

专题评述

天气预报现代化的途径

朱抱真

(中国科学院大气物理研究所)

当前华主席、党中央为我们指明了科学技术现代化的目标,要求我们能尽快地实现科学技术现代化。大气科学的中心任务是提高天气预报的准确度,天气预报的进展是整个大气科学发展的基础。因此怎样使我国的天气预报科学实现现代化,是我们气象工作者应该考虑的重要问题。本文想从近代天气预报科学的进展情况讨论一下这个问题。

一、天气预报方法必须逐步地建立在坚实的物理学基础上

天气预报现代化的方向是客观、定量、迅速地提供准确的预报,要完成这一目标必须从天气变化的本质着眼。复杂的天气变化是发生在地球周围的旋转大气运动中,大气是附着于地球周围的可压缩流体,因此天气变化的问题在本质上是地球流体动力学问题。这就包括两个主要特点:

- 1) 大气运动和天气变化首先是属于物理学问题,它遵循流体热力、动力学规律;
- 2) 大气运动是附着于复杂的地球表面上,随着地球旋转运动,因此它不只是简单地遵循古典流体力学规律,而是具有地球流体力学的特征。

上述第1个特点决定了天气预报的发展方向必须把预报方法建立在坚实的物理学——流体力学规律的基础上。第2个特点形成了大气运动的极端复杂性,例如:

- 1) 地球的旋转造成大气的大尺度运动的准地转性,大气运动在地转偏向力的作用下不断调整使得大气变化的动力过程非常重要。因此大气变化并不都能简单地归结于热力始因,风场的变化并不一定是气压场变化的结果,也可以是气压场变化的原因。

- 2) 大气运动受地球表面的海陆分布的动力热力作用和太阳辐射的热力作用,但这些作用都要通过大气的风场结构、温度层结和水汽分布等状态来实现,也就是说这些作用和大气本身的运动有关。因此太阳辐射作用、海陆热力作用和大气运动形成一个复杂的反馈系统。

- 3) 自转地球有着不同尺度的地形起伏和水陆差异,地球又以太阳为焦点作椭圆轨道的公转,这使大气运动包括了很多的长短不同的时间尺度和大小不同的空间尺度,不同尺度的运动又具有非线性的相互制约关系。这种不同尺度之间的非线性制约与大气运动的不稳定以及间歇性突变有关,这是天气变化的一个最重要而又最困难的问题。

到目前为止,人们对于这些地球流体力学的规律的了解仍然很不清楚,这给准确地予

报天气造成了很大的困难。针对这种困难,人们创造了不同类型的预报模式,一般可划分为概念模式、统计模式和动力模式三种。

概念模式是从丰富的天气预报实践,借助物理学、天气动力学规律而提炼的预报概念,这是有经验的预报员传统的预报方法;它的优点在于灵活性,缺点是半经验性的,难以用严格的数学式表达,因此无法作出客观、定量的预报。

现在的统计模式是利用统计学把预报因子和预报量构成统计性关系。在方法上是客观、定量的,但实践证明只有那些预报因子和预报量有明确物理关系的统计模式,才是有生命力的。但从大量可能因子中挑选物理上关系最密切的因子是极困难的;天气变化是复杂的、非线性的,不是少数几个线性关系的预报因子所决定的,而预报因子的增加又会引起统计关系的不稳定,使得拟合关系好而预报效果差,这是统计模式最根本的难题。目前的趋势是把动力数值预报的一些输出量和天气要素预报量作出统计关系,现已证实这种动力、统计混合模式,要比单纯的统计模式效果好。

动力模式是依赖地球大气流体动力学规律建立起来的预报模式。这就是说,把地球大气运动与流体力学规律结合起来,解决天气预报问题。这一点是非常重要的,气象学史上成功的重大理论模式并不是单纯从流体力学规律推导得到的,而是在深入的天气实践基础上,结合流体力学规律,创造性地提出来的。

锋面模式是在分析地面天气图中,把气象要素(风和温度等)的不连续线看作冷暖气团交绥的一个物质面和地面的交线,按照冷暖空气的流体运动规律而创造的富有坚实的物理学基础的模式。因此这一模式对天气分析和预报的贡献是划时代的。但由于锋生的动力学机制仍无成功的理论,因此锋面模式虽是一个现实的模式,但未能发展成严格的预报工具。

长波模式则是在高空天气图深入分析的基础上,把高空的大气波动看成单独的,自身维持的系统,考虑地转参数随纬度的变化对大型运动的重要性,按照大气涡度变化的流体动力学规律,所创造的气象学上第一个成功的大气动力学模式。它不但成为近代天气预报的科学基础,并且影响了几乎整个气象学的领域,也正是在长波理论的基础上发展起客观定量的流体力学数值预报方法。

二、数值天气预报的地位和作用

由于天气预报的科学方法必须建立在逐步真实地反映大气变化过程的物理机制上,必须从大气变化的动力过程着眼。而数值预报的最优越的性能就是能抓住大气变化的动力过程,并且通过计算机能够作出定量的预报。因此数值预报正在天气预报现代化中起着主导的作用。

数值预报已有近三十年的历史,前十五年的进展是缓慢的,简单的准地转、绝热正压模式的短期预报延续了十几年。但六十年代中期开始的进展是迅速的,卫星探测技术和大气环流数值模拟的出现,给数值预报开辟了新的广阔途径。模式大气已从简单的准地转、绝热的正压大气,发展到复杂的非地转、非绝热斜压大气,主要进展表现在三个方面:

1. 业务预报方面有明显的提高,例如;

(a) 细网格有限区域模式对天气尺度的短期形势预报有了显著的提高, 现在可以发布过去不能作的海面气压场预报图。另外对降水区的预报也有了改善。

(b) 大气环流数值模式能作 7 天左右的形势预报, 目前有的国家已在发布 4—5 天的业务预报, 这样就把数值业务预报从二十多年只能作 48 小时预报, 进展到 5 天左右。

2. 数值预报的发展在科学上也正在发生深远的影响, 数值模拟和近代探测技术结合起来, 能对全球大气或一定地区的特殊过程进行“实验”性研究, 把天气动力学带入一个“实验”科学的阶段。因为传统的概念, 认为极端复杂的大气变化不可能用实验方法研究, 现在借助高速电子计算机, 把“逼真的”大气模式, 用数值方法进行大气变化的模拟。改变物理因子的组合与初始场的结构, 可以作各种“控制”性实验; 把计算的结果再与详细真实的探测记录相比较, 构成对整个(或地区)的大气进行实验研究。

3. 初始方程模式和卫星资料的引进, 正把大气探测、资料处理、客观分析、初值形成和大气运动的预报模式有机地统一起来。未来的预报业务将发生如下的变革: 一个数值大气模式在演进中不断地产生预报图, 同时也不断地产生分析图。从这一点可知探测现代化必须要求预报现代化, 否则现代化的探测资料无法更有效地用于预报。

因此, 动力数值预报在几种预报途径中占着主导地位, 正在成为预报现代化的主流。图 1 表示当代正在发展着的天气预报现代化的规模。

大型天气过程和地区性天气过程的短期预报正在以数值预报为主, 一个大型天气过

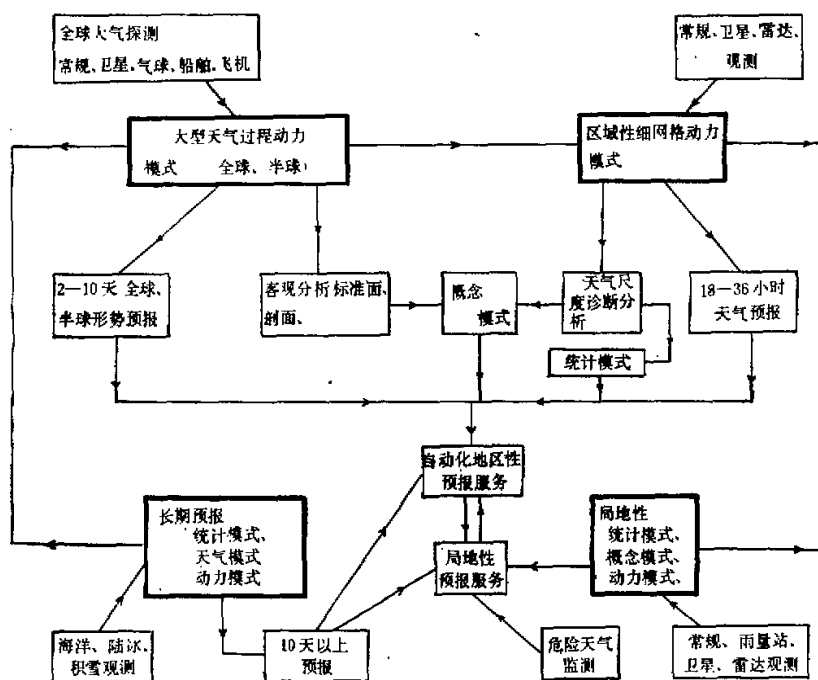


图 1 天气预报现代化的规模

程的数值模式可以处理非常规(如卫星、定高气球、船舶、飞机等)资料,包括复杂的影响大气变化的物理因子,能作出半球—全球范围 2—7 天的形势预报,并自动分析标准面形势图、剖面图和物理量(如涡度和垂直运动等)分布图,并向一个区域性细网格大气模式提供随时间变化的边值。

一个区域性数值模式能作出 18—36 小时的地区性气压形势和降水预报,并可给出付天气尺度的诊断分析。从这些模式输出的物理量结合统计模式,可以得到要素(最高、最低气温、降水等)预报的概率,再结合预报员所拥有的概念模式进行综合判断,作出最后的预报。通过自动化预报服务系统向外发布。

局地的天气预报现在主要由统计模式和概念模式作出。目前怎样利用大尺度的数值预报结果表示局地天气的研究工作正在进行;结合探测技术的发展与中尺度动力模式的研究,将会提供新的概念。

剧烈的灾害性天气(如暴雨、洪水)预报仍是当前预报上的难点,建立一种有效的观测监视系统,通过计算机将观测资料迅速整理成便于预报使用的数据,借助外推模式不断作出短时预报,仍然可以减少人民生命财产的损失。

10 天以上的逐日预报目前还不能数值模式作出,一个月的预报仅在利用“平均模式”试探。一个月以上的长期预报现在还只能从天气模式和统计模式得到,但利用大气环流数值模式可以分析长期过程的物理机制,由此开展起来的动力气候学研究无疑地会对长期天气预报探索着新的途径。

图 1 所表现的天气预报现代化方案,看起来要比传统的预报方案(天气图分析→概念模式→预报服务)的工序复杂得多,但是从天气预报科学的进展看,前者是必然的途径,而借助近代的高速电子计算技术,人们可以敏捷迅速地处理这种复杂的工序。

因此要实现天气预报现代化,应该把数值预报的发展工作放在主导的地位,而数值预报工作首先是发展国家预报中心的业务预报。一个现代化的国家预报中心应该配备大型快速电子计算机,能够完成下列 4 项任务:

- (1) 能够作出标准等压面的高度、温度、水汽和海面气压场的资料处理和客观分析;
- (2) 一个半球范围的包括非绝热和地形作用的初始方程预报模式,能作 48 小时以至 96 小时的大形势预报;
- (3) 一个有限区域的包括降水预报的细网格模式,能作 24—36 小时海面气压场和降水分布的预报;
- (4) 一个便于电子计算调用和检索资料的存取库。

这些业务的建立是一个国家天气预报近代化的起点。它是一个国家预报业务的中心环节,通过传真它将对广大的预报员(包括县站的)从数量极为庞大的观测信息中,迅速提供最有用的资料作为预报的引导。因此如何尽快地建立上述业务是天气预报现代化的首要问题。

三、基本研究的三个重要方面

数值模拟和数值预报在过去十五年虽有蓬勃的进展,但它对异常复杂的天气变化的

预报能力仍然是十分有限的,这也是必须承认的现实。表现在

(1) 平坦地区气压形势的短期预报已经较好,但降水量的预报仍然进展很小,更不用说暴雨等强烈的中小尺度天气现象了;

(2) 预报时效虽已延伸到 4—7 天,但 10 天以上的过程预报,目前可以说仍是无能为力。

因此现在有人认为“大气探测和计算技术装备有了很大的发展,但天气预报水平却没有得到相应的提高”,因而对复杂的数值模拟和数值预报提出怀疑^[1]。

我们认为,数值预报的成功并不能简单地归于技术装备,数值预报也不是简单的“数学-物理”。它是气象、物理、数学的三结合,并且可以说气象是“灵魂”。数值预报的进展不断要求,根据天气实践所创造的新的理论概念,建立新的模式,再回到预报实践中去检验模式,提高模式的性能。

早年的短期数值预报的成功是在滤去重力波的适应过程,突出准地转近似下的动力过程的概念下取得成功的。近代气象学认为气压场的变化是大气动力作用的过程,虽然任一地点的气压可以相当精确地等于该地上空的空气重量和,在这一点上是静力的,但气压变化的原因却是动力的。在地转偏向力作用下,我们所观测到的气压场变化(发展过程)是不断通过地转适应过程和地转破坏过程来完成的;后两者在发展过程中是对立统一的,由于变化是绝对的,而静止是相对的,在发展过程中应该不断出现地转适应和破坏,因此发展过程与适应、破坏过程在时间尺度上是可分的,但在时间先后上是不可分的,是同时进行的。在准地转模式中适应速度可以看作无穷大,因此模式中“滤掉”重力波,不包括适应过程而得到气压场的发展过程。实践证明这种模式能够预报系统的移动,但不怎么能预报系统的发展。重力波在天气系统发展特别是在剧烈天气形成中仍是重要的,现在的原始方程模式则包括了重力波和适应过程,这样的模式就更具有普遍的意义,更宜于描写系统发展和在低纬地区使用。

数值天气预报能从 48 小时延伸到 5—7 天,是在这样的指导概念下得到的:影响中期天气过程的加热作用是通过小尺度过程,但作为天气过程最主要尺度的大尺度过程可以看作单一的、自身维持的系统,通过小尺度参数化,可以把大尺度运动看作定向的或接近定向的运动。在一定精度的观测资料和计算方法前提下,理论上可以预报 2 周。目前的实践结果,虽然有的过程可报 10 天,但大部分可能是 7 天左右。

10 天以上到月的天气变化物理机制相当不清。近年来人们发现海水表面温度的异常与大气环流的异常有密切的联系,提出了海温异常引起大气环流异常的长期过程的概念,以及大气运动场向海温场适应的“长期适应过程”^[2,3]。这些观点都是从动力过程着眼的。

因此预报模式的建立是以理论概念的指导为前提的,我们除了要结合预报业务开展应用性研究以外,还必须加强理论性的基础研究。下边将谈谈有关的三个重要方面:

1. 中尺度天气动力学

这是当前提高短期预报的一个重要的基本问题,近年来这方面的研究正在兴起,是目前非常活跃的领域。

中尺度强天气是在大尺度位势不稳定区产生的,同时又是由一群小尺度对流系统构

成的。这些不同尺度运动的相互制约是这一领域的最基本的动力学问题。由于典型波长 10—100 公里的中尺度系统是由典型波长 1—10 公里的对流单体组成的,从现实情况看,观测资料和计算能力都很难直接地处理中尺度预报问题。因此,从预报的观点出发,最重要的是大尺度和中尺度之间的相互制约问题。

六十年代人们研究积云群的统计效果对大尺度系统的影响,得到第二类不稳定(CISK);它表示积云群尺度和大尺度运动的合作,积云提供潜热能以推动气旋环流,而气旋提供水汽以维持积云。但这种简单的模式并不能说明积云群和大尺度环境之间是怎样地相互作用。近年来的研究^[4]得到,积云内的潜热释放并不直接地加热环境,而是维持积云的上升,但在积云顶部,由积云引起的补偿下沉气流所产生的绝热压缩使大尺度环境空气增暖和变干,但同时由积云顶部“吸出”的水滴的再蒸发所产生的冷却和变湿维持大尺度环境的热量、水分平衡,而大尺度辐合气流的强迫作用,提供大量的水汽向云内“吸入”,再从低浅并未降水的积云向上输送水汽,维持深厚并有降水的云塔。这修正了原来的 CISK 概念,进一步揭露了大、中尺度相互作用的物理过程。它正是研究中尺度对流云群的性质及其和大尺度环境的关系所得到的重要结果。

因此,从联系大尺度运动的观点出发,研究中尺度系统的发生和发展是非常重要的,其中包括不同类型的有组织的对流群的结构和生命史,特别是中尺度对流群是在大尺度环境怎样迅速地释放不稳定能量而又逐渐恢复不稳定条件下不断发生和维持的,同时中尺度对流群又是怎样改变大尺度环境的温度和水汽分布的。

中尺度系统的发生和发展更受下垫面复杂性的作用。江湖海陆的中尺度分布使得水汽和感热的输送富有中尺度的不均匀性,中尺度的地形起伏和降水的中尺度分布有着密切的关系。

除了积云群的对流性降水外,中尺度模式还必须包括稳定性降水。现在的细网格模式,对稳定性降水的物理机制的考虑也是很粗的,它只是考虑质点绝热饱和膨胀或局地饱和凝结,而不包括降水的微物理过程。稳定性降水方案的改进需要从降水微物理研究取得新的启发,还需要把云雨物理的观测和天气尺度的观测联系起来。

怎样把中尺度动力模式付于预报实践,还有很困难的资料问题。现在和不远的将来还只能靠高分辨的卫星资料、雷达资料和地面观测资料揭露中尺度现象,探空资料仍是大尺度的。因此根据目前的资料情况,如何开展有实际应用价值的中尺度预报需要新的概念。现在正在提出这样一种可能性:从卫星资料和中尺度模式的交互应用,发展更仔细的地区性动力预报模式^[5]。建议以“大型”的高分辨率的卫星资料为主来形成中尺度模式的初值,由高分辨的细网格模式,通过中尺度下垫面地理状态的影响和中尺度有组织的对流系统来发展中尺度结构,模式输出 6—18 小时的短期预报,同时作为解释最近的细致的卫星和雷达资料的参考。这个设想是值得注意的。

2. 大气环流的基本理论和数值模拟

大气环流变动的基本理论是作好中长期天气预报的基础。大气环流变化是受那些物理因子控制的,它们和大气变化的关系怎样,在什么样的条件下会出现什么现象,在不同的发展时段那些物理因素起着主要的作用;海气之间、平流层与对流层之间、中高纬与低纬之间以及大气的长波和超长波运动之间的相互作用的动力过程怎样;这些都是大气环

流变动的基本问题。

目前研究这些问题的主要工具是以大气环流模式为中心的数值模拟。它可以了解大气变化过程的一些机制,同时又能作为一定的预报工具。现已知道,这种模式虽能比较成功地模拟出大气变化的气候学的平均状态,但是还不能模拟 2 周变化的天气学的个别过程。可以说它的预报能力仍是很有局限的。但是从它本身的优越特点看,它仍是当前研究 3—30 天天气过程的有力手段。这条途径仍有许多潜力,可以通过下列问题的研究提高预报的时效。

a) 次网格尺度物理过程(如辐射、地气之间的动量、热量和水汽的转换)的观测和理论研究;

b) 积云对流参数化,特别是在温带和付热带的参数化问题;

c) 大地形的强迫性爬流和绕流的动力学,以及小尺度地形对大尺度过程的参数化问题;

d) 计算格式的精度和适于在全球范围内描写各种尺度运动的格式问题。

e) 与预报模式协调的初值形成和非常规资料同化问题。

这些研究的目标都是使现行的大气环流模式成为研究全球大气运动,并进一步作好延伸预报的更有效的工具。数值模拟的优越性在于它的“控制性”的实验能力和现实性的预报能力。但由于它的复杂性,对于模式大气过程的物理机制的分析也带来了相当的困难。因此需要同时进行观测事实的分析研究和简化模式的理论分析研究。

近年来在大型环流观测事实的分析研究中,热带的较多,中高纬的很少。由于大气探测和客观分析的进展,特别是即将举行的第一次全球大气研究计划的全球实验(FGGE)以及一些地区性特殊过程实验(如季风实验、大西洋热带实验等)都会提供大量整理好的全球-半球的详细资料,能作出全球大气的结构、物理量以及能量转换的时空尺度的谱分析,再与大气环流数值模拟的结果作对比研究,可以更进一步地了解大气环流变化的机制。

理论分析研究在近年里已经从小扰动线性理论进展到有限振幅的非线性理论^[6],对于波动与纬圈环流的相互作用,以及波动与波动之间的相互作用有了更深的了解。但这些研究结果尚未能在实际预报模式中引起作用。

值得注意的是在中期数值预报结果的谱分析中,发现超长波波段的预报效果最差^[7]。我们知道短期预报的成功是在特征水平尺度 $L \sim 10^6$ 米,时间尺度 $\tau \sim 1$ 天的长波理论的基础上发展起来的。而主要的中期过程是 $L \sim 10^7$ 米, $\tau \sim 10$ 天的超长波活动。到目前为止,包括阻塞高压、切断低压和西风崩溃、建立的指数循环过程仍然没有一个动力学理论。近年来人们通过观测事实的分析发现:半球环流的能量收支有明显的 23 天左右的振动^[8],南亚季风系统有 14 天左右的振动^[9],长江流域连阴雨有 12 天左右的振动^[10],物理模拟也发现明显的“谐振”^[11](vacillation)。进一步开展这种大型环流非周期振动的理论研究可能对 2 周预报从理论上提出新的概念。

3. 动力气候学

全球大气环流变化研究的一个新的生长点是动力气候学的研究。它的目标是深入了解气候形成及气候变迁的物理过程,它的研究成果有助于探索长期数值预报的途径。

上述的大气环流数值模式也可用于气候模拟。其中海温是作为定常的下边界条件而

影响大气;对长期天气过程而言,海洋也是缓慢地变化着,因此要考虑海气之间的耦合作用。还要考虑大气成分(CO_2 与 O_3 等)、土壤水分以及冰雪的变化,建立一个描写大气-海洋-冰雪之间复杂的反馈系统的气候模式。

现在正在利用这些模式研究气候形成和气候变迁问题,并检验海温异常对大气环流异常有无影响问题,已经得到一些有意思的结果:例如植被、反照率和降水的生物地球物理反馈机制对干旱气候、沙漠气候形成的作用^[12],全球大气中 CO_2 量的增加对平均气温的升高^[13],不同的海温分布可以产生不同的月平均气压场和不同的天气活动的时间序列。

这些动力气候学的研究,将对长期数值预报探索途径。上面已经讲到,由于海水表面温度的异常与大气环流的异常有密切的联系,因此前些年人们提出海温异常引起大气环流异常的长期过程的概念,以及大气运动场向海温场适应的概念,利用这种概念探索长期数值预报。但是最近几年,根据更多的观测事实分析,虽然海洋对大气有反馈作用,但不是海温的异常决定大气环流的异常,而更是大气环流控制海表水温。人们发现,西太平洋的海表水温异常的建立和破坏都是大气环流异常所形成的^[14];利用28年资料分析,得到北太平洋的海面气压场与海表水温场有相似的时间尺度,主要是大气运动强迫的结果,虽然不排除海温对环流有反馈作用^[15];在低纬地区,也得到局地降水量的变化并不是由海表水温引起的,而是由局地环流变化引起的^[16];由赤道地区热量收支的一个研究也得到,在环流的纬向变化区域,虽然海表水温很暖,但由于降水凝结很大,云量很多,因此蒸发很小,控制环流变化的主要作用并不是海表水温,而是水汽的水平辐合所造成的大量凝结^[17],因此一个海洋和大气的耦合系统的变动机制仍是很不清楚的复杂问题。

建立这样复杂的气候模式,还需要对海洋、海冰和积雪地区进行大规模的观测实验。另外关于这种反馈系统的计算也是要重新考虑的问题:把大气-海洋-冰雪模式进行长期积分时,由于海洋的热容量很大,变化很慢,需要研究这种系统的长期反应的计算方法;还有一个问题是时常难以判别模式大气的响应是属于一个在统计上有效的信号,还是模式固有变率所引起的“噪音”。

另一条途径是建立简单的有统计意义的“平均”模式,这时的难题是如何考虑瞬变的大型涡旋的统计效用,由于大型涡旋对平均环流的维持是不可缺少的,因此不能滤掉它们。我们认为研究大型涡旋对平均环流的参数化可能是有希望的途径。

四、结语—天气预报现代化和我国天气预报实践相结合

上面已经讲过,天气预报科学属于地球流体力学问题,数值预报是气象、物理、数学三结合的产物,因此天气预报科学也必然带有强烈的地理性特色。一个有生命力的天气预报新理论是在深入的天气实践基础上,结合流体力学规律的分析应用而得到的。

环绕全地球周围的大气是一个整体,一定地区的天气变化在一定的时间尺度中都受一定范围的大气运动的影响。从大气动力学的观点,要作好2天以上的预报,必须考虑北半球的范围;从这一点讲,任何一个国家的天气变化规律必然和整个大气运动的普遍规律协调一致。另一方面,地球表面的不均匀状态是极端复杂的,下垫面物理作用对大气的影响在不同地区必定富有不同的特征,因此一个国家的天气变化规律又必然具有相对独立

的特殊规律。

我国地理范围广大,有着世界最高的青藏高原大地形,并位于大洋的上游,这样复杂特殊的海陆地形造成了东亚大气环流和天气过程的特殊性。例如,强大的地形作用使得我国经常处于缓慢变化的超长波(如东亚大槽和青藏高压)的控制下,经常叠加着南北两支短波槽的活动,气旋生成大多只在东部省区才明显出现,梅雨锋上时常先有降水天气,然后出现气旋波。这些特殊现象要求研究工作者在深入的我国天气认识的基础上,提高为理论,并在数值预报的模式中有所反映。

另一方面以数值预报为主流的天气预报现代化,要求预报员了解数值模式的性能;例如:客观分析在记录稀少地区的误差、模式不能精确预报的槽脊强度的系统性误差、以及位相的落后等。预报员若能把数值模式提供的预报结果与自己对我国天气实践的丰富经验结合起来,必然会作出更确切的预报判断。

适应我国社会主义农业建设的需要,在从“补充预报”发展起来的“县站预报”工作中,作出了许多丰富的“统计模式”和“概念模式”。当前很需要进一步提高。考虑到天气变化归根结底是三度空间的大气动力学问题,天气预报方法必定要逐步地建立在物理规律的基础上,那么县站预报将来也必然要和动力学的数值预报相结合,在取长补短的相互影响下,向前发展。从图 1 可以看到,在数值预报的进展和预报自动化服务系统的发展下,国家预报中心和地区中心都能迅速地向测站提供地区天气预报图和各种分析图;为“大中小结合”与“图资群结合”提供一种有希望的具体途径。

因此,我们应该把以数值预报为主流的天气预报现代化和我国的天气预报实践结合起来前进,完全可能走出我国自己的道路。天气预报现代化需要高度的技术装备和能解决我国天气实际问题的理论指导,在这方面,我们和世界先进水平的差距很大,但是在光辉的毛泽东思想的指引下,我们一定能赶超世界先进水平。

本文初稿曾于 1977 年 12 月在第二次全国数值预报会议上报告,在定稿过程中曾与丁一汇同志作了有益的讨论。

参 考 资 料

- [1] C. S. Ramage, *B. A. M. S.*, 1976, 57, 4—10.
- [2] A. C. Мони́н, *Физика атмосферы и океана*, 1969, 5, 1102—1113.
- [3] 长期数值天气预报小组, *中国科学*, 1977, 162—172.
- [4] M. Yania etc, *J. A. S.*, 1973, 30, 611—627.
- [5] C. W. Kreitzberg, *B. A. M. S.*, 1976, 57, 679—685.
- [6] J. Pedlosky, *J. A. S.*, 1970, 27, 15—30.
- [7] K. Miyakoda, *M. W. R.*, 1972, 100, 836—855.
- [8] J. P. Mcquirk etc, *J. A. S.*, 1976, 33, 2079—2093.
- [9] T. N. Krishnamurti, *J. A. S.*, 1976, 33, 1937—1954.
- [10] 大气物理所二室, 春季连续低温阴雨天气的预报方法, 科学出版社, 1977, p. 37—52.
- [11] R. L. Pfaffner, *M. W. R.*, 1967, 95, 75—82.
- [12] J. G. Charney, *Q. J. R. M. S.*, 1975, 101, 193—202.
- [13] R. Manabe, *J. A. S.*, 1975, 32, 3—15.
- [14] 林学椿, 中国科学院大气物理所集刊第 6 号.
- [15] B. E. Davis, *J. Phys. Oceanogr.*, 1976, 6, 249—266.
- [16] C. S. Ramage, *M. W. R.*, 1977, 105, 540—544.
- [17] A. G. Cornejo-garrido, *J. A. S.*, 1977, 34, 1155—1162.