

“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

青藏高原多年冻土及变化

赵 林 盛 煜 等 / 著



科学出版社

《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项目 “冰冻圈变化及其影响研究”
“冻土水热过程及其对气候的响应” 课题 (2013CBA01803)
- 国家科技基础性工作专项重点项目 “青藏高原多年冻土本底调查”
(2008FY110200)

“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

青藏高原多年冻土及变化

赵 林 盛 煜 等 / 著



科学出版社
北京

内 容 简 介

本书将青藏高原多年冻土作为主要研究对象,基于多年来对青藏高原多年冻土方面的研究成果,系统地总结和介绍了多年冻土及其变化过程,并重点阐述了活动层水热特征和多年冻土相关特征的变化过程及其模拟。本书紧扣青藏高原多年冻土及其变化这一主题,主要内容包括多年冻土国内外研究的最新进展和趋势、研究的重点区域和数据获取方法、多年冻土分布特征、活动层水热特征、多年冻土温度和厚度、多年冻土地下冰和碳储量及其碳源汇效应等,以及结合模型对多年冻土水热过程及其变化进行模拟。本书利用长期野外考察、定位观测试验的成果,突出理论结合实际,系统总结了青藏高原多年冻土及其变化与气候、环境等相互作用的最新研究成果和进展,为中国冰冻圈科学研究尤其是青藏高原多年冻土研究提供参考。

本书可供高校地理学专业学生、冻土学专业研究人员、冰冻圈科学研究人员,以及寒区大气、生态和水文等相关方面的科研和技术人员使用和参考。

图书在版编目(CIP)数据

青藏高原多年冻土及变化 / 赵林, 盛煜等著. —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 978-7-03-058133-4

I. ①青… II. ①赵… ②盛 III. ①青藏高原—多年冻土—研究 IV. ①P642. 14

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 135061 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: 23 3/4

字数: 560 000

定价: 268.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

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 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

《青藏高原多年冻土及变化》 著者名单

主 笔 赵 林 盛 煜

成 员 (按姓氏拼音排序)

陈 继	杜二计	谷良磊	胡国杰	李 静
李 韧	李旺平	刘广岳	庞强强	乔永平
秦艳慧	尚 雯	孙琳婵	王 武	王澄海
王玉玉	吴吉春	吴通华	吴晓东	肖 瑶
谢昌卫	姚济敏	岳广阳	赵拥华	邹德富

■ 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。

秦大河

中国科学院院士

2017 年 12 月

■ 总 序 二 ■

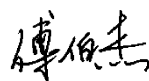
冰冻圈是气候系统的重要组成部分，在全球变化研究中具有举足轻重的作用。在科学技术部全球变化国家重大科学研究计划支持下，以丁永建研究员为首席的研究团队围绕“冰冻圈变化及其影响研究”这一冰冻圈科学中十分重要的命题开展了系统研究，取得了一批重要研究成果，不仅丰富了冰冻圈科学研究积累，深化了对相关领域的科学认识水平，而且通过这些成果的取得，极大地推动了我国冰冻圈科学向更加广泛的领域发展。《冰冻圈变化及其影响研究》系列专著的出版，是冰冻圈科学向深入发展、向成熟迈进的实证。

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奋进中不断取得辉煌成果！



中国科学院院士

2017年12月

前 言

人类对多年冻土的关注，始于认识其独特的水文地质和工程地质性质。各类工程活动对多年冻土区地表土层的扰动，都可能导致多年冻土上限下降、多年冻土层中地下冰融化，进而诱发地基土层沉降，使工程建筑物发生变形、开裂乃至破坏。人们在多年冻土区的活动，离不开对生活用水的需求，如同非多年冻土区，人们曾试图凿井取水，但大多以失败而告终。因此，探求多年冻土的工程地质性质、冻土区地下水的分布及冻融破坏的防护措施是早期冻土学家关注的焦点，查明多年冻土的分布特征、发育条件，以及地下冰的形成和融化过程等科学探究都是围绕工程活动而展开的。

近 30 年来，特别是 21 世纪以来，科学家注意到，多年冻土通过对地表能量、水量及有机碳循环过程的影响，在气候、水文、生态等系统中发挥着重要作用，冻土学的研究范畴逐渐扩展到多年冻土与气候、水文和生态过程的相互作用关系，其中的关键科学问题是准确描述活动层和浅层多年冻土内部的水、热和碳氮等物质和能量运移的物理过程。但人类对多年冻土的认识依然非常有限，从全球甚至区域尺度看，也仅仅初步了解了多年冻土分布的大致空间格局，对于多年冻土的其他特征，如厚度、地下冰等信息的了解更是非常有限。多年冻土的这些基本信息是开展区域气候、水文和生态等陆面过程模拟的基础输入背景资料，也是准确确定地表辐射平衡、土壤水热特征等物理参数的基础。因此，查明多年冻土的这些基本特征及影响因素，一直是冻土学长期以来的主要研究内容之一。

在多年冻土区活动层冻融过程中，土壤的水热物理性质、地表蒸散发、植被生长状况、地表反照率等都发生着显著的周期性变化，并通过其变化调节着土壤和大气间的感热、潜热、动量等能水交换过程。在全球气候变化背景下，这些周期性过程已经或者正在发生着显著变化，探求这些变化的物理过程和机制、构建准确描述这些过程和机制的各类模式，是现代冻土学的另一主要研究内容。

多年冻土区赋存的大量有机碳是伴随多年冻土的发育过程而积累和储存下来的，低温和强烈的冻融作用，是土壤有机碳得以积累和保存的基础。气候变暖会引起多年冻土的融化，这可能会直接导致多年冻土作为有机碳汇这一功能的减弱乃至消失，温室气体的排放加速了全球气候的变暖。因此，查明多年冻土区碳氮循环的过程和机理，定量描述其与气候之间的互馈关系，是冻土、生态和气候学家正在积极开展的科学研究任务之一。

青藏高原是中低纬度高海拔多年冻土分布的典型区域，面积超过 100 万 km^2 的长期处于冻结状态并富冰的冻土/岩层叠加在面积超过 250 万 km^2 、平均海拔在 4000m 以上的青藏高原这一巨型构造单元之上，强烈影响着该地区乃至周边地区的气候、水文和生态系统，也在全球大气环流中发挥着独特作用。与高纬度多年冻土相比，青藏高原多年冻土区具有独特性，主要表现为多年冻土的温度较高，连续性较差，多年冻土上限埋藏较深，活

动层厚度大，土壤有机质含量低等，这些特点决定了其对气候变化的响应和反馈有其自身的独特性。自 20 世纪 80 年代以来，尽管随着高精度监测仪器的应用，针对青藏高原冻土内部水热变化过程的定位监测得以广泛开展，但对高原多年冻土理解的广度和深度，仍然不能满足生产实践和科学研究的需求。在当前的气候背景下，要深入了解青藏高原的气候、水文、生态、环境现状及其在当前气候背景下的发展趋势，有必要对青藏高原多年冻土及其相关的研究成果进行系统总结。2009 年，由科学技术部支持的国家科技基础性工作专项重点项目“青藏高原多年冻土本底调查”启动，该项目对 5 条大断面的线路和 6 个典型区开展了多年冻土综合调查；同时，在已有监测网点的基础上，完善了青藏高原多年冻土综合观测网络，获取了冻土与环境因子的本底数据，辅以遥感技术，开展了多年冻土分布综合制图，完成了对青藏高原多年冻土现状的综合评估。

2013 年，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”启动后，在第三课题“冻土水热过程及其对气候的响应”（课题编号：2013CBA01803）的支持下，以前期建立的多年冻土定位监测网和监测数据为基础，针对活动层水热运输的物理机制和中亚高海拔多年冻土变化基本特征等方面的研究工作，结合气候变化和冻土内的热传输理论，初步构建了可以与陆面过程模式相互耦合的多年冻土变化模式，开展了高海拔多年冻土对气候变化响应方面的模拟。

本书是在我国冻土学工作者近半个世纪工作的基础上，依托中国科学院青藏高原冰冻圈观测试验研究站（藏北高原冰冻圈特殊环境与灾害国家野外科学观测研究站，简称格尔木站）和冻土工程国家重点实验室（简称冻土实验室），在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”项目第三课题“冻土水热过程及其对气候的响应”的支持下，对格尔木站和冻土实验室在青藏公/铁路格（格尔木）拉（拉萨）段、国道 214 线（西宁-玉树）、省道 308 线（清水河-不冻泉省）、柴（柴达尔）木（木里）地方铁路、天（天峻）木（木里）公路、热（热水）江（江仓）公路等公路、铁路沿线取得的大量调查和长序列观测资料，以及在科学技术部国家科技基础性工作专项重点项目“青藏高原多年冻土本底调查”支持下获得的基本覆盖青藏高原主体的大量第一手调查和监测资料，对青藏高原多年冻土的空间分布格局及多年冻土区地表和浅表层土壤的水热运输过程进行了综合研究，完成了高原尺度多年冻土区植被、土壤分布图的编制；完成了多年冻土及活动层厚度、多年冻土厚度、地下冰及土壤有机碳氮分布图的编制；给出了冻融作用下多年冻土区地表反照率、粗糙度、土壤热物理特征等的参数化方案；模拟了多年冻土区地表水循环过程、活动层内部水热过程及多年冻土变化的物理过程；评估了高寒草甸、高寒草原两类多年冻土区主要下垫面类型下二氧化碳和甲烷温室气体的源汇效应；预估了在气候变化情境下高原多年冻土可能的变化。本书集成了研究团队近十年来在冻土领域的主要研究成果，并首次发布了大量野外调查和监测数据，为青藏高原地球科学领域的相关科学研究、工程实践和生态保护方案建设提供了基础数据和科学依据。

本书共分为 10 章 38 节，涉及的数据以附件的形式给出了清单。本书的结构和内容在第 1 章绪论中进行了较为详细的阐述。本书各章撰写情况如下：第 1 章，赵林、盛煜；第 2 章，盛煜、赵林、陈继、吴通华、吴吉春、李韧、李旺平、岳广阳、杜二计、王武、谢

昌卫；第3章，盛煜、赵林、邹德富、陈继、吴吉春、吴通华、李静、谢昌卫；第4章，姚济敏、肖瑶、李韧、胡国杰、乔永平、谷良磊、王玉玉、孙琳婵；第5章，李韧、胡国杰、邹德富、赵林、乔永平、秦艳慧；第6章，王武、刘广岳、杜二计、陈继；第7章，庞强强、赵林、刘广岳、陈继；第8章，吴晓东、赵拥华、乔永平、尚雯；第9章，赵林、吴吉春、谢昌卫、杜二计、刘广岳、王澄海；第10章，赵林、盛煜、肖瑶等。本书经赵林、盛煜、李韧、谢昌卫统稿，由赵林、盛煜统一汇编、定稿，庞强强对全书进行了汇总。

近20年来，青藏高原多年冻土的研究工作不断深入，高原尺度多年冻土分布和变化的模拟结果也经常见诸国际上相关主流学术期刊。然而，受不同学者对多年冻土的独特物理解过程的差异，以及标校和验证资料空间和时间尺度的限制，不同模拟结果的差别较大。本书补充了大量实地调查和观测资料，给出了目前最接近青藏高原多年冻土分布和特征现状的基础本底参照数据系列。然而，受诸多因素的影响和限制，很多结果也仅仅是对现有资料初步分析的结果，许多认识还有待进一步深入和提升。本书难免存不足和疏漏之处，敬请读者不吝指正！

在项目的执行及本书的撰写过程中，得到了科学技术部、中国科学院以及中国科学院寒区旱区环境与工程研究所、冰冻圈科学国家重点实验室和冻土工程国家重点实验室有关领导和专家的大力支持。另外，全球变化国家重大科学研究计划项目相关专家和主要研究骨干也数次对本书的初稿及修改版本提出了详细的修改意见和建议。在此，致以衷心的感谢！

著 者

2018年12月18日

目 录

总序一	
总序二	
前言	
第 1 章 绪论	1
1.1 多年冻土研究的进展与趋势	3
1.1.1 多年冻土空间分布与特征调查和研究	3
1.1.2 多年冻土基本信息的获取方法	4
1.1.3 多年冻土水热过程及模拟	6
1.2 青藏高原多年冻土研究历史及面临的挑战	7
1.2.1 青藏高原多年冻土研究历史	7
1.2.2 青藏高原多年冻土研究存在的主要问题	9
1.3 本书的结构和主要内容	12
第 2 章 研究区域与方法	14
2.1 青藏高原多年冻土区的地质背景及气候、地理特征	14
2.1.1 青藏高原的地质背景	14
2.1.2 青藏高原的气候特征	16
2.1.3 植被特征	19
2.1.4 土壤特征	22
2.2 野外调查及数据	25
2.2.1 调查区概况	25
2.2.2 植被调查数据	29
2.2.3 土壤剖面数据	35
2.2.4 多年冻土垂直地层剖面数据	38
2.2.5 多年冻土下限物探调查数据	43
2.2.6 活动层厚度物探调查数据	50
2.3 监测网络及监测数据	59
2.3.1 青藏高原多年冻土监测网络概述	59
2.3.2 综合气象监测	61
2.3.3 活动层水热变化监测	63
2.3.4 多年冻土温度监测	64
2.4 遥感及空间数据	65

2.4.1	基础空间数据	66
2.4.2	遥感产品及再分析资料	68
2.4.3	空间数据适用性评价	71
第3章	多年冻土分布	76
3.1	典型调查区多年冻土发育特征及分布	76
3.1.1	温泉调查区	76
3.1.2	改则调查区	78
3.1.3	西昆仑调查区	80
3.1.4	阿尔金调查区	83
3.1.5	西大滩调查区	84
3.1.6	祁连山大通河源区	85
3.1.7	祁连山疏勒河上游区	86
3.2	青藏高原主要道路沿线多年冻土发育特征及分布	88
3.2.1	青藏公路沿线	88
3.2.2	214 国道沿线	90
3.2.3	308 省道沿线	93
3.2.4	219 国道沿线	96
3.3	高原多年冻土分布与制图	99
3.3.1	青藏高原多年冻土制图研究综述	99
3.3.2	青藏高原多年冻土分布及验证	102
3.3.3	多年冻土温度分布	106
3.4	小结	108
第4章	多年冻土区地表水热过程特征	109
4.1	地表能量平衡过程	109
4.1.1	地表能量收支过程的监测计算	109
4.1.2	地表能量闭合率	111
4.1.3	地表能量通量的季节变化	112
4.1.4	多年冻土区与季节冻土区地表能量平衡过程对比	113
4.1.5	多年冻土区晴天日地表能量通量变化	114
4.2	多年冻土区地表参数与活动层水热参数	116
4.2.1	多年冻土区地表参数特征	116
4.2.2	活动层热力学参数及其参数化	122
4.2.3	地表积雪特征及参数化方案	127
4.3	多年冻土区陆面过程的模拟研究	131
4.3.1	陆面过程模型在高原多年冻土区的改进	131
4.3.2	基于 CoupleModel 在高原多年冻土区的水热过程模拟	137
4.4	多年冻土区地表能量通量的空间分异规律	144

4.5	小结	149
第5章	活动层的水热特征	150
5.1	活动层冻融过程中的温度变化规律	150
5.1.1	冻融过程中的温度变化特征	150
5.1.2	活动层的冻融过程	157
5.2	活动层冻融过程土壤水分变化规律	161
5.2.1	冻融过程中活动层的未冻水含量变化	162
5.2.2	冻融过程中活动层的水分迁移	164
5.3	活动层冻融过程中水热耦合变化规律	166
5.3.1	土壤水分垂直运动对活动层热状况的影响	166
5.3.2	冻融过程中水热耦合运移特征	172
5.3.3	活动层内部的相变	174
5.4	活动层厚度的空间分布	178
5.4.1	活动层厚度的空间分布	178
5.4.2	活动层的影响因子	181
5.5	小结	192
第6章	青藏高原多年冻土厚度	194
6.1	多年冻土厚度的确定方法	194
6.1.1	钻探	194
6.1.2	地温梯度法	195
6.1.3	物探	196
6.2	多年冻土厚度的影响因素	196
6.2.1	多年冻土厚度与地质、地热	197
6.2.2	多年冻土厚度与地形、地貌及地表状况	199
6.2.3	多年冻土厚度与水体	204
6.3	多年冻土厚度分布	207
6.3.1	多年冻土厚度概况	207
6.3.2	典型区多年冻土厚度	208
6.3.3	多年冻土厚度空间分布	214
6.4	小结	215
第7章	青藏高原多年冻土地下冰	217
7.1	地下冰分类和影响因素	217
7.2	青藏高原地下冰的区域分布特征	218
7.2.1	温泉调查区	219
7.2.2	西昆仑调查区	221
7.2.3	改则调查区	223
7.2.4	阿尔金调查区	224