

刘时银 等 著



冰川观测 与 研究方法

Field Observations
in Glaciological Research



科学出版社

冰川观测与研究方法

刘时银 等 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

冰川学的发展离不开大量的野外观测试验,因而随着观测技术的不断发展、研究和观测内容的不断丰富,对冰川相关过程的认识也在不断深入。本书通过综合国内外冰川观测与研究发展现状,对冰川的要素、形成过程的观测与调查方法进行了系统总结和介绍,主要内容包括冰川积雪性质与成冰作用、冰川的物质平衡、冰川运动与表面高程变化、冰川温度与厚度、冰川气象、冰川融水径流、第四纪冰川地貌,以及积雪与雪崩等的基本观测和研究方法。

本书提供了冰川学的基础知识,并介绍了冰川相关研究的观测方法,为即将加入冰川研究队伍的青年学者或希望获取某一冰川过程信息的学者提供了基本工作思路,有助于他们尽快实现观测目的。本书还可供自然地理、气候、水文、测绘、第四纪地质与地貌、旅游、水电规划等领域的大学生、研究生、研究和教学人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

冰川观测与研究方法 / 刘时银等著. —北京:科学出版社, 2012

ISBN 978-7-03-033855-6

I. ①冰… II. ①刘… III. ①冰川-水文观测-研究 IV. ①P343.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 044717 号

责任编辑:韦 沁 王 运 朱海燕 / 责任校对:李 影

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:王 浩

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>

北京天时彩色印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012 年 3 月第 一 版 开本:A5(880×1230)

2012 年 3 月第一次印刷 印张:7 1/4

字数:215 000

定价:59.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



科技部科技基础性工作专项“中国冰川资源及其变化调查”(2006FY110200)
国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目“北半球冰冻圈变化及其对气候
环境的影响与适应对策”(2010CB951401)
中国科学院知识创新工程重要方向项目“天山冰冻圈与环境研究”(KZCX2-
YW-GJ04)及“西部冰川变化监测及其影响评估方法研究”(KZCX2-YW-
301)
国家自然科学基金项目“冰川-冰湖耦合关系及对冰碛湖溃决机理影响研究”
(41071044)

资 助

作者名单

主 编	刘时银		
副 主 编	刘潮海	谢自楚	赵井东
前 言	刘时银		
第 1 章	刘时银	刘潮海	
第 2 章	刘时银	谢自楚	刘潮海
第 3 章	刘时银	谢自楚	刘潮海
第 4 章	上官冬辉	陈建明	
第 5 章	朱国才		
第 6 章	上官冬辉	陈建明	
第 7 章	朱国才		
第 8 章	谢自楚	韩海东	康兴成
第 9 章	刘时银	刘潮海	谢自楚
	韩海东	刘 巧	
第 10 章	张志忠	王彦龙	谢自楚
第 11 章	赵井东	殷秀峰	江合理

序

冰冻圈是气候系统五大圈层之一，冰川与冰盖又是冰冻圈最主要的组成部分，末次冰期时，它们覆盖了地球陆地面积的 20% 以上，现在也覆盖了 11% 的陆地表面。冰川在气候变化、水资源管理、海平面上升、生态保护、经济社会发展等许多领域，都有重要的科学和应用价值。

冰川和冰盖内保存有地球气候环境演化和外太空环境的信息。20 世纪 50 年代科学家就在格陵兰冰盖内钻取冰芯，1966 年在世纪营地站 ($77^{\circ}11'N$, $61^{\circ}10'W$) 钻取了第一支透底的冰芯 (1388m)。20 世纪 90 年代以来，科学家又相继在南极冰盖东方站、EPICA 冰丘 C 等地钻取了深冰芯，提供了数十万年以来高分辨气候环境演化历史，以及古大气内的温室气体浓度变化曲线，为全球变化研究和人类社会应对气候变化作出了重大贡献。

水是我们这个星球特有的资源。最新资料表明，地球上海洋水体占全球水体总量的 96.5%，淡水仅占 2.53%，其中 68.5% 储存于南极冰盖、格陵兰冰盖和山地冰川中。目前，人类可以直接利用的淡水主要来自河流和湖泊，只占全球水体的 0.32%。冰川是宝贵的淡水资源，世界人口的 1/6 以上生活在冰川、积雪和冻土补给的河流流域里，在人类聚集的中低纬度亚洲中部，在欧洲南部和北部、美洲大陆等地区，冰川提供的淡水是这里最重要的水源。然而，气候变化正在改变着这些流域的径流年内分配或年总径流量，给水资源的利用与管理，进而给区域经济社会可持续发展带来巨大挑战。

此外，近百年来全球气候系统变暖，冰冻圈也在变暖，冰川、积雪融化加快，既给人类生产生活和社会可持续发展提供了水资源，也造成冰湖溃决、洪水突发等灾害。近几十年来的冰川退缩，成为全球海平面上升的主要原因，等等，所以，继续监测冰川变化，展开系统研究，有重要的科学意义，也有极高的应用

价值，必须予以高度重视。

国际上冰川学研究已有 200 多年的历史。中国冰川研究始于 20 世纪 50 年代，祁连山、天山现代冰川考察吹响了中国冰川研究的号角，一开始就有明确的应用目标，即解决冰川融水与农业灌溉的矛盾。在极端困难的时期和极其艰苦的条件下，中国冰川学家历经艰险，进行野外考察，建立定位观测站。也正是他们，将现代冰川考察的足迹印遍祖国西部的每一条山脉、南极冰盖和格陵兰冰盖，为发展冰川学作出了重要贡献。进入新世纪，中国科学院冰冻圈科学国家重点实验室刘时银研究员和他的团队，在长期野外调查和研究的基础上，进行了系统总结，结合国内外冰川学研究的理论和实践，领衔撰写了《冰川观测与研究方法》这部专著。我国是世界上中低纬度地区现代冰川发育数量最多的国家，冰川类型多样，分布面积大，有许多冰川等待冰川学家调查、监测、研究，社会对应用冰川学的需求巨大，这些都有赖于年青一代冰川工作者来完成。

《冰川观测与研究方法》一书简明扼要、通俗易懂、理论结合实际、注重实践、便于工作。全书涵盖了现代冰川野外观测和研究方法，每一项观测都从理论介绍切入，使读者在冰川学理论指导下，开展野外观测研究；介绍了现代冰川观测新技术新方法，丰富了冰川学的内容；系统总结的新技术和新方法，为提高冰川观测研究水平打下了坚实基础。全书还附有大量图表，直观再现冰川实时观测的情景和观测结果，便于读者学习。总之，这本专著在普及冰川学知识、指导青年冰川学家研究方面很有价值，它不仅仅是作者的学术工作的阶段性总结，也是一部理论联系实际、规范野外调查方法的教材，非常适合刚涉足冰川研究的青年。所以，我希望大家都能读一读，也希望更多的青年同志加入冰川学研究队伍，使我国冰川学研究上一个新台阶！

秦大河

中国科学院院士

冰冻圈科学国家重点实验室主任

2012 年 3 月 29 日于北京

前 言

冰冻圈是指地球表层系统中水处于冻结状态的部分,包括冰川、冰盖、冻土、积雪以及海、河、湖冰等,由于其在气候系统中的重要作用而受到重视。世界气候研究计划(World Climate Research Programme, WCRP)于2000年启动的气候与冰冻圈(Climatic and Cryosphere, CliC)计划(Allison *et al.*, 2001),国际大地测量与地球物理联合会(International Union of Geodesy and Geophysics, IUGG)于2007年宣布成立国际冰冻圈科学协会(International Association of Cryospheric Sciences, IACS),使冰冻圈科学成为国际大地测量与地球物理联合会下与大地测量学、地磁与高空大气物理学、水文科学、气象与大气科学、海洋物理学、地震与地球深部物理学以及火山学与地球深部化学学会相平行的第八个学会,显示了国际科学界对冰冻圈科学研究的高度重视。

冰川是陆地冰冻圈系统的重要组成部分。冰川以其广泛的分布、巨大的淡水储存和显著而频繁的水热交换,对大气圈、水圈、生物圈和岩石圈产生重要影响。全球冰川(含冰盖和冰架)总面积为 $1638 \times 10^4 \text{ km}^2$,约占陆地面积的11%,总储水量占全球淡水资源的3/4,因而冰川在地球大气环流、水循环、海平面变化、自然环境演变及地壳运动中有举足轻重的作用,与人类社会也有密切的联系(谢自楚、刘潮海,2010)。我国冰川总面积近 $6 \times 10^4 \text{ km}^2$,约占亚洲冰川总面积的一半,冰储量约 5600 km^3 (施雅风,2005),是世界第四大冰川国。因而监测我国冰川变化、研究冰川对水资源与灾害形成演化的影响,不仅具有重要的学术价值,同时也具有突出的现实意义。

国际冰川研究已有近200年历史,出版了涵盖冰川学理论与

观测试验方法的系列专著。其中,对我国冰川研究影响较大的专著有《冰川学概论》(卡列斯尼克,1982年中译本)、《冰川物理学》(Paterson,1987年第二版中译本)、《冰川研究基本方法指南》(阿夫修克,1959年中译本)等。我国冰川学研究开始于20世纪50年代末,在不断发展和总结过程中,陆续出版了《西藏冰川》(李吉均等,1986)、《中国冰川概论》(施雅风等,1988)、《中国冰川水资源》(杨针娘,1991)、《中国天山冰川站手册》(刘潮海,1991)、《中国雪崩研究》(王彦龙,1992)、《天山冰川作用》(刘潮海等,1998)、《天山积雪与雪崩》(谢自楚等,1996)、《中国冰川与环境——现在、过去与未来》(施雅风等,2000)以及大量地区性、专题性考察报告或文集。冰川野外调查与观测在数据获取手段上随技术进步而不断更新,因此,冰川要素观测的一些传统方法也在不断更新和优化。更为重要的是,冰川学理论和模型模拟的发展不断要求更加丰富的冰川观测信息。纵观国内冰川学研究,目前尚无一部系统介绍冰川各种参数观测和调查方法的著作。一些项目实施的观测与试验设计,多依靠有经验人员的身口相传,或通过论文研究方法部分的检索、查询特定要素的观测流程或方法,这与目前国内大批年轻科研人员和研究生投身于冰川学研究的事实是极不匹配的。此外,在科技部科技基础性工作专项“中国冰川资源及其变化调查”(2006FY110200),国家重点基础研究发展计划(973计划)项目“北半球冰冻圈变化及其对气候环境的影响与适应对策”(2010CB951401),中国科学院知识创新工程重要方向项目“天山冰冻圈与环境研究”(KZCX2-YW-GJ04)、“西部冰川变化监测及其影响评估方法研究”(KZCX2-YW-301)以及国家自然科学基金项目“冰川-冰湖耦合关系及对冰碛湖溃决机理影响研究”(41071044)等执行过程中,由于有不同单位科研人员的参与,特别是一些不曾从事冰川领域的观测和调查人员的参与,我们深感迫切需要一部系统介绍冰川调查和观测方法的专著,用以指导其顺利完成科研任务。正是这一现实需要促成了《冰川观测与研究方法》一书的面世,以期对新近加入冰川研究的青年学者有所

裨益，对于有一定观测经验的人员，使他们的冰川观测与调查方法更加完善，从而获得有价值的观测和调查数据。

本书共分 11 章，包括：绪论、雪的层位及其成冰作用观测、冰川物质平衡观测、冰川运动速度测量、冰川温度监测、冰川厚度测量、冰川变化测量、冰川气象观测、冰川水文测验及其融水径流估算、雪崩调查与积雪监测、冰川地貌及其要素调查。本书通过综合国内观测调查发展现状，对上述涉及冰川主要要素的观测与调查方法进行了系统总结和介绍。在章节结构上，基本采用观测意义—理论需求—观测方法—数据整编或分析方法等思路，以图文并茂结合案例分析的方式介绍各要素的观测和研究方法，以方便读者理解并设计自己的观测方案。

除本书各位作者付出辛勤工作之外，何兴编审参加了审核校对工作、徐成琳女士参加了审校和编辑工作、祝国存女士清绘部分插图，在此对参与本书编写和审校的所有人员表示衷心感谢！

刘时银

2011 年 11 月

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 冰川研究的意义	1
1.2 冰川野外调查与观测的作用	3
1.3 冰川野外调查的准备工作	3
1.4 野外观测与理论发展的关系	4
1.5 本书编写目的	6
1.6 本书主要内容	7
第 2 章 雪的层位及其成冰作用观测	8
2.1 基本概念	8
2.1.1 雪型	8
2.1.2 雪的变质成冰作用	9
2.2 雪-粒雪的层位观测	13
2.2.1 观测雪坑的设置	13
2.2.2 雪层观测使用的器材	14
2.2.3 雪-粒雪层位观测的内容	15
2.3 冰川分带的主要标志	19
2.3.1 按成冰作用机制分	19
2.3.2 按融化状态分	22
第 3 章 冰川物质平衡观测	24
3.1 冰川物质平衡各分量的定义	24
3.2 物质平衡的直接观测	27
3.2.1 观测冰川的选择及测点的布设	27
3.2.2 冰川消融的观测	28

3.2.3 冰川积累的观测	32
3.2.4 整个冰川物质平衡的计算	36
3.2.5 总平衡的观测	38
3.3 物质平衡的间接观测	42
3.3.1 水文学方法	42
3.3.2 重复测量法	43
3.3.3 踏勘方法	43
3.4 极地冰盖物质平衡研究方法	44
3.4.1 分量法	44
3.4.2 冰流量法	45
3.4.3 整体法	45
3.5 冰川平衡线(雪线)	46
3.5.1 定义	46
3.5.2 野外观测方法	46
3.5.3 冰川平衡线的间接判读法	47
第4章 冰川运动速度测量	49
4.1 冰川表面运动速度的测量	49
4.1.1 测量点的布设与观测时间	50
4.1.2 测量冰川表面运动速度的方法	52
4.1.3 冰川运动速度的短期变化和脉动测量	56
4.1.4 测量冰川垂直运动分量的方法	57
4.2 冰内运动速度测量	59
4.2.1 探坑法	60
4.2.2 冰隧道(冰洞)法	60
4.2.3 钻孔法	61
4.3 冰川冰的变形观测	61
4.3.1 冰川表面变形观测	62
4.3.2 冰川隧道变形观测	62
4.4 跃动冰川的监测	64
4.5 冰川运动速度的资料汇总	64

第5章 冰川温度监测	65
5.1 冰川温度测量仪器	65
5.2 冰川温度测量方法	69
5.2.1 表面温度测量	69
5.2.2 雪层温度测量	69
5.2.3 浅(活动)层冰温测量	71
5.2.4 透底冰层测温	75
5.3 冰川温度数据归一化处理	75
5.4 实验仪器与说明书	76
5.4.1 精密热敏电阻温度计探头	76
5.4.2 标准手提冰钻简要使用说明书	77
第6章 冰川厚度测量	83
6.1 冰川测厚回顾	83
6.2 冰雷达测厚方法	86
6.2.1 冰雷达测厚的物理基础	86
6.2.2 冰雷达探测基本原理	87
6.2.3 现场作业	89
6.2.4 内业整理	93
6.2.5 测厚成果	94
6.3 冰川探测与发展	97
第7章 冰川变化测量	99
7.1 冰川测绘的准备工作	99
7.1.1 了解测区概况和拟定作业方案	99
7.1.2 冰川测量的范围	100
7.1.3 冰川测绘的时间	100
7.1.4 测图比例尺	101
7.1.5 等高距	102
7.2 测绘方法	102
7.2.1 标志点测量法	103
7.2.2 摄影测量法	103
7.2.3 平板仪测量法	104

7.2.4	地面立体摄影法	105
7.2.5	重复航空摄影测量法	105
7.2.6	数字摄影测量法	107
7.2.7	卫星遥感技术	107
7.3	外业测绘	108
7.4	内业成图	111
7.5	冰川表面变化量测的几种方法	112
7.6	冰川测绘资料整编	114
第8章	冰川气象观测	116
8.1	冰川定位站的气象观测	116
8.1.1	人工观测场址及场地	116
8.1.2	观测场内仪器及其布置	117
8.1.3	观测方法及要点	118
8.1.4	自动气象观测	122
8.2	冰川小气候观测	124
8.2.1	观测目的	124
8.2.2	场地选择与仪器安装的基本原则	125
8.2.3	冰川小气候的自动气象观测	125
8.2.4	气温及降水梯度观测	127
8.2.5	冰川区与非冰川区的气候差异及冰川“温跃值”观测 ...	130
8.3	冰川能量平衡观测	131
8.3.1	基本知识	131
8.3.2	观测方法	135
第9章	冰川水文测验及其融水径流估算	137
9.1	冰川融水径流及其特征值	137
9.1.1	冰川融水径流的定义	137
9.1.2	冰川融水径流的特征值	138
9.1.3	冰川融水径流特征	140
9.2	冰川消融与融水径流观测	142
9.2.1	代表性冰川的选择	142
9.2.2	冰川融水径流场的布设及观测	142

9.2.3 冰川消融场的布设及观测	143
9.2.4 冰川水文断面的设立及其径流观测	144
9.2.5 冰川汇流观测	148
9.3 冰川融水径流量的估算	150
9.3.1 水量平衡法	151
9.3.2 高度区间法	152
9.3.3 流量过程线分割法	155
9.4 冰川洪水和冰川泥石流的监测	156
9.4.1 冰川湖溃决性洪水的监测	157
9.4.2 冰面湖和冰内洞穴溃决洪水的监测	158
9.4.3 其他成因的洪水或泥石流	159
第10章 雪崩调查与积雪监测	161
10.1 概述	161
10.1.1 雪崩的基本概念	161
10.1.2 雪崩的形成与计算	161
10.2 雪崩调查	167
10.2.1 雪崩调查要点	167
10.2.2 雪崩痕迹调查	168
10.2.3 访问群众	171
10.2.4 填写雪崩登记卡片	172
10.3 雪崩观测与试验	172
10.3.1 雪崩观测站的任务	173
10.3.2 观测内容和方法	173
10.4 积雪监测与试验	174
10.4.1 积雪的环境意义	174
10.4.2 积雪的形成与分类	175
10.4.3 积雪资料的选择与质量控制	176
10.4.4 积雪性质的观测与实验	178
第11章 冰川地貌及其要素调查	184
11.1 冰川地貌研究的意义	184
11.2 冰川侵蚀地形及其要素调查	185

11.2.1 冰斗	185
11.2.2 冰川谷	188
11.2.3 羊背岩、鲸背岩	191
11.2.4 其他冰川侵蚀地形	192
11.3 冰川沉积地形及其要素调查	194
11.3.1 侧碛垄	195
11.3.2 终碛垄	196
11.3.3 其他冰碛地形及其要素调查	198
11.4 第四纪冰川年代学样品采集	200
11.4.1 地衣样品的采集与要点记录	201
11.4.2 ^{14}C 测年样品的采集与要点记录	202
11.4.3 光释光 (OSL) 测年样品的采集与要点记录	203
11.4.4 电子自旋共振 (ESR) 测年样品的采集与要点记录	204
11.4.5 宇宙成因核素 (CRN) 测年样品的采集与要点记录	205
参考文献	207

第 1 章 绪 论

1.1 冰川研究的意义

冰冻圈是地球气候系统的四大圈层之一，而冰雪则是冰冻圈的主要组成部分。全球约 11% 陆地面积被冰川所覆盖，蕴藏了全球 3/4 的淡水资源。对地球表层系统来说，冰雪相变过程的热量交换占热量循环的 1/3，冰雪的高反射率特性是导致地球表面能量再分配的主要因子，因而冰雪变化对大气环流和水循环有重要影响。在冰期-间冰期旋回过程中，全球冰量变化是海平面变化的主要影响因素，近百年全球海平面上升与全球范围冰川萎缩有很大关系。因此，认识冰雪分布及其变化规律具有十分重大的科学及实践意义。

我国是世界第四大冰川国，据《中国冰川目录》12 卷 22 册的统计，我国共发育冰川 46377 条，面积 59425km²，冰储量约 5600km³（施雅风等，2005）。我国冰川面积虽然只占全球冰川总面积（含冰盖）的 0.4%，但就山地冰川或两极之外冰川而言，它分别占世界和亚洲冰川面积的 14.5% 和 47.6%，而且是世界上中低纬度和内陆干旱地区冰川最多的国家（王宗太、苏宏超，2003）。我国干旱区不同于世界其他干旱区的一个最显著特点就是冰雪水资源在地表水资源形成中扮演着十分重要的角色，冰雪融水变化与绿洲兴衰有密切的联系。青藏高原发育的数量众多和规模巨大的冰川，成为滋养东亚和南亚文明的大江大河的源泉。因此，研究中国冰川有着更为特殊的现实意义。

开展冰川研究的重要意义显示为以下几方面：

（1）冰川是气候的产物，其变化又对气候变化有敏感的指示