

专题评述

大气科学中的数值模拟研究——理论研究和实用相结合*

曾庆存

(中国科学院大气物理研究所)

一、引言,数值模拟研究在大气科学发展中的重要作用

大气科学的对象是地球上与人类活动息息相关的大气圈,大气科学研究就是认识自然界(大气及其与周围环境的相互关系)的规律,达到利用和改造自然界的目。这里所说的利用自然界包括两个方面,一是提供准确的天气和气候预报,二是提供合理利用气象资源的依据和方案,以便保障社会活动、经济建设和国防建设的需要。在改造自然界方面则包括人工控制天气、改造气候以及净化由于人类不合理活动带来的大气污染等等。由于控制大气运动的因素很多,也极复杂,规模又很大,所以传统的大气科学研究方法和其他地学学科相类似,是对大气圈进行直接观测,收集和分析资料,归纳出规律性并提出假设和理论。但要达到像提供准确的各地区的天气预报和气候预测这样的实用目的,仅有定性的描述和相应的理论解释还不行,必须提高到严密推理的和可作定量计算的科学,即建立能够提供计算的理论和方法并算出所需要的地区和时间的天气变化来。显然,这既可以反过来大规模地检验原来的假设和理论的正确与否,又可以发现更多更新更准确和更全面的规律性,发展新的理论。其次,由于因子很多,数据庞杂,计算量极大,在没有电子计算机的时代,要完成由“定性”描述到“定量”计算的发展过程只不过是梦想。但自电子计算机问世以来,大气科学紧紧抓住并充分利用这一工具,短短三十多年间,气象学就由一门“刚刚够格的科学”发展成为今天这样具有初步现代化的科学了,完成了由“定性描述”到“定量计算”的突破。在这过程中,沟通理论和应用两方面的“数值模拟研究”起了极大的作用,建立了不朽的功勋。如同大规模使用电子计算机和计算方法的空气动力学、材料力学、航空和宇航、导弹以及核能物理等近代先进科学技术一样,在大气科学、气象规划和业务中,应用电子计算机和“数值模拟研究”亦已成为不可缺少的非常重要的一部分,使大气科学日益成熟,日益和经济问题密切结合起来。甚至已有了“气象工程”问题,在建设中起更大的作用。可以预料,电子计算机和“数值模拟研究”也必将在地学学科中得到重要应用,为地学的发展和现代化提供光辉的前景。

美国海洋和大气管理局(NOAA)和普林西顿大学合作设有地球流体力学研究所

1984年4月21日收到。

* 这是在中国科学院地学部学部委员会议上的报告(1983年1月,北京)。

(GFDL, L-Laboratory, 直译应为研究室, 实是研究所级规模的单位), 美国大学联盟则建立了大气科学研究中心(NCAR), 两者均得到美国科学基金会的强力支持, 拥有美国最大最新一级的计算机, 从事大气和海洋各种问题的数值模拟研究。苏联科学院最近也成了以马尔丘克(Marchuk)院士为首的计算数学部(Department of Numerical Mathematics), 专门从事大气、海洋和环境科学的数值模拟研究。另外, 美、苏、日和欧洲还有不少研究机构中有从事上述研究的强有力的部分。这是很值得重视的发展趋向。面对这样的趋势, 面对我国国民经济发展对大气科学、海洋科学和地学学科的要求, 我们应该好自为之。

以下仅就六个方面谈谈“数值模拟研究”的进展和问题。

二、数值天气预报

求解适合于大气过程的方程式组来预报天气即所谓数值预报, 其发展过程经历了理论研究、数值试验和数值天气预报业务几个阶段。本世纪二十年代初即已基本上列出了天气预报方程, 经过近三十年的理论研究(动力气象)的准备, 自五十年代初有了电子计算机之后, 美国即作了大规模的天气预报计算试验, 再经过一段时间的不断改进, 终于将理论应用到实际中来, 建立了数值天气预报业务。此后, 世界各国在天气预报中普遍采用数值预报方法。在一至三天的短期天气形势预报方面, 其精度优于预报员凭经验作出的预报。由于积累了近二十年的建立比较完善的大气环流模式和数值试验的经验, 现在美国和欧洲联合中期预报中心又建立了五至十天逐天天气形势的中期数值预报业务, 能够报出预报员所难于报出的第二代和第三代气旋和某些类型的环流突变过程, 充分显示了数值预报方法的优越性。

我国在这方面作了长期的理论研究和数值试验, 在国家气象局, 中国科学院大气物理所和北京大学等单位共同协作下, 我国现已建立了完全由电子计算机及其外围设备完成的数值预报业务。但因条件限制, 电子计算机、通讯设备和资料收集及处理系统尚远不能满足建立中期数值预报业务的要求, 我国现时的中期数值预报尚处于数值试验阶段。目前, 只能量机器和资料之力, 对一些重要的中期过程分门别类、针对性地用现有条件能够完成计算的比较简单的模式进行试验。然而, 也取得了一些令人鼓舞的结果。例如, 中国科学院大气物理所选取了几类预报员有困难的寒潮过程, 用一层模式或三层模式进行中期预报试验, 结果是: 大都在三天至五天前就可报出来。无疑, 中期数值预报业务也必将在我国建立起来。

为了建立我国的中期数值天气预报, 改进短期天气形势预报以及解决好资料处理, 以便得到合适的初始场, 我们必须作出很大努力, 进行针对性的数值模拟研究。

三、中长期天气过程机理的研究

国际上中期数值预报虽已业务化, 但超过一个星期尤其是十天以上的预报精度尚不够理想。至于长期预报目前则还处于试验研究阶段。为此, 必须对中长期天气过程的机理作进一步的理论研究和数值试验, 了解其中的控制因子、物理和动力学规律, 以便改进

原有的或重新建立中长期数值预报模式;并明确那些量和那些过程是可以报的,那些是不能报的,以便确定对观测系统的要求和规划等等。

阻塞高压、指数循环和环流突变等都是预报中比较困难的问题,它们和各种尺度运动的相互作用以及地形和海陆影响等有密切关系。欧洲联合中期预报中心利用比较完善的

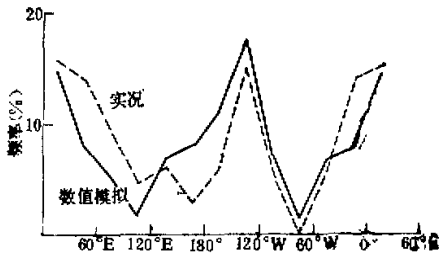


图1 北半球阻塞高压出现频率的地理分布^[1]

全球大气环流模式进行了一年逐日“天气变化”的数值试验,并进行统计,得到阻塞高压经常在一些特定地区生成和维持,其地理分布和实况非常接近,如图1,说明阻塞高压在很大程度上受地理环境的影响。我国学者进一步试验表明,其中尤以地形作用更为重要。可见要想提高预报精度必须在模式中处理好地形作用的计算。阻塞高压、指数循环以及对长期过程很有意义的遥相关等显然又

受大气运动内部的因子所制约,目前国内外对此都集中了许多人力进行研究。中国科学院大气物理所从带状环流和扰动相互作用的角度进行了许多数值试验,得到:若初始带状环流比较强而且有明显的急流,则在无能源和耗散情况下,扰动很迅速地被带状环流所吸引(我们称之为“旋转适应”);但若带状环流比较弱和有比较强的扰动,则扰动维持下来且有比较规则的演变过程,例如“上游效应”过程、指数循环等。有趣的是,这个问题的理论研究及数值试验不仅可以揭露出控制中长期天气过程的一些基本因子,还可对其他行星大气环流的性质给以合理的解释,例如,木星大气环流何以具有非常鲜明的带状结构,没有明显的行星波,只有一些孤立的像大红斑这样的涡旋呢?这可能是由于木星大气非常

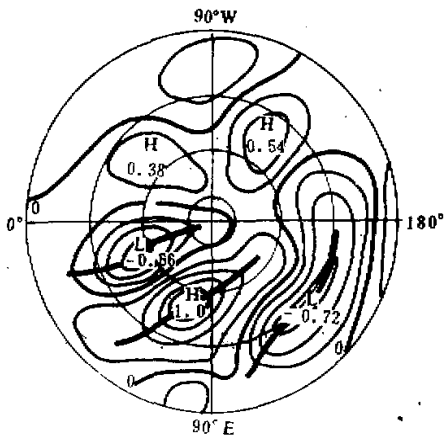


图2 北半球各点和基点(55°N, 75°E) 500百帕高度的相关系数分布图^[2]

正负中心的轴线由黑粗线标出

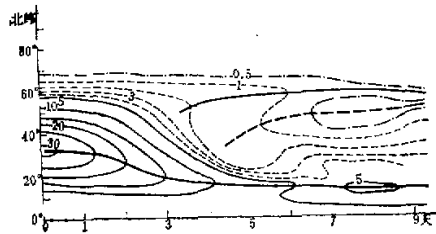


图3 沿纬圈平均的扰动动能(相对单位)的演变和传播^[3]

初始扰动为两半球对称的行星波,西风急流轴位于35°N和35°S.

深厚、木星旋转速度又高,旋转适应所需时间极短(按我们的数值试验结果,扰动能量被吸收一半只需不到 12 小时)。而大红斑虽成因不明,但可确知是强涡旋,能够自行维持。

地形作用以及海温异常的影响又是怎样维持下来和传播出去的呢? 这与准常定波的形成、传播及其特性有关,它能传播出去,就形成所谓“遥相关”。显然,这对了解气候形成和变动、长期和超长期预报有重要意义。图 2 是显示出明显的遥相关的实况图。取某些给定的类似于实况的基本气流,再加上初始扰动,用数值试验研究其传播特性,可见到中纬地区扰动确实向低纬和高纬传播,以低纬一支为主,如图 3。如加上常定扰动,就可算出准定常波的分布及异常状态,如图 4。两者和实况的特征都很类似,可知遥相关与行星波有密切关系。

环流突变的机理是什么呢? 目前普遍认为是在大气中不同尺度运动的非线性相互作用。国内外都利用极简单的截谱模式来研究,结果是:当带状环流状态或某些外部参数变化到某种“临界”状态之后,行星波系统可以有一个跳跃式的变化。但在比较符合实际的斜压大气中和具有足够多自由度的情况下,处理起来就要复杂得多,因此,数值模拟是非常必要的。

此外,在中长期天气预报方面的理论和实际问题还有许多。例如,两半球环流相互作用、中低纬环流相互作用、上下层相互作用和垂直分层、地形的处理、边界层参数化、预报时效问题等,都必须通过理论和数值模拟研究来解决。

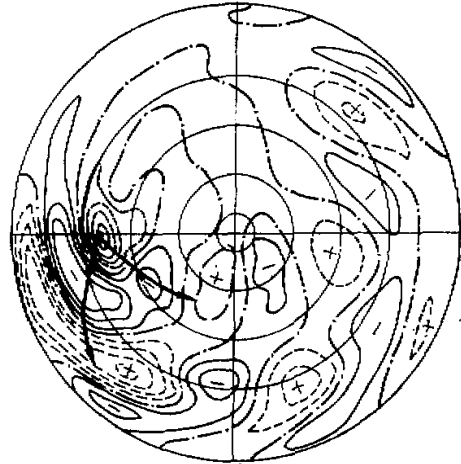


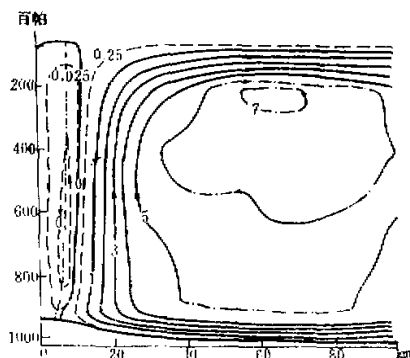
图 4 由一个中心在 30° 的圆形山脉形成的正压扰动的扰动场,基流为北半球冬季的带状环流^[4]。山脉中心点由黑圆点标出;带箭头的粗黑线指示出两个扰动带的传播(图取自 Hoshins 和 Karoly 文, 1981)。

四、灾害性天气过程和热带气象的研究·台风和暴雨

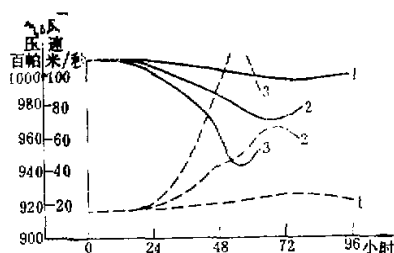
灾害性天气如暴雨和台风等对人类活动带来严重影响,然而今日无论是数值预报方法、统计预报方法还是经验预报方法都准确度不高。热带地区的预报也存在许多问题。需要大力进行观测、分析、理论和数值试验研究。数值试验研究将会起很重要的作用。

以台风为例,台风生成理论至今尚未成熟,需要数值试验进行大量检验。国外用非常细致的网格已模拟出强台风具有台风眼结构,如图 5,我们用比较简单的模式模拟出台风有螺旋云雨带和外围对流雨带,并模拟出了只当洋面温度高于 28°C 时才能形成台风,如图 6。这些都与实际经验相符,但还需解决确定参数问题和低纬度地带台风源地资料不足这些困难,才可望应用到实际的台风生成预报中去。庞大的积雨云体和台风的相互作用仍然是一个有待进一步研究的重要问题。

暴雨的数值预报与中尺度天气系统动力学和湿空气动力学有密切关系。迄今在数值

图5 强台风结构的数值模拟^[2]

图示为沿经向和垂直方向剖面上的流线图。台风中心在半径为 0 公里处,点线表示垂直速度为零。可见在 $r=7$ 公里以外为上升气流,以内为下沉气流(台风眼)。

图6 台风发展和洋面温度关系的数值模拟^[2]

实线为地面最低气压随时间的变化,虚线为最大风速随时间的变化。1、2、3 分别对应于洋面温度为 25°C、28°C 和 31°C。可见只当洋面温度高于 28°C 时方能形成台风。

试验方面取得了一定的成功,在我国,中国科学院大气物理所和北京大学都作出了不少成绩,但还有一些问题需要解决,例如雨量及暴雨落区的精度欠佳,需要继续改进模式、输入实测风场以及解决好初始场整理方法。我国地形复杂,而观测事实表明,地形对中尺度环流和暴雨有很明显的影响,因此,建立一个能处理复杂地形的比较准确的计算格式也是十分重要的。只有做到这点,才有可能作区域性的降雨预报。还要指出,只有当我们能设计出可以计算边界层内(850 百帕以下气层)气象要素变化的模式,我们才能建立天气现象的数值预报。

众所周知,台风和暴雨都和作为其背景的大尺度流场有密切关系,台风的路径(尤其是奇异路径)更是如此。因此,我们必须同时预报大尺度流场。可是,台风眼以及伴随着台风的灾害天气,还有暴雨系统等,都具有精细复杂的结构,非有比较精细的足以分辨出这些结构的计算网格才行。但台风或暴雨以外的地区,天气系统变化比较平缓。为了减少计算量,就得采取格距大小不等的两套或多套网格套叠起来。但这样一来,在套叠的边界上的计算就要满足一定的协调条件,否则就会产生所谓“寄生波”现象,使计算结果紊乱不堪。此外,如果格式设计不好,还会产生计算不稳定,尤其是非线性计算不稳定,甚至可能产生“溢出停机”事故。所以,我们还得深入研究许多计算数学问题。

五、大气环流、气候形成和变动以及气候改造的数值模拟研究

数值试验是研究大气环流、气候形成和变动以及气候改造问题的机理的强有力方法。因为气候问题总需进行一定的平均运算,即使个别天气系统的演变过程计算得不够准确,但在一定时段内进行平均之后,其群体的平均性质(即气候)仍可有较好的结果。近二十年来国际上在气候的数值模拟研究方面取得了很大的成功,利用比较完善的大气环流模

式已可相当准确地模拟出冬季和春季的气候平均气压和温度分布、地球上的气候带、气候变动的变率(标准值)及其地理分布,甚至可以模拟出季风爆发、雨带推移等。国际上也很关心由人类活动所造成的因子如二氧化碳、平流层水汽和其他污染物质的增加所形成的气候效应问题,对此作了不少数值模拟,气候改造问题的数值模拟研究亦已开始。我国在大气环流和气候的数值模拟方面也取得了一些成果。中国科学院大气物理所计算了稳定高空槽脊的分布、海陆相互作用的气候振荡、积雪量或雨量异常年份的短期气候效应等,兰州高原大气物理研究所着重模拟了青藏高原的影响,而南京大学则模拟出了夏季副热带高压的北跳现象。

图7是美国最近利用大气环流模式模拟出来的气候变率分布和实况的比较,从中可

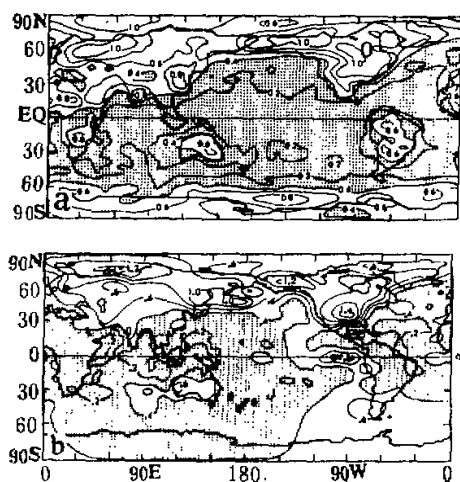


图7 年平均地面气温的平均气候变率(单位:度)

a. 数值模拟结果^[17]; b. 实况.

以看出欧亚大陆和北美大陆的气候变率数字和分布都是比较吻合的。目前,“世界气候研究计划”(WCRP)已制定了一个庞大的国际合作研究计划,目标是在今后十至二十年内分步解决三种时间尺度的气候预测问题,即月份和季节气候距平预报(亦称“长期天气预报”)、年际气候距平预测以及年代际(十年以上)气候趋势预测。为此,必须设计比现有大气环流模式完善得多的气候预测模式,并作大量的数值模拟试验。模式中必须包括形成气候和影响其变化的各“气候系统”间的相互作用,即大气与海洋(甚至包括深海环流)、冰圈与大气、地表特征(甚至包括植被的变化)、水文状况与大气的相互作用等。云和辐射相互作用、边界层过程、反映中小尺度对大尺度运动长期影响的参数化方案等也都需要改进。计算精度、稳定性与省时间问题等的研究也十分重要。

最后谈一下气候改造的数值模拟研究问题。叶笃正曾模拟了中低纬多雨或因灌溉使土壤增墒等造成的短期气候效应。设由于多雨或灌溉,中纬度带(30° — 60° N)特湿,七月一日全纬度带土壤水份均达饱和,则在其后五个月内气候状态和水热平衡都有明显的改

变,在原来土壤水汽饱和的纬度带内雨量增加、土壤墒增而温降,但雨量的增加却主要集中于正常年景雨量多的地区,干旱区雨量增加很少;整个对流层的温度和风也有明显改

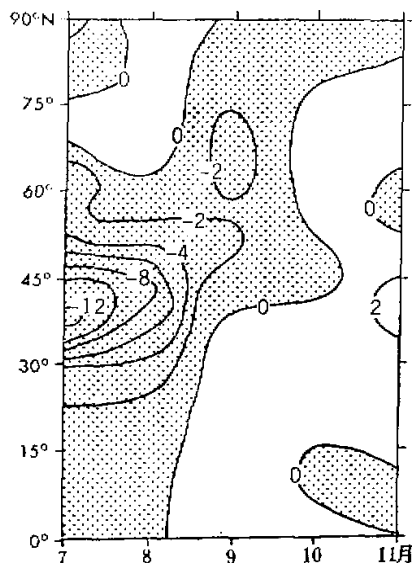


图8 纬圈平均地表温度距平(单位:度)随纬圈和月份的变化^[4]

变。影响还可扩展到上述纬度带周围 30 个纬距,尤其是雨带内,如图 8。不难设想,如果我们不是在全纬度带而是在有限地区内灌溉,而且是每隔若干天灌溉一次,就可模拟出接近实际情况的大面积水利灌溉工程的水文气象效应。不过,若要达到可供实用的目的,就需有精细得多的模式。特别是,气候改造工程问题大都是区域性的,地理条件是比较重要甚至是关键性的,这对模式的空间分辨率、地表特性以及水文特性的精细程度就有较高的要求。

六、数值模拟研究在大气科学其他分支和规划工作中的应用

· 气象工程

数值模拟研究方法不仅在大气动力学、天气预报和气候研究方面,而且在其他大气科学分支学科中也可得到重要应用,

例如:

(1) 观测系统的规划和设计

在确定全球观测系统时,要放多少气象卫星?遥感方案如何选取?观测项目、精度和频数如何?不同类型的资料能否“同化”处理?地面观测系统和其他辅助系统应如何配备?这样的系统的效率和经费开支如何?等等。对这些问题都曾作过大量的很复杂的数值模拟研究,然后作综合平衡,择其优者。这在今后也仍然是很重要的。

(2) 人工影响天气机理研究和试验设计问题

人工影响天气问题的研究和试验有其实际需要和经济价值,无论国内、国外都曾热极一时,可以说也曾是推动大气物理学向现代科学发展的一个大课题。然而这是一个很困难的问题,主要是机理不明,试验效果难于检验和分清。因此国外现在已经冷了下来,只有少数单位仍在坚持。我国则因实际需要,各地仍在搞实地试验。现代化的数值模拟试验或许可以发挥很好的作用。其实,国内外都已对云、雨、雾和冰雹形成过程以及催化和人工影响过程建立了数学物理模式并进行数值试验,以便弄清其机理。倘能再将大尺度流场背景影响加进去,就可解决效果检验问题;若再求解相应的极值问题,就可找到最优影响方案,解决经济效益问题。这是完全可能的。

(3) 大气污染以及环境保护规划

大气和环境污染既受环境和气象条件控制,又包括许多物理化学过程,是很复杂的。实地监测和分析研究无疑是最直接的方法。但这个问题也有和人工影响天气相类似之处。如不建立比较精细的包括气象和地理因子以及物理化学过程的数学模式并进行数值模拟是难于获得全面的和全过程的认识的。至于工业污染物的排放标准、净化城市污染和环境保护等方面,利用数值试验也是可以找到最优规划的。

还可举出更多的分支。更不必说电子计算机在气象通讯、资料处理等日常业务中所起的巨大作用了。即使从上述三个方面也可以看到,电子计算机的应用以及数值模拟研究已使大气科学的一些方面日益朝着“利用和改造自然”的方向前进,日益和经济建设密切结合,变为人们可以控制和计算其经济效益的工程科学问题。其实,在改造气候、大气污染和环保、人工影响天气和气象规划等方面业已提出了一些可以称为“气象工程”的问题,只是尚待变成一门系统的学科分支罢了。

七、地学学科应用计算技术和数值模拟研究的前景

由前面几节可以看到计算技术和数值模拟研究已深入到大气科学的各个分支。我国也有一定基础,在某些方面也不落后,但从整体上说则是相当落后的,需要有一个很大的发展。除去气象业务不谈,就大气科学研究而言,要达到现代化,除需采用和发展先进的观测技术外,我们还必须有一个有各种硬件和软件配套的电子计算机系统,并大力开展针对性的数值模拟研究,以便促进理论的发展,促进理论和经济建设实际问题相结合,并促进大气科学和其他学科的相互结合。就数值模拟来说,固然我们应该建立各种问题的数值模式,但其中我们尤其感到迫切需要的是建立起我国的大气环流模式和大气大洋环流耦合模式,这样就可以对许多十分重要的课题进行研究,例如为建立我国中期数值预报作准备,作东亚季风进退和梅雨的预报试验,高原和海陆对东亚大气环流、气候形成和变异的模拟研究,作干旱和沙漠化过程的模拟研究,作气候改造方案的研究,还可作历史气候和地质年代的气候及其与生态平衡、地层演变和石油生成的联系的模拟研究,以及农业组成和气象条件的关系,等等。这样的计划如能成功,不仅可以解决不少气象实用问题,还可促进大气科学和其他地学学科的联系,为发展地学其他学科的数值模拟研究提供一些条件和取得一些经验。

可以预料,计算技术和数值模拟研究方法在地学其他学科中也必将得到广泛的应用。

目前,国际上对近海环流、大洋环流、上升流、潮汐和风暴潮等都进行了大规模的数值模拟研究,和大气模拟研究并驾齐驱。现在甚至已开始作海洋化学以及生态平衡的数值模拟。我国除风暴潮和近海环流等之外,尚无其他的数值模拟研究,需急起直追。特别是应该看到,海洋调查是一件非常困难和花费的事,每次能调查到的也只限于非常有限的地区和时段,需要在空间上延拓、在时间上延伸。数值模拟研究正可补此不足,且可为海洋调查规划提出参考方案,在发展海洋科学方面起重大作用。还须指出,在未来十五年内,建立近海的和大洋的环流、温、盐等海洋物理量时空变化的数值预报是完全可能的,也是

渔业和海洋开发所必须的。

电子计算机在地球物理研究、地理遥感、资源分析和地球物理探矿尤其是石油勘探方面的大量应用是人所共知的。此外,国内外在地理、地质和生物进化方面已建立了一些数学理论和数学模式,开展了一些数值模拟研究,取得了可喜的成绩。囿于见闻,诚恐挂一漏万,恕不举例了。但有一点是很清楚的,就是:地质力学——大地构造、地震和成矿理论最终必定会发展成既有定性的又是定量的理论。只要能够从数学物理和力学的一般原理出发,对现有的各种理论进行概括,不难提出可供作数值模拟试验的数学模式,尽管其中还含有某些未能确定的参数,甚至某些未搞清的物理——力学的或化学的规律,但可以通过大量的数值试验,经过比较之后,选出其中合理的和正确的,从而建立相应的理论,甚至还可发现用传统的方法难于得到的规律性。可见,数值模拟研究可以大大缩短检验和发展理论的周期,还可从事实验室难于从事的实验,会使地质科学发展得更快。未来地学的突破,十分可能是以现有观测事实为依据,通过数值模拟研究来实现。

总之,计算技术的应用和数值模拟研究为地学各学科的发展展示着光明的前景。而且,地学学科也有不少共同课题,例如大气和海洋动力学已融合为“地球流体力学”,土地慢运动、洋冰运动、气候变迁和大陆漂移亦已成为地球流体力学的一些组成部分,风沙运动和河床动力学很可能会包括进去。数值模拟研究起很重要的作用,这也是共同的。实际上,一个新分支“计算地球流体力学”已在形成之中。其次,大气遥感、海洋探测以及地球物理和地质问题中都有大量的反演问题。而就数值模拟本身而论,各种问题也包含许多共同的或类似的问题,可以相互借鉴。地学各学科可以联合起来,相互沟通,这样做,可以促进地学理论的发展和在经济建设中起更大的作用。

写这报告时和叶笃正、陶诗言、谢义炳、孔纯枢诸学部委员进行过多次讨论,谨致谢意。

参 考 文 献

有关文献甚多,从略。文中所用的图,引自下列文献:

- [1] Gilchrist, A. Aspect of the simulation of climate and climate variability in middle latitudes. Proceedings of WMO/ICSU Study Conference on Physical Basis for Climate Prediction on Seasonal, Annual and Decadal Time Scales, Leningrad, 13—17 September 1982.
- [2] Wallace J. M. and D. S. Gutzler, Teleconnections in the geopotential height field during the northern hemisphere winter, *M. W. R.*, 109, No. 4, 1981.
- [3] Zeng Qing-cun, and I. Held, Unpublished paper, 1982.
- [4] Grose W. and B. J. Hoskins, On the influence of orography on large-scale atmospheric flow, *J. A. S.*, Vol. 36, 223—234, 1979.
- [5] Kurihara Y., Structure and analysis of the eye of a numerically simulated tropical cyclone, *J. M. S. Japan*, ser. II, vol. 60, No. 1, 1982.
- [6] 张铭,台风的数值模拟,中国科技大学研究生院研究生毕业论文,1982.
- [7] Manabe S. and D. G. Hahn, Simulation of Atmospheric variability, *M. W. R.*, vol. 109, No. 11, 1981.
- [8] Yeh T. C. (叶笃正), R. T. Wetherald and S. Manabe, The effect of soil moisture on the short-term climate and hydrology change—a numerical experiment, (to be published in *M. W. R.*), 1982.