



多年冻土调查手册

Permafrost Survey Manual

主 编 赵 林 盛 煜

副主编 南卓铜 吴通华 周国英



科学出版社

多年冻土调查手册

主 编 赵 林 盛 煜

副主编 南卓铜 吴通华 周国英

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

多年冻土是陆地冰冻圈的重要组成部分,占据着北半球约四分之一的陆地面积,在区域乃至全球气候、水文、生态系统中发挥着重要作用,并影响着寒区工程的稳定性。而获得多年冻土基础数据资料的最基本而又有效的方法即是实地开展多年冻土调查。本书综合国内外多年冻土野外调查、观测和研究方法及作者过去 20 年来的实际经验,系统描述了开展多年冻土野外调查的方法,内容包含多年冻土的基本概念、主要影响因子、调查的主要内容及方法、多年冻土制图和多年冻土数据库建设等。

本书可供冰冻圈科学及与多年冻土有关的大气、水文、生态等方面的科研和技术人员,以及大专院校师生使用和参考。

图书在版编目(CIP)数据

多年冻土调查手册 / 赵林, 盛煜主编. —北京: 科学出版社, 2015. 9

ISBN 978-7-03-045611-3

I. ①多… II. ①赵…②盛… III. ①多年冻土—调查—手册

IV. ①P642.14-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 211944 号

责任编辑: 王 运 / 责任校对: 韩 杨

责任印制: 肖 兴 / 封面设计: 耕者设计工作室

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>

北京通州皇家印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 9 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2015 年 9 月第一次印刷 印张: 13 1/4

字数: 320 000

定价: 138.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

作者名单

(以姓氏汉语拼音为序)

陈 继	杜二计	方红兵	胡国杰
李 韧	李旺平	刘广岳	南卓铜
庞强强	乔永平	尚 雯	盛 煜
史健宗	王 武	王志伟	吴吉春
吴通华	吴晓东	肖 瑶	岳广阳
赵 林	赵拥华	周国英	邹德富

科技部科技基础性工作专项“青藏高原多年冻土本底调查”（项目编号：2008FY110200）项目

国家重大科学研究计划“冰冻圈变化及其影响研究”第三课题“冻土水热过程及其对气候的响应”（项目编号：2013CBA01803）

中国科学院青藏高原冰冻圈观测研究站（又称：藏北高原冰冻圈国家野外科学观测研究站）

冰冻圈科学国家重点实验室

共同资助出版

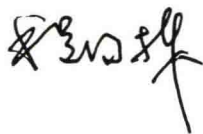
序

—

多年冻土是发育于地表下一定深度内至少两年及两年以上处于负温状态的土（岩）层，其主要分布于环北极的高纬度地区和中低纬度的高海拔地区，其中青藏高原是全球中低纬度多年冻土分布面积最广的地区。这里气候严寒、人迹罕至，备受关注的青藏铁路的修建才使多年冻土这一原本非常陌生的地理、地质现象更多地出现在相关媒体的报道中。事实上，多年冻土的存在不仅是这些地区工程建设面临的重大问题，更是通过影响浅地表土层的热量和水分循环过程，而影响着区域气候、水文、生态系统。在全球变暖背景下，多年冻土的变化可能带来一系列区域水文、生态乃至工程地质问题。只有深入了解多年冻土的现状和变化过程，才能更好地为区域经济社会可持续发展献计献策。

我国的多年冻土研究是从解决林业、铁路、公路以及公民建筑等生产实践中的冻土问题开始，发展到开展多年冻土分布、特征和变化研究，再到开展多年冻土内部水热过程及其与气候、生态和水文过程等的相互作用机制研究，从无到有，不断发展。青藏铁路的修建，成功解决了高温、高含冰量冻土区的工程稳定性问题，成为我国冻土学家解决生产实践问题的典范，在国际多年冻土学界享有较高声誉。这期间一代又一代科技人员，长年奔波在高寒缺氧、交通不便的多年冻土区，付出了艰辛的劳动。冻土研究者的足迹遍布于东北的大小兴安岭地区、祁连山、天山和阿尔泰山等高山峻岭以及地势高亢的青藏高原地区，积累了丰富的冻土学资料，获得了大量的研究成果。数代人的艰苦努力，在学习、借鉴国际多年冻土调查和研究基本方法的同时，摸索出了一套适合于开展我国高海拔多年冻土调查和研究的流程和方法。

随着人们对全球气候变暖现象的日益重视，多年冻土在全球气候系统中的作用受到了越来越多的关注，冻土学的发展正迎来新一轮的高潮。进一步摸清我国多年冻土分布、活动层厚度、冻土地温、冻土分布区地形地貌、土壤、植被分布等本底数据，为国家经济建设和相关领域的科学研究服务，具有重要的现实意义。而规范、合理的调查研究方法是获取准确数据资料的基础。非常欣慰地看到由赵林研究员和盛煜研究员领衔，由他们研究团队集体编著的这部《多年冻土调查手册》。该调查手册对过去数十年来多年冻土考察和监测研究中积累的经验和方法进行梳理和继承，并对近年来多年冻土研究中新开展的研究内容和方法进行了总结，这对保证冻土调查数据与历史调查数据资料一致性、可比性有重要的现实意义。相信本书的出版，将对开展多年冻土区野外考察、定位监测和试验等起到指导作用，对冻土学学科的发展有十分积极的意义。



中国科学院院士
2015年1月23日

序 二

赵林研究员邀请我为本书写序，我欣然答应。作为长期从事冰冻圈科学调查和研究的科学工作者，非常明白冰冻圈科学数据之来之不易，合理、规范的调查和研究方法是获取可靠数据资料的保证。继《冰川观测与研究方法》一书于2013年正式出版后，本书是指导冰冻圈野外调查和研究的第二部方法论专著，期望本书的出版能够为冰冻圈科学的发展添砖加瓦。

多年冻土是除积雪外，在全球陆地表面分布面积最大的冰冻圈组分。其独特的下垫面特征和大量地下冰的发育使其在气候、水文和生态系统中发挥着重要作用。准确评估多年冻土分布、获取多年冻土及其主要影响因子的基础数据资料有着重要意义。

观测表明，近年来全球绝大部分地区的多年冻土正处于退化状态，已经带来了一系列水文、生态乃至工程问题，并通过改变陆面能、水和碳氮循环过程，影响着区域乃至全球气候。多年冻土作为弱透水层或者隔水层，首先通过其上覆的季节融化层，也即活动层的动态变化调节着区域水文过程，而多年冻土中地下冰的融化，也将参与到全球水循环过程中。此外，未来多年冻土退化可能导致数千万吨的二氧化碳和甲烷气体排放到大气中，对全球碳、氮循环过程产生较大影响。然而，受现有多年冻土基础资料以及对多年冻土研究深度的限制，科学家不仅不能准确评估多年冻土变化到底导致每年有多少地下冰被融化、有多少有机碳被分解和排放、融化的地下冰对海平面的贡献、分解的有机碳对全球气候的影响程度等科学问题，更谈不上准确预估其未来的变化和影响。

在中国，系统的多年冻土调查和研究始于新中国成立初期，由于东北冻土区地矿调查、林业开发、工程建设及各项生产建设的需要，冻土科学的研究得到了迅速发展。自1960年以来，几代冻土科技工作者坚持在青藏高原、西部高山及东北大小兴安岭，克服气候严寒、高山缺氧等种种困难，为国家经济建设和发展做出了卓有成效的贡献，形成了较为系统、实用的野外调查和研究方法，积累了大量的冻土科学资料，使我国冻土学研究取得了长足的进展。这些方法由一代代科学家在具体的调查研究过程中，通过言传身教传了下来，并被分散地记录到各类文献资料中，但却没能形成系统的方法论。近年来，冰冻圈科学国家重点实验室赵林研究员和他的团队，在长期野外调查和研究的基础上，进行了系统总结，结合国内外多年冻土研究的理论和实践，编写了《多年冻土调查手册》这部适用性很强的著作，对已经从事和即将从事多年冻土调查、监测和研究的科技工作者具有极大的参考价值。

《多年冻土调查手册》以指导如何准确获取多年冻土及与多年冻土有关领域的基础数据为目的，较为全面地介绍了开展多年冻土调查、监测和研究的方法。本手册以国家相关行业标准和相关学科通用的常规方法为主要参考，在充分考虑当前全球多年冻土研究面临的科学问题和未来可能的发展趋势的基础上，综合国内外相关文献编写而成。全书通俗易



懂、图文并茂、理论结合实际、便于操作，系统地介绍了多年冻土观测的新技术和新方法，丰富了冻土学的研究内容，为提高多年冻土研究水平奠定了基础。总之，这本专著是作者及其团队工作方法的系统总结，是一部理论联系实际、规范野外调查方法的教材，在普及冻土学基础知识，规范多年冻土野外工作方面具有较高参考价值。相信本书不仅是多年冻土科技工作者的指导性专著，同时也将为我国冰冻圈科学领域长期观测和联网研究提供重要的参考依据。

秦大河

中国科学院院士

2015年1月25日

前 言

地球表层现代多年冻土分布面积约占陆地总面积的 24%，主要分布于环北极的高纬度地区和中低纬度的一些高海拔地区。我国的多年冻土面积居世界第三位，约占国土面积的 22.3%，主要分布于东北地区的大小兴安岭地区和西部的高山区以及青藏高原，其中青藏高原是世界上高海拔多年冻土分布最广的地区。由于多年冻土对区域生态、水文和气候环境以及资源开发、重大工程规划具有重要的影响，对气候变化有很好的指示作用，国内外针对多年冻土分布、特征及其与区域环境、气候的相互作用方面开展了大量的研究。我国的多年冻土研究是在冻土区工程建设实践中产生和发展起来的。从 20 世纪 50 年代开始，来自中国科学院、高等院校的科研人员会同交通、铁路及矿产开采等生产部门的科技人员克服了气候严寒、高山缺氧等重重困难，在多年冻土发育区开展了大量的科学考察、定点监测和试验工作，积累了丰富的冻土科学资料，取得了丰硕的研究成果。1980 年以来，随着高精度监测仪器的应用，针对冻土内部水热变化过程的定位监测得以广泛开展。这些工作对全面了解多年冻土分布范围、活动层内部水热特征以及变化趋势有重要意义。同时，经过多年的野外科学调查、观测和室内资料分析，逐渐形成了一套常规的冻土调查和研究的方法。将这些调查研究方法梳理总结，以规范或者手册的形式成书出版一直是冻土学领域科研人员的期望。然而，由于冻土学本身是一门新兴的学科，也是一门交叉学科，其调查和研究方法涉及地质学、大气科学、物理学、生物学、土壤学以及化学等众多学科领域，因此尽管不同时期不同的科研人员有编写冻土调查规范的想法，但终因涉及的内容繁杂和其他原因，规范的编写工作一直没有完成。

2008 年，科技部启动了基础性工作专项“青藏高原多年冻土本底调查”项目（2008FY110200），这一项目以摸清整个青藏高原地区多年冻土的现状为目的而展开，对青藏高原多年冻土区的地形地貌、土壤、植被分布、地层剖面特征以及活动层厚度、冻土地温等开展了综合调查和分析试验工作。为完成既定调查任务，保证调查方法的连续性和调查资料的可靠性，项目组从 2008 年开始组织编写本手册，于 2009 年完成初稿。随后，手册初稿被应用于指导 2009~2013 年共计 5 次的大型野外调查工作，较好地规范了野外调查和数据、资料收集、整理流程。期间，根据野外调查工作的实际使用情况进行了反复修订。随着冻土调查项目的顺利结题，这本《多年冻土调查手册》的内容也全面确定。希望本手册能成为指导多年冻土野外考察工作的实用手册，也为规范冻土野外工作起到抛砖引玉的作用。

本书共 9 章，前两章为有关多年冻土学研究的基本现状、基本概念介绍，其中涉及调查工作的总体设计方法、调查所要获取到的有关多年冻土的主要特征参数，以及调查区需要获取的主要背景资料及获取方式等；第 3~7 章分别介绍了多年冻土调查的主要内容和方法；最后两章，即第 8 章和第 9 章主要介绍了多年冻土调查的最后汇总工作，即多年冻

土制图和多年冻土数据库的构建。附录提供了野外调查和室内分析工作中用到的一些记录和统计表格。这些表格的应用,可使野外和室内数据的生产规范化和标准化,也为后期数据处理和数据库管理提供了方便。

本书各章节撰写分工为:第1章,赵林、盛煜;第2章,赵林、盛煜、李韧、吴吉春、陈继;第3章,岳广阳、周国英、王志伟;第4章,吴晓东、方红兵、赵拥华、胡国杰;第5章,盛煜、吴通华、陈继、庞强强、王武、杜二计;第6章,吴通华、李韧、庞强强、乔永平;第7章,吴吉春、盛煜;第8章,南卓铜、王志伟、邹德富、陈继;第9章,南卓铜、史健宗等。全书经赵林、盛煜、南卓铜、吴通华、谢昌卫统稿,由赵林、盛煜统一汇编、定稿,谢昌卫、余文君和范云伟参与了书稿的校对和订正工作。

本手册有关地理、土壤、植物等的调查内容以及遥感、物探、钻探等调查手段的应用方法,在不同学科领域有相对成熟的规范或者指导方法。因此在编写过程中我们引用了相关学科比较经典的文献或者规范的部分内容,这样一方面使本手册涉及的不同学科的内容更加充实,另一方面也加强了本手册内容与其他学科的衔接。所引用到的文献和规范均在参考文献中列出,在此特向原作者致以崇高的敬意!初稿编写时,陈肖柏研究员、刘经仁副研究员进行了大量历史资料、文献的收集和整理工作,童伯良研究员提供了大量冻土学俄文译文,他们的贡献为本手册的顺利完成奠定了基础。周幼吾研究员、郭东信研究员和童长江研究员对手册全文提出了较为详细的修改意见和建议。特别要感谢的是程国栋院士,没有他自始至终的教诲和鼓励,很难想象本书能够顺利完成。编写中得到了科技部项目主管领导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;中国科学院青藏高原冰冻圈观测研究站全体成员以及其他参加冻土调查项目的专家学者自始至终参与了本手册内容的研讨论证和文献资料的收集工作。对此,作者一并致以衷心的感谢!

作 者

2015年1月

目 录

序一

序二

前言

第1章 概述	1
1.1 多年冻土的概念及分布	1
1.1.1 多年冻土的概念	1
1.1.2 全球多年冻土的分布	1
1.1.3 我国多年冻土的分布	2
1.2 多年冻土的形成条件	4
1.2.1 气候条件	4
1.2.2 构造、地质、地形地貌条件	6
1.2.3 植被	10
1.3 多年冻土的分类	11
1.3.1 共生和后生多年冻土	11
1.3.2 衔接和不衔接多年冻土	11
1.3.3 连续、不连续和岛状多年冻土区	11
1.3.4 气候驱动型和生态驱动型多年冻土	12
1.3.5 稳定和不稳定多年冻土	13
1.3.6 高温和低温多年冻土	14
1.3.7 少冰、多冰、富冰和饱冰多年冻土及含土冰层	14
1.3.8 多年冻土的融沉分类	14
1.4 多年冻土调查的意义和目的	15
1.4.1 多年冻土与气候	15
1.4.2 多年冻土与区域水循环和生态系统	16
1.4.3 多年冻土与冰缘地貌	17
1.4.4 多年冻土与工程	18
1.4.5 多年冻土调查研究的目的	19
1.5 本书的结构和主要内容	20

第2章 调查区与主要调查内容	22
2.1 多年冻土调查总体技术方案	22
2.1.1 调查区和调查线路的确定	22
2.1.2 比例尺选取	23
2.1.3 总体技术方案	24
2.2 调查区背景资料的收集	27
2.2.1 气象气候背景信息	27
2.2.2 地形地貌背景	29
2.2.3 地质和构造背景	29
2.2.4 植被和土壤	31
2.2.5 遥感数据	31
2.3 多年冻土特征指标	33
2.3.1 冻土分布边界和多年冻土面积	33
2.3.2 活动层厚度与多年冻土上限	34
2.3.3 多年冻土下限和多年冻土厚度	35
2.3.4 多年冻土温度	35
2.3.5 活动层水分状况	35
2.3.6 地下冰	36
2.4 多年冻土地层剖面	37
2.4.1 钻孔和探坑位置选取原则	38
2.4.2 冻土钻探的技术要求	38
2.4.3 地层剖面的描述	39
2.4.4 剖面样品采集	42
2.4.5 岩层主要参数的测试	44
第3章 多年冻土区植被调查	46
3.1 我国多年冻土区主要植被类型	46
3.1.1 青藏高原主要植被类型	46
3.1.2 青藏高原植被分布特征	53
3.1.3 东北寒温性针叶林	54
3.2 野外样地、样方调查程序	55
3.2.1 准备调查工具	55
3.2.2 样地设置	55
3.2.3 样方设置	56

3.3 样方调查	56
3.3.1 草本、半灌木及矮小灌木样方调查	56
3.3.2 灌木样方调查	58
3.3.3 乔木样地调查	59
3.4 植被调查信息的后期处理	59
3.4.1 植物标本的鉴定和整理	59
3.4.2 调查照片的地标化处理	59
第4章 多年冻土区土壤调查	60
4.1 多年冻土区主要土壤类型	60
4.1.1 土壤分类系统	60
4.1.2 我国多年冻土区的土壤地理发生分类类型	63
4.1.3 我国多年冻土区的土壤系统分类类型	64
4.1.4 世界主要土壤分类系统比较	70
4.2 调查区域及前期准备	72
4.2.1 调查区域	72
4.2.2 调查前期准备	72
4.3 土壤剖面调查	73
4.3.1 调查样点选取	73
4.3.2 土壤剖面描述	73
4.3.3 土壤样品采集	79
4.3.4 土壤样品分析测试	79
4.3.5 土壤类型鉴定	81
4.3.6 土壤调查信息录入数据库	81
第5章 多年冻土的分布特征	82
5.1 多年冻土分布边界的确定	82
5.1.1 多年冻土分布边界的初步估计	82
5.1.2 多年冻土分布边界的确定方法	83
5.2 多年冻土上、下限深度的确定	90
5.2.1 多年冻土上限深度的确定方法	91
5.2.2 多年冻土下限深度的确定方法	98
第6章 多年冻土区的气象观测与冻土水热特征监测	102
6.1 多年冻土监测场点的布设原则	102
6.1.1 剖面监测的布设原则	102



6.1.2 区域监测场点的布设原则	104
6.2 多年冻土区的地面气象观测	105
6.2.1 自动气象站仪器的组成	105
6.2.2 自动气象站仪器的安装	107
6.2.3 自动气象站仪器的维护	108
6.2.4 自动气象站仪器的校准	108
6.2.5 自动气象站观测的要素及参考仪器	109
6.2.6 涡动相关的观测规范及参考仪器	113
6.3 活动层监测	115
6.3.1 活动层观测场点的安装	115
6.3.2 活动层温度监测	117
6.3.3 活动层水分监测	118
6.3.4 土壤热通量监测	119
6.3.5 土壤热特性的野外观测	120
6.4 多年冻土剖面温度监测	120
6.5 数据质量控制和规范化	122
6.5.1 数据可接受的合理界限值检查	122
6.5.2 数据可疑变化率检查	123
6.5.3 数据逻辑一致性检查	123
6.5.4 不正常观测记录处理	124
第7章 常见冰缘地貌野外调查	125
7.1 冰缘地貌概述	125
7.2 常见的冰缘地貌特征及调查	126
7.2.1 寒冻风化-重力作用形成的冰缘地貌	126
7.2.2 融冻蠕流-重力作用形成的冰缘地貌	129
7.2.3 冻融分选作用形成的冰缘地貌	131
7.2.4 冻胀冻裂作用形成的冰缘地貌	134
7.2.5 热融扰动作用形成的冰缘地貌	138
第8章 多年冻土制图	141
8.1 制图与制图单元	141
8.2 典型区填图	142
8.3 背景数据制备	144
8.3.1 采样方法	144

8.3.2 制图方法	145
8.3.3 示例	146
8.4 多年冻土数字制图	149
8.4.1 数字化制图基础	149
8.4.2 多年冻土分布制图	150
8.4.3 多年冻土特征制图	153
8.4.4 多年冻土剖面图	154
8.4.5 地图概括及多年冻土图件说明书的编写	158
8.4.6 多年冻土图常用符号	158
8.4.7 成图出版	159
第9章 多年冻土数据库与信息系统	160
9.1 数据前处理	160
9.1.1 数据类型	160
9.1.2 数据质量控制	161
9.1.3 数据标准化	162
9.2 多年冻土元数据	163
9.2.1 元数据	163
9.2.2 元数据标准	164
9.2.3 多年冻土元数据标准	165
9.3 信息系统功能	167
9.3.1 数据入库与发布	167
9.3.2 数据发现	168
9.3.3 实时数据系统	169
9.3.4 数据管理	169
9.3.5 可视化和简单分析功能	169
9.3.6 冻土模型	170
9.4 实现方法	171
9.4.1 技术实现	171
9.4.2 制度化	172
9.4.3 服务模式	172
主要参考文献	174
附录1 冻土钻孔编录	185
附录2 群落样点基本信息表	186

附录 3 草地群落组成调查表 187

附录 4 标本采集信息表 188

附录 5 灌丛群落组成调查表 189

附录 6 多年冻土土壤剖面记录表 190

附录 7 多年冻土上限雷达探测原理及实例 192

| 第 1 章 | 概 述

1.1 多年冻土的概念及分布

1.1.1 多年冻土的概念

冻土是指温度低于 0°C 并含有冰的土或岩层；而温度低于 0°C 不含冰的土或岩被称为寒土，其中既不含冰也不含重力水的寒土被称为干寒土，如被冻结的基岩和干沙等；而不含冰却含负温的卤水或盐水的寒土被称为湿寒土。较多的情况下，自然界的冻土与寒土同时存在，准确区分两者需要深入细致的调查，因此，冻土学中一般把寒土也包含在冻土之内。

受区域气候条件差异的影响，在不同地区，冻土存在时间的长短差异极大，短至数分钟，长可达数千乃至数万年。冻土学中按照冻土存在时间的长短，将冻土分为短时冻土（数小时、数日至半月以内）、季节冻土（半月、数月乃至2年以内）和多年冻土（2年至数万年以上），其中存在时间在1年之上2年之内的季节冻土又被称为隔年冻土。

一定区域内，多年冻土并不完全是连续分布的。在多年冻土发育的区域内，某些地段可能有多年冻土，而某些地段又没有多年冻土发育，这个地区就被总称为多年冻土区。而受特殊地质、构造、地理和局地气候特征的影响，那些因特殊的水热条件而没有发育多年冻土的地段，就被称为融区。除特殊条件，如地热因素影响之外，融区一般发育季节冻土。多年冻土区包括发育多年冻土的地区和不发育多年冻土的融区，多年冻土区的面积要大于多年冻土本身面积。多年冻土占据多年冻土区面积的百分比，被称为多年冻土的连续性。

1.1.2 全球多年冻土的分布

地球表层现代多年冻土分布面积约占陆地总面积的24%，除大洋洲外，其他洲均有多年冻土分布。北半球的多年冻土主要分布于环北极的高纬度地区和中低纬度的一些高海拔地区，其中包括北冰洋的许多岛屿（格陵兰、冰岛、斯瓦尔巴德群岛等）及部分大陆架乃至洋底。多年冻土分布面积最大的几个国家依次是俄罗斯、加拿大、中国和美国（表1.1）。南半球的多年冻土主要分布在南极洲及其周围岛屿、南美洲的部分高山地区。按照多年冻土发育的地理位置和形成条件划分，全球多年冻土可分为高纬度多年冻土和中低纬度高海拔多年冻土。