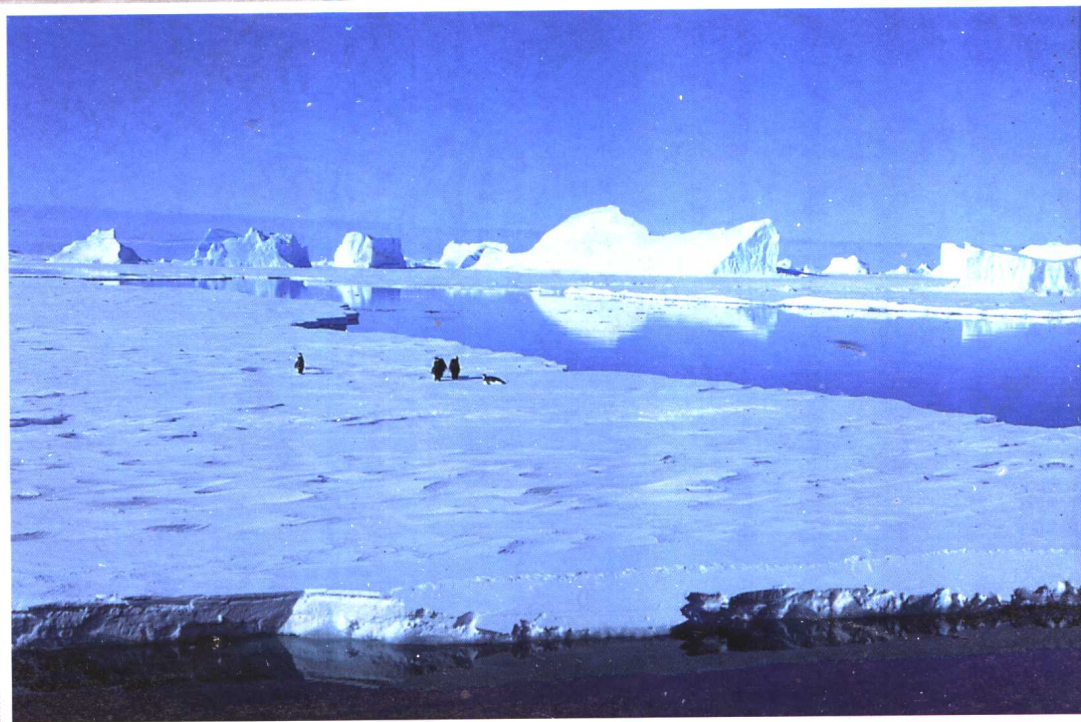




秦大河 任贾文 主编

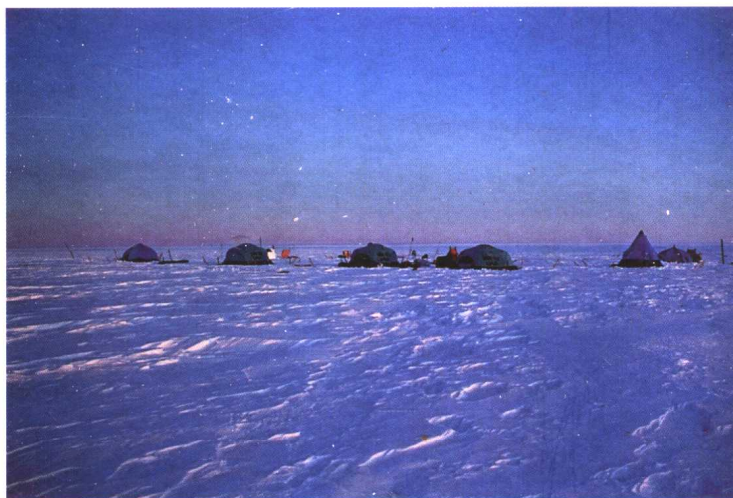
南极冰川学



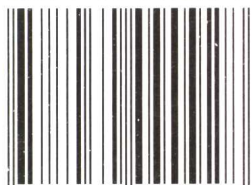
科学出版社

(P-1263.1101)

责任编辑: 吴三保 封面设计: 黄华斌



ISBN 7-03-009092-6



9 787030 090928 >

ISBN 7-03-009092-6/P · 1263

定价: 42.00 元

P3
Q4

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

南 极 冰 川 学

秦大河 任贾文 主编

科 学 出 版 社

2 0 0 1

内 容 简 介

本书是作者们多年从事南极冰川学研究的结晶,全书较全面、综合地介绍了国际南极冰川学研究的主要成果。内容包括:南极冰川学研究的意义以及过去和现状,南极冰盖的基本特征,南极冰盖的物质平衡与海平面变化,南极雪变成冰的过程,南极冰盖的热学特征,南极冰盖的雪冰化学与环境,冰芯气候环境研究等。本书重点集中于冰川物理、化学和生物地球化学过程与记录研究,并将中国冰川工作者具有独到见解的代表性研究成果穿插其中。

本书可供冰川、大气化学、水文、海洋、气象、冻土、地理、地球化学工作者和高等院校有关教师及研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

南极冰川学/秦大河,任贾文主编. —北京:科学出版社,2001

ISBN 7-03-009092-6

I. 南… II. ①秦…②任… III. 冰川学-南极 IV. P343.716.61

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 87390 号

南 极 冰 川 学

秦大河 任贾文 主编

责任编辑 吴三保

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

新蕾印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2001 年 2 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2001 年 2 月第一次印刷 印张:15 3/4

印数:1—1 000 字数:390 000

定价:42.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

**谨以此书纪念
中国开展南极科学研究 20 周年！**

本专著得到下列项目资助：

中国科学院知识创新工程项目（KZCX2-303）

“九五”国家科技攻关计划（98-927-01）

中国科学院“九五”重大项目（KZ951-A1-205）

国家自然科学基金（49971021，40071025）

序 言

自 1958 年中国科学院成立冰川专门研究机构开始,直到 1981 年派谢自楚赴南极参加澳大利亚的冰川考察队为止,即 1958 ~ 1981 年间,我国的冰川学研究为适应当时需求,仅仅是面向国内的,而且主要集中在中国西部。青藏高原和天山是中低纬地区冰川最为集中的区域,顺应“天时、地利、人和”的有利条件,我国在那里首先致力的冰川学研究填补了国际上的空白。但地球上最大的冰盖在南极,自 80 年代起,我们先派员参加国外组织的南极冰川考察队,后来我国有了自己的考察站,我国独立的冰川学研究就围绕站区附近展开。我国南极冰川学研究在以国际合作及独立研究方式达到一定积累的情况下,中国科学院冰芯与寒区环境实验室于 1995 年正式建立,为南极冰川学在我国成长和深化创造了条件。这样,中国的冰川学研究走过了从无到有、从小到大、从国内到南极、从以路线观察为主的冰川学,到定量、半定量化的实验冰川学的漫长道路。

全球变化研究是南极冰川学的主题。由于南极被巨大冰雪覆盖,强烈的雪冰反射率使南极常年处于负的辐射平衡状态下,因而造就了地球上最大的“冷源”,使南极地区成为地球气候变化的“启动区”和“放大器”。极地雪冰量变化将引起全球大气环流、海洋环流以及海平面的变化,这可从第四纪海洋同位素曲线变化主要取决于极地冰量变化的规律予以证明。从这个角度说,南极冰川研究已超越了单纯的冰川学,走向冰川学、气候学、大气化学、海洋学、物理学、第四纪环境变化等多学科的交叉与渗透。本书中“冰盖物质平衡与海平面变化”和“冰芯气候环境研究”的内容,就突出地说明了这一点。

秦大河同志以其对极地冰盖研究的杰出贡献,近年被选任国际南极科学委员会(SCAR)冰川工作组主席和国际雪冰委员会(ICSI)副主席,得以把握南极冰川学的前沿和发展脉络。他还参与撰写了最新一期 IPCC 报告中与极地冰川学有关的章节,为本书中源引最新、最可靠资料提供了保证。在他的带领下,一批年轻人已满腔热情地参与到南极冰川学这项艰苦而豪迈的工作中了。我国南极冰川学实际上已从参加国外考察队、到实施站区考察、再到组织大型考察队深入南极冰盖内陆,在较短时间内实现了推动南极冰川学向国际总体水平看齐的阶段。所以,在这部专著中,除了介绍南极冰川学的基本原理外,着重论述了中国冰川学家对南极冰盖的研究新成果,这是很有意义的。

这里,我祝贺《南极冰川学》的出版,祝愿我国的南极冰川学研究在经历了参与、跟踪学习的阶段后,能达到国际先进水平,能向科学前沿挑战。与此同时,我国冰川工作者在从事全球性冰川调查、监测和研究后,在全球气候环境变化研究方面提出有独到见解的观点,作为一名老冰川工作者,将感到莫大的欣慰。

施 雅 风

2000 年 10 月 15 日

前 言

推出一部较全面介绍南极冰川学理论基础和主要成果的专著，是我们的一桩夙愿。自极地先驱们踏上南极冰盖的那一刻起，南极冰川学就进入了人类的视野，开始了最原始的资料积累。1958年“国际地球物理年”（IGY）后，国际协作大规模冰川调查推动了南极冰川学的飞速发展。由于历史的原因，我国的南极科学研究事业起步较晚，南极冰川学也不例外，短暂的研究历史限制了我们推出这部专著的勇气。但经过近20年不间断地进行实际研究工作，我们已经有了—定的科学积累，对南极冰川学的全貌、现状和前沿有了远较以前深刻的认识，这大大增强了我们的自信心。这部专著就是在经历十多年漫长的酝酿之后，才与大家见面的。

南极冰川学越来越受到“全球变化”研究中前沿问题的召唤。南极地区被IGBP计划列为全球变化研究的关键地区之一，并单列GLOCHANT作为纲领性计划。在南极地区，冰川学是最重要的学科之一，在GLOCHANT计划中，与冰川学相关的计划就有五个，涉及到海平面变化、古气候、现代全球气候环境过程、冰下湖群的形成以及其中的原始生命形态等全球性问题。SCAR冰川工作组对涉及的专题性课题均设立国际协调工作组，以利于国际联合攻关。如何向大家介绍当前南极冰川学发展的现状和方向呢？这就是我们撰写这部专著的初衷。

南极冰川学的发展如同地球科学的许多分支门类一样，在实际观测的基础上形成经验模式，进而形成理论模型。在研究实践的发展过程中，利用先进实验技术和大量新资料的积累，又不断修正和完善理论，反过来又指导研究工作向精确、定量化方向发展。因此，对原理性较强的内容如冰川热学特性、冰川冰的形成过程，本书在介绍了理论体系建立的历史过程后，重点介绍了当前公认逼近真实的理论模型。

主要研究成果的介绍集中于两个方面：过程研究（包括物理、化学和生物地球化学过程）和记录研究。过程研究的内涵较广，与冰川学紧密相关的物理过程有大气环流、冰体动力过程、冰床热力过程、冰/雪/气界面物质、能量交换过程，等等；化学过程有高层（平流层及其以上）大气化学、对流层大气化学、气/雪/冰界面上的化学物质传递，等等；生物地球化学过程则与南大洋海洋生物化学循环过程紧密相关。记录研究介绍了经典的气候变化模式和曲线，尤其对近年的新发现作了重点介绍。南极冰川学研究是国际合作性很强的工作，各国的行动都遵循国际南极研究的纲领性计划（即GLOCHANT及其下属的PICE, ITASE, ISMASS, 等等），以保证不同研究者在有限区域内获得的第一手资料得到规范化和可融合性，如汇集—枝—叶，形成南极冰川学的参天大树。这本书中源引的大部分资料就是在上述—系列科学计划（如PICE, ITASE, ISMASS）指导下做出的最新成果。

关于南极冰川，有些方面的研究中国人是有独到见解的，为此在本书中，我们将中国冰川工作者的代表性成果作为实例穿插在相应的章节中。中国南极考察的重点自“八五”起确立为“全球变化”研究，因此，冰川学被作为优势学科给予重点支持。全球变

化研究的归结点是关注人类福祉和生存环境,因此,南极冰川学责无旁贷地要服务于南极地区对中国乃至世界各地气候、环境变化、生产活动的影响方面。比如,通过海洋-大气-冰雪间的正负反馈作用,南极冰雪面积的消长变化可能放大气候变化的信号,隐含着全球变化的预警信息。南极冰雪的消长受到大气环流,特别是南半球主要大气活动中心异常变化的直接影响,其共同作用会引起南北半球经赤道高低空经向物质输送的变化,从而影响到我国的短期(季度以上尺度)气候变化。因而研究南极地区短期气候变化与南半球大尺度大气环流、特别是主要大气活动中心(SOI,极涡,副热带高压和南方涛动)的时空响应过程,以揭示南极地区热汇强度和冰雪消长与越赤道气流的相互关系,从中可能发现和提取可用于我国旱涝、汛期降水、台风活动、低温冷害等重大气候灾害等的预警信号,这对我国天气气候及国民经济的可持续发展不仅具有重大科学价值,而且具有潜在的经济和社会效益。所以,现正在规划中的国家“十五”南极研究大纲中,冰川学将同大气科学、海洋科学一道,联合进行这方面的攻关。概而言之,地球科学是一门系统科学,南极冰川学同样要走出本学科的圈子,服务于社会。国家科技领域包括中国科学院正在实施知识创新工程,建立国家创新体系。“具有原始创新性”是当代科技潮流对基础性研究的迫切要求,从这个角度讲,我们出版这部著作也正是想说明:我们的路才刚刚开始。

国际上南极冰川学研究的重要成果很多,专题性论著或文集也不少,但综合性全面介绍南极冰川学研究的专著并不多见。其原因恐怕在于:南极冰川学研究的内容很广,每一个方面丰富的成果都可集成巨著,要在一本书中全面介绍,只能提纲挈领地反映其概貌。尽管如此,我们仍希望编纂这部相对比较全面介绍南极冰川学研究最新成果的专著。我们期待着本学科及相关学科同仁们的批评指正,以便再版时改进。

本书为合作成果,是集体劳动的结晶。国家海洋局极地考察办公室多年来对南极冰川学事业的支持,为中国冰川工作者较快融入国际行列提供了根本保证。与中国极地研究所以及国家气象局、教育部、中国科学院其他兄弟单位的多年合作,增强了研究的系统性。在此,我们特别对中国南极冰川学的前辈谢自楚教授表示敬意,感谢与陈立奇教授、董兆乾教授、鄂栋臣教授、P. Mayewski 教授、J. Petit 教授以及秦为稼、钱嵩林、韩健康、卞林根、刘小汉、康建成、孙波、李院生、李忠勤、张明军、汪大立、谭德军、张永亮、高新生等同行的多年愉快的合作。

本书各章的作者在目录和正文中均标出,全书最后的统稿和审定由任贾文负责。施雅风院士在百忙中撰写了序言;完成初稿后,施雅风院士、李吉均院士和程国栋院士阅读了部分章节并提出宝贵意见。张惠兴清绘图件,王晓香打字输入初稿。科学出版社彭斌、吴三保为本书责任编辑,中国科学院寒区旱区环境与工程研究所何兴参与编辑工作。在此,谨对以上提及和未提及的同志们表示衷心的感谢。

秦 大 河
2000年9月10日

目 录

序言	施雅风 (i)
前言	秦大河 (iii)
第一章 绪论	任贾文 秦大河 (1)
第一节 南极冰川学及其意义	(1)
第二节 南极冰盖考察历史简述	(3)
第三节 南极冰盖研究的现状和趋势	(5)
第四节 中国南极冰川学工作者的使命	(7)
第二章 南极冰盖的基本特征	任贾文 张寅生 (10)
第一节 南极冰盖发育历史	(10)
第二节 南极冰盖形态特征	(14)
第三节 冰盖表面能量平衡	(21)
第四节 大气环流和降水	(25)
第三章 南极冰盖的物质平衡与海平面变化	秦大河 效存德 任贾文 (34)
第一节 引言	(34)
第二节 南极冰盖物质平衡概况	(39)
第三节 东南极冰盖的物质平衡	(45)
第四节 西南极冰盖的物质平衡	(51)
第五节 南极冰盖物质平衡状态和变化趋势	(54)
第六节 南极冰盖物质平衡与海平面变化	(55)
第四章 雪转变成冰的过程	任贾文 秦大河 (61)
第一节 雪层剖面	(61)
第二节 成冰机制与成冰带	(65)
第三节 雪的密度变化特征	(69)
第四节 晶体尺寸及生长速率	(73)
第五节 晶体组构	(75)
第六节 气泡	(78)
第五章 南极冰盖的热学特征	任贾文 (82)
第一节 雪和冰的热学性质	(82)
第二节 热量迁移方程	(85)

第三节	近表层温度分布	(87)
第四节	稳定状态温度剖面	(90)
第五节	实测温度剖面	(93)
第六节	模式的应用	(95)
第七节	冰架的温度剖面	(97)
第八节	冰盖底部的热状况	(98)
第六章	雪冰化学与环境	秦大河 孙俊英 任贾文 (104)
第一节	气溶胶的来源和沉积过程	(104)
第二节	主要阴、阳离子	(108)
第三节	含硫化合物 SO_4^{2-} 和 MSA	(125)
第四节	雪冰中 NO_3^- 和 NH_4^+	(138)
第五节	人类活动污染在雪冰中的记录	(155)
第七章	南极冰芯气候环境研究	姚檀栋 效存德 (170)
第一节	引言	(170)
第二节	冰芯断代	(171)
第三节	浅冰芯记录	(181)
第四节	深冰芯记录	(201)
参考文献		(220)
附录：南极地名汉英对照		(238)

Antarctic Glaciology

Chief Editors: Qin Dahe and Ren Jiawen

CONTENTS

Foreword	Shi Yafeng (i)
Preface	Qin Dahe (iii)
Chapter 1 Introduction	Ren Jiawen and Qin Dahe (1)
1. Antarctic glaciology and its significance	(1)
2. Brief history of investigations on the Antarctic Ice Sheet	(3)
3. Situation and prospects of study on the Antarctic Ice Sheet	(5)
4. Antarctic glaciological studies in China	(7)
Chapter 2 Basic Features of the Antarctic Ice Sheet	Ren Jiawen and Zhang Yinsheng (10)
1. Development and changes of the Antarctic Ice Sheet	(10)
2. Morphology of the Antarctic Ice Sheet	(14)
3. Energy budget at the surface of the Antarctic Ice Sheet	(21)
4. Atmospheric circulations and precipitation	(25)
Chapter 3 Mass Balance of the Antarctic Ice Sheet and Sea Level Change	Qin Dahe, Xiao Cunde and Ren Jiawen (34)
1. Introduction	(34)
2. Outline of the Antarctic Ice Sheet mass balance	(39)
3. Mass balance of the East Antarctic Ice Sheet	(45)
4. Mass balance of the West Antarctic Ice Sheet	(51)
5. Current states and change tendency of the Antarctic Ice Sheet mass balance	(54)
6. Mass balance of the Antarctic Ice Sheet and sea level change	(55)
Chapter 4 The Process of Snow Transformation into Ice	Ren Jiawen and Qin Dahe (61)
1. Snow stratigraphic profiles	(61)
2. Mechanism of snow transformation to ice and zonation	(65)

3. Density changes in snow layer	(69)
4. Crystal size and growth in snow layer	(73)
5. Crystal-orientation fabrics of ice	(75)
6. Bubbles	(78)
Chapter 5 Thermal Characteristics of the Antarctic Ice Sheet	Ren Jiawen (82)
1. Thermal properties of snow and ice	(82)
2. Heat transfer equations	(85)
3. Temperature distribution in the near-surface layer	(87)
4. Steady-state temperature profiles	(90)
5. Measured temperature profiles	(93)
6. Application of models	(95)
7. Temperature profiles of ice shelves	(97)
8. Thermal characteristics at the ice sheet bottom	(98)
Chapter 6 Glaciochemistry and Environment	Qin Dahe, Sun Junying and Ren Jiawen (104)
1. Sources and depositional processes of aerosols	(104)
2. Main anions and cations	(108)
3. Sulfur-containing species— SO_4^{2-} and MSA	(125)
4. NO_3^- and NH_4^+ in snow and ice	(138)
5. Pollutant record from human activities in snow and ice	(155)
Chapter 7 Climatic and Environmental Record from Ice Core Study	Yao Tandong and Xiao Cunde (170)
1. Introduction	(170)
2. Ice core dating	(171)
3. Shallow ice-core records	(181)
4. Deep ice-core records	(201)
References	(220)
Appendix: A Chinese – English bilingual list of the place names in Antarctica	(238)

第一章 绪 论

任 贾 文 秦 大 河

第一节 南极冰川学及其意义

南极洲是南极大陆和周围岛屿的总称，位于地球最南端，是地球七大洲中的第五大洲，面积约 $1.4 \times 10^7 \text{ km}^2$ 。南极地区除南极洲之外，还包括南极辐合带以南的海域。通常所说的“南极”广义上是指南极地区，狭义上则仅指南极洲。因此，为使人们明确所指，一般多采用“南极地区”、“南极大陆”等术语。实际上，真正的南极地区北界尚无统一精确的划定。例如，《南极条约》将南极地区北界规定为 60°S 。但是，南极研究科学委员会（SCAR）则将南极辐合带视为南极地区的北界，因为从科学研究角度出发，南极辐合带是比较明显的地理界限。一般来说，南极辐合带被看作是南大洋（南大西洋、南太平洋和南印度洋的总称）的北界。在南极辐合带上，海洋表层为向南流动的暖流，下层则为向东北方向的冷水流。南极辐合带的位置还随季节发生变化，同一季节不同经度上其位置也不尽相同，一般在 $48^\circ \sim 63^\circ\text{S}$ 之间。图 1-1 示意性地表述了南极大陆和南大洋的区域界限。另外，某些南极辐合带以北已有主权所属的岛屿也因与南大洋关系密切而被 SCAR 划入南极研究范畴，如印度洋法国所属的 Crozet 岛 ($46^\circ 26'\text{S}$, $56^\circ 52'\text{E}$) 和 Amsterdam 岛 ($37^\circ 50'\text{S}$, $77^\circ 34'\text{E}$)，印度洋和太平洋交汇区域澳大利亚所属的 Macquaria 岛 ($54^\circ 30'\text{S}$, $158^\circ 60'\text{E}$)，等等。

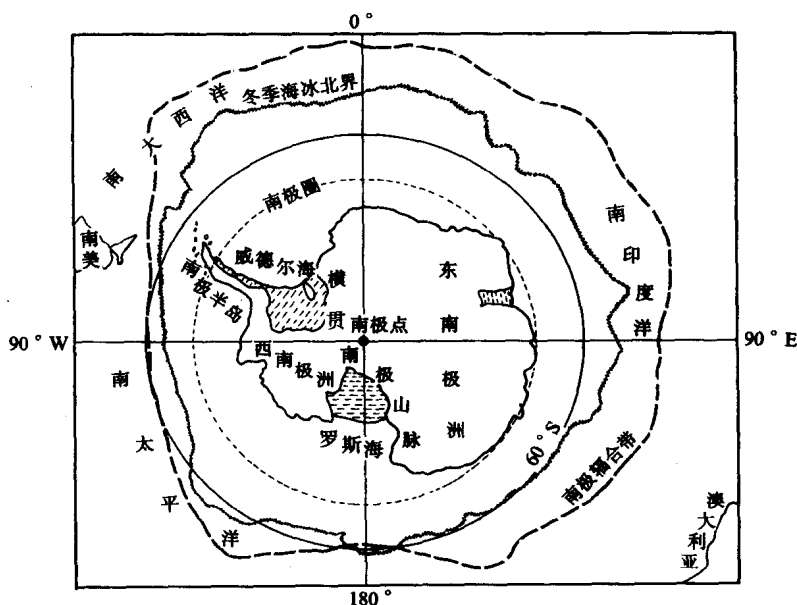


图 1-1 南极洲及南大洋略图

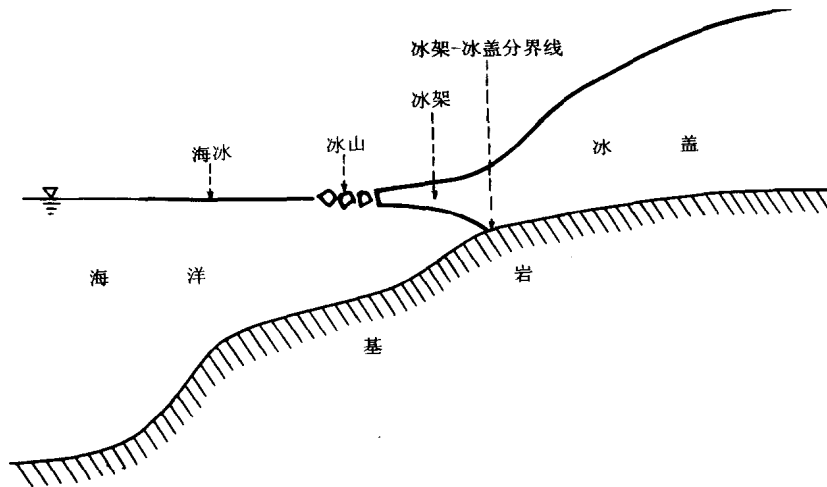


图 1-2 南极冰盖、冰架、冰山及海冰关系示意图

南极大陆是南极洲的主体，其 98% 的面积被冰雪覆盖，这一巨大的冰雪体被称做南极冰盖。它是由降雪不断堆积而形成的，因而其上层（数十米至上百米厚度）为雪，下层是雪在自重作用下经压密而演变形成的冰。占冰盖面积 10% 的冰体延伸到海洋，形成漂浮冰架。南极冰盖（陆地冰与边缘冰架的总和）的总面积约为 $1.38 \times 10^7 \text{ km}^2$ 。南极大陆外围的岛屿绝大部分面积也被冰川或冰帽所覆盖。南大洋数百公里宽度范围内为海冰和冰山分布区。从广义上讲，所有这些陆地上和海洋中的冰体都是南极冰川学的研究对象。它们的形成、演化及其与外界因素之间的关系，它们自身的特征、各种性质及其发生在内部及界面上的各种过程，它们对气候、环境等诸多信息的记录和保存的方式、过程以及这些记录的发掘等是南极冰川学研究的主要内容。

南极地区多种多样的冰雪其存在形式、内部过程、与气候环境的关系各有特色。例如，南极冰盖就像毯子一样覆盖着南极大陆，直接与大气和陆地发生物质交换和相互作用。冰架虽然是冰盖的延伸（图 1-2 示意性描绘了冰盖与冰架的剖面），但却漂浮在海洋中，因而与冰盖、海洋和大气都有很密切的关系。海冰首先由海水冻结而形成，此后则不断接收大气降水（主要是降雪），故此，其物质成分比较复杂。另外，由于海冰是季节性的，其厚度、面积变化不可与冰盖和冰架同日而语。南极大陆边缘和内陆某些山区，因局地特殊地形而形成一些小冰川或冰流（其规模往往比中低纬度的大冰川还要大，但与冰盖相比则极其渺小），其运动速度、进退变化等与大陆冰盖很不相同。南极大陆外围的一些岛屿，有些处在气候比较温暖湿润的亚南极地区（比如南设得兰群岛），其物理特征的某些方面与中低纬度的冰川有些相似，而与南极冰盖相差甚远（Ren Jia-wen et al., 1995）。由于南极冰盖是南极雪冰的主体，因此本书中我们主要介绍南极冰盖的研究情况。南极大陆及其外围岛屿上的小冰川和冰帽，相对来说，研究成果不够广泛和丰富。南极海冰在全球变化中具有很重要的作用（Weller, 1989, 1993），正因为如此，海冰研究内容极为丰富，而且与海洋学等交叉非常深入，某些方面已超越了冰川学范畴而以其他学科为主。考虑到一部著作不可能包罗太多内容，尤其是不宜纳入以其他学科为主的内容，故此本书对海冰也不予涉及。

南极冰盖是地球表面最大的冰川和淡水资源。例如, 南极冰盖许多地点的厚度超过了 4 000 m, 平均厚度约为 2 450 m, 冰储量占全球冰川的 90%, 占全球淡水总量的 70% 左右。因此, 南极地区冰量的增减对全球海平面变化、水分循环等有巨大影响。据南极冰盖体积的估算值 (Drewry, 1983), 南极冰盖全部融化将会使全球海平面上升 60 ~ 70 m。

由于冰雪反射率极高, 南极地区处于负的辐射平衡状态, 因而有人形象地称南极地区的冰雪为地球的“冰箱”(Weller, 1989)。南极洲冰雪面积的变化无疑将会导致全球大气和海洋环流的变化。

南极冰盖中储存有非常丰富和详细的全球气候和大气环境变化的记录, 其时间尺度长达上百万年。与其他类型的气候环境记录相比, 冰芯记录具有保真度好、信息量大、分辨率高等独特优势, 通过南极冰芯研究, 恢复地球的气候环境变化史是全球变化研究的重要内容, 也是使南极冰川学研究倍受重视的最主要原因之一。

南极冰盖运动过程和冰量变化对地壳运动有重要作用。南极冰盖内冰的变形规律研究对地球岩石圈的变形研究具有借鉴意义 (Robin and Swithinbank, 1987)。

以上几个方面说明, 南极冰川学研究不仅对冰川学本身的发展, 更重要的是对全球变化和其他学科研究具有重要意义。正因为如此, 南极冰川学研究近几十年来发展迅猛, 成果卓著, 特别是南极雪冰气候环境记录的研究, 如 Vostok 冰芯提供的数十万年气候环境记录 (如 Jouzel et al., 1987; Petit et al., 1999), 引起了科学界及社会上广泛的兴趣。

第二节 南极冰盖考察历史简述

南极洲是地球上惟一个没有土著居民的大陆。人类涉足该大陆及邻近海域的活动只是近 200 多年来的事情。在这 200 多年内, 人们在南极洲的活动大致可分为 3 个阶段: 20 世纪初以前的探险时期; 20 世纪初至 50 年代的航空勘察和初步考察时期; 20 世纪 50 年代末期以后的定位站科学考察时期。

英国人 J. Cook 船长于 1772 ~ 1775 年率队在南大洋的航行揭开了南极探险的序幕。Cook 虽未发现、也未登上南极地区的陆地, 但他数次环绕南极的航行为后人进一步向南挺进奠定了基础。1820 年前后英国人 E. Bransfield、俄国人 T. Bellingshausen 和美国人 N. Palmer 等不同国家的探险者在航海探险中发现了南设得兰群岛中的某些岛屿, 还再向南到达南极半岛附近, 但是对谁首先发现南极大陆长期争论不休。20 世纪初, 南极大陆内陆探险活跃起来。最有名的南极大陆内陆探险是 1911 年底至 1912 年初挪威的 R. Amundsen 和英国的 R. F. Scott 率领考察队向南极点进军的竞赛。结果是 Amundsen 等人于 12 月率先到达南极点, Scott 等人一个月后第二批抵达。Scott 等人虽然未能生还, 但他们遗留的考察笔记与其他人的资料一起成为后人继续探索南极大陆的宝贵经验和精神财富。关于早期的南极探险已有不少书籍予以介绍, 比如 Lovering 和 Prescott (1979) 的专著就是一例。

第一次世界大战以后, 许多国家对南极洲的考察兴趣日渐浓厚。20 至 30 年代, 美国人多次飞越南极大陆, 进行大面积航空勘察和测量, 为全面了解南极洲的概貌和绘制

南极地形图提供了丰富的资料 (Saunders, 1933)。与此同时, 陆地考察中除了对南极冰盖的表面形态和粒雪的某些特征进行观测外, 还开始应用地球物理探测方法测量冰体的厚度。至 1957~1958 国际地球物理年之前, 最突出的冰川学考察可能是 1949~1952 年挪威-英国-瑞典联合考察队所做的工作。该考察队应用地震法对南极冰盖的厚度进行了首次比较可靠的测量 (Schytt, 1953; Robin, 1958), 开展了数十米深度钻孔的冰芯取样试验, 并对粒雪的粒径和结构进行了详细的观测 (Schytt, 1958)。

1957~1958 的国际地球物理年开创了对南极冰盖的大规模测量和定位站观测研究的崭新时代。当时, 10 多个国家在南极洲建立的考察站达数十个 (尽管后来有一些考察站曾经关闭), 上万人登上南极冰盖, 广泛开展国际联合考察项目, 成为仅次于登月计划的国际科学行动。他们应用地震测厚和气压测高对南极冰盖展开大范围测量, 对冰盖表面物质积累速率和温度等进行观测, 打钻取样观测研究冰盖内部物理特征。浅冰芯取样钻曾先用于格陵兰, 在南极考察中得到改进, 如 10m 深度轻型手摇取样钻基本定型, 为探测年平均温度、确定积累速率和表层粒雪的物理特征提供了便利; 中等深度打钻技术也已发展起来, 在 Byrd 站和 Ross 冰架上打钻至 200~300m 深度 (Patenaude, 1959; Ragle, 1960)。到 60 年代初, 所获得的资料使人们能够做出南极冰盖表面和底床形态、冰厚度、积累率和表面年平均温度等一系列重要参数的基本轮廓图 (Bentley, 1962; Thiel, 1962), 使人们得以了解南极冰盖的概貌。

60 年代, 各种测量技术迅速发展, 尤其是利用卫星测高、无线电回波测深和深孔冰芯取样等技术使南极冰川学研究突飞猛进。尽管极地地区卫星覆盖区域有限, 高度测量的精度不是很高, 特别是要监测冰面高度变化还有困难, 但对大范围全面了解冰盖表面地形和确定冰面运动速度很有帮助。无线电回波测深是当时冰川探测技术最辉煌的成就, 因为它能使人们获得冰体厚度、冰下地形、冰内构造等诸多重要信息。例如, 有名的 Vostok 冰下湖就是这一时期被初步探测确定的。冰芯钻取技术发展也极为迅速, 在 Byrd 站完成了到达底床 (深度 2 164m) 的打钻和取样 (Ueda and Garfield, 1970), 这一冰芯钻取的深度记录一直保持到 80 年代末。与此相伴, 雪冰的物理性质和冰盖动力学研究也广泛开展, 冰芯的化学分析开始展示了冰芯研究的潜力。

70 年代以冰盖模式和动力学研究最具特色, 期间冰芯分析技术也有了长足的进展。自 1969 年开始的国际南极冰川学计划 (IAGP) 对东南极一个较大的扇形区 (60°E 和 160°E 及 80°S 之间) 进行深入细致的国际合作研究, 获取了从冰盖边缘向内陆往复几条交叉路线上的冰川学基础资料和多个 1 000m 深度内冰芯综合分析资料, 通过计算机数值模拟, 得出了东南极冰盖动力学特征、温度分布等参数的纵剖面图 (Budd et al., 1971, 1976), 建立了理论三维模型 (Jenssen, 1977)。同时对南极冰盖冰雪样品的晶体组构和流变特性的实验研究也广泛开展。冰芯研究则一方面对 Byrd 冰芯进行分析总结, 另一方面在 Dome C、Vostok 和 Law Dome 等地进行新的冰芯钻取。其中 Dome C 和 Vostok 冰芯钻取都达 900 多米深度, Law Dome 也有数百米。分析内容除稳定同位素外, 还增加了气体含量、微粒浓度、痕量元素等 (Lorius et al., 1979; Petit et al., 1981; Raynaud and Lebel, 1979; Thompson, 1977; Boutron and Lorius, 1979; Delmas and Ascencio, 1980)。

进入 80 年代后, 在冰结构和流变规律及动力学模拟研究的大量成果得到总结 (如 Budd and Jacka, 1989; Jacka, 1984; Duval, 1981; Alley, 1988) 的同时, 由于人们对全球

变化问题的日益关心和南极冰盖与全球气候、环境变化的密切关系, 南极冰盖与全球变化研究得到更多重视, 研究重点主要放在两个大的方面: 一是冰盖本身状态 (主要是物质平衡状态和动力平衡状态) 的变化及其对海平面变化、气候和环境变化的影响; 另一个是冰/雪芯中环境和气候信息的发掘。前者主要基于利用卫星遥感和测量技术监测冰盖表面形态和冰盖体积变化、物质积累速率的实地详细观测以及冰盖与海洋、大气之间的模式研究, 但由于需积累大范围长时期的基本资料, 因此尽管进行了许多测量和研究, 仍处于资料积累阶段。冰芯研究则以 Vostok 站 2 083m 深度冰芯分析结果为代表。该冰芯虽未达底床, 但仍为当时年代最老的一支冰芯, 稳定同位素、CO₂ 气体及微粒等研究给出了近 16 万年以来气候和环境变化序列 (Jouzel et al., 1987; Barnola et al., 1987; Angelis et al., 1987)。冰芯分析内容进一步丰富, 尤其是离子浓度、生物有机酸、痕量金属及气体成分等化学分析技术发展迅猛, 展示了从南极冰盖中提取更多、更详细的环境和气候信息的广阔前景。

90 年代以来, 南极冰芯的钻取深度进一步加大, 例如, Vostok 冰芯的钻取深度超过了 3 600m, 时间尺度达 42 万年 (Petit et al., 1999)。另外一些地点的冰芯研究也取得很大进展, 如 Law Dome 到达底床的 1 200 多米冰芯研究 (Morgan et al., 1997), Dome F 的 2 500m 冰芯钻取 (Dome - F Deep Coring Group, 1998a, b), 等等。同时, 浅冰芯和表面雪层的研究得到更多的重视, 这是因为对深冰芯资料的合理解释必须建立在对现代气候环境的充分认识之上, 而且人类活动对地球环境产生重要影响也仅仅是近 200 年来的事。另外, 浅冰芯研究所获得的气候环境记录分辨率更高, 年代更准确。所以说, 短时间尺度冰芯记录也具有特殊重要性。因此, 自 90 年代初开始, 许多在南极建站的国家参与了国际横穿南极科学考察计划 (ITASE), 对南极冰盖表面特征和现代气候环境记录进行了大范围的同步研究。

第三节 南极冰盖研究的现状和趋势

80 年代末 90 年代初, 国际南极研究科学委员会 (SCAR) 为了响应国际全球变化研究的重大计划——IGBP (国际地圈 - 生物圈计划), 拟定了南极地区全球变化研究的大纲——GLOCHANT (Global Change and The Antarctic), 确定了南极地区全球变化研究的 6 个重点领域: 1) 南极海冰区在全球地圈 - 生物圈系统中的相互作用和反馈; 2) 南极冰盖、海洋和陆地沉积物内的古环境记录; 3) 南极冰盖的物质平衡与海平面变化; 4) 南极地区平流层臭氧、对流层大气化学、紫外辐射对生物圈的影响; 5) 南极地区的大气与海洋在全球生物地球化学循环和交换中的作用; 6) 监测南极地区的环境, 监测南极地区的全球变化 (Weller, 1989, 1993)。可以看到, 南极冰盖的变化和雪冰气候环境记录研究是南极冰盖在全球变化研究中最重要两个方面。

从前面南极冰盖研究历史的简单回顾可以看到, 虽然南极冰盖的科学考察仅仅几十年, 但发展很快, 成就斐然。特别是随着全球变化受到重视, 人们对南极冰盖的研究给予愈来愈多的关注。至 80 年代, 南极冰盖基本形态和物理特征大致上已搞得比较清楚了; 计算机的发展为冰盖模拟研究中复杂模型的建立提供了技术手段; 十几万年时间尺度冰芯气候环境记录的获得令人振奋。