

“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

全球气候系统中冰冻圈的 模拟研究

林岩奎 王磊 苏洁 董文浩 等 / 著



科学出版社

全球气候系统中冰冻圈的 模拟研究

林岩銮 王 磊 苏 洁 董文浩 等 著



科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书从冰冻圈分量模式与气候系统的关系入手,介绍了国际上包括积雪、冻土、海冰、冰川冰盖等模式的发展经历以及我国近些年在冰冻圈模式方面取得的一些成果和进展;结合冰冻圈观测介绍了过去几十年全球冰冻圈变化事实,并在此基础上利用全球和区域模式的结果分析评估了模式对冰冻圈要素的模拟能力和改进;展望了冰冻圈分量模式的未来发展趋势。

本书可供气象、地理、环境、水文、生态、社会经济尤其是侧重全球气候模式、冰冻圈气候模拟、冰冻圈分量模式开发等相关领域的科研人员、政府管理部门有关人员以及高校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

全球气候系统中冰冻圈的模拟研究 / 林岩奎等著. —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 978-7-03-058135-8

I. ①全… II. ①林… III. ①冰川学—气候模拟—研究 IV. ①P343.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 135030 号

责任编辑: 周 杰 / 责任校对: 樊雅琼

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: 12 1/2

字数: 300 000

定价: 138.00 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》系列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”项目 (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”(2013CBA01805)

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：林岩鑫、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
林岩奎 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

《全球气候系统中冰冻圈的模拟研究》

著者名单

主 笔

林岩銓

成 员 (按姓氏汉语拼音排序)

曹殿斌 陈莹莹 董文浩 黄建斌

齐 嘉 苏 洁 宋 蕾 王澄海

王 磊 肖 遥 姚 瑶 张 通

■ 总序一 ■

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的经营理念。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。

秦大河

中国科学院院士

2017 年 12 月

■ 总序二 ■

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！

傅伯杰

中国科学院院士

2017年12月

■ 前 言 ■

全球气候变化是世界性的重大课题之一。作为全球气候系统重要的组成部分和气候变化的指示器,冰冻圈各个分量在全球和区域气候模式中的表达和模拟至关重要。同时鉴于冰冻圈分量自身的特点和区域上的差异性,冰冻圈各分量的模拟及其同气候系统其他分量之间的关系尤为复杂。本书从冰冻圈分量与气候系统的关系入手,介绍了冰冻圈分量模拟的进展和存在问题,分别回顾了当前主流的积雪、冻土、海冰和冰川冰盖等参数化方案以及我国在这些方面取得的发展和进步,并利用全球和区域气候模式对三极的模拟进行了评估和改进,最后对冰冻圈分量模式的未来发展趋势进行了展望。

本书共分9章。第1章为绪论,介绍了冰冻圈与气候变化的联系;第2章介绍了当前气候模式冰冻圈分量的模拟能力和存在的问题;第3~6章分别介绍了气候模式中积雪、冻土、海冰和冰川冰盖模式的参数化;第7章介绍了区域气候模式在南北极的模拟情况;第8章介绍了全球和区域模式在青藏高原的降水模拟情况;第9章展望了冰冻圈分量模式的未来发展趋势。参加本书编写的人员共有13人,他们来自不同部门和单位,包括清华大学、中国科学院青藏高原研究所、中国海洋大学、中国气象科学研究院、兰州大学等。本书同时得到多位领域内权威专家的审阅,他们提出了很多宝贵的意见和建议。全书由林岩奎、董文浩组织撰稿和定稿,林岩奎、董文浩负责全书统稿。本书各章节主要撰稿人员为:第1章林岩奎、董文浩、曹殿斌;第2章董文浩、林岩奎;第3章王磊、宋蕾、齐嘉;第4章陈莹莹、肖遥;第5章苏洁;第6章王澄海;第7章黄建斌、董文浩、姚瑶;第8章董文浩、林岩奎;第9章林岩奎、王磊、苏洁、张通、董文浩。

衷心感谢本书的每一名贡献者、审稿专家、项目办和秘书组成员,感谢他们辛勤的劳动和认真负责的科学态度,感谢部门领导的大力支持。本书集结了多部门、多学科专家学者共同的智慧,书中素材大部分也来源于各学科专家的研究结果。因此,本书是大家共同努力的成果和结晶。此外,科学出版社负责本书的编辑与出版,他们认真细致的工作使得本书的质量得到保证。在此,我们一并表示衷心感谢!

由于气候变化科学的复杂性,模式发展的快速性,以及目前仍然存在的学科上的不确定性,加之受限课题组成员编写汇总水平能力等,本书必然存在不足与疏漏之处。我们期待广大读者的批评与指正,因为你们的批评建议将是我们开展下一次科学评估工作的动力!

作 者

2017年12月于北京

目 录

总序一

总序二

前言

第1章 绪论	1
1.1 冰冻圈现状	3
1.2 全球气候模式	9
1.3 全球气候变化和冰冻圈	12
第2章 气候模式冰冻圈分量模拟存在的问题	14
2.1 气候模式极地海冰模拟能力评估	14
2.2 气候模式欧亚大陆积雪的模拟评估	19
2.3 气候模式青藏高原上冻土的模拟评估	26
第3章 气候模式中的积雪参数化	32
3.1 积雪参数化简介	33
3.2 积雪模式参数化的发展	34
3.2.1 积雪模型的发展和分类	34
3.2.2 积雪模型的参数化方案: SAST 和 SNOW17	35
3.2.3 陆面模式中的积雪参数化方案	47
3.3 积雪模式参数化的最新进展	54
3.3.1 WEB-DHM 水文模型中的三层积雪模块	54
3.3.2 WEB-DHM 水文模型中三层积雪模块与冻土模块的耦合	55
第4章 气候模式中的冻土参数化	60
4.1 冻土观测试验	60
4.1.1 国际观测计划	61
4.1.2 我国观测现状	62
4.2 冻土模型研究现状	63
4.2.1 经验-统计关系冻土模型	63
4.2.2 基于物理过程的冻土模型	64
4.2.3 考虑冻融过程的陆面过程模型	65
4.2.4 最新研究进展	66

4.3 青藏高原冻融过程分析与参数化方案改进	68
4.3.1 冻融过程特点	68
4.3.2 冻融参数化方案的改进	71
第5章 气候模式中的海冰模式及其参数化	80
5.1 气候系统中海冰模式	80
5.1.1 海冰模式的发展简介	80
5.1.2 CMIP 模式中采用的海冰模式	82
5.1.3 国内极区海冰模式的发展	85
5.2 海冰模式的主要物理框架	86
5.2.1 海冰冰厚分布函数	86
5.2.2 海冰动力学模型	87
5.2.3 海冰热力学模型	89
5.3 海冰物理过程参数化	90
5.3.1 海冰反照率参数化	91
5.3.2 冰上积雪参数化	92
5.3.3 海洋热通量参数化	93
5.3.4 侧向融化参数化	94
5.3.5 融池水量分配参数化	95
5.3.6 冰面冰底拖曳力参数化	98
第6章 气候模式中的陆地冰川参数化	101
6.1 冰川动力数值模式的发展简介	101
6.2 主要的冰川动力数值模式的建立及模拟	103
6.2.1 冰川模型的一般形式	103
6.2.2 模型的简化	105
6.3 一个山地冰川新模型的设想	111
第7章 区域模式对南北极冰冻圈的模拟	113
7.1 区域模式针对南极气候特征的改进	113
7.1.1 区域气候模式对南极表面能量平衡的模拟	117
7.1.2 区域气候模式对南极表面物质平衡的模拟	118
7.2 区域模式对北极地区的模拟	121
7.2.1 区域模式和复杂热力学海冰模式的耦合	122
7.2.2 海冰厚度给定方法对模拟的影响	125
第8章 全球和区域模式在青藏高原的降水模拟	128
8.1 全球模式和区域模式对青藏高原夏季降水气候态的模拟	128
8.2 全球模式和区域模式对青藏高原夏季降水变化趋势的模拟	135
第9章 冰冻圈分量模式的未来发展趋势	140
9.1 积雪	140

9.2 冻土	141
9.3 海冰	142
9.4 冰川冰盖	145
参考文献	148

海水的盐度,对大洋环流和海洋生物产生重要影响。研究显示,极地冰盖融化注入海洋的低温淡水对海洋环流产生越来越大的影响。山地冰川变化造成的高寒地区、干旱半干旱地区的水资源变化对生态系统演变具有决定性的意义。冻土变化对地表水分循环、生态环境及地-气间碳交换的影响极为重要 (Zimov et al., 2006)。国内外诸多研究结果表明,作为冰冻圈组成部分的积雪和海冰不仅是导致气候异常的重要原因,也是预测气候变化的重要先兆因子。近20年来,随着全球变暖,全球大部分区域的冰冻圈要素发生了显著的变化。这些变化通过一系列的冰-海-气相互作用,影响大气环流和气候变化,造成极端气候事件的增加。冰冻圈要素通过直接和间接过程影响大气环流和气候变化,但是利用直接观测研究监测冰冻圈要素对大气环流的反馈作用非常困难。因此气候模式成为研究冰冻圈影响大气环流和气候变化的有效途径。

利用气候系统模式开展数值模拟研究,是定量评估冰冻圈在全球和区域气候变化中的作用,深入研究冰-海-气相互作用的物理过程与反馈机制,进而科学预估未来气候与冰冻圈变化的主要研究方法和手段之一。

当前国际上冰冻圈科学研究态势主要体现在两条主线上:一条是以 WCRP (世界气候研究计划)-CliC (气候与冰冻圈) 国际研究计划为主线,核心目标是提高对冰冻圈与气候系统之间相互作用的物理过程与反馈机制的理解,评估和量化过去和未来气候变化所导致的冰冻圈各分量变化,提高冰冻圈对气候影响的认识水平。实现和解决上述目标和关键科学问题的前提条件是强化冰冻圈的观测与监测。另一条主线是以“冰冻圈科学”为核心,着力推动冰冻圈科学向体系化方向发展 (秦大河等, 2006)。在上述两条主线上,冰冻圈科学研究目前主要面临3个方面的重大科学问题,即冰冻圈变化机理、冰冻圈与气候相互作用关系、冰冻圈变化的影响及适应。其中,冰冻圈与气候相互作用是 WCRP-CliC 关注及着力推动的重点,这部分研究离不开耦合冰冻圈分量的全球气候模式。

1.1 冰冻圈现状

冰冻圈现状研究主要从海冰、陆地冰川和冻土展开。海冰是气候系统重要的组成部分,海冰的存在会改变海洋的反照率,阻止海洋向大气释放热量,而且会减少大气与海洋之间能量和热量的交换。在海冰形成的过程中会结晶析出盐分,这些盐分会影响海洋盐度的分布,甚至改变海洋环流特征。气候变化会引起海冰覆盖范围的变化,反过来,海冰的变化也会作用于整个气候系统。另外,海冰还是极地生态系统的重要组成部分,很多动植物的生存与生活都依赖于海冰。

图1-2反映了1979~2012年34年间北极海冰的季节循环和年代际变化。一般情况下,北极海冰的覆盖范围在2月或3月达到最大值,在9月达到最小值。夏季的年代际变化较冬季更大。年代际的变化没有明显规律。例如,在1989~1998年,海冰变化可以忽略不计。但在21世纪最初10年,冬季海冰的覆盖范围减少了约 $0.6 \times 10^6 \text{ km}^2$ 。而从变化趋势上来看,除了白令海以外,其他区域海冰都呈现减少趋势,尤其是在北极盆地的东部及海洋

冰冻圈在地球气候系统中发挥着极为重要的作用。冰冻圈各组分的快速变化对地表能量平衡、大气环流、海洋环流、水循环、海平面变化、碳源、碳汇乃至区域社会经济都有深远影响（秦大河等，2006）。冰雪变化通过影响能量平衡及水循环过程改变区域尺度或全球尺度的气候动力过程进而影响气候变化；海冰冰量变化通过改变海洋盐度和温度影响大洋环流进而改变全球气候格局；多年冻土变化不仅通过改变地-气水热交换过程影响气候系统，而且还会通过改变冻土碳库影响全球碳循环和气候变化；冰盖冰川消融是未来海平面升高最重要的影响因子。因此，近几十年来越来越多的科学家开始关注冰冻圈。

作为一门新兴学科，冰冻圈科学研究的是其各组成部分的形成机理、演化规律、与其他圈层之间的相互作用，以及对经济社会的影响（秦大河和丁永健，2009）。冰冻圈与大气圈、水圈、陆地表层和生物圈共同组成全球气候系统。作为全球气候系统的一个重要组成部分，冰冻圈影响地表能量、水分收支，并进一步影响大气和海洋环流。冰冻圈影响气候的主要因子包括：积雪和冰面的高反射率；冰水相变的潜热；积雪对覆盖陆面和浮冰对下面海水或淡水的保温作用；冰盖和冰川中存储的水；冻土中存储的大量温室气体等。通过这些因子和对应的各种反馈过程，冰冻圈和全球气候系统存在复杂的联系和相互作用。因此，全球气候模式中需要合理考虑各种不同种类和时空尺度的冰冻圈过程，如时间尺度较短的积雪、海冰过程，长时间尺度的冰川和冻土，以及更长时间尺度的冰盖变化过程。

冰冻圈变化及其与其他圈层的相互作用关系是认识气候系统的重要环节，而且冰冻圈对气候变化有高度敏感性和重要反馈作用，在全球变暖背景下，冰冻圈研究受到广泛关注，成为气候系统研究中最活跃的领域之一，也是当前全球变化和可持续发展最关注的热点之一（秦大河等，2006）。冰冻圈对气候变化敏感，响应迅速且具有极强的指示性，被认为是气候系统各圈层中最为关键的因素之一（IPCC，2007）。冰冻圈作为气候系统的重要组成部分，不仅受气候变化影响，而且极地冰盖、山地冰川、积雪、海冰、湖冰、河冰等冰冻圈要素在不同时间和空间尺度上通过复杂的反馈过程对气候也有重要的调节作用（Alexander et al., 2004；施雅风，2005；秦大河等，2006；秦大河和丁永健，2009；姚檀栋等，2013）。随着观测技术的进步、观测资料的日益增多和计算条件的迅速改善，国内外已有大量研究表明，作为冰冻圈组成要素的积雪、海冰和冰盖不仅是导致气候异常的重要原因，而且是预测气候变化的重要先兆因子。

冰冻圈是气候系统的重要组成部分，它与其他圈层之间的互相作用在全球和区域气候变化中发挥着重要作用，因此冰冻圈在气候变化中的作用成为目前和未来冰冻圈研究中的关注焦点。冰冻圈一方面对气候变化十分敏感，是气候变化的指示器；另一方面冰冻圈自身变化对气候也有巨大的反馈作用。冰雪具有很高的反照率、巨大的相变潜热和低导热率等特点。冰冻圈的扩展或缩减会导致参与局地、区域或全球水循环的能量和水量减少或增加，并伴随着能水平衡的改变，使其与大气、海洋、水文、环境和生态等之间产生一系列相互作用过程。IPCC（2013）第五次评估报告认为，1993~2012年冰冻圈退缩对海平面升高的贡献量约为30%。最近几年的研究结果显示，冰冻圈融化产生的水当量已超过海水热膨胀成为海平面上升的首要贡献者。积雪和海冰由于地表覆盖面积很大，且具有很大的自然变率，是地表能量平衡中最为关键的影响因子。海冰的冻融过程可以改变海洋表层