

Basic Principles of Glacial Dynamic Models and
Observation Guide for Corresponding Parameters

冰川动力学模式 基本原理和参数观测指南

李慧林 李忠勤 秦大河 主编

冰川动力学模式 基本原理和参数观测指南

李慧林 李忠勤 秦大河 主编

 气象出版社
China Meteorological Press

内 容 提 要

冰川动力学模式是基于物质、能量和动量守恒原理而建立的物理学模式,由冰川变化机理入手,从力学和热学范畴来描述和模拟冰川特征和变化。本书简要介绍了冰川动力学模式基本原理和相关参数的观测方法及资料整理。

图书在版编目(CIP)数据

冰川动力学模式基本原理和参数观测指南/李慧林,李忠勤,
秦大河主编. — 北京:气象出版社,2009.4
ISBN 978-7-5029-4741-5

I. 冰… II. ①李…②李…③秦… III. 冰川-运动(力学)-
建立模型 IV. P343.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 055198 号

Bingchuan Donglixue Moshi Jiben Yuanli he Canshu Guance Zhinan 冰川动力学模式基本原理和参数观测指南

李慧林 李忠勤 秦大河 主编

出版发行:气象出版社

地 址:北京市海淀区中关村南大街 16 号

邮政编码:100081

总 编 室:010-68407112

发 行 部:010-68409198

网 址:<http://www.cma.gov.cn>

E-mail: qxcsbs@263.net

责任编辑:简学东 李太宇

终 审:俞卫平

封面设计:燕 形

责任技编:吴庭芳

印 刷:北京中新伟业印刷有限公司

开 本:787 mm×1092 mm 1/32

印 张:2

字 数:51 千字

版 次:2009 年 5 月第 1 版

印 次:2009 年 5 月第 1 次印刷

印 数:1~1500

定 价:10.00 元

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等,请与本社发行部联系调换

冰川对气候变化的直接响应是冰川物质平衡发生变化，间接响应是冰川动力学特征发生改变（图 1）。冰川动力学模式可以以冰川物质平衡变化为驱动，模拟研究由冰川动力学特征改变而引发的冰川形态的变化，实现“气候变化—冰川物质平衡变化—冰川形态与体积变化—冰川融水径流变化”的完整推算，对预测未来由气候变化引发的冰川变化及其对水文、水资源的影响具有重要意义。

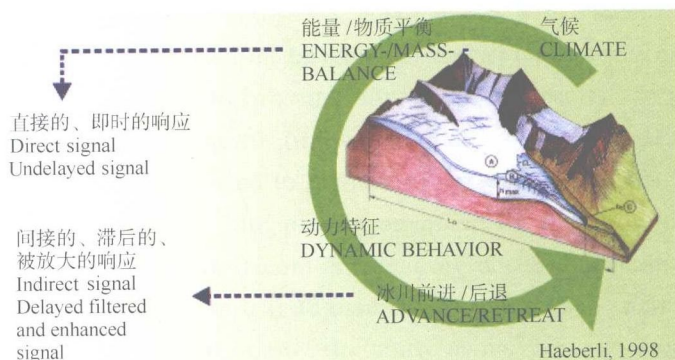


图 1 冰川对气候变化的响应

Fig. 1 The response of glaciers to climate change

建立冰川动力学模型，一方面需要对冰川各种动力学理论进行研究和探讨，使模型在真实反映冰川各种过程的基础上，

得到最大限度的简化；另一方面则需要采集尽可能多的模型所需参数。目前定位或半定位的冰川学观测在不同类型、不同规模的冰川上已蓬勃开展起来，为统一和规范与冰川动力学模式相关的观测项目，我们编写了这本《冰川动力学模式基本原理和参数观测指南》，供从事冰川相关研究的野外观测人员参考。由于时间仓促，错误在所难免。需要科技人员在观测实践中进行改进和完善。

编 者
2009 年 4 月

Preface

The response of glaciers to climate change has two aspects. It first appears as change of mass balance, which is immediate and direct response, and secondly the dynamical adjustment of glaciers to their environment which is regarded as indirect and lagged response. Therefore, predicting the long term future of glaciers requires not only the knowledge of the future climatic conditions and their impacts on mass balance of glaciers, but also the way glaciers will respond. By integrating all responding physical processes, a deterministic dynamic model should provide more accurate results. In previous researches several time-extrapolated or statistical approaches have been used to project future changes of glaciers in China. However, the projection made by those methods over long periods can become misleading because they do not account for the dynamical adjustment of glaciers to their environment. In recent years, the study using dynamic models to estimate the future evolution of glaciers has been carried out on the valley glaciers in western China. This book is aimed to provide basic principles of glacial dynamic models and a field observations guide of corresponding parameters.



序

1 引言	(1)
2 冰川动力学模式基本原理和所需观测参数	(5)
3 冰川物质平衡观测	(12)
4 冰川厚度测量	(21)
5 冰川表面运动速度观测	(27)
6 冰川温度观测	(33)
7 冰川地形图绘制和冰川表面高程变化测定	(36)
8 冰川末端变化观测	(38)
9 冰川区气象、水文观测	(41)
10 冰川流域内的相关观测和资料采集	(43)
致谢	(45)
主要参考文献	(46)
附录 I 花杆/雪坑法冰川物质平衡的计算	(48)
附录 II 利用经纬仪(全站仪)测定冰川表面运动速度	(52)

CONTENTS

Preface

1	Introduction	(1)
2	Basic principles of glacial dynamic models and corresponding parameters	(5)
3	Mass balance observation	(12)
4	Ice thickness measurement	(21)
5	Surface velocity measurement	(27)
6	Borehole temperature measurement	(33)
7	Glacier mapping and surface elevation variation determination	(36)
8	Terminus variation measurement	(38)
9	Hydro-meteorological observation in glacierized area	(41)
10	Relevant observation and data collection in glacierized basin	(43)
	Acknowledgment	(45)
	References	(46)
Appendix I	Calculation of mass balance in stake/ snowpit method	(48)
Appendix II	Surface velocity measurement by theodolite (total station)	(52)

1 引言

冰川对气候变化反映敏感,随着全球性的升温 and 降水变化,20 世纪以来大多数山岳冰川处于明显退缩状态,这一退缩在最近 20 年又显现出强烈的加速趋势,其幅度是许多学者始料未及的,也是许多模式无法模拟的。在中国西部干旱区,冰川是重要的水资源,冰川未来变化的预测及其对水资源影响是众多学者关注的问题。

冰川变化是由气候条件的变化(主要是气温和降水)造成的,这种变化首先会反映在冰川物质平衡变化上,其次是冰川厚度和运动特征(如冰川底部出现滑动)等变化上。冰川是流动的巨体,流动造成了冰川变化,改变了冰川各部分所处的水热条件,也造成了对气候变化响应的复杂性,表现之一就是冰川的变化显著地滞后于气候的变化。这种响应特征,使得对冰川的预测包括了两个内涵,一是冰川对气候变化的即时响应,二是由冰川动力学特征改变而引发的变化。

目前冰川变化预测使用较多的方法是基于统计学原理的“时间外延法”。这种方法较为简单,但前提条件是被预测的冰川对气候的响应已达到相对稳定的阶段,冰川保持了和气候条件相适应的规模。因此,这种预测方法从原理上讲不适用于那些处在非稳定态的冰川。

物质平衡模式(主要包括度日因子模式和能量平衡模式等)有时也被用来进行冰川消融的预测,但这一模式基于气象要素

和冰川物质平衡的统计关系上,将冰川对气候变化的动力学响应视为一个“黑匣子”,因而无法准确计算冰川体积的动态变化过程,并且从机理上不能用来预测长期的冰川变化。

冰川动力学模式是基于物质、能量和动量守恒而建立的物理学模式,由冰川变化的机理入手,从力学和热学范畴来描述和模拟冰川变化,能够较好地解决预测问题。该类模式以物质平衡模式的结果为输入端,不仅能够预测冰川在气候发生变化时详细的几何形状响应过程,而且可以预测冰川在给定气候情景下的最终退缩状况,实现由气候变化—冰川物质平衡变化—冰川动力学响应—冰川形态体积变化(冰川融水资源变化)的完整推算。

冰川动力学基本理论的建立始于 20 世纪 60 年代。Nye 将运动波波速与运动波扩散参数等概念引入冰川运动系统,建立了一系列由冰川物质平衡变化来驱动冰川响应的模式理论。而 Jenssen(1977)和 Mahaffy(1976)等则在一维动力学模式的基础上建立了二维及三维的冰流模式(Ice flow model),从而达到准确预测冰川规模的变化。之后,Oerlemans(1982)首次在动力学模式应用中探讨了冰盖各种物理特征随时间的变化情况。

由于受到计算复杂、参数难以获取等因素的制约,冰川动力学模式在 20 世纪 70—80 年代发展缓慢,尤其是在应用方面。然而,计算机技术的飞速发展使得该方向研究在最近十几年有了很快的发展。在极地冰盖方面,以冰川模式专家 Philippe 为首的研究小组进行了动力学模式系统性研究。然而,对于山岳冰川而言,由于其边界条件远远复杂于极地冰盖,相应的动力学研究也相对滞后。

近年来,Áðalgeirsdóttir (2006)等利用“浅冰层近似”、“微

扰”及“有限元”等方法对冰岛 Hofsjökul 和 Vatnajökull 冰盖的演化过程进行了历史重建和未来趋势预测,引起广泛关注。Le Meur 等(2003)利用二维“浅冰层近似”方法对观测资料丰富的法国 de Saint-Sorlin 冰川开展了过去和未来变化过程的预测。这些研究逐渐形成一个新的趋势,就是将动力学模式与物质平衡模式进行耦合,并辅以遥感、热动力学和水文平衡等方法,实现由气候变化引发冰川变化的推算,形成了一些实用性很强的预估模式体系。

尽管由于近年来全球冰川的强烈退缩,冰川动力学预测模式的研究正逐步升温,但大部分科学家仍将注意力集中在南北两极冰盖的模拟当中。前缘性研究已将大气模式、物质平衡模式、动力学模式、冰盖底部地热模式及内部与底部水文模式等耦合,形成可以独立解决“气候变化—冰盖响应—海平面上升”的模式操作体系。模式链条中的动力学模式部分也日益复杂与精细,架构中考虑所有应力分量,数学处理中引入三维及有限元方案,使得模拟结果可信度日益提高。少数科学家也开始注意到山岳冰川的明显退缩对局地气候、生态及经济的重要影响,并开始利用动力学模式或动力学模式与其他模式的耦合来模拟山岳冰川的未来变化,研究山岳冰川对气候变化的敏感性及响应机理。其中包括 Oerlemans(1998)对 Alaska 及新西兰个别冰川的尝试性模拟。与极地冰盖相比,在山岳冰川上应用动力学模式更有难度。主要原因是地形复杂、边界条件及输入参数难以获取。日前的研究多限于那些观测详细、观测时间序列长的冰川上,例如,De Smedt & Pattyn (2003),Sugiyam *et al.* (2007)和 Huybrechts 等在俄罗斯、瑞士和尼泊尔地区的研究。利用动力学模式对流域范围内的众多冰川进行模拟,是近年来在国际

上新开展的研究方向。由于这项研究具有所需参数多、采集困难、需要投入大量人力物力等特点,多数研究计划也只停留在理论设想阶段。

中国冰川一半以上分布在干旱区,是重要的水资源,开展冰川动力学模式研究在我国具有十分重要的意义。乌鲁木齐河源1号冰川有近50年详尽的观测资料,具备开展动力学模式基础性建立的条件和参数验证、敏感性分析及误差分析等条件。我们提出了用流域中单条冰川模拟结果向流域推广,进而获得流域众多冰川变化结果的研究思路。国家重点基础研究发展计划(973计划)“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”项目在我国不同冰川区域7条典型冰川上实施了定位观测,为这项研究的推广应用提供了必要条件。《中国冰川编目》的完成和二次编目等一系列基础性工作的开展,为这项工作的完成奠定了坚实的基础。

2 冰川动力学模式基本原理和所需观测参数

2.1 冰川动力学模式的基本原理

冰川是流动的巨大大冰体,流动造成冰川形态发生变化,改变了冰川各部分所处的水热条件,见图 2.1,也导致了冰川对气候变化响应的复杂性。冰川动力学模式旨在模拟预测冰川的流动特征。在长达半个世纪的发展历史中,冰川动力学模式出现了侧重点不同的分支,例如频率响应模式、剖面形状因子模式及冰流模式等。虽解决的具体问题不同,采用的物理公式略有差异,但这些模式所立足的基本数学物理理论是一致的。在动力学模式理论建立初期,为了从机理上研究冰川的运动以及简化计算,冰川被认为是一种理想塑性体,可恢复性形变(弹性形变)和不可恢复性形变(塑性形变)是运动的主要形式,在这种假设下,用于晶体的屈服应力概念被引入:

$$\tau_0 = \rho gh \sin \alpha \quad (2.1)$$

其中 τ 是屈服应力, ρ 是冰的密度, g 是重力加速度, h 是冰川厚度, α 是冰川表面坡度。在同种晶体的屈服应力恒定的假设下,陡峭的冰川较薄而厚度大的冰川较为平坦等概念得到推广。

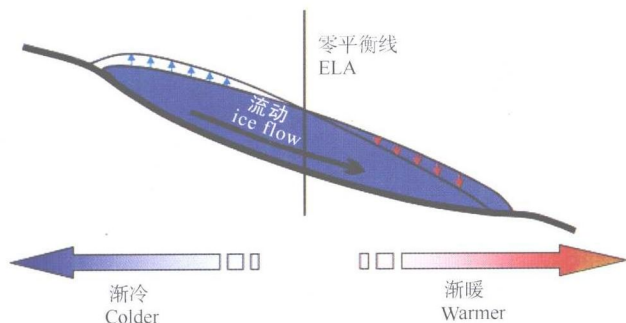


图 2.1 冰川流动在冰川物质平衡和形态变化方面扮演了十分重要的角色

Fig. 2.1 Glacial motion plays an important role in mass balance and shape of a glacier

冰川的受力及运动状况是动力学模式研究的对象。重力是冰川运动的基本驱动力,其分量在空间与时间上的差异造成了冰川运动的相应变量。

利用不可压缩性原理(式 2.2)及动量守恒定律(式 2.3),将重力在冰川上成功分解成 9 个分量。各个分量描述冰川在不同方向不同角度的受力细节。后来,又通过 Glen 流动定律(式 2.4)获得了冰川的应变及速度分布情况。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.2)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} = -\rho g_x \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} = -\rho g_y \\ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} = -\rho g_z \end{cases} \quad (2.3)$$

$$\dot{\epsilon} = A\tau^n \quad (2.4)$$

为将冰川的运动与冰川表面物质平衡及冰川的形态变化联系起来,各种动力学模式在上述原理的基础上,采用不同形式的连续性方程来研究冰川厚度随时间的变化情况,最简化形式如式(2.5)。

$$\frac{\partial h}{\partial t} = b - \frac{\partial F}{\partial x} \quad (2.5)$$

不同模式对具体物理过程有不同的思考与处理,例如,频率响应模式中,物质平衡对冰川系统的扰动形式被视为频率波扰动,由此构建的函数(式 2.6 与式 2.7)代入连续性方程和力学方程中进行数学运算,得到冰川对物质平衡的动力学响应(Nye, 1960; 1965)。频率响应模式建立了各种冰川参数之间数学关系,具有很强的理论研究价值,也推动了冰川动力学模式的发展。

$$\begin{cases} \bar{a}(t) = A(\omega) \exp i\omega t \\ h_1(x, t) = H(x, \omega) \exp i\omega t \\ Q_1(x, t) = Q(x, \omega) \exp i\omega t \end{cases} \quad (2.6)$$

$$Q_1 = c_0 h_1 - D_0 \left(\frac{\partial h_1}{\partial x} \right) \quad (2.7)$$

剖面形状因子模式将冰川不同部分的厚度变化关系定义为“剖面形状因子”(式 2.8),以力学原理及质量守恒原理为基础,求得冰川达到稳定状态所需时间(式 2.9)及届时冰川几何形状等结果。在实际使用中,该模式通常被当作一种单纯的几何模型,而剖面形状因子也被当作冰川对气候变化响应

阶段的直接指示参数。这一模型的最大优势是在冰川长度与平均厚度的变化之间建立了关系,而大多数冰川的长度变化可以通过终碛垄判别测量及实测的方法获得,因而该模型在估算和预测区域冰川变化时具有很强的可操作性(Jóhannesson *et al.*, 1989)。

$$f(t) = \frac{\langle \Delta h(x, t) \rangle}{\Delta h(l_0, t)} \quad (2.8)$$

$$T_M = \int \frac{l_0}{u(l_0)} = \frac{\langle \Delta h(x, t) \rangle}{\Delta h(l_0, t)} \frac{l_0}{u(l_0)} \quad (2.9)$$

冰流模式的建模思想与前面两种类似。一维冰流模式具有所需实测参数较少,模式架构具有合理、简洁与直观等特点,适用于观测资料不是很详细的冰川。迄今为止,国际上不仅建立了二维至三维的扩展模型,而且与热动力学、大地平衡构造学以及冰川物质平衡模式等相结合的综合模型也已经比较成熟。这些模式在冰川变化预测的研究中具有相对灵活和实用的特点。

2.2 冰川动力学模式所需的观测参数

冰川动力学模式以研究冰川运动为解决问题的主线,因此除了作为输入端的物质平衡,所有影响冰川运动的因素都包括于模式参数架构之中。

重力是冰川运动的驱动力。除极地冰盖外,冰川通常发育于中—高纬度的山区。据所处地形不同,分为冰帽、山谷冰川、冰斗冰川及悬冰川等几个基本类型或这些类型的复合。这些冰川都依山体而生,在自身重力的作用下沿坡向流动。坡度大,重

力沿坡面的分量就大,运动速度就快。冰川的厚度不同,受到的重力作用不同因而运动速度也有差异。因此在研究冰川运动时,冰川表面运动速度、冰川厚度及冰川表底面坡度是非常重要的物理参数。

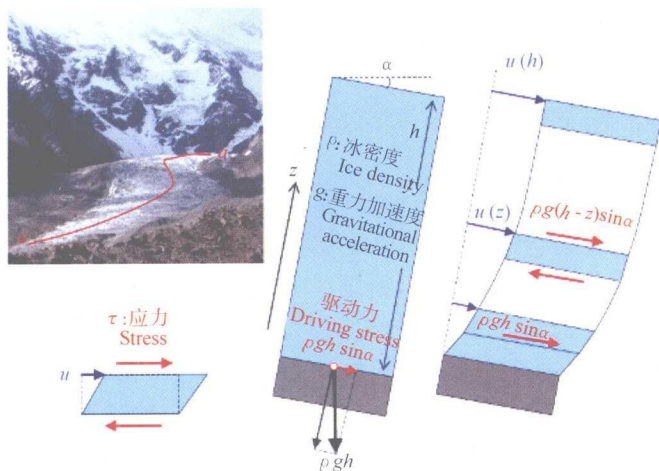


图 2.2 重力驱动冰川流动原理图

Fig. 2.2 Gravity is the driver of glacial motion

对山岳冰川而言,尤其是大陆性与极大陆性冰川,冰川温度低,内部含水量较少,底部基岩对冰川的流动有较强的阻滞作用。两侧的基岩相当于底部基岩的延伸,将冰川向上托举,减缓了冰川的运动。研究这种作用,需要测量冰川横断面形状和冰川表面宽度等物理参数。