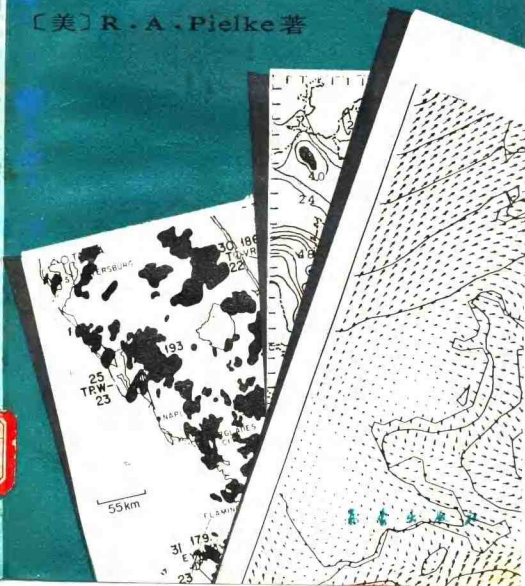


中尺度气象模拟

ZHONGCHIDU QIXIANG MONI

[美] R. A. Pielke 著



中尺度气象模拟

[美] R. A. Pielke 著

张杏珍 杨长新 译

程麟生 丑纪范 校

丁卯 1155/114



气象出版社

内 容 简 介

本书从基本物理守恒方程开始,对涉及中尺度气象模拟的有关问题作了比较全面深入的概述。内容广泛、数学推导严谨,作为教材,它为初学者提供了基本知识;作为专著,它为研究人员提供了最新的研究成果和较深的论述。书末附有近 500 篇参考文献,使读者有可能根据需要对中尺度气象模拟进行深入探讨。

本书可供高等气象院校的学生、教师、研究生以及业务、科研等单位气象科技人员阅读。

Mesoscale meteorological modeling
R. A. Pielke
Academic Press 1984

中尺度气象模拟

R. A. Pielke 著

张杏珍 杨长新 译

程麟生 五纪范 校

责任编辑 黄丽荣

北京市昌平环球科技印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 全国各地新华书店经销

开本: 850×1168 1/32 印张: 21.75 字数: 557千字

1990年5月第一版

1990年5月第一次印刷

印数: 1—1500 定价: 4.50元

ISBN 7-5029-0242-2/P·0147(课)

译 者 的 话

本专著是美国科罗拉多州立大学大气科学系 R. A. Pielke 教授所著，作者试图从基本物理守恒关系开始对中尺度数值模拟作一综述。本专著涉及内容广泛，数值推导严谨，与中尺度数值模拟有关的问题作了比较全面的介绍，对研究中尺度数值预报、中尺度数值模拟和中尺度动力学基本原理很有参考价值。

书后附有近 500 篇参考文献，使读者有可能根据需要作深入的研究。

在中译本出版之际，作者 R. A. Pielke 教授特为中译本写了前言，并寄来书中勘误，我们向他致以真诚的谢意。

本书 1—10 章由张杏珍翻译，前言、11—13 章、附录和索引由杨长新翻译。全书由程麟生、丑纪范审校。

由于水平有限，译文有错误或不当之处，敬希读者指正。

1987 年 6 月

中译本前言

我非常珍惜为《中尺度气象模拟》中译本撰写前言和对英文原著提供勘误的机会。1986年秋,我曾有幸在中国度过两周,访问了北京、桂林、广州、南京和上海等几个城市的研究中心。在我所见到的科学家中,他们的热情接待和科学才干给我留下了深刻的印象。我希望这本书的翻译出版将有助于中国气象科学研究事业的发展,有助于美中两国在社交和专业两方面的密切合作。

我感谢各位专家发现英文原著中的印刷错误和提出需要修改的意见,这些在中译本中均已作了修订。我也非常感谢 Pinhas Alpert, Ray Arritt, Martin Beniston, Feng Zhi-qiang,(冯志强), Mike Flannigan, Mark Hadfield, Alan Lipton, Chuck Mollenkamp, Mike Moran, Bill Physick, Craig Tremback, Moti Segal, Gnaeme Stephens, Yu Chang-han, Doug Wesley, 以及 Zhu Fu-cheng (朱复成)(按姓氏笔划排列)等对原著提出的宝贵意见。如果对中译本提出其它问题或修改意见,也请写信告诉我。最后,还应当感谢丑纪范教授、程麟生副教授,以及译审张杏珍、副编审杨长新等在翻译本书时所做的努力。完成这项工作不仅要求同时通晓英语和汉语,而且还需要有坚实的数学才能。他们为科学发展和技术交流所做的这一贡献将会得到世界气象界的称赞。

作者

Roger A. Pielke

1987年4月于美国科罗拉多

州立大学大气科学系

前 言

本书的目的是提供中尺度数值模拟方面的概述，所以一开头就给出基本物理守恒方程。个别章节的纲要在引言中给出。本书是题为《中尺度数值模拟》论著的充实和提高。我的那篇论著已收入《地球物理进展》第23卷。

本书在阐述中尺度模拟的一些专题时，希望尽可能作到从基本原理开始，但这就需要涉及过多的初期工作，不过已发表的若干参考文献均已给出，这样，读者就能追溯本源（包括若干假设）。在列出的文献中常常只有研究者的新近工作，然而如有必要，一旦查到这些最新发表的文章，就可在其后的参考文献中很快查到他（或她）早期所做过的工作。理解用于推导中尺度模式数学方程组的一些假设，对融会贯通这个专题的内容是非常必要的。为了适应广大读者的需要，本书对初学者提供了基本知识，对专业人员则涉及较深的论述。

作者衷心感谢在本书写作过程中提过意见和建议的广大专家；还感谢弗吉尼亚大学和科罗拉多州立大学作为中尺度气象模拟教材讲授时阅读过原文的部分或全部草稿的师生，其中对该教材提出过重要建议和勘误的学生有 Raymond Arvitt, David Bader, Charles Cohen, Omar Lucero, Jeffery McQueen, Charles Martin, Jenn Luen Song, Craig Tremback, James Toth 和 George Young. 感谢 P. Flatau 帮助我了解苏联一些有关中尺度气象学方面的工作。还感谢科罗拉多州立大学大气科学系全体教师给予的有益建议和支持，其中包括 Duane E. Stevens, Richard H. Schubert 和 Richard Pearson, Jr.。

本书有些章节还送给在中尺度气象学某些方面知名的一些专

家审阅过。这些科学家有 André Doneaud (第1—5, 7和8章), George Young (第5章) Tzvi Gal-Chen (第6章) Raymond Arritt (第7章), Richard T. McNider (第7章), Ackerman (第8章), Andrew Goorch (第8章), Larry Freeman (第8章), Michael Fritsch (第9章), William Frank (第9章), Jenn-Luen Song (第9章), R. D. Farley (第9章), Harold Orville (第9章), Robert Lee (第10章), Mike McCumber (第11章), Joseph Klemp (第12章), Mordecai Segal (第2, 3, 10, 11和12章)和 Robert Kessler (第12章)。对于他们在审查书稿中所给予的帮助,作者表示深切的谢意。

此外,我还要感谢对总结附录B中模式一览表作过工作的每位同事。虽然模式一览表概括的还很不全面(因为没有得到每个模拟小组的回答或接触每个模拟小组的模式),但是该表却提供了中尺度模拟性能的最新概括。

我也很感谢 William R. Cotton 和 Joanne Simpson 的鼓励,他们促使我从事中尺度气象学领域的工作。在讲授本教材和指导学生学习工作中,我尽量设法创造机会而使以学生自己思路独立地创造性地完成他们的研究。我还要向 André Doneaud 和 Mordecai Segal 表示特别感谢,他们耐心而认真地阅读了本书大部分手稿,从而使正文有了极大的改进。此外,我也要向 Thomas H. Vonder Harr 表示真诚的感谢,在本书整个加工过程中,他向我提供了极好的工作和研究条件。

在撰写这本专著时,我考虑论题大纲不超过中尺度气象学范围;纯推论性的讨论,大多出现在辐射效应那些章节,尤其是空气污染的一些章节;在参数化、求解方法、边界条件和初始条件、以及模式评价等章的若干地方也出现有纯理论的讨论。当然,这是一个大胆的思索,因为目前还没有研究出一种特别的方法适用于要求扩大的科学研究范围。尽管如此,但我相信,要完善这本教材的基本内容,上述讨论是非常必要的;而且其中的一些设想对指出今

后研究方向也可能是有益的。如果这本教材能引导人们对中尺度气象模拟有新的深入了解,那么,这本入门教材就可以说是成功的了。

最后,撰写一本专著或一本教科书不可避免地会出现一些错误,我对这些错误负有完全责任。但我希望上述错误不会有损于本书的价值,并希望读者从查出书中的错误中也许会得到一些收益。在任何情况下,我都愿意知道读者对于本书任何错误的批评意见,包括对有关最新成果的遗漏等方面的意见。

本书草稿和脱稿前的手稿是由非常能干的 Ann Gaynor, Susan Grimstedt 打字的。可以毫不夸张的说,他们在校对资料方面的贡献,使手稿的错误达到了最低程度。Jinte Kelbe, Teresita Arritt 和 Judy Sorbie 的制图工作完成得非常出色。这本专著的部分补助资金是在 ATM 81-00514 和 ATM 82-42931 和 ATM 83-04042 项目下,由国家科学基金会大气科学处提供的。

最后一点,也是最重要的一点,我要感谢我的家庭成员——Gloria, Tare 和 Roger Jr., 在完成这项费时的艰巨的任务中所给予的支持。

目 录

译者的话

中译本前言

前言

第一章 引言..... (1)

第二章 基本方程组..... (3)

2.1 质量守恒..... (3)

2.2 能量守恒..... (5)

2.3 动量守恒..... (13)

2.4 水物质守恒..... (17)

2.5 其他气体和气溶胶物质守恒..... (18)

2.6 小结..... (19)

注释..... (21)

参考文献..... (22)

第三章 基本方程的简化..... (23)

3.1 质量守恒..... (23)

3.2 能量守恒..... (30)

3.3 动量守恒..... (31)

3.4 水物质和其他气体、气溶胶污染物的守恒..... (41)

注释..... (42)

第四章 平均守恒关系..... (43)

4.1 平均的定义..... (43)

4.2	涡度方程	(51)
4.3	非流体静力气压的诊断方程	(54)
4.4	换算气压形式	(56)
4.5	小结	(59)
	附录	(50)
	注释	(62)
	参考文献	(62)
第五章	模式的类型	(63)
5.1	物理模式	(63)
5.2	线性模式	(69)
	注释	(106)
	参考文献	(107)
第六章	坐标变换	(108)
6.1	张量分析	(108)
6.2	广义垂直坐标	(117)
6.3	流体静力假设	(124)
6.4	小结	(132)
	注释	(133)
	参考文献	(134)
第七章	参数化——平均次网格尺度通量	(135)
7.1	基本项	(137)
7.2	高斯烟流模式	(143)
7.3	相似理论	(148)
7.4	行星边界层参数化	(160)
7.5	应用边界层参数化估算污染物的输送和扩散	(183)
	注释	(194)

参考文献	(197)
第八章 平均辐射通量密度	(199)
8.1 引言	(199)
8.2 基本概念	(199)
8.3 长波辐射通量	(202)
8.4 短波辐射通量	(225)
注释	(240)
参考文献	(242)
第九章 湿热力过程参数化	(243)
9.1 引言	(243)
9.2 对流稳定大气中水相变影响的参数化	(245)
9.3 对流不稳定大气中水相变影响的参数化	(258)
注释	(287)
参考文献	(289)
第十章 求解方法	(290)
10.1 差分方法	(291)
10.2 迎风插值法	(317)
10.3 有限元表示	(330)
10.4 诊断方程	(344)
10.5 时间分离	(348)
10.6 非线性效应	(349)
10.7 小结	(356)
注释	(357)
参考文献	(358)

第十一章 边界条件和初始条件	(359)
11.1 区域和格点结构	(359)
11.2 初值化	(375)
11.3 空间边界条件	(388)
注释	(451)
第十二章 模式评价	(455)
12.1 评价标准	(455)
12.2 与解析理论比较	(456)
12.3 与其他数值模式比较	(465)
12.4 与模式方程组的不同形式比较	(467)
12.5 模式中诸物理量收支的计算	(475)
12.6 与观测资料比较	(485)
12.7 模式逻辑运算的使用价值	(490)
注释	(491)
第十三章 中尺度模拟实例	(494)
13.1 地形诱发的中尺度系统	(495)
13.2 天气尺度系统诱发的中尺度系统	(539)
注释	(551)
参考文献	(552)
附录 A 具有周期性边界条件的方程 (10-21a), (10-38)	
和 (10-56d) 的解	(553)
附录 B 模式纲要汇总	(557)
第一部分 1983 年中尺度数值预报模式研究组模式性能纲要汇总	(558)

第二部分 与中尺度模拟直接有关的某些研究组模式性

能纲要汇总.....	(593)
参考文献.....	(604)
名词索引.....	(663)

第一章 引言

为了有效地利用大气的中尺度动力学模拟,需要了解模式的物理和数学的基本原理。同时需要具备鉴别我们所关心的具体的大气系统的能力。本书将提供这方面的综述,以适于实际工作者和中尺度现象的研究人员使用。由于本书是从若干基本概念开始叙述,因而有可能用来评价已研创的或将研创的任何模拟模式是否具有这种科学基础。

中尺度可以描述性地定义为时间尺度和水平空间尺度比常规探空站网小、但比积云单体又大得多的一种尺度。也就是说,水平尺度约为几公里—几百公里,时间尺度约为1—12小时。垂直尺度从几十米到整个对流层。很显然,如此的限定是有些任意的。不过,就天气预报的目的而言,中尺度可应用于这样的大气系统:尺度比其小的系统所对应的天气特征只能用统计方法来描述;而尺度比其大的系统所对应的天气特征至少一般可以根据天气图辨认出来。还可以把中尺度应用于这样的大气系统,它们的水平范围足够地大,以致流体静力近似能有效地表示气压的垂直分布;但又足够地小,以致在行星边界层以上地转风和梯度风作为实际风环流的近似已不合适。这样的一种尺度,加上计算机和费用的限制,决定了中尺度模式的区域和网格的大小。书中将列举几种特殊的环流例子,以说明中尺度环流的各种尺度。

本书各章要点如下:第二、第三章引入基本守恒关系,给出适当的简化。第四章对诸方程求平均以适合中尺度模式网格。第五章讨论模式的种类及它们模拟中尺度现象的优缺点。第六章给出方程组向广义坐标系的转换。第七、八、九章分别为中尺度模式中

的行星边界层参数化、电磁辐射参数化和湿热力过程参数化。第十章提出求解的方法。第十一章讨论边界条件、初始条件和格点结构。第十二章介绍评价模式的方法。最后，在第十三章中提出对具体的中尺度现象进行中尺度模拟的例子。

第二章 基本方程组

任何一种模式的基础，都是一组守恒原理。对中尺度大气模式来说，这些原理是：

- (1) 质量守恒，
- (2) 能量守恒，
- (3) 动量守恒，
- (4) 水物质守恒，
- (5) 其他气体和气溶胶物质守恒。

这些原理构成了在各个表达式中必须彼此同时满足并包含源和汇的一组耦合关系式。

用于大气的这些原理，其相应的数学表达式推导如下。

2.1 质量守恒

在地球大气中，通常假设质量是无源汇的¹⁾。用另一种方式说，这一概念要求从一个无穷小六面体流入和流出的质量，必须等于六面体内质量的变化。图 2-1 为这一六面体示意图，图中 $\rho u|_1 \delta y \delta z$ 为从左边流入的质量通量， $\rho u|_2 \delta y \delta z$ 为从右边流出的质量通量。符号 δx 、 δy 和 δz 代表六面体互垂边， u 为垂直于 $\delta z \delta y$ 平面的速度分量。

如果六面体相当小，穿过六面体的质量通量的变化可写成

$$[\rho u|_1 - \rho u|_2] \delta y \delta z = \left[[\rho u|_1 - \rho u|_2] - \frac{\partial \rho u}{\partial x} \right] \delta x$$

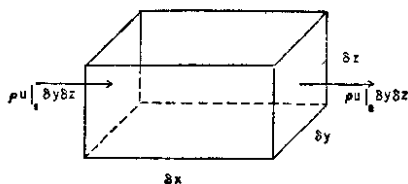


图 2-1 用于推导质量守恒关系的六面体示意图

$$-\frac{1}{2} \left. \frac{\partial^2 \rho u}{\partial x^2} \right|_1 (\delta x)^2 - \dots \Big] \delta y \delta z = \frac{\delta M}{\delta t}$$

式中 $\rho u|_1$ 写成一维泰勒级数展开, $\delta M/\delta t$ 为六面体内质量增减率。略去级数中 (δx^2) 和更高阶项, 表达式可改写为

$$-\left. \frac{\partial \rho u}{\partial x} \right|_1 \delta x \delta y \delta z \simeq \frac{\delta M}{\delta t}$$

因为质量 M 等于 ρV (其中 $V = \delta x \delta y \delta z$ 为六面体的体积), 假设体积随时间不变, 这一表达式可改写为

$$-\left. \frac{\partial \rho u}{\partial x} \right|_1 \delta x \delta y \delta z \simeq V \frac{\delta \rho}{\delta t}$$

如果质量通量以同样的方式通过 $\delta x \delta y$ 和 $\delta x \delta z$ 各边, 则六面体内质量通量的全方程可写成

$$\begin{aligned} & -\left. \frac{\partial}{\partial x} \rho u \right|_1 \delta x \delta y \delta z - \left. \frac{\partial}{\partial y} \rho v \right|_1 \delta x \delta y \delta z - \left. \frac{\partial}{\partial z} \rho w \right|_1 \\ & \times \delta x \delta y \delta z \simeq V \frac{\delta \rho}{\delta t} \end{aligned}$$

除以体积, 得到的方程为

$$-\left. \frac{\partial \rho u}{\partial x} \right|_1 - \left. \frac{\partial \rho v}{\partial y} \right|_1 - \left. \frac{\partial \rho w}{\partial z} \right|_1 \simeq \frac{\delta \rho}{\delta t}$$

如果取时间和空间增量的极限为零, 则

$$\lim_{\substack{\delta x \rightarrow 0, \delta y \rightarrow 0 \\ \delta z \rightarrow 0, \delta t \rightarrow 0}} \left(-\left. \frac{\partial \rho u}{\partial x} \right|_1 - \left. \frac{\partial \rho v}{\partial y} \right|_1 - \left. \frac{\partial \rho w}{\partial z} \right|_1 \right) = \lim_{\substack{\delta x \rightarrow 0, \delta y \rightarrow 0 \\ \delta z \rightarrow 0, \delta t \rightarrow 0}} \frac{\delta \rho}{\delta t}$$