

“十二五”国家科技支撑计划项目

重点领域气候变化影响与风险丛书

气候变化影响与风险

气候变化对冰川影响 与风险研究

刘时银 张 勇 刘 巧 孙美平等 著



科学出版社

重点领域气候变化影响与风险丛书

气候变化影响与风险

气候变化对冰川影响与风险研究

刘时银 张 勇 刘 巧 孙美平等 著

“十二五” 国家科技支撑计划项目

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统介绍了近年来关于冰川、积雪和冰湖变化监测与研究、冰雪变化影响以及冰湖灾害风险评估等领域研究的新进展,包括利用多源遥感技术进行冰川与冰湖编目、冰川(跃动)运动速度提取、冰川表面高程(冰量)变化监测、冰川湖突发洪水预警、潜在危险性冰碛湖判别与灾害风险评估研究方法和典型应用;融雪径流模拟与融雪型洪水评估、冰川物质平衡模拟、冰川水资源评估、流域尺度包含冰川模块的水文过程模拟等内容。

本书可供从事全球变化与冰雪资源利用与灾害防治有关的科研和技术人员以及大专院校师生使用和参考。

图书在版编目(CIP)数据

气候变化影响与风险. 气候变化对冰川影响与风险研究/刘时银等著.
—北京: 科学出版社, 2017.4

(重点领域气候变化影响与风险丛书)

“十二五”国家科技支撑计划项目

ISBN 978-7-03-051915-3

I. ①气… II. ①刘… III. ①气候变化—影响—冰川—研究
IV. ①P467②P343.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 040167 号

责任编辑: 万 峰 朱海燕 / 责任校对: 张小霞
责任印制: 肖 兴 / 封面设计: 北京图阅盛世文化传媒有限公司

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

2017年4月第一版 开本: 787×1092 1/16—

2017年4月第一次印刷 印张: 16

字数: 379 000

定价: 128.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

《重点领域气候变化影响与风险丛书》编委会

主 编 吴绍洪

编 委 (按姓氏汉语拼音排序)

丁文广 凌铁军 刘时银 吕宪国

马 欣 潘 韬 潘根兴 吴建国

吴绍洪 辛晓平 严登华 杨志勇

尹云鹤 张九天

1. 科技支撑计划项目重点领域气候变化影响与风险评估技术研发与应用课题七：气候变化对冰川影响与风险评估技术（2012BAC19B07）
2. 科技基础性工作专项中国西部主要冰川作用中心冰量变化调查（2013FY111400）
3. 国家自然科学基金项目西北干旱区流域尺度雨雪冰产流过程模拟研究（41130641）
4. 中国科学院重点部署项目专题新疆山区冰川动态与冰表热参数（KZZD-EW-12-1）
5. 国际科技合作中亚地区应对气候变化条件下的生态环境保护与资源管理联合调查与研究课题 23：气候变化对中亚冰雪变化的影响及空间差异（2010DFA92720-23）

共同资助出版

各章作者

- 第1章 刘时银
- 第2章 郭万钦 蒋宗立 魏俊锋 李弘毅
- 第3章 刘时银 姚晓军 郭万钦 许君利
- 第4章 刘巧 魏俊锋 刘时银
- 第5章 张勇 孙美平 刘巧 刘时银
- 第6章 孙美平 刘时银
- 第7章 李弘毅 李晶 戴礼云 王建
- 第8章 姚晓军 王欣
- 第9章 王欣 姚晓军 上官冬辉
- 第10章 刘时银 张勇 刘巧 孙美平 王欣

总 序

气候变化是当今人类社会面临的最严重的环境问题之一。自工业革命以来，人类活动不断加剧，大量消耗化石燃料，过度开垦森林、草地和湿地土地资源等，导致全球大气中 CO₂ 等温室气体浓度持续增加，全球正经历着以变暖为主要特征的气候变化。政府间气候变化专门委员会（IPCC）第五次评估报告显示，1880~2012 年，全球海陆表面平均温度呈线性上升趋势，升高了 0.85℃；2003~2012 年平均温度比 1850~1900 年平均温度上升了 0.78℃。全球已有气候变化影响研究显示，气候变化对自然环境和生态系统的影响广泛而又深远，如冰冻圈的退缩及其相伴而生的冰川湖泊的扩张；冰雪补给河流径流增加、许多河湖由于水温增加而影响水系统改变；陆地生态系统中春季植物返青、树木发芽、鸟类迁徙和产卵提前，动植物物种向两极和高海拔地区推移等。研究还表明，如果未来气温升高 1.5~2.5℃，全球目前所评估的 20%~30% 的生物物种灭绝的风险将增大，生态系统结构、功能、物种的地理分布范围等可能出现重大变化。由于海平面上升，海岸带环境会有较大风险，盐沼和红树林等海岸湿地受海平面上升的不利影响，珊瑚受气温上升影响更加脆弱。

中国是受气候变化影响最严重的国家之一，生态环境与社会经济的各个方面，特别是农业生产、生态系统、生物多样性、水资源、冰川、海岸带、沙漠化等领域受到的影响显著，对国家粮食安全、水资源安全、生态安全保障构成重大威胁。因此，我国《国民经济和社会发展第十二个五年规划纲要》中指出，在生产布局、基础设施、重大项目规划设计和建设中，需要充分考虑气候变化因素。自然环境和生态系统是整个国民经济持续、快速、健康发展的基础，在国家经济建设和可持续发展中具有不可替代的地位。伴随着气候变化对自然环境和生态系统重点领域产生的直接或间接不利影响，我国社会经济可持续发展面临着越来越紧迫的挑战。中国正处于经济快速发展的关键阶段，气候变化和极端气候事件增加，与气候变化相关的生态环境问题越来越突出，自然灾害发生频率和强度加剧，给中国社会经济发展带来诸多挑战，对人民生活质量乃至民族的生存构成严重威胁。

应对气候变化行动，需要对气候变化影响、风险及其时空格局有全面、系统、综合的认识。2014 年 3 月政府间气候变化专门委员会正式发布的第五次评估第二工作组报告《气候变化 2014：影响、适应和脆弱性》基于大量的最新科学研究成果，以气候风险管理为切入点，系统评估了气候变化对全球和区域水资源、生态系统、粮食生产和人类健康等自然系统和人类社会的影响，分析了未来气候变化的可能影响和风险，进而从风险管理的角度出发，强调了通过适应和减缓气候变化，推动建立具有恢复力的可持续发展社会的重要性。需要特别指出的是，在此之前，由 IPCC 第一工作组和第二工作组联合发布的《管理极端事件和灾害风险推进气候变化适应》特别报告也重点强调了风险管理

对气候变化的重要性。然而，我国以往研究由于资料、模型方法、时空尺度缺乏可比性，导致目前尚未形成对气候变化对我国重点领域影响与风险的整体认识。《气候变化国家评估报告》、《气候变化国家科学报告》和《气候变化国家信息通报》的评估结果显示，目前我国气候变化影响与风险研究比较分散，对过去影响评估较少，未来风险评估薄弱，气候变化影响、脆弱性和风险的综合评估技术方法落后，更缺乏全国尺度多领域的系统综合评估。

气候变化影响和风险评估的另外一个重要难点是如何定量分离气候与非气候因素的影响，这个问题也是制约适应行动有效开展的重要瓶颈。由于气候变化影响的复杂性，同时受认识水平和分析工具的限制，目前的研究结果并未有效分离出气候变化的影响，导致我国对气候变化影响的评价存在较大的不确定性，难以形成对气候变化影响的统一认识，给适应气候变化技术研发与政策措施制定带来巨大的障碍，严重制约着应对气候变化行动的实施与效果，迫切需要开展气候与非气候影响因素的分离研究，客观认识气候变化的影响与风险。

鉴于此，科技部接受国内相关科研和高校单位的专家建议，酝酿确立了“十二五”应对气候变化主题的国家科技支撑计划项目。中国科学院作为全国气候变化研究的重要力量，组织了由地理科学与资源研究所作为牵头单位，中国环境科学研究院、中国林业科学研究院、中国农业科学院、国家海洋环境预报中心、兰州大学等 16 家全国高校、研究所参加的一支长期活跃在气候变化领域的专业科研队伍。经过严格的项目征集、建议、可行性论证、部长会议等环节，“十二五”国家科技支撑计划项目“重点领域气候变化影响与风险评估技术研发与应用”于 2012 年 1 月正式启动实施。

项目实施过程中，这支队伍兢兢业业、协同攻关，在重点领域气候变化影响评估与风险预估关键技术研发与集成方面开展了大量工作，从全国尺度，比较系统、定量地评估了过去 50 年气候变化对我国重点领域影响的程度和范围，包括农业生产、森林、草地与湿地生态系统、生物多样性、水资源、冰川、海岸带、沙漠化等对气候变化敏感，并关系到国家社会经济可持续发展的重点领域，初步定量分离了气候和非气候因素的影响，基本揭示了过去 50 年气候变化对各重点领域的影 响程度及其区域差异；初步发展了中国气候变化风险评估关键技术，预估了未来 30 年多模式多情景气候变化下，不同升温程度对中国重点领域的可能影响和风险。

基于上述研究成果，本项目形成了一系列科技专著。值此“十二五”收官、“十三五”即将开局之际，本系列专著的发表为进一步实施适应气候变化行动奠定了坚实的基础，可为国家应对气候变化宏观政策制定、环境外交与气候谈判、保障国家粮食、水资源及生态安全，以及促进社会经济可持续发展提供重要的科技支撑。



2016 年 5 月

序

编著一部反映中国西部冰川(含积雪)变化及其影响的专著,没有项目推动很难完成,这部气候变化对冰川影响与风险研究专著正是在这一背景下完成的。“十二五”国家科技支撑计划项目“重点领域气候变化影响与风险评估技术研发与应用”,设立了第七课题“气候变化对冰川影响与风险评估技术”,该项目集合中国科学院寒区旱区环境与工程研究所和成都山地灾害与环境研究所、西北师范大学地理与环境科学学院和湖南科技大学建筑与城乡规划学院等从事冰川资源、冰雪遥感、冰川灾害等方向的研究力量,经过近5年的研究,完成了课题设定的研究任务,并在此基础上形成了本书。值得庆幸的是,该项目研究促成了一批年轻骨干快速成长,他们作为主笔牵头撰写各章,确保专著成果代表了当前该领域的最新进展。需要特别说明的是,中国科学院寒区旱区环境与工程研究所王建研究员所在团队的大力支持,由李弘毅博士系统总结了该团队近年来在积雪变化及其影响方面的进展,丰富了专著内涵。

在全球变化影响日益突显的大背景下,冰冻圈变化及其影响成为热点话题,在中国尤其如此,主要原因在于中国西部冰冻圈分布范围广大,极端干旱的内陆地区大部分水源来自于高山和高原的冰雪融水,长江、黄河、雅鲁藏布江、澜沧江、怒江等外流水系的河源区是冰冻圈地区,因为这个原因,冰冻圈与水资源和灾害主题,成为科技部、中国科学院和自然科学基金委员会等长期支持的重点方向之一,因此,国内有多个团队围绕这一主题开展研究,取得了众多突出的成果。参与这一课题研究的各成员长期坚持从事冰川编目与冰川资源、积雪变化与水资源、冰湖溃决洪水灾害等研究,为本专著奠定了坚实的基础。

中国科学院寒区旱区环境与工程研究所、地理科学与资源研究所、青藏高原研究所、新疆生态与地理科学研究所;清华大学、北京师范大学、河海大学、武汉大学;水利科学研究院等相关团队,在流域水文模型研发中,尤其是包含冰雪产流过程模块的引入,取得了大量成果,推动了面向冰冻圈水文与水资源研究的快速发展。课题组借鉴这些团队的先进成果,在西部区域冰川水资源评估、典型流域或冰川的融水径流过程及机理研究等方面取得了突出的成绩,发展出基于能量平衡过程,包含表碛影响的复杂冰川下垫面物质平衡/融水径流模型,代表了当前发展方向;利用传统冰川平均融水径流—夏季平均温度方法,结合大尺度再分析数据和零度层高度信息,计算得到中国西部近数十年来的平均冰川水资源量,是目前方法一致性程度高,且较为系统的中国西部冰川水资源的评估结果,有重要的参考价值。

西部冰川灾害广泛发育,对一些干线工程、城镇居民和水电设施等有重大影响。水是这些灾害的主要诱因,其中,冰川阻塞湖和冰碛阻塞湖溃决洪水影响较突出,因而也是过去研究的重点方向之一。该项目课题组在已有积累基础上,重点开展了基于遥感和

地理信息系统的冰湖编目、冰湖变化、潜在危险冰碛湖识别与危害风险评估方法，典型冰川湖监测与溃决风险预报方法研究等在区域冰湖危险性评估和典型冰川湖溃决预报中得到应用，为地方政府冰湖灾害防治提供了科技支撑。

近 20 年来，冰冻圈科学的快速发展与国家经济发展高度一致，在相关领域产生了一大批有国际影响的成果，该项目课题组与国内外相关领域发展保持一致，个别领域保持领先方面不懈努力，因而，本专著仅是这种努力的表现，全面反映学科发展态势的论著尚需本领域的大家来完成，本专著对正在从事学位学习和研究的青年学者有较大的启示作用，同时，对地方水资源利用规划、防灾减灾规划等有重要的参考价值。

刘时银

2016 年 5 月

前 言

本书是“十二五”国家科技支撑计划项目“重点领域气候变化影响与风险评估技术研发与应用”第七课题“气候变化对冰川影响与风险评估技术”的成果总结。课题旨在分析中国西部冰川变化基础上，系统评估冰川变化的水资源和灾害影响。

本书分为 10 章，各章主要内容如下：第 1 章介绍了中国冰川调查和编目历史、方法及其结果，冰川变化对水资源影响评估以及本书研究思路等。第 2 章系统从冰川边界提取和属性参数计算、冰川表面数字高程模型提取和基于大地测量的冰量变化研究方法、冰川表面运动速度提取等现代监测方法及其误差评估，进行了系统梳理。第 3 章介绍了利用现代遥感和地理信息系统技术完成的中国第二次冰川编目结果及第一次冰川编目数据修订，以及在此基础上获得的中国西部冰川过去 50 年来的变化。第 4 章围绕冰川物质平衡和融水径流展开，包括中国冰川物质平衡观测概况，分析了由共同时段观测所得冰川物质平衡的空间差异特征，之后介绍了冰川融水径流观测情况，以及基于观测得到的冰川径流变化基本特征。第 5 章介绍了冰川尺度物质平衡和融水径流模拟，以及流域尺度耦合冰雪产流过程的水文模型研究等近期进展，本章分别介绍了度日物质平衡模型、基于能量平衡的物质平衡模型、包含表碛区产流过程的物质平衡模型和流域尺度考虑冰川变化影响的水文模型方法、参数率定及其应用示例。第 6 章从水资源角度介绍了冰川资源评估现状、不同流域冰川径流补给比例，利用平衡线高度上的消融代表冰川平均消融量思路，系统评估了中国西部冰川水资源现状，此外，给出了典型流域基于模型方法的未来冰川水资源变化预估。第 7 章是本书围绕积雪变化与影响研究的唯一一章，本章首先总结了中国西部及其主要地区的积雪分布及基于遥感的积雪变化，之后介绍了融雪径流模拟方法及其应用，并总结了部分流域气候变化对融雪径流变化的影响及其可能趋势。第 8 章介绍了中国西部冰川灾害类型和分布，气候变化对主要冰川灾害类型的影响及其可能趋势。第 9 章重点介绍中国西部冰湖分布与变化、潜在危险性冰湖识别方法及其结果，重点地区冰湖突发洪水危害范围评估结果等。第 10 章对全书进行了总结，并指出了冰川变化与影响研究的发展趋势。

本研究除得到科技支撑计划项目（2012BAC19B07）、科技基础性工作专项（2013FY111400），国家自然科学基金重点和重大计划项目专题（41130641 和 41190084）及中国科学院重点部署项目专题（KZZD-EW-12-1）等联合支持外，本书各章作者还得到以下项目的支持：国家自然科学基金项目阿尼玛卿山地区跃动冰川近期表面变化监测研究（412012068，主持人郭万钦）；国家自然科学基金项目典型山地温冰川排水系统演化及其对冰川运动的影响机理研究（41371094，主持人刘巧）；国家自然科学基金项目天山乌鲁木齐河流域冰川水文过程试验研究（41561016，主持人孙美平）；国家自然科学基金项目多源遥感数据支持的无资料地区积雪模型参数化研究（41471358，主持人李

弘毅); 国家自然科学基金项目典型冰碛湖水量平衡过程研究(41261016, 主持人姚晓军); 国家自然科学基金项目冰碛湖坝温度场与内部结构变化的耦合机制及其对坝体稳定性的影响研究(41271091, 主持人王欣)。

此外, 本书所用冰川编目及变化数据为科技基础性工作专项中国冰川资源及其变化调查(2006FY110200)产出的数据集, 各章节涉及的遥感数据、数字高程模型数据、气象与水文数据、气候模式输出数据等, 分别来源于中国资源遥感与应用中心、国家气象局、水利部水文局, 美国宇航局和雪冰数据中心; 世界冰川监测服务处及国际气候模式比较计划第5阶段数据中心等。

丁良福、上官冬辉、吴立宗、盖春梅、赵井东、武震、张迎松、张震、鲍伟佳、冯童、吴坤鹏、王荣军、张秀娟、徐成琳等, 先后参与了冰川数据处理、野外调查、辅助制图等。秦大河院士、吴绍洪研究员、罗毅研究员、赵成义研究员、姜彤研究员、王宁练研究员、刘潮海研究员、谢自楚研究员等对完善本书提出了有益的建议和指导, 在此一并感谢。

刘时银

2016年6月

目 录

总序
序
前言

| | |
|----------------------------------|----|
| 第 1 章 绪论 | 1 |
| 1.1 中国西部冰川分布与变化评估 | 1 |
| 1.2 冰川变化影响评估 | 3 |
| 1.3 冰雪变化及其影响的评估思路 | 4 |
| 参考文献 | 5 |
| 第 2 章 冰雪遥感监测技术与方法 | 6 |
| 2.1 遥感在冰川编目中的应用 | 6 |
| 2.1.1 基于遥感的冰川分类方法 | 6 |
| 2.1.2 基于遥感的冰川编目和变化监测流程 | 12 |
| 2.2 遥感冰川物质平衡研究 | 18 |
| 2.2.1 遥感冰川物质平衡研究的主要原理 | 19 |
| 2.2.2 基于遥感大地测量法的冰川区 DEM 获取 | 21 |
| 2.2.3 基于 ICESAT 的冰川物质平衡研究 | 24 |
| 2.3 其他遥感冰川应用研究 | 25 |
| 2.3.1 基于遥感的冰川运动速度提取 | 25 |
| 2.3.2 基于遥感的冰川雪线提取 | 26 |
| 2.3.3 基于遥感的冰川反照率提取 | 27 |
| 2.3.4 基于遥感的冰川表面温度提取 | 29 |
| 2.4 遥感积雪属性研究 | 30 |
| 2.4.1 积雪面积遥感调查 | 30 |
| 2.4.2 积雪水当量遥感反演 | 31 |
| 2.4.3 积雪反照率遥感反演 | 31 |
| 2.4.4 积雪粒径遥感反演 | 32 |
| 2.4.5 遥感调查地面验证 | 33 |
| 参考文献 | 33 |
| 第 3 章 冰川分布与变化 | 45 |
| 3.1 冰川分布 | 45 |
| 3.1.1 总体分布现状 | 45 |

| | | |
|------------|--------------------|-----------|
| 3.1.2 | 各山系冰川数量与分布 | 47 |
| 3.1.3 | 各水系冰川数量与分布 | 48 |
| 3.1.4 | 冰川的表碛覆盖 | 50 |
| 3.1.5 | 冰川的高度特征 | 52 |
| 3.2 | 冰川变化 | 54 |
| | 参考文献 | 60 |
| 第4章 | 冰川物质平衡与径流观测 | 63 |
| 4.1 | 冰川物质平衡与冰川径流 | 63 |
| 4.1.1 | 基本概念和定义 | 63 |
| 4.1.2 | 全球和中国西部的冰川物质平衡监测 | 66 |
| 4.2 | 冰川物质平衡的监测和研究方法 | 68 |
| 4.2.1 | 测杆法 | 68 |
| 4.2.2 | 水量平衡法 | 71 |
| 4.2.3 | 大地测量法 | 72 |
| 4.3 | 观测物质平衡变化 | 74 |
| 4.3.1 | 全球尺度冰川物质平衡 | 74 |
| 4.3.2 | 中国冰川物质平衡 | 75 |
| 4.4 | 观测的冰川径流变化 | 78 |
| 4.4.1 | 全球尺度 | 78 |
| 4.4.2 | 中国冰川径流监测 | 79 |
| | 参考文献 | 82 |
| 第5章 | 冰川物质平衡与径流模拟 | 86 |
| 5.1 | 冰川物质平衡与径流过程 | 86 |
| 5.1.1 | 冰川物质平衡 | 86 |
| 5.1.2 | 冰川径流 | 86 |
| 5.1.3 | 冰川物质平衡与径流模拟 | 88 |
| 5.2 | 冰川尺度物质平衡与径流模拟 | 89 |
| 5.2.1 | 度日模型 | 89 |
| 5.2.2 | 能量-物质平衡模型 | 94 |
| 5.2.3 | 表碛覆盖型冰川物质平衡模拟 | 100 |
| 5.3 | 区域尺度物质平衡模拟 | 106 |
| 5.4 | 流域尺度水文模拟 | 110 |
| 5.4.1 | 模型基本原理与结构 | 110 |
| 5.4.2 | 模型输入和输出数据 | 113 |
| 5.4.3 | 模型应用进展 | 114 |
| 5.4.4 | 西部典型流域冰川水文过程模拟与预估 | 114 |
| | 参考文献 | 117 |

| | |
|-----------------------|-----|
| 第 6 章 中国冰川水资源 | 123 |
| 6.1 冰川水资源评估历史 | 123 |
| 6.1.1 概况 | 123 |
| 6.1.2 冰川径流空间分布 | 126 |
| 6.1.3 融水径流变化预估 | 128 |
| 6.2 冰川水资源现状评估 | 128 |
| 6.2.1 冰川冰储量估算 | 129 |
| 6.2.2 冰川水资源现状评估 | 131 |
| 6.3 冰川水资源变化预估 | 141 |
| 6.3.1 研究区概况 | 142 |
| 6.3.2 径流对气候变化响应 | 143 |
| 6.3.3 流域未来气候情景及冰川响应 | 146 |
| 6.3.4 流域未来径流预估 | 151 |
| 参考文献 | 154 |
| 第 7 章 中国西部积雪水资源 | 158 |
| 7.1 积雪分布与变化 | 158 |
| 7.1.1 概况 | 158 |
| 7.1.2 积雪变化 | 158 |
| 7.1.3 融雪径流变化与影响 | 163 |
| 7.2 融雪过程模拟方法及气候变化情景模拟 | 168 |
| 7.2.1 融雪过程模拟方法 | 168 |
| 7.2.2 积雪水文模拟及预估 | 171 |
| 7.3 积雪水资源未来变化 | 174 |
| 参考文献 | 175 |
| 第 8 章 冰川灾害 | 179 |
| 8.1 冰川灾害类型 | 179 |
| 8.1.1 雪崩 | 179 |
| 8.1.2 冰崩 | 181 |
| 8.1.3 冰川跃动 | 183 |
| 8.1.4 冰湖溃决洪水 | 185 |
| 8.1.5 冰川泥石流 | 187 |
| 8.2 冰川灾害分布 | 187 |
| 8.2.1 雪崩灾害分布 | 188 |
| 8.2.2 冰湖溃决洪水灾害分布 | 192 |
| 8.2.3 冰川泥石流灾害分布 | 194 |
| 8.3 冰川灾害与气候变化 | 196 |
| 参考文献 | 199 |

| | |
|------------------------|-----|
| 第 9 章 冰湖变化与溃决灾害 | 202 |
| 9.1 冰湖分布与变化 | 202 |
| 9.1.1 冰湖遥感调查概述 | 202 |
| 9.1.2 中国西部冰湖分布 | 203 |
| 9.1.3 中国西部冰湖变化 | 206 |
| 9.2 冰湖溃决灾害评价 | 207 |
| 9.2.1 潜在危险性冰湖识别 | 207 |
| 9.2.2 冰湖溃决概率模型 | 210 |
| 9.3 典型湖溃决洪水模拟案例 | 215 |
| 9.3.1 冰碛湖溃决洪水 | 215 |
| 9.3.2 冰川阻塞湖突发洪水 | 222 |
| 参考文献 | 226 |
| 第 10 章 结论与展望 | 229 |
| 10.1 结论 | 229 |
| 10.1.1 冰川遥感与冰川变化监测 | 229 |
| 10.1.2 冰川物质平衡/径流变化 | 230 |
| 10.1.3 冰川水资源变化 | 231 |
| 10.1.4 积雪水资源变化 | 232 |
| 10.1.5 冰湖变化与冰湖突发洪水灾害风险 | 233 |
| 10.2 展望 | 234 |
| 10.2.1 冰川监测 | 234 |
| 10.2.2 冰川水资源 | 236 |
| 10.2.3 冰湖及其突发洪水灾害 | 236 |

第 1 章 绪 论

高亚洲,外文文献中多以 High Asia 或 High Mountain Asia 表述,泛指包括青藏高原、帕米尔高原、天山和阿尔泰山等山系,拥有连片且海拔超过 2000 m 山地所构成的地区。高亚洲不仅是除极地之外最大的冰川发育区,冰川面积约占全球冰川面积的 1/6 (Pfeffer et al., 2014),而且是中低纬度地区最大的多年冻土发育区和季节积雪分布区。冰川和冻土发育的高海拔地区是与高亚洲约 20 亿人口密切相关的数条大河(额尔齐斯河、锡尔河、阿姆河、伊犁河、黄河、长江、怒江、澜沧江、雅鲁藏布江、恒河、印度河,以及塔里木盆地内流区、准噶尔盆地内流区、河西走廊内流区、柴达木盆地内流区、青藏高原内流区)的水资源形成区,冰雪冻土波动在这些河流径流的季节、年际和年代际变化中扮演了十分重要的角色。受全球变暖影响,世界各地的冰川纷纷表现出退缩趋势,一些流域因冰川退缩,河川径流季节和年际过程有所改变,一些地区冰川洪水及其诱发泥石流有加剧趋势,因而,监测冰川变化,评估冰川变化对水资源变化和利用带来的深刻影响有巨大的现实需求。

1.1 中国西部冰川分布与变化评估

根据 Randolph Glacier Inventory (RGI5.0) 统计,全球除南极和格陵兰两大冰盖之外的冰川面积约为 $72.68 \times 10^4 \text{ km}^2$,其中,高亚洲冰川面积约占全球冰川总面积的 13.6%,而高亚洲冰川面积的 52.4%位于中国。中国冰川主要分布于青藏高原、帕米尔高原、天山和阿尔泰山等地区。1978~2002 年完成的中国第一次冰川编目首次查明我国冰川家底,结果表明我国是中低纬度地区冰川资源大国,也是世界上第三大冰川资源国(图 1.1)。

自 1958 年祁连山冰川考察以来,我国科学家先后对西部各山脉主要冰川作用中心开展了野外考察和短期观测,并建立了天山冰川观测试验站。大量考察和观测数据,结合系统性的冰川编目数据,在理论分析和数值计算的基础上,对我国冰川的性质、各流域冰川数量及其融水补给作用、冰川灾害分布及其变化等有了较深入的认识,这些积累为不断深化冰川变化及其对水资源变化和灾害演化机理的认识水平奠定了基础。根据早期有限的冰川数据,施雅风和谢自楚(1964)将我国冰川划分为海洋型和大陆型,后者又可区分亚大陆型和极大陆型,这一分类系统在国内外被广为接受。赖祖铭和黄茂桓(1988)根据测得的 22 条冰川冰温、表面运动速度、平衡线高度上的年平均气温、夏季平均气温和年降水等指标,将中国冰川划分为温型(海洋型)、亚极地型(亚大陆型)和极地型(极大陆型)三种类型,并首次从区划角度给出上述各类型冰川的大致分布范