气候物理学

PHYSICS OF CLIMATE

José P. Peixoto 和 Abraham H. Oort 著
吴国雄　刘　辉　等译校

气象出版社

需要全本请访问 www.ertongbook.com

气候物理学

著者：

何赛·P·佩索托
物理学教授，地球物理研究所，
里斯本大学，里斯本，葡萄牙

阿伯拉罕·H·奥特
地球流体力学实验室，美国国家海洋大气局，
美国商业部，普林斯顿，新泽西州

序言：爱德华·N·洛伦兹
麻省理工学院气象学荣誉教授

翻译、审校者：吴国雄教授、刘辉博士等
中国科学院大气物理研究所，
大气科学和地球流体力学国家重点实验室

本书得到美国物理学会出版社惠许而翻译出版

© Copyright 1992 by American Institute of Physics Press.
Translated and published in Chinese with the kind permission of AIP Press.

气象出版社

(京)新登字 046 号

图书在版编目(CIP)数据

气候物理学＝PHYSICS OF CLIMATE / (葡)佩索托(Peixoto, J. P.)著；吴国雄等译

-北京：气象出版社，1995

书名原文：Physics of Climate

ISBN 7-5029-1917-1

Ⅰ. 气…

Ⅱ. ①奥… ②吴…

Ⅲ. 气候学：大气物理学

Ⅳ. P46

Physics of Climate

© Copyright 1992 by AIP Press

气候物理学

José P. Peixoto 和 Abraham H. Oort 著

吴国雄教授、刘辉博士等翻译、审校

责任编辑：林雨晨　终审：周诗健

封面设计：林雨晨　责任技编：都　平

气象出版社出版

(北京市海淀区白石桥路 46 号　100081)

北京科技印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行　全国各地新华书店经销

1995 年 5 月第一版；1995 年 5 月第一次印刷

开本：787×1092　1/16　印张：28.25　字数：717 千字

印数：1—2000

ISBN 7—5029—1917—1/P・0742

定价：30.00 元

中译本出版者的话

近一二十年来,“全球气候变暖”的问题已成为人们的日常活题,人们从来没有像今天这样关注着自己的居住环境可能遭受到气候变暖所引发的严重后果。气候不仅对大气科学而且对其它学科来说已变得越来越重要,气候变化和气候预测已成为当今国际科学研究的重大问题。特别是1992年6月联合国环发大会上,包括我国在内的许多国家签署了“气候变化框架公约”,这标志着全球气候问题已不仅是一个科学问题,而已成为各国政府为促进本国社会和经济持续发展所必须考虑的一个重要环境政策问题,从而进一步推动了气候变化和气候研究的发展。

1992年中国气象局马鹤年副局长访美期间在美国国家气象中心约见在美的中国气象工作者时,亦即《气候物理学》英文版刚出版之时,这些学者怀着拳拳报国之心,就提出应出该书的中文版,以促进我国气候研究的进展。马副局长对此十分重视。我社接受了这一任务后,积极筹备该书中文版的出版工作。

中国气象局国家气候中心主任丁一汇教授在为我社进行选题评审中指出,《气候物理学》一书具有下列几个特点:(1)全面系统地论述了“气候系统”的各个部分的热力和动力特征;(2)物理的阐述比较全面和新颖,使读者可以获得较深入的气候学知识以及了解现代气候学中的主要物理和动力问题;(3)作者是这方面的专家,书中包含了他们大量的工作,为本书作序的享有国际声誉的洛伦兹教授也大力推崇这本书。总之,丁教授认为这是一本高水平的、有深刻物理内容的气候学专著,非常值得出中译本。中国科学院院士陶诗言先生在阅读此书后,也认为这是当前气候学专著中最好的一本。

在中译本面世之际,我们要特别感谢中国科学院大气物理研究所、大气科学和地球流体力学国家重点实验室主任吴国雄教授在组织并参与本书的翻译、审校等工作中所付出的艰辛劳动。没有他的努力,中译本是难以高质量地如期出版的。原书作者佩索托和奥特先生得知吴教授要将《气候物理学》译成中文出版时,也表示非常高兴与支持。一方面是中译本的译文质量有了保证;另一方面则为该书能拥有广大的中国读者而感到荣耀。我们还要感谢这两位作者以及美国物理学会出版社的慷慨授权,惠许我社无偿地获得中文版权。该社负责人玛丽亚·泰勒女士在其间所起的关键作用也是值得称道的。

当前社会上普遍存在高水平科技译著出版难的现象。作为全国唯一的气象科学出版社，我社责无旁贷，将一如既往地多出好书，将一本本优秀的国内外专著介绍给读者，促进学术交流，促进科学研究。《气候物理学》中译本的出版，就是我社在这一系列努力中最新奉献给读者的一份珍品。

气象出版社

1995年3月

需要全本请访问 www.ertongbook.com

校译者前言

我们将把一本优秀的关于现代气候学的书推荐给广大读者。

气候与地球历史共存。其寓意随着科学的发展而不断更新。经典的气候概念指近地层大气平均的温度(有时也包括风)和降水。它是一个定常的概念。经典的气候学只是一门描述性的科学。第二次世界大战结束以后,随着全球观测资料的增加,人们对气候的认识从近地层拓广到全球三维空间,从定常态发展为非定常态。经典气候学也逐渐地进化为近代气候学。它不仅研究气候的平均态的时空分布和变化,还研究各种气候的高阶矩(如方差,协方差及相关等)的时空分布和变化,与大气环流的研究已十分接近。从本世纪60年代开始,大气探测手段(如卫星遥感等)不断改善,通讯技术不断发展。尤其是计算机及计算科学的突飞猛进,使地球科学研究出现质的变革。人们开始把计算机当作实验室,去研究大气和海洋的运动,冰雪圈和生物圈的作用,以及岩石圈的变迁。从而使地球学科与物理、化学学科一样成为可实验的学科,也使气候学进入了现代研究的新纪元。

现代气候学,或称物理气候学,或动力气候学,用数学、物理和化学的知识,从整个气候系统的角度去研究气候演变的规律,以及人类活动对气候的影响。气候系统是由大气圈、水圈、冰雪圈、生物圈及岩石圈等气候子系统构成。各个子系统之间互为外强迫介质,通过各圈交界面上所发生的能量、质量及动量的串级交换过程相互作用而融为一个整体——气候系统。因此,现代气候学研究的一个最鲜明的特征就是多学科的交叉——不仅需要地学内各学科的交叉,也涉及物理学、化学、数学、生物学,以及天文学等大学科的交叉。

本书的作者从50年代起就从事大气科学研究。60年代以后分别在里斯本大学和普林斯顿大学任教。他们在大气的能量循环、角动量、热量和水汽的输送及收支,以及在大气环流的统计特征的研究中都取得了卓著的成绩。他们是世界上杰出的大气环流诊断分析大师。近年来,他们在海洋、冰雪圈的诊断研究中又取得了重大进展,成为气候物理研究的专家。本书是他们积几十年的教学和研究经验和成果,并综合当今世界气候物理研究的最新进展而成的大作。

本书内容大致可分为三个主要部分。第一部分(2—6章)首先介绍支配气候系统各分量以及辐射过程的物理数学方程。第二部分(7—10章)分别介绍气候系统中三个最活跃的分量,即大气圈、水圈及冰雪圈的主要特征及其相互作用。第三部分(11—15章)从整个气候系统的角度分析角动量、水分及能量的循环及熵的收支;还用有效能量的观点去讨论大气-海洋的热机效率。这些是全书最富特色的内容之一。最后(16—17章)作者用对气候变化性的讨论和数值模拟去结束全书,颇具匠心地突出气候学科已成为"可实验学科"的特色。此外,全书还系统地概括了对各气候子系统研究的重要著作。它不仅可供大学本科生作为地学教材,也为地球科学的研究生、教师,以及科学工作者提供了重要的参考文献和研究素材。

参加本书翻译工作的主要是在"大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室"中从事气候动力研究的年轻科学家。其中,序言至第5章由张邦林博士翻译;第10—12章由王会军博士翻译;第13—14章由张人禾博士翻译;第15—17章及附录由李旭博士翻译;其余章节和内容由刘辉博士和吴国雄教授翻译。参加本书译稿审校工作的有吴国雄教授、刘辉博士,

张荣华博士及袁重光研究员。最后，全书由吴国雄教授和刘辉博士总校。

为了用最快的速度把本书推荐给读者，从开始翻译、审校到誊清、总校、再修改，总共不到一年。加之水平所限，错误难免，敬请读者予以指正。

本书的翻译出版得到了“大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室”(LASG)的资助。得到了版权拥有者美国物理学会出版社(AIP Press)的慷慨认可。该社负责人玛丽亚·泰勒小姐(Ms. Maria Taylor)为促进中美两国的大气科学交流，为本书中文版的出版作出了重要贡献。译者在此一并致以衷心的感谢。

吴国雄　刘辉

1994年于北京

中文版前言

《气候物理学》这本书已被译成中文，能拥有如此广大的尊贵的读者，作者感到荣耀无比和责任重大。

气候不仅对大气学科而且对其它学科来说已变得越来越重要。气候变化已引起人们对未来地球环境和全球变化的极大关注。全球变化不只是一个科学挑战问题，而且对生态学、经济学及大多数其它的人类活动来说都是极其重要的。可以说气候是每一个人的事。

气候给人类留下了深刻的烙印，它创造了大千文化，孕育了文明的兴衰。它影响人类的健康、食品和行为，从而影响生活质量，它也对艺术、科学和文化有强大的影响。

气候系统由大气圈、水圈、冰雪圈、岩石圈和生物圈等子系统构成。本书的目的并非在于描述气候本身，而在于说明气候系统运行的物理基础。所有子系统间都有强烈的相互作用，其过程高度地非线性，必须用物理学、数学和化学手段对气候加以研究，才能对发生在地球环境中的现象进行正确的解释，才能比传统的描述方法更进一步。尤其重要的是，气候的概念必须建立在众多状态的平均总体上，并辅以高阶统计和对极端事件的认识。这一途径似乎是表征一定时段内气候系统的结构和动力学的最佳方法。我们必须突破静止态的框框，把四维时空中的气候考虑成一个动力整体。把气候当成平均条件的静态表示已成为过去，现代的途径是建立关于气候总体理论的最自然的方法。这种理论必须对观测到的气候变化及其物理成因加以描述和解释，也必须为气候的可预报性提供估测。联合国环境计划署(UNEP)、国际科学联盟理事会(ICSU)、世界气象组织(WMO)以及其它团体近年来所设立的许多国际科学研究计划正是沿着这一广泛的科学途径。这些研究计划把各国的科学家联合在一起，去共同研究与气候有关的环境问题。

我们对历史时期的气候及变化的了解主要来自记录和其它间接记载。在这些间接记载中，中国保存的档案是举世无双的，它成为最可靠的信息库之一。在整个历史时期，有如此多的气候和天气事件为中华文化所吸收真令人叹为观止。关于气候通过社会事件和动荡深刻地影响中华民族的史载读起来更脍炙人口。因人口压力而迁移、干旱以及饥荒等都可视为气候变化的指示。其它的气候变化的指示还可以从若干事件发生时间的记载中找到，如灌木开花、植物种类的存在、候鸟的到达、季节庆典等等。这些都与天气现象有关。令人惊奇的是，我们已能够追溯2000年来中国旱涝的变化，跟踪干旱区的变迁，以及了解农业产量与气候的联系。这些史料也使我们能够研究人类活动对中国沙漠化的影响。

更令人庆贺的是，中华民族关于气候研究的这一长期传统已经被许多近代杰出的中国科学家继承下来。他们在气候变化及其成因方面已经取得许多重要成果。我们期望本书能提供一些关于近期气候研究的新信息，以此来促进中国科学家与世界科学家之间的交流。借此机会我们对本书的翻译和编辑表示感谢。我们还要感谢美国物理学会出版社允许和支持本

书翻译成中文，感谢地球流体力学实验室(GFDL)的主任捷里·D·马尔曼博士(Dr. Jerry D. Mahlman)对我们合作工作的持续的支持。

何赛·P·佩索托(José P. Peixoto)
阿伯拉罕·H·奥特(Abraham H. Oort)
普林斯顿，1993年9月

序　言

气候研究可采用多种形式，气象学家倾向于把气候及其连续不断的演变看成是特定的天气状况及其变化。海洋学家则可能把海洋环流包括在重要的气候特征中并通过研究海洋状况去探索气候变化的根源。而地质学家可能把史前期气候变化归因于大陆形状的变化并最终归结到大陆的漂移。

对气象学家来说，气候一直是一个不断发展的概念。在本世纪初期，局地气候常被认为仅仅是温度和降水长期平均值的年变程。如果在地球上广大区域内存在相对均匀的局地气候，则该区域就被定义为气候带；在特定的气候带中可以找到诸如热带雨林、沙漠、冻原等熟知的地理特征。

至本世纪中叶，一些气象学家已把气候的范畴延伸到不仅仅包括温度和降水，而实际上已包括高空和地表面的所有大气特性。对这些研究者来说，气候由一组大气的长期统计特征量构成。这几乎就是大气环流的同义词。此时，气候的理论解释不再主要限于用大气自身的热量和水分收支，它也包括了大气内部的能量、水汽和动量输送作用，这些输送已成为大气环流理论的基本因素。

近年来，“气候系统”的概念已牢固形成。这一观点的基础是由于人们认识到在试图解释大气行为时，下垫面的海洋和陆地表面（以及冰、雪、湖泊、河流，存在于大气、海陆表面之间的生物）不再仅仅是被动的边界条件。相反，它们有自身的内部动力学；对它们来说，大气也是其边界条件之一。它们与大气一起构成了逻辑上可以作为一个整体进行研究的更大的系统。从这一角度看，大气环流问题只不过是气候问题的一个方面，更不用说气候的研究已不再仅仅是气象界的任务了。

“气候物理学”的作者和我有共同的导师 Victor Starr，这使我们有共同的科学追求，甚至在某种程度上使我们对生活有共识。Starr 是一个伟大的理论气象学家。最值得纪念的是他对大气中角动量、能量和水分输送进行了广泛深入的研究以及设计了从可以利用的气象资料中估算这些输送的一系列方案。他的许多理论观点对我后来的工作有很大影响。他关于输送过程的计算的想法，在本书作者的许多工作中也可以看得十分清楚。

差不多十五年前，我应世界气象组织之邀写了一本专著，我给这本专著所选的题目是“大气环流的性质和理论”。在写作过程中，通过几乎每天都与 Victor Starr 进行讨论，我得到了很大的帮助，并且我所写的大气环流基本上都是 Starr 所认为的大气环流。在最长的一章里，我叙述了大气与其环境之间的各种交换，以及大气内部的各种通量，并把这些交换和通量描写成维持大气环流的过程。用当时人们对气候的理解来衡量，只要对该书稍作修改，也许就可以成为一本关于气候性质和理论的专著。

现在，所有这些都已经改变了。在当代对气候的性质与理论的研究中，不管所用的方案是否与我当时的方案相似，都必须处理整个气候系统，而不能仅局限于对特定气候特征的描述性研究。在《气候物理学》中，作者就是这样处理的。两位作者都是国际上著名的气象学家，他们用最新的观测资料对维持大气环流的各种过程进行过深入的研究，发表在本书中的一些结果就是作者自己的研究成果。除了大气输送统计特征外，他们还增加了海洋中的同类统

计特征研究，并用了一整章的篇幅研究冰、雪和永久冻土。

作者们在对气候系统进行详细的研究之前，首先在前几章里介绍了气候理论。在这些章节中，控制地球的基本物理规律都用气候变量表示，通过引入气候变量的数学表达式及表示物理定律的数学方程，大大增强了讨论效果。然而在许多地方，甚至在有关数值模拟的那一章里，都有许多不包含数学符号的篇幅。因此，那些对数学说明不太熟悉的读者会发现他们仍然能领会中心思想。书中还有大量的插图。

人们已获得了气候系统中这么多相互联系的统计特征，以至于谁也不能花费许多时间去全部记住。从许多原始材料中搜集它们是一项很费力的任务。能在一本书中汇集这么一大批的气候统计，这是本书为从事气候领域研究的人们所提供的一大好处。另一方面，对这么多气候统计的内容不熟悉的读者也会发现大量有意思的现象。例如，作者们指出世界上80%的淡水是固态；他们简单地说明风是如何生成海洋中的涌升流和下沉流的；他们还给出犹它州的大盐湖湖水表面高度在过去一个世纪中的变化图。

E. N. 洛仑兹(Edward N. Lorenz)
气象学名誉教授
麻省理工学院
剑桥，马萨诸塞州
1991年9月

需要全本请访问 www.ertongbook.com

作者前言

在某种意义上，写一本书好像是创造一件艺术品。就如一个雕塑家的创作可能开始于一个模糊的想法、一块空板、一袋粘土和一些雕塑工具。作者在开始写作时，除了对于他(她)想要写或要选入书中的那些内容仅有一些一般的想法外，可能什么都没有。但接着以一种似乎十分奇妙的形式，这些想法渐渐地一个接一个地开始成形、不断增长，最后发展成更具体更清晰的结构。此时，手稿、目录、梗概和草图开始代替原先的想法，逐步形成所需的框架。我们发现构思一本书的过程是一个持续不断地演变的过程——增加新章节并修改，重新组织或删除老章节等等。这类似于雕塑过程——在需要的地方加几块粘土到被塑的模型上，而在多余的或不当之处削去一些。

把现有地球气候系统的观测资料和理论知识综合起来，根据上述过程进行创作一直是本书作者孜孜以求的目标。我们两人有不同的构思和背景，因此，这种创造过程也是不同思想相互交换和融汇的过程。然而，正如 Edward Lorenz 在序言中所提及的，有一个共同的因素使我们在差不多30年前就走到了一起，并由此成为朋友和同事。这一因素就是我们曾经共同在 MIT 气象系学习，在尊敬的导师 Victor P. Starr 指导下从事研究的经历。在这里我们谨以此书来纪念他。事实上，大约在20年前，Starr 就建议我们写一本以观测事实为基础的有关大气环流的书，然而，我们很快就发现可用的材料还不完整，也不充分，完成该目标的时机显然还未成熟。那时，数值模式并不完善，气象学、海洋学、气候学及水文学相互间也未有机地联系起来。

现在，20多年已经过去，关于全球大气和海洋已有内容更多的材料可用。我们关于大气和海洋中观测到的角动量、水分和能量方面所发表的文章和我们的同事及学生的论文；再加上我们在 Lisbon 大学和 Princeton 大学的教学讲义为本书提供了基本材料。

我们希望本书能为读者提供关于地球气候系统的广泛的透视。本书还综合了我们现有的观测知识和物理知识来说明气候热机是如何工作的。本书中50%以上的内容是有关大气的，约20%关于海洋，5%是关于冰雪圈、固体地球及生物圈的，其余约25%的内容则是更一般性的讨论。因此，大气和海洋显然是本书讨论的重点。按照另一种不同的统计，物理原理及背景知识的讨论占40%，观测及诊断分析约占60%。本书不包括任何有关气候系统为什么像现在这样工作的理论及探索性解释。我们希望通过用一些简单易懂的术语写作本书，以便能使大多数对本研究领域感兴趣的学生及其它领域的科学家更易于理解它。

除了作为一本教科书外，本书也是一份研究报告，这些研究已经花费了我们多年的时间。然而在本书的大量内容中，有一些我们还不是很专长。由于这样或那样的原因，本书中某些章节也未能完美地表述出来。因此，我们欢迎大家多提意见以利改进。

我们预计本书会令广泛的读者觉得是有趣和有助的，这包括气象学家、海洋学家、地理学家及地球物理学家，也包括那些对气候有兴趣的物理学家、数学家、生态学家和工程师。本书主要适宜于研究生和研究工作者，但那些有创造性的大学生也是能看懂的，这是因为本书只用了中等水平的数学知识，且主要集中在物理上去理解。此外，本书的一些章节也可作为大气环流方面的研究生教材，或作为大气和海洋科学高等教程的补充材料。

作者致谢

我们要感谢在地球流体力学实验室(GFDL)、大气和环境研究公司(AER)、国家大气研究中心(NCAR)、欧洲中期天气预报中心(ECMWF)、气候分析中心(CAC)以及在研究与环境科学联合研究所(CIRES)等单位工作的许多同事，他们审查了本书的不同章节，提出了许多建设性的批评和建议，这对丰富本书内容作出了有价值的贡献。我们要特别感谢 GFDL 的 Syukuro Manabe 博士、刘雅章博士，AER 的 Richard D. Rosen 博士和 David A. Salstein 博士，马里兰大学的 Lev Gandin 教授，Yale 大学的 Barry Saltzman 教授及 MIT 的 Edward N. Lorenz 教授，他们放下手中正在处理的事情，用自己深遂的洞察力及渊博的知识所给予的指导，使本书得以不断拓广和完善。

没有 GFDL 的主任 Joseph Smagorinsky 和 Jerry Mahlman 的鼓励和持续的支持(非常慷慨大方地为本工作提供了可利用的 GFDL 资源)，本书是不可能出版的。我们要感谢 NCAR 的 Roy Jenne 先生，GFDL 的 Sydney Levitus 先生和 CAC 的 Chester F. Ropelewiski 博士为本书提供的气候资料。我们也感谢国家海洋大气管理局(NOAA)、国家自然科学基金会(NSF)和葡萄牙国家研究理事会(INIC)为我们的合作研究提供了必要的经费支持。

作者深深地感谢 GFDL 的管理系统、计算机系统、计算机操作系统、绘图室及其它技术支持小组的许多工作人员，特别是 James S. Byrne 先生，John N. Connor 先生，Gail T. Haller 太太，Catherine Rophael 太太，Melvin Rosenstein 先生及 Phillip G. Tunison 先生为我们的研究提供的便利条件及准备初稿过程中所给予的有力帮助。我们感谢 James G. Welsh 先生为我们多年的研究提供了大量计算机专业知识，也应该感谢 Joyce Kennedy 太太的高效率和爽朗，她几乎无休止地为本书打印了一系列修订本。最后，我们要感谢 GFDL 的 Noboru Nakamura 制作了本书的卷头插画，感谢美国物理学会出版社的编辑 Thomas von Foerster 博士、Michael Henney 先生和 Andrew Prince 先生在组织和准备初稿的过程中所提供的帮助和建议。我们还要深深地感谢下面所列的出版者和作者①允许我们使用其已发表过的材料。

① 原文4页名单，略去——编者注。

纪　念
维克多·斯塔教授
1909—1976

拆开一个纱团

现在看来，人们似乎已不再期望流体力学领域里的某些天才会在一天内通过摆弄方程一下子解决大气环流问题。如此复杂的大气环流的解不会像希腊神话中主神宙斯头顶上生出的智慧女神雅典娜那样一下子就得到的。相反，它们是慢慢出现的，并呈现阶段性。在每一个阶段，我们都需要停下来详细地检查资料，以保证有一个牢固的根基，并恰当地选择下一步的工作。这一过程十分类似拆开一个纱团。如果找到了纱线的端点，拆起来就会比较顺利，但仍需要时间——也许几十年。这可能就是大气环流的情形。

摘　自
维克多·斯塔
的
“关于科学和有关题目的意见和感想”

符号和定义表

这里仅列出一些主要的符号。水平二维矢量由等线体字型表示，三维矢量由黑体字型表示，而三维张量用带衬线的哥特式粗体字表示。

a_λ	波长 λ 处的辐射吸收率 $= I_{a\lambda}/I_\lambda$
c	(1)光速($=2.998\times10^8$ m s^{-1})
	(2)单位质量的凝结率
	(3)表面层的比热(第六章和第十章，表10.1)
c^*	表面层的传导容量
$\boldsymbol{c}$	三维风速$=(u, v, w)$
$\boldsymbol{c}_A$	无旋绝对坐标系中的三维风速矢量
c_I	雪/冰的比热
c_L	陆地的比热
c_O	海水的比热(4187 J kg^{-1} K$^{-1}\approx c_{p0}\approx c_{v0}$)
c_p	大气定压比热($=1004$ J kg^{-1} K^{-1})
c_s	声速(≈300 m s^{-1})
c_v	大气定容比热($=717$ J kg^{-1} K^{-1})
curl	旋度算子
d	天
d	日地距离(第六章)
d_m	平均的日地距离
dA	面元
div	散度算子
dm	质量元
dS	表面元
d_es	越过开系统边界的熵输送
d_is	系统内部的熵产生
dV	体元
dyn	1 dyn$=10^{-5}$ N (1 dyn cm$^{-2}=10^{-1}$ Pa)
e	(1)单位质量的蒸发率；
	(2)水汽压(第十章)
e_s	饱和水汽压
f	(1)科氏参数$=2\,\Omega\sin\varphi$(在45°纬度$=1.03\times10^{-4}$ s^{-1})；
	(2)频率；
	(3)一个系统的反馈(第二章)；
	(4)实际和潜在蒸发(蒸发势)之比$=E/E_0$(第十章)

f'	$=2\Omega\cos\varphi$
f_N	Nyquist 频率 $=\frac{1}{2}\Delta t$
g	重力加速度(在海平面$=9.81\ \mathrm{m\ s^{-2}}$,在20 km 高度$=9.75\ \mathrm{m\ s^{-2}}$)
$\boldsymbol{g}$	视重力矢量
gpm	位势米(1 gpm≈1 m)
grad	梯度
h	小时
h	(1)Planck 常数 ($=6.626\times10^{-34}\ \mathrm{J\ s}$); (2)太阳时角(第六章); (3)海洋的焓$=(p/\rho+I)$(第十四章)
$h(x)$	海底深度
h_r	焓参考状态海洋
k	(1) 卡曼(von Karman)常数($=0.4$) (2) 玻尔兹曼(Boltzman)常数($=1.380\times10^{-23}\ \mathrm{J\ K^{-1}}$); (3) 波数$=2\pi R\cos\varphi/L$ (附录 A)
k_λ, k_ν	在波长 λ,频率 ν 处的辐射衰减系数
$k_{\lambda a}$	波长 λ 处的辐射吸收系数
$k_{\lambda s}$	波长 λ 处的辐射散射系数
l	混合长
m_a	大气总质量(≈5.136×10^{18} kg)
m_d	干空气的分子量(≈$28.9\times10^{-3}\ \mathrm{kg\ mol^{-1}}$)
m_e	地球质量(≈5.98×10^{24} kg)
m_v	水汽的分子量($=18.0\times10^{-3}\mathrm{kg\ mol^{-1}}$)
mb	毫巴(1 mb $=10^2$ Pa$=1$ hPa $\approx10^3\ \mathrm{dyn\ cm^{-2}}$)
n	波数
$\boldsymbol{n}$	单位矢量(指向体块的外侧)
n_i	可溶解分子量 i 的光分子数
p	气压
p_D	深度 D 处的海洋底部气压
p_{Ei}, p_{Wi}	第 i 个山脉东侧、西侧的气压
p_r	参考气压
p_0	表面气压
p_{00}	参考面气压(≈1000 hPa)
p_{SL}	海平面气压(第七章)
q	比湿(单位是 g/kg)
q_s	饱和比湿
r	相关系数
$\boldsymbol{r}$	矢径
r_r	旋转参考系中某一点的位置矢量

r_λ	波长 λ 处的辐射反射率$=I_{\lambda r}/I\lambda$
s	秒
s	(1) 单位质量的熵； (2)路径长度
$s(q)$	水汽的源汇项
s^*	海洋中的静力稳定度 $(=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial \rho}{\partial z}-\frac{g}{c_s^2})$
sr	球面度
t	时间
u	(1) 向东的风分量； (2) 光学厚度或光学路径长度 $=\int k_\lambda \rho \, ds$； (3) 风速
u_*	摩擦速度 $=\sqrt{-\tau_0/\rho}$
u_{ag}, v_{ag}	向东、向北的非地转风分量
u_g, v_g	向东、向北的地转风分量
v	向北风分量
v_l, v_s	悬浮在空气中的液态、固态水的径向速度
$[\bar{v}]_{ind}$	由角动量平衡间接算出的 $[\bar{v}]$
V	水平风速$=(u, v)$
w	向上的垂直风速
w_E	Ekman 垂直速度
yr(a)	年
z	(1)几何高度； (2)位势高度(在 MKS 系统中 $\equiv \frac{1}{9.80}\int_0^z g \, dz \approx$ 几何高度)； (3)天顶角(第六章)
z_0	(1)表面高度； (2)表面粗糙长度(第十章)
z_{SA}	标准大气中的气压层高度
A	(1)积分区域； (2)反照率； (3)任意参数； (4)常数 Wien 定律(第六章)
A_{sfc}	表面反照率
AU	天文学单位，日地平均距离$(=1.4960\times10^{11}$ m)
$\mathscr{A}$	代表大气的符号
B	(1) Bowen 比$=F_{SH}^{\uparrow}/F_{LH}^{\uparrow}$； (2) 由浮力引起的湍流动能产生率$=-g\overline{\rho' W'}$
B_λ, B_ν	在波长 λ、频率 ν 处的黑体辐射

需要全本请访问 www.ertongbook.com