

文章编号: 1000-0240(2007)02-0201-08

冰川动力学模式及其对中国冰川变化 预测的适应性

李慧林, 李忠勤, 沈永平, 王飞腾, 王文彬

(中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所 冰冻圈与环境联合重点实验室 天山冰川站, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 冰川动力学模式以其优越的物理过程描述能力, 在冰川变化的预测研究中占有重要地位。其中“频率响应模式”、“剖面形状因子模式”和“冰流模式”较为成熟, 并且具备对山岳冰川演变的模拟分析能力。从发展历史、主要利弊以及适用条件和范围几个方面, 对上述 3 种模式进行了讨论, 并对其在我国冰川上的运用前景进行了探讨。

关键词: 动力学模式; 冰川变化预测; 频率响应模式; 剖面形状因子模式; 冰流模式

中图分类号: P343.6 **文献标识码:** A

0 引言

冰川对气候变化反映敏感, 随着全球性的升温和降水变化, 大多数山岳冰川自 20 世纪以来呈现出明显的退缩状态, 这一退缩在最近 20 a 又出现了强烈的加速趋势^[1-4], 其变化幅度是许多学者始料未及的, 也是现有的大多数模式无法准确预测的^[5]。因此, 寻求行之有效的理论和方法进行冰川变化的预测及其对未来水资源的影响显得十分紧迫。

事实上, 冰川目前的变化是由于气温升高和降水改变造成的, 这种改变首先会反映在冰川的物质平衡变化上, 其次是冰川的温度、运动特征(如冰川底部出现滑动)等一系列变化上。冰川是流动的巨大冰体, 流动改变了冰川各部分所处的水热条件, 同时造成对气候变化响应的复杂性, 表现之一就是冰川变化显著地滞后于气候变化。这种响应的复杂性, 造成了对冰川未来变化预测的困难, 使得预测包括了两个内涵, 一是冰川对气候变化的即时反映, 二是冰川动力学特征改变而引发的变化。

目前使用较多的物质平衡模式(主要包括度日因子模式和能量平衡模式等)基于气象要素和冰川

物质平衡统计关系上, 将冰川作为一个静态系统, 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, 从机理上不能用来预测长期的冰川变化。

冰川动力学模式能够较好地解决这一问题。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, 而且可以预测出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(图 1)。由于模式引入了各种动力学动态参数, 能很好地描述气候变化对冰川的各种影响, 如冰川温度、底部运动状况等, 从而得到较为准确的预测结果。

早在 20 世纪 60 年代, 国际上就开展了利用动力学模式进行冰川变化预测方面的研究, 并且逐步发展出几套较为系统的模式理论。这些动力学模式无一例外地建立在冰川流动定理与物质守恒原理之上。Nye^[6-8]将运动波波速与运动波扩散参数等概念引入了冰川运动系统, 建立了一系列由冰川物质平衡来推算冰川响应的模式理论。其中以频率响应模式理论最为完备, 研究了冰川厚度变化对物质平

收稿日期: 2007-01-10; 修订日期: 2007-02-20

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-127); 国家自然科学基金项目(40631001; 40571033; 40371028; J0630966)资助

作者简介: 李慧林(1981-), 女, 甘肃兰州人, 2004 年毕业于兰州大学物理系, 在读硕士研究生, 主要从事冰川模式方面研究。

E-mail: ay_linke@163.com

衡变化的幅度及相位响应，并且通过数理分析确定了其在外界条件不变情况下到达稳定状态所需的时间^[9-10]。Jóhannesson *et al.*^[11] 则将冰川动力学原理与冰川几何特征相结合，引入了剖面形状因子，推导出冰川达到稳定状态时可能的几何形态。Oerlemans^[12-13] 首次在动力学模式应用中讨论了冰盖各种物理特征随时间的变化情况。而 Jenssen^[14] 和 Mahaffy *et al.*^[15] 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。

由于受到计算复杂、参数难以获取等因素制约，冰川动力学模式在 20 世纪 70 和 80 年代发展缓慢，尤其是在运用方面。然而，计算机技术的飞速发展则使得该方向上的研究在最近十几年有了长足的发展。在极地冰盖，以冰川模式专家 Huybrechts

为首的研究小组进行了动力学模式系统性研究^[16-19]。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，A. Óalgeirsdóttir *et al.*^[20-21] 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 *et al.*^[22] 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系统预测。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-冰川径流量变化的完整推算，形成了一些实用性很强的预测模式体系。

相比之下，我国的冰川动力学研究非常薄弱。除了对新疆天山乌鲁木齐河源 1 号冰川进行过频率响应^[23] 及主流线厚度简单模拟^[24]，以及对新疆伊犁河流域冰川的一些理论性探讨研究^[25] 之外，几乎为空白。我国大多数冰川目前处于加速消融的状态^[26-27]，冰川如何进一步变化，对水资源会有怎样影响，是众所关注的问题。而现有的预测研究主要基于统计或经验模式上，亟待通过冰川动力学研究开展物理模式的预测研究。

1 山岳冰川动力学模式概述

由于山岳冰川的表面不能够简单视为无限或均一，冰体运动状况受底部地形影响较大，同时冰川

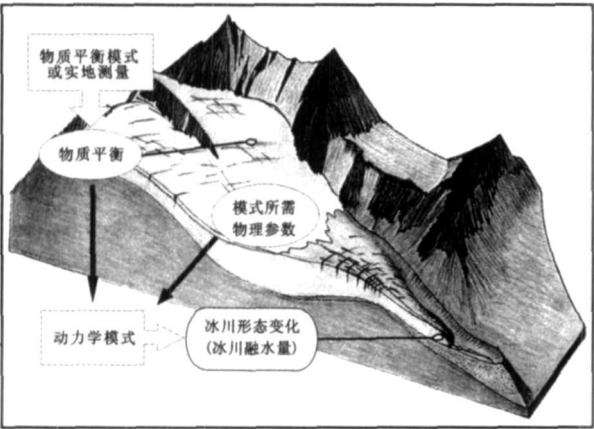


图 1 冰川模式系统结构
Fig. 1 The structure of model system on glacier

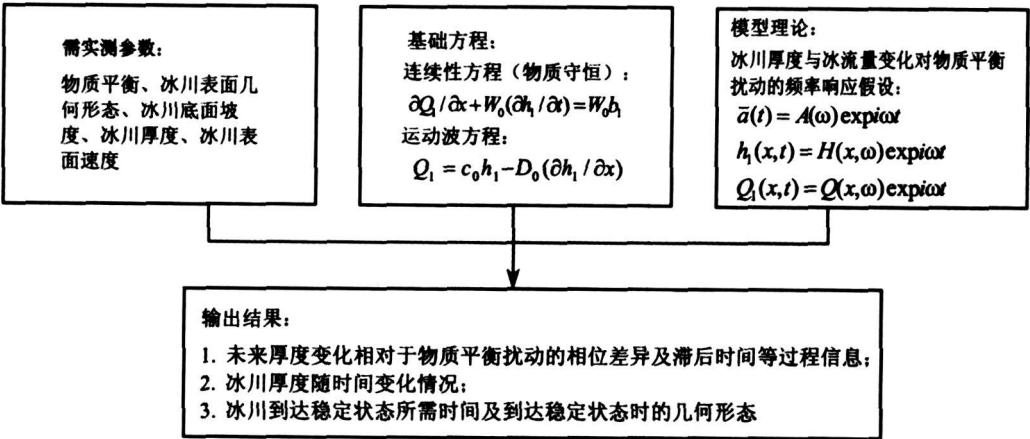


图 2 频率响应模式的结构示意框图
Fig. 2 Structure of frequency response model

温度等其它参数的空间变化显著, 因此将动力学模式应用于山岳冰川时需引入较为严格的输入条件及边界条件, 力学分析过程也与极地冰盖不同. 以下简要介绍几种适合于山岳冰川的动力学模型.

1.1 频率响应理论(Frequency response model)

Nye^[6-10] 在 20 世纪 60 年代提出, 并经过几次完善而形成了一套完整的动力学模式理论体系. 它将物质平衡对冰川系统的扰动形式划分为 3 种: 瞬时扰动、阶段性扰动以及频率波扰动. 据此分别构建了 3 种函数形式, 代入连续性方程及流动方程中进行数学运算, 从而得到冰川对物质平衡的动力学响应. 实践发现, 物质平衡扰动的频率波理论最具实际意义, 频率响应理论模式便由此而来. 图 2 指示了这一模式的输入、输出和理论基础. 频率响应理论在各种冰川物理参数间建立了详细的数学关系, 具有很强的理论研究价值.

1.2 剖面形状因子模式(Factor of profile model)

剖面形状因子是 Jóhannesson *et al.*^[11] 提出的一个参数概念, 以冰川动力学及质量守恒原理为基础, 通过该模式可以求得冰川达到稳定状态所需时间及届时冰川几何形状等结果. 在实际使用中该模式常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. 图 3 指示了这一模型的输入、输出及理论基础. 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测量及实测的方法获得, 因而该模型在估算和预测大量冰川变化时具有很强的可操作性.

1.3 冰流模式(Ice flow model)

该模式始现于 20 世纪 70 年代, 整体建模思想

与前两种相类似, 即以物质平衡变化为扰动输入, 而以冰川厚度随时间的变化为输出结果. 一维冰流模式所需实测参数较少, 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, 不仅建立了二维甚至三维的扩展模型, 而且与热动力学、大地平衡构造学及冰川物质平衡模式等相结合的次级模型也已经比较成熟. 这一模式在冰川变化预测的研究中具有相对灵活性和实用的特点. 图 4 指示了这一模式的输入、输出和理论基础.

1.4 数值模型(Numerical models)

除了以上几种动力学模式外, 还有一些针对不同形态山岳冰川的数值模型(图 5), 这些模型均以冰川动力学原理为基础, 但实际的解决方案十分复杂, 在此不予细述.

2 各种模式对我国山岳冰川的适用性分析

2.1 模式的适用条件

上述动力学模式虽然建模基础类同, 并且都适用于山岳冰川, 但在参数选取、数据处理方式、计算复杂程度以及模拟结果优劣等方面都存在着差异. 在实际预测变化时, 需对以上模式进行客观评价后择优利用. 由于数值模拟方法都存在计算过程复杂和对计算硬件要求颇高等问题^[28], 我们在此不做评述.

Nye 的频率响应模式是在对冰川运动机理的研究过程中建立起来的, 该模式理论完备、逻辑严密、条理清晰, 具有很强的理论研究价值. 如能在某一冰川上实现这一模式, 不仅能够预测这一冰川的未来的动态过程, 而且对于这条冰川的各种动力学特征, 以及与动力学理论的结合都会有一个深入

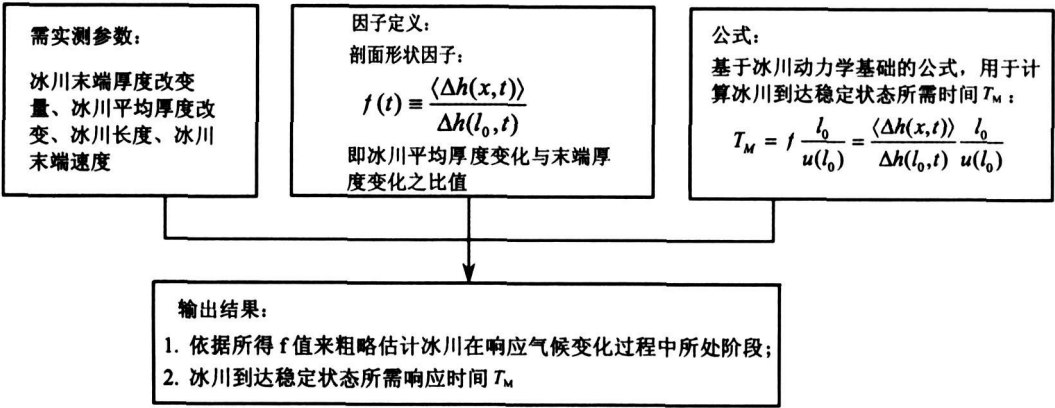


图 3 剖面形状因子模式的结构示意框图

Fig. 3 Structure of factor of profile model

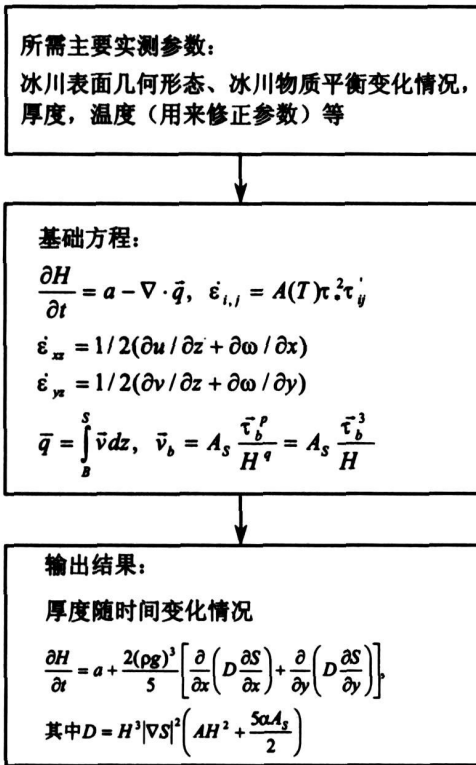


图 4 冰流模式的结构示意框图

Fig. 4 Structure of ice flow model

的了解。但是, 模式本身引入的大量冰川基本物理信息, 如冰川表面宽度、长度、坡度、速度与底面坡度等, 还有一些抽象运动参数如运动波波速与运动波扩散系数, 使得需实测项目繁多。另外, 物质平衡需至少 20 a 的观测数据, 而冰川表面速度则不少于 10 a。基于上述情况, 能够实施频率响应模式的冰川并不是很多。

剖面形状因子模式的初步模拟结果可以对冰川演化过程进行阶段性划分, 譬如若剖面形状因子接近 0.5, 则说明冰川对气候变化的响应刚刚开始, 若 < 0.1, 则此冰川已逼近它的稳定状态。而利用该模式计算响应时间时则需较多的观测资料, 包括两次冰川主流线各点厚度数据, 及 10 a 以上物质平衡资料来对结果进行修正。

冰流模式对观测参数的时间尺度和种类要求相对较少, 许多参数可以通过冰川编目和遥感技术获得。同时, 冰流模式形式灵活, 便于与物质平衡模式及其它模式的结合, 同时可以通过网格化与坐标轴补充等方式进行二维及三维扩展。对精度和力学模拟的不同要求也可以通过调整有限元划分尺度达到。它对冰川系统的模拟比较直观, 处理过程较频率响应模式简单。基于这种优点, 该模式运用广

泛, 常在面积较大和难以进行实地观测的冰川上运用。但是, 这一模式没有考虑冰川底部边界的影响, 对于跃动型冰川和坡度较大的冰川的模拟效果不好。

2.2 模式应用于单条冰川及区域尺度

山岳冰川分布广泛, 不同区域内的冰川在表面形态、基岩几何形状、温度结构与运动状况等方面都存在较大差异。各种动力学模式通常对以上特性中的一种或几种有限定或简化假设, 因此在应用时要选择与冰川的具体情况相符的模式。模拟预测结果的率定亦是单条冰川应用的重要环节, 即将预测结果与实际观测资料进行对比分析, 以进一步修正模式中经验参数, 来确定模型的可靠性。

同一区域内的不同冰川由于在相似的气候环境中, 许多动力学特征具有可比性。因此基于单条冰川的模式从理论上可以推广到流域或区域上去。而由冰川几何形态不同引起的模拟差异, 可以通过改变相应的参数来调整。这种情况下, 推广的重点在于详细研究各种参数对模型的敏感性, 尤其是动力学响应与冰川的形状等参量之间的关系。

由于动力学模式对观测资料有较高要求, 因此, 用以研究的冰川需要有基本的历史观测数据, 如冰川温度、冰川物质平衡、冰川厚度等。为选择合适的研究对象, 我们进行了前期调查研究。据统计, 在我国境内, 拥有较长物质平衡观测资料的冰川大约有 10 余条, 拥有厚度观测资料的冰川为 30 余条, 拥有各种冰温记录的冰川也在 30 条左右。基于对所有这些冰川资料的分析、代表性和可行性研究, 我们初步断定具有基本条件并且能够开展一定验证研究的冰川在 10 条以内。而要将模拟的结果推广到区域尺度, 单条冰川不仅要有数据优势, 还必须具备一定区域代表性。

2.3 运用前景

(1) 与冰川编目资料、GIS 及遥感资料、物质平衡模式的结合。动力学模式对冰川形态变化的模拟包含两种物质变化机理, 即积累与消融造成的物质平衡变化与冰川自身运动造成的内部物质再分配。这一模式需要以物质平衡作为输入参数, 而物质平衡的观测十分困难, 因此在应用中应将物质平衡模式与动力学模式结合起来, 通过物质平衡模式来计算物质平衡值, 再利用动力学模式计算冰川对物质平衡的长期响应。未来物质平衡的预测需要以未来气候变化的结果为输入, 可以从各种气候变化情景预测中得到, 如 IPCC 评估报告等。冰川形态

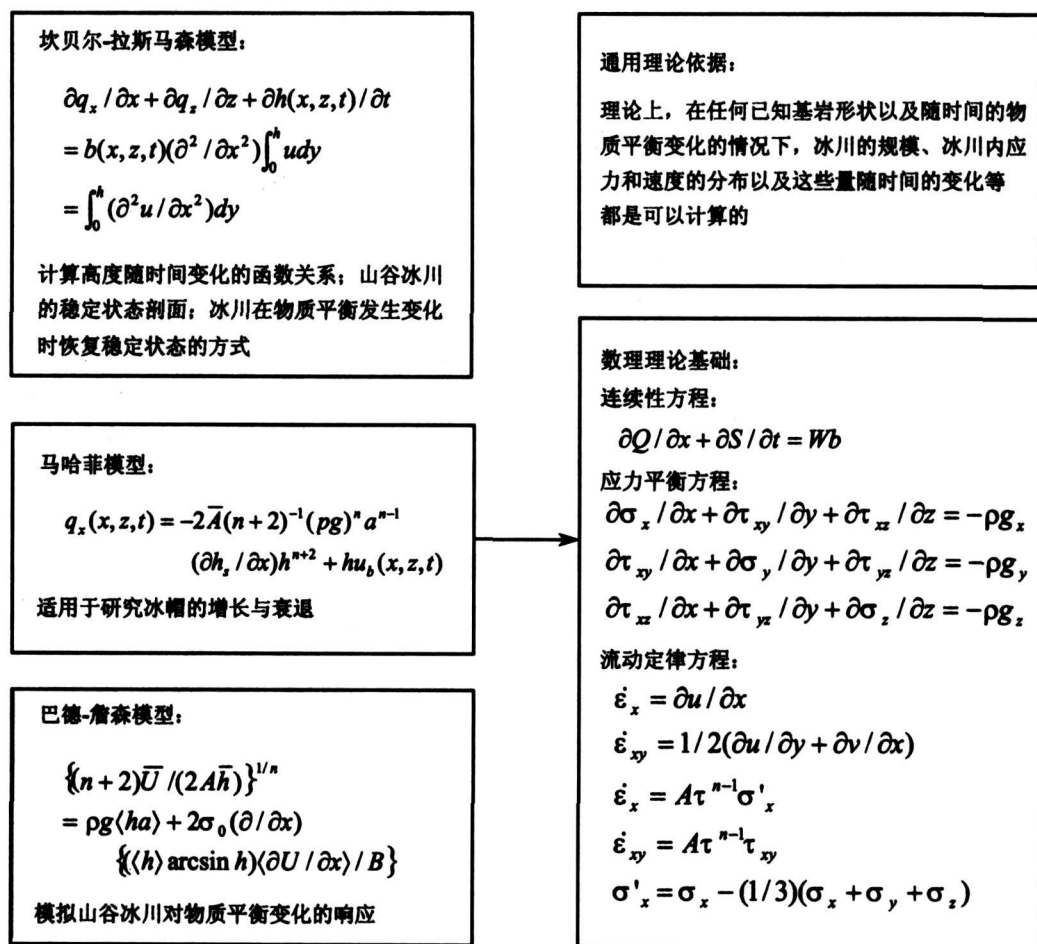


图 5 几种数值模型及其理论基础

Fig. 5 Selective numerical models and their theoretical basis

参数也可以从冰川编目资料和各类遥感资料中获取, 以减少模式对实测资料的依赖。

(2) 在水资源预测中的运用. 在单条冰川上建立动力学预测模式, 对输入条件、预测结果好坏以及适用性进行深入分析, 在此基础上筛选、提炼并最终抽象出适合于区域尺度的冰川动力学模式, 同时选择数条冰川进行验证研究, 便可以此开展流域和区域尺度冰川规模(冰川水资源)长期变化的预测研究。

3 模式在 1 号冰川上的运用实例

天山乌鲁木齐河源 1 号冰川是我国惟一具有近 50 a 观测历史的冰川, 各种观测资料齐备. 该冰川变化的动力学预测在 20 世纪 80 年代就有过一些尝试. 曹梅盛等^[24]依据 Nye^[8]的假设, 利用统计相关方法计算出冰川最终达到稳定状态时的纵向剖面参数, 预测届时 1 号冰川面积与体积分别为 1980 年的 86.3% 与 60.5%, 并且形态上分为两支^[24]. 1

号冰川于 1993 年分裂为东西两支, 部分证实了这一预测结果的正确性. 王文梯等^[23]依据 Nye^[9]的频率响应理论对冰川进行了预测, 结果表明: 2006 年左右, 冰川可能有近 30 a 来最大幅度的退缩; 从 1981 年到稳定状态, 1 号冰川的总后退幅度将达 388 m, 冰川约缩短 14%, 持续后退时间长达 84.5 a.

近期我们针对 1 号冰川进行了基于剖面形状因子模式、频率响应模式及冰流模式的变化预测研究. 详细的模拟过程将另行专门陈述, 在此仅将前两种模式的模拟结果做一简单介绍。

3.1 剖面形状因子模式研究

剖面形状因子的含义是冰川纵剖面上平均厚度变化与末端厚度变化的比值. 在冰川运动波理论中, 冰川对气候变化的响应首先从冰川中上部开始, 随后向冰川下游传递. 于是中上部的厚度变化率先开始, 而后下游的变化才逐渐加强. 进行到响应的最后阶段, 冰川中上部不再变化, 末段变化尤

为剧烈,而后冰川达到稳定状态^[28]。依此理论,剖面形状因子可以反应冰川不同部分的厚度变化情况,因此对冰川响应过程具有指示能力。在利用剖面形状因子时,冰川学家作了两种理想假设:1)假设理想冰川几何形态为规则三角形;2)冰川在响应之初剖面形状因子为0.5。在这两种假设下,冰川的响应过程越是趋后,末端厚度变化幅度(因子的分母)就越大,剖面形状因子的绝对值就越小。

本计算中我们采用1970—1990年的物质平衡资料,厚度变化取1980年与2001年两次厚度测量数据之差,主流线长度资料则依据1981年1号冰川地形图获得。结果显示,1980年时剖面形状因子为0.41,比较接近0.5,说明当时1号冰川对物质平衡的响应仍在初期阶段,要达到稳定状态仍需110a左右的时间(2090年)。2006年,我们再一次测定了1号冰川的厚度,因此可以利用这一资料计算出新的结果。

3.2 频率响应模式研究

采用频率响应模式对1号冰川预测,计算中物质平衡与厚度变化资料的选取均与剖面形状因子模式相同,表面流速取1975—1985年的观测资料,表面形态则依据1981年1号冰川地形图获得。

模拟结果表明,在20世纪80年代,1号冰川末端厚度的变化幅度相对较小,仅为物质平衡变化幅度的两倍多,1号冰川处于响应的初级阶段。如果维持当时物质平衡条件不变的情况下,1号冰川将在2110年(130a)达到稳定状态,届时净物质平衡为零,冰川几何状态不再发生变化。我们同时估算了1号冰川到达稳定状态时的物质平衡,并在此基础上推算了1号冰川在响应过程中的退缩幅度大约在400m以上。

分析两种模式的计算结果,虽然之间有20a的差异,但都反映1号冰川对物质平衡的响应过程长达百年。以上的研究,仅仅是对1号冰川响应时间和在冰川出现稳定状态的假设前提下的初步预测(这种稳定状态很难出现),旨在提供未来冰川变化的某些基本特征,对于未来冰川动态变化过程的预测,仍在进行当中。

4 结论

全球变暖导致的冰川加速消融,为冰川及冰川水资源未来变化预测提出了新的挑战。冰川动力学模式在机理上考虑了冰川对气候的各种响应,可以较为准确地预测冰川长期动态变化,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,是一个较为理想的解决方案。具有广泛的运用前景。

然而,受观测资料的制约,这项研究在我国则刚刚起步,满足研究条件的冰川很少。为使研究走向深入,我们认为应该:1)加强对冰川物质平衡的长期观测,并且通过物质平衡模式,延长现有冰川物质平衡资料;2)开展以冰川形状、温度、厚度等变化为主的冰川物理学观测,充分利用冰川编目资料、GIS及遥感资料,以满足模式所需参数;3)在不同类型的冰川上建立冰川物理学观测体系,研究其动力学特征,最终实现通过单条冰川的模拟解决流域甚至区域冰川预测问题;4)发展这项研究所需的各种软、硬件条件。

参考文献(References):

- [1] Dyurgerov M B, Meier M F. Twentieth century climate change: evidence from small glacier [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2000, **97**(4): 1406—1411.
- [2] Haeberli W, Barry R, Cihlar J. Glacier monitoring within the Global Climate Observing System [J]. *Annals of Glaciology*, 2000, **31**: 241—246.
- [3] National Research Council. Decade-to-Century-Scale Climate Variability and Change: A Science Strategy [M]. Washington D C: National Academy Press, 1998.
- [4] Thompson L G, Mosley-Thompson E, Davis M E, *et al.* Recent warming: Ice core evidence from tropical ice cores with emphasis upon central Asia [J]. *Global and Planetary Change*, 1993, **7**: 145—156.
- [5] Haeberli W, Holzhauser H. Alpine glacier mass changes during the past two millennia [J]. *Pages News*, 2003, **1**/11: 13—15.
- [6] Nye J F. On the theory of the advance and retreat of glaciers [J]. *Geophysical Journal of Royal Astronomical Society*, 1963, **7**(4): 431—456.
- [7] Nye J F. The response of a glacier to changes in the rate of nourishment and wastage [J]. *Proceedings of the Royal Society of London (Series A): Mathematical and Physical Sciences*, 1963, **275**(1360): 87—112.
- [8] Nye J F. The response of glacier and ice sheets to seasonal and climate changes [J]. *Proceedings of the Royal Society (Series A)*, 1960, **256**(1287): 559—584.
- [9] Nye J F. A numerical method of interring the budget history of a glacier from its advance and retreat [J]. *Journal of Glaciology*, 1965, **5**(41): 589—607.
- [10] Nye J F. The frequency response of glacier [J]. *Journal of Glaciology*, 1965, **5**(41): 567—587.
- [11] Jóhannesson T, Raymond C, Waddington E. Time-scale for adjustment of glaciers to change in mass balance [J]. *Journal of Glaciology*, 1989, **35**(121): 355—369.
- [12] Oerlemans J. A model of the Antarctic ice sheet [J]. *Nature*, 1982, **297**(5967): 550—553.
- [13] Oerlemans J. Response of the Antarctic ice sheet to a climatic

- warming: a model study [J]. *Journal of Climate*, 1982, **2**: 1—11.
- [14] Janssen D. A three-dimensional polar ice sheet model [J]. *Journal of Glaciology*, 1977, **18**(80): 373—389.
- [15] Mahaffy M A W. A three—dimensional numerical model of ice sheets: tests on the Barnes ice cap, Northwest Territories [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1976, **81**(6): 1059—1066.
- [16] Huybrechts P. A 3-D model for the Antarctic ice sheet: a sensitivity study on the glacial interglacial contrast [J]. *Climate Dynamics*, 1990, **5**: 79—92.
- [17] Huybrechts P. Sea-level changes at the LGM from ice-dynamic reconstructions of the Greenland and Antarctic ice sheets during the glacial cycles [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2002, **21**(13): 203—231.
- [18] Huybrechts P, Le Meur E. Predicted present-day evolution patterns of ice thickness and bedrock elevation over Greenland and Antarctica [J]. *Polar Research*, 1999, **18**(2): 299—308.
- [19] Huybrechts P, Oerlemans J. Response of the Antarctic ice sheet to future greenhouse warming [J]. *Climate Dynamics*, 1990, **5**: 93—102.
- [20] Aðalgeirsdóttir G, Guðmundsson G H, Björnsson H. Volume sensitivity of Vatnajökull Ice Cap, Iceland, to perturbations in equilibrium line altitude [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, **110**, F04001, doi: 10.1029/2005JF000289.
- [21] Aðalgeirsdóttir G, Jóhannesson T, Björnsson H, *et al.* The response of Hofsjökull and southern Vatnajökull, Iceland, to climate change [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, **111**, F03001, doi: 10.1029/2005JF000388.
- [22] Le Meur E, Vincent C. A two-dimensional shallow ice-flow model of Glacier de Saint-Sorlin, France [J]. *Journal of Glaciology*, 2003, **49**(167): 527—538.
- [23] Wang Wenti, Liu Zongxiang. Analysis of the frequency response behaviour of the Glacier No. 1 at the Ürümqi River Headwaters, Tianshan [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1984, **6**(4): 13—24. [王文梯 刘宗香. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川频率响应特性的计算与分析 [J]. *冰川冻土*, 1984, **6**(4): 13—24.]
- [24] Cao Meisheng, Meier M F. Calculation of glacial longitudinal sections under stable conditions——Glacier No. 1 at the headwater of the Ürümqi River, Tianshan Mt. as an example [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1987, **9**(2): 131—138. [曹梅盛, M. F. 迈耶. 稳定状态下冰川纵向断面计算——以天山乌鲁木齐河源 1 号冰川为例 [J]. *冰川冻土*, 1987, **9**(2): 131—138.]
- [25] Ye Baisheng, Ding Yongjian, Liu Fengjing, *et al.* Responses of various-sized alpine glaciers and runoff to climatic change [J]. *Journal of Glaciology*, 2003, **49**(164): 1—7.
- [26] Li Zhongqin, Han Tianding, Jing Zhefan, *et al.* A summary of 40—year observed variation facts of climate and Glacier No. 1 at the headwaters of Ürümqi River, Tianshan, China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, **25**(2): 117—123. [李忠勤, 韩添丁, 井哲帆, 等. 乌鲁木齐河源区气候变化和 1 号冰川 40a 观测事实 [J]. *冰川冻土*, 2003, **25**(2): 117—123.]
- [27] Yao Tandong, Liu Shiyin, Pu Jianchen, *et al.* Recent glacial retreat in high—Asia in China and its impact on water resources in Northwest China [J]. *Science in China (Series D)*, 2004, **34**(6): 535—543. [姚檀栋, 刘时银, 蒲建辰, 等. 高亚洲冰川的近期退缩及其对西北水资源的影响 [J]. *中国科学(D 辑)*, 2004, **34**(6): 535—543.]
- [28] Paterson W S B. *The Physics of Glaciers*(3rd edition) [M]. Oxford: Pergamon Press, 1994.

Glacier Dynamic Models and Their Applicability for the Glaciers in China

LI Hui-lin, LI Zhong-qin, SHEN Yong-ping, WANG Fei-teng, WANG Wen-bin

(Key Laboratory of Cryosphere and Environment / Tianshan Glaciological Station, CAREERI, CAS, Lanzhou Gansu 730000, China)

Abstract: Alpine glaciers are sensitive to changes in temperature and precipitation. The shrinkage of alpine glaciers in the twentieth century is on a global scale. For a number of glaciers, the rate of shrinkage appears to have accelerated toward the end of the century. However, the current acceleration of glacier melting apparently has not been predicted by most glacier models. As glacier dynamic models perform satisfactorily for describing physical processes and long-term evolution of glaciers, they likely become a potential tool to reveal the current changes of Alpine glaciers. In this paper, developing history, application conditions, advantages and disadvantages of three dynamic models (frequency response model, factor of profile model,

and ice flow model) are discussed. The particular focus is on their applicability for the glaciers in China. It indicates that these models may be effective if more data, e. g. glacier mass balance, thickness, surface velocity, and temperature etc. are observed, especially on different kind of glaciers. GIS and remote sensing data can also be employed as supplementary. In addition, as a case study, different models have been applied to Glacier No. 1 at headwater of Ürümqi River for its future variation predication. The result indicates that the response time of the glacier is in a magnitude of over one hundred year. The parameter optimizing, modeling processes and all outcomes are presented and discussed in this paper.

Key words: dynamic models; prediction of glacier changes; frequency response model; factor of profile model; ice flow model