

BINGCHUANXUE DAOLUN

冰川学

导论

BINGCHUANXUE DAOLUN

谢自楚 刘潮海 著

上海科学普及出版社



封面设计 赵 斌



ISBN 978-7-5427-4449-4



9 787542 744494 >

定 价:

180.00元

冰川学导论

谢自楚 · 刘潮海 著

上海科学普及出版社

图书在版编目(CIP)数据

冰川学导论/谢自楚,刘潮海著. —上海:上海科学普及出版社,2010.7

ISBN 978-7-5427-4449-4

I. 冰… II. ①谢… ②刘… III. 冰川学
IV. P343.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 169589 号

责任编辑 史炎均 董宁宁

冰川学导论

谢自楚 刘潮海 著

上海科学普及出版社出版发行
(上海中山北路 832 号 邮政编码 200070)
<http://www.pspsh.com>

各地新华书店经销 常熟市新骅印刷有限公司印刷
开本 787×1092 1/16 印张 31.5 字数 630 000
2010 年 7 月第 1 版 2010 年 7 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5427-4449-4 定价:180.00 元

纪念中国冰川学研究开创五十周年

祝贺施雅风院士九十寿辰

本书得到下列项目资助

国家自然科学基金(40141003,40371027,40741002,40871043)

中国科学院知识创新工程重要方向项目《西部冰川变化监测及其影响评估方法研究》(KZCXZ-YW-301)

国家科学技术学术著作出版基金

上海科技专著出版资金

中国科学院寒区旱区环境与工程研究所 所长基金项目(2003年,2006年)

湖南省重点学科建设项目(60652001)



作者简介

谢自楚 1937 年生于湖南衡南县。1960 年毕业于前苏联莫斯科大学地理系极地与冰川专业。一直从事山地冰川及南极冰川学研究。现为湖南师范大学教授、国际欧亚科学院院士。曾任原中国科学院兰州冰川冻土研究所所长,国际水文科学协会雪冰委员会第二副主席。(左)

刘潮海 1940 年生于陕西省泾阳县。1964 年毕业于兰州大学地质地理系地貌专业。一直从事中国冰川资源与环境研究。现为中国科学院寒区旱区环境与工程研究所研究员。曾任原中国科学院兰州冰川冻土研究所冰川资源与环境研究室副主任,天山冰川观测试验站站长。(右)

序

地球上冰雪、冻土分布广泛,冰川覆盖全球陆地面积的 11%,冰川储存的水占全球淡水资源的 3/4。冰川与人类的生活、地球环境的演变关系十分密切。中国的冰川分布于西部高山地区,总面积达 6 万 km^2 ,是世界上第四冰川大国。

冰川学是研究冰川的形成、发育、过程、特征和演变的科学,在国际上已有 200 多年的历史。中国从 1958 年开展冰川研究以来,也已经有 50 年历史。中国冰川研究者的足迹不仅遍及中国各大高山的冰川,而且还涉及南极、北极及各大洲的冰盖、冰原和冰川,形成中国特色的冰川学体系,在国内地球科学体系及国际冰川学界,中国冰川研究均有重要的地位。

在中国虽然已有几部总结中国冰川研究的专著,但还缺乏一部较系统介绍冰川基本理论和方法的带有普及性的著作。本书作者谢自楚及刘潮海两位是中国第一代冰川学家,他们为中国冰川学的创建和发展做出过重要贡献。特别是谢自楚教授早年在莫斯科大学地理系极地与冰川专业学习,具有坚实的冰川学理论知识和丰富的野外实践经验。在 70 岁华诞时本人曾题词祝贺,词曰:

谢自楚教授:

热忱祝贺七十华诞

中国冰川学的元勋

欧亚科学院的院士

成冰作用、物质平衡研究的领头人

三登珠峰,首上南极冰盖的罕见勇士

八年所长,壮大冰川冻土事业的功臣

研究教育,创新撰著冰川学专著

身在楚邦,促进湖南地理学扎实发展

向八十迈进,再创辉煌

老友,施雅凤及沈健 敬贺 2007 年 1 月 24 日

本人几年前曾建议他们能写一部系统的有关冰川理论、方法的专著,以满足青年冰川学者对冰川学知识日益增长的需要。经过几年的努力,现在终于完成全书。初稿经过几次在冰川学方面研究生的讲学,效果良好。

国际上现已有多种类似的冰川学专著出版,本书与其相比有以下特点:第一,较系统地介绍了冰川学的最新理论和方法,如冰川物理学、环境学等方面;第二,较

全面介绍了中国冰川学者多年积累的经验和成果;第三,突出了作者本人在普通冰川学方面有创新性的概念和理论,具有中国区域冰川学特色。本书文字通俗简练,并附有大量图表及照片,易于中国读者接受。

目前,全球气候变化对地球环境的影响日益受到人们的关注,作为地球系统五大圈层之一的冰冻圈的研究得到了前所未有的重视。国家经济社会迅速的发展及西部大开发战略的实施,越来越紧密地涉及到冰川资源的合理利用和冰川灾害的防治等实际问题,对冰川知识的系统认识不仅是青年冰川学者的渴望,也是全社会的需要。因此,本人认为本书的出版是十分必要和及时的。相信一定会更进一步促进中国冰川学的发展,也是对国际冰川学的贡献。

本书着重于普通冰川学方面的介绍,称为冰川学导论是恰当的,希望今后在冰川学其他最新方向也有类似的专著问世。

施维凤

2008年8月28日

前 言

全球冰川(包括冰盖)总面积近 1 600 万 km^2 , 占地球陆地面积的 11%, 冰川总储量约 3 000 万 km^3 , 平均寿命 1 万年, 占全球淡水资源量的 3/4, 是地球系统五大圈层之一的冰冻圈的主体部分。中国冰川总面积约 6 万 km^2 , 冰川总储量约 5 600 km^3 , 居亚洲首位。冰川在地球大气环流、水循环、海平面升降、自然环境演变及地壳运动中有举足轻重的作用, 与人类社会经济发展有密切关系。中国冰川对我国西部开发中的水资源利用、防灾减灾和环境保护有重要影响。

冰川学是研究冰川形成、分布、性质、演变及其与自然环境和人类社会经济发展关系的科学。该学科的研究在国际上已有近 200 年历史了, 并且发展出了许多分支学科, 如普通冰川学、地球物理冰川学、环境冰川学、应用冰川学, 还有一些专门的冰川学方向, 如冰川气象学、冰川水文学、冰川地貌学、动力冰川学、结构冰川学、冰雪工程、遥感冰川学、雷达冰川学等。

中国冰川学研究已有 50 年历史了, 现已发展出具有中国特色的冰川学体系, 曾经做过几次系统总结, 出版了数十部不同地区及不同方向的专著, 在国内外发表许多创新性成果, 并在水资源开发、冰雪灾害防治等方面广泛应用, 为当前全球气候变化评估提供了重要资料。

国际上已有多部较全面系统的冰川学著作, 中国读者已知的有前苏联卡列斯尼克(С. В. Калесник)的《冰川学概论》(1982 年, 中译本)、加拿大佩特森(W. S. B. Paterson)的《物理冰川学》(第二版, 1987 年, 中译本), 以及一些内部发行的专门方向的著作, 如《结构冰川原理》(原著 1955 年)、《冰川水文学》(原著 1976 年), 但有的内容已经陈旧, 有的比较专业, 并且均缺少中国冰川学家在国内以及极地多年研究积累起来的理论、概念及成果。中国虽有多部冰川学方面的专著, 但内容比较专业, 有的涉及地区比较窄。因此, 我们很需要有一部介绍及论述冰川学基本理论、概念、原理、方法, 涉及全球及总汇中国冰川学精华的著作。中国冰川学创始人施雅风院士很早就关心此事, 并建议作者承担此任; 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所前所长程国栋院士, 现所长王涛研究员, 先后两次拨专款支持本书的出版工作; 湖南师范大学资源与环境学院领导也给予了亲切的关怀和支持。经过几年努力, 本书初稿(打印本)已于 2007 年底基本完成, 作者以此为主要教材, 两次向青年科研人员及研究生讲授冰川学专门课程。

在吸取中国冰川学同行专家宝贵意见的同时, 针对讲授中发现的问题, 作者对初稿内容作了必要的修改、补充, 对文字作进一步加工、校正, 最终完成此书。拟在

中国冰川学创建 50 周年之际正式出版。

本书共分 10 章,包括绪论、冰的基本物理性质、成冰作用、冰川的物质平衡、冰川变化、冰川温度、冰川运动、冰芯研究、世界冰川地理、中国冰川资源,涉及冰川学的主要方面,吸收国内外冰川学的精华。本书偏重于普通冰川学方向,主要介绍及论述冰川学的基本理论、概念和研究方法,对中国冰川学者包括作者本人在内 50 年来积累的有创新性的成果作了较详细的介绍,对涉及冰川物理机制的某些公式省略了繁琐的数学推导,只介绍原理及主要结果。为方便读者阅读和理解,书中附有大量图表及照片。为方便读者深入研究,每章后附有大量中外文献目录。

本书主要对象为从事冰冻圈、自然地理、气象、水文方面的科研、教学人员及有关的资源、环境部门设计、生产人员,特别针对上述方面的研究生、大学生,也可供出版、旅游、媒体及其经济管理等部门参考。

本书由谢自楚执笔第一章至第八章,刘潮海执笔第九章和第十章。施雅风、李吉均、程国栋、秦大河、姚檀栋等院士,崔之久、伍光和、温家洪、康建成、周尚哲等教授,黄茂桓、苏珍、曾群柱、杨针娘、王宗太、康尔泗、曹梅盛、胡汝骥、王树基、仇家琪、张文敬、丁永建、任贾文、沈永平、李忠勤、刘时银、王宁练、何元庆、李院生、孙波、侯书贵等研究员,浦健辰、焦克勤、周石砦、段克勤等副研究员审阅全书或部分章节,提出许多宝贵修改意见。全书最后由谢自楚、刘潮海共同定稿,何兴编审参加了审校核对工作,祝国存清绘部分插图。王欣、李巧媛等博士,王淑红、王利平、周宰根等硕士协助初稿校对。在这里作者对以上领导、学者、朋友表示衷心感谢!

作 者

2008 年 10 月

目 录

序.....	(i)
前言.....	(iii)
第一章 绪论.....	(1)
第一节 冰川学及冰冻圈科学.....	(1)
第二节 冰川学发展简况.....	(3)
第三节 中国冰川学发展简况.....	(4)
第四节 国际冰川学研究概况.....	(10)
第五节 冰川学研究的意义.....	(17)
参考文献.....	(18)
第二章 冰的基本物理性质.....	(21)
第一节 冰的结构.....	(21)
第二节 冰的热学性质.....	(23)
第三节 冰的同分异构物.....	(25)
第四节 冰的变形.....	(27)
参考文献.....	(39)
第三章 成冰作用.....	(42)
第一节 基本概念.....	(42)
第二节 雪的变质成冰作用.....	(43)
第三节 雪的层位及其研究方法.....	(47)
第四节 雪的密实化作用及晶体生长.....	(51)
第五节 冰川带.....	(58)
参考文献.....	(81)
第四章 冰川的物质平衡.....	(85)
第一节 基本概念及定义.....	(85)
第二节 物质平衡研究方法.....	(89)
第三节 物质平衡的恢复及延长.....	(98)
第四节 物质平衡特征.....	(109)
第五节 物质平衡线.....	(116)
第六节 全球冰川物质平衡及海平面变化.....	(125)

第七节 中国冰川物质平衡监测·····	(129)
参考文献·····	(130)
第五章 冰川变化 ·····	(135)
第一节 冰川变化的基本规律·····	(135)
第二节 冰川变化的研究方法·····	(143)
第三节 中国冰川变化研究·····	(147)
第四节 世界冰川近期变化研究概况·····	(156)
第五节 冰川变化的预测·····	(158)
参考文献·····	(188)
第六章 冰川温度 ·····	(195)
第一节 概述·····	(195)
第二节 冰川活动层温度·····	(197)
第三节 冰川深层的温度·····	(208)
第四节 冰架的温度状态·····	(218)
第五节 极地冰盖底部的热状况·····	(219)
第六节 南极冰盖下的湖泊·····	(221)
第七节 关于中国冰川内部热状态的研究·····	(226)
参考文献·····	(230)
第七章 冰川运动 ·····	(234)
第一节 基本概念·····	(234)
第二节 冰川运动的一般原理·····	(238)
第三节 冰的变形·····	(241)
第四节 冰川的底部滑动·····	(246)
第五节 底碛变形·····	(254)
第六节 冰川运动速度的分布·····	(259)
第七节 冰川跃动·····	(270)
参考文献·····	(296)
第八章 冰芯研究 ·····	(302)
第一节 同位素研究方法·····	(302)
第二节 气体含量、融化痕迹和积累率估算·····	(307)
第三节 大气中二氧化碳及甲烷含量·····	(311)
第四节 冰雪中的杂质·····	(312)
第五节 冰芯定年断代·····	(315)
第六节 关于冰芯研究的一些主要结果·····	(320)

参考文献.....	(335)
第九章 世界冰川地理.....	(337)
第一节 概述.....	(337)
第二节 冰川发育的自然条件.....	(338)
第三节 全球冰川的地理分布.....	(347)
第四节 全球各区域的冰川分布.....	(352)
参考文献.....	(418)
第十章 中国冰川资源.....	(423)
第一节 中国冰川发育的自然条件.....	(423)
第二节 冰川在各水系中的分布.....	(430)
第三节 冰川融水径流及其变化.....	(476)
第四节 中国西部冰川变化及趋势.....	(482)
参考文献.....	(486)

第一章 绪 论

第一节 冰川学及冰冻圈科学

一、冰 冻 圈

冰冻圈是与大气圈、水圈、岩石圈和生物圈一起,并称为地球系统中的五大圈层之一。具有负温或零温、存在着固相水或过冷水的地球圈层称为冰冻圈(Cryosphere)。冰冻圈的形状是不规则的,其下界在南极为地表以下 4~5 km,在北极为地表以下 1.5~2 km,向温带逐步减小并最终尖灭,其上界最高可达平流层 100 km 的高度。

冰冻圈一词,最初是由多博罗沃尔斯基(Dobrowolsky, 1923)提出的,它是指所有的自然冰体及其存在的范围,包括瞬时的、短期的、季节的和多年的(或永久的)冰体,如含冰的云层、积雪、冻土(包括地下冰)、水冰(河、湖、海)、冰川及冰盖等。

全球冰体的总质量约 3 000 万 km^3 , 占全球淡水资源量的 3/4 以上,而各种冰体占地球表面的面积,有的地区最多可达百分之百,存在时间从数天至万年以上(表 1-1)。其中,冰川和冰盖,或统称冰川的质量最多,寿命最长,是冰冻圈的主体。对水圈来说,冰川不但是地球上最丰富的淡水资源,而且在很大程度上决定了现代地带性规律,减缓水循环,影响海平面的变化。

表 1-1 地球自然冰体的分布
(据 Котляков, 1994)

冰体种类	质量 (t)	分布面积 (km^2)	平均寿命 (a)	在陆地、海洋及全球的分布比率 (%)
冰川及冰盖	3×10^{16}	16×10^6	10 000	11(陆地)
地下冰	5×10^{14}	32×10^6	30.5	22(陆地)
海 冰	4×10^{13}	26×10^6	1.05	7(海洋)
积 雪	1×10^{13}	72×10^6	0.35~0.52	14(全球)
冰 山	8×10^{12}	63×10^6	3	19(海洋)
大气冰	2×10^{12}	510×10^6	4×10^{-3}	100(全球)

对大气圈来说,地球热循环的 1/3 消耗于冰的相变过程。冰雪对气候的另一主要作用是提高地球的反射率。陆地上的冰雪使地球的平均反射率增大 1%,相应使地表平均温度下降 1°C 。大的冰盖还可以影响大气环流和天气,改变地表的

温度和降水状况。

对岩石圈来说,冰川作用是地质外营力之一,它剥蚀地表,在搬运、堆积过程中改造地形,冰盖的消长还会引起地壳的均衡运动。

生物圈对冰冻圈的反应更加敏感,特别是人类在自然资源开发和合理利用、环境保护、减灾防灾等问题中经常要与冰雪打交道。

二、冰冻圈科学和冰川学

研究冰冻圈内各种冰体的性质、过程及其与其他地球圈层之间的相互作用的科学称为冰冻圈科学(Cryology),研究地表及海洋中的冰体部分属于冰川学(Glaciology),而研究土、岩层中冰体归于冻土学或称地冰学(Geocryology),研究大气冰体部分属气象学的内容。

冰川学有广义与狭义之分。前者以地球表面一切形式的冰体为研究对象,后者只研究冰川和极地冰盖。专门研究积雪的可称雪学,研究河、湖、海冰的可称冰学,研究冰川演变历史的可称古冰川学(Paleo-glaciology),研究冰体应用及防灾减灾的可称为工程冰川学(Engineering Glaciology)或应用冰川学(Applied Glaciology),后者还可分为雪工程学和冰工程学。

由于与其他学科的关系和研究方法的不同,冰川学还可分为几个方向:地质冰川学、地理冰川学、物理冰川学、同位素及地球化学冰川学、气象水文冰川学,以至更专门的动力冰川学、遥感冰川学、雷达冰川学等。但总体上大致可分为以下几个大的方面。

(1) 普通冰川学:包括地质冰川学、地理冰川学、气象水文冰川学等,着重于研究冰川和冰盖的发育、演化、分布、内部过程及其与大气圈、水圈、岩石圈以及人类的关系。

(2) 地球物理冰川学:包括物理冰川学、结构冰川学、动力冰川学等。着重研究冰川、冰盖及其他自然冰体的结构、物理性质、动力过程和机制,以及冰冻圈与其他圈层之间的物理联系和数量关系。

(3) 环境冰川学:包括同位素和地球化学冰川学、气候冰川学等。着重研究冰川、冰盖以及整个冰冻圈与气候、环境及其变化的关系。近期突出地表现为冰芯的研究(Ice core studies),它能提取反映古代及现代气候与环境及其变化的高精度、长时间系列的信息,在全球气候环境变化及相关的研究中处于重要地位。

(4) 应用冰川学:包括所有自然冰体与人类社会经济发展有关的应用及防灾减灾问题,包括雪工程学、冰工程学。目前国际上的应用冰川学问题,主要是研究冰川湖溃决突发洪水(Glacial Lake Outburst Flood,简称 GLOF)及冰川跃动(Surge)引起的特大灾害问题,建设大的人工冰坝及冰平台问题,冰山拖运、停泊及淡水获取问题,冰川积累、消融的人工调节问题等。

由于冰川及冰盖是冰冻圈的主体,其研究方法相似,因而本书便以其为主要对象,偏重于普通冰川学方向,同时兼顾冰川学的其他方向。

第二节 冰川学发展简况

一、人们对于冰雪的最初认识

冰雪现象分布广泛,与人类的生活和生产活动关系密切。古希腊的地理及历史学家,如阿利斯多芬等的著作中就有关于大气冰、雪崩和冰川方面的记述。

中国唐朝的玄奘在去印度取经途中,经过天山和帕米尔,他对冰川及雪崩的记载,被认为是最早的冰川学记录,在西方文献中,在谈到冰川学历史时,常被提及。公元 629 年玄奘从长安出发,开始了他的漫长的西行南下取经的旅途,在由南向北横越中央天山时,经过著名的木札尔特谷地,他的徒弟辨机和慧立在他们的著作中生动地描述了途经的木札尔特冰川表面现象和在山口处遇到雪崩的情况(施雅风和王宗太,1979)。

古冰岛人早在 13 世纪就有关于冰岛火山爆发引起的冰川洪水灾害的记述。

阿尔卑斯山是人类最早开发的高山区,也是冰川与雪崩的王国,正是在这里出现了第一部有关冰川和雪崩的科学著作。瑞士人索绪尔(H. B. de Saussure)在他写的多卷本《阿尔卑斯游记》(1779,1786,1796)中,首次记述了冰川的运动和雪崩的发生,这部著作标志着冰川学的萌芽。由此计算,冰川学的真正历史只有 200 多年,远比地理学、地质学、物理学以及水文学、气象学等基础学科年轻得多。

但作为近代冰川学的奠基人,应该算是阿伽西(Agassiz, 1807~1873)。他是瑞士自然科学学会会长,他创立、发展和完善了第四纪冰川学说,建立了世界上第一个冰川观测站(1840),对冰川结构、运动、温度等进行了系统观测。他的著作《冰川研究》(*Etudes sur le's glaciers*)(Agassiz, 1840)是冰川学理论奠基之作,因此他被称为“冰川之父”。

二、冰川学发展的主要阶段

第一阶段:从 1796 年起到整个 19 世纪。主要是研究山地冰川,特别是其冰舌部分的形态,以分类、描述为主要趋势。

第二阶段:20 世纪的前半叶。冰川研究从山地扩大到极地,从冰舌区扩大到积累区,从冰川表面深入到冰川内部,从野外路线考察扩大至半定位和定位研究,从单纯的观察描述,发展至采用仪器测量和观测,如地面及航空测量,冰川运动,气象及水文观测等。

第三阶段:以第三届国际地球物理年(1957~1958,1958~1959)为开端,经过

国际水文协作 10 年(1965~1974)到 20 世纪 80 年代中期。广泛采用较新的仪器对分布于全球不同自然带的冰川开展了国际性的同步观测,突出了冰川学的地球物理方向和水文方向,注意了对重大冰川灾害的研究,如冰湖溃决洪水和冰川跃动现象。冰川学从国家范围走向全世界,出现了许多新的国际合作研究计划,特别是在南极冰盖的研究方面。

第四阶段:从 20 世纪 80 年代中至今。随着科学界大多数人对与温室效应有关的全球变化的认可,社会上对全球变化可能引起的气候与环境变化后果十分关注,特别是冰芯记录在全球变化研究中作用的显示,使冰川学发展出现了巨大的转变,以 1985 年在英国《自然》(*Nature*)杂志上发表的关于南极东方(Vostok)站冰芯 15 万年来的气候变化记录的文章(Lorius *et al.*, 1985)为标志,从 20 世纪 60 年代发展起来的环境冰川学方向受到了特别的重视,以致使其成为冰川学研究的主导方向。

第三节 中国冰川学发展简况

虽然中国人对冰雪世界的认识历史悠久,但真正意义的冰川学研究却起始于 20 世纪 50 年代中国西部登山科考和冰川资源的大规模考察。1958 年,中国科学院成立了高山冰雪利用研究队,可以作为中国冰川学创建的标志,至今,中国冰川学已有半个世纪的发展历史。回顾过去,中国冰川学的发展大致可分为以下几个阶段。

一、创建及初步发展阶段(1958~1966 年)

1958 年,中国科学院在当地政府的要求和支持下,组织了中国科学院地理所、地球物理所、兰州大学等高校及地方水利、气象等部门的学者、专家,成立了以施雅风为首的高山冰雪利用研究队。在前苏联专家道尔古辛(Dolgushin)的指导和参与下,对祁连山冰川资源进行了大规模的考察,开展了人工促进冰川消融的试验,随后出版了中国第一部冰川学专著《祁连山现代冰川考察报告》(中国科学院高山冰雪利用研究队,1958)。作为中国冰川创建时期的著作,还有崔之久(1958)关于贡嘎山现代冰川的论文和王明业等(中国珠穆朗玛峰登山科学考察队,1962)关于珠穆朗玛峰冰川考察的报告。

1959 年,冰川考察及人工促进冰川消融试验扩大至天山主要山脉,同时分别在祁连山的大雪山老虎沟及天山乌鲁木齐河源建立了冰川定位观测站(前者为 1959~1963 年,后者为 1959 年至今)。可惜天山冰川考察及融冰化雪试验的报告未公开出版,其部分结果后来反映在许世远的《天山现代冰川作用研究》(1963)一文中。1960 年,冰川考察扩大至帕米尔的慕士塔格-公格尔山,其结果后来只有部