

中国现代科学全书 • 水文学
CHINESE ENCYCLOPAEDIC SERIES OF MODERN SCIENCES • HYDROLOGY

● 杨针娘 曾群柱 著

冰川水文学

GLACIER HYDROLOGY

重庆出版社

中国现代科学全书·水文学

冰川水文学

杨针娘 著
曾群柱

重 庆 出 版 社

图书在版编目(CIP)数据

冰川水文学/杨针娘,曾群柱著,—重庆:重庆出版社,2000.12
(中国现代科学全书)

ISBN 7—5366—5104—X

I. 冰… II. ①杨…②曾… III. 冰川学:水文学研究
IV. P343.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 58169 号

中国现代科学全书·水文学

冰 川 水 文 学

杨针娘 曾群柱 著

出版·发行/重庆出版社

经销/新华书店

印刷/北京兴谷印刷厂

开本/850×1168 毫米 1/32

印张/12.125

字数/300 千字

印数 1—3,000 册

版本/2001 年 1 月北京第 1 版

2001 年 1 月第 1 次印刷

网址:<http://www.cesms.com.cn>

电话:64851686

书号:ISBN 7—5366—5104—X/P 34

定价:23.00 元

出版声明/版权所有,翻印必究。

中国现代科学全书总编辑委员会

名誉主编 胡 绳 钱伟长 吴阶平 周光召
许嘉璐 罗豪才 季羨林 王大珩
郑必坚
主 编 姜士林 郭德宏 刘 政 程湘清
卞晋平 王洛林 许智宏 白春礼
卢良恕 徐 诚 王洪峻 明立志

(副主编和编辑委员名单容后公布)

水 文 学 编 辑 委 员 会

主 编 刘新仁 陈吉余
编委委员 (以姓氏笔画为序)
王金李 朱元生 朱学愚 朱慧芳
刘新仁 林传真 陈吉余 陈家琦
宋德敦 芮孝芳 杨针娘 钱孝星
濮培民

序 言

地球表面淡水资源的 80%,是以固态形式—冰川、积雪和在土壤岩石中冻结的冰体(冻土)存在的。它不仅是人类最宝贵而丰富的自然资源,而且对地球的生态环境有巨大而深刻的影响。因此在现代科学系统中,人们把以冰体为主体构成的冰冻圈作为与大气圈、生物圈、岩石圈和水圈并列的地球系统层。同时,冻土圈又是冰圈中的特殊圈层。冰川水文学就是研究冰冻圈中固态水与液态水之间相互转化、运动、演化及其与气候环境相互作用的冰川学与水文学交叉的现代科学的新方向。

中国是世界上冰冻圈分布最广泛,与人类的生活关系最密切的国家之一。在高温干旱年份,冰川将它在低温湿润年份储存的水额外融化出来,自然地调节着维系干旱区绿洲生态环境的生命之水,因而冰川是中国西部最珍贵的水源,被誉为“固体水库”。在中国冰川学诞生之时起,以作者为首创立的冰川水文研究就是其重要的内容,并由冰川作用区扩大到积雪进而拓展到整个寒区的水文学研究。由于中国地理环境的独特性,必须创立一套既与国际先进水平媲美,又适用于中国的研究方法和理论,如冰川和积雪融水径流的估算方法、遥感技术的

应用,冰雪、冻土水文过程和冰雪灾害的形成、运动机理及其对气候变化的响应以及冰雪的化学、同位素成分时空分布、古气候的恢复等均具有独创性的研究。这些国内外最新的研究成果在本书中都作了详尽而系统的论述。

既具科学性又有巨大现实意义的冰川水文学具有无限的生命力,总结过去意味着开拓未来。在新世纪到来之际,相信本书将会充分发挥承前启后的作用。

谢自楚

1999.8.11

前 言

冰川水文是一门研究现代冰川、积雪、冻土与周围环境间固态与液态水的相互转化、冰雪与冻土表面、冰层和底部水的积聚与流动过程、水量平衡与热量平衡、冰雪融水对河流、湖泊的补给作用、气候变化对寒区水文、寒区环境的影响以及冰雪化学成分、冰雪灾害如突发性冰湖溃决洪水、冰川泥石流等的学科。

本书系统地总结了我国自 1958 年以来冰川水文研究的成果。近十年来,我国冰川水文研究从冰川区拓展到包括冻土地区在内的整个高寒山区的研究,同时还介绍了国外冰川水文研究现状及主要成果。本书的问世将为深入研究中国西部和东北高寒山区水资源的开发、利用和生态环境的变化奠定基础。

本书以前人研究成果为基础,是作者三十多年来在冰川水文研究中的成果结晶。第一章至第五章,第七章与第八章是由研究员杨针娘执笔,第六章与第九章由研究员曾群柱执笔。

本书得到中国科学院院士、研究员程国栋所长和名誉所长、中国科学院院士施雅风教授的关怀和大力支持。前任所长、欧亚科学院院士谢自楚教授,研究员康尔泗等

提出许多宝贵意见。在写作过程中得到研究员刘潮海的热情帮助,顾佩同志负责清绘全书插图,在此一并致谢。

书中的错误和不妥之处敬请读者批评指正。

杨针娘

一九九九年八月

目 录

序言	1
前 言	1
第一章 冰川水文学概述	1
第一节 冰川水文学研究对象及意义	1
第二节 冰川水文学研究地区与内容	3
第三节 冰川水文学研究方法	3
第四节 冰川水文学研究进展	6
第二章 中国的冰川、积雪和冻土	16
第一节 冰川	16
第二节 积雪	41
第三节 冻土	48
第三章 冰川水文	56
第一节 冰川作用区热量平衡	56
第二节 冰川作用区物质平衡	69
第三节 冰川作用区水状况与水量平衡	83
第四节 冰川消融区冰面、冰层和冰床的水状况	89
第五节 冰川融水径流形成机制和径流特征	95
第六节 冰川融水径流估算方法	122

第四章 雪水文学	134
第一节 雪的物理参数及观测.....	134
第二节 冻土活动层的季节冻结与融化.....	145
第三节 融雪径流.....	159
第四节 融雪径流估算.....	177
第五章 寒区冰川水资源与河川径流对气候变化的响应	204
第一节 寒区河流水文情势.....	204
第二节 中纬度山地水资源对气候变化的响应.....	211
第三节 未来气候变暖对中国和一些国家水资源的 影响.....	226
第六章 冰湖溃决洪水与冰川泥石流	234
第一节 冰湖溃决洪水.....	234
第二节 冰川泥石流.....	253
第三节 冰湖溃决洪水及冰川泥石流发展趋势.....	269
第七章 近百年来现代冰川、积雪和冻土对气候 变化的响应	272
第一节 近百年来全球气候变化.....	272
第二节 冰川对气候变化的响应.....	274
第三节 中纬度山区积雪对气候变化的响应.....	287
第四节 冻土对气候变化的响应.....	291
第八章 冰雪化学特征	298
第一节 冰雪水化学特征.....	299
第二节 冰雪的同位素.....	307

第九章 冰川、积雪遥感监测	318
第一节 冰雪电磁波谱特征	319
第二节 遥感平台简介及遥感资料评价	329
第三节 冰川变化的遥感监测	332
第四节 大范围卫星积雪动态监测	337
参考文献	347

第一章 冰川水文学概述

第一节 冰川水文学研究对象及意义

一、研究对象

冰川和其它天然冰体,如雪、海冰、湖冰、河冰、冰锥、地下冰以及包括山区河流、高山湖泊、过湿地等在内的寒区水体,都是冰川水文学的研究对象。故冰川水文学是介于冰川学与水文学之间的一门新的分支科学。

二、狭义的冰川水文学

狭义冰川水文学是研究有冰川覆盖的流域(即冰川作用区)的水热状况,也就是冰川与其附近环境的水热交换,冰川表面、冰内和底部水的积聚和流动的物理过程,冰川水量平衡、冰川融水对河流的补给作用以及寒区水体对气候变化的响应等。

三、广义的冰川水文学

广义冰川水文学是研究寒冷地区水文现象,即研究包括冰川、积雪、冻土等在内的整个高寒山区的水文现象。寒区一般定义为最冷月的平均气温低于 -3.0°C ,高于 10°C 的月平均气温不超过4个月,河流、湖泊的封冻期在100天以上,有50%以上的降水量为固态降水,并流域形成一定的积雪覆盖的地区。从更广泛的意义上,可将寒区扩大到冰冻圈。

四、研究目的意义

中国是世界上中、低纬度冰川最发达的国家,冰川总面积为

59406.15km²,冰川储量 5589.76km³,除了南极大陆和格陵兰两大冰盖外,中国冰川的数量仅次于加拿大、前苏联和美国,居世界第4位。全球冰川面积为 $15.8 \times 10^6 \text{ km}^2$ (WGNS, 1989) (World Glacier Inventory, Status, 1988),占全球陆地面积的 1/10。

中国多年冻土面积为 $215 \times 10^4 \text{ km}^2$,占我国领土面积的 22.3% (徐学祖等, 1983),冻土面积排行世界第三位 (郭东信, 1990)。加拿大多年冻土面积约占其国土面积的 50%;前苏联多年冻土面积占其本国领土面积的 48%;美国多年冻土面积占其国土的 15%,全球多年冻土面积约占陆地总面积的 1/4。可见,全球寒区范围之广、淡水资源之丰富,以及它们在水循环、气候变化中的重要地位。

冰川、冻土虽然远离人类活动区,但与人类的经济活动有着密切的关系。在中国,冰川是西部山区河流重要的补给水源,是西部地区人们赖以生存、发展工、农、牧业的最基本因素之一。在中亚地区,冰川融水的灌溉面积达 50%;在法国、瑞士阿尔卑斯山脉的冰川,是发展水力发电和旅游业的重要资源;在加拿大西部的落基山脉以及沿岸山脉的冰川对发展水力发电、农业灌溉和工业起着重要作用;北美石油输运管道通过冰川和冻土地区。在西方一些发达的国家,雪盖提供的水量对水力发电、灌溉,城市供水以及改善水资源管理方面有着十分重要的意义。冰雪既是宝贵的淡水资源又是山区形成严重自然灾害的发源地,如突发性冰湖溃决洪水,冰川泥石流,雪崩,牧区雪灾等。冰川与冻土也是山地环境重要的组成,给山地和山麓平原的植被、土壤以至绿洲的形成和人类活动以重要影响;同时又是敏感性气候信息,它们在了解过去,预测未来的研究中,发挥着越来越显著的作用。因此,冰雪的形成、分布、时空动态变化的研究是目前世界各国学者十分关注的重要科学问题之一。

第二节 冰川水文学研究地区与内容

一、研究地区

冰川水文学研究的地区,在中国有青藏高原地区(包括昆仑山、喀喇昆仑山、唐古拉山、念青唐古拉山,冈底斯山和喜马拉雅山)、祁连山、阿尔泰山、天山、帕米尔和东北大、小兴安岭、长白山等;在国外除南极大陆、格陵兰两大冰盖以外,还有北极地区的冰帽以及亚洲、北美洲、南美洲、欧洲、新西兰等的高山冰川及广大多年冻土地区。

二、研究内容

随着研究的逐步深入和国际间合作研究的发展以及生产实践的需要,按寒区两相水体的水文现象以及不同环境中水存在的不同形式,冰川水文学又区分为冰川水文、雪水文、湖沼水文和寒区河流水文研究等内容。研究范围从局部的、小尺度的研究,扩大到全球性尺度的研究。1990年国际地理联合会(IGU)建议在中国开展区域性水文对气候变化和全球变暖的响应研究,并且提出冰冻圈包含丰富的气候变化的敏感性信息。事实上国际上已把冰冻圈的一些研究内容,如冰川的物质平衡和进退变化,冰湖的冻结和融化日期,季节海冰、季节雪盖的范围和存在时间,多年冻土活动层的厚度,多年冻土的温度剖面等,列入了全球变化的监测计划之中。

第三节 冰川水文学研究方法

一、野外观测实验与室内分析

(一)野外观测实验

在国际水文 10 年 IHD(1965~1974),提出以冰量和水量平衡为研究方向,在全球先后建立了 60 多个典型冰川流域。例如在前苏联的高加索(Dzhankuat)冰川、在天山捷尔斯克伊阿拉套(Терскей - Alatau)山的 Тиуикзи 大陆型冰川、约汉—克谢尔苏综合性实验流域;瑞士在阿尔卑斯山的 Gries 冰川, Aletsch 冰川, Limmern 冰川及 Silvretta 冰川等;奥地利在东阿尔卑斯山的 Vernagthfener 冰川;美国加利福尼亚的 Maclure 冰川,华盛顿的 Cascade 冰川,阿拉斯加的 Wolverine 冰川和 Gulkana 冰川;在加拿大落基山脉的 Peyto 冰川等;日本山地积雪实验站有 9 处。中国在 20 世纪 50 年代末以及从 60 年代初至今在天山乌鲁木齐河源 1 号冰川建立实验站,在祁连山疏勒河、老虎沟 12 号冰川、北大河“七一冰川”、水管河 4 号冰川、帕米尔的切尔干布拉格冰川等建立半定位站,80 年代初至 90 年代初在祁连山黑河支流冰沟建立积雪与寒区水文监测站等,取得了大量的冰川物质平衡、水热平衡、冰川进退变化、冰川温度、冰川厚度、冰岩芯、冰川融水径流、冻土活动层厚度、地温、水位以及水文、气象、冰雪化学等观测资料,为理论和应用研究提供了重要的科学数据。

(二)室内分析

1. 地形数字模型

在野外高寒山区交通不便、条件艰苦的地方,采用地形数字模型的方法进行室内分析工作。地形数字模型是目前外推积雪资料及其它气象要素,如降水、气温、蒸发、雪水当量等有效的方法之一。它是以地形图的坡度、坡向、海拔高度、经纬度根据面积大小将流域化分为若干个小网格,分别计算各网格的积雪深度、雪水当量、气温、降水、径流等水平衡要素,从而求得上述要素在流域的动态分布图。在美国、奥地利、瑞士等用地形数字模型与地面站小流域观测资料进行比较,其结果十分理想,但对流域面积大的不太理想。中国近期用地形数字模型计算天山乌鲁木齐河源 1 号冰川辐

射和积雪分布效果很好。

2. 遥感技术用于冰雪监测

利用 NOAA/AVHRR、TOVS 卫星及 Landsat, Spot 等卫星资料以及搭载于雨云水号(NIMBUS-5), 雨云 7 号卫星及海洋卫星等多通道微波扫描辐射仪(SMMR)等的微波辐射可以将雪盖与无雪盖区分出来并有很强的穿透能力, 可以确定积雪深度和雪水当量随时间的变化。并可获得积雪下部冻土和土壤含水量的状况。但目前微波遥感尚处于实验阶段, 一般精度尚满足不了水文要求。为了检验遥感资料的可靠性, 需要与地面实验站相配合, 如在奥地利阿尔卑斯山 Langental 流域(面积 9.4km^2), 美国加利福尼亚州 Emerald(面积 1.22km^2)等。中国在东北、天山、祁连山、黄河上游等也曾进行冰雪遥感监测实验研究。

3. 数据统计分析

从野外提取的水热平衡要素以及水文气象等资料, 通过统计分析, 如利用多元回归等方法找出各因素之间的关系以揭示寒区水文过程与有关因素的内在联系。

二、基本理论

水量与能量平衡是水文学研究的基本理论。大气与陆面的水量和能量平衡是气候系统的基本组成部分。因此, 陆面的水量和能量过程受制于气候系统。目前从微观尺度上, 如从小实验流域水量与能量平衡研究, 不断扩展到大尺度乃至发展到全球性能量与水循环试验(GEWEX)。

然而目前开展水量与能量平衡研究关键在于基本资料的精度问题。降水、蒸发与径流作为水量平衡基本要素, 其覆盖面尚不能满足要求, 尤其是在高寒山区, 研究全球性的困难更多。

在中国目前开展寒区水量与能量平衡研究主要还是在不同地理环境下的小实验流域进行。例如在天山冰川站的冰川区和裸露

山坡流域;近 10 年又在祁连山冰沟多年冻土实验流域进行水、热平衡研究。

为探讨全球性冰雪在水循环中的作用,国际雪冰委员会(ICSI)制定了在全球若干个有代表性的高山冰川区进行以物质平衡为中心的同步观测。在北半球选择 45 条冰川,其中,中国有 5 条高山冰川被列入该研究计划,研究冰冻圈,包括冰川、积雪和多年冻土,对全球气候变暖的响应。

高亚洲冰冻圈对气候环境变化的响应极为敏锐,冰川类型复杂而多样,但研究程度较差。列入计划的有 15 条冰川,分布于帕米尔、天山、阿尔泰山、昆仑山、喜马拉雅山、唐古拉山及贡嘎山。

第四节 冰川水文学研究进展

一、国外冰川水文研究进展

冰雪是优质的淡水资源,全球 $4/5$ 的淡水资源聚集于冰川。国际水文 10 年(1965-1974)期间,冰川水文学引起了人们极大的兴趣。1969 年在英国剑桥召开的第一次国际冰川水文会议推动了冰川水文学的发展,世界各国的冰川水文研究从单纯的地理学科向地球物理学科发展。提出了以冰量和水量平衡为基础的研究方向。更加重视野外观测实验研究,在国际水文 10 年期间先后建立了 60 多个典型冰川实验流域。冰川水文研究从一般性的描述,发展到实验研究和定量分析的新阶段。它不但研究冰川本身的物理性质,而且深入研究了冰川表面、冰内和冰下水运动的物理过程,冰川与周围环境之间的关系以及高寒山区特殊的自然灾害,如突发性冰湖溃决洪水和冰川泥石流。此后冰川水文学问题在 1971 年夏季于莫斯科举行的第十五届国际地球物理与大地测量(IUGG)会议上,1972 年 9 月在加拿大班夫举行的“冰、雪在水文学中的作用”会议上,1972 年 9 月在塔什干召开的第五届前苏联