

“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

冰冻圈变化 对中国西部寒区径流的影响

陈仁升 张世强 阳勇 刘俊峰 赵求东 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

冰冻圈变化 对中国西部寒区径流的影响

陈仁升 张世强 阳勇 刘俊峰 赵求东 等 / 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是全球变化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”第六课题“寒区流域水文过程综合模拟与预估研究”成果的初步总结。基于在中国西部高海拔寒区试验小流域长期观测、山区流域尺度植被与土壤调查成果,获取了中国西部寒区流域水文研究急需的高山区降水数据集,在机理研究与参数率定的基础上,开发了冰冻圈流域水文模型,探讨了冰川、冻土和积雪水文过程及其流域水文效应,综合评估了气候、冰冻圈要素及其组合变化对中国西部山区流域过去和未来径流的影响。

本书可供水文学、气象学和冰冻圈科学等专业的科研和管理人员,以及相关专业的高等院校师生、科技人员阅读和使用。

审图号: GS (2019) 671 号

图书在版编目(CIP)数据

冰冻圈变化对中国西部寒区径流的影响 / 陈仁升等著. —北京: 科学出版社, 2019. 3

(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 978-7-03-058136-5

I ①冰… II ①陈… III. ①冰川学-影响-寒冷地区-径流-研究-西南地区
②冰川学-影响-寒冷地区-径流-研究-西北地区 IV. ①P331.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 135058 号

责任编辑: 周 杰 / 责任校对: 彭 涛

责任印制: 吴兆东 / 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 3 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2019 年 3 月第一次印刷 印张: 13 1/2

字数: 350 000

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》丛书得到下列项目资助

- 全球变化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

- 全球变化国家重大科学研究计划“冰冻圈变化及其影响研究”项目
“寒区流域水文过程综合模拟与预估研究”课题 (2013CBA01806)

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

《冰冻圈变化对中国西部寒区径流的影响》

著者名单

主 笔 陈仁升 张世强 阳 勇 刘俊峰 赵求东

成 员（按姓氏拼音排序）

郭淑海 韩春坛 刘国华 刘晓娇 刘章文

吕海深 秦 甲 王 岗 王 磊 王希强

许 民 郑 勤

■ 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

■ 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 ■

中国西部冷湿寒区与干旱盆地并存。以冰冻圈为主体的西部寒区如青藏高原、天山、阿尔泰山等不仅是中国及其周边国家重要大江、大河的发源地，而且是中国西部干旱内陆河地区的水塔。水是制约中国西部干旱区经济与社会发展最关键的因素，“有水为绿洲，无水为荒漠”，中国西部寒区可用水资源基本来自以冰冻圈为主的寒区流域。在全球变暖的背景下，中国西部寒区的升温速度更是显著高于其他地区，这导致冰川大规模退缩，多年冻土退化、活动层加厚，季节冻土冻结深度变浅，积雪日数减少、消融期提前。冰冻圈萎缩不仅对寒区流域的水循环及生态产生巨大影响，更会直接影响干旱内陆河流域的水资源及水安全。随着近年来国家“一带一路”倡议的实施，以及全球《巴黎协定》的签订，急需了解气候变化背景下冰冻圈变化对中国西部特别是干旱区水资源的影响。

中国高海拔寒区占中国寒区面积的70%以上，其水文过程与北半球高纬寒区具有较大的差异，国外高纬寒区水文过程的研究结果难以反映中国高海拔寒区水文循环的特征。目前中国高海拔寒区流域水文的研究重点主要是针对冰冻圈，特别是冻土水文过程，对于高海拔山区降水时空分布，以及高海拔寒区典型植被在流域水文循环中的作用及其和环境要素的相互关系研究相对不足，其主要限制因素是缺乏全面、同步的观测数据。为此，科学技术部在2007年启动的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”中，专门涉及了冰冻圈及其变化的水文效应研究。2013年又启动了全球变化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”，其中的第六课题专门探讨了冰冻圈变化对寒区流域水文过程的影响。在这些项目的支持下，研究组在中国西部寒区开展了大量冰冻圈水文过程的野外试验观测和相关过程研究。2008年起在祁连山黑河上游的葫芦沟流域建立了冰冻圈全要素水文过程观测体系，共布设了对冰川、冻土、积雪、气象、水文、地下水、植被等相关要素的监测网络，其已形成了国内最为详细和全面的寒区水文全要素系统监测网络。此外，研究组还在祁连山疏勒河流域、天山阿克苏流域、长江源等地布设了寒区水文长期监测网络系统。目前这些监测网络系统已经成为了全球冰冻圈监测（GCW）的4个超级站之一。

经过十几年对试验点、坡面、小流域和大流域尺度的系统观测与研究，我们初步获取了中国高山区降水时空分布数据，了解了寒区流域的关键水文过程，获取了较多的相关参数和经验公式。在此基础上我们开发了适合中国高海拔寒区流域的水文模型，在对大量土壤与植被调查基础上，本书模拟并预估了气候和冰冻圈变化对西部主要寒区流域水文过程

的影响，评估了未来中国西北干旱内陆河流域可用水资源的可能变化。这些流域主要包括阿勒泰山区的克兰河和布尔津河，天山南坡的阿克苏河及北坡的呼图壁河、玛纳斯河、库车河和木扎特河，祁连山区的石羊河、黑河和疏勒河，青藏高原腹地的长江、黄河源区，以及西南地区的怒江、澜沧江和雅鲁藏布江流域。本书研究结果对《巴黎协定》气候变化情景下“一带一路”倡议重点关注区的水资源规划与利用有一定的借鉴意义。

全书由陈仁升和张世强组织撰稿和定稿，阳勇负责全书统稿，全书共分为9章。第1章为绪论，主要介绍研究意义及国内外主要研究进展。第2章主要为介绍研究区概况及主要研究方法。第3~8章为本书主要研究结果，其中第3章重点介绍高山区降水数据的重要性及其特征和校正方法，并集成了高山区降水数据集；第4~6章分别从冰川、冻土和积雪的角度分析三种主要冰冻圈要素的水文作用及其对流域水文过程的影响；第7章为冰冻圈水文模型的改进与构建；第8章主要探讨冰冻圈要素对流域水文过程的影响，并预估未来不同气候变化情境下冰冻圈变化及其对中国西部山区流域径流的影响。第9章为结论与展望。各章主要撰稿人如下：

第1章：陈仁升，阳勇。

第2章：阳勇，张世强，陈仁升，王希强，郭淑海。

第3章：刘俊峰，陈仁升，吕海深，王磊，韩春坛，郑勤。

第4章：张世强，赵求东。

第5章：阳勇，王希强，许民，刘国华。

第6章：刘俊峰，陈仁升，刘晓娇。

第7章：陈仁升，赵求东，王岗，阳勇，刘章文。

第8章：赵求东，陈仁升，张世强，秦甲。

第9章：陈仁升，阳勇。

此外，刘章文、韩春坛、王希强、王磊、郑勤、郭淑海、刘国华、刘晓娇等还协助检查了书稿的格式、单位、图表等。

本书是对过去工作的阶段性总结，但由于研究区广泛、资料匮乏以及对冰冻圈水文过程的认识程度还不深入，相关结果尚不完善，不确定性因素仍然较多。因此，相关疏漏难以避免，敬请批评指正。

项目秘书组王世金副研究员、王生霞助理研究员、赵传成副教授、上官冬辉研究员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，在幕后做出了重要贡献。在本书即将付梓之际，我对他们的无私奉献表示由衷的感谢！

作者

2017年9月

目 录

序一	1
序二	1
前言	1
第1章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 冰冻圈变化水文效应的研究进展与趋势	2
1.2.1 冰川变化对融水径流的影响	3
1.2.2 冻土退化对寒区水文过程的影响	5
1.2.3 积雪变化的水文效应	6
第2章 研究区域与方法	8
2.1 研究区概况	8
2.2 研究方法	13
2.2.1 定位观测	13
2.2.2 区域调查	16
2.2.3 模型模拟	17
第3章 高山区降水观测及降水产品	18
3.1 高山区降水观测及校准	19
3.1.1 降水观测网络	19
3.1.2 固液态降水分离	20
3.1.3 降水观测误差校正	20
3.2 高山区降水分布特征及最大高度带	24
3.2.1 降水海拔关系	24
3.2.2 降水最大高度带	26
3.3 高山区降水产品	36
3.3.1 西部寒区多源降水数据精度评价	36
3.3.2 高寒山区月降水产品 (CAPD)	38
第4章 冰川水文过程及融水变化	43
4.1 冰川水文过程	43
4.1.1 冰川融水径流的有关概念	44

4.1.2	冰川产汇流过程	45
4.1.3	冰川产流的主要影响因素	46
4.1.4	冰川融水径流特点	47
4.2	冰川水文效应	48
4.2.1	冰川变化对海平面的影响	48
4.2.2	流域水源作用	49
4.2.3	流域径流调节作用	49
4.3	过去 50 年冰川融水径流变化	51
4.3.1	乌鲁木齐河源 1 号冰川变化对融水径流的影响	51
4.3.2	不同规模冰川的融水量变化特征	54
4.3.3	中国西部冰川融水量评估	55
4.4	未来冰川融水的变化	64
4.4.1	冰川融水变化预估方法	64
4.4.2	典型流域未来冰川融水变化	65
第 5 章	冻土水文过程及其流域水文效应	70
5.1	冻土水文过程	70
5.1.1	冻土弱透水性	70
5.1.2	冻土覆盖率对径流稳定性的影响	71
5.1.3	冻土一维水热传输过程	74
5.2	近几十年来冻土退化及其对水文过程的影响	83
5.2.1	近几十年来的冻土退化概况及祁连山示例	83
5.2.2	冻土退化与径流变化	88
5.2.3	冻土退化对区域水量平衡的影响	91
5.3	冻土退化对未来河川径流的可能影响	95
5.3.1	试验点冻土水热过程升温敏感性模拟	95
5.3.2	流域尺度冻土退化对径流影响的敏感性试验	97
第 6 章	积雪水文过程及融水径流变化	100
6.1	积雪水文过程	100
6.1.1	积雪累积过程	101
6.1.2	积雪再分布过程	101
6.1.3	积雪消融过程	101
6.1.4	融雪下渗、产流和汇流过程	102
6.2	积雪水文功能	103
6.3	过去 50 年积雪要素与径流的关系	103
6.3.1	积雪日数与径流	104
6.3.2	积雪厚度与径流	108
6.3.3	MODIS 积雪面积与径流	113

6.4	过去 50 年融雪径流变化	116
6.4.1	黑河流域	117
6.4.2	疏勒河流域	119
6.4.3	长江源	119
6.4.4	黄河源	119
6.4.5	全球及中国过去融雪径流变化	119
6.5	未来融雪径流的变化	121
第 7 章	冰冻圈水文模型改进与构建	124
7.1	冰冻圈水文模型现状与问题	124
7.2	冰冻圈水文过程在流域水文模型中的耦合方法	125
7.2.1	冰川水文模块	125
7.2.2	积雪水文模块	126
7.2.3	冻土水文模块	127
7.3	VIC 模型中冰川模式的改进	127
7.3.1	模式的计算单元的改进	128
7.3.2	冰川在模式计算单元中的次网格化	129
7.3.3	冰川区气象要素的次网格化	130
7.3.4	基于 VIC 模型改进的冰川模型	131
7.4	冰冻圈流域水文模型开发	136
7.4.1	气象因子模块	137
7.4.2	冰川模块	138
7.4.3	积雪模块	139
7.4.4	植被截留及蒸散	139
7.4.5	冻土水热耦合模块	140
7.4.6	入渗过程	146
7.4.7	产流模型	147
7.4.8	汇流模块	148
7.4.9	输入与输出	150
第 8 章	寒区流域尺度径流变化综合评估	151
8.1	过去 50 年径流变化特征	151
8.2	降水和蒸散发变化对径流的影响	152
8.2.1	过去 50 年西部降水和蒸散发变化特征	153
8.2.2	降水及蒸散发变化对流域径流过程的影响	154
8.3	下垫面水文功能及其变化对寒区径流的影响	156
8.3.1	山区不同下垫面的水文功能	157
8.3.2	下垫面类型对流域径流的贡献和影响	159
8.3.3	下垫面变化对山区径流空间分布的影响	162

8.4	冰冻圈变化对过去区域/流域径流的综合影响	163
8.4.1	天山山区	163
8.4.2	祁连山山区	167
8.4.3	青藏高原	168
8.4.4	综合分析	170
8.5	中国西部寒区流域径流变化预估	170
8.5.1	21世纪中国西部气候变化特征	171
8.5.2	21世纪末中国西部主要寒区流域径流的变化	171
第9章	结论与展望	180
9.1	结论	180
9.2	展望	182
参考文献		184