

海洋与其过程的数值模型

Numerical Models of Oceans and
Oceanic Processes

[美] LAKSHMI H. KANTHA (甘塔) 著
[美] CAROL ANNE CLAYSON (克莱森)

乾爱国 黄海华 程道同 李延华 吕志锋 刘勇胜 等 译



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

海洋与其过程的数值模型

Numerical Models of Oceans and Oceanic Processes

[美] LAKSHMI H. KANTHA (甘塔) 著
[美] CAROL ANNE CLAYSON (克莱森)

乾爱国 黄海华 程道同 等 译
李延华 吕志锋 刘勇胜



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书以海洋和海洋过程的数值模型为主题,即计算海洋动力学。主要目的是提供与海洋建模和相关主题有关的知识背景,从简单的模型开始,最终将描述综合数据同化及最先进的海洋数值模型。主要内容包括海洋动力学、数值解法、赤道动力学与减重力模型解决方案、中纬度动力学和准地转模型、高纬度的动力学海-冰模型、潮汐和潮汐建模、海岸动力学和正压模型、 σ 坐标区域和沿海模型、多级盆地规模和全球模型、海气耦合模型等。

本书适合从事相关专业的技术人员,以及高校师生参考阅读。

This shorter Chinese edition of *Numerical Models of Oceans and Oceanic Processes* by Lakshmi Kantha, Carol Clayson is published by arrangement with ELSEVIER INC., a Delaware corporation having its principal place of business at 360 Park Avenue South, New York, NY 10010, USA.

This shorter Chinese edition excludes the Chapter 8, 11, 12, 14 and Appendices B&C from the original book (本书中文版省略了英文原版中的第 8、11、12、14 章以及附录 B、附录 C)。

The translation was undertaken by China Water & Power Press.

This shorter edition is published for sale in China only.

北京市版权局著作权合同登记号为:图字 01-2014-243

图书在版编目(CIP)数据

海洋与其过程的数值模型 / (美)甘塔, (美)克莱森著; 乾爱国等译. — 北京: 中国水利水电出版社, 2014. 2

书名原文: Numerical models of oceans and oceanic processes

ISBN 978-7-5170-1637-3

I. ①海… II. ①甘… ②克… ③乾… III. ①海洋动力学 IV. ①P731.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第319988号

书 名	海洋与其过程的数值模型
原 书 名	Numerical Models of Oceans and Oceanic Processes
作 者	[美] LAKSHMI H. KANTHA (甘塔) [美] CAROL ANNE CLAYSON (克莱森)
译 者	乾爱国 黄海华 程道同 李延华 吕志锋 刘勇胜 等
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn
经 售	电话: (010) 68367658 (发行部) 北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京时代澄宇科技有限公司
印 刷	三河市鑫金马印装有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 28.75印张 682千字
版 次	2014年2月第1版 2014年2月第1次印刷
定 价	135.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

声 明

This shorter Chinese edition excludes the Chapter 8, 11, 12, 14 and Appendices B&C from the original book.

本书中文版省略了英文原版中的第 8、11、12、14 章以及附录 B、附录 C。

序一

该书首先对早期的海洋建模进行回顾，在 20 世纪四五十年代，Jules Charney 和 Norman Phillips 在数值天气预测方面取得了显著成效，来自普林斯顿高等研究院的 Joseph Smagorinsky 参与了他们的工作，在回到华盛顿后，他说服了美国气象局（该局后来成为美国国家大气和海洋管理局的一部分），要求该局支持一项富有长远意义的工程，即建立一个包括大气和海洋在内的全球气候综合数值模型。在这项工程的早期阶段，从事相关工作的科学家和程序员不到 10 人。此外，当时工作所需要的超级计算机庞大且昂贵，并且操作不便。由于这项研究所需要的资源极大，并且它要求人们将精力集中于这样一个长期的目标上，因此从事类似研究的组织很少便不足为奇了。

Smagorinsky 率先对全球海洋环流数值模型进行了研究，他组织的实验室被证明是进行该项工作的理想环境。赋予实验室主任的一项开明政策使我能够得到很多的机会，在这期间我曾经回到伍兹霍尔海洋研究所，在那里我发现同事对我的工作倍感好奇，不过他们对海洋模型的构建却没有积极兴趣，因为做这类研究所需的工具只有在极少数的几个专门实验室才有。对地球物理流体动力学有兴趣的研究群体是很小的，因为与之相关的海洋学所关注的问题更为抽象，虽然当时的计算机已经能够解决该问题。

当前的情形已经截然不同，计算机设计和制造技术的巨大进步使模型构建广泛地普及到实验室、高等院校甚至个人，并且有的学生在进入大学前就已经擅于使用计算机。计算机模型已经成为几乎所有科学领域中从事研究和教育的工具。物理海洋学是从一个在根本上与全球海洋的探索相关的领域发展而来的，它关注更为详细的问题，包括海洋环流的机制及其在气候变化中所扮演的角色。几十年前，大多数对海洋的观察可以归结为一些印刷的地图册。现在，由卫星和观测船所获取的大量数据可供海洋学家使用，卫星测高仪和温度数据让人们首次看清了海洋的“概貌”，大气科学家认为这是理所当然的，而在几十年前，基于考察船获取的观察结果不可能得到对海洋的“概貌”。冷战的结束使美国和苏联所保持的大量数据档案公诸于众。

同时，海洋环流数值模型可以在许多交叉学科领域发挥有益的作用。地球化学测量在检测海洋中化学成分的最小浓度方面的能力开启了在调查海洋混合物以及注入海洋表面的示踪剂的全球通路的详细信息方面的巨大的可能性。这些交叉学科领域中，很多领域是科学研究和重要国际政策问题相互交叉的。比如，一些建模团队正尝试着对化石燃料燃烧产生的额外二氧化碳中被海洋吸收的部分进行定量，同时尝试确定这种吸收随不同的气候状况可能产生的变化，建模团队在尝试着改善温室气体不断增加的世界的气候环境，这意味着要理解海洋和大气之间的相互作用是怎样影响着陆地的降雨量和温度的。自原始国际气候变化小组（IPCC）在 1990 年报道以后，气候对温

室气体的增加的反应模型被认为只有在包含海洋环流的主动模型时才是完整的。

大气和海洋耦合模型的发展为常规的测量海洋表面以下的观测网提供了一个坚实的基础，并且这样的网络已经存在，它监视着赤道附近的太平洋发生厄尔尼诺现象的区域。除了全球问题外，海洋环流模型已在近岸区域具有很多重要的局部应用，近岸区域的模型需要科学地理解沿海环流，同时还需要解决涉及渔业管理和污染的环境问题。

随着海洋模型在生物学、工程学、地球化学和气候学等如此多领域中的大量重要应用，很多具有不同背景的科学家对海洋模型产生了兴趣，也许一个共同的原因是他们熟悉计算机在解决科学问题方面的应用。本书由 Kantha 和 Clayson 编写，汲取了众多的来源和一个广泛的背景，同时包含作者建模的一些经历，提供一个易理解的教学工具，并对相关研究提供一个指导。它以一种通俗易懂的方式总结当前存在的对海洋环流进行数值化模拟的方法。本书为读者提供了一条途径，使读者可以独自从传统的参考文献或者网络资源获得代码和信息，从而使其自己尝试使用海洋模型，或者将其应用到全新的领域中去。

Krik Byran
Princeton, NJ

序二

海洋在天气和气候中起着至关重要的作用，同时也是食物和矿物质的重要来源，此外，海洋承担的商务作用对全球经济也极为关键。因此，海洋直接或间接地成为日常生活的一部分。然而，我们并没能很好地理解海洋环流的复杂性，而是仅限于对海洋的生物生产力、海洋与大气的相互作用或者海洋对不断增加的人口所倾倒的废弃物的承受程度等的理解。直到最近，我们对海洋的观测能力也还是有限的，现场测量的艰难及其高昂的成本限制了对海洋的探索能力。尽管传感器随着卫星沿轨道运行或者由自由移动的浮标携带，或者由自动的水下机器人携带，或者由暂时的战略性布局的系泊工具携带——这些 20 世纪科技的胜利成果已经开始填补着我们对海洋运作机制理解的知识缺口，而它们仅仅是解决方案的一部分。

在 21 世纪，将会越来越依赖于 20 世纪科学技术的另一个奇迹：高性能计算机。运行于高性能计算机上的海洋数值模型将极大地增强我们对海洋的模拟和理解能力、检测海洋当前状态的能力甚至一定程度上受到限制的预测海洋未来状态的能力，这些模型以独立模式运行或者与观测数据相结合运行。然而，它们满足当代社会需求的能力将很大程度上依赖于它们模拟海洋过程的真实程度。尽管 21 世纪的高性能计算机的万亿次甚至上千万亿次的强大运算能力将会有助于该项任务，但它们代替不了对潜在机制的理解及其描述。这就是为什么我们需要聪慧年轻的下一代人——计算机的使用能力得到锻炼的人，掌握必须的知识基础的人，并且自愿地去应对解密自然运作机理这一艰难任务的人。我们期望本书随同其姐妹篇《地球物理流中的小规模过程》能够有助于这项任务。

如同许多其他的计算机科学那样，海洋数值模型需要不同技术的相互结合。首要的是对海洋动力学知识或者至少对海洋静态特征有一个熟练掌握。（为了对化学状态或者生物状态进行模拟，必不可少地要具备一些关于化学过程或生物过程的知识）。与描述海洋学不同的是，动力海洋学要求学生具备足够的数学和物理学方面的技能，因为通过求解相关的守恒方程对海洋过程进行定量化的能力不是选择性的，而是必须的。其次要求的是编程以及与计算机交互的能力，对于这点，年轻一代拥有一定的优势，他们能更轻松地接触计算机。然而，他们需要熟练掌握至少一门编程语言（FORTRAN 是当前用来进行科学计算的首选语言），还需要一个操作系统（当前通用的系统是 UNIX）。此外，若熟悉一些基本的数值方法那就更好了。而这些必备技能的融合是很难实现的，很少有学生能够掌握所有的这些技能。从教授这一门课程的经验来看，将海洋数值模型与一些海洋动力学以及数值方法一起教授比较好，这一理念塑造了本书的内容。虽然已经具有很好的处理海洋动力学和数值方法的书籍，我们还是努力编写了本书——为了缓解参考的压力和避免被控诉，本书包括以下内容：①为试图在计

算机上进行模拟的读者提供动力学的基本却较实用的知识；②不同方程和数值分析的数值解法中的一些基本概念；③海洋数值模型。然而，与次网络尺度过程相关的话题如海洋混合和建模混合层以及耦合的物理—化学—生物系统等已经分别包含在《地球物理流中的小规模过程》一书中。我们希望这两本书能够为本课题提供有用的参考。

对这样一个庞大的课题，要对其每一子课题都深入透彻的理解是不现实的，因为要做到这点，就需要对每一子课题本身进行深入描述的完整书籍。然而，我们已经设法提供关于这些与海洋模型有很大关联的课题的一些基础资料。当然，现代的参考资料让学生能够在很大深度上去详细考察一个特定的课题。写这本书的目的是使进入这一领域的新人能够轻松地学习这个课题，不过前提是他们具备必要的数学和物理学的知识以及一定的计算技能，并介绍一些当前的研究课题，而不用他们亲自去做一次广泛的文献调查。我们希望本书至少能够吸引并鼓励世界范围内的一些年轻人去从事环境科学与工程方面的职业，从而为更好地理解我们的环境和改善广大民众的生活环境方面做出贡献，在 21 世纪，变幻莫测的大自然将更大程度上影响我们的食物来源。

最好使用现代多媒体手段教授本学科。因为海洋数值模型与其他计算科学一样，仅仅从书本上去学习远远不够，无论所用的书本有多好。此外，它要求动手实践。因此我们希望提供本书的电子版，除了常规的硬拷贝格式外，我们还希望为学生提供电子版的源代码、数据库、彩图、动画包以及运行实例，从而让学生能够更具交互性地使用相关资料。每个章节尽可能地提供一些项目式的练习，目的在于改善学生的技能和理解力。阅读有关近岸海浪的文献与实际观察它们的传播，观察由相关参数振荡所带来的变化是两件完全不同的事。希望这些电子版的资料能够使这些枯燥、困难而且曾经也确实挫败了不少才华横溢的年轻人的课题变得更加易学且“有趣”。

Lakshmi H. Kantha
University of Colorado
Boulder, Colorado
kantha@colorado.edu

Carol Anne Clayson
Purdue University
West Lafayette, Indiana
clayson@purdue.edu

前 言

本书的主题是海洋和海洋过程的数值模型，也就是计算海洋动力学。尽管重点是海洋，我们也考虑了海冰和大气，因为它们与该主题有着本质联系。我们主要关注以下物理过程：大尺度环流和密度结构。《地球物理流中的小规模过程》一书对化学和生物过程的模拟进行了简要介绍，其中主要论述了与海洋中的垂直混合及运输有关的小尺度过程。

海洋建模和海洋状态的估计与理解、预测长期的天气和气候的关系日益紧密。厄尔尼诺现象，澳大利亚季风和年代间变化是三个很好的例子。海洋环流及其结构的真实模拟对渔业管理、污染控制以及许多其他海军作业等应用同样重要。本书的目的是提供与海洋建模和相关主题有关的坚实背景，虽然开始的模型比较简单，但最终将描述综合数据同化及最先进的海洋数值模型。

很显然，一个海洋模拟人员首先必须理解他试图用数字计算机要模拟的东西。因此，第1章将介绍海洋动力学的入门知识，这是海洋数值模型这一三脚椅的第一只脚。该主题包含广泛的循环特性，比如流域尺度的风力环流，Ekman层，与地形、锋面、中尺度可变性以及温盐环流有关的正、斜压流。用一种准解析的方法对待这些主题，因为海洋动力学的坚实知识基础及基本概念对一个海洋建模人员来说是必不可少的，已经具备这些知识的读者可以略读或跳过本章。第2章主要解决这张椅子的第二只脚：数值方法，熟悉数值技术是进行海洋建模的另一先决条件。本章的课题包含不同原方程和偏微分方程的显示和隐式解法，定常问题和时间依赖问题，数值化方法的稳定性，空间离散化和时间离散化。本章同时给出了不少例子，从简单的惯性振荡问题到麻省理工学院近期研究得出的最先进的非静力模型。

接下来继续解决椅子的第三只脚，即海洋数值模型本身。第3章~第5章分别是热带地区、中纬度地区和高纬度地区的海洋过程以及模拟这些过程的一些简单的数值模型。这种用纬度带的方式来划分以考虑海洋过程并对其进行数值模拟是一种很有效的方式，第3章描述了赤道波导的调整过程以及对其进行模拟的简单减重力模型。第4章描述中纬度过程，比如Rossby波、斜压不稳定和适合模拟中纬度动力学的准地转模型。第5章检测了高纬度海洋中的海冰的作用并描述了怎样模拟海冰覆盖范围。第6章是潮汐和潮汐模型，这一主题传统上是极重要的河流和河床水流动力学以及模型，但是它对于边缘海和大洋海盆的模拟也越来越重要。最后，第7章研究了海岸动力学和海岸海洋的简单的正压模型。

第8章~第9章的3个模型分别描述了用于求解控制海洋环流过程的基本方程的方法，它们是不同的垂直离散化方法。第8章描述了称为sigma坐标的地形追踪垂直坐标所构成的模型，该模型模仿了一个类似的大气模型(Phillips, 1957)。开发sigma

坐标模型的目的是进行陆架环流和河口环流的相关应用，这里通过使用局部深度和垂直方向的等级数对垂直距离 z 进行正则化后，在所有格网点处是相同的，它与局部的水柱深度无关，因此，浅海大陆架和深海区域的求解都不需要过多的垂直等级数，而且海底的运动边界条件的正确性可以得到满足。在地形梯度大的区域，用动量方程计算水平压力梯度时，模型具有承受一定截断误差的潜力（Haney, 1991；McCalpin, 1994；Mellor 等, 1994）。第 9 章所研究的传统 z 坐标系统中构建的模型虽然不受这个问题的困扰，却要受到海底深度“梯度”离散化的影响，因此也会受到不精确的底部动力学边界条件的影响，这反过来又会导致局部垂直速度过大（Gerdes, 1993）。不同格网点处的等级数是不同的，这与局部深度有关。只有上层中的垂直分辨率很高时，浅海大陆架区域才能够被恰当地进行模拟。在将 z 坐标系中建立的模型应用到大洋海盆中时，习惯上忽略围绕在它们边缘的浅海大陆架区域。

第 10 章中的海洋大气耦合模型适合于对海洋大气耦合系统的长期状态的模拟。本书没有对物理—生物耦合模型进行考虑，不过在《地球物理流中的小规模过程》一书中涉及了对它的讨论。

我们已尽可能地在本书中介绍了一些基本（但是重要）的概念以及与各课题有关的先进材料，由于科学发展突飞猛进，后者也许容易受到新知识的影响，而前者却在定义上是相对不变的，可以沿用下去。最近提供的参考资料应该能使读者在需要的情况下进一步深入研究某一特定的课题，比较适合于研究生。然而，本书也适合于熟悉流体流动的读者。本书对于教授海洋模型方面的综合性两学期制研究生课程特别有用，尽管其中一些精选的课题仅用一个学期就可以教完。

编者

免 责 声 明

在法律允许范围内，出版者和版权所有权者均不对因书中出现的看法、指示、进程、产品或方式等任何事实存在或可能存在的中伤言论，对知识产权、私人权利或产品信誉的侵权等行为无意中对人或事造成的伤害负有责任。

目 录

序一

序二

前言

第 1 章 海洋动力学	1
1.1 海洋模型的类型、优点和局限性	10
1.2 近期的例子	14
1.3 控制方程	19
1.4 涡度守恒	29
1.5 海洋运动的无量纲量和无量纲尺度	30
1.6 地转流和热成风	36
1.7 内部运动	37
1.8 Ekman 层	38
1.9 Sverdrup 传输	44
1.10 西向边界强化 (STOMMEL 解)	47
1.11 环流尺度的环流 (Munk 解)	50
1.12 地形之上的正压流	56
1.13 地形上的斜压传输	57
1.14 沿岸上升流和锋面	59
1.15 中尺度涡流及其变化	62
1.16 温盐环流和区块 (水库) 模型	68
1.17 数值模型	75
第 2 章 数值解法	78
2.1 基本条件	79
2.2 常微分方程	84
2.3 偏微分方程	87
2.4 椭圆方程和稳定状态问题	93
2.5 时间依赖问题	103
2.6 有限差分 (格网点) 方法	114
2.7 频谱算法 (频谱变换)	130
2.8 有限元法	133
2.9 亚格子尺度参数化过程	137
2.10 侧向边界条件	138
2.11 计算问题	142

2.12	实例	143
第3章	赤道动力学与减重力模型解决方案	151
3.1	海洋对强迫的动态响应	151
3.2	控制方程	154
3.3	赤道波	158
3.4	赤道潮流	165
3.5	赤道过程的低重力场模型	167
第4章	中纬度动力学和准地转模型	176
4.1	线性运动	176
4.2	连续分层	186
4.3	地转适应和不稳定性	188
4.4	起转	195
4.5	准地转模型	197
第5章	高纬度动力学与海—冰模型	202
5.1	冰盖的显著特征	202
5.2	海冰的动量方程	206
5.3	海冰的本构法则（海冰流变）	207
5.4	海冰的连续性方程	214
5.5	风暴通道的海冰响应	215
5.6	数值	216
第6章	潮汐和潮汐建模	223
6.1	潮汐的描述	225
6.2	潮汐势公式	231
6.3	主体、负荷、大气和辐射的潮汐	239
6.4	潮汐动力学理论：拉普拉斯潮汐方程	248
6.5	潮汐的平衡理论	252
6.6	潮汐分析——正交潮	253
6.7	潮汐流	257
6.8	全球潮汐模型	260
6.9	区域潮汐模型	267
6.10	地球物理意义	268
6.11	地球自转的变化	282
6.12	斜压（内部）潮汐	289
6.13	长期潮汐	295
6.14	浅水潮汐和残余电流	299
6.15	小结	301
第7章	海岸动力学和正压模型	303
7.1	风能和浮力驱动涌流	304

7.2	潮汐运动	306
7.3	大陆架波	306
7.4	正压模式	314
第 8 章	σ 坐标区域和沿海模型	322
8.1	介绍	322
8.2	控制方程	327
8.3	垂直混合	331
8.4	边界条件	332
8.5	模分裂	333
8.6	数值	335
8.7	数值问题	342
8.8	应用	344
8.9	代码结构	347
第 9 章	多级盆地规模和全球模型	351
9.1	简介	351
9.2	控制方程	352
9.3	等密面扩散	358
9.4	体系结构和其他模型特性	361
9.5	应用	362
9.6	混合的 s 坐标模型	365
9.7	区域 z 级模型	370
第 10 章	海气耦合模型	371
10.1	耦合海洋和大气层	373
10.2	海气耦合一般环流模型	376
10.3	区域海洋耦合模型	383
附录		388
附录一	状态方程	388
附录二	单位和常量	391
参考文献		400

第1章 海洋动力学

海洋学是一个相对较新的领域，从发展至今不到 100 年的时间。直到 20 世纪 40 年代才有了一些重大发现，例如大西洋西边界流中墨西哥湾流和日本暖流加剧的原因、低频率的声能量可以传输上千公里而衰减很小的一个深海声道的存在。即使在今天，关于全球海洋环流的知识仍然粗略而充满漏洞。然而，由于海洋在影响人类的各种问题中（如气候问题）起着核心的作用，这种情形在迅速地改变着。卫星遥感（包括卫星测高仪、红外传感器、微波传感器以及海洋水色传感器等）、长期的遥测数据、高持久度漂流船和滑翔机以及小型的水下自动机器人等都在迅速地改变着我们对全球海洋的观察和监测。相比之下，海洋数值模型就更为年轻，第一个综合的世界斜压海洋数值模型在 60 年代晚期才由 Krik Bryan (Bryan, 1969) 构造得出。然而，高性能计算机的出现使该领域得到显著发展，尤其是最近 10 年以来。

由于水的高比热容（上层的 2.5m 海域与整个对流层是相等的）以及海洋的巨大范围（覆盖了地球表面 70%），海洋扮演着热量调节器的角色并使地球的天气长期保持适中。海洋还是巨大的 CO_2 储藏所（它所容纳的 CO_2 是大气中的 60 倍），而且海洋记忆力极好（大约上千年）——因为深海区域存在了很长时间。因此在不同时间尺度上，海洋在决定地球的气候状况中起着至关重要的作用，历史上地球气候的显著变化被认为与全球子午线温盐环流的分布有关。在年时间尺度上，与耦合的大气海洋系统（主要在热带太平洋）有着固有关系的名厄尔尼诺—南方振荡现象（ENSO）引起了全球范围内降水格局的大范围分布，对海洋进行更好的理解也因为其他原因如各个国家的灾害预防和商业需求而变得重要。海洋还是蛋白质的重要来源，对它们的生物特性如初级生产力等进行更好的理解对于保持渔业捕捞中的限度是非常必要的，同时对于海洋生物资源的妥善管理也很重要。在 21 世纪，海洋也许还能提供一部分能量和矿物。

然而，通常情况下海洋学比较缺乏数据，甚至到目前为止，南半球还存在着许多区域没有进行过任何海洋特性的现场测量。因为传感器的支柱力量电磁波并不能完全穿透大气或者传播至深海区域，用遥感探测海洋内部存在困难。最强的穿透波段为光谱的蓝—绿可见光范围，然而它在最清澈的水中最大传播距离也只有 100m 左右。只有低频率的声能量才能够传输很远的距离并且几乎无衰减，由于深度水域中存在最小声音传播速度，声能量在波导中进行传播，其传播距离能够达到上千公里。这使得用声音进行遥测成为可能，比如可用声层析成像法进行遥测。只有在过去的 10 年左右的时间里，卫星所携带的传感器比如红外线辐射计、微波成像仪以及测高仪才开始填补着数据的空缺，尤其是对南半球海洋的探测。由于海洋的现场测量数据收集极其昂贵，并且卫星携带的传感器所提供的大部分信息基本上只是海洋近表面层的，通常认为海洋模型是理解海洋运作方式的核心内容。

希望与少数现场测量数据和相对丰富的遥感数据相结合的综合海洋模型能够提供一种对海洋进行学习和监测的最好方式，这说明了海洋模型的重要性及其承诺。为了估计海洋的未来状态，即为了达到预测的目的，海洋数值模型是不可或缺的。

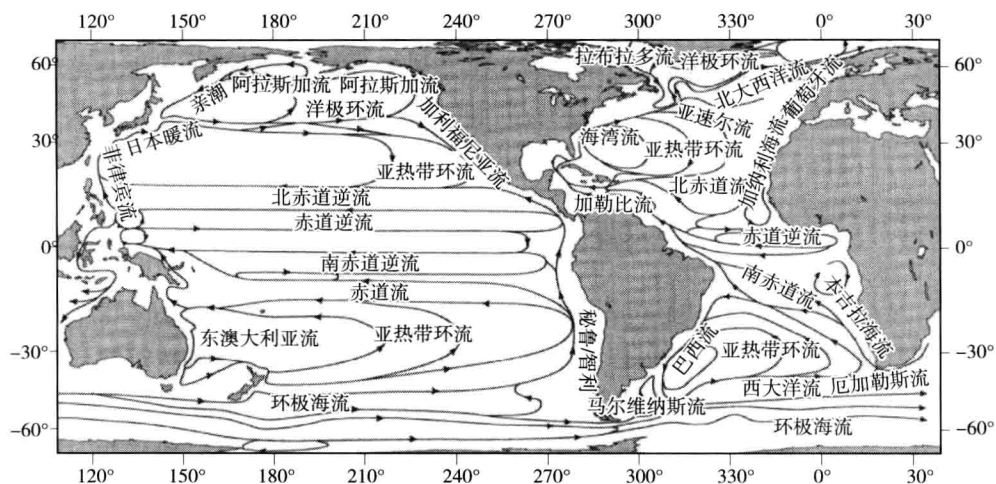
海洋中的运动是很复杂的，它具有广泛的空间和时间尺度范围。对于一个海洋建模人员来说，理解模型所代表或决定的是什么尺度以及参数化的是什么尺度是很重要的，更重要的是要明白什么尺度是不合适的。表 1.5.1（同时见图 1.5.1）列出了很多有意思的海洋过程（为了完整性，包含了大气过程）和它们所对应的时间尺度与长度尺度，以及与它们有关的中纬度处的罗斯贝数。在用数字计算机对海洋及海洋过程进行模拟之前，很好地理解他所要模拟的海洋的广泛特征是必不可少的，其中主要根据观察和分析手段所获得的知识。

海洋环流是构成海洋洋盆的水团的密度结构、表面辐射通量、海洋表面的外力（由上方大气层引起的风应力和浮力通量，以及一定程度上由月球和太阳引起的潮汐力）的复杂函数。表面外力包括许多的时间尺度（从小时到数十年甚至更长时间）和空间尺度（从与大气锋前相关的公里尺度到流域尺度）。海洋对大气外力的响应方式极其复杂，时至今日，对全部外力的响应细节甚至响应特性都没有能够被很好地理解，因为尚不存在对所有外力范围内的观察。要理解海洋对这种外力的响应，必然包括海洋运动的控制动力学方程，以及简单的概念数值模型或复杂的数值模型，这属于动力海洋学领域，对于相关的一些主题读者可以参考 Gill（1982）、Pond 和 Pickard（1989）、Cushman - Roisin（1994）以及 Mellor（1996a）。然而，由于海洋及海洋过程的数值模型要求，至少要对海洋动力学的突出方面有一个确切了解，因此我们在本章对其进行了简要概述。

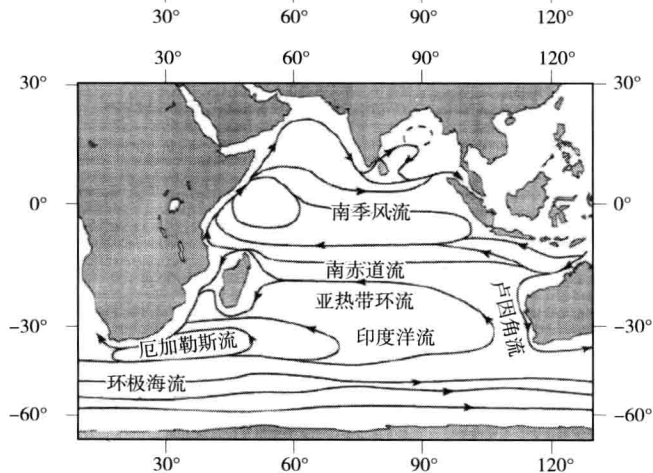
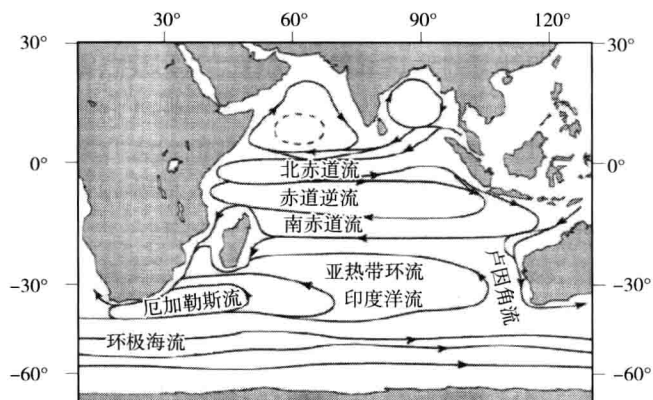
20 世纪，人们已经煞费苦心地用现场测量数据逐步建立了海洋的大致结构和海洋环流的广泛特征，这些广泛特征的描述属于描述性物理海洋学的范畴，关于海洋结构和海洋环流的知识读者可参考 Pickard 和 Emery（1982），Dietrich 等（1980），Tomczak 和 Godfrey（1994）。Schmitz（1996a, b）一书对海洋洋盆和洋盆间的大尺度环流的许多引人注目的特征进行了深刻的描述。然而该主题内容太过广泛，下文中只对其进行概述而不对主题进行太多详细证明。

过去的 20 年中，一些学者的书籍所给出的详细分析推进了我们对海洋结构和海洋环流的认识，比如 Joe Reid 和他的同事（Reid, 1981；Lynn 和 Reid, 1968；Mantyla 和 Reid, 1983）以及收集了过去一个世纪的水文资料（从国家海洋数据中心获得）的 Schmitz（1996a, b）。Syd Levitus 和他的同事（Levitus, 1982；Levitus 和 Boyer, 1994；Levitus 等, 1994）出版了一本全球海洋的温度、盐度和氧含量等水团特性的地图集，采用了气象学中的时间尺度，在国家海洋数据中心有它的电子版和图集版。借助以上资料，读者能够了解最新的海洋特性分部信息。同时，表面外力已被 Hellerman 和 Rosenstein（1983）用船上海洋表面的观察推导出，它是 Woodruff 等（1987）构建海洋大气数据集这项工作的一部分。这些分析的电子版是可用的，它们以月时间尺度很好地提供了强加给海洋的表面外力。

我们将在本书的后面章节考虑这些问题，不过现在先呈现大西洋、太平洋和印度洋这 3 个主要海洋洋盆平均表面环流图（图 1.1.1）。它们说明了海洋的广泛特征——比如深海



(a)



(b)

图 1.1.1 大洋的平均表面环流图

(a) 大西洋和太平洋; (b) 印度洋

平原、浅海大陆架、大洋中脊、群岛、狭窄通道和海峡——以及它们的环流——比如剧烈的西边界流、跨洋盆的广泛环流、赤道流系，以及与多个流域相连接的南极绕极流。海洋数值模型的任务是尽可能真实地在不同的空间和时间尺度上将这些环流特征及其变化进行再现。

显著特征

就其形状和范围来说，全球海洋的物理特征是由使大陆漂移的构造力决定的，这种构造力创造海洋地壳的同时也使其不断被消耗。构造运动是由地球上地幔内部热量驱动的对流引起，其传输深度被认为能达到 1000km。地幔对流造成大陆（岩石圈）板块的缓慢漂移（平均每年大约几厘米），它们就好像浮在地球的上地幔顶端一样，对流还引起大洋中脊处海洋地壳的形成以及由于俯冲造成的大洋海沟处海洋地壳的消耗。此外，地幔热点还会引起群岛的形成，如夏威夷群岛，因此，俯冲板块边缘的海沟比如西太平洋的马里亚纳海沟是全球海洋中最深的点。大洋中脊、群岛、淹没的平顶海山以及海底山等是深海区域中的最浅特征，它们在海洋动力学中扮演着重要角色。尤其是点缀着西太平洋的成千上万的海底山，在潮汐混合和海洋环流的其他方面起着非常重要的作用。大洋中脊和其他许多地形特征对于流域环流很重要，因此必不可少地要将它们包含在数值模型中。而深海沟所起的作用却是很微小的，由于考虑效率和经济的缘故，大多数海洋环流模型限制了模型的深度（假的海底），粗略地等于深海的海底深度，约 5000m。

洋盆的边缘被较浅的大陆架所包围，深度不到 200m，其范围从几公里至上百公里。这些大陆架被认为与沉积地质过程有关，比如在上次冰河时代盛行的那些沉积过程，当时的海平面比当前的海平面低了 125m。由于包含深度较浅的区域，大陆架上的环流受到风和潮汐的强烈影响，而在深海洋盆的环流中，密度梯度和风起着重要作用。由于大陆架和洋盆的动力学不同，通常对它们进行分开学习和模拟，同时利用不同种类的模型。从大陆架到深海海域的过度是很突然的，因此这些大陆坡区域是非常窄的，其宽度仅有几十公里。因为目前所有海洋模型在处理很大的地形变化时都存在困难（由于当今计算机所能达到的分辨率不够高），对大陆坡区域的模拟是最困难的。而它们在碳氢化合物的提取中起着越来越重要的作用，似乎不断增长的人口对碳氢化合物的需求永远无法满足。

洋盆的形状及其深度分布是其本身环流的重要因素。由此看来，相对窄而年轻的大西洋洋盆与宽阔的太平洋洋盆形成强烈对比。构造运动还在不断地使大西洋变宽、太平洋变窄。极少数地质活动对海洋的一个动力学重要性是海地地震及其衰退产生毁灭性海啸，另一个是洋中扩张中心的火山喷发口，其影响范围可从脊顶延伸至很远的距离。然而，只有在上百万年时间尺度上洋盆的形状及位置才会发生显著变化，因而对古海洋学来说具有重要意义。对古代海洋环流的模拟是一种挑战，同时也很吸引人。在过去的几百万年时间里，由于地幔对流模式的两次改变，大陆块体交替地相互接近或者远离，这对于所产生的环流影响深远。比如，各大陆的聚集似乎使全日潮增强，而当前的分布选择性地增强了半日潮。

南极次大陆周围的南大洋使 3 个主要的洋盆在南半球两两之间相互连接，而在北半