



全球变化与地球系统科学系列

Series in Global Change and Earth System Science

大洋环流

风生与热盐过程

OCEAN CIRCULATION

Wind-Driven and Thermohaline Processes

黄瑞新 著

乐肯堂 史久新 译



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS



全球变化与地球系统科学系列
Series in Global Change and Earth System Science

大洋环流

风生与热盐过程

OCEAN CIRCULATION

Wind-Driven and Thermohaline Processes

黄瑞新 著

乐肯堂 史久新 译

DAYANG HUANLIU



高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

内容简介

大洋环流是地球上能量和物质输送的基本过程之一，大洋环流与气候变化之间的相互作用已经成为地球科学中最活跃的研究前沿领域之一。本书是关于大洋环流动力学和热力学的简明导引，其中包括：海水热力学和海洋环流能量学、风生环流理论、热盐环流（包含水团形成/销蚀、深层环流和水循环）以及风生环流与热盐环流的相互作用。

目前已经有多部关于风生大洋环流的著作问世，但涉及热盐环流及其能量学的著作甚为罕见。在关于大尺度海洋环流的论著中，本书是第一本涵盖这两个重要方面的专著。

本书提供了丰富的插图，可以帮助读者更加直观地理解书中所阐述的物理原理。本书适于大洋环流研究以及海-气相互作用研究的人员阅读使用，也可作为海洋学家和其他地球科学家学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

大洋环流:风生与热盐过程/黄瑞新著;乐肯堂, 史久新译. —北京:高等教育出版社, 2012.10

ISBN 978 - 7 - 04 - 034656 - 5

I . ①大… II . ①黄…②乐…③史… III . ①大洋环流 - 研究生 - 教材 IV . ①P731.27

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 088102 号

策划编辑 柳丽丽	责任编辑 柳丽丽	封面设计 张楠	版式设计 王艳红
插图绘制 尹莉	责任校对 杨雪莲	责任印制 朱学忠	

出版发行	高等教育出版社	咨询电话	400-810-0598
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	网 址	http://www.hep.edu.cn
邮政编码	100120		http://www.hep.com.cn
印 刷	涿州市星河印刷有限公司	网上订购	http://www.landaco.com
开 本	787mm × 1092mm 1/16		http://www.landaco.com.cn
印 张	39.75		
字 数	1000 千字	版 次	2012 年 10 月第 1 版
插 页	10	印 次	2012 年 10 月第 1 次印刷
购书热线	010-58581118	定 价	139.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题，请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物 料 号 34656-00

为黄瑞新博士《大洋环流》一书的 中文版写几句话

黄瑞新博士和我是至交了,我们相识于 20 世纪 70 年代,那时我们都在中国科学院工作,但在不同的研究所从事不同的专业研究。在那个特殊的年代,闲暇时我们就讨论地球流体力学的问题,并合作写了两篇论文。后来他去了美国改学物理海洋专业,并在这一领域中一直工作至今。黄瑞新在中国科技大学读书时,学的不是地球物理专业也不是流体力学专业。初看起来这是弊,因改学物理海洋专业需要补修一些基础课,但这也是很大的利,至少受气象学和海洋学教育中很多传统框框的约束较少,因此他经常会对某些问题提出自己的见解,这个利反映在他后来从事物理海洋学研究中,也在这本书中得到了体现。

很高兴为黄瑞新这本《大洋环流》的中文版写几句话。由于我主要从事大气物理学研究,不是物理海洋学的研究,因此有可能写了些外行话甚至错话,希望不会误导读者特别是年轻读者。

能量及能量的生成方式是大气和海洋运动的源及需要研究的基本问题。大气运动的驱动过程比较简单,在辐射和热量(包括水分)平衡下,它的基本气候态是下层温度高,上层温度低,它是一部典型热机,它的能量生成和转换方式至少在理论上是我们熟知的。海洋不同,一方面有来自海洋表面风应力的机械能,由此搅拌出混合层,由混合层的埃克曼泵吸驱动出海洋上层的风吹洋流,由于上层温度呈跃层分布,也可把上层的风吹洋流称为风生温跃层环流,另一方面还有深层的热盐环流。洋流的这种驱动方式造成与大气不同的气候态。它的温度分布是上层热,下层冷,它不是一部典型的热机,它的能量生成方式要复杂得多。

经典的 Sandstrom 定理指出,“定常的海洋环流只有在热源位于冷源之下才有可能”,因此除由风应力直接驱动的表层流外,在海洋内部(即使在上层)要形成洋流,也需对 Sandstrom 定理的约束条件做某些更改或补充。海洋学大师 Stommel 在 20 世纪 40 年代末就提出副热带西边界洋流强化理论,并在 60 年代初用两个盒子的概念性模型,讨论了温度和密度的多种交换方式是如何形成不同平衡态的温盐环流的。黄瑞新是十分重视物理的,他扩展了 Stommel 的盒子模型,提出热盐环流形成的新的约束条件,进而和王伟博士做了一个更接近实际的热源强迫实验。结果表明,在热源不同的分布下可引导出各种环流形态,这无疑是对 Sandstrom 定理的补充和发展,这是其他海洋环流书中没有的。黄瑞新在本书第 3 章中全面平衡地介绍和评论了其他各种补充方法和理论,对包括机械能在内的各种能量平衡进行了讨论,并对海洋环流模式的改进提出了积极的建议。

这一章(第 3 章)是迄今对海洋能量生成写得最为全面和清楚的。但在该书中黄瑞新把这一章放到书的第一部分,即导论部分,这一编排方法,表明作者把能量和能量生成放到海洋环流最基础的视角来考虑,这是独特的写法。

本书的核心部分并和书名匹配的是第二部分的第4章——风生环流(或称风驱动温跃层环流),实际上这一章也可独立成书。该章以早期风驱动下西边界洋流强化的 Stommel 边界层、Munk 边界层湍流作用模式和 Charney 的惯性理论为基础,对 20 世纪 80 年代以来的分层模式的结构和结果做了详尽的介绍,并和同事们应用两层模式发展了 Charney 的匀质流体副热带西边界流的强化理论,分析了解的存在区域和条件。书中也对赤道潜流的惯性理论做了分析,因此,这一章对大洋环流理论的介绍和讨论在海域上也是全面的。

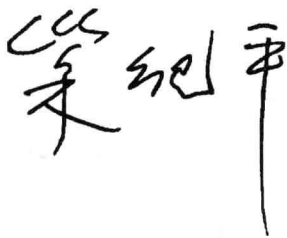
温跃层的存在是上层海洋特有的现象,在温度和密度连续分布条件下,它的控制方程早在 1959 年就由 Welander 建立了,由于是二阶非线性偏微分方程,且边界条件难以确定,故虽然有了一些诸如相似解等,但较为严谨的确解,则是在 40 年后由黄瑞新发现的。这不仅是对物理海洋学理论研究的一个贡献,它的重要性还在于解的结果与分层模式解十分接近,这意味着分层模式解的结果基本可信。在实际应用中,大洋环流模式是分层的,用于研究气候变化与大气模式耦合的海洋模式自然也是分层的,因此更广义地说,这个工作为地球模拟器的发展提供了理论基础。

大气中热带和副热带之间环流和信号的传输,分别藉哈德利环流和罗斯贝波的经向传播来实现,但后者有如何克服热带东风带阻碍的问题。在海洋学研究中,黄瑞新等提出内部信息窗的概念,这是值得气象学家借鉴的。

黄瑞新把本书定位在研究生的教科书,这个定位在我看来窄了些。因为它是近代物理海洋学理论研究的总结,对从事物理海洋学研究甚至动力气象学研究的学者都是一本难寻的参考书。

黄瑞新对科学问题常有自己的见解,容易引发争议,科学是在不断争鸣中发展的,连微积分的创始人都有两位。中国是文明古国,春秋时期就有被称为“诸子百家”的不同学术派别,“百家争鸣”也曾作为促进科学进步的方针,几十年前曾把百家争鸣定为科学发展的国策,它带来过科学发展的春天!

借这几句话,庆贺黄瑞新在物理海洋学理论研究中取得的成就,也盼望此书中文版的问世,能给中国物理海洋学的理论研究吹来更多春天的气息!



2012 年 2 月 9 日

译者前言

近 20 年来,气候和全球环境变化的成因、规律及其与地球系统的各个分支(特别是海洋分支)之间的关系问题已经受到世界各国相关科学家的高度重视。实际上,海洋过程对气候变化的响应与反馈是海-气耦合系统中不可或缺的两个环节。通过近 20 年的努力,气象学家们已越来越重视海洋环流在全球气候变化中的作用。这是因为热盐环流(尤其是西边界流)的稳定性、变异及其与之相联系的向极热量和淡水的输送可以对局地或全球气候变化产生明显影响。

大洋环流是地球上能量与物质输送的基本过程之一。近年来,大洋环流与气候变化之间的相互作用已经成为地球科学中最活跃的研究前沿领域之一。大洋环流及其所遵循的地球物理流体动力学原理是在地球科学的海洋科学和大气科学等学科中属于研究生阶段的基础课程。大洋环流可由多种因子来驱动和调节,其中包括它与大气的相互作用(海气界面上的风、热流和淡水流),潮汐耗散以及海洋要素(温度、盐度和随之而产生的密度)的区域差异。目前已经有多部关于风生大洋环流的著作问世,但鲜有从气候变化的视角来探讨大洋环流及其理论的书籍。

本书是一本关于大洋环流的理论著作,与 Pedlosky (1996) 的 *Ocean Circulation Theory* (中译本:《大洋环流理论》,吴德星、陈学恩译)相比较,本书有如下特点:

(1) 本书从全球气候变化的高度较全面地考察了大洋环流及其变化(时间尺度从年际到千年际)发展的理论,因此在选材上,本书不是仅就大洋环流中的若干论题进行论述,而是尽可能概括了大洋环流理论的最新发展及其前沿领域。

(2) 本书系统地论述了大洋环流的动力学理论及其发展。不仅以约化重力模式为基点由简单到复杂建立起一套风生环流理论,而且首次详尽地阐述了大洋环流的热力学、能量学和热盐环流理论。

(3) 本书为读者提供了一个大洋环流的理论框架,书中着重强调物理概念及其图像的清晰性与连续性,因此,在本书中除了用尽可能简单的数学模式来论证基本原理外,还引用了大量的现场观测与实验数据和数值实验结果作为例子来说明所论述的基本原理。

(4) 尽管本书是在研究生课程基础上写成的,但由于作者注意收集许多历史资料,并且所引述的文献不仅包括了大量的经典文献,而且包含了 21 世纪最初十年发表的研究前沿的文献,故本书对于研究人员也是一本重要的参考书。

尽管本书主要论述大洋环流的动力学、热力学和能量学问题,但叙述风格侧重于对相关理论的发展及其前沿问题的思考,故本书不仅对于我国开展大洋环流及其与气候变化相互作用的研究是一本很好的参考书,而且对于边缘海与浅海环流的研究者也会有所裨益。

本书侧重于近 20 年来大洋环流理论发展的前沿问题,书中涉及不少需要拟定译名的新术语,其中有些术语即使在英语文献中也是新近才出现的,因此,这些术语的译名使译者颇费思量。感谢作者在这方面提供了许多建设性的建议,使译者在译文中得以避免不少理解上的偏差。

在中译本中,首先对英文版中已发现的错漏之处进行了较为全面的校订(所校订之处均已得到作者的首肯),从而使译本在质量上较英文原著有显著改进。其次,在中译本中还增加了注释。译者所加的注释除了指出校改之处外,主要是补充了一些背景材料,同时,也表达了译者对有关问题的观点。译者希望这些注释对于读者进一步理解本书的内容能有所助益。另外需要说明的是,本书中的物理量符号和数学符号非常多,为保证与英文版一致,译者在翻译时,尽量尊重英文原著的表达方式,只进行了少量调整。

此中译本能按合同要求顺利付梓出版,首先要感谢作者的具体支持,其次还要感谢乐茜和王红认真录入修改稿与英汉译名对照表,感谢孙永明和程瑶瑶协助处理插图和公式,此外,还要感谢我们的家人对本书翻译工作的全力支持。

本书由史久新译出初稿,乐肯堂对初稿进行校改并加上注释,形成修改稿,作者黄瑞新对修改稿提供了重要的修订意见和订正,最后由乐肯堂进行统筹修订、润色并定稿。尽管译者为提高译文质量做了诸多方面的努力,但疏漏及不妥之处仍在所难免,尚祈专家、读者不吝指正。

乐肯堂 史久新
2011年12月于青岛

中文版前言

人类和海洋有着千丝万缕的联系,探索海洋的秘密一直是人类梦寐以求的目标之一。物理海洋学是海洋科学的先头部队。所有的海汇成一个统一的世界大洋,所以大洋环流是研究海洋、气候和全球环境变化的关键现象之一。

国际上适合海洋动力学教学和研究的书籍一向不多,在国内更少。感谢乐肯堂和史久新先生把本书译成中文以飨国内读者。他们经过近一年的努力对英文原版进行了仔细的推敲,并在中文版中加上详细的注解和勘误。

由于历史的原因,过去很长时期内国内对大洋的探索、研究和开发都远远跟不上世界海洋强国的步伐。我非常高兴地看到,这种情况正在改变,现在有许多学者和青年学生致力于大洋环流的研究。我希望本书的出版能为正在推进中国物理海洋事业发展的朋友们提供某种帮助,更希望国内学者能跻身于世界海洋研究与开发的前沿。

黄瑞新

2011年8月于伍兹霍尔海洋研究所

英文版前言

随着科学和技术的巨大进展,人们对于包括大洋总环流在内的气候系统如何构建在我们的地球上,颇感兴趣。本书即是为那些希望了解大洋环流及其与地球环境和气候关系的广大读者而写的。

在为本书收集素材的过程中,我一直试图在大洋环流的基本物理概念、已建立的完善理论和该领域研究前沿的最新进展之间进行取舍,以求取得合理的平衡。正如书名所提示的,本书是一本关于大洋中的风生和热盐过程的著作。在过去的数十年间,尽管大洋总环流理论已经有了良好的发展,但是目前看来,我们对于总环流的理解,充其量只能说仅处于起步阶段。本书是作为研究生教材而撰写的,因此,我在书中着力于描述和解释环流的物理过程,而不是依靠复杂的数学推导。为便于读者理解,我加入了很多揭示物理过程的插图。

在本书的理论部分,我着重引入了关于大洋总环流能量学的新理论和新思想。尽管在任何动力系统中,能量学是其中的一个基本方面,但是在大洋总环流的研究中,能量学的重要性迄今仍未获得广泛关注。尽管现在我们认为机械能在调控海洋总环流中起着关键的作用,但实际上,在能量平衡中,特别是机械能平衡中的一些基本项,还没有得到可靠的估计。显然,在不久的将来,这一领域的许多知识将最有可能由现在的青年学生来充实,因为他们已经认识到,在大洋环流能量学的研究中,很多方面还是未知的或者仅得其皮毛。新理论的出现几乎是日新月异,这种情况颇像计算机工业,任何一款新产品的出现,等你买到手时就已经过时了。因此,在准备出版这样一本关于热盐环流及其能量学的书籍时,我可能遇到类似情况,收入本书中的理论可能很快就会过时,应该代之以不断产生的新理论。尽管如此,如果本书能够为正在探索大洋环流奥秘的青年学生提供学习基础,我将非常高兴。

本书阐述了我个人的许多观点。书中的许多地方,我已尽力拓宽思路;然而,就像此前已出版的多数书籍那样,在这一领域中本书所讨论的论题,在某种程度上属于个人观点。作为一本教材,我也收录了各方面的研究结果,其中有一些是非常基础的且为业内所熟知;然而,另一些内容对业内的大多数人而言可能有点新鲜。为稳妥和客观起见,我并没有把本书中的全部素材作为我个人的贡献。

为了展示大洋环流理论的发展过程,我不得不介绍这一领域里先辈提出的思想。其中的一些思想随着学科的发展进步已被证明是毫无价值的,甚至是错误的。介绍这些内容的目的是让青年读者了解先驱们所犯的错误,不致重蹈覆辙。

我本人的科学生涯漫长而曲折。年轻的时候,我享受单纯而快乐的学生生活,直到大学毕业。在求学期间,我从许多优秀的老师那里获益匪浅。他们教导我作为一个诚实的学生和未来的科学家,应该如何思考和如何工作。“文化大革命”使我损失了职业生涯中最为宝贵的10年时光。像许多年轻人那样,我在这段漫长的时间中忘掉了在学校中学会的一切,学术上一事

无成。

在此之后,我的生活进入了一条完全不同的轨道。1978年,我实现了一个从前我连做梦都不敢想的目标,那一年我进入了中国科学院研究生院。在我的英文教师 Mary Van de Water 女士无私而不断地鼓励下,我在1980年作为一名研究生来到了美国。28年前,我进入了麻省理工学院和伍兹霍尔海洋研究所(MIT/WHOI),完成了海洋学联合教学计划的学业,并在毕业后开始了我的海洋学研究生涯。

当我作为一名初出茅庐的科学工作者回到伍兹霍尔海洋研究所时,我非常幸运地结识了 Hank Stommel 教授。科研阅历的天壤之别并没有妨碍我们成为挚友。五年多的时间里,我们每天都有交流,他个人对科学和生活的态度对我产生了深远的影响。最重要的是,我开始思考大洋环流的物理过程,而不再是数学和技术上的细节。遗憾的是他永远离开了我们,为表达我对 Hank 教授深深的怀念之情,谨以此书献给他。他对海洋学的影响以及他的个人魅力,我将铭记一生。

在学习期间和毕业后,我得到了 MIT/WHOI 许多老师的帮助。包括我的研究生导师 Glen Flierl、Mark Cane 和 Carl Wunsch。特别是,我以前的老师、现在的挚友 Joseph Pedlosky,他在过去的20年中给了我许多帮助和建议。

在本书的写作期间,我得到了许多好友和同事的大力协助,包括 Terry Joyce、Ray Schmidt、金相泽、王伟、刘秦玉、Ted Durland、甘子钧、管玉平、江华等。特别感谢 Joe Pedlosky 和贾复阅读了部分手稿并提出了建设性的意见; Bruce Warren 帮我绘制了深层水形成和深层环流部分的最新图件。我的许多学生读过我依照 MIT/WHOI 联合教学计划而开设的研究生课程“大洋环流理论”时所用的讲义,即本书的初稿。另外,在中国海洋大学、中国科学院南海海洋研究所以及其他一些中国的海洋研究所举办的讲习班上,这份讲义的许多内容我都讲授过,特别是中国海洋大学的学生陈儒和翟平通读了本书的最初手稿并指出了多处错误。在绘图方面,邹越滨给了我许多帮助。

最后,我要特别感谢我的第一任研究生导师巢纪平,他教会我作为一名科学家应该如何工作。我在美国读研究生的初期,还得到 Howard 和 Vivian Raskin 夫妇的鼓励。我的妻子邹绿苹不断督促我,没有她在精神上的支持,就不可能完成这本书的写作。

过去20年间,我的科学研究得到美国国家科学基金的大力支持。本书的写作得到范·阿兰·克拉克二世杰出海洋学讲座教授的资助。Barbara Gaffron 女士细心地审读了初稿并对文字加以润色。

黄瑞新

于伍兹霍尔海洋研究所

目 录

为黄瑞新博士《大洋环流》一书的中文版写几句话

译者前言

中文版前言

英文版前言

第一部分 导 论

第 1 章 世界大洋的描述	3	1.4.7 大洋环流的混合与能量学 ...	48
1.1 世界大洋的表层强迫力	3	第 2 章 动力学基础	51
1.1.1 表层的风强迫力	3	2.1 动力学和热力学定律	51
1.1.2 表层热盐强迫力	5	2.1.1 基本方程组	51
1.1.3 其他外部强迫力	13	2.1.2 整体特性	52
1.2 世界大洋的温度、盐度和		2.2 量纲分析和无量纲数	53
密度分布	14	2.2.1 物理海洋学中常用变量的	
1.2.1 表层温度、盐度和密度的		量纲	54
分布	14	2.2.2 量纲的齐次性	55
1.2.2 温度、盐度和密度的经向		2.2.3 无量纲参数	56
分布	22	2.2.4 应用量纲分析的若干例子 ...	56
1.2.3 南大洋的位温、盐度和密度		2.2.5 动力海洋学中若干重要的	
的分布	29	无量纲数	58
1.3 海洋运动的分类	31	2.3 热力学基本概念	59
1.3.1 引言	31	2.3.1 温度	59
1.3.2 两种类型的环流	33	2.3.2 能量	60
1.4 大洋环流理论述评	37	2.3.3 熵	61
1.4.1 引言	37	2.3.4 热力学第二定律	62
1.4.2 上层海洋的热力结构和		2.3.5 能量与熵	65
环流	38	2.4 海水的热力学	65
1.4.3 风生环流的早期理论	40	2.4.1 热力学的基本微分关系	65
1.4.4 正压环流的理论框架	42	2.4.2 海水热力学函数间的基本	
1.4.5 斜压风生环流理论	44	关系	68
1.4.6 热盐环流理论	46	2.4.3 密度、热膨胀系数和盐收缩	

系数	69	经典理论	102
2.4.4 比热容	70	2.9.2 非均匀垂向扩散系数下的 埃克曼螺旋	105
2.4.5 压缩性与绝热温度梯度	71	2.10 斯韦尔德鲁普关系、环岛 规则和 β 螺旋	107
2.4.6 绝热直减率	72	2.10.1 斯韦尔德鲁普关系	107
2.4.7 位温	73	2.10.2 环岛规则	108
2.4.8 位密	74	2.10.3 水平速度场的垂向结构	109
2.4.9 温压效应	76	第3章 海洋环流的能量学	116
2.4.10 混合增密	78	3.1 引言	116
2.4.11 中性面和中性密度	79	3.1.1 能量学视角下的海洋	116
2.4.12 涩性	79	3.1.2 大洋环流的不同理论 观点	116
2.4.13 静力稳定性与布伦特 - 维萨拉频率	80	3.2 桑德斯特伦定理	118
2.4.14 基于吉布斯函数的海水 热力学	81	3.2.1 作为热力学循环的海洋 环流	118
2.4.15 海水的熵	81	3.2.2 桑德斯特伦定理成立之 条件	121
2.4.16 内能、焓与自由焓的关系	83	3.2.3 检验桑德斯特伦定理的 实验室实验	123
2.5 海水状态方程	86	3.3 作为双组分混合物的海水	126
2.5.1 引言	86	3.3.1 随着质心运动的坐标系	126
2.5.2 简化的状态方程	86	3.3.2 盐度平衡的自然边界 条件	127
2.6 尺度分析与各种近似	88	3.3.3 含蒸发过程的一维模式	128
2.6.1 流体静压近似	88	3.4 质量、能量和熵平衡	129
2.6.2 传统近似	90	3.4.1 质量守恒	129
2.6.3 水平动量方程的尺度分析	91	3.4.2 动量守恒	129
2.6.4 地转性与热成风关系式	92	3.4.3 重力势能守恒	130
2.7 布西涅斯克近似与浮力通量	93	3.4.4 动能守恒	130
2.7.1 布西涅斯克近似	93	3.4.5 内能守恒	130
2.7.2 布西涅斯克近似带来的潜在 问题	95	3.4.6 熵平衡	131
2.7.3 浮力通量	96	3.5 世界大洋的能量方程	132
2.7.4 用浮力通量诊断大洋环流 能量之误区	97	3.5.1 海洋中特性量积分的三类 时间导数	132
2.7.5 含非线性状态方程的模式 之浮力平衡	97	3.5.2 广义莱布尼兹定理和广义 雷诺输送定理	134
2.8 各种垂向坐标	98	3.5.3 正压潮的能量学	134
2.8.1 垂向坐标变换	98		
2.8.2 海洋学中常用的垂向坐标	99		
2.9 埃克曼层	101		
2.9.1 自由海面下埃克曼层的			

3.5.4 海洋的能量方程	136	3.7.1 重力势能	159
3.5.5 能量积分方程的解读	138	3.7.2 可用势能	163
3.5.6 世界大洋的能量图解	140	3.7.3 模型大洋中重力势能的 平衡	174
3.6 海洋中的机械能平衡	142	3.7.4 环流调整中重力势能/可用 重力势能的平衡	181
3.6.1 世界大洋中机械能的 源/汇	142	3.8 海洋中的熵平衡	184
3.6.2 化学势能之源	155	3.8.1 淡水混合产生的熵	184
3.6.3 海洋中机械能平衡的一个 暂定示意图	155	3.8.2 世界大洋中的熵平衡	190
3.6.4 世界大洋能量学中剩余的 挑战性问题	156	附录:加热/冷却导致的重力势能 的源/汇	196
3.7 重力势能和可用势能	159		

第二部分 风生与热盐环流

第4章 风生环流	201	4.4.2 Fofonoff 解	293
4.1 简单分层模式	201	4.4.3 Veronis 模式	294
4.1.1 分层模式中的压强梯度 和连续方程	201	4.4.4 应用于回流区的位涡均 一化	296
4.1.2 约化重力模式	205	4.4.5 底压扭矩的作用	298
4.1.3 风生环流的物理过程	219	4.4.6 评述	299
4.1.4 Parsons 模式	224	4.5 把温跃层和热盐环流耦合 起来的分层模式	301
4.1.5 关于次表层运动的困惑	229	4.5.1 引言	301
4.1.6 位涡均一化理论	235	4.5.2 两层半模式	301
4.1.7 通风温跃层	240	4.6 赤道温跃层	303
4.1.8 多层惯性西边界流	255	4.6.1 引言	303
4.1.9 应用于世界大洋的温跃层 理论	261	4.6.2 赤道区外之解	306
4.2 连续层化温跃层模式	266	4.6.3 作为惯性边界流的赤道 潜流	308
4.2.1 含扩散过程的温跃层与 理想流体温跃层	266	4.6.4 太平洋中赤道潜流的非 对称性质	308
4.2.2 连续层化的模式	270	4.7 亚热带和热带间的桥接 窗口	315
4.3 亚极带流涡中的环流结构	280	4.7.1 引言	315
4.3.1 引言	280	4.7.2 亚热带与热带之间的内桥接 窗口	317
4.3.2 两层半模式	281	4.7.3 世界大洋的桥接窗口	322
4.3.3 连续层化模式	283		
4.4 回流区	291		
4.4.1 研究动机	291		

4.7.4 不同等密度面上的桥接和 路径	328	5.2.5 中等深度的环流	441
4.8 温跃层和海盆尺度环流的 调整	330	5.3 盐致环流	444
4.8.1 地转调整	330	5.3.1 水循环与向极热通量	444
4.8.2 海盆尺度的调整	337	5.3.2 海面盐度边界条件	458
4.9 由温跃层模式推断的气候 变异	343	5.3.3 蒸发和降水引起的盐致 环流	466
4.9.1 构建多层模式之公式	343	5.3.4 双扩散	476
4.9.2 连续层化模式	350	5.4 热盐环流理论	479
4.9.3 从资料和数值模式诊断 得出的气候之年代变率 ...	355	5.4.1 热盐环流的概念模式	479
4.10 区域性气候变异产生的 流涡之间的桥接	357	5.4.2 基于盒子模型的热盐 环流	485
4.10.1 引言	357	5.4.3 基于圆环模型的热盐 环流	500
4.10.2 构建模式的公式	358	5.4.4 二维热盐环流	504
第5章 热盐环流	364	5.4.5 三维海盆中的热力环流 ...	510
5.1 水团形成/销蚀	364	5.4.6 热盐环流——多态与 崩变	516
5.1.1 世界大洋深层水的源地 ...	364	5.4.7 热盐振荡	524
5.1.2 底层水/深层水的形成	369	5.5 风生环流与热盐环流之 联合	534
5.1.3 深层水的溢流	373	5.5.1 密跃层与热盐环流的尺度 分析	534
5.1.4 模态水的形成/销蚀	386	5.5.2 风生环流与深层环流的 相互作用	545
5.1.5 潜沉与潜涌	389	5.5.3 温跃层的全球调整	555
5.2 深层环流	409	5.5.4 混合层在调节经向质量/热量 通量中的动力作用	564
5.2.1 观测	409	附录:海洋感热通量的定义	571
5.2.2 简单的深层环流理论	413		
5.2.3 深层环流的广义理论	420		
5.2.4 混合加强后的深层环流 ...	433		
参考文献	574		
推荐阅读	594		
索引	596		
英汉译名对照表	611		
汉英人名对照表	620		

第一部分 导 论

第 1 章

世界大洋的描述

本书着重研究世界大洋中的大尺度环流。作为一个动力系统,世界大洋中的环流受到各种外强迫力的联合作用,其中包括风应力、通过海面和海底的热通量、表层淡水通量、引潮力和重力。此外,还应包括科氏力,这是因为我们所有的理论和模型都是建立在地球自转坐标系中的。在本章中,我们首先描述表层强迫力和海水物理特性的分布,然后讨论世界大洋中各种运动的分类,并简要评述大洋总环流理论的历史发展。

1.1 世界大洋的表层强迫力

在大洋的上表层中,驱动海洋的强迫力主要包括风应力、热通量和淡水通量。另外,引潮力作用于整个水体柱,地热通量和底摩擦力对于建立和调节海洋中的运动也有贡献。不过,表层强迫力才是海洋环流的基本作用力,这是本节讨论的核心。

1.1.1 表层的风强迫力

在作用于世界大洋上表层的强迫力中,风应力可能是最具决定性的。物理海洋学中通用的方法是把风的效应处理成作用于海洋上表层的一个表面应力。海面风应力通常是利用海面以上 10 m 高度处的地转风速 (geostrophic wind)^①通过块体公式 (bulk formula) 来计算的。然而,海-气界面实际上是大气边界层和海洋边界层之间的一个过渡带。最重要的是,海洋边界层是一个波动边界层,在这个边界层中,表面波和湍流在调节动量、热量、淡水和气体的垂向通量中起着非常重要的作用。因此,严格地说,所谓海面上的风应力应该是海洋上表层的波动边界层与该边界层之下海水之间的辐射应力^②。施加在下层水体上的风应力应该取决于大气和海洋边界层中的诸多动力特性,比如大气边界层的稳定性和上层海洋表面波的波龄。然而,本书中的讨论仍将沿

① 此处原著有误,确切地说,应为经高度校正后的实测风 (observed wind)。——译者注

② 事实上,在海-气界面处,风对海面的作用,不仅有法向的,还有切向的。因此风应力不仅限于因表面波动边界层的存在而出现的辐射应力,而且还应包括因边界摩擦的存在而施加于海面上的风的切向作用力。——译者注