

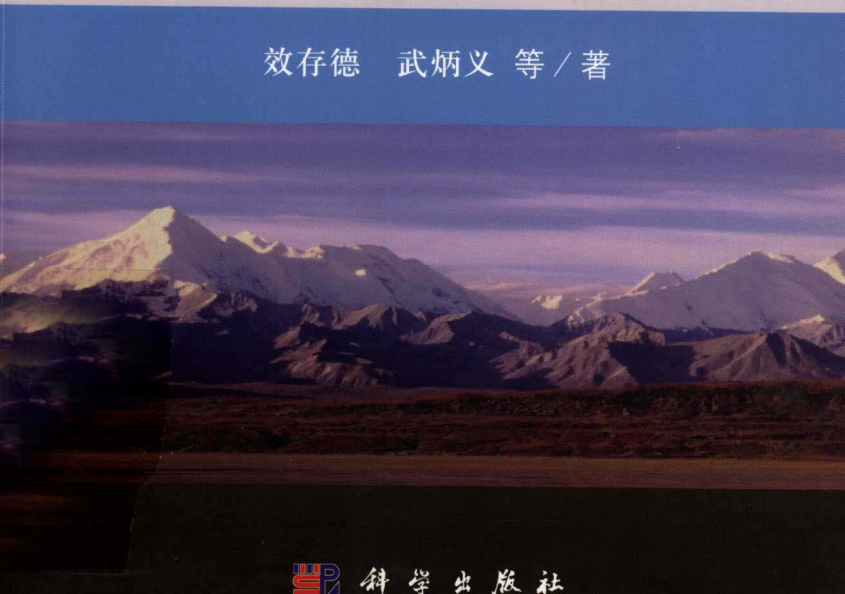
“十三五”国家重点出版物出版规划项目

冰冻圈变化及其影响研究

丛书主编 丁永建 丛书副主编 效存德

极地冰冻圈关键过程 及其对气候的响应机理研究

效存德 武炳义 等 / 著



科学出版社



“三五”国家重点出版物出版规划项目

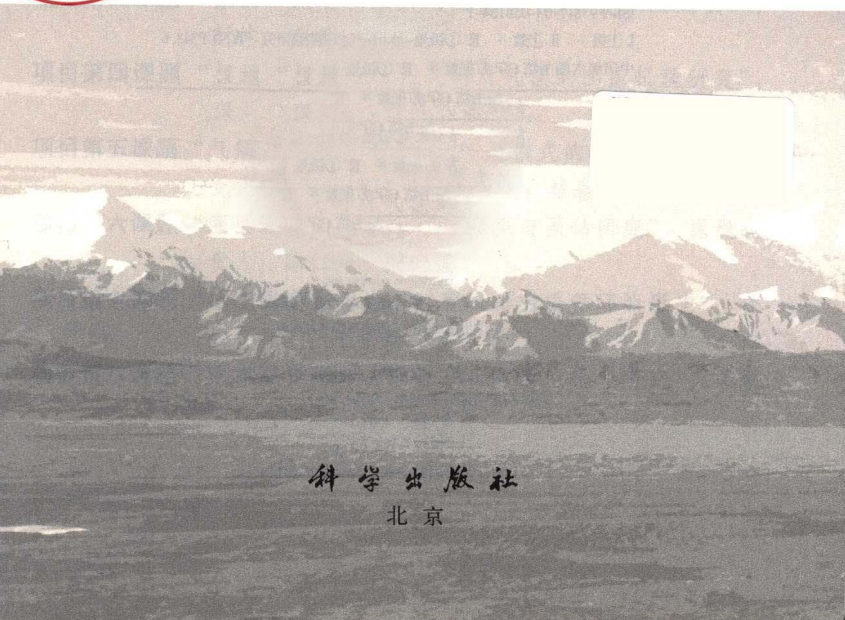
冰冻圈变化及其影响研究

丛书主编 丁永建 丛书副主编 效存德

极地冰冻圈关键过程 及其对气候的响应机理研究



效存德 武炳义 等 / 著



科学出版社
北京

内 容 简 介

本书较系统地总结了近年来我国主要极地冰冻圈学者对南、北极冰盖和海冰关键过程及其对气候响应机理方面的研究成果。主要体现在对南极冰盖和格陵兰冰盖物质平衡计算与模拟、高度计和重力卫星对冰盖冰量变化的算法改进、冰盖-冰架动力学模型的研发、影响冰盖稳定性的冰-气界面过程、冰内过程和冰-岩界面过程观测研究；以及南北极海冰变化特征研究、北极海冰变化对气候的影响与反馈作用研究、南北极海冰变化的长期序列重建等方面。

本书可供对冰冻圈、地理、气候、海洋、水文、生态和环境等相关领域感兴趣的大专以上学历人员、相关科研和教学人员以及政府管理部门有关人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

极地冰冻圈关键过程及其对气候的响应机理研究 / 效存德等著. —北京: 科学出版社, 2019. 1

(冰冻圈变化及其影响研究 / 丁永建主编)

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

ISBN 978-7-03-058134-1

I. ①极… II. ①效… III. ①极地-冰川-气候影响-研究 IV. ①P343.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 135034 号

责任编辑: 李 敏 / 责任校对: 彭 涛

责任印制: 张 伟 / 封面设计: 黄华斌

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京虎彩文化传播有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 1 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2019 年 1 月第一次印刷 印张: 20

字数: 470 000

定价: 198.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

《冰冻圈变化及其影响研究》丛书得到下列项目资助

- 全球变化国家重大科学研究计划
“冰冻圈变化及其影响研究” (2013CBA01800)
- 国家自然科学基金创新群体项目
“冰冻圈与全球变化” (41421061)
- 国家自然科学基金重大项目
“中国冰冻圈服务功能形成过程及其综合区划研究” (41690140)

本书由下列项目资助

- 全球变化国家重大科学研究计划“冰冻圈变化及其影响研究”项目
“极地冰雪关键过程及其对气候的响应机理研究”课题 (2013CBA01804)
- 国家杰出青年科学基金项目
“极地冰冻圈” (41425003)

全球变化国家重大科学研究计划
“冰冻圈变化及其影响研究” (2013CBA01800) 项目

项目首席科学家 丁永建

项目首席科学家助理 效存德

项目第一课题 “山地冰川动力过程、机理与模拟”，课题负责人：
任贾文、李忠勤

项目第二课题 “复杂地形积雪遥感及多尺度积雪变化研究”，课题
负责人：张廷军、车涛

项目第三课题 “冻土水热过程及其对气候的响应”，课题负责人：
赵林、盛煜

项目第四课题 “极地冰雪关键过程及其对气候的响应机理研究”，
课题负责人：效存德

项目第五课题 “气候系统模式中冰冻圈分量模式的集成耦合及气候
变化模拟试验”，课题负责人：林岩奎、王磊

项目第六课题 “寒区流域水文过程综合模拟与预估研究”，课题负
责人：陈仁升、张世强

项目第七课题 “冰冻圈变化的生态过程及其对碳循环的影响”，课
题负责人：王根绪、宜树华

项目第八课题 “冰冻圈变化影响综合分析与适应机理研究”，课题
负责人：丁永建、杨建平

《冰冻圈变化及其影响研究》丛书编委会

主 编 丁永建 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所 研究员
副主编 效存德 北京师范大学 中国气象科学研究院 研究员
编 委 (按姓氏汉语拼音排序)

车 涛 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所 研究员
陈仁升 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所 研究员
李忠勤 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所 研究员
林岩璠 清华大学 教授
任贾文 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所 研究员
盛 煜 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所 研究员
苏 洁 中国海洋大学 教授
王澄海 兰州大学 教授
王根绪 中国科学院成都山地灾害与环境研究所 研究员
王 磊 中国科学院青藏高原研究所 研究员
杨建平 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所 研究员
宜树华 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所 研究员
张世强 西北大学 教授
张廷军 兰州大学 教授
赵 林 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所 研究员

秘 书 组

王世金 中国科学院寒区环境与工程研究所 副研究员
王生霞 中国科学院寒区环境与工程研究所 助理研究员
赵传成 兰州城市学院 副教授
上官冬辉 中国科学院寒区环境与工程研究所 研究员

《极地冰冻圈关键过程
及其对气候的响应机理研究》
著者名单

主	笔	效存德	武炳义			
成	员	张东启	丁明虎	唐学远	崔祥斌	杨元德
		李传金	王叶堂	郭井学	苏洁	张通
		张胜凯	谢爱红	周春霞	窦挺峰	杨佼
		柳景峰				

■ 序 — ■

1972年世界气象组织(WMO)在联合国环境与发展大会上首次提出了“冰冻圈”(又称“冰雪圈”)的概念。20世纪80年代全球变化研究的兴起使冰冻圈成为气候系统的五大圈层之一。直到2000年,世界气候研究计划建立了“气候与冰冻圈”核心计划(WCRP-CLIC),冰冻圈由以往多关注自身形成演化规律研究,转变为冰冻圈与气候研究相结合,拓展了研究范畴,实现了冰冻圈研究的华丽转身。水圈、冰冻圈、生物圈和岩石圈表层与大气圈相互作用,称为气候系统,是当代气候科学研究的主体。进入21世纪,人类活动导致的气候变暖使冰冻圈成为各方瞩目的敏感圈层。冰冻圈研究不仅要关注其自身的形成演化规律和变化,还要研究冰冻圈及其变化与气候系统其他圈层的相互作用,以及对社会经济的影响、适应和服务社会的功能等,冰冻圈科学的概念逐步形成。

中国科学家在冰冻圈科学建立、完善和发展中发挥了引领作用。早在2007年4月,在科学技术部和中国科学院的支持下,中国科学院在兰州成立了国际上首次以冰冻圈科学命名的“冰冻圈科学国家重点实验室”。是年七月,在意大利佩鲁贾(Perugia)举行的国际大地测量和地球物理学联合会(IUGG)第24届全会上,国际冰冻圈科学协会(IACS)正式成立。至此,冰冻圈科学正式诞生,中国是最早用“冰冻圈科学”命名学术机构的国家。

中国科学家审时度势,根据冰冻圈科学的发展和社会需求,将冰冻圈科学定位于冰冻圈过程和机理、冰冻圈与其他圈层相互作用以及冰冻圈与可持续发展研究三个主要领域,摆脱了过去局限于传统的冰冻圈各要素独立研究的桎梏,向冰冻圈变化影响和适应方向拓展。尽管当时对后者的研究基础薄弱、科学认知也较欠缺,尤其是冰冻圈影响的适应研究领域,则完全空白。2007年,我作为首席科学家承担了国家重点基础研究发展计划(973计划)项目“我国冰冻圈动态过程及其对气候、水文和生态的影响机理与适应对策”任务,亲历其中,感受深切。在项目设计理念上,我们将冰冻圈自身的变化过程及其对气候、水文和生态的影响作为研究重点,尽管当时对冰冻圈科学的内涵和外延仍较模糊,但项目组骨干成员反复讨论后,提出了“冰冻圈—冰冻圈影响—冰冻圈影响的适应”这一主体研究思路,这已经体现了冰冻圈科学核心理念。当时将冰冻圈变化影响的脆弱性和适应性研究作为主要内容之一,在国内外仍属空白。此种情况下,我们做前人未做之事,大胆实践,实属创新之举。现在回头来看,其又具有高度的前瞻性。通过这一项目研究,不仅积累了研究经验,更重要的是深化了对冰冻圈科学内涵和外延的认识水平。在此基础上,通过进一步凝练、提升,提出了冰冻圈“变化—影响—适应”的核心科学内涵,并成为开展重大研究项目的指导思想。2013年,全球变化研究国家重大科学研究计划首次设立了重大科学目标导向项目,即所谓

的“超级973”项目，在科学技术部支持下，丁永建研究员担任首席科学家的“冰冻圈变化及其影响研究”项目成功入选。项目经过4年实施，已经进入成果总结期。该丛书就是对上述一系列研究成果的系统总结，期待通过该丛书的出版，对丰富冰冻圈科学的研究内容、夯实冰冻圈科学的研究基础起到承前启后的作用。

该丛书共有9册，分8册分论及1册综合卷，分别为《山地冰川物质平衡和动力过程模拟》《北半球积雪及其变化》《青藏高原多年冻土及变化》《极地冰冻圈关键过程及其对气候的响应机理研究》《全球气候系统中冰冻圈的模拟研究》《冰冻圈变化对中国西部寒区径流的影响》《冰冻圈变化的生态过程与碳循环影响》《中国冰冻圈变化的脆弱性与适应研究》及综合卷《冰冻圈变化及其影响》。丛书针对冰冻圈自身的基础研究，主要围绕冰冻圈研究中关注点高、瓶颈性强、制约性大的一些关键问题，如山地冰川动力过程模拟，复杂地形积雪遥感反演，多年冻土水热过程以及极地冰冻圈物质平衡、不稳定性等关键过程，通过这些关键问题的研究，对深化冰冻圈变化过程和机理的科学认识将起到重要作用，也为未来冰冻圈变化的影响和适应研究夯实了冰冻圈科学的认识基础。针对冰冻圈变化的影响研究，从气候、水文、生态几个方面进行了成果梳理，冰冻圈与气候研究重点关注了全球气候系统中冰冻圈分量的模拟，这也是国际上高度关注的热点和难点之一。在冰冻圈变化的水文影响方面，对流域尺度冰冻圈全要素水文模拟给予了重点关注，这也是全面认识冰冻圈变化如何在流域尺度上以及在多大程度上影响径流过程和水资源利用的关键所在；针对冰冻圈与生态的研究，重点关注了冰冻圈与寒区生态系统的相互作用，尤其是冻土和积雪变化对生态系统的影响，在作用过程、影响机制等方面的深入研究，取得了显著的研究成果；在冰冻圈变化对社会经济领域的影响研究方面，重点对冰冻圈变化影响的脆弱性和适应进行系统总结。这是一个全新的研究领域，相信中国科学家的创新研究成果将为冰冻圈科学服务于可持续发展，开创良好开端。

系统的冰冻圈科学研究，不断丰富着冰冻圈科学的内涵，推动着学科的发展。冰冻圈脆弱性和风险是冰冻圈变化给社会经济带来的不利影响，但冰冻圈及其变化同时也给社会带来惠益，即它的社会服务功能和价值。在此基础上，冰冻圈科学研究团队于2016年又获得国家自然科学重大基金项目“中国冰冻圈服务功能形成机理与综合区划研究”的资助，从冰冻圈变化影响的正面效应开展冰冻圈在社会经济领域的研究，使冰冻圈科学从“变化—影响—适应”深化为“变化—影响—适应—服务”，这表明中国科学家在推动冰冻圈科学发展的道路上不懈的思考、探索和进取精神！

该丛书的出版是中国冰冻圈科学研究进入国际前沿的一个重要标志，标志着中国冰冻圈科学开始迈入系统化研究阶段，也是传统只关注冰冻圈自身研究阶段的结束。在这继往开来的时刻，希望《冰冻圈变化及其影响》丛书能为未来中国冰冻圈科学研究提供理论、方法和学科建设基础支持，同时也希望对那些对冰冻圈科学感兴趣的相关领域研究人员、高等院校师生、管理者学习有所裨益。

李大河

中国科学院院士

2017年12月

■ 序 二 ■

冰冻圈是气候系统的重要组成部分，在全球变化研究中具有举足轻重的作用。在科学技术部全球变化研究国家重大科学研究计划支持下，以丁永建研究员为首席的研究团队围绕“冰冻圈变化及其影响研究”这一冰冻圈科学中十分重要的命题开展了系统研究，取得了一批重要研究成果，不仅丰富了冰冻圈科学研究积累，深化了对相关领域的科学认识水平，而且通过这些成果的取得，极大地推动了我国冰冻圈科学向更加广泛的领域发展。《冰冻圈变化及其影响》系列专著的出版，是冰冻圈科学向深入发展、向成熟迈进的实证。

当前气候与环境变化已经成为全球关注的热点，其发展的趋向就是通过科学认识的深化，为适应和减缓气候变化影响提供科学依据，为可持续发展提供强力支撑。冰冻圈科学是一门新兴学科，尚处在发展初期，其核心思想是将冰冻圈过程和机理研究与其变化的影响相关联，通过冰冻圈变化对水、生态、气候等的影响研究，将冰冻圈与区域可持续发展联系起来，从而达到为社会经济可持续发展提供科学支撑的目的。该项目正是沿着冰冻圈变化—影响—适应这一主线开展研究的，抓住了国际前沿和热点，体现了研究团队与时俱进的创新精神。经过4年的努力，项目在冰冻圈变化和影响方面取得了丰硕成果，这些成果主要体现在山地冰川物质平衡和动力过程模拟、复杂地形积雪遥感及多尺度积雪变化、青藏高原多年冻土及变化、极地冰冻圈关键过程及其对气候的影响与响应、全球气候系统中冰冻圈的模拟研究、冰冻圈变化对中国西部寒区径流的影响、冰冻圈生态过程与机理及中国冰冻圈变化的脆弱性与适应等方面，全面系统地展现了我国冰冻圈科学最近几年取得的研究成果，尤其是在冰冻圈变化的影响和适应研究具有创新性，走在了国际相关研究的前列。在该系列成果出版之际，我为他们取得的成果感到由衷的高兴。

最近几年，在我国科学家推动下，冰冻圈科学体系的建设取得了显著进展，这其中最重要的就是冰冻圈的研究已经从传统的只关注冰冻圈自身过程、机理和变化，转变为冰冻圈变化对气候、生态、水文、地表及社会等影响的研究，也就是关注冰冻圈与其他圈层相互作用中冰冻圈所起到的主要作用。2011年10月，在乌鲁木齐举行的 International Symposium on Changing Cryosphere, Water Availability and Sustainable Development in Central Asia 国际会议上，我应邀做了 *Ecosystem services, Landscape services and Cryosphere services* 的报告，提出冰冻圈作为一种特殊的生态系统，也具有服务功能和价值。当时的想法尽管还十分模糊，但反映的是冰冻圈研究进入社会可持续发展领域的一个方向。令人欣慰的是，经过最近几年冰冻圈科学的快速发展及其认识的不断深化，该系列丛书在冰冻圈科学体系建设的研究中，已经将冰冻圈变化的风险和服务作为冰冻圈科学

进入社会经济领域的两大支柱，相关的研究工作也相继展开并取得了初步成果。从这种意义上来说，我作为冰冻圈科学发展的见证人，为他们取得的成果感到欣慰，更为我国冰冻圈科学家们开拓进取、兼容并蓄的创新精神而感动。

在《冰冻圈变化及其影响》系列丛书出版之际，谨此向长期在高寒艰苦环境中孜孜以求的冰冻圈科学工作者致以崇高敬意，愿中国冰冻圈科学研究在砥砺奋进中不断取得辉煌成果！



中国科学院院士

2017年12月

■ 前 言 ■

在当今全球变暖的大背景下, 极地冰冻圈对气候的响应以快速、过程的非线性以及难以准确预测为特点。不突破这些难题将难以回答当今气候系统和可持续发展领域面临的诸多挑战: 全球海平面上升、极端天气气候事件频发、极区航道、防灾减灾和风险管理, 等等。

对南极冰盖和格陵兰冰盖而言, 20 世纪 90 年代之前, 由于缺乏技术, 对冰盖整体物质平衡变化的定量计算非常困难, 但之后随着三大卫星技术(高度计、合成孔径雷达、重力计)的使用, 对冰盖整体物质平衡和冰量估算的进展取得了历史性突破。同样, 对北极海冰和南大洋海冰整体变化的认识, 很大程度上也是借助卫星时代以来的技术进步。当然, 这些先进技术的利用并不能替代精细化的地面观测, 尤其针对关键过程和机理的观测研究。只有将过程研究、长期观测、数据融合与同化、统计、数值模型构建有机结合起来, 才可能取得上述科学问题上的突破。

中国是极地研究的后起国, 研究积累与西方发达国家相比还有较大差距。为此, 在 973 计划气候变化专项 A 类项目“冰冻圈变化及其影响研究”第四课题“极地冰雪关键过程及其对气候的响应机理研究”立项之初, 构想如何抓住极地冰冻圈的几个关键前沿科学问题, 既利用我国极地科学考察在某些断面和海区的独特优势, 又充分利用国际极地观测技术和数据的优势, 加上在算法改进和关键模型的自主研发上发力, 做出具有国际同等水平的科研成果, 成为课题设计的出发点。鉴于此课题着力于开展如下几方面难题的研究: ①影响冰盖动力稳定性的界面过程: 冰-气界面过程(表面物质平衡)、冰内过程、冰岩界面过程、冰架-海洋界面过程; ②北极海冰快速变化过程; ③北极海冰变化的影响; ④构建长时间序列, 研究极地冰冻圈的稳定性规律。

经过大约 4 年的努力, 我们较好地完成了当初的设计。当然, 研究仍有诸多不足, 本书是对课题的较系统总结, 希望广大读者对其中的不足之处不吝指正! 我们还希望, 本课题的队伍尤其青年科学家在已有研究的基础上, 继续追踪国际前沿, 做出创新性成果, 推动中国极地冰冻圈科学不断进步。

本书共分 11 章, 效存德撰写第 1 章、第 10 章和第 11 章以及其他章部分节; 武炳义撰写第 9 章和第 2 章部分节; 丁明虎撰写第 3 章和第 2 章部分节; 唐学远、崔祥斌、郭井学撰写第 4 章; 王叶堂撰写第 5 章; 杨元德、周春霞撰写第 6 章和第 2 章部分节; 张通、周春霞撰写第 7 章; 苏洁、张胜凯、窦挺峰等撰写第 8 章; 杨佼、丁明虎、柳景峰、李传金撰写第 10 章部分节。任贾文、苏洁、王璞玉等对本书提出了审稿意见, 再次特表谢忱!

张东启对本书初稿进行了通稿，并汇编了参考文献。

本书在撰写和出版过程中得到“冰冻圈变化及其影响研究”项目全体成员的大力支持，科学出版社也给予了全方位的技术支持。项目组同仁对本书章节布局、内容取舍、逻辑合理性等方面提出宝贵修改意见，对此一并表示衷心的感谢。

项目秘书组王世金博士、王生霞博士、赵传成博士、上官冬辉博士和王文华高工在专著研讨、会议组织、材料编制等方面进行了大量工作，付出了很大努力。清华大学、武汉大学、山东师范大学、中国海洋大学、中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所、中国科学院寒区旱区环境与工程研究所在课题执行期间给予会议组织方面的大力支持，在本专著即将付梓之际，对他们的无私奉献表示由衷的感谢！

作 者

2017年9月

目 录

总序一

总序二

前言

第 1 章 引言	1
1.1 概述	1
1.2 国内外进展与趋势	3
1.2.1 东南极冰盖表面物质平衡的星-地一体化观测计算与评估	3
1.2.2 典型冰盖-冰架系统监测与模拟研究	5
1.2.3 北极海冰时空变化特征、消融机制及其对天气气候变化的影响机理	6
1.2.4 极地冰冻圈长期变化与气候的关系	8
1.3 问题与主要关注点	9
1.3.1 冰盖物质平衡计算的不确定性 & 多源数据的融合计算	9
1.3.2 影响冰盖动力不稳定性的几个关键问题	10
1.3.3 北极增暖、北极海冰融化对中纬度区域影响中存在的科学问题	11
1.3.4 年代际至百年际冰芯记录反映的极地冰冻圈变化	11
第 2 章 研究区域与方法	13
2.1 研究区域	13
2.1.1 南极冰盖和格陵兰冰盖	13
2.1.2 北冰洋	17
2.2 研究方法	18
2.2.1 冰盖物质平衡	18
2.2.2 海冰观测	24
2.2.3 冰盖动力: 三维 Stokes 冰盖动力模型的构建	27
2.2.4 大气动力诊断与模拟	27
2.2.5 冰芯重建方法	28
2.3 基本研究思路	30
2.3.1 本研究的基本思路	30
2.3.2 采用的技术路线	31

第3章 南极冰盖典型流域表面物质平衡	36
3.1 南极冰盖表面物质平衡的影响因素	36
3.2 南极冰盖海岸至内陆表面物质平衡变化规律	37
3.2.1 中山站—Dome A 断面表面物质平衡变化	37
3.2.2 Syova—Dome F 断面表面物质平衡变化	42
3.2.3 Terra Nova Bay—Dome C 断面表面物质平衡变化	45
3.3 三个典型区域表面物质平衡的异同	47
第4章 影响冰盖物质平衡的冰下和冰内过程	48
4.1 冰盖的冰厚与冰下地形	48
4.1.1 Bedmap 数据库评述	49
4.1.2 中山站—Dome A 断面的冰厚和冰下地形	50
4.1.3 Dome A 核心区域冰厚和冰下地形	53
4.1.4 泰山站的冰厚与冰下地形	58
4.1.5 格罗夫山的冰厚与冰下地形	60
4.2 冰盖内部等时层及其应用	62
4.2.1 内部等时层的表示	63
4.2.2 内部等时层的形成机制	64
4.2.3 内部等时层的形变	66
4.2.4 内部等时层的应用	67
4.3 冰下复结冰、冰下湖和冰下水系统	73
4.3.1 冰下复结冰	73
4.3.2 冰下湖	77
4.3.3 冰下水系统	80
4.4 冰盖稳定性与冰下过程	82
第5章 南极冰盖表面物质平衡模拟	84
5.1 多源再分析资料适用性评估	84
5.1.1 再分析资料基本情况	84
5.1.2 南极冰盖表面物质平衡实测数据库	87
5.1.3 基于实测资料的多源再分析资料空间变化评估	88
5.1.4 多源再分析资料时间变化评估	89
5.2 多区域气候模式相互比较与评估	92
5.2.1 区域气候模式基本情况	92
5.2.2 多区域气候模式表面物质平衡空间变化模拟评估	94
5.2.3 多区域气候模式表面物质平衡时间变化模拟评估	94
5.3 现代南极冰盖表面物质平衡变化模拟	95
5.3.1 表面物质平衡及各分量空间分布	96
5.3.2 表面物质平衡及各分量季节变化、年际变化和趋势	97

5.4	21 世纪和 22 世纪南极冰盖表面物质平衡预估	97
5.4.1	LMDZ4 大气环流模式及动力降尺度	98
5.4.2	LMDZ4 和 SMHiL 模拟的南极现代表面物质平衡评估	98
5.4.3	21 世纪和 22 世纪南极冰盖表面物质平衡预估	99
第 6 章	冰盖物质平衡的卫星观测	101
6.1	卫星观测原理介绍	101
6.1.1	卫星测高原理介绍	101
6.1.2	GRACE 重力卫星原理介绍	104
6.2	卫星测高与卫星重力数据处理介绍	108
6.2.1	卫星测高数据处理	108
6.2.2	卫星重力 GRACE 数据处理	112
6.3	卫星测高与卫星重力观测的冰盖物质平衡时空分布特征	115
6.3.1	基于卫星测高的冰盖物质平衡时空分布	115
6.3.2	卫星重力的冰盖物质平衡时空分布	124
6.4	地面与卫星多源数据在冰盖物质平衡的融合与同化	126
6.4.1	联合卫星重力和卫星测高的格陵兰冰盖冰/雪高程变化分离	126
6.4.2	卫星与地面数据融合与同化	128
第 7 章	冰盖-冰架动力模型的构建与模拟	129
7.1	冰盖动力模型简述	129
7.1.1	南极冰盖和格陵兰冰盖	129
7.1.2	冰盖动力模型发展历史	130
7.1.3	海洋性冰盖的动力学不稳定性	131
7.2	完全 Stokes 冰盖模型	132
7.2.1	冰盖流动的 Stokes 方程	132
7.2.2	构建 Stokes 模型的数值方法	133
7.3	冰架系统的模拟	133
7.3.1	冰架的动力学性质	133
7.3.2	模拟冰架流动的数值方法	134
7.4	接地线动力过程的模拟	135
7.4.1	接地线位置的确认	135
7.4.2	模拟接地线位置的移动	137
7.5	冰盖的底部滑动	138
7.5.1	冰盖底部的水热特征	138
7.5.2	确定冰盖底部滑动系数分布	141
第 8 章	海冰变化观测事实与原因分析	142
8.1	北极海冰的快速变化	142
8.1.1	密集度变化	142

8.1.2	范围和面积变化	146
8.1.3	厚度变化	150
8.1.4	漂流速度的变化	152
8.1.5	冰龄变化	155
8.1.6	基于遥感数据的北极海冰快速变化的观测事实	158
8.2	基于 ICESat 测高数据的北极海冰干舷研究	160
8.2.1	数据简介	160
8.2.2	解算方法	161
8.2.3	解算结果	162
8.2.4	验证分析	164
8.3	北极黑碳对于北极海冰消融影响的观测与模拟研究	166
8.4	北极降水形态变化对北极海冰消融影响的观测与模拟研究	171
第9章	北极海冰变化对气候的影响与反馈	173
9.1	9月北极海冰变化的动力学原因研究	173
9.1.1	9月北极 SIE 变化趋势	173
9.1.2	夏季北极表面风场变率优势模态的空间特征	174
9.1.3	风场优势模态位相演变的物理意义	178
9.1.4	夏季风场模态对9月北极 SIE 的影响	179
9.2	秋冬季节北极海冰融化对欧亚大陆冬季盛行天气模态的影响	184
9.2.1	冬季欧亚大陆盛行天气模态的空间特征以及位相演变的物理意义	185
9.2.2	盛行天气模态的时间演变特征	190
9.2.3	冬季欧亚大陆盛行天气模态与秋季北极海冰的可能联系	194
9.3	秋冬季节北极海冰对冬季西伯利亚高压的影响	200
9.3.1	北极 SIC 和冬季西伯利亚高压的联系:对季节预测的启示	200
9.3.2	近20年来冬季西伯利亚高压的变化趋势	204
9.3.3	趋势的可能机制和讨论	207
9.4	冬春季北极海冰异常对夏季欧亚大陆大气环流以及东亚中纬度地区降水的影响	208
9.4.1	冬季北极海冰与夏季欧亚大陆大气环流异常的联系	210
9.4.2	夏季欧亚大陆大气环流变率的优势模态的主要特征	213
9.4.3	冬季北极海冰异常影响后期夏季欧亚大陆大气环流的可能机理	216
第10章	南极浅冰芯记录与海冰长期变化	219
10.1	用代用指标反演南极海冰的原理与方法	219
10.1.1	MSA 与 SIE	219
10.1.2	海盐离子与 SIE	222
10.1.3	其他代用指标	224
10.2	南印度洋过去300年 SIE 的变化特征	225