

数值天气和气候预测

Numerical Weather and Climate Prediction

托马斯·汤姆金斯·沃纳 (Thomas Tomkins Warner) 著

陈葆德 李 泓 王晓峰 等译



CAMBRIDGE

数值天气和气候预测

托马斯·汤姆金斯·沃纳 著
(Thomas Tomkins Warner)

陈葆德 李 泓 王晓峰 等 译

Numerical Weather and Climate Prediction (ISBN 78-0-521-51389-0) by Thomas Tomkins
Warner first published by Cambridge University Press 2011.

All rights reserved.

This simplified Chinese edition for the People's Republic of China (excluding Hong Kong, Macau and Taiwan) is published by arrangement with the Press Syndicate of the University of Cambridge, Cambridge, United Kingdom.

© Cambridge University Press and China Meteorological Press 2012

This edition is authorized for sale in the People's Republic of China (excluding Hong Kong, Macau and Taiwan) only. Unauthorised export of this edition is a violation of the Copyright Act. No part of this publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of Cambridge University Press and China Meteorological Press.

此版本仅限在中华人民共和国境内(不包括香港、澳门特别行政区及台湾省)销售。

图书在版编目(CIP)数据

数值天气和气候预测 / 陈葆德等译著. -- 北京: 气象出版社, 2017. 3

ISBN 978-7-5029-6244-9

I. ①数… II. ①陈… III. ①数值天气预报②气候预测 IV. ①P456.7②P46

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 026945 号

北京市版权局著作权合同登记:图字 01-2017-1452

Shuzhi Tianqi he Qihou Yuce

数值天气和气候预测

托马斯·汤姆金斯·沃纳(Thomas Tomkins Warner)著 陈葆德 李泓 王晓峰 等译

出版发行: 气象出版社

地 址: 北京市海淀区中关村南大街 46 号

电 话: 010-68407112(总编室) 010-68408042(发行部)

网 址: <http://www.qxcbs.com>

责任编辑: 李太宇

责任校对: 王丽梅

封面设计: 博雅思企划

印 刷: 中国电影出版社印刷厂

开 本: 787 mm×1092 mm 1/16

字 数: 640 千字

版 次: 2017 年 3 月第 1 版

定 价: 95.00 元

邮政编码: 100081

E-mail: qxcbs@cma.gov.cn

终 审: 邵俊年

责任技编: 赵相宁

印 张: 25.5

印 次: 2017 年 3 月第 1 次印刷



翻译团队成员(按姓氏笔画为序)

王晓峰 刘梦娟 李 泓 杨玉华
张 旭 张 蕾 陈葆德 骆婧瑶
黄 伟 谢 英 谭 燕

数值天气和气候预测

本教科书为研究生、研究人员和专业人士提供了关于天气和气候预测综合而易懂的论述。针对大气模式的使用,讲授其优点、缺陷和最佳实践,对在各个方面应用模式的学者们来说是本理想的书籍。书中描述了不同的数值方法、资料同化、集合方法、可预报性、陆面模拟、气候模拟和降尺度、计算流体动力模式、基于模式研究的试验设计、检验方法、业务预报,以及空气质量模式和洪水预报等专业应用。本书基于作者在宾夕法尼亚州立大学和科罗拉多大学 30 多年所教授的课程,也得益于作者在美国国家大气研究中心(NCAR)的模式实践经历。

本书将满足在研究和业务应用中需要了解大气模式的人士,适合作为天气和气候预测分支学科的教科书,也可作为具有大气科学、气象学、气候学、环境科学、地理学及地球物理流体力学/动力学等研究背景的专业人士作为参考用书。

本书作者 Tom Warner(全称 Thomas Tomkins Warner,托马斯·汤姆金斯·沃纳,简称 Tom Warner),之前是宾夕法尼亚州立大学气象系教授,后加入美国国家大气研究中心(NCAR),同时在科罗拉多大学任教。他的一生致力于数值天气预报和中尺度天气过程的教学和研究工作,其成果已在众多专业期刊发表,并于 2004 年出版了《沙漠气象学》^{*}(Desert Meteorology)一书(剑桥大学出版社)。

^{*} 中文版《沙漠气象学》(魏文寿等译),已由气象出版社 2008 年出版。——编辑注

专家评述

《数值天气和气候预测》一书对于想综合了解大气和地球系统数值模式的读者来说是一本非常好的书籍,无论他们的兴趣是天气预报、气候模拟、还是其他的数值模式应用。本书内容全面、叙述精致,包含大量清晰的插图。

Richard A. Anthes 博士
大气研究大学联盟(UCAR)主席

Tom Warner 的这本书内容丰富、书写精炼,全面总结了从局地到全球尺度大气模式的各个方面,应该被所有气象学家、气候学者,以及其他对模式的能力及优缺点感兴趣的科学家所收藏。

Roger A. Pielke Sr. 教授
科罗拉多州立大学大气科学系

Tom Warner 在宾夕法尼亚州立大学和 Boulder 的科罗拉多大学教授数值天气和气候预测课程三十多年,也曾是大气科学界广泛使用的数值模式的主要研发者之一,还很长时期地应用这些程序代码。这一宽广的背景造就了 Warner 教授在模式如何工作、如何使用模式、模式的问题出自何处、以及如何将之解释给学生等方面的独特视角。他的这本书是在假定学生对大气科学有基本认识的前提下撰写的。本书涵盖有关模式的所有常见内容,如数值技术,也包含意料外的东西,如集合模式、初始化及误差增长。如今大多数学生是模式的使用者而非研发者,越来越少的人能够超越他们感兴趣的狭小区域深入研究模式。成千上万行的代码中研发团队一般关注其中的某部分,很少有人能说他完全了解一个模式的全部。Warner 教授的这本教科书可以帮助学生和模式的高级使用者更好地领会和了解已成为大气科学主宰的数值模式。

Brian Toon 教授
科罗拉多大学大气和海洋科学系主任

Tom 的这本新书内容广泛,涵盖从传统的须知材料到尖端的大气模式话题,是所有模式使用者和有抱负的模式研发者的必读书籍,也将是我的数值天气预报(NWP)学生的必读教科书。

David R. Stauffer 教授
宾夕法尼亚州立大学气象系

这本书讨论了数值天气预报中很多实践的问题,特别适合学生及利用数值模式做研究和应用的科学家。虽然已有一些关于数值预报基础理论的优秀教科书,但本书提供了更多的辅助材料,对于理解业务数值天气预报的关键部分是非常有用的。

蒲朝霞教授
犹他大学大气科学系

Lewis Fry Richardson 可谓数值天气预报之父。除了对模拟大气的方法有极大兴趣,他对发展可预报战争的数学方程,以期避免战争抱有同样的热情。让我们,在大大小小各方面,追随 LFR 的热情。

感谢 John Hovermale,是他提议写这本书。

中文版序一

自 20 世纪初挪威科学家 Bjerknes 首次提出数值预报的科学思想,并于 20 世纪 50 年代成功地将数值预报应用于天气业务以来,伴随着高性能计算机、卫星探测等新技术的快速发展和数值预报理论研究的不断深入,数值预报的发展取得了巨大成功,已成为现今大气科学进步的重要标志、气象预报业务的主要方法。科学研究和业务实践表明,数值预报具有物理基础扎实、客观定量等优点,是提高天气预报准确率的根本途径,这也是国际大气科学领域的普遍共识。随着数值预报模式分辨率的不断提升和预报时效的不断延长,数值预报发展亦面临可预报极限、天气气候一体化、物理过程改进、新探测资料同化、计算效率等诸多挑战,世界上模式研发领先的国家正在制定并实施新一轮的数值预报发展计划,抢占数值预报的制高点。

我国的气象业务和科研部门一直高度重视数值预报的发展,早在 20 世纪 50—60 年代就开始数值预报研究和试验,80 年代初建立了第一代数值预报业务系统,是数值预报起步较早的国家之一。经过多年发展,我国已经建立了包括全球、区域和专业模式在内的完整的数值预报业务体系,取得了长足的进步。2016 年,我国自主研发的 GRAPES 数值预报模式投入了业务应用,使我国成为当前少数几个具有模式自主研发能力的国家之一。为促进新时期我国气象预报业务的现代化发展,2016 年初,中国气象局发布“十三五”现代气象预报业务发展规划,提出无缝隙、精准化、智慧型气象预报业务发展目标,大力发展精细化预报预测等业务,而高时空分辨率数值预报则是实现这一目标任务的关键和基础。目前已成立了多支创新团队共同开展数值预报攻关,力争在数值模式核心技术方面取得新突破。

以本书主要译者陈葆德博士领军的上海高分辨率区域模式创新团队,作为目前国内区域数值预报研发的翘楚,长期从事区域数值预报业务与研究,不但在高分辨率区域模式研发和中小尺度物理过程研究等方面颇有建树,还通过数值预报云的建立快速共享了该团队研发的高分辨率数值预报产品,有力地支撑了华东区域乃至全国的精细化预报业务发展。该团队也非常注重跟踪数值预报国际前沿进展,不吝分享其掌握的先进数值预报理念与科技成果,本书的翻译出版即是其中的一个方面,将为广大从事气象预报的科技人员提供一个快速学习的途径。在此,对陈葆德博士及其团队的贡献表示感谢。

由 Thomas Warner 所著、剑桥大学出版社出版的《数值天气和气候预测》是国

际上关于数值预报的最新专著之一,其内容丰富,涵盖了从局地到全球尺度数值模式的各个方面;图文并茂,应用了大量的示意图和研究事例,方便读者理解;每章节附有练习题和延伸阅读书籍,供有兴趣的读者深入理解和进一步学习。该书不但为大气科学学科学生、数值预报研究人员提供参考,亦可成为广大预报员掌握数值预报基本原理、提升数值预报产品应用能力的优秀培训教材。

矫梅燕

中国气象局副局长

2017年2月

中文版序二

上海作为一个超大城市,对气象灾害及其影响高度敏感。如何做好极端天气气候风险分析研判和预报预警,牢牢守住城市安全运行和生态环境保护的底线,是气象工作者最关心的难题。高分辨数值预报作为短期与中期天气预报最重要的工具,已经越来越被预报员所认可,其产品时空上的精度及预报时效已在很大程度上超越了人工预报,促进了气象服务水平的大幅度提高。随着数值模式的快速发展,新的问题也逐渐展现在人们面前,即预报员如何甄别海量的预报信息;在日益准确和智能化的模式产品面前,预报员如何更好地发挥作用。实践证明,只要充分理解了数值模式的原理、架构、内在的物理过程和资料的应用,预报员就能更好地理解 and 判断数值预报的可信度,尤其是高分辨率区域模式与全球模式的差异所在,从而更有效地提高预报能力。

合适的数值预报教材和参考书对提升模式的应用能力十分重要。剑桥大学出版社出版的 Thomas Warner 撰写的《数值天气和气候预测》一书,内容丰富,深入浅出,实例多样,涵盖了中尺度天气模式到气候模式的各个方面。它的引进与翻译,对于需要综合了解天气和气候数值预报的学生及模式研发和预报人员来说,具有十分重要的参考价值。

本书的翻译人员来自上海市气象局区域高分辨率数值预报创新中心,他们有着丰富的研发与应用的实践经验,近年来其研发的数值预报业务系统为上海及华东的预报人员提供了强有力的支持。在此基础上,上海市气象局搭建了区域高分辨率数值模式及应用体系建设的众创平台,希望越来越多的学生加入数值预报研发队伍,从模式的“旁观者”或应用者变为研发者,为我国的数值预报发展和气象现代化建设做出更大贡献。

陈振林

上海市气象局局长

2017年2月

中文版序三

半个世纪以来,数值模式已经成为天气预报的主要工具。基于我们对大气物理过程的了解,再加上计算机计算能力的提升和计算资源的普及,数值模式可以说是无所不在。从全球气候预测,中尺度极端天气的预报,到城市建筑物流场的模拟,都可以看到数值模式的运用。随着数值天气预报的进展,天气预报模式可以与客户端的应用程式更紧密地结合,让用户可以根据天气预报模式的输出来驱动下游的应用程式,然后使用应用程式的结果来做决策。比如,空气质量的预测及其对人类健康的影响、作物的灌溉、交通路况、飞行安全、水资源的管理、风能太阳能的利用、紧急疏散等,都必须与天气预报模式紧密结合。随着数值模式精准度的提高,我们也可以利用数值模式来做各种仿真,使我们能够更好地掌握模式预报的不确定性及模式的偏差。天气及气候数值模式已经成为进行大气科学研究不可或缺的工具。

20 世纪 60 年代和 70 年代,早期数值模式的研究及运用仅局限于有限的专家。这些专家对于他们自己发展的模式有着很好的了解。随着数值模式的普及,现在许多人都可以接触和使用数值模式,即使他们对数值模式的了解不是很深,模式使用的经验也很少,对模式局限性的了解不足。因此,好的数值模式教育和训练材料,对一般的模式用户来说特别需要。好的教科书可以提供模式用户必要的知识,让他们有效地、恰当地使用数值模式。虽然已有很多针对数值模式的某些专门课题的书,Warner 博士的这本《数值天气和气候预测》可以说是最好的一本数值模式教科书。它的内容包含了从传统数值模式的基本教材到先进的数值模拟课题,提供了数值天气预报及气候模拟所有相关的材料。这本书为数值模式用户提供了非常实用、非常有价值的讯息。从最基础的控制方程式、动力框架、数值方法、边界条件、物理参数化、数据同化、模式初始化,到模式实验设计、模式结果分析、统计后处理、模式校验、可预报度、集合预报、再分析、区域气候预测,到模式在民生与国防的应用,非常齐全。Warner 博士提供了很多很实际也非常实用的范例。这本书对初学者或是有经验的数值模式工作者都很有用。

Warner 博士 1970 年初师从 Anthes 博士(Dr. Richard A. Anthes),是 Anthes 博士的第一个博士生。他和 Anthes 博士一起工作,把 Anthes 博士的三层台风模式转化成普遍性的中尺度模式,也就是 MM0(中尺度模式初始版),是 20 世

纪 90 年代非常有名的 MM5(中尺度模式第 5 版)的前身。

Warner 博士是我的师兄,我念博士时他给了我很多指导。Warner 博士人很好,做研究非常认真。这本书累积了他数十年在天气及气候模式的工作及教学经验,是一本难得的好书。很高兴陈葆德博士等把这本书翻译成中文,让国内的学者能更方便阅读 Warner 博士的大作。陈葆德博士是中国气象局台风数值模式重点实验室主任,中国气象局上海台风研究所科学主任,也是上海高分辨率区域数值天气预报创新基地的首席科学家。陈葆德博士对天气及气候数值模式有很深的造诣。本书的翻译准确翔实,文笔流畅,是一本难得的译著。我相信,本书的出版会对国内数值天气预报及气候模拟的推展做出重大的贡献。

郭英华

美国大气研究大学联盟(UCAR)

大气研究社团课题室主任(Community Programs Director)

2017 年 1 月

中文版序四

能够见证已故 Thomas Tomkins Warner 教授这部著作的中文版面世,是一件让我高兴的事。我很有幸能成为他在 1993 年调职到美国大气科学研究中心之前,在宾夕法尼亚州立大学指导的最后一个博士生。他对学生倾其所能,这使我在他身上获益良多。他激励和培育了我对数值天气预报的兴趣,这种兴趣以后把我引向去美国国家海洋大气管理局工作的道路。在我成为一名科研人员之后,我们继续保持着工作关系。20 世纪 90 年代我曾在两个研究项目中和他一起工作,这和本书的其中两章“物理过程参数化”和“集合预报”颇有关系。通过这些项目合作,我越发钦佩他对数值天气预报和气候模拟的研究热情。Warner 教授的教学和研究工作覆盖了大气模式的不同领域。这部书真实地反映了 Warner 教授在教授数值天气和气候预报方法的精神。书中材料取自 Warner 教授在宾夕法尼亚州立大学和科罗拉多大学的数值天气和气候预报相关的研究生课程教学中大量使用的讲义,这使得这部书适用于在校学生和有更多天气和气候模式背景的资深读者学习和参考。

这部书讲述清楚,可读性极高。其内容包含大气方程组及其数值解、物理过程参数化、模式初始化/资料同化、集合方法,可预报性、检验方法、基于数值模式的研究的试验设计、业务预报、计算流体动力模式、气候模拟和降尺度、模式输出分析技术、后处理统计,以及数值模式的一些特殊应用(例如空气质量模拟和洪水预报等章节)。书中的每一章都附有清晰且翔实的插图,且各章可独立阅读。书的开始部分有详尽的首字母缩略词、缩写和数学符号。对于需要进一步了解特定主题信息的读者,每一章节还包含了额外的参考文献。

作为一部全面介绍大气和地球系统数值模式的入门参考书,该书适用于利用数值模式进行学习、研究和应用的学生、研究人员和专业人士。这本书的易读性使它成为一部有助于全面理解大气数值模拟关键过程的好书。它不仅可帮助模式使用者,特别是将数值模式当黑箱的使用者了解数值模式的能力、优点和缺点,还能给专注于具体且往往狭窄的课题的模式发展人员提供天气和气候数值模拟的基本理念。

包剑文

美国国家海洋大气管理局地球系统实验室(NOAA/ESRL)

气象研究员(Research Meteorologist)

2017 年 1 月

译者前言

2007 年我回国领导华东区域中心的气候变化和区域数值预报的科研与业务工作。工作中发现,团队成员急需拓展数值模拟相关知识的深度与广度,就一直试图寻找一本深入浅出、综合全面的专业书籍供大家学习参考。直到 2012 年春,NCAR 的 Matthias Steiner 博士访问上海,将刚刚出版的 Thomas Warner 的遗作《数值天气和气候预测》作为礼物送给我们。阅读以后发现此专著是迄今为止同类出版物中最全面、最详尽的一本。上海数值预报团队的数据同化专家李泓博士和长期从事数值天气预报应用的王晓峰博士,从各自的专业角度出发,也与我的看法高度一致。

数值预报作为预报天气的一种方法,发展至今已有百余年历史。随着探测技术和高性能计算的快速发展,数值预报已成为天气和气候预报必不可少的重要手段。考虑到广大学生、教师、科研和业务人员对综合了解数值预报基础理论和模式实践的迫切需求,我们组织翻译团队,历时四年,在中国气象局行业专项(GY-HY201206006)的资助下,共同努力将此书引入与翻译,期望译著对广大师生及模式研发、应用人员有所帮助。我们每个人很荣幸参与这一工作,以期能为数值天气与气候预报在我国的研究与应用贡献自己的一份微薄之力。

本书的翻译工作分工如下:目录、缩略词、符号及第 1 章由谭燕、杨玉华合作翻译,陈葆德校对;第 2 章由陈葆德翻译及校对;第 3、14、15、16 章由张旭翻译,陈葆德、谢英校对;第 4、5 章由黄伟翻译,刘梦娟校对;第 6 章由骆婧瑶翻译,李泓校对;第 7、8、10 章由李泓翻译,李泓、谭燕校对;第 9、12 章由张蕾翻译,谭燕、张蕾校对;第 11、13 章由王晓峰翻译,张蕾校对。另外,扉页、前言、附录等由李泓、谭燕、张旭完成。

翻译从 2013 年开始,从成稿、校对到反复修改、文字润色,期间凝聚着各位译者的辛勤劳动和几多汗水,也包含气象出版社李太宇编审的极大热情和心血。感谢黄润恒研究员、章澄昌教授等对全书各章节的审校。在此,我们要对那些为本书的出版付出辛劳和给予帮助的所有人表示衷心的感谢!最后十分感谢中国气象局矫梅燕副局长、上海市气象局陈振林局长、美国 UCAR 的郭英华(Bill Kuo)教授和 Warner 教授的学生、NOAA 的华人科学家包剑文(JianWen Bao)博士为本译著写序,推荐本书。

由于译者水平有限,译文中肯定还有这样那样的不当之处,请各位读者不吝赐教,我们深表感谢。

陈葆德

2017 年 2 月

原版前言

本书旨在为业务预报或科学研究使用大气数值模式提供一个综合介绍,希望众多的模式使用者能够了解模式的长处与局限。不同于仅介绍模式某方面细节的书籍,本书主要对数值模式进行了总体论述,可用于自学或有关课程的学习。虽然书中的大量篇幅涉及数值方法,但它不是本书的重点。读者可以发现,书中介绍了大量与模拟大气过程相关的其他内容,只有很好地理解了这些,才能在研究和业务中有效地使用模式。对某些主题有特别兴趣并想深入了解的读者,每章还提供了相关内容的参考文献。本书适用于有微分方程数学基础、大气科学学士或以上学位的读者。

书中第一次出现的缩略词和符号等,在章节中会有定义,同时为了便于查询,也会包括在第一章前的缩略词表中。虽然应注重于概念而不是术语,但为了便于讨论相关主题,有必要准备一本技术词典。常用或重要术语在第一次出现时会用斜体表示,以提醒读者这些术语是值得记忆的。

针对某特定主题,本书并不试图提供一份详尽的参考文献列表。如果读者想得到详细的历史文献列表,可以参考最近的文献,或者每章结尾处推荐的综述文章。由于互联网地址的频繁变更,本书不提供相关地址链接信息,读者应该利用搜索引擎查询当前模式说明和资料来源的相关信息。

许多同事对本书的出版提供了各种有形与无形的支持和帮助。Cindy Halley-Gotway 为本书的图片和封面耐心地进行艺术处理;浅水流体模式解的图形是基于 Gregory Roux 的模式试验,他也为第 3 章中的一些函数作了图。许多同事花费时间参与技术讨论,这里要特别感谢 George Bryan, Gregory Byrd, Janice Coen, Joshua Hacker, Yubao Liu, Rebecca Morss, Daran Rife, Dorita Rostkier-Edelstein, Robert Sharman, Piotr Smolarkiewicz, Wei Wang 和 Andrzej Wyszogrodzki。帮助本书各章审阅与编辑的同事有: Fei Chen, Luca Della Monache, Joshua Hacker, Andrea Hahmann, Thomas Hopson, Jason Knievel, Yubao Liu, Yuwei Liu, Linlin Pan, Daran Rife, Robert Sharman, David Stensrud, Wei Wang, Jeffrey Weil 和 Yongxin Zhang。Christina Brown 负责获取版权的相关事宜, Carol Makowski 为手稿的准备提供了技术帮助。来自国家大气研究中心图书馆的 Leslie Forehand 和 Judy Litsey 对参考文