

冰川径流模型研究进展

张小咏¹, 刘耕年¹, 鞠远江², 傅海荣¹

(1. 北京大学环境学院, 北京 100871; 2. 中国矿业大学资源学院, 江苏 徐州 221008)

摘要: 介绍了国内外有关冰川径流模型研究成果。表明国际上冰川径流模型研究经历了从传统的经验统计模型到分析模型, 目前正朝着基于物理的分布式的数字水文模型发展, 对于模型机理的研究越来越接近实际。但基于物理概念性的分析模型在冰川区的应用较广, 并已发展形成较为成熟的模型, 时空分辨率更高。我国冰川区水文气象观测较晚并受条件限制, 对冰川水文模型的研究晚于国际其它一些国家。

关键词: 冰川径流; 水文模型; 研究进展

中图分类号: P334 92

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2005)04-0058-05

A Review of the Hydrological Model in the Glacierized Drainage Basin

ZHANG Xiao-yong¹, LIU Geng-nian¹, JU Yuan-jiang², FU Hai-rong¹

(1. College of Environmental Science, Peking University, Beijing 100871, China;

2. College of Resource, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China)

Abstract: The study of international glacial hydrological models show that it develops from the statistical model to analytical model, and new physically based, distributed melt and runoff models which is called numerical model have been developed for nival and glacierized catchments. The international researchers have made much work about these models, especially on physically based, conceptual runoff models. In our country, the study of glacial runoff model is later due to the late observation and limit conditions in the hydrometeorology of the high mountainous regions. The physically based on the conceptual models are not mature. The new numerical model begins to apply to the glacial region.

Key words: glacial runoff; hydrological model; research review

1 引言

在大气-海洋-冰川相互作用的问题中, 在陆地表面的水热交换研究中, 国际上已经认识到高山流域是重要的环境影响因子之一; 在目前全球气候变暖和人类影响下, 全球冰川普遍后退, 高山冰川资源和它的可能发展趋势研究是非常重要的。一些国家冰雪融水占整个河川径流的40%~70%, 我国西北内陆干旱区, 冰川径流约占出山口径流量的22%^[1], 塔里木内陆河的冰川融水补给河川径流平均可达40.3%^[2]。山地系统已是一个强烈影响区域甚至全球水文循环和热量交换, 并受到广泛关注, 建立合适的冰川-水文-气候模型已是当务之急^[3]。

纵观国内外的冰川径流资料, 其冰川水文模型的发展紧跟其它水文模型步伐, 经历了经验统计模型, 分析模型, 数值模型三个阶段。前两个模型在冰川径流方面的应用没有明显的时间上的界线, 都是发展于上个世纪70年代。到90年代初, 单纯的统计模型在冰川径流模拟中的应用已较少, 概念

性的冰川水文模型向逐渐成熟化发展, 并重视冰川径流形成的物理过程。由于地理信息系统(GIS)和遥感科学的发展, 直到90年代末, Arnold^[4]才把数字模型主要指分布式水文模型, 应用到冰川水文学的研究中, 它能够真实地描述和科学地揭示冰川区内水文循环的时空变化过程, 并容易和大气环流模型GCM嵌套, 把冰川径流的模拟研究推向一个新的发展方向。

2 统计模型

统计模型是传统的数理模拟方法, 早在20世纪70年代它就被用于冰川径流与气象要素关系的拟合研究中^[5], 由于不考虑形成冰川径流的物理, 使用参数少, 计算简单, 直到20世纪90年代在一些冰川径流模拟中仍较为广泛的使用^[6, 7]。

对冰川径流的研究首先要考虑的一个重要因子就是冰川消融量。冰川上的平衡线高度是一个重要界线, 在这个高度上的积累等于消融, 而消融又与气温密切相关。因此, 早在

* 收稿日期: 2005-04-26

基金项目: 国家自然科学基金资助(90102016)

作者简介: 张小咏(1976-), 女, 博士研究生, 地貌与环境演化专业。

1924 年阿尔曼^[18]利用平衡线高度处消融与气温关系特点来推算冰川消融值。后来, 苏联冰川学家又进一步发展了这一理论。库达科夫和克伦克^[9, 10]建立的公式为:

$$A = (T_{VI-VIII} + 9.5)^3$$

科特莱科夫与克伦克^[11]提出的公式为:

$$A = 1.33(T_{VI-VIII} + 9.5)^{2.85}$$

刘潮海等^[12]根据库达科夫等人的思路, 利用天山山区气象站和冰川目录资料, 建立了平衡线高度处年消融量 (A) 的经验公式:

$$A = 0.78(T + 9.0)^{3.09}$$

式中: A —— 冰川平衡线处的年平均消融深; $T_{VI-VIII}$ —— 年消融季 (6~8 月) 平均气温。两公式为纯粹的统计公式, 不适宜直接应用到其它冰川区。

康尔泗^[13]对乌鲁木齐河源冰川物质平衡季节变化和总消融海拔分布研究中, 计算了冰川融水量随海拔分布。发现冰川平衡线、平均消融线和平均海拔线相互接近。也认为平衡线可作为估算冰川融水量的一个标准位置。然而, 这种方法表示的一种平均状态, 忽略了冰川消融强度随高度的变化。但对于粗略, 简单的估算仍不失为好的方法。基于在高山区冰川区观测资料少, 路传琳^[14]对冰川消融深与不同高度带的气温进行比较, 发现冰川消融深与冰川上气温的关系最密切, 而冰川径流与冰川附近高山站处气温关系最密切。在缺乏高山站气温资料时, 可采用相应于冰川末端高空气温资料代替。

随着观测实验资料的积累, 较多应用了各种统计模型和随机模型, 如时间系列分析^[15, 16]和复回归模型等。通过分析, 叶佰生引用消融强度函数方法考虑了冰川面积和冰川消融强度随高度变化这一特征, 使对冰川径流的估算比以往合理^[17]。目前, 统计模型已用到冰川系统径流估算中, Kotlyakov et al 根据不同气候条件下数十条冰川上的观测资料推出冰川上夏季平均气温 t_s 与冰川年消融 a 的关系模式: $a = 1.33(9.66 + t_s)^{2.85}$, 该公式被称为“全球公式”。谢自楚^[18]用此公式对西藏南部冰川系统径流进行了计算。

3 分析模型

在分析模型研究方面, 自 70 年代以来, 考虑流域物理过程的概念性水文模型得到广泛的应用^[19, 20]。该种模型基于水量和能量平衡原理, 对流域的产流和汇流的物理过程进行参数化处理, 具有较明确的物理概念。自 80 年代以来, 该种模型便用于不同气候变化情景条件下流域径流响应过程的研究, 其中包括水量平衡模型和概念性水文模型。但目前单纯应用水量平衡研究冰川区的径流较少, 常常是把水量平衡的思想渗透到其它模型的研究中。

在我国, 水量平衡模型在冰川区的应用源于赖祖铭等^[21]根据高寒山区特点专门设计的一种以月为时间步长的模型, 它主要考虑了高寒山区流域内分布的现代冰川、积雪、多年冻土和季节冻土对径流的形成和调节作用各不相同这一特点。依据流域的这些特性, 将整个流域按高度分成冰川区、多年冻土区和季节冻土区三个子流域, 同时计算各区的平均高度和相应的面积。其中, 蒸发力是依据高桥浩一郎的方法, 由月平均气温和月降水量计算; 冰川径流由冰川模型

计算, 冰川径流的估算是将冰川沿高度分带, 分别计算其径流, 并考虑到了冰川消融强度随高度的变化。其水量平衡的基本表达式为:

$$\pm M_B = P - R - E$$

$$R = R_r + R_s + R_i$$

式中: M_B —— 冰川物质平衡; P —— 降水量; R —— 冰川区径流; E —— 蒸发量; R_r —— 降雨径流; R_s —— 融雪径流; R_i —— 融水径流。

用此模型对乌鲁木齐河流域模拟, 研究了不同假设气候变化情景条件下的径流响应过程, 其结果表明模型具有一定的适应能力。该模型又于 1996 年^[22]对天山伊犁河上游冰川流域进行模拟, 模型的率定和检验也表明了其具有一定的适应能力。目前在我国冰川区单纯用这类模型也较少, 而是向较为成熟的概念性水文模型方向发展。

概念性模型是以水文现象的物理概念作为基础进行模拟的, 它是利用一些简单的物理概念 (如下渗、蓄水公式等, 或有物理意义的结构单元, 如线性水库、线性水渠道等) 对复杂的水文现象进行概化, 然后建立水文模型。该类模型可以模拟水循环的整个系统, 如流域水文模型; 也可以模拟水循环的某个环节, 如产流模型、汇流模型、蒸发模型、土壤水模型、地下水模型、冰雪融水模型等。概念性水文模型具有集总模型 (Lumped model) 和分散模型 (Distributed model) 或分块模型之分。集总模型忽略了各部分流域特征参数在空间上的变化, 把全流域作为一个整体而建立的模型。分散模型按流域各处冰川、土壤、植被、土地利用和降水等的不同, 将流域划分为若干个水文单元, 在每一个单元上以一组参数 (冰川面积、坡度、冰雪下渗、融水的再冻结等) 表示该部分流域的种种自然地理特征, 然后通过径流演算而得到全流域的总输出。

该模型起源于瑞典水文气象研究所 HBV 水文模型^[23]。模型已适应各种不同要求被应用到许多国家, 包括水库管理、洪水预测和气候变化下的水文响应。在世界的许多地区冰川对盆地径流有重大影响。概念性水文模型应用到冰川流域需要解释冰川对其的影响, 包括粒雪和冰产生的融水, 它们与季节性积雪相比融化率的不同及液态水在冰川流域系统的路线。早在 1979 年该模型就被应用到冰川区径流的研究中。Moore^[24]对加拿大的一个冰川区水文模拟是一个较为典型的概念性水文模型结构, 基本结构如图 1。

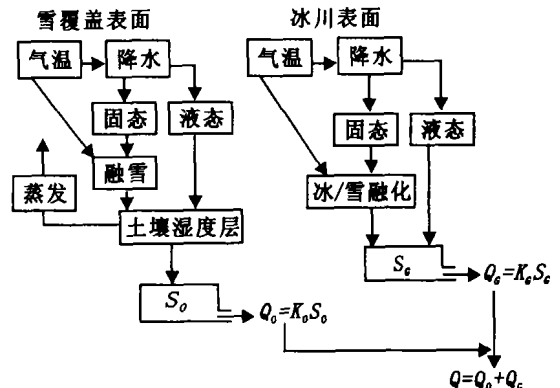


图 1 冰川区概念性水文模型结构图

模型把流域分成若干高度带, 每个高度带按冰川区和非冰川区分别处理, 基本输入为以日为时间步长每一高度带的

平均气温和降水, 输出为冰川区的径流量和蒸发量。其模拟计算步骤如下:

(1) 水量的输入计算。包括冰川融化、固态降水的分离、雪的积累和融化。冰川积雪融化量和液态水量合计为流域的水量输入。

降水类型: 考虑到了临界温度 T_0 ,

$$T > T_0 \quad F = C_f (T - T_0)$$

$$T < T_0 \quad M = C_m (T - T_0)$$

冰融化量计算: 在冰川上的积雪完全融化的情况下, 出现了冰的融化。

$$M_i = r C_m (T - T_0)$$

式中: F ——再冻结水; C_f ——再冻结系数; T ——高度带平均温度; T_0 ——临界温度; M ——融雪量; C_m ——融雪系数; M_i ——融冰量; r ——调整系数。

(2) 积雪层和土壤湿度层水量的计算。把各高度带的雨雪通过渗透流到冰川表面或土壤湿度层的水定义为 WR (mm)。应用HBV 径流模型中的土壤湿度层的概念, 将表面和表面以下, 多年冻土活动层或潜水面以上这一层统称为土壤湿度层, 通过土壤湿度层的水形成的径流定义为 RO , 计算公式为:

$$RO = \begin{cases} WR (SM / FC)^\beta & SM < FC \\ WR & SM \geq FC \end{cases}$$

式中: SM ——高度带上的土壤层最蓄水量; FC ——流域内土壤层的蓄水能力; β ——校准参数。

(3) 蒸发的计算, 这里只考虑了非冰川区积雪完全融化后土壤表面的蒸发。

$$E_p = \begin{cases} E (SM / L_p) & SM < L_p \\ E_p & SM \geq L_p \end{cases}$$

式中: E_p ——土壤表面蒸发量; L_p ——在蒸发有限的情况下土壤的蓄水量。

(4) 径流的计算。将每日来自土壤湿度带上的径流视为进入一个线性水库, 这个线性水库控制着非冰区流域的流出; 来自冰川区上的水的排泄也是把所有高度带上的水量汇总到一个叫冰川水库内, 从这个水库中流出的水量按下式计算:

$$Q_G = K_G S_G$$

式中: Q_G ——冰川区内的径流量; K_G ——冰川水库内液态水的存储量; S_G ——出流系数。

以上是Moore^[24]总结前人对概念性水文模型应用的基础上, 对传统的概念性水文模型进行了小的修改, 考虑到了冰川系统有季节变化和年变化的特征, 并用观测到的平衡线高度来消除积累区和消融区模型参数校准的模糊性。但对于冰川径流的机理模拟仍是很模糊, 没有考虑到水的下渗, 也忽略了参数在空间上的变化(各高度带都用同一土壤湿度系数 SM / FC), 冰川末端冰碛覆盖影响冰川融化强度大小也没考虑进去, 因此它仍属于一个集总式的概念性水文模型。表1 列举了概念性水文模型在不同冰川区的研究工作, 可以看出研究流域范围的发展变化是从冰川覆盖面大的小冰川区到冰川覆盖面中等或低的冰川流域。一些模型没有把冰川径流的线路从非冰川区的径流的线路中分离出来。大多数模型把冰川流域系统看作时间系数不变的线性水库, 而没有考虑季节的变化。没有明确解释积雪、粒雪、冰影响冰面冰内冰下水的储蓄。Braun 等^[25]发现由于冰水混合的影响很难获得明确的降水数

量。认为积雪和非冰川流域的降水量低估可能会由于冰融化量的增加而补偿, 所以这种流域水平衡因子的相互错误估算导致了一个较好的模拟结果。Braun 曾试用其它的方法解决这一问题, 最终也没找到合适的办法。Aizen 等^[26]对中亚高山区河流日径流分两组模型进行了模拟, 第一组是对水量输入的估计, 第二组是线性水库模型。其实质也是一个其于物理的概念性水模型。水量输入那部分的模拟考虑到了雪水滞留, 再冻结融水量, 冰碛下冰不同于裸露冰的融化量。David^[27]把概念性线性水库径流模型应用到法国的一个冰斗冰川融水形成径流季节变化的研究中。模拟了冰川融水产生、存储、流路和排泄过程, 用了一些常用的模拟要素, 像线性水库的一些经验性的水文回归分析, 并在以下几个方面有所突破: 把降水作为流域的水文输入, 水库的储蓄系数有季节变化, 对冰雪表面观测更详细, 时间分辨率达 15 min。

表1 概念性水文模型在冰川区应用

文献	冰川区	流域面积/km ²	冰川覆盖面积/%
Power and Young (1979)	Peyto, Canada	22 8	59
Gottlieb (1980)	Peyto, Canada	22 8	59
Baker et al (1982)	Vernagtferner, Austria	11 4	82
Lundquist (1982)	Nigardsbreen Norway	66	74
Tangborn (1984)	Forrest Kerr Creek, Canada	286	67
Pena and Nazaro la (1987)	Maipo River, Chile	5000	7
Braun and Aellen (1990)	Massa (Alesch glacier) Switzerland	195	66
Morre (1993)	Lilboet River, Canada	2160	17
Hartman (1999)			
David (2001)	Pyrenees, French	36 5	64 1
康尔泗等(1999)(2002)	黑河山区, 中国	10009	0 59

从以上对文献的总结可以看出国际上对概念性水文模型在冰川区的应用已向基于物理的概念性水文模型发展, 趋于成熟化。在我国, 20 世纪 80 年代初, 国家要对中国水资源现状进行综合评价, 中国科学院兰州冰川冻土研究所负责对中国冰川水资源研究, 杨针娘^[28, 1]使用径流模数外推法实质上就是对我国集总式概念水文模型研究的开始。冰川径流模数法, 是对有观测资料冰川的冰川径流资料进行分析得出冰川的产流能力, 将其运用到整个流域按冰川面积放大, 对于不同地区, 不同形态冰川进行一些修证^[29], 其优点是简单, 但由于其集总式的计算整个冰川径流, 就没有考虑冰川面积和消融强度随高度的变化规律, 按各高度将冰川面积分得到流域的冰川径流。基于物理概念性水文模型在国际上研究较为成熟时, 康尔泗等^[30, 31](1999, 2002)应用此模型对我国黑河山区的径流进行了模拟, 而对于其冰川区的融水径流在模型中也是按高度进行分带, 考虑到了固态降水的分离, 但由于条件限制, 对于径流形成的物理机制考虑仍是不够全面, 像没有把下渗、融水的再冻结等考虑为成为径流形成的影响因子。所以说, 我国概念性水文模型在冰川区的研究还处于初级阶段。

4 数字模型

数字模型目前主要研究是基于物理的分布式水文模型。

早在20世纪70年代,国外就开始了分布型水文模型的研究,1969年Freeze和Harlan发表了《一个具有物理基础数值模拟的水文响应模型的蓝图》的文章,标志着分布式水文模型的萌芽。由丹麦、法国及英国的水文学家研制与改进的SHE模型(System Hydrologic European)是最早为人所知的一个典型的分布式水文模型,是它致力于模拟水文循环的所有重要环节。目前代表性的其它模型还有IHDM模型,SWAT模型。但其长足的进步和广泛的研制和应用,只能在计算机技术、地理信息系统技术、遥感技术、雷达测雨技术和水文理论有了进一步发展的今天。

基于物理的分布式水文模型充分考虑流域下垫面空间分布不均对水文循环的影响。在水平方向上将流域分成许多网格和子流域(一般基于DEM),在垂直方向上将土壤分层,并依据流域产汇流的特性,使用一些物理的、水力学的微分方程(连续方程与动量方程)求解径流的时空变化。与传统的流域概念性集总水文模型相比具有以下显著的优点:(1)具有物理机理,能描述流域内水文循环的时空变化过程;(2)其分布式结构,容易与GCM嵌套,研究自然和气候变化对水文循环的影响;(3)由于建立在数字高程模型(DEM)基础上,所以能及时模拟人类活动和下垫面因素变化对流域水文循环过程的影响。

这种基于物理的分布式特性是一般水文学的共同特征。近年来,现存的基于降水径流的物理模型^[32]和TOPMODE^[33]已经被用于包括概念性的融雪成分的大的积雪流域^[34,35]。新的基于物理的分布式的水文模型在积雪覆盖地^[36,37]也已经被发展起来。然而直到1998年,英国人Arnold等^[4]才利用这种基于物理的分布式的水文模型对瑞士的一个山谷冰川进行模拟,预测了冰川径流并考察了冰川内部流域系统的特征,从而把分布式水文模型应用到冰川水文的研究中。Ian C. et al^[38]基于上文同一地区进一步发展检验这种模型。

在我国分布式水文模型的研制方面起步较晚,目前还没有比较成熟或者得到国际上普遍认可的分布式水文模型。而把分布式水文模型应用到冰川区的研究则更晚。只有董增川等尝试用基于DEM分布式冰雪融水-雨水混合水文模型,根据乌鲁木齐河山区流域冰雪融水和雨水混合补给的特性^[1]使流域水文过程独具特色:(1)气温在水文过程中起着重要作用;(2)高程决定着气温、降水、蒸发等主要水文因素的分布;(3)流域面上产流类型的不均匀分布,除了与高程有

关外,还与有无冰川积雪覆盖有关。这些特点要求在冰川流域水文过程的模拟中采用分布式的水文模型,即考虑流域内不同空间位置上的不同情况,采用不同的计算方法、不同参数、不同的输入变量等。

5 结 论

冰川径流模型是在水文模型基础上发展起来的。其发展大体上经历了从传统的统计学到包括水量平衡和概念性的水文模型的分析模型,并已发展成为预测具体流域的流出。近年,Arnold et al^[4]报导了一个基于物理的分布式的模型在瑞士Haut冰川区的初步结果,预测了冰川径流而且检查冰川内部系统的特征,标志着冰川水文模型的研究已向基于物理过程的方向发展。

目前,单纯的传统的统计模型不考虑冰川径流形成的物理过程而在冰川区的应用已较少,但其考虑参数少,模型简单,使用起来方便,在一些冰川径流的估算中仍使用。考虑流域物理过程的概念性水文模型得到广泛的应用^[19,20]。该种模型基于水量和能量平衡原理,对流域的产流和汇流的物理过程进行参数化处理,具有较明确的物理概念。自80年代以来,适用于不同气候变化情景条件下流域径流响应过程的研究,其中包括水量平衡模型和概念性水文模型。我国已在一些典型流域应用水量平衡模型研究了不同假设气候变化情景条件下的径流响应过程^[21]。然而,概念性水文模型是把流域作为一个整体来研究,故势必忽略了降水及冰雪融水在冰川表面、冰内、冰下呈现空间分布不均匀的事实,只能给出空间均化的模拟结果。这样必然使得集总式水文模型的结构和参数的物理意义模糊不清,使其在模拟流域水文过程时存在较大的局限性。分布式水文模型,尤其是具有物理基础的分布式冰川水文模型,由于它们明显优于传统的集总式水文模型,能为真实地描述和科学地揭示现实世界的冰雪径流形成机理提供有力工具,因此是一种发展前景看好的新一代水文模型。由于其在冰川区的应用由于受到气候-冰川水文过程认识水平的限制,目前在外国是处于研究的初级阶段,我国也是正在探索中。但在本文所讲的三类模型中,第一类是用传统的统计学方法建立的模型,第三类模型目前正在进行研究,由于受到气候-水文过程认识水平等因素的限制,离实际还有相当的距离。所以目前,基于物理的概念性冰川水文模型研究较多。

参考文献

- [1] 杨针娘. 中国冰川水资源[M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1991. 1- 158
- [2] 康尔泗, 程国栋, 董增川. 中国西北干旱区冰雪水资源与出山径流[M]. 北京: 科学出版社, 2002. 17
- [3] WMO. Intercomparison of models of snowmelt runoff[R]. Operational Hydrology Report No. 23. Geneva: World Meteorological Organization, 1988
- [4] Neil Arnold, Keith Richards, Ian Willis, et al. Initial results from a distributed, physically based model of glacier hydrology[J]. Hydrology of Processes, 1998, 12: 191- 219
- [5] Lang H. Variations in the relation between discharge and meteorological elements[A]. Symposium on the hydrology of Glaciers[C]. IAHS Publication, 1973. 95: 85- 96
- [6] Kang E. Relationship between runoff and meteorological factors and its simulation in a Tianshan glacierized basin [M]. International Association of Hydrological Sciences Publication, 1991. 205: 189- 202
- [7] Willis IC, Sharp MJ, Richards KS. Studies of the water balance of Mditdalsbreen[A]. Hardangerjøkulen, Norway. II Water storage and runoff prediction[M]. Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie. 1993, 27/28: 117- 138

- [8] Ahlman, H W. Le niveau deglaciation comme fonction de l'accumulation d'humidite sous forme solide[J]. Geografiska Annaler, 1924, (9): 167- 172
- [9] Khodakov V G. On the dependence of total ablation over the glacier surface on the air temperature[J]. Meteorol i Gidrol, 1965, (7): 48- 50
- [10] Krenke A N, Khodakov V G. On the relationship between the surface melting of glaciers with air temperature[J]. Materialy Glytsiologicheskikh issledovaniy, Khronika, Obsuzhdeniya, 1966, (12): 153- 164
- [11] Kotlyakov V M, Krenke, A N. Investigations of the hydrological conditions of alpine regions by glaciological methods, Hydrological Aspects of Alpine and High Mountain Areas[C]. IAHS Publication, 1982 30- 34
- [12] 刘潮海, 丁良福. 中国天山冰川区气温和降水的初步估算[J]. 冰川冻土, 1988, 10(2): 151- 158
- [13] 康尔泗, 刘潮海, 等. 乌鲁木齐河源冰川物质平衡季节变化和总消融海拔分布[J]. 冰川冻土, 1994, 16(2): 120- 126
- [14] 路传琳. 冰川消融及其径流与气温的关系[J]. 冰川冻土, 1983, 5(1): 79- 83
- [15] 宋强, 陈靖. 用时间序列模拟预报天山乌鲁木齐河源1号冰川的年径流量[J]. 冰川冻土, 1990, 12(2): 162- 165
- [16] 康尔泗, 杨新元. 乌鲁木齐河源区径流和气象要素变化关系及其模拟计算[A]. 见: 乌鲁木齐河山区水资源形成和估算[C]. 北京: 科学出版社, 1992 148- 165
- [17] 叶佰生. 乌鲁木齐河源冰川的消融强度函数[J]. 冰川冻土, 1996, 18(2): 140- 145
- [18] 谢自楚, 冯清华, 刘潮海. 冰川系统变化的模型研究—以西藏南部外流水系为例[J]. 冰川冻土, 2002, 24(1): 16- 24
- [19] WMO. Intercomparison of conceptual models used in operational hydrological forecasting[R]. Geneva: World Meteorological Organization, 1975, No. 942
- [20] WMO. Intercomparison of models of snowmelt runoff[R]. Geneva: World Meteorological Organization, 1986, No. 646
- [21] 赖祖铭, 叶佰生. 高寒山区流域的水量平衡模型及气候变暖趋势下径流的可能变化[J]. 冰川冻土, 1991, (6): 652- 658
- [22] 叶佰生, 赖祖铭, 施雅风. 气候变化对天山伊犁河上游河川径流的影响[J]. 冰川冻土, 1996, 18(1): 30- 35
- [23] Bergstrom S. Development and Application of a Conceptual Runoff model for Scandinavian Catchments[C]. Bulletin Series A. No 52, Lund: Lund University, 1975 12- 83
- [24] R D Moore. Application of a conceptual streamflow model in a glacierized drainage basin[J]. Journal of Hydrology, 1993, 150: 151- 168
- [25] Braun, L N, Allen, M. Modeling discharge of glacierized basins assisted by direct measures of glacier mass balance[A]. Hydrology in Mountainous Regions Hydrological Measurements; the Water Cycle, Proc of two Lausanne Symp[C]. IAHS: IAHS Publ, 1990, 193: 99- 106
- [26] V Aizen, et al. Simulation of daily runoff in Central Asian alpine watersheds[J]. Journal of Hydrology, 2000, 238: 15- 34
- [27] David M Hannah, et al. A conceptual, linear reservoir runoff model to investigate melt season changes in cirque glacier hydrology[J]. Journal of Hydrology, 2001, 246: 123- 141
- [28] 杨针娘. 中国现代冰川作用区径流的基本特征[J]. 中国科学, 1981, 4: 468- 476
- [29] 杨针娘. 祁连山冰川水资源. 冰川冻土[J], 1988, 10(1): 37- 45
- [30] 康尔泗, 等. 西北干旱内陆河流域出山径流变化趋势对气候变化响应模型[J]. 中国科学(D)增刊, 1999, 29: 48- 53
- [31] 康尔泗, 等. 概念性水文模型在出山径流预报中的应用[J]. 地球科学进展, 2002, 17(1): 19- 25
- [32] Abbott M B, Bathurst J C, Cunge J A, et al. An introduction to the European Hydrological System/Système Hydrologique Européen, "SHE": 2. Structure of a physically-based, distributed modelling system [J]. Journal of Hydrology, 1986 87(1- 2): 61- 77.
- [33] Beven K J, Lamb R, Quinn P, et al. TOPMODEL [A]. In Computer Models in Watershed Hydrology [C]. Singh V P (ed.). Water Resource Publications: Highlands Ranch, 1995 627- 668
- [34] Bathurst J C, Cooley K R. Use of the SHE hydrological modelling system to investigate basin response to snowmelt at Reynolds Creek, Idaho [J]. Journal of Hydrology. 1996, 175(1- 4): 181- 211.
- [35] Boggild C E, Knudby C J, Knudsen M B, et al. Snowmelt and runoff modelling of an Arctic hydrological basin in west Greenland [J]. Hydrological Processes, 1999, 13: 1989- 2002
- [36] Blochl G, Gutknecht D, Kirnbauer R. Distributed snowmelt simulation in an alpine catchment. 1. Model evaluation on the basis of snow cover patterns [J]. Water Resources Research, 1991, 27(12): 3171- 3179
- [37] Wigmosta M S, Vail L W, Lettenmaier D P. A distributed hydrology-vegetation model for complex terrain [J]. Water Resources Research, 1994, 30(6): 1665- 1679
- [38] Ian C Willis, Neil S Arnold, Ben W Brock. Effect of snowpack removal on energy balance, melt and runoff in a small supraglacial catchment [J]. Hydrological Process, 2002, (16): 1721- 1749