

“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

# 中国冰冻圈变化的脆弱性 与适应研究

丁永建 杨建平 等 / 著



科学出版社

“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

# 中国冰冻圈变化的脆弱性 与适应研究

丁永建 杨建平 等 / 著



科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书系统阐述了冰冻圈脆弱性与适应的概念、理论方法、冰冻圈变化的影响、冰冻圈灾害风险分析等冰冻圈在社会经济领域的科学研究内容,也是冰冻圈科学有关应用研究的最新成果。同时,本书研究内容也是国际上前所未有的创新领域。本书主要以中国冰冻圈变化的影响、脆弱性、风险和适应为对象,针对不同冰冻圈要素影响的关键对象,以研究案例形式较翔实地分析了冰冻圈变化对水资源、生态等产生的影响及其脆弱程度和冰湖溃决、雪灾等带来的灾害风险。

本书可供对冰冻圈、地理、气候、水文、生态、环境、人文及社科等相关领域感兴趣的大专学历及以上人员、相关科研和教学人员以及政府管理部门有关人员阅读。

审图号: GS (2019) 704 号

图书在版编目(CIP)数据

---

中国冰冻圈变化的脆弱性与适应研究 / 丁永建, 杨建平等著. —北京: 科学出版社, 2019. 5

(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 978-7-03-058137-2

I. ①中… II. ①丁… ②杨… III. ①冰川学—研究—中国 IV. ①P343.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 135055 号

---

责任编辑: 周 杰 / 责任校对: 樊雅琼

责任印制: 肖 兴 / 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>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2019 年 5 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2019 年 5 月第一次印刷 印张: 16 1/2

字数: 400 000

定价: 188.00 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

- 全球变化研究国家重大科学研究计划项目  
“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

- 全球变化研究国家重大科学研究计划“冰冻圈变化及其影响研究”项目  
“冰冻圈变化影响综合分析与适应机理研究”课题 (2013CBA01808)
- 中国科学院战略性先导科技专项 (A 类)  
“‘美丽冰冻圈’增值增效途径与应用示范”课题 (XDA23060700)
- 国家自然科学基金重点项目  
“西北内陆河山区流域水文内循环过程及机理研究” (41730751)
- 中国科学院战略性先导科技专项 (A 类)  
“三极冰冻圈服务功能及重大工程决策支持”课题 (XDA19070501)

**全球变化研究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：林岩銮、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 with 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 磊 中国科学院青藏高原研究所 研究员

王澄海 兰州大学 教授

王根绪 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所 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

# 《中国冰冻圈变化的脆弱性与适应研究》

## 著者名单

主 笔 丁永建 杨建平

成 员 (按姓氏拼音排序)

陈虹举 邓茂芝 方一平 何 勇

王生霞 王世金

## ■ 总 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的核心理念。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研究》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。

蔡大河

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研究》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研究》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前行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 ■

当前全球环境变化研究领域正在掀起一场由自然科学为主向以自然、人文和社会经济交叉融合为主,服务于可持续发展的跨学科集成研究的转变。作为这种转变的排头兵,冰冻圈科学领域早在2007年就启动了国家重点基础研究发展计划项目“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”,在全球首先开展了对冰冻圈及其变化的脆弱性与适应领域的探索性研究。2013年又启动了全球变化研究国家重大科学研究计划重大科学目标导向项目“冰冻圈变化及其影响研究”,在前述项目研究积累的基础上,进一步深入研究了冰冻圈变化的社会经济影响、风险与适应机制。尽管冰冻圈变化与可持续发展研究目前仍处于起步阶段,但10年来,经过前期探索初步形成了一套独特的研究体系,并且开展了一系列针对不同冰冻圈要素变化的影响、风险、脆弱性与适应研究,积累了研究经验和方法体系,形成了一些初步研究成果,本书就是对这些成果的系统总结。

本书是目前国际上第一部较系统阐述冰冻圈变化影响、脆弱性、风险和适应研究的专著,是冰冻圈与可持续发展研究这一新兴研究领域的最新科研成果。本书开篇剖析脆弱性与适应的概念与特征,重点阐述冰冻圈变化影响、脆弱性与适应研究方法,为后续宏观与典型区两个层面研究的展开奠定理论与方法框架。为便于读者理解后续研究内容,从多圈层相互作用角度综合概述冰冻圈变化的自然影响,为本书勾勒了开展风险、脆弱性与适应研究的大背景。之后,从自然属性层面,综合评价了冰冻圈自身对气候变化的脆弱性。在此基础上,依据中国冰冻圈变化及其影响的显著区域差异性,选取若干典型地区,量化研究这些地区受冰冻圈变化影响的程度、社会-生态系统对冰冻圈变化的脆弱性,并针对不同典型区存在的问题,提出适应措施。最后,本书从宏观层面上呈现中国冰冻圈变化的脆弱性,预估其未来变化,并提出基于问题的中国冰冻圈变化适应战略与对策措施。

全书共8章,杨建平撰写第1章、第2章、第4章、5.1节、5.4节和5.5节、7.1节、7.4节和第8章;丁永建和王生霞撰写第3章和7.4节;方一平撰写5.3节;王世金撰写第6章。5.2节与7.2节和7.3节引用邓茂芝与何勇的研究成果。效存德、赵林、庞强强和怀保娟对书稿进行了第一次审阅,提出了许多修改建议。书稿修改后钟歆、崔祥斌和王生霞对书稿进行了第二次审阅并提出了进一步修改建议。这些修改建议为提高书稿质量起到重要作用,在此深表谢忱。杨建平对全书文字进行了统稿,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了宝贵修改意见。邓茂芝为本书提供了新疆阿克苏河与乌鲁木齐河流域

冰川变化水资源脆弱性资料，何勇提供了冰冻圈变化脆弱性评估材料，陈虹举编辑了本书的部分图件，对此一并表示衷心感谢。

项目秘书组的王世金、王生霞、赵传成、上官冬辉和王文华在本书研讨、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，在幕后做出了重要贡献。在本书即将付印之际，对他们的无私奉献表示由衷的感谢！

作者

2018年9月

# 目 录

总序一

总序二

前言

|                                  |    |
|----------------------------------|----|
| 第1章 绪论 .....                     | 1  |
| 1.1 脆弱性与适应的概念与特征 .....           | 1  |
| 1.1.1 脆弱性与适应的概念 .....            | 1  |
| 1.1.2 脆弱性与适应概念内涵的扩展 .....        | 2  |
| 1.1.3 气候变化脆弱性与适应的基本要素 .....      | 5  |
| 1.1.4 气候变化脆弱性与适应的影响因素 .....      | 6  |
| 1.2 冰冻圈及其变化的脆弱性概念 .....          | 9  |
| 1.2.1 冰冻圈的脆弱性概念 .....            | 9  |
| 1.2.2 冰冻圈变化的脆弱性概念 .....          | 11 |
| 1.2.3 冰冻圈变化的暴露度、敏感性与适应能力概念 ..... | 13 |
| 1.3 小结 .....                     | 14 |
| 第2章 冰冻圈变化的脆弱性与适应研究理论与方法 .....    | 16 |
| 2.1 冰冻圈变化的脆弱性与适应研究内容 .....       | 16 |
| 2.1.1 研究范畴 .....                 | 16 |
| 2.1.2 研究内容与关键科学问题 .....          | 17 |
| 2.2 冰冻圈变化的脆弱性与适应研究方法 .....       | 21 |
| 2.2.1 构建脆弱性与适应研究指标体系框架的思路 .....  | 21 |
| 2.2.2 冰冻圈及其变化的脆弱性评价指标体系 .....    | 23 |
| 2.2.3 冰冻圈变化的脆弱性评价方法 .....        | 29 |
| 2.2.4 冰冻圈社会调查方法 .....            | 31 |
| 2.3 冰冻圈及其变化的脆弱性与适应研究布局 .....     | 34 |
| 2.3.1 中国冰冻圈分区 .....              | 34 |
| 2.3.2 研究布局 .....                 | 37 |
| 2.4 小结 .....                     | 37 |
| 第3章 中国冰冻圈变化的影响 .....             | 38 |
| 3.1 冰冻圈与其他圈层相互作用 .....           | 38 |

|       |                 |    |
|-------|-----------------|----|
| 3.2   | 冰冻圈变化对气候的影响     | 42 |
| 3.2.1 | 东亚季风            | 43 |
| 3.2.2 | 积雪与气候变化         | 44 |
| 3.2.3 | 北极海冰与大气环流       | 44 |
| 3.3   | 冰冻圈变化对水文与水循环的影响 | 45 |
| 3.3.1 | 冰冻圈与大尺度水循环      | 45 |
| 3.3.2 | 冰冻圈与陆地水文        | 51 |
| 3.4   | 冰冻圈变化对生态的影响     | 60 |
| 3.4.1 | 植被对冻土的影响        | 60 |
| 3.4.2 | 冻土对植被分布的影响      | 61 |
| 3.5   | 冰冻圈变化对地表环境的影响   | 65 |
| 3.6   | 冰冻圈变化对可持续发展的影响  | 66 |
| 第4章   | 中国冰冻圈对气候变化的脆弱性  | 70 |
| 4.1   | 数据与评价方法         | 70 |
| 4.1.1 | 冰川与冻土脆弱性评价指标体系  | 70 |
| 4.1.2 | 数据及其处理方法        | 71 |
| 4.1.3 | 脆弱性评价模型         | 74 |
| 4.1.4 | 脆弱性分级方法         | 75 |
| 4.2   | 冰川对气候变化的脆弱性     | 76 |
| 4.2.1 | 冰川脆弱性指数模型构建     | 76 |
| 4.2.2 | 脆弱性分级           | 77 |
| 4.2.3 | 冰川脆弱性的空间分布      | 77 |
| 4.2.4 | 冰川脆弱性情景预估       | 79 |
| 4.2.5 | 冰川脆弱性趋势变化       | 82 |
| 4.2.6 | 问题讨论            | 82 |
| 4.3   | 冻土对气候变化的脆弱性     | 84 |
| 4.3.1 | 研究区简介           | 84 |
| 4.3.2 | 冻土脆弱性指数模型构建     | 84 |
| 4.3.3 | 脆弱性分级           | 86 |
| 4.3.4 | 冻土脆弱性空间分布       | 87 |
| 4.3.5 | 影响冻土脆弱性的因素      | 87 |
| 4.4   | 中国冰冻圈脆弱性的综合评价   | 89 |
| 4.4.1 | 中国冰冻圈对气候变化的脆弱性  | 90 |
| 4.4.2 | 中国冰冻圈脆弱性的关键驱动因素 | 92 |
| 4.4.3 | 中国冰冻圈的脆弱性分区     | 93 |
| 4.5   | 小结              | 94 |

|                                       |     |
|---------------------------------------|-----|
| 第5章 中国冰冻圈变化的脆弱性与适应措施评估典型案例 .....      | 95  |
| 5.1 河西内陆河流域 .....                     | 95  |
| 5.1.1 河西内陆河流域简介 .....                 | 95  |
| 5.1.2 冰川变化对河西三大河流域绿洲社会经济的影响 .....     | 98  |
| 5.1.3 绿洲社会-生态系统对冰川变化的脆弱性 .....        | 105 |
| 5.1.4 绿洲社会-生态系统冰川变化适应措施评估 .....       | 118 |
| 5.2 新疆典型内陆河流域 .....                   | 123 |
| 5.2.1 乌鲁木齐河与阿克苏河流域简介 .....            | 123 |
| 5.2.2 水资源对冰川变化的脆弱性 .....              | 125 |
| 5.2.3 水资源系统冰川变化适应措施评估 .....           | 135 |
| 5.3 长江黄河源区 .....                      | 143 |
| 5.3.1 长江黄河源区自然和社会经济概况 .....           | 143 |
| 5.3.2 长江黄河源区的战略地位 .....               | 144 |
| 5.3.3 基于冰冻圈变化的生态系统脆弱性现状评价 .....       | 145 |
| 5.3.4 基于冰冻圈变化的生态系统脆弱性预估 .....         | 149 |
| 5.4 横断山地区 .....                       | 155 |
| 5.4.1 自然与社会经济概况 .....                 | 155 |
| 5.4.2 横断山地区冰冻圈变化的脆弱性 .....            | 156 |
| 5.4.3 玉龙雪山地区冰冻圈变化的脆弱性 .....           | 164 |
| 5.4.4 玉龙雪山地区冰冻圈变化的适应能力 .....          | 172 |
| 5.5 喜马拉雅山地区 .....                     | 178 |
| 5.5.1 喜马拉雅山地区自然与社会经济概况 .....          | 178 |
| 5.5.2 喜马拉雅山地区冰冻圈变化的脆弱性评价方法 .....      | 179 |
| 5.5.3 喜马拉雅山地区冰冻圈变化的暴露度、敏感性与适应能力 ..... | 182 |
| 5.5.4 喜马拉雅山地区冰冻圈变化的脆弱性 .....          | 188 |
| 5.6 小结 .....                          | 191 |
| 第6章 中国冰冻圈的灾害风险 .....                  | 192 |
| 6.1 冰冻圈灾害的类型与特征 .....                 | 192 |
| 6.1.1 冰冻圈灾害的内涵与类型 .....               | 192 |
| 6.1.2 冰冻圈灾害的特点 .....                  | 192 |
| 6.2 冰冻圈灾害的影响 .....                    | 193 |
| 6.3 冰冻圈灾害风险分析——以青藏高原三江源牧区雪灾为例 .....   | 194 |
| 6.3.1 研究区概况 .....                     | 194 |
| 6.3.2 研究方法 .....                      | 195 |
| 6.3.3 历史雪灾时空变化特征 .....                | 198 |
| 6.3.4 雪灾综合风险评估 .....                  | 201 |
| 6.4 小结 .....                          | 202 |

|                                           |     |
|-------------------------------------------|-----|
| 第7章 中国冰冻圈变化的脆弱性与适应                        | 203 |
| 7.1 中国冰冻圈变化的脆弱性综合评估                       | 203 |
| 7.1.1 脆弱性                                 | 203 |
| 7.1.2 暴露度                                 | 204 |
| 7.1.3 敏感性                                 | 204 |
| 7.1.4 适应能力                                | 205 |
| 7.1.5 综合分析                                | 205 |
| 7.2 中国冰冻圈变化的脆弱性评价与预估                      | 206 |
| 7.2.1 冰冻圈变化的脆弱性评价方法                       | 206 |
| 7.2.2 中国冰冻圈变化的暴露度、敏感性与适应能力评价结果            | 209 |
| 7.2.3 中国冰冻圈变化的脆弱性评价结果                     | 210 |
| 7.3 中国冰冻圈变化的脆弱性分区                         | 211 |
| 7.4 冰冻圈变化的适应战略与对策措施                       | 215 |
| 7.4.1 中国冰冻圈变化适应战略                         | 215 |
| 7.4.2 中国应对冰冻圈变化的对策措施                      | 218 |
| 7.5 小结                                    | 224 |
| 第8章 结论与展望                                 | 225 |
| 8.1 结论                                    | 225 |
| 8.1.1 冰冻圈变化的脆弱性与适应理论框架体系                  | 225 |
| 8.1.2 自然层面解读冰冻圈对气候变化的脆弱性                  | 225 |
| 8.1.3 案例层面解读冰冻圈变化的脆弱性与灾害风险                | 226 |
| 8.1.4 中国冰冻圈变化的脆弱性与适应                      | 227 |
| 8.2 展望                                    | 228 |
| 8.2.1 进一步完善冰冻圈变化的影响/风险、脆弱性与适应理论体系         | 228 |
| 8.2.2 构建冰冻圈与社会经济耦合模型, 量化冰冻圈变化的影响/风险与脆弱性程度 | 229 |
| 8.2.3 加强冰冻圈变化风险研究                         | 229 |
| 参考文献                                      | 230 |