

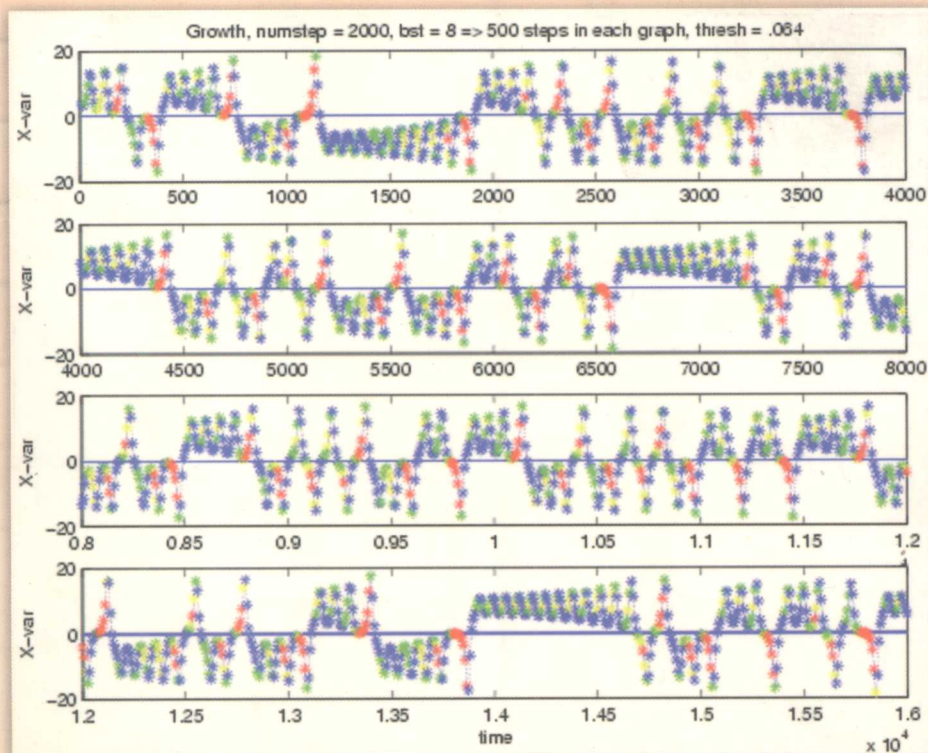
Atmospheric Modeling,
Data Assimilation
and Predictability

大气模式、 资料同化 和可预报性

[美] Eugenia Kalnay 著

蒲朝霞 杨福全 邓北胜 徐怀刚 周小刚 译

廖洞贤 校



气象出版社

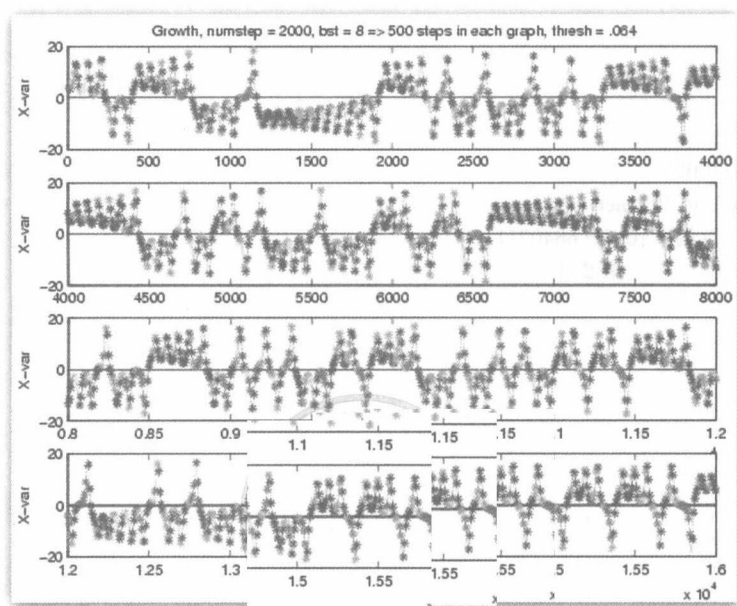
[美] Eugenia Kalnay 著

蒲朝霞 杨福全 邓北胜 徐怀刚 周小刚 译

廖洞贤 校

大气模式、资料同化 和可预报性

Atmospheric Modeling,
Data Assimilation
and Predictability



气象出版社

Atmospheric Modeling, Data Assimilation and Predictability by Eugenia Kalnay

Copyright © Eugenia Kalnay 2003

Published by the Press Syndicate of the University of Cambridge

The Pitt Building, Trumpington Street, Cambridge, United Kingdom

2003 年第一版, 2004 年修改重印

中译本版权©气象出版社 2005

保留所有权利

图书在版编目(CIP)数据

大气模式、资料同化和可预报性/(美)卡莱尼(Kalany, E.) 著;

蒲朝霞等译. —北京:气象出版社, 2005. 8

书名原文: Atmospheric Modeling, Data Assimilation and Predictability

ISBN 7-5029-4007-3

I. 大… II. ①卡… ②蒲… III. 数值天气预报 IV. P456.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 096350 号

北京市版权局著作权合同登记:图字 01-2005-2042 号

出 版 者:气象出版社

地 址:北京海淀区中关村南大街 46 号

网 址:<http://cmp.cma.gov.cn>

邮 编:100081

E-mail:qxcbs@263.net

电 话:总编室:010-68407112 发行部:010-62175925

责任编辑:俞卫平 李澄昌

终 审:周诗健

封面设计:王 伟

版式设计:吴庭芳

责任校对:吴边红

印 刷 者:北京金瀑印刷有限责任公司

装 订 者:三河市海龙装订厂

发 行 者:气象出版社

开 本:787×1092 1/16

印 张:20.00

字 数:450 千字

版 次:2005 年 8 月第一版 2005 年 8 月第一次印刷

书 号:ISBN 7-5029-4007-3/P·1434

印 数:1500 册

定 价:58.00

本书如存在文字不清,漏印以及缺页、倒页、脱页等,请与本社发行部联系调换

谨以本书献给 Mayo (梅奥)广场的祖母们，
并对她们在维护人权和民主方面的巨大勇
气和领导才能表示怀念和敬意。

中文版序(一)

我非常荣幸地看到“大气模式、资料同化和可预报性”一书被翻译为中文并即将在气象出版社出版。我真希望我自己能阅读中文!

显然,完成这项令人钦佩的翻译工作是一个了不起的成就。中国科学院院士丑纪范教授阅读了该书原版并建议翻译这本书是非常有益的。中国国家气象中心廖洞贤研究员和气象出版社俞卫平女士为翻译该书做了大量的校对和编辑工作。我要特别感谢我以前的学生,现今犹他大学气象系助理教授蒲朝霞,她翻译了该书的序言和篇幅最长的第五章,并帮助校正了译文中的一些错误。同时我要感谢邓北胜、徐怀刚、杨福全、周小刚,他们分别翻译了该书的第一章和附录,第二章,第三章和第六章这两个主要的章节,以及第四章和索引。

气象学是一门独特的科学,因为大气没有国界。我希望这本书能为国际和平交流以及通过改进天气预报为人类谋福祉做一份微薄的贡献。

Eugenia Kalnay

2005年5月13日

中文版序(二)

在 1990 年代以前,国内外曾出版过许多数值天气预报教科书和专著。其中除过滤模式和有关方法外,大部分今天仍在应用,但已融入了许多新的内容,如 3 维和 4 维同化,半隐式-半拉格朗日技术和云预报模式等。值得注意的是,在 1960 年代出现的大气可预报性理论和动力-统计预报,经过几十年的研究和发展,人们认识到:大气的可预报性不仅受制于模式初值的不确实性和模式的缺陷,还受制于大气的混沌行为。为了克服这些困难,到上世纪 90 年代,在一些预报中心已开始用集合预报代替单个预报投入业务,取得了好的效果。由于新技术的应用,根据美国国家环境预报中心的统计 1990 年代中期 24 小时累计降水超过 1 英寸(2.54 cm)的 2 天预报,已达到 1970 年代 1 天同类预报的水平,进步是明显的。

2003 年剑桥大学出版社出版了 Eugenia Kalnay 教授撰写的《大气模式、资料同化和可预报性》一书,概括了上述的大部分新技术。Kalnay 教授曾在麻省理工学院、俄克拉何马大学和马里兰大学任教,并长期在戈达德空间飞行中心和美国国家环境预报中心从事研究和开发工作,有坚实的理论基础和丰富的实践经验。她善于把理论转化为实用技术,曾提出过有关资料同化和集合预报的重要方法。在撰写本书时,除基本理论和动力框架外,对资料同化和大气可预报性(包括集合预报)进行了系统、详细地论述。为了使读者易于理解,特别是对基本概念的理解,还由浅入深地用许多生动的事例进行说明并附有习题,启发读者独立思考。本书内容丰富,体裁新颖,虽然次网格物理过程参数化一章论述较简,但总的来说瑕不掩瑜,仍不失为一本近年来出版的难得的数值天气预报好书。

2003 年丑纪范院士看到本书后认为很适合我国数值天气预报专业人士和高等院校师生了解或学习有关新技术的需要,乃组织人员进行翻译。参加者有蒲朝霞、邓北胜、徐怀刚、杨福全和周小刚等,他们各译了序言和第五章、第一章和附录、第二章、第三章和第六章、第四章。其他由廖洞贤译。索引由周小刚完成。最后由廖洞贤校对并统一协调。蒲朝霞仔细阅读了校样,并做了许多澄清和校正。

本书由中国气象局培训中心资助出版。在翻译过程中曾得到丑纪范院士的大力支持,谨表示感谢。

本书内容牵涉到许多新技术,译文难免有差错或不当,敬希读者指正。

廖洞贤 写于北京

2005 年 3 月

英文版序

在过去 50 年中,有关数值预报方面的教科书数量很少。距今最近的一本是 Haltiner 和 Williams 1980 年所写的。毋庸置疑,近年来数值预报取得了令人难忘的成就和发展。E. Kalnay 为进一步阐述数值预报的成就做出了非常重要的贡献。气象界非常有幸地看到她以自己的知识和洞察力所写成的这部专著。

Kalnay 出生于阿根廷^①,并在那里接受了良好的教育。她本来打算学习物理,但是一个偶然的机会有改变了她的命运:她的母亲为她报名去竞争阿根廷国家天气服务局的奖学金! 1966 年, Kalnay 在大学学习期间,阿根廷发生了军事政变,理学院遭到军队侵扰。理学院院长 R. Garcia 为她联系到去美国麻省理工学院做 J. Charney 的有助教职务的学生。于是她成为该学院的优秀学生和第一位女博士研究生。1971 年,在 Charney 的指导下,她完成了一篇关于金星大气环流的优秀博士论文。在后来的回忆中,她认为那是她从 Charney 那里所学到的重要一课。因为在那时,如果她的数值结果与已被接受的理论不符的话,或许该理论是错误的。

她在本书中阐述了什么呢? 根据她的经历,她用饶有兴趣的事例和可靠的根据详尽地概述了数值预报及其相关领域的许多问题。第一章综述了书中所要讨论的主要概念。第二章表述了用于大气模型化的标准方程,并给出了一个简洁完整的有关滤波近似的讨论。第三章是数值方法路线图,为没有有关知识背景的学生提供了一个发展模式所需的所有工具。第四章介绍了次网格物理过程参数化,并列出了可参考的专门文献和文章。我发现她在第五章中对资料同化方法和第六章里对可预报性及集合预报的阐释不仅全面而且透彻明了,同时兼顾了历史的发展。这些章节包含了许多的名词定义和方程表述(我认为这是该领域技术成熟的象征)。这些复杂的定义和方程可能使得许多读者望而生畏,但是 Kalnay 显然已意识到了这一点。为此她用了许多的简单图例来解释一些重要的关系和定义。附录中有美国国家天气局模式输出统计的应用及其成就,以及强加给预报模式的严格约束的描述,是给读者的附加礼物。同时她在附录中也介绍了以 Kalman 滤波为基础的适应性回归方案以及线性切线和伴随模式计算机程序的编制。

1998 年, Kalnay 从国家环境预报中心(NCEP)下属的模型化中心主任离任。在此之前,她领导了由 R. Kistler 担任技术总管的历史气象资料再分析课

① 为了使读者不致混淆,人名一律用原文;除在书中第一次出现外,一律用姓代表全名,除非用姓不足以代表本人的例外——译注。

题。该课题运用 1995 年最先进的资料分析和天气预报系统对过去许多年的气象事件做了重新的分析和预报。其中 1950 年的结果令人惊讶。1950 年 11 月 24 日,一个非常强烈的雪暴在阿巴拉契亚山一带上空发展,当时的业务预报即使在 24 小时之前也未能预报出这一事件。随着 1950 年第一台 ENIAC 计算机的诞生(正如第一章所述),人们不断对数值预报技巧进行试验。这一引人注目的雪暴事件成为新技术试验的实例。1953 年,Charney 应用他的斜压模式,经过大量调试,最终以 1950 年 11 月 23 日为初值成功地做出了一个气旋发展的 24 小时预报,尽管所预报的气旋位置和实况相距不小,位于实际风暴中心的东北侧大约 400 km 处,但这个“预报”对 1955 年成立联合数值天气预报单位提供了主要依据(第一章)。不过相比较起来,在资料再分析课题中,这一事件却被预报得更为准确,其强度和位置甚至提前 3 天就得以预报(与其相关的太平洋上空 500 hPa 涡度中心则得到更早的预报,尽管当时还没有卫星资料!)。这一事实显著地展示了过去几十年数值预报界的成就,其中包括许多来自于作者自己的贡献。

在 1998 年离开 NCEP 后,俄克拉何马大学(OU)聘任 Kalnay 为该校气象学院的 Lowry 首席教授,并开始编写这部教材。1999 年她回到马里兰州就任马里兰大学(MU)气象系主任,继续她在许多方面,包括把混沌理论应用于集合预报和资料同化方面的研究。我们期待着 Kalnay 教授未来的新的成就。

Norman Phillips

英文版作者致谢

1998 年秋我第一次在俄克拉何马大学(OU)教授数值天气预报时,已写了本书手稿的约三分之二。OU 所提供的环境,支持我完成了第一稿的撰写。1999 年秋到 2001 年在马里兰大学(MU)重教该课时我做了较大修改并完成本书。在 MU 和 OU 选修该课的学生们给了我重要的反馈,并帮助我发现该书书中的许多(可能只是大多数)错误。

另外,有几位同行帮助我对手稿中的几章做了重大修改,他们的建议和订正是十分宝贵的。其中,N. Phillips 审阅了第一章的早期手稿并做了重要的历史评论。A. Persson 写了关于数值天气预报早期历史的短文,特别强调了欧洲的历史发展(见附录)。A. R. Barradas 对第二章做了评审。W. Sawyer 校对了第三章并提出了较多的改进建议。H. Pan 对第四章的写作起到了影响作用。J. Geiger 评审了第五章,指出了一些模糊的描述。J. Purser 也评论过这一章;他不但对该章做了有益的建议,还提供了细致的对三维变分分析(见缩写一览表,下同)和最优插值提法的等价性证明。P. Lyster 与作者对这章的讨论也很有帮助。D. J. Patil 提出了许多对第六章的改进意见;B. Martin 指出了 R. Bradbury 关于“蝴蝶效应”的故事。J. Ballaberra 对附录中模式输出后处理的内容做了重要改进。S. Yang 和 M. Corazza 仔细审阅了全书(包括附录),并做了许多澄清和订正。

我感谢 M. Penā,他制做了缩写一览表;还帮助做了很多图并订正了参考文献。D. Wobus 创造性地绘制了封面上优美的 6 天集合预报图。S. K. Park 提供了附录 B 中的线性切线和伴随方程的计算机程序编码。剑桥大学出版社的 M. Lloyd 和 S. Francis 的帮助和指导,M. Storey 对本书的编辑,以及 N. Phillips 为本书写的亲切的序言,也都是我非常感谢的。

20 世纪 60 年代后期,我开始从布宜诺斯艾利斯大学教授们,特别是从 R. Garcia 和 R. Norscini 那里,以及 P. D. Thompson 令人鼓舞的教科书中,学习数值天气预报。在美国麻省理工学院(MIT),我的论文导师 J. Charney,以及 N. Phillips 和 Lorenz 的课程,给我的影响远非笔墨所能形容。在加州大学洛杉矶分校(UCLA),A. Arakawa 的数值天气预报课堂笔记和 J. Gary 所写的有关数值方法的国家大气研究中心(NCAR)教材帮助我在 MIT 教授该课。在过去 30 多年,我有幸一直不断地向我工作过的其他机构包括在蒙得维的亚(Montevideo)大学、MIT、NASA/GSFC、OU 和 MU 的许多同事学习。不过,我最重要的经验还是来自作为国家环境预报中心下属的环境模型化中心主任任上度过的 10 年,在那里我的最有献身精神的同事们和我一起学会如何把研究概念最好地过渡为业务改进。

最后,我要感谢我的丈夫 M. Dick、我的儿子 J. Rivas 和我的姊妹 P. Kalnay 和 S. Kalnay 给我的大力支持、耐心和鼓励。并感谢我父母在心灵深处灌输给我的爱和教育。

缩写一览表

3D-Var	Three-dimensional variational analysis 3 维变分分析
4D-DA	Four-dimensional data assimilation 4 维资料同化
4D-Var	Four-dimensional variational analysis 4 维变分分析
AC	Anomaly correlation 距平相关
ADI	Alternating direction implicit 隐式交替方向
AMIP	Atmospheric Models Intercomparison Project (frequently refers to long model runs in which the observed SST is used instead of climatology) 大气模式相互比较计划(经常指用观测 SST 代替气候值的长期模式试验)
AO	Arctic oscillation 北极涛动
AP	Arrival point in semi-Lagrangian schemes 半拉格朗日方案中的到达点
ARPS	Advanced Regional Prediction System 高级区域预报系统
AVN	NCEP's aviation (global) spectral model NCEP 航空(全球)谱模式
CAPS	Center for Analysis and Prediction of Storms 风暴分析预报中心
CFL	Courant-Friedrichs-Lewy Courant-Friedrichs-Lewy(计算稳定性判据)
COAMPS	US Navy's coupled ocean/atmosphere mesoscale prediction system 美国海军海气耦合中尺度预报系统
CONUS	Continental USA 大陆美国
CPC	Climate Prediction Center (NCEP) 气候预报中心(属 NCEP)
CSI	Critical success index (same as threat score) 临界成功指数(和 T 评分相同)
DP	Departure point in semi-Lagrangian schemes 半拉格朗日方案中的离开点

DWD	German Weather Service 德国天气局
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts 欧洲中期天气预报中心
EDAS	Eta data assimilation system Eta 资料同化系统
ENIAC	Electronic numerical integrator and computer 电子数字积分计算机
ENSO	El Nino-Southern Oscillation El Nino-南方涛动
FASTEX	Fronts and Storm Track Experiment 锋面和风暴路径试验
FDE	Finite difference equation 有限差分方程
FDR	Frequency dispersion relationship 频率频散关系
FFSL	Flux-form-semi-Lagrangian scheme 通量形式半拉格朗日方案
GLE	Global Lyapunov exponents 全局 Lyapunov 指数
GPS	Global positioning system 全球定位系统
hPa	hecto Pascals (also known as millibars) 百帕(过去也称毫巴)
HPC	Hydrometeorological Prediction Center (NCEP) 水文气象预报中心(属国家环境预报中心)
JMA	Japan Meteorological Agency 日本气象厅
JNWPU	Joint Numerical Weather Prediction Unit 联合数值天气预报单位
LFM	Limited fine mesh 有限区细网格
LLV	Local Lyapunov vectors 局地李雅普诺夫(Lyapunov)向量
MCC	Mesoscale compressible community (model) 中尺度可压缩通用模式
MeteoFrance	National Meteorological Service for France 法国国家气象局
MJO	Madden and Julian oscillation Madden-Julian 涛动(常简称 M-J 涛动)

MM5	Penn State/NCAR mesoscale model, version 5 宾州/NCAR 中尺度模式第 5 版
MOS	Model output statistics 模式输出统计
NAO	North Atlantic oscillation 北大西洋涛动
NASA	National Aeronautics and Space Administration 国家航空和航天局
NCAR	National Center for Atmospheric Research 国家大气研究中心
NCEP	National Centers for Environmental Prediction (US National Weather Service) 国家环境预报中心(属美国国家天气局)
NCI	Nonlinear computational instability 非线性计算不稳定性
NGM	Nested grid model 嵌套网格模式
NLNMI	Nonlinear normal mode initialization 非线性正规模初始化
NMC	National Meteorological Center 国家气象中心
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration 国家海洋大气局
NORPEX	North Pacific Experiment 北太平洋试验
NWP	Numerical weather prediction 数值天气预报
NWS	National Weather Service 国家天气局
OI	Optimal interpolation 最优插值
PDE	Partial differential equation 偏微分方程
PDO	Pacific decadal oscillation 太平洋 10 年涛动
PIRCS	Project to Intercompare Regional Climate Systems 区域气候系统相互比较计划
PQPF	Probabilistic quantitative precipitation forecast 概率定量降水预报
PSAS	Physical space analysis scheme 物理空间分析方案

PVE	Potential vorticity equation 位涡度方程
RAFS	Regional analysis and forecasting system 区域分析和预报系统
RAOB	Rawinsonde observation 无线电探空测风观测
RDAS	Regional data assimilation system 区域资料同化系统
RSM	NCEP's Regional Spectral Model NCEP 区域谱模式
RUC	NCEP's rapid update cycle NCEP 快速更新循环
SAC	Standardized anomaly correction 标准化距平相关
SCM	Successive correction method 逐步订正法
SOR	Successive overrelaxation 逐次超松弛
SST	Sea surface temperature 海面温度
SWE	Shallow water equations 浅水方程
TOGA	Tropical ocean, global atmosphere 热带海洋和全球大气试验计划
TOVS	TIROS-N operational vertical sounder TIROS-N 业务垂直探测器
TS	Threat score T-评分
UKMO	United Kingdom Meteorological Office 英国气象局
UTC	Universal time or Greenwich time, e. g. 1200 UTC Frequently abbreviated as 1200Z 世界协调时或格林尼治时间, 如 1200 UTC, 常缩写为 1200 Z
WMO	World Meteorological Organization 世界气象组织

变量一览表

a	地球半径
A	分析误差协方差矩阵
B	背景误差协方差矩阵
C	协方差矩阵
C_p, C_v	定压比热、定容比热 ^①
d	修正或观测增量向量
D	流体深度
$E()$	期望值
f	科氏参数(科里奥利参数)
g	重力常数
H	线性观测算子矩阵
H	观测算子、大气标高
I	单位矩阵
J	值函数
JM	诸格点 j 中的最大值
K	Kalman 增益矩阵
$L(t_0, t)$	TLM 的预解式或传播函数
M	TLM 矩阵
N	Brunt-Vaisala 频率
P	投影矩阵
p	气压、概率、分布函数
q	水汽和干空气的质量混合比
Q	预报模式误差协方差
r	位置向量
R	观测误差协方差矩阵
R	均方根误差、气体常数
R_d	Rossby 变形半径
R_0	Rossby 数
RE	相对误差
T	温度
TS	T 评分
u, v	东风和北风分量
W	权重矩阵
W	垂直风分量、最优权重
x, y	水平坐标

^① C_p, C_v 按现行标准应称为“比定压热容”和“比定容热容”。

$\delta_{i,j}$	克罗内克(Kronecker)符号
ϵ_a	分析误差
ϵ_b	背景误差
η	绝对涡度
Φ	位势高度
φ	位势、纬度
λ	经度
λ_i	全局 Lyapunov 指数
ρ_{ij}	相关矩阵 C 的元素
σ	标准偏差
σ^2	方差
ψ	流函数
ω	气压坐标中的垂直速度、谱频率
ζ	相对涡度

目 录

中文版序(一)	(I)
中文版序(二)	(III)
英文版序	(V)
英文版作者致谢	(VII)
缩写一览表	(IX)
变量一览表	(XIII)
第一章 数值天气预报的历史回顾	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 早期发展	(3)
1.3 原始方程组、全球模式、区域模式和非静力模式	(9)
1.4 资料同化:确定计算机预报的初始条件	(11)
1.5 业务数值天气预报和预报技巧的演变	(15)
1.6 流体非静力中尺度模式	(21)
1.7 天气的可预报性、集合预报和季节到年际预报	(22)
1.8 展望	(27)
第二章 方程的连续形式	(28)
2.1 控制方程组	(28)
2.2 球坐标中的大气运动方程组	(31)
2.3 大气中的基本波动	(32)
2.4 滤波近似	(40)
2.5 浅水方程、准地转滤波和惯性重力波的过滤	(45)
2.6 原始方程和垂直坐标	(51)
第三章 运动方程的数值离散化	(58)
3.1 偏微分方程(PDEs)的分类	(58)
3.2 初值问题:数值解	(61)
3.3 空间离散法	(77)
3.4 边值问题	(97)
3.5 区域模式的侧边界条件	(102)
第四章 次网格尺度物理过程参数化简介	(108)
4.1 引言	(108)

4.2	次网格尺度过程和雷诺平均	(109)
4.3	模式参数化综述	(112)
第五章	资料同化	(115)
5.1	引言	(115)
5.2	经验分析方案	(118)
5.3	最小二乘法介绍	(120)
5.4	多元统计资料同化法	(126)
5.5	3D-Var,物理空间分析方案(PSAS)及其与OI的关系	(141)
5.6	考虑预报误差协方差演变的高级资料同化方法	(147)
5.7	初始条件中的动力和物理平衡	(155)
5.8	观测资料的质量控制	(166)
第六章	大气可预报性和集合预报	(172)
6.1	大气可预报性简介	(172)
6.2	混沌系统基本概念的简要回顾	(175)
6.3	切线线性模式、伴随模式、奇异向量和Lyapunov向量	(178)
6.4	集合预报:早期研究	(190)
6.5	业务集合预报方法	(196)
6.6	误差增长率以及中纬度和热带地区可预报性的局限	(213)
6.7	海陆对月、季和年际可预报性所起的作用	(217)
6.8	年代际变化和气候变化	(220)
附录A	数值天气预报的早期历史	(223)
	数值天气预报的历史	(223)
	为什么是在瑞典?	(224)
	更具挑战性的思想	(225)
附录B	切线线性和伴随模式的编程和检验	(226)
B.1	检验	(229)
B.2	FORTRAN 程序的例子	(229)
附录C	为获得测站天气预报而进行的数值模式输出后处理	(237)
C.1	模式输出统计(MOS)	(237)
C.2	完全预报(Perfect Prog)	(239)
C.3	基于简单Kalman滤波方法的自适应回归方法	(240)
参考文献		(243)
汉文索引		(283)
译者后记		(300)