



程麟生 编著  
丑纪范

# 大气数值模拟

现代大气科学技术丛书



高等教育出版社

P43  
CLS

# 大气数值模拟

程麟生  
编著  
丑纪范

气象出版社

## 内 容 简 介

数值模拟开创了大气科学研究的新纪元,它的现状、进展、问题和发展为人们所关注。本书以国内外最新材料为基础,加上作者自己的研究,对数值模拟中的一些重大问题,特别是气候模拟和中小尺度气象模拟方面的一些关键科学问题,作了系统的简明的阐述。对内容的叙述深入浅出,易读易懂,发人深思。

本书可供气象部门高级业务技术组织管理人员、高等气象院校的师生、研究生和业务、科研等单位气象科技人员阅读。

### 大气数值模拟

程麟生 丑纪范 编著

责任编辑 杨长新

\* \* \*

气象出版社出版

(北京西郊白石桥路46号)

农业出版社印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行 全国各地新华书店经销

\* \* \*

开本: 787×1092 1/32 印张: 5.625 字数: 121千字

1991年6月第一版 1991年6月第一次印刷

印数: 1—1500 定价: 4.05元

ISBN 7-5029-0555-3/P·0319

## 序 言

随着科学技术的发展，大气科学技术的分支越来越细。为了取得某一研究问题的突破，气象科研工作者在一段时间里必须潜身于某一较窄的专业领域。但是，气象毕竟是一门多学科交叉的应用科学，为了在这个领域不断攀登新的高峰，必须掌握更多相关学科的新理论、新方法和新发现。若要博览浩如烟海的新论文和新著作，时间和精力总显得太不够，怎么办？

气象业务现代化建设要求特别注重系统设计，以便使各种适用技术巧妙地结合配套，发挥理想的整体效益。这就要求业务专家们适时掌握各种大气科学技术的最新成就，从中选取适用技术。但是，由于业务工作繁忙，常常也难于找出足够的时间一个学科一个学科去搜索。

近年来，气象部门的管理干部专业化水平有了很大提高。许多管理者本身就是专家。但是，毕竟管理学是另一门科学。他们走上管理岗位之后，在紧张的公务之余，能有时间读几本管理科学丛书就已十分难得。事业的发展却要求他们至少要跟得上大气科学技术发展的步伐。尤其是高层次的管理者必须不断掌握大气科学技术的最新进展和发展动向。否则，就不可能再成其为称职的管理者。

感谢气象出版社想业务专家之所想，急管理者之所急，组织一批正处在大气科学技术各有关分支的前沿阵地的高级

专家编著这一套“现代大气科学技术丛书”，系统地介绍大气科学技术各分支当前国内外的最新动向、最新方法和最新理论，从战略高度对本学科的去、现在和将来做科学的概括，并指出目前发展中存在的关键问题和可能解决的途径。相信这套丛书的出版会使众多的专家和管理者花费极少的时间，获得极大的收益。

马鹤年

1990.8.28

## 前 言

自1950年Voh Neumann和Charney在小型ENIAC计算机上实现了Richardson (1922) 的数值天气预报梦想之后, Phillips在1956年又第一次成功地完成了大气环流的数值模拟。这两次突破对大气科学来说无疑是一场革命。这场革命的意义在于: 人们正朝着“人类的梦想”——大气数值模拟和预报的方向稳步前进。当然, 前进的历程不会是一帆风顺的。

从最初的准地转模式模拟和预报到六十年代的原始方程试验成功, 大约经历了十年时间。自七十年代以来, 由于大型和超级计算机的相继问世和使用, 数值模拟和预报在大气科学各个领域迅速兴起。其中, 尤为世人瞩目的有三个方面, 这就是: 气候模拟, 中期天气预报和中、小尺度气象模拟。显然, 这些方面的迅速进展既与人类社会和国民经济的迫切需要密切关联, 又是与现代科学技术, 特别是探测手段、计算技术和数学物理学基础理论的长足进步分不开的。

由于大气数值模拟和预报不仅在大气科学的理论和应用研究中占有十分重要的地位, 而且可以获得巨大的社会效益和经济效益; 因此, 世界各国都十分重视, 特别是一些经济发达和技术先进的国家, 都先后建立了各类数值模式模拟系统和业务数值天气预报系统。其中, 欧洲中期天气预报中心(ECMWF) 可谓是这类系统的一个典型。

我国数值模拟和预报的研究工作在五十年代就已开始。1974年开始用原始方程制作预报。北京气象中心于1982年2月正式发布我国短期数值业务预报。

在气候模拟和中、小尺度气象模拟方面，我国起步稍晚，但工作进展相当迅速，特别是中国科学院大气物理研究所的全球大气环流数值模式，由于计算方法先进和模式物理性能好，所以，对气候平均状态的模拟和国外高分辨气候模式具有同样的精度，可以预期，随着我国计算机条件的改善，在不久的将来也会建立起自己的气候模式模拟系统和中小尺度模式模拟系统。

为了尝试对国内外大气数值模拟的研究现状和新进展作一最简要的概括，本书着重介绍了近十几年气候模拟和中、小尺度气象模拟方面的新进展和一些关键科学问题。对内容的叙述既希望深入浅出，易读易懂；又力图简洁概括，引人深思。但限于作者水平，难免事与愿违；错误不当之处，一定很多。切盼各方读者批评指正，作者将表示衷心感谢。

本书第一、三、四部份由程麟生编写，第二、五部分由丑纪范编写。

作者

1990年2月

# 目 录

一、大气科学发展的必由之路——数值模拟 .....	(1)
(一) 地球-大气：一个复杂的物理系统 .....	(1)
(二) 观测、分析和理论：天气学和动力气象学的发展 .....	(4)
(三) 实验室模拟：研究大气现象的物理模式法 .....	(12)
(四) 数值模拟：开创大气科学新纪元的研究方法 .....	(17)
(五) 中期业务数值天气预报的现状和前景 .....	(25)
参考文献 .....	(33)
二、气候模拟——大气科学面临的战略任务 .....	(38)
(一) 气候系统的物理描述 .....	(41)
(二) 大气环流模式及其数值模拟现状 .....	(50)
(三) 海-气耦合模式及ENSO的气候模拟 .....	(54)
(四) 陆地表面和冰雪状况的耦合 .....	(59)
(五) 气候敏感性的数值试验 .....	(61)
(六) 气候模拟的问题和展望 .....	(65)
参考文献 .....	(67)
三、中尺度气象模拟——大气数值模拟的重要进展 .....	(69)
(一) 中尺度气象模拟系统的建立和发展 .....	(69)
(二) 中尺度大气物理过程的处理 .....	(79)
(三) 积云参数化述评 .....	(90)
(四) 行星边界层不同参数化方案的比较 .....	(98)
(五) 中尺度数值模拟的现状和问题 .....	(106)
参考文献 .....	(115)
四、小尺度气象模拟——高分辨模拟的发展和应用 .....	(120)
(一) 对流风暴的数值模拟 .....	(120)



(二) 龙卷雷暴的高分辨模拟 .....	(129)
(三) 大气扩散和空气污染的数值模拟 .....	(134)
参考文献 .....	(145)
五、问题和展望 .....	(148)
(一) 可预报性问题 .....	(149)
(二) 确定论系统的内在随机性——混沌现象 .....	(153)
(三) 自变量的离散化——次网格过程及其参数化问题 ...	(157)
(四) 状态变量的离散化——舍入误差及其后果 .....	(160)
(五) 对初始资料和模式参数的敏感性问题 .....	(165)
(六) 大气数值模拟展望 .....	(166)
参考文献 .....	(171)

# 一、大气科学发展的必由之路——数值模拟

凡属星体，其四周总有一层气体环绕，不管这层气体多么稀薄。对于地球而言，它不仅为一层厚达百余公里的大气所包围，而且具有不同的层次和性状。在这种大气中既发生着复杂的物理和化学变化过程，又包含有多种时间和空间尺度运动的形态；而大气科学正是以全球大气为研究对象，以坚实的数理知识为基础，应用先进的科学和技术，对发生在大气中的各种奥秘进行研究和探索的发展中科学。为了了解这门科学，那就需要首先知道地球-大气系统。

## (一) 地球-大气：一个复杂的物理系统

与一般物理实验室相比，在地球-大气中能观测到更为复杂的物理现象；这是因为大气的变化和运动不仅由旋转大气本身制约，而且还受到陆地、海洋、生物圈、冰覆盖、宇宙因素以及人类活动的影响。近30年来对地球-大气系统各个部份之间复杂的相互作用及其对地球-大气过去和未来演变影响的研究表明，我们这个世界比其所想像的要复杂得多！

人们现在已认识到地球上的海洋、大气和冰覆盖区与全球天气气候的形成密切相关。利用全球温度、水分和云覆盖的卫星资料，气象学家们已建立了全球大气环流和气候模式；海-气相互作用的研究已诊断出厄尼诺现象（洋流的变

化)与南方涛动(气压的变化)之间的联系。此外,人们也认识到地球生物对全球大气过程的重要作用。例如,海洋生物群产生海洋沉积物减少大气中的二氧化碳,这对气候变化有重要影响;海洋生物群和大陆上的生态系统都参与地球化学物质的循环过程;而陆地生物群还通过影响地表反照率、水循环和各种微量气体的排放对全球气候产生影响。图 1.1 就是地球-大气这个复杂整体中各部份之间相互作用示意。

如果把地球-大气变化过程分为物理气候系统(大气、海

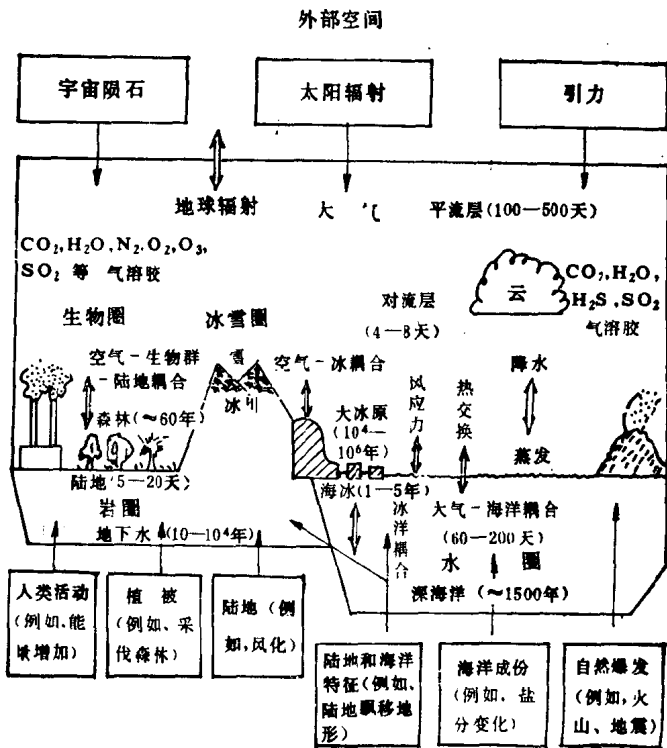


图 1.1 在地球大气的气候系统中诸因子及其相互作用

洋和陆地表面) 和生物地球化学循环两种基本类型, 那么, 包括大气的全球变化过程可以物理模式在图1.2中示意。该模式有两点值得注意: 其一, 把人类活动作为全球变化的重要

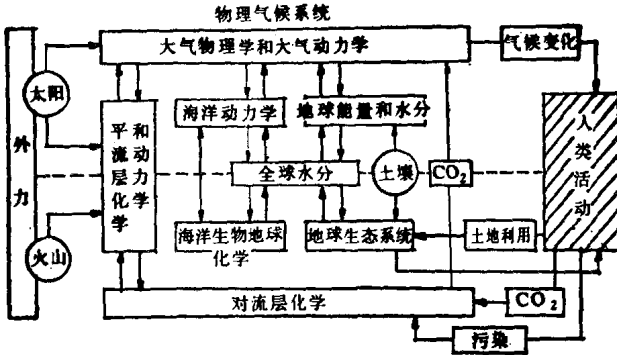


图 1.2 地球-大气变化过程的物理模式

引发者; 其二, 无处不有的全球水分(水汽、水、冰)把各种相互作用联结在一起。但至今我们对地球-大气中的水分运动尚未作充分研究, 同时也还没有充分的资料来建立全球的水循环模式, 因此, 如何对全球水循环进行观测将是一个研究地球-大气系统的重要课题。此外, 人们还发现, 地球-大气系统各部份之间具有耦合性和非线性, 因此, 某一部份发生变化常常会影响其他部份, 或某一时空尺度发生变化便可传播到其他时空尺度, 这就要求人们在进行大气科学探索时, 最好按其不同时间和空间尺度研究各部份之间的相互作用。这种方法包括: 观测、分析、诊断、数值模拟和预测预报。

为了全面地、科学地认识地球-大气系统及其各部分之间的相互作用与演变, 若干重要的国际计划已提到日程上来,

这些研究计划包括：热带海洋全球大气（TOGA）计划，试图确定厄尼诺现象及南方涛动的成因及其可预报性；国际卫星云气候学计划（ISCCP），为研究云和辐射相互作用及其在气候模式中的应用提供全球资料；国际卫星地表气候学计划（ISLSCP），是为监测特定生物群落内地表过程与气候之间的相互作用；世界海洋环流实验（WOCE），建立和改进全球海洋环流模式；国际陆圈-生物圈计划（IGBP），进行全球变化的研究；全球海洋通量研究（GOFs），增加人们对海洋生物生长和死亡过程的认识。

必须指出，这些国际合作对研究全球性的地球-大气科学是至关重要的。因为从不同空间、不同地面和不同地区进行各种详细的全球观测是极其必要的；而且，所涉及的国家必须参与观测计划的制定和实施，并为这些研究提供资料。

显然，这些令人鼓舞的国际合作研究计划标志着大气科学的迅速发展，但这些进展的获得不是偶然的，而是人类在探索自然界各类大气现象发生规律进行长期观测、分析和理论研究的结果。因此，对这段发展史进行追溯是必要的。

## （二）观测、分析和理论：天气学和动力气象学的发展

从古代中国、印度、埃及和希腊等国劳动人民观云测天到Brandes利用德国的地面观测资料于1820年在莱比锡绘制了第一张天气图开始，应该说《天气学》已经萌生。如果把定性天气分析和预报作为传统天气学，则其发展可分为两个阶段。在初期，人们只能根据地面气象观测资料进行分析，预报员也只能采用非常简单的外推法预报天气系统（象气旋、反气旋、锋）的移动；第一次世界大战后，由于无线电

探空仪和飞机的发明，个别气象台站有了高空观测；与此同时，挪威学派根据对新观测事实的分析提出了锋面气旋的经典模式。这时候，天气学也进入了第二阶段。该期间，锋和气团成为天气学中的基本概念，而天气预报也以锋和气团的移动及变性作为主要依据；其后，随着世界范围高空观测网的建立和对新观测事实的分析，Rossby (1939, 1940) 揭示出行星波，并提出著名的大气长波理论；而Bjerknes最先注意到高空流型的作用，构想了两种气旋生成过程；另一方面，Sutcliffe (1947) 用垂直速度和散度建立了气旋和反气旋的发展理论；与此同时，Petterssen, Palmen, Riehl等对天气系统的垂直结构和演变作了相当细致的分析研究；而Rossby和Sutcliffe则从理论上解释了这种结构和演变的高、低空关系，并以此作为制作定性天气预报的理论基础，但这主要是对中纬度大尺度环流系统而言。其后，象热带和副热带环流系统，热带风暴和台风以及中、低纬度有组织对流系统等，都因观测技术的发展和观测资料的增加而有可能进行更仔细的分析，并使天气学的内容大大扩充，甚至实际上已把热带气象学和大气环流作为与传统天气学分立的专业学科了。第二次世界大战后，对许多新观测资料的分析发现，大气运动系统具有许多不同的时空尺度，因而，Ligda (1951), Orlanski (1975), Fujita (1981)和 Emanuel (1984) 等先后对不同大气现象作了运动的尺度分类，其中，以Orlanski (图1.3) 和Emanuel (表1.1) 的分类最具代表性。在图 1.3 中，尺度由长度和时间同时定义；在表1.1中，若干大气现象是根据拉格朗日时间尺度 $T$  (流体质点加速的特征时间) 和Rossby数 $Ro (= 2\pi/fT)$  分类的，其中， $N_w$ 是湿浮力频率， $R$ 是最大风尺度半径， $V_T$ 是最大

$L_s$	$T_s$		$1 \text{月} (\beta L_s)^{-1}$		$1 \text{日} (f)^{-1}$		$1 \text{时} (\frac{g}{\theta} \frac{d\theta}{dz})^{-1}$		$1 \text{分} (\frac{g}{\theta} \frac{L}{U})^{-1}$		$1 \text{秒}$	
10000 km	定常波	超常波	潮汐波									α 大尺度
2000 km		斜压波										β 大尺度
200 km			锋面和飓风									α 中尺度
20 km				夜间低空急流、飚线、云和湍流、山脉和湖泊扰动								β 中尺度
2 km					雷暴、内动波、晴空湍流、城市影响							γ 中尺度
200 m						龙卷、深对流、短波扰动						α 小尺度
20 m							尘(沙)暴、热泡、尾流					β 小尺度
								柱状气流、粗糙度、湍流				γ 小尺度
大气委员会 科学	气候尺度		天气 行星尺度		中尺度		微尺度				建议的定义	

图 1.3 尺度定义和具有特征时间和水平尺度的不同过程  
(按Orlanski, 1975)

表 1.1 选择大气现象的 Lagrangian 时间尺度  
T 和 Rossby 数 Ro

大气现象	T	Ro
纬向平均环流	$2\pi a/U$	$U/af$
行星罗斯贝波	$2\pi/\sqrt{u\beta}$	$\sqrt{u\beta}/f$
气旋和反气旋	$2\pi\sqrt{Ri}/f$	$1/\sqrt{Ri}$
经典锋面	$2a\sqrt{Ri}/f$	$1/\sqrt{Ri}$
海陆风	1 天	$1/(2\sin\Phi)$
倾斜对流	$1/f$	$2\pi$
热带气旋	$2\pi R/V_T$	$V_T/Rf$
惯性重力波	$2\pi f^{-1} - 2\pi N^{-1}$	$1 - N/f$
雷暴和积云	$N_w^{-1}$	$2\pi N_w/f$
开尔文-赫姆霍茨波	$2\pi N^{-1}$	$2\pi N/f$
行星边界层湍流	$2\pi h/U^*$	$U^*/fh$
龙卷	$2\pi R/V_T$	$V_T/fR$

切向风尺度。其余符号在气象上通用。

由上述分类可见，传统天气学主要研究的是大尺度环流系统。

然而，与传统天气学不同的中、小尺度气象学研究近十几年已有了迅速的发展。这些中、小尺度系统主要包括：中尺度对流复合体 (MCC)，中尺度锋和急流，重力波，准稳定对流过程，台风的中尺度结构，孤立对流风暴，飚线和雨带，山脉波，干线，海陆风环流和龙卷等；此外，还包括小雷暴、深对流以及短重力波等这样一些中尺度（1—10 公里）系统。这些中、小尺度系统常常造成局地突发性的或大面积持续性的自然灾害，有时是极其严重的。为了深入研究这一领域，美国正在实施一个 STORM（风暴尺度业务和研究气象学）计划。这是世界当前第一个力图同时测量从<sup>a</sup>（1000—100公里）至 $\gamma$ （10—1公里）中尺度运动、降水、



温度、湿度和其他大气变量的真正多尺度计划。该计划分三个阶段（初期、中期和后期），最后阶段预计在1995年结束。该试验的主要观测任务是由地面气象多普勒雷达、机载多普勒雷达以及脉冲多普勒雷达完成。可以期望，该计划的完成将会大大促进中尺度气象学的发展。

近几年，我国也分别在京津冀、长江三角洲、武汉和珠江三角洲四个地区建立起中尺度监测网；台湾省中尺度试验（TAMEX）计划自1987年也已开始，该计划的主要目的是研究梅雨锋的中尺度环流系统及其结构和演变。

然而，局地强风暴和中、小尺度强对流系统的发生和发展预报是十分困难的，为了尽可能提高对这类灾害天气系统的预报准确率，美国国家海洋局（NOAA）自1979年至1983年发展和建立了一个“实验性区域观测和预报服务（PROFS）”的探索性发展设施（EDF），该设施包括观测、资料处理、预报方法、带有交互式图形显示的工作站和通向预报情报选择接收者的输出通道试验系统。这一套甚短期预报的设施可简称为POWS（PROFS业务工作站）系统。该系统（图1.4）于1990年前后用于美国国家天气局。我国也准备发展这套系统。

由此可见，中、小尺度气象学和短期及甚短期天气预报已成为近代天气学非常重要的内容。但总的说来，天气学是一门较为定性和偏重实践的学科，然而，正是日复一日的天气预报实践向大气科学工作者提出了大量的科学和理论问题，随着对这些科学问题的理论研究，于是，理论气象学，即动力气象逐渐形成并迅速发展。

动力气象学是包括大气热力学、大气辐射、大气静力学、大气动力学和大气能量学的气象学主要分科之一。这门