

中国科学院大学研究生教材系列

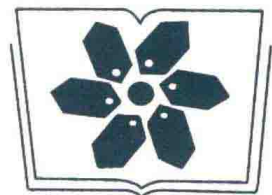
冰冻圈科学概论

主编 秦大河

副主编 姚檀栋 丁永建 任贾文



科学出版社



中国科学院科学出版基金资助出版

中国科学院大学研究生教材系列

冰冻圈科学概论

主 编 秦大河

副主编 姚檀栋 丁永建 任贾文

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书从冰冻圈科学理论框架角度系统介绍了冰冻圈科学,内容涵盖冰冻圈各要素的形成发育、演化和研究方法,以及冰冻圈与气候系统其他圈层的相互作用、社会经济可持续发展和地缘政策等热点问题。

本书可供地理、水文、地质、地貌、大气、生态、环境、海洋和区域经济社会可持续发展等领域有关科研和技术人员、大专院校相关专业师生使用和参考,也可供在经济、社会、人文等领域和部门工作的同仁参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

冰冻圈科学概论/秦大河主编. —北京:科学出版社, 2017.8

(中国科学院大学研究生教材系列)

ISBN 978-7-03-053935-9

I. ①冰… II. ①秦… III. ①冰冻圈-研究生-教材 IV. ①P343.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 165428 号

责任编辑:杨帅英/责任校对:何艳萍

责任印制:肖 兴/封面设计:图阅社

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>

中国科学院大学图书馆

科学出版社发行



2017 年 8 月第 一 版 开本 787mm×1092mm 1/16

2017 年 8 月第一次印刷 印张: 32 1/2

字数: 740 000

定价: 238.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《冰冻圈科学概论》编写委员会

主 编：秦大河

副 主 编：姚檀栋 丁永建 任贾文

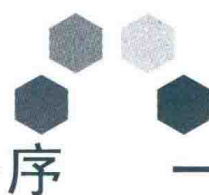
主 笔（按姓氏汉语拼音排序）：

丁永建	何元庆	康世昌	赖远明	李 新	李志军
李忠勤	刘时银	罗 勇	秦大河	任贾文	孙 波
孙俊英	王根绪	王宁练	温家洪	吴青柏	武炳义
效存德	姚檀栋	张廷军	赵 林	赵进平	周尚哲

主要作者（按姓氏汉语拼音排序）：

车 涛	陈仁升	丁明虎	窦挺峰	方一平	何剑锋
侯书贵	金会军	李国玉	刘耕年	刘晓宏	马丽娟
牛富俊	沈永平	田立德	王世金	肖 瑶	徐柏青
徐世明	阳 坤	杨建平	叶柏生	张 通	张建民
张人禾	张世强	朱立平			

秘书组 马丽娟 窦挺峰 徐新武 王亚伟 俞 杰



冰冻圈科学以自然界的冰、雪、冻土为研究主体。冰冻圈是受气候变暖影响最严重的一个圈层，突出表现在全球冰川严重退缩，北极海冰和北半球积雪迅速减少，以及多年冻土活动层增厚，等等。与此同时，冰冻圈通过与其他圈层间的物质、能量交换，对自然系统和社会经济系统也产生显著影响。中国科学家经过数十年的研究阐明了冰冻圈现状、演变规律及变化机理，并揭示了冰冻圈与其他圈层的相互作用。中国科学家还率先在冰冻圈与可持续发展的关联方面进行了探索性研究。

冰冻圈以其表面的高反射率、巨大的冷储和相变潜热，作为温室气体的源汇和气候环境的记录器，以及巨大的淡水储量等不可替代的功能，加之其变化过程、趋势和其他圈层的相互作用，已成为当前气候系统和可持续发展研究中最活跃的领域之一，受到前所未有的重视。2007年，中国率先成立了冰冻圈科学国家重点实验室。同年，国际大地测量地球物理联合会（IUGG）将其下属原国际雪冰委员会（ICSI，二级学会）升格为国际冰冻圈科学联合会（IACS，一级学会），成为IUGG成立87年里增加的唯一的一级学会。2016年，中国科学技术协会批准成立中国冰冻圈科学学会。

近几年来，冰冻圈科学国家重点实验室联合其他科研单位和高等院校的专家，先后在中国科学院大学、北京师范大学和兰州大学开设“冰冻圈科学概论”研究生课程，在此基础上编写出版了该书。这是继2012年《英汉冰冻圈科学词汇》和2014年《冰冻圈科学辞典》之后，秦大河院士等科学家编写出版的第三部冰冻圈科学系列书籍。

《冰冻圈科学概论》内容丰富，涵盖了冰冻圈科学的基本概念和理论，深入浅出地阐述了冰冻圈各要素的形成演化、冰冻圈与气候系统其他圈层的相

互作用，以及冰冻圈变化对社会经济可持续发展的影响，可作为大专院校相关专业的教材和生态环境领域科技人员的参考文献。该书是至今第一部系统论述冰冻圈科学的专著，我相信该书的问世必将进一步促进冰冻圈科学的发展。



中国科学院院士

2017年3月



序 二

自 20 世纪 50 年代我国老一辈地理学家开启现代冰川和冻土科学考察以来，以分支学科并行研究冰川、冻土和积雪，历经了半个多世纪。近十几年来，以秦大河院士为首的团队用系统综合的思想，提出并发展了一门新兴学科——冰冻圈科学，组建成立了冰冻圈科学国家重点实验室，先后出版了《英汉冰冻圈科学词汇》和《冰冻圈科学辞典》。今天他们又推出了系统介绍冰冻圈科学内容的《冰冻圈科学概论》。我有幸目睹和经历了这一过程，一路走来，我对他们勇于开拓、勇攀高峰的精神所感动。作为随行者，我首先拜读了《冰冻圈科学概论》。

冰冻圈科学与地理学、气象气候学、水文学、地貌学、生态学、海洋科学、遥感科学、环境科学等学科交叉，与社会经济可持续发展乃至地缘政治相关。伴随新技术和新方法，冰冻圈科学的研究深度和广度都获得了长足发展，涉及全球变化、环境变迁、可持续发展等多个领域。“气候变暖冰先知”，冰冻圈的变化通过影响水资源、生态环境、海平面变化和极端天气气候事件等，对人类社会产生不可估量的影响。因此，冰冻圈科学的发展不仅关系到冰冻圈研究本身，还牵动着与之相关的人类生存环境、经济社会等多个方面，与我们日常生活息息相关。在此背景下，推出一本全面介绍冰冻圈基本概念、研究概况和前沿进展的书籍，对冰冻圈科学体系的建立和发展、教育和普及具有重要的现实意义。

冰冻圈科学包含冰川、冻土、积雪等多个分支，每个分支的内容又极为丰富、差异性大，要把冰冻圈所含各要素有机地统筹到冰冻圈系统中，针对某一方面内容（比如：冰冻圈物理、化学、观测、模拟等）集中在一章或一节中呈现给读者，还要确保内容的连贯性，这本身是有相当难度的。可以看出本书在这方面下了很大功夫，对讲授内容、讲解顺序和理论深度都作了较好的安排，使得冰冻圈科学中的各主要要素都在书中得到体现。在章节安排上循序渐进、由浅入深，既有基础知识、又有机理探究；既有野外工作介绍、

又有观测实验分析。在获取理论知识的同时又不会觉得枯燥，可读性强。该书的另一个特点是取材新颖。书中不少资料是最近十年研究的新成果、新技术，不仅图文并茂地阐述冰冻圈观测事实，还作了物理解释，大大扩展了本书的受众。

尽管该书在内容上个别表述仍有专著的影子，但已适合具备一定自然地理学基础的本科生、研究生作为冰冻圈科学入门学习和后期科研参考的教科书，相信会对学生开阔视野乃至今后科研能力的发展大有裨益。该书亦可作为对冰冻圈科学感兴趣的教师、媒体等社会公众的参考书目。冰冻圈科学是一个注重野外实地观测的学科，观测技术的进步会大大促进该学科的发展。因此随着未来观测技术水平的进步，冰冻圈科学仍将快速发展壮大，新的研究成果必将不断涌现。相信再版时会更加完善。

学科要发展，教育须先行。作者团队高瞻远瞩，在连续出版了一系列冰冻圈科学工具书的基础上，又亲自在多所大学讲授相关课程，形成了系统介绍冰冻圈科学内容的《冰冻圈科学概论》，这是在冰冻圈科学领域的首开先河。该书的出版必将增强冰冻圈科学研究的中坚力量和后继人才队伍建设，势必推动冰冻圈科学取得实质性进展，并引领冰冻圈科学迈上新台阶。



中国科学院院士
中国地理学会理事长

2017年2月



前言

当今世界，科技进步带来经济社会的快速发展，提高了人民生活水平，也带来了全球气候变暖、生态环境恶化的后果，引起社会广泛关注。山地冰川退缩、雪线上升、冻土退化、南极冰盖消融、北极海冰范围减小等冰冻圈科学涵盖的问题备受关注。不同领域的研究者已经发表了大量涉及冰冻圈科学的学术论著；大众传媒刊登大量文章，讨论气候变化和冰冻圈变化的影响，受众甚广；各种各类演讲报告里，拿冰冻圈举例说事的，比比皆是；……冰冻圈科学正在向不同学科领域交叉渗透，科学知识不断普及，影响日益扩大，社会效益日增，带来了冰冻圈科学的大发展、大传播。

将气候变化、冰冻圈变化的影响、适应与经济社会发展紧密接合，保护地球环境、实现可持续发展，是我们的夙愿。大好形势下实现夙愿和抱负，是喜事。但喜中也有忧。由于科技队伍快速扩大，人才培养滞后发展速度，部分冰冻圈科技工作者对本学科的新发展和未来趋势了解不够，专业知识结构存在缺陷。这不利于冰冻圈科学深入发展，不利于科学普及，也不利于保护地球、保护环境，实现可持续发展。随着人类生产活动的发展和科学技术水平的提高，特别是卫星及遥感探测技术的提高，使冰冻圈科学得到迅速发展。《冰冻圈科学概论》正是顺应这一发展需求，对此门科学做一个较为全面的介绍。

全书共分为 11 章，对冰冻圈科学的有关问题进行了较为系统的论述。第 1 章是冰冻圈与冰冻圈科学，系统讲述冰冻圈科学的定义和研究简史，以及冰冻圈在全球变化和社会发展中的作用等；第 2 章是冰冻圈的分类和地理分布，主要阐述冰冻圈各要素在全球的地理分布以及各要素的分类；第 3 章是冰冻圈的形成和发育，介绍冰冻圈发育的地带性，以及冰冻圈各要素的形成机制和发育条件等；第 4 章是冰冻圈的物理特征，从力学、热学、电学、磁学等方面介绍冰川、冻土、积雪、海冰等要素的物理特征；第 5 章是冰冻圈的化学特征，主要包括冰川的雪冰化学特征、冻土的化学特征，以及海冰的化学特征；第 6 章是冰冻圈内的气候环境记录，系统介绍从冰芯、冻土、树木年轮及寒区其他介质记录反映的气候演变；第 7 章是不同尺度的冰冻圈演化，主要从构造尺度、轨道/亚轨道尺度、千年尺度、百年-年代际尺度到年际-季节尺度介绍冰冻圈各要素的变化特征；第 8 章是冰冻圈与其他圈层的相互作用，讨论了冰冻圈与气候系统其他四大圈层之间相互作用关系，主要介绍其中密切关联的交叉部分；第 9 章是冰冻圈变化与可持续发展，介绍了冰冻圈变化对社会的影响、冰冻圈灾害与风险管理、冰冻圈区重大工程建设等与社会经济发展密切相关的内容；第 10 章是冰冻圈模式和冰冻圈变化的预估，介绍了冰冻圈各要素现有的模式，并讨论了冰冻圈过程与气候的耦合模拟；第 11 章是冰冻圈科学观测和实验技术，对冰冻圈探测的传统方法和实验室分析技术进行了系统介绍，并讨

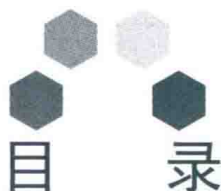
论了冰冻圈科学加速发展所使用的新技术和新方法。可以预料，未来十几年有关冰冻圈科学的研究将有更全面的进展，本书中提到的一些冰冻圈科学问题也将有更全面的结论，尤其是冰冻圈与其他圈层相互作用，冰冻圈变化与可持续发展等当前研究热点，一定会有更加成熟的结论。从这一点讲，本书作为“概论”，可将其视为冰冻圈科学的“初级阶段”，是进一步研究的基础。

本书主要面向高等院校相关专业的师生和科研机构的科技人员。通过阅读本书，使读者从圈层的角度重新认识冰冻圈及其组成要素的意义，了解冰冻圈变化的复杂性和重要影响，获得新的知识，从阅读中也可以提出需要研究的新问题。冰冻圈科学内容丰富，单靠一本概论无法详尽阐述，我们已经考虑在出版《冰冻圈科学概论》的同时，编撰冰冻圈科学分论系列书籍，作为概论的补充教学。由于我们第一次编撰《冰冻圈科学概论》，经验不足，学识有限，国际视野仍欠缺，加上涉及的学科面广、学科发展迅速，等等，难免有不当或疏漏之处，敬请读者批评指正，以便再版时补充或修正。

本书的编撰和出版得到国家自然科学基金创新研究群体项目(41421061)、国家重大科学研究计划项目(2013CBA01800)、国家重点基础研究发展计划项目(2007CB411507)、冰冻圈科学国家重点实验室自主课题(SKLCSS-ZZ-2016)和中国科学院大学教材出版中心共同资助，同时还得到中国科学院学部局常委会自主部署的学科发展战略研究支持，作者表示衷心感谢。同时，也感谢对本书的出版给予关心、支持和帮助的所有师长、同仁和朋友。

秦大河

2016年12月于北京



目 录

序一

序二

前言

第1章 冰冻圈与冰冻圈科学	1
1.1 冰冻圈	1
1.1.1 地球上的冰冻圈	1
1.1.2 冰冻圈的分类和数量特征	3
1.1.3 冰冻圈变化	4
1.2 冰冻圈科学	7
1.2.1 冰冻圈科学的定义、内容和范畴	7
1.2.2 学科体系和研究方法	9
1.2.3 国际重大科学计划中的冰冻圈科学	11
1.2.4 冰冻圈科学在中国	12
1.3 冰冻圈与气候系统	13
1.3.1 冰冻圈的发育机理、过程 and 变化	13
1.3.2 冰冻圈发育的时空尺度	14
1.3.3 冰冻圈与其他圈层的相互作用	16
1.3.4 冰冻圈在气候系统中的作用	18
1.4 冰冻圈科学在经济社会发展中的作用	20
1.4.1 水循环和水资源	21
1.4.2 矿产资源和工程建设	22
1.4.3 冰冻圈地区探险与旅游	23
1.4.4 冰冻圈灾害	25
1.4.5 冰冻圈地缘政策	26
1.5 行星冰冻圈	27
1.5.1 火星冰冻圈的特征	28
1.5.2 火星水冰的证据	30
思考题	32

延伸阅读	32
第2章 冰冻圈的分类和地理分布	35
2.1 冰冻圈的全球分布、组成与分类	35
2.1.1 冰冻圈分布的地带性	35
2.1.2 冰冻圈的组成和分布特征	36
2.1.3 海洋冰冻圈、陆地冰冻圈和大气冰冻圈	37
2.2 陆地冰冻圈的分类与分布	39
2.2.1 冰川与冰盖的分类与分布	39
2.2.2 冻土的分类与分布	49
2.2.3 积雪的分类与分布	55
2.2.4 河/湖冰的分类与分布	62
2.3 海洋冰冻圈的分类与分布	67
2.3.1 冰架与冰山的分类与分布	67
2.3.2 海冰的分类与分布	73
2.3.3 海底多年冻土的分类与分布	78
2.4 大气冰冻圈的分类与分布	80
2.4.1 大气冰冻圈的分类	80
2.4.2 大气冰冻圈的分布	80
思考题	83
延伸阅读	84
第3章 冰冻圈的形成和发育	87
3.1 冰冻圈形成与发育的条件	87
3.1.1 积雪的形成与发育条件	87
3.1.2 冰川的形成与发育条件	88
3.1.3 多年冻土的形成与发育条件	90
3.1.4 河/湖冰的形成与发育条件	91
3.1.5 海冰、冰架、冰山的形成与发育条件	91
3.2 冰冻圈形成与发育的物理基础	92
3.2.1 冰冻圈表面的能量平衡物理基础	92
3.2.2 冰冻圈表面的水量平衡物理基础	92
3.2.3 冰冻圈介质中的热量传输物理基础	93
3.2.4 冰冻圈物质平衡的物理基础	93
3.2.5 土壤中水分迁移/运动的物理机制	96
3.3 积雪与固态降水的形成与发育	98
3.3.1 冰晶和雪花的形成与发育	98

3.3.2 霰、冰粒和冰雹的形成与发育	100
3.4 冰川(盖)的形成与发育	101
3.4.1 成冰作用	101
3.4.2 冰盖的形成	103
3.5 冻土的形成与发育	104
3.5.1 季节冻土的冻结与融化	104
3.5.2 多年冻土的形成	105
3.5.3 地下冰和冻土结构	105
3.6 海冰的形成与发育	107
3.6.1 海冰的形成过程	107
3.6.2 海冰的结构与变化	108
3.6.3 海冰的融化过程	111
3.7 河/湖冰的形成	112
3.7.1 河冰	112
3.7.2 湖冰	114
思考题	115
延伸阅读	115
第4章 冰冻圈的物理特征	117
4.1 冰的主要物理性质概述	117
4.1.1 冰的晶体结构	117
4.1.2 冰的力学性质	120
4.1.3 冰的热学性质	123
4.1.4 冰的电学和光学性质	126
4.2 冰冻圈主要要素动力学特征	127
4.2.1 冰川运动和动力学特征	127
4.2.2 冻土力学特征	132
4.2.3 积雪的动力学特征	140
4.2.4 海/河/湖冰动力学特征	141
4.3 冰冻圈主要要素热学特征	142
4.3.1 冰川和积雪热学特征	142
4.3.2 冻土中的水热迁移	147
4.3.3 海/河/湖冰的热力学特征	152
4.4 冰冻圈主要要素的其他物理特征	155
4.4.1 反照率特征	155
4.4.2 电磁学特征	157

思考题·····	159
延伸阅读·····	159
第5章 冰冻圈的化学特征 ·····	161
5.1 冰冻圈化学成分的来源·····	161
5.1.1 大气化学成分进入冰冻圈的主要过程·····	163
5.1.2 冰冻圈化学对气候环境的影响·····	163
5.2 冰川化学·····	164
5.2.1 无机成分·····	164
5.2.2 有机成分·····	171
5.2.3 微生物·····	172
5.2.4 不溶性微粒·····	173
5.2.5 稳定同位素比率·····	175
5.3 冻土化学·····	176
5.3.1 已冻结土及正冻土的化学过程·····	176
5.3.2 天然气水合物·····	179
5.4 河/湖冰化学特征·····	182
5.4.1 氢-氧稳定同位素比率在冰-水两相间的变化与影响因素·····	182
5.4.2 电导率与离子变化·····	184
5.4.3 痕量气体在河/湖冰中的分布·····	185
5.4.4 河/湖冰中有色可溶性有机物的排斥效应与光学特性·····	185
5.5 海冰化学·····	186
5.5.1 现代海水的化学组成·····	187
5.5.2 海冰盐度及其演化·····	189
5.5.3 海冰相图·····	193
5.5.4 海冰中的气体·····	195
5.5.5 生物过程对海冰化学的影响·····	195
思考题·····	197
延伸阅读·····	197
第6章 冰冻圈内的气候环境记录 ·····	198
6.1 冰冻圈介质中的气候环境指标·····	198
6.1.1 冰川·····	198
6.1.2 冻土·····	200
6.1.3 树木年轮·····	200
6.1.4 湖泊沉积·····	201
6.2 冰芯记录·····	202

6.2.1 冰芯断代方法	203
6.2.2 极地冰盖记录	204
6.2.3 山地冰川记录	210
6.3 冻土记录	213
6.3.1 冰楔记录	214
6.3.2 冻胀丘泥炭层记录	216
6.4 树木年轮记录	218
6.4.1 寒区树木年轮记录的重大气候事件	218
6.4.2 寒区树木年轮记录的冰川末端进退	219
6.4.3 寒区树木年轮记录的冻土环境变化	221
6.4.4 树轮记录的积雪变化	221
6.5 寒区湖泊记录	223
6.6 寒区其他介质记录	223
思考题	227
延伸阅读	227
第7章 不同尺度的冰冻圈演化	229
7.1 构造尺度冰冻圈演化	229
7.1.1 前寒武纪大冰期	229
7.1.2 石炭-二叠纪大冰期	231
7.1.3 第四纪大冰期	232
7.1.4 三大冰期形成原因	234
7.2 轨道尺度冰冻圈演变-更新世气候演变与米兰科维奇理论	235
7.2.1 冰期天文理论的创立过程	235
7.2.2 冰期天文理论的基本原理	236
7.2.3 冰期天文理论的修正	239
7.2.4 冰期天文理论面临的挑战	240
7.3 晚更新世亚轨道尺度的冰冻圈演变	240
7.3.1 气候变化若干重要事件及其基本概念	241
7.3.2 末次冰期以来冰冻圈各要素演变	243
7.4 百年来冰冻圈变化	251
7.4.1 南极冰盖百年际变化	251
7.4.2 山地冰川变化	256
7.4.3 全球冻土变化	260
7.4.4 北半球积雪变化	265
7.5 年际至季节尺度变化	267

7.5.1 冰川变化	267
7.5.2 冻土变化	271
7.5.3 北半球积雪变化	273
7.5.4 两极海冰年际-年代际尺度变化	273
思考题	277
延伸阅读	277
第8章 冰冻圈与其他圈层的相互作用	279
8.1 冰冻圈与大气圈	279
8.1.1 冰雪-反照率反馈机制	280
8.1.2 冰-气潜热和感热交换	281
8.1.3 冰-气动量交换	282
8.1.4 冰冻圈与气候相互作用——案例研究	284
8.2 冰冻圈与生物圈	287
8.2.1 冰冻圈与寒区生态	287
8.2.2 冰冻圈与寒区碳氮循环	298
8.2.3 极地海洋生物	302
8.3 冰冻圈与水圈	305
8.3.1 概述	305
8.3.2 冰冻圈与大尺度水循环	310
8.3.3 冰冻圈与海平面	316
8.3.4 冰冻圈与陆地水文	319
8.4 冰冻圈与岩石圈	341
8.4.1 构造运动与冰期地表过程响应	341
8.4.2 冰川侵蚀、搬运与堆积作用	344
8.4.3 多年冻土与岩石圈表层	349
思考题	353
延伸阅读	354
第9章 冰冻圈变化与可持续发展	358
9.1 冰冻圈变化影响的评估方法与适应框架	358
9.1.1 脆弱性及其评估方法	358
9.1.2 冰冻圈变化的适应框架	362
9.2 冰冻圈变化影响的适应案例	363
9.2.1 冰冻圈变化对水文-生态影响的适应案例	363
9.2.2 工程适应案例：青藏铁路适应多年冻土变化	366
9.2.3 规划适应案例：印北城镇水资源供给适应冰川变化	367

9.2.4 政策适应案例：瑞士旅游业适应阿尔卑斯山冰雪变化·····	367
9.3 冰冻圈灾害与风险评估·····	368
9.3.1 灾害风险与风险管理·····	368
9.3.2 冰冻圈灾害风险评估·····	369
9.4 冰冻圈区重大工程建设·····	385
9.4.1 寒区铁路、公路与冻土融沉·····	385
9.4.2 南水北调西线工程·····	390
9.4.3 冻土区输油管道·····	392
9.4.4 海冰区港口·····	395
9.5 冰冻圈旅游·····	396
9.5.1 冰冻圈旅游内涵·····	396
9.5.2 冰冻圈旅游资源特点·····	397
9.5.3 国际冰冻圈旅游发展概况·····	397
9.5.4 冰冻圈旅游资源开发案例·····	398
9.6 冰冻圈服务功能及其价值·····	399
思考题·····	402
延伸阅读·····	402
第 10 章 冰冻圈模式和冰冻圈变化的预估 ·····	405
10.1 冰冻圈模式及其在地球系统模式中的地位·····	405
10.1.1 气候模式的发展·····	405
10.1.2 地球系统中的冰冻圈模式·····	408
10.2 冰冻圈过程的模拟·····	420
10.2.1 冰川物质平衡模拟·····	420
10.2.2 冰盖物质平衡模拟·····	421
10.2.3 冻土分布与气候响应模拟·····	421
10.2.4 积雪模拟·····	423
10.2.5 海冰模拟·····	424
10.2.6 河/湖冰模拟·····	424
10.3 冰冻圈变化的预估·····	426
10.3.1 IPCC 和排放情景·····	426
10.3.2 冰冻圈变化的预估·····	429
10.3.3 冰冻圈变化预估的不确定性·····	438
思考题·····	439
延伸阅读·····	439
第 11 章 冰冻圈科学观测和实验技术 ·····	443