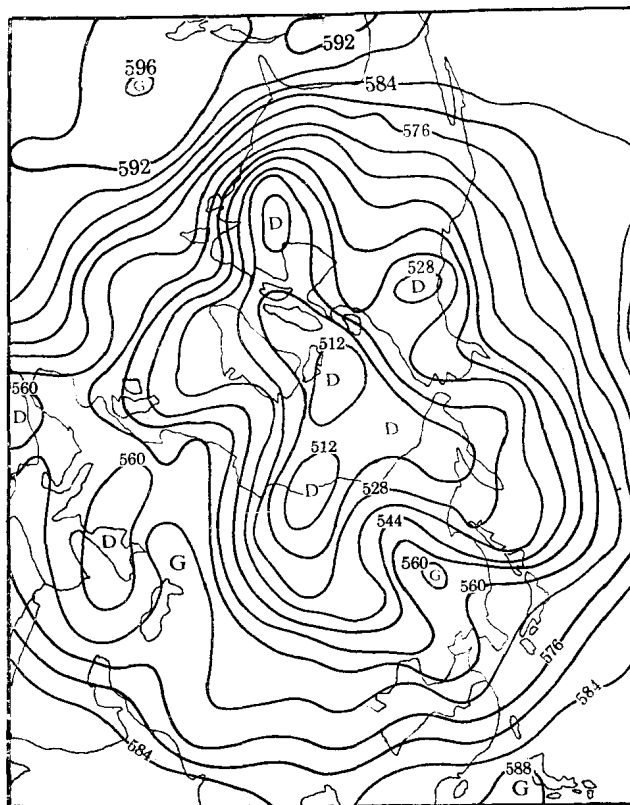


图 5 三层模式 24 小时预报图
(1975 年 4 月 20 日 20 时 500 毫巴)

我们认为，在笠原的研究思路中，一个不足的方面是：没有充分地 from 物理方面探讨各种坐标系的优缺点，而深入了解各种坐标系的优缺点，可以取长补短，得出一种比较好的混合坐标系。

例如， P 坐标的优点是预报方程简单明了，缺点是地表面气压随时间和空间而变化，在处理下边界条件时比较困难。而修正的 σ 坐标优点是上下边界都是坐标面，容易处理，缺点是水平气压梯度力项的计算是两个大项的小差，在陡峭的地形处，计算误差大，造成严重的失真。如果我们所选择的坐标是这样一种混合坐标系：在对流层中部以上采用 P 坐标，在对流层中部以下采用 σ 坐标。这样， P 坐标中的缺点就由 σ 坐标的优点来弥补，而 σ 坐标中的缺点又得到 P 坐标的优点来补充，显然这是选择垂直坐标的一种有效途径。

地形效应在中期预报模式中是十分重要的。象青藏高原这样大的地形障碍，它必然影响所有尺度的大气运动(从超长波尺度、长波尺度、背风坡低压以至小的湍流涡旋)。采用适当的坐标系，只能有助于解决而不可能完全解决地形效应问题。在讨论地形对大气环流流型的影响时，应该考虑以下三个因素：(1) 地面摩擦引起的边界层效应，(2) 由于海陆分布所形成的大尺度热源和热汇，(3) 对于大气运动起障碍作用的大尺度地形。为了了解以上三种影响的相对重要性，可以在大气环流模式中进行各种“控制”实验。

3. 次网格尺度的物理过程

在设计中期数值预报模式时，必须考虑到大气中能源和能汇的形成，因此，辐射传递、水汽凝结、涡动扩散和动能消耗(摩擦作用)等物理过程，都应视为重要的因素。然而这些过

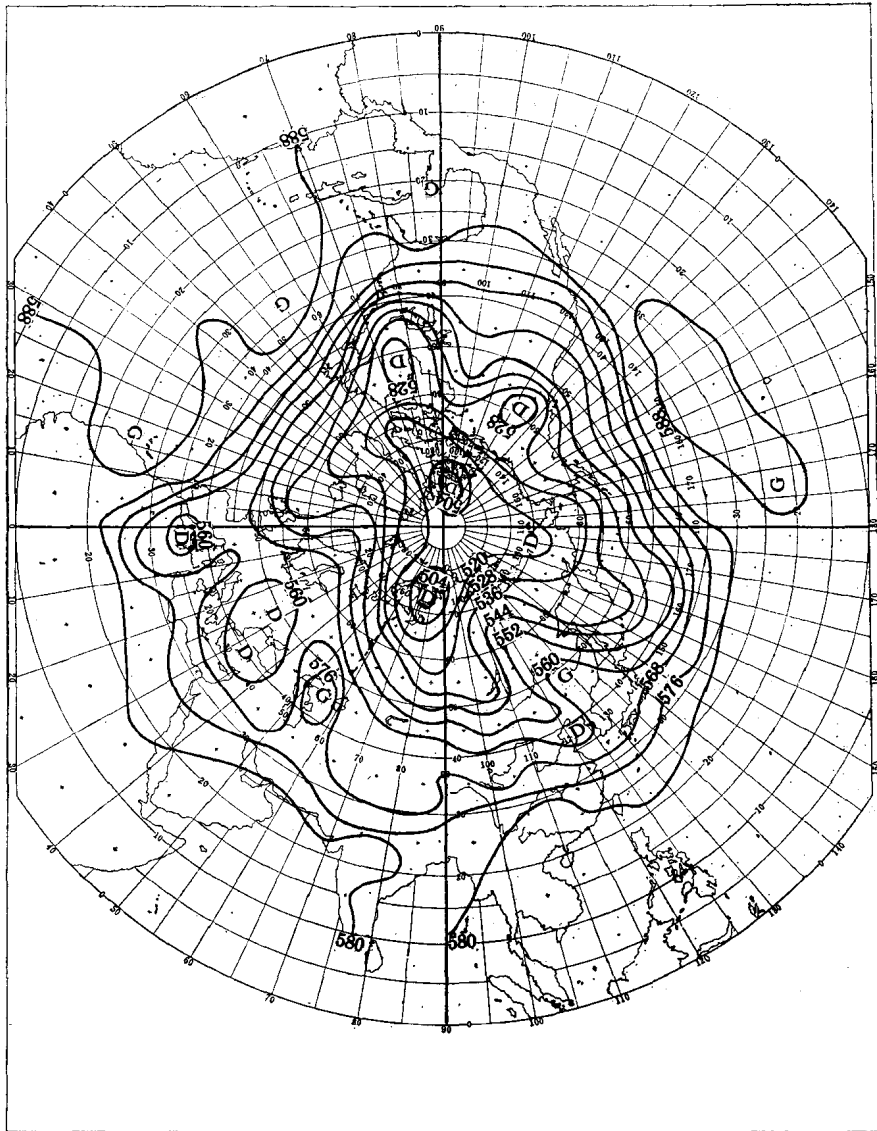


图 6 五层模式 24 小时预报图
(1975 年 4 月 20 日 20 时 500 毫巴)

程的机制主要是涉及小尺度扰动甚至涉及到分子运动过程。这就给我们的模式设计工作增加了困难。

众所周知，包括这些非绝热在内的物理过程，是中期预报模式的基本特征之一。但在一般情况下，详尽的机制不可能得到合理的处理。因为相对于小尺度扰动和分子运动来说，空间分辨率实在是太粗糙了，尺度接近或小于格距的系统，显然不能用这样的网格分析，这种现象一般称为次网格过程。但是，诸如湍流、对流、辐射传递、摩擦、感热交换、水汽凝结、蒸发等小尺度现象的物理过程，对于模拟大气环流、设计中期模式来说，是不可缺少的。目前，一个折衷的方案就是将这些过程“参数化”。以此作为宏观大尺度模式中描述次网格过程的统计学效应的一种方法。用某种近似或把次网格过程的统计影响“参数化”，考虑到大尺度参数里，并将这些参变量函数作为源或汇包括在预报大尺度因变量的方程中去。

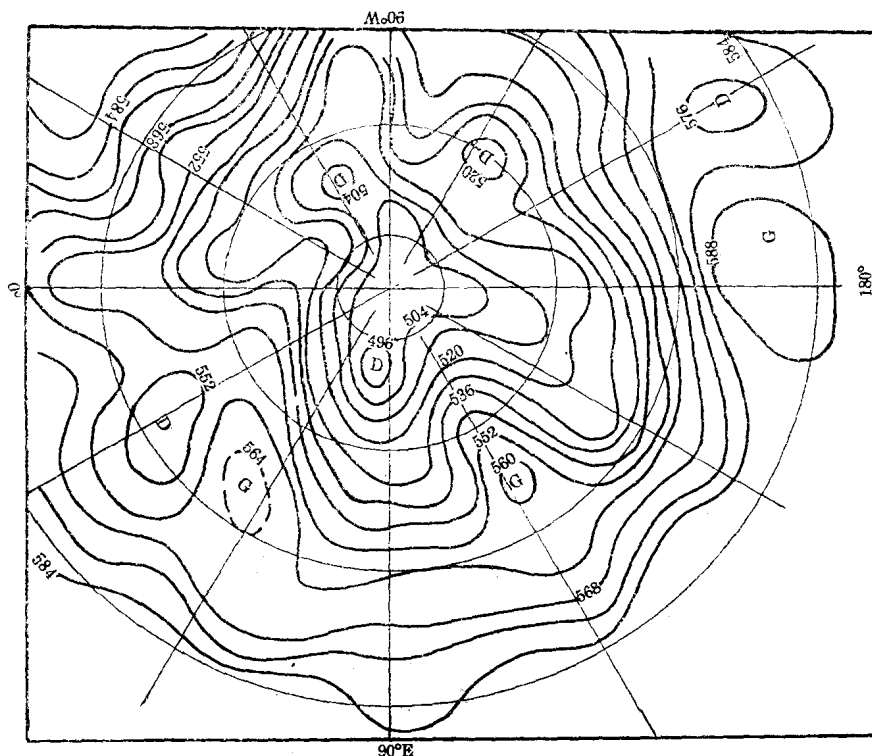


图 7 七层模式 24 小时预报图
(1975 年 4 月 20 日 20 时 500 毫巴)

目前,已有不少工作对于辐射、地表面热平衡、地表面应力和热量水汽传递、在行星边界层和自由大气中的垂直混和以及积云对流等过程进行了参数化试验。

4. 地面摩擦的影响

叶笃正、朱抱真 1958 年在概括了五十年代关于地面摩擦效应的研究时指出^[7]: (1) 地面摩擦影响必然经常地作用于大气的下界, 应给予注意。一般在 500 毫巴的空气 2—3 星期绕地球一周, 摩擦效应可将空气所得到的扰动阻尼了绝大部分。明确指出了摩擦对扰动的阻尼作用。(2) 地面摩擦影响可传到高空, 它不仅影响了 500 毫巴的扰动振幅, 而且在质的方面影响了槽脊的地理分布。在无地面摩擦的情况下, 槽脊的地理位置上下是一致的, 地面摩擦的影响使槽或脊的轴随高度向西发生倾斜。(3) 地面摩擦在海洋上和在陆地上是不一样的。

近年来, 西德的费希尔 (G. Fischer)^[8] 为了研究天气尺度扰动的发展受地面摩擦的影响, 采用了斜压原始方程模式数值计算的方法来实现。它表明了什么样的地面气压场对锋面的演变是起作用的; 同时通过在行星边界层中模拟摩擦过程的不同形式的试验, 得到了有益的结果: 地面摩擦某种公式的数值试验, 增进了气旋的再生和产生相当明显急剧的锋面。对冷锋来说尤其如此。这和五十年代纯阻尼作用的论点相对照, 显然是有所前进的。

1978 年 6 月 8 日至 12 日, 新疆出现了一次有记录以来的最大的大面积降水 (暴雨), 乌鲁木齐降水 91 毫米, 天池 229.0 毫米。对于这次降水预报, 从形势调整的预报来讲, 时效达 5 天, 但对形势调整中具体天气系统的演变, 认识极差。归其原因与地面摩擦效应和地形作用不清楚有关。即当一个南北向跨度很大很深的槽 (高层图为超长波槽) 在越过高原 (帕米

尔)、盆地(塔里木)、山脉(东西向山脉)等错综复杂的地形时,北端东移北缩,南端在塔里木盆地西北部(即背风坡)形成涡旋。这个涡旋自成系统以后缓慢向东北前进,造成大面积降水。从而预报员很自然地提出:采用什么方法事先就能分析得出,对某些扰动,地面摩擦效应显著;而对另一些扰动,地面摩擦效应不显著。根据我国天气演变实践来看,地面摩擦作用对有些扰动是起阻尼作用,而对另一些扰动则可能起再生和发展作用。对于地面摩擦效应的这一新颖观点,尚期待我国更多的预报员给予关注和检验。

5. 大尺度加热和大气波动

非绝热加热对于大尺度气旋的发生和大气波动的发展与否的影响,早已有各种研究。

例如有人研究气旋发生时,将加热尺度作为一个因素,发现在一定条件下,单纯增加地面加热时,气压将下降;气压下降的最大强度与加热率是成正比的。又例如有人研究表明,加热对于新的气旋形成和发展有显著影响,如在周围相对暖的水面上,气旋就要加深。

关于加热对斜压大气波动的影响,有人作了初步的试验,他采用一个简单的两层模式,在斜压不稳定情况下,加热将使波动产生或使已有的波动发展。

一般地讲,完整的加热项的公式是非常复杂的,因为它是许多因素综合作用的过程。但是,如果运动是限制在大尺度、准地转运动的条件下,就可以将加热项简化为线性化的近似值,目前已有得到了两层模式中主要加热过程的简单表达式^[9]。尽管这种处理十分简单,但也十分有益地分析了加热率对大气波动的传播速率和衰减率是有影响的。当然,这个研究

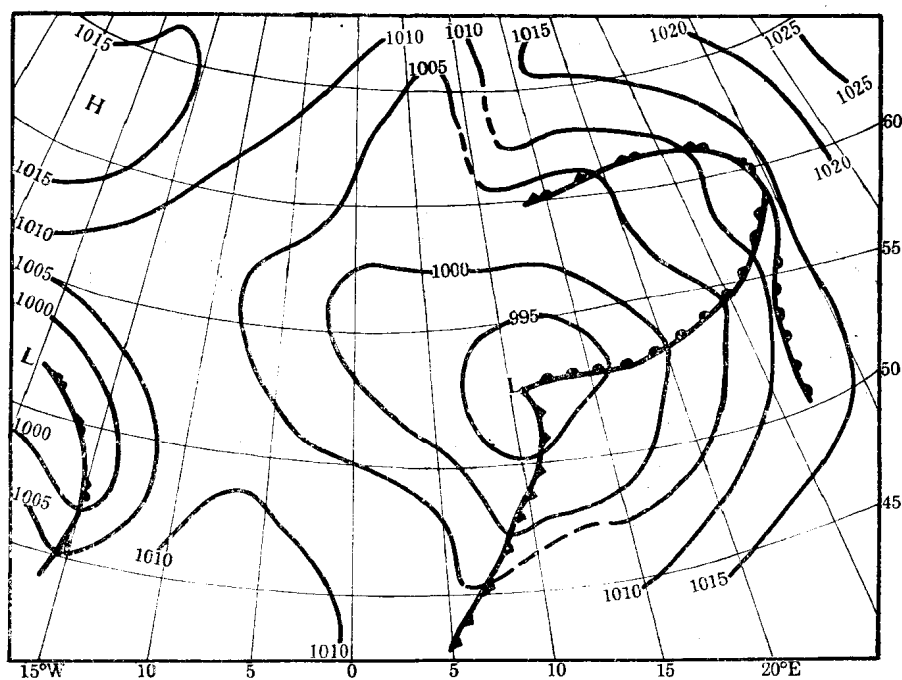


图 8 地面初始场

结果的应用受到一定的假设条件限制。

加热率的作用下某些物理量的倾向(重力位势倾向、地面气压倾向、温度倾向等)的计算,依赖于热力分层,依赖于加热率和其他参数的垂直分布。这使我们确信:加热率具有重要的意义,特别是在大尺度情况下,它影响修正了大气的波动。因此,在设计中期数值天气

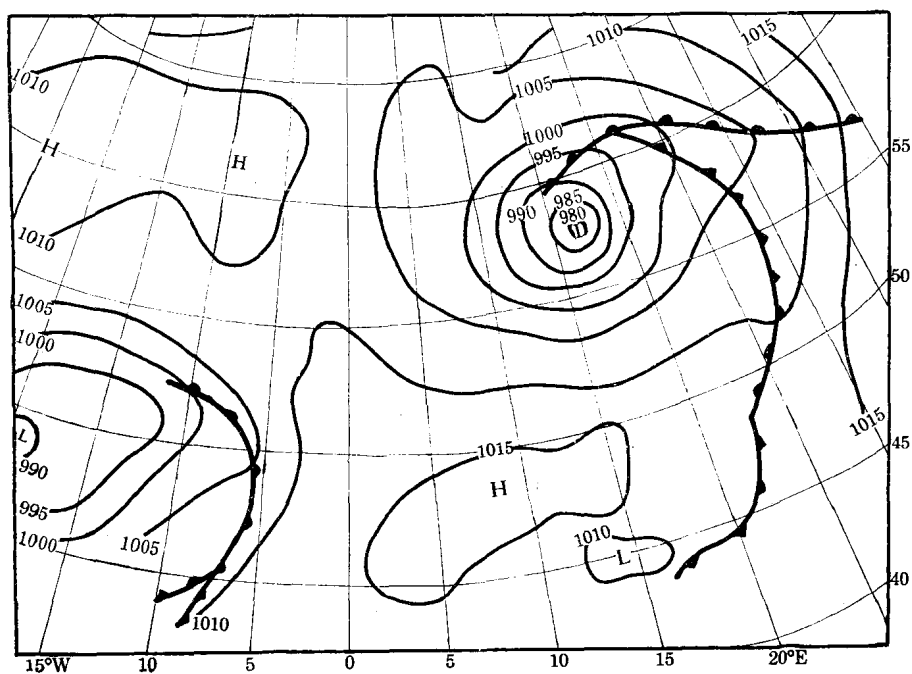


图 9 24 小时地面实况图

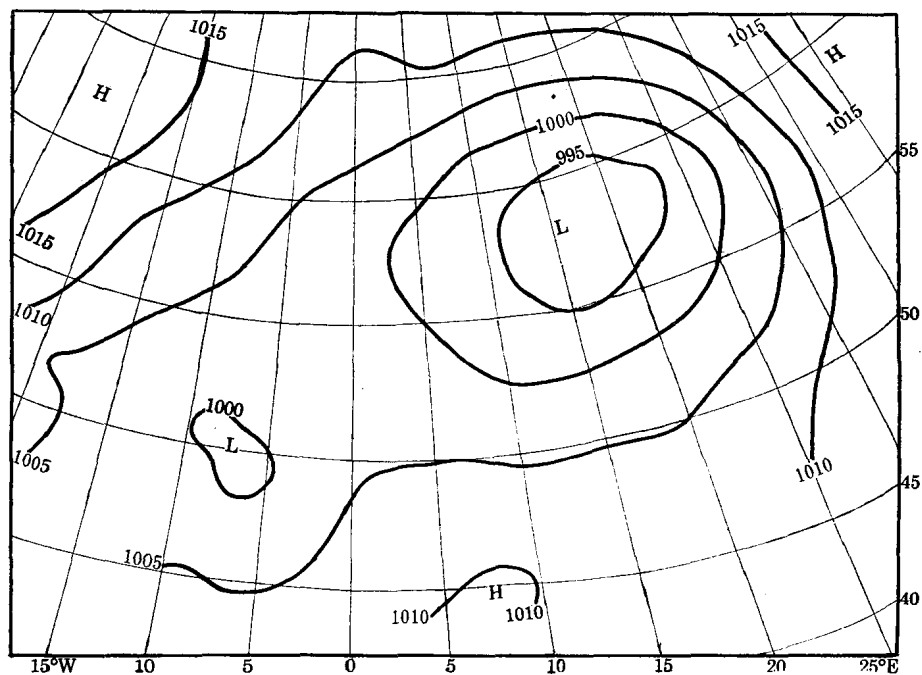


图 10 不考虑凝结加热率效应的 24 小时地面预报图

预报模式时，准确地考虑加热率的影响是十分重要的。

例如，关于大尺度稳定凝结作用所引起的加热率效应的各种研究，已在各种数值模式中进行了十分有效的研究。图 8—图 11 给出了考虑和不考虑凝结加热率效应的数值预报试验图^[10]。图 8 表示初始场(1967 年×月×日地面图)，图 9 表示 24 小时地面实况图，图 10 表示没有考虑凝结加热率时的地面气压场 24 小时预报图，图 11 表示考虑了凝结加热率时地面