

# 冰冻圈的质量平衡 当代及未来变化的观测和模拟

JONATHAN L. BAMBER

主编

ANTONY J. PAYNE

张占海 等 译

CAMBRIDGE



海洋出版社

# 冰冻圈的质量平衡

## 当代及未来变化的观测和模拟

JONATHAN L. BAMBER  
ANTONY J. PAYNE

主编

海洋出版社

2010年·北京

## 图书在版编目(CIP)数据

冰冻圈的质量平衡:当代及未来变化的观测和模拟/(英)班伯(Bamber, J. L.),  
(英)佩恩(Payne A. J.)主编;张占海等译. —北京:海洋出版社, 2010. 11

书名原文: Mass Balance of the cryosphere——Observations and modelling of  
contemporary and future changes

ISBN 978 - 7 - 5027 - 7758 - 6

I. ①冰… II. ①班… ②佩… ③张… III. ①冰川学—  
文集 IV. ①P343.6 - 53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 119350 号

图字:01 - 2009 - 4723

[*Mass Balance of the Cryosphere: Observations and Modelling of Contemporary and Future Changes*]  
[first edition] [ISBN:0 521 80895 2] by [Jonathan L. Bamber & Antony J. Payne] first published  
by Cambridge University Press [2004]

All rights reserved.

This simplified Chinese edition for the People's Republic of China is published by arrangement with the  
Press Syndicate of the University of Cambridge, Cambridge, United Kingdom.

© Cambridge University Press & China Ocean Press [2010]

This book is in copyright. No reproduction of any part may take place without the written permission of  
Cambridge University Press or China Ocean Press.

This edition is for sale in the mainland of China only, excluding Hong Kong SAR, Macao SAR and  
Taiwan, and may not be bought for export therefrom.

此版本仅限中华人民共和国境内销售,不包括香港、澳门特别行政区及中国台湾。不得出口。

责任编辑:白 燕

责任印制:刘志恒

海洋出版社 出版发行

<http://www.oceanpress.com.cn>

北京市海淀区大慧寺路 8 号 邮编:100081

北京画中画印刷有限公司印刷 新华书店经销

2010 年 11 月第 1 版 2010 年 11 月第 1 次印刷

开本:787 mm × 1092 mm 1/16 印张:29.5

字数:829 千字 定价:115.00 元

发行部:62147016 邮购部:68038093 总编室:62114335

海洋版图书印、装错误可随时退换

# 作者

JONATHAN L. BAMBER

Bristol Glaciology Centre , School of Geographical Sciences.  
University of Bristol , University Road, Bristol BS8 1SS, UK  
J.l.bamber@bristol.ac.uk

CHARLES R. BENTLEY

Department of Geology and Geophysics, University of  
Wisconsin – Madison, 1215. Dayton St, Madison, WI 53706,  
USA  
bentley@geology.wisc.edu

JULIAN A. DOWDESWELL

Scott Polar Research Institute, University of Cambridge,  
Lensfield Road, Cambridge CB2 1ER, UK  
jd16@cam.ac.uk

MARK B. DYURGEROV

Institute of Arctic and Alpine Research (INSTAAR), University of Colorado, Campus Box 450, Boulder. CO 803  
09-0450, USA

Mark.Dyurgerov@Colorado.EDU

GREGORY M. FLATO

Canadian Centre for Climate Modeling and Analysis,  
Meteorological Service of Canada, University of Victoria,  
PO Box 1700, Victoria, BC V8W 2Y2, Canada  
Greg.Flato@ec.gc.ca

CORNELIS J. VAN DER VEEN

Byrd Polar Research Center, The Ohio State University,  
Columbus, OH 43210, USA  
Vanderveen.1@osu.edu

PETER WADHAMS

Department of Applied Mathematics and Theoretical Physics,  
University of Cambridge, Wilberforce Road, Cambridge CB3  
0WA, UK  
p.wadhams@damtp.cam.ac.uk

JOHN E. WALSH

Department of Atmospheric Sciences, University of Illinois,  
105 South Gregory Avenue, Urbana, IL 61801, USA  
walsh@atmos.uiuc.edu

## 前言

一望无际的南北极冰原美丽诱人,荒芜的冰原避免了人类的干扰破坏,充满着魅力和神奇,然而这些并不是我们对南极和北极进行科学研究的唯一理由。与地球表面其他地方相比,南北极的重要性远远超出了根据其地理面积而做出的想象。冰冻圈中,冰积累与消融的平衡变化主导了地球气候史。发生在最近一百万年或更早年代的半规则冰期变化改变了冰平衡,关于冰期变化我们知之甚少。冰平衡的改变引起海平面的大幅度升降,这对全球海岸具有巨大影响。例如,今天的海平面比上个冰期末——大约 20 000 年前或更早升高了 120 m。

主导两极地区冰质量平衡的长期因素,无论是对海冰的形成或是对冰原的维持,均来自于地球环太阳轨道的关键特征——偏心率的规律性摆动,即地球轴的倾斜以及一年中地球最接近太阳的时间。这些特征的变化周期从 20 000 ~ 100 000 年不等,其最终导致了一年中不同时期到达极地的太阳能量出现巨大变化,特别是在北半球的夏季。1867 年,James Croll 首先提出这个问题,20 世纪 20 年代塞尔维亚科学家 Milutin Milankovitch 对此进行了广泛研究。这些变化引发了冰盖的增长和衰减,而冰盖的影响力则远远超出了极地地区。例如,在冰盖的增长期,数万年间北半球的大片陆地被冰雪覆盖,而当冰盖退缩时所释放的淡水则对海洋环流产生了巨大影响。

回到近代,在最近的 20 年间我们逐步认识了人类活动对气候影响。矿物燃料的燃烧使大量的温室气体二氧化碳进入大气,最终导致地球气候正在以一个 10 000 年间从未出现过的速度明显变暖。我们必须尽可能详细地了解海冰和冰盖对大气增温的反应以及它们的变化又是如何影响气候的。冰盖是否由于降雪的增加而正在增长,或是由于温度上升已经开始融化?当前的这些变化是否已经对南极巨大冰盖的稳定造成了威胁,补充进入海洋的淡水对深海洋流有何影响等。

多国有关学科的专家,特别是专门应用于冰以及冰区周围的大气和海洋的物理学、动力学方面的专家,加入到了本书的编写。本书的章节对观测和模式化所涉及的各主要的方法多加着墨,对冰冻圈各领域的最新技术进展详加介绍,反映了冰冻圈的诸多特征及演变。一些重要问题已经有了答案,本书是当今相关知识的重要综合文献。

John Houghton

# 序

2000 年的欧洲地理协会的年会期间, Tony Payne 和我组织了一个关于冰冻圈质量平衡的研讨会, 会议所展示的成果令人印象深刻。这次会议以及近期发表的相关文献都清楚地表明最近 10 年间我们对冰冻圈质量平衡的研究已经取得了长足的进步。先进的卫星和航空设备提高了观测技术; 计算能力的加强和对物理意义的深入理解改进了模拟能力, 这是取得进步的两个关键因素。我们认为目前是个合适时机对质量平衡观测和模拟背后的相关理论以及最新的观测和数值模拟成果进行全面回顾。本书的独特之处是将理论和实际成果结合在一本书中。23 名专家共撰写了 5 个主题 17 个章节, 内容包含海冰、冰川和冰盖。虽然这是一本编辑卷, 但每一章节的内容都可相互参照, 它们组成了一本完整的综合性图书。此外, 出色的撰写保证了本书的最高科学水平。书中的第一部分试图向读者提供一个既全面又紧凑的关于质量平衡测量理论与实践的参考教材。同样, 第二部分的内容是数值模拟, 第 3 至第 5 部分详细、全面地描述了测量和模拟的最新相关知识, 其中包括了海冰、冰盖、冰川和冰帽当前和未来的预测变化。

这类图书的出版需要整个团队成员的共同努力, 要求每个成员敬业、专注并具有渊博的专业知识。十分感谢全体作者, 他们当中的一些人为了目睹自己的研究成果变为著作出版已经等了很长时间。我还要感谢剑桥大学出版社的编辑和职员、最终校阅人员, 特别是本书的编辑 Irene Pizzie, 感谢他们坚持不懈的努力和敬业。最后, 我还要感谢欧洲空间局和美国航空航天总署对彩色复制费用的慷慨资助。

Jonathan Bamber

# 目 录

|                        |     |
|------------------------|-----|
| 第1章 背景和介绍 .....        | (1) |
| 1.1 宗旨和目的 .....        | (1) |
| 1.2 地球系统中冰冻圈的重要性 ..... | (1) |
| 1.3 变化的时间尺度 .....      | (3) |
| 1.4 地理背景 .....         | (4) |
| 参考文献 .....             | (5) |

## 第1部分 观测技术和手段

|                       |      |
|-----------------------|------|
| 第2章 现场观测技术:陆冰 .....   | (9)  |
| 2.1 导论 .....          | (9)  |
| 2.2 质量平衡方程 .....      | (9)  |
| 2.3 表面高度变化的直接观测 ..... | (10) |
| 2.4 质量平衡分量的观测 .....   | (14) |
| 2.5 局地质量平衡方程 .....    | (26) |
| 2.6 结论 .....          | (26) |
| 参考文献 .....            | (27) |
| 第3章 现场观测技术:海冰 .....   | (31) |
| 3.1 当前的技术 .....       | (31) |
| 3.2 今后可能的技术 .....     | (37) |
| 参考文献 .....            | (40) |
| 第4章 遥感技术 .....        | (43) |
| 4.1 介绍 .....          | (43) |
| 4.2 电磁理论和基本原理 .....   | (43) |
| 4.3 卫星和传感器 .....      | (46) |
| 4.4 陆冰的质量平衡 .....     | (54) |
| 4.5 海冰质量平衡:介绍 .....   | (65) |
| 4.6 总结 .....          | (76) |
| 参考文献 .....            | (76) |

## 第2部分 模拟技术和方法

|                        |      |
|------------------------|------|
| 第5章 陆冰表面质量平衡数值模拟 ..... | (85) |
|------------------------|------|

|                                |       |
|--------------------------------|-------|
| 5.1 引言 .....                   | (85)  |
| 5.2 表面能量平衡 .....               | (87)  |
| 5.3 度-日方法 .....                | (98)  |
| 5.4 消融模式中的质量平衡 .....           | (99)  |
| 5.5 冰川尺度的质量平衡模拟介绍 .....        | (100) |
| 5.6 消融模式 .....                 | (100) |
| 5.7 大气模式 .....                 | (103) |
| 5.8 回归模式 .....                 | (110) |
| 5.9 不同类型模式的比较 .....            | (111) |
| 5.10 符号列表 .....                | (112) |
| 参考文献 .....                     | (114) |
| 第6章 陆冰动力学数值模拟 .....            | (121) |
| 6.1 引言 .....                   | (121) |
| 6.2 冰川动力学 .....                | (123) |
| 6.3 模式级别 .....                 | (133) |
| 6.4 评估陆地冰体模式 .....             | (139) |
| 6.5 符号列表 .....                 | (151) |
| 参考文献 .....                     | (152) |
| 第7章 海冰动力响应数值模拟 .....           | (159) |
| 7.1 介绍 .....                   | (159) |
| 7.2 精选的观测到的海-冰运动:力学和物理特征 ..... | (160) |
| 7.3 模拟海冰漂移与变形 .....            | (168) |
| 7.4 海冰力学 .....                 | (172) |
| 7.5 海-冰热力学 .....               | (188) |
| 7.6 冰厚度分布理论:动力热力耦合 .....       | (193) |
| 7.7 海冰演变动力热力模拟的选择分级 .....      | (206) |
| 7.8 结束语 .....                  | (222) |
| 参考文献 .....                     | (224) |

### 第3部分 海冰的质量平衡

|                      |       |
|----------------------|-------|
| 第8章 海冰观测 .....       | (235) |
| 8.1 介绍 .....         | (235) |
| 8.2 海冰观测 .....       | (235) |
| 8.3 海冰观测:前卫星时期 ..... | (237) |
| 8.4 海冰覆盖:后卫星时代 ..... | (242) |

|                         |       |
|-------------------------|-------|
| 8.5 平均冰厚度及其变化 .....     | (246) |
| 8.6 目前有关海冰改变的证据 .....   | (251) |
| 8.7 海冰变化的后果 .....       | (252) |
| 8.8 展望未来 .....          | (252) |
| 参考文献 .....              | (252) |
| 第9章 海冰数值模拟 .....        | (257) |
| 9.1 海冰模式的要点性回顾 .....    | (257) |
| 9.2 平均冰厚 .....          | (260) |
| 9.3 模拟海冰质量平衡的未来变化 ..... | (268) |
| 9.4 总结和结论 .....         | (270) |
| 9.5 结语 .....            | (270) |
| 参考文献 .....              | (271) |

## 第4部分 冰盖质量平衡

|                             |       |
|-----------------------------|-------|
| 第10章 格陵兰:现代质量平衡观测 .....     | (277) |
| 10.1 简介 .....               | (277) |
| 10.2 冰盖质量平衡的构成 .....        | (281) |
| 10.3 PARCA 测量 .....         | (283) |
| 10.4 结果 .....               | (294) |
| 10.5 将来的研究 .....            | (301) |
| 参考文献 .....                  | (301) |
| 第11章 格陵兰:数值模拟 .....         | (308) |
| 11.1 引言 .....               | (308) |
| 11.2 定点质量平衡的模拟 .....        | (309) |
| 11.3 冰山的产生和浮动冰川舌的底部融化 ..... | (317) |
| 11.4 动力不平衡 .....            | (318) |
| 11.5 展望 .....               | (319) |
| 参考文献 .....                  | (319) |
| 第12章 南极冰盖质量平衡(观测方面) .....   | (323) |
| 12.1 前言 .....               | (323) |
| 12.2 测量手段 .....             | (324) |
| 12.3 测量结果 .....             | (328) |
| 12.4 西南极冰盖——一个特例 .....      | (337) |
| 12.5 小结 .....               | (341) |
| 参考文献 .....                  | (341) |

|                        |       |
|------------------------|-------|
| <b>第 13 章 南极洲:数值模拟</b> | (346) |
| 13.1 前言                | (346) |
| 13.2 南极冰盖模式            | (347) |
| 13.3 模拟南极冰盖响应          | (350) |
| 13.4 潜在的不稳定源           | (359) |
| 13.5 结论和展望             | (361) |
| <b>参考文献</b>            | (363) |

## 第 5 部分 冰冠和冰川的质量平衡

|                                    |       |
|------------------------------------|-------|
| <b>第 14 章 北极冰冠和冰川</b>              | (371) |
| 14.1 引言                            | (371) |
| 14.2 冰的分布、范围和体积                    | (372) |
| 14.3 北极最近的气候                       | (374) |
| 14.4 北极冰质量平衡的野外观测                  | (376) |
| 14.5 模拟北极冰川和冰冠对气候变化的响应             | (382) |
| 14.6 斯瓦尔巴群岛的总质量平衡:个例研究             | (383) |
| 14.7 北极冰的质量平衡:讨论                   | (387) |
| 14.8 结论                            | (391) |
| <b>参考文献</b>                        | (392) |
| <b>第 15 章 冰川和冰冠:历史背景和世界范围的监测战略</b> | (396) |
| 15.1 概述                            | (396) |
| 15.2 世界范围冰川监测的历史背景                 | (396) |
| 15.3 观测到的状况和趋势                     | (399) |
| 15.4 数据分析的概念                       | (403) |
| 15.5 与全球气候相关的冰川观测策略                | (405) |
| <b>参考文献</b>                        | (407) |
| <b>第 16 章 冰川与气候和海平面变化研究</b>        | (411) |
| 16.1 引言                            | (411) |
| 16.2 概念和术语                         | (411) |
| 16.3 冰川的面积和变化                      | (415) |
| 16.4 冰川体系                          | (416) |
| 16.5 冰川体积变化的空间格局                   | (428) |
| 16.6 冰川的质量平衡和气候的变率                 | (432) |
| 16.7 冰川质量平衡和海平面升高                  | (435) |
| 16.8 总结                            | (437) |

---

|                       |       |
|-----------------------|-------|
| 参考文献 .....            | (438) |
| 第 17 章 总结,概括和展望 ..... | (442) |
| 17.1 概要 .....         | (442) |
| 17.2 目前的不确定性 .....    | (447) |
| 17.3 今后的研究趋势 .....    | (449) |
| 17.4 结束语 .....        | (450) |
| 参考文献 .....            | (451) |

# 第 1 章 背景和介绍

## 1.1 宗旨和目的

冰冻圈可广义地定义为地球表面所有的冰冻水和土地。这个定义包括不同空间和时间特征、各种各样的冰体,从季节性河冰、湖冰到南极洲格陵兰的准定常(千年时间尺度)冰盖、季节性雪盖和常年冰冻层。本书不可能也没有必要讨论所有这些成分,因为它们的物理过程及其相互作用各不相同,甚至毫无关联。本书重点关注陆冰(以冰盖、冰冠和冰川的形式存在)和海冰这两个关键项,它们紧密联系,在相互作用的同时,也同气候系统的其他部分发生作用。它们是以冰盖、冰帽和冰川形态存在的陆冰和海冰。相应地,这些表示在任一时刻,这个目前地球上体积和面积均最大的冰体,在从季节到千年的时间尺度上都响应着气候变化。政府间气候变化专门委员会(IPCC)已确认海冰是短期气候变化的关键指示器,而陆冰则可能贡献了 20 世纪多达 50% 的海平面增长,它给我们海平面升高的预测带来了较大的不确定性。本书的其他部分谈到的冰冻圈仅指陆冰和海冰这两部分。

本书的目的是系统、及时地综述我们从观测角度得到的对当前冰冻圈质量平衡的最新认识,并基于我们的最新模拟研究,探讨它在下个千年时间里可能发生的变化。本书将成为一本包括有陆冰和海冰质量平衡测量和模拟,理论和实践的参考书。现在已出版了一些论述冰川学基本物理原理的著作,但还没有一部专门针对陆冰或海冰质量平衡研究的专著。因此,在这方面本书做出了开创性的贡献。第 1 部分和第 2 部分分别讨论了观测和模拟质量平衡研究所用方法的基本原理。其他部分阐述了现在的理解水平,预测了将来的冰冻圈质量平衡,这些章节都由该领域的顶尖科学家执笔进行了详细总结。总之,全书有 23 位作者参加了编写,每一章都是全书密不可分的组成部分,不是孤立的论述。因此本书并非内容松散、没有联系,而是一部整体性很强、联系紧密的著作,连贯论述了(1)主题的背景材料,(2)对陆冰和海冰现在及将来健康状态的最佳预计,(3)这些信息是如何从观测和模拟中获得的。

20 世纪 90 年代取得了几个重大的进展:(1)质量平衡监测和评估能力不断提高;(2)冰冻圈各成分的数值模式更加先进和准确,更多的地球系统模式涵盖了冰冻圈。20 世纪 90 年代,由欧洲航天局(ESA)和美国国家宇航局(NASA)资助的卫星、航空及地球计划大大提高了我们在数量上对陆冰和海冰质量平衡的理解水平。针对冰冻圈研究,这两家机构也已出台了新的卫星计划,这也反映了政府和类似的非政府组织认识到冰冻圈在地球系统中所起的关键作用及冰冻圈在气候变化时显现的脆弱性的承认。

## 1.2 地球系统中冰冻圈的重要性

### 1.2.1 海平面

陆冰的质量平衡对海平面有着直接的影响,而且很可能是导致海平面升高的直接因子,尽管

对其贡献的评估误差同其信号大小相差无几(Church 等,2001)。南极和格陵兰冰盖分别包含着可使全球海平面上升 65 m 和 6 m 的冰量。即使一个相对较小的冰质量平衡也会导致明显的海平面上升。目前,一般认为海平面变化介于每年 1.5 ~ 2 mm 之间。南极质量平衡的不确定性为每年 1 mm,也就是总信号的一半(第 12 章)。同南极冰盖将来行为相联系的不确定水平是,我们甚至还不能断定其符号的正负(Houghton 等,2001)。因此,对两大冰盖动力学的更好理解对于降低海平面未来趋势预测的不确定性来说至关重要。已经确认的是,更小的冰体正加速(目前是每年 0.41 mm,第 15 章和第 16 章)使海平面增长,它们代表着全球气候系统中更敏感的元素之一,其原因将在下文给出。

### 1.2.2 冰-海洋-大气反馈

陆冰以多种方式、在不同的时间尺度同全球气候系统发生着相互作用。首要的相互作用(海冰等同)是由于其非常高的反射特性。洁净雪的反照率在 80% ~ 97%,而洁净冰的反照率仅为 34% ~ 51%(Paterson,1994)。这比其他自然表面反照率大很多倍,例如水(1%)、森林(10% ~ 25%)、裸露土壤(5% ~ 20%)。这个对比产生了冰冻圈,大气及其下面的海洋或陆地表面间的很多重要反馈,它们可在很短的时间内产生局地加剧全球气候变化的影响。雪盖增加使吸收的太阳辐射减少,产生的致冷效应会使雪盖增加。反之相同,温度升高使雪盖减少,导致吸收的太阳辐射增多,并促使气温进一步升高。这通常称为冰-反照率反馈机制,是冰冻圈与地球系统其他部分相互作用的最重要机制之一。海冰是一个尤为重要的因子,因为这是冰冻圈的一个动态成分,南大洋夏季和冬季海冰范围波动相差 5 倍(第 8 章)。海水的反照率是 1%,因此海冰覆盖使表面吸收的太阳辐射减少多达 95%,即多达  $100 \text{ W/m}^2$ 。比较而言,从 1750—2000 年增加的大气  $\text{CO}_2$  辐射强迫效应估计为  $1.46 \text{ W/m}^2$ (Houghton 等,2001)。

除反照率效应,陆冰总量常对局地气候有剧烈影响。在天气尺度,大冰盖地形阻挡对大气环流有重要的影响。在中间尺度,冰体往往具有它们自己的独特区域性气候,例如冰体通常同强的下降风相联系。在局地尺度,山谷冰川的存在也将剧烈地改变微气候。实际上,山谷冰川是气候变化的极敏感指示器,因为一旦其表面达到融点,它们就不能通过增加长波辐射来缓冲大气增暖的影响了。

需要指出的是,冰盖和冰川不仅是气候系统的活跃成分,同时还是过去气候变化的有效记录仪。从冰芯中获取的信息对于辨认从十年到冰龄时间尺度的过去变化有重要作用(例如东南极东方站的冰芯可反演到 420 000 年;Petit 等,1999)。亚极地和高山冰川通常是水电系统(例如在挪威和冰岛)和灌溉/人类消费的重要来源。对很多地区来说,冰川是地球上最大的增长产业—旅游业的主要资源之一。

冰盖和海冰都在大洋环流,特别在构成部分海洋输送带的深层水形成中起着重要作用(Stossel, Yang 和 Kim,2002)。从冰芯数据中,辨识出了北半球在末次冰期内快速而剧烈的气候变化(Stocker,2000)。这些波动(特别是海因里希事件和丹斯加德涛动)涉及几十年内大的变化,并且前者很可能同来自洛朗蒂德冰盖(位于北美)的大量冰山排出事件导致的温盐环流关闭有关。很明显,冰与冰期间的快速气候变化有密切关系,并且认为处于全球变暖条件下的格陵兰冰盖可能影响将来的北大西洋温盐环流。当前,冰山排出和源自南极冰盖周围浮冰架的底部融化作用于南大洋的淡水收支及其混合过程。

海冰是本书所讨论的冰冻圈中最具动态和变化的部分,因此,它同气候系统的其他部分强烈耦合。图 1-1 表述了发生的一些关键反馈的框架图表,特别边缘冰区附近。海冰如同热力上的毛毯,大大减少了海洋和大气间的水汽和  $\text{CO}_2$  交换。密集冰间的水道是强烈的能量和水汽交换区:

这是由海洋和大气表面间强的温度对比导致的。水道和冰间湖发生着强烈的表面水冷却,产生了形成北半球北大西洋深层水和南半球南极底层水(ABW)的高密度冷水。例如,威德尔海冰间湖被认为在南极底层水的形成中起着关键作用(Goose 和 Fichefet, 2001)。大约从1970年(第8章)开始的观测结果显示,北极海冰范围和厚度明显减少,如果继续改变下去的话,海冰将通过上述的相互作用和反馈过程给北大西洋气候带来实质性的、但不明确的改变。

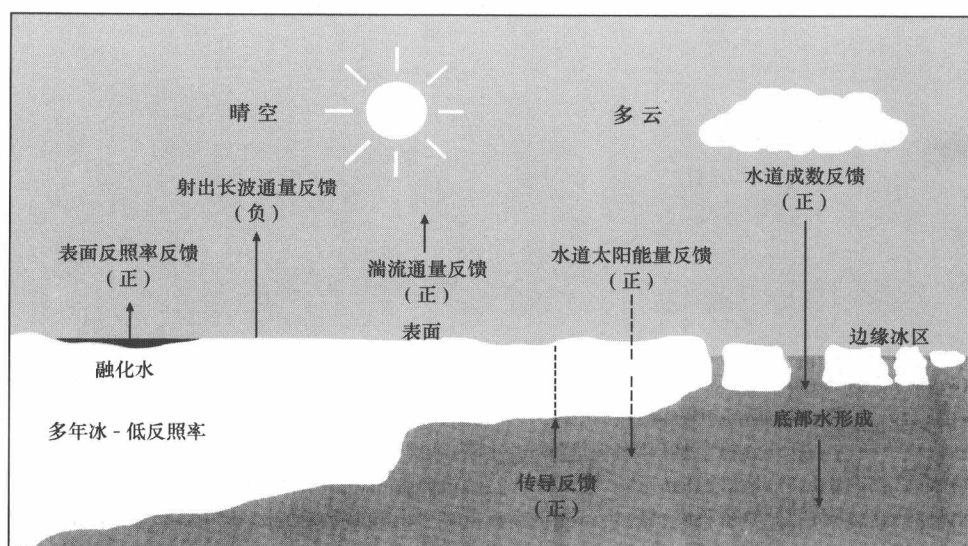


图1-1 描述海冰同其他气候系统的关键相互作用框图(经 E. Hanna 许可,普利茅斯大学)

### 1.3 变化的时间尺度

本书所讨论的冰冻圈各部分的质量平衡,大小从面积  $1.3 \times 10^7 \text{ km}^2$  的南极冰盖一直到仅有几千米长的山谷冰川。本书同时还探讨海冰盖的趋势,正如上面提到的,海冰具有明显的季节变化。因此,简要地讨论变化的时间尺度并把目前的波动放在过去变化的背景下是非常重要的。

目前,南极和格陵兰冰盖覆盖陆地的总面积大约为  $1.36 \times 10^7 \text{ km}^2$ 。21 000 年前的最大冰覆盖期(末次冰期的最大期, LGM),冰覆盖的陆地面积只有该面积的一半。现在的冰盖明显增大,且向大陆架边缘扩展。另外,冰覆盖着北半球  $45^\circ \text{N}$  以北的很多大陆(北美的洛朗蒂德、因纽伊特和科迪勒拉冰盖,欧亚的堪的纳维亚巴伦支海冰盖)、海冰范围也在该时期逐渐增长。因此,对当前冰冻圈所作的任何评估都应建立在发生于末次冰期全球冰消的背景下。该冰消期大约始于14 500年以前,基本结束于11 500年以前。需要说明的是,这些时间上的变化具有明显的区域偏差(例如,科迪勒拉冰盖直到末次冰期最大期的4 000年后才达到其最大值, Clague 和 James, 2002)。从冰期到间冰期的转换并不是一个渐进过程,尤其是它不时地被一个称作新仙女木事件(迄今12 000年前)的能使总冰量不断增多的冷周期所打断。更近的是,全新世时期(上个10 000年),全球经历了几个周期,期间气温变化剧烈,总冰量忽增忽减。前一个例子是介于5 000至6 000年前的第一个气候最佳期(当时全球气温约比现在高  $1^\circ \text{C}$ ),第二个气候最佳期是在公元1 000年,当时出现了对冰岛、拉布拉多和格陵兰等地的维京探险,并建立了格陵兰的农业。相对冰增期使两者分开,后一个终止于小冰期,该冰期以公元1 700年为中心、大约持续了400年。因此,

对目前冰冻圈质量平衡的评估必须以自然变化为背景,时间尺度从大的冰期—间冰期—冰期循环到孤立的世纪尺度事件(例如小冰期)或甚至更短的气候波动(例如准十年尺度的北大西洋涛动)。

表 1-1 气候系统中各部分达到平衡所需的时间尺度(例如它们的响应时间)

| 各组成部分  | 响应时间  |
|--------|-------|
| 自由大气   | 日     |
| 大气边界层  | 小时    |
| 海洋混合层  | 月—年   |
| 深海     | 世纪    |
| 海冰     | 日—世纪  |
| 雪和表面冰  | 小时    |
| 湖泊和江河  | 日     |
| 土壤和植被  | 日—世纪  |
| 冰川     | 十年—世纪 |
| 冰盖     | 千年    |
| 地壳均衡响应 | 千年    |

引自:McGuffie 和 Henderson—Sellers(1997)。

南极洲响应时间的量级在 10 000 年或更久。因此,处于气候系统的最慢项当中(见表 1.1,同深海一样)。该时间尺度主要与冰盖内非常慢的冰流动有关,除冰河等的快速流动区外,速度量级多在每年 1~10 km。冰河等快速流动区的速度量级是每年 1 km,但仅占目前冰盖的一小部分。这里有一个重要的含义,南极洲(可能还有格陵兰)仍响应于以前的气候变化,该变化同发生在约 8 000 年前末次冰期的地球非常时期相联系(第 13 章)。既然冰盖在末次冰期的最大期明显偏大,这表明近来观测到的海平面增长可能归因于该长的时间尺度,而并非是为人为因素。更进一步讲,目前冰盖质量平衡的一部分可能同全新世期间的的气候变化无关。

对陆冰而言,动力响应时间  $t$  同冰体大小成比例(Paterson,1994),其近似关系为

$$t \approx H/a_0 \quad (1.1)$$

$H$  为最大冰厚, $a_0$  是消融速率。在方程 1.1 中,如果采用格陵兰的典型值,由方程(1.1)计算得到的响应时间大约是 3 000 年,而对谷地冰川来说, $t$  的数量级可能是几百年。陆冰是气候不可或缺的组成部分。相比之下,海冰范围直接同中间气候相关,因此,海冰可能是近来气候变化,并且可能是人为气候变化的最早指标之一。在后面的章节中,质量平衡的讨论隐式地同响应时间常数相联系并表示它对来自卫星或站点观测短期记录含义。变化的模拟研究也包括进了各种响应类型的时间尺度。本书的重点是从几十年到千年时间尺度的质量平衡变化,并不讨论冰期—间冰期—冰期变化,因为它们不太可能影响到当前的状态。

## 1.4 地理背景

地球上最大的冰体(是其他冰体的 10 倍)是南极冰盖(第 12 章)。它占了世界上淡水供给量的 80% 左右,覆盖了超过  $1.3 \times 10^7 \text{ km}^2$  的面积。如前所述,冰体的动力响应时间同其大小成正比,因此,它具有本书所讨论的任何冰体中最长的响应时间。相比之下,南半球冬季时,南极海冰覆盖着南大洋多达  $1.9 \times 10^7 \text{ km}^2$  的面积,但有一个增长和衰退的强季节循环,其最小范围少于  $4 \times$

$10^6 \text{ km}^2$ 。从地理上来看,北极的情况完全不同(图1-2)。

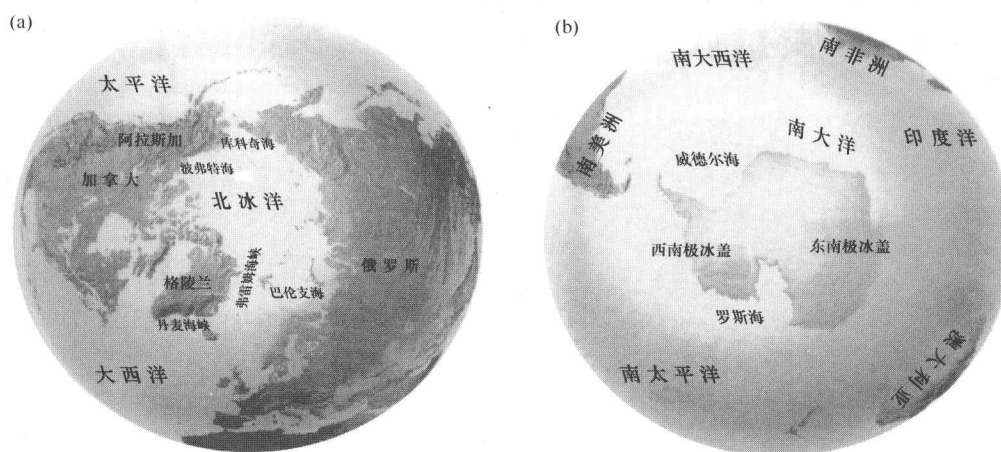


图1-2 极射投影地图。(a)北冰洋及其周围大陆;(b)南极洲和南大洋

北冰洋基本上完全被陆地封锁,只有相对狭窄的通道,例如白令海峡,弗拉姆海峡可供冰或水流入或流出该地区。相比之下,南大洋环绕着大陆,并且有着地球上最大的海流—南极绕极流。这些区别决定了局地气候以及陆地、海冰的表现。东南极的大陆特性导致了它是地球上最干燥的荒漠之一,在部分内陆地区,年降水仅为每年7 cm。而格陵兰的降水大约是每年20~100 cm。格陵兰冰盖面积和体积大约是南极冰盖的1/10,它有广大的消融区(不同于南极冰盖),对气候变化极为敏感。环绕北冰洋的其他岛屿和大陆的冰川化也越来越强。例如,斯瓦尔巴群岛大约有60%的面积冰川化。北极这些小的冰体大约占全球总冰量—除冰盖外的一半。另一半分布在冰川中间,主要是北半球,包括欧洲的阿尔卑斯山、亚洲的喜马拉雅山、喀喇昆仑山以及中亚的其他区域。南半球南极洲之外陆冰量相对较少,例外是巴塔哥尼亚(Patagonian,阿根廷,译者注)冰原,它长达350 km,沿着南美山脊延伸的纬度范围为48~51.5°S,是极地地区以外最大的冰冠。地球上有超过160 000条冰川,长度从几千米到几百千米不等。冰冻圈在其分布、大小、响应时间以及同地球其他部分的相互作用上是极其复杂多样的。对地球系统中的一个如此复杂多样成分进行观测和模拟前景不容乐观,在后面的章节中将阐述这方面的“最新技术进展”,并尽最大努力地尝试迎接这个挑战。

## 参考文献

- Church, J. A. et al. 2001. Changes in sea-level. In Houghton, J. T. and Yihui, D., eds., *IPCC Third Scientific Assessment of Climate Change*. Cambridge University Press, pp. 640–693.
- Ciague, J. J. and James, T. S. 2002. History and isostatic effects of the last ice sheet in southern British Columbia. *Quat. Sci. Rev.* 21 (1–3), 71–88.
- Goosse, H. and Fichefet, T. 2001. Open-ocean convection and polynya formation in a large-scale ice-ocean model. *Tellus Seris a - Dyn. Meteorol. & Oceanography* 53(1), 94–111.
- Houghton, J. T. et al. 2001. *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Cambridge University Press.
- McGuffie, K. and Henderson-sellers, A. 1997. *A Climate Modelling Primer*. Chichester, Wiley.
- Paterson, W. S. B. 1994. *The Physics of Glaciers*, 3rd edn. Oxford, Pergamon.
- Petit, J. R. et al. 1999. Climate and atmospheric history of the past 420 000 years from the Vostok ice core, Antarctica.

*Nature* 399(6735), 429–36.

Stocker, T. F. 2000. Past and future reorganizations in the climate system. *Quat. Sci. Rev.* 19 (1–5), 301–319.

Stossel, A., Yang, K. and Kim, S. J. 2002. On the role of sea ice and convection in a global ocean model. *J. Phys. Oceanography* 32(4), 1194–208.

JONATHAN L. BAMBER 和 ANTONY J. PAYNE

布里斯托尔大学地理科学学院