

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.20180008

陈心池, 张利平, 陈少丹, 等. SRM 融雪径流模型在奎屯河流域洪水预报的应用[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(1): 50-56.  
CHEN X C, ZHANG L P, CHEN S D, et al. Snowmelt runoff model applied in Kuitun River catchment for flood forecasting[J].  
South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(1): 50-56. (in Chinese)

# SRM 融雪径流模型在奎屯河流域洪水预报的应用

陈心池<sup>1,2</sup>, 张利平<sup>1,2</sup>, 陈少丹<sup>1,2</sup>, 贾军伟<sup>3</sup>

(1. 武汉大学 水资源与水电工程国家重点实验室, 武汉 430072; 2. 水资源安全保障湖北省协同创新中心, 武汉 430072;  
3. 吉林省电力勘测设计院, 长春 130000)

**摘要:** 我国中小河流域防洪标准普遍偏低, 急需加强洪水预报工作, 特别是在站点稀少, 资料匮乏的高寒山区, 由融雪产生的径流与由降水产生的径流难以区分, 加大了洪水预报工作难度。SRM 融雪径流模型是专门解决这个问题水文模型, 它对于山区流域融雪径流预报和模拟研究起着非常重要的作用。基于 SRM 融雪径流模型, 以新疆地区典型山区中小河流域奎屯河为例, 通过 MODIS 遥感数据提取流域积雪覆盖率, 并结合气象台站数据, 对研究区进行水文模拟, 研究结果认为: 融雪径流模型能够很好的模拟奎屯河流域的径流过程, 率定期与验证期 Nash 效率系数都达到了 0.7 以上, 说明融雪径流模型能够适用于奎屯河流域的洪水预报, 对高寒山区中小河流域防洪预警具有一定的指导意义。

**关键词:** 融雪径流模型; MODIS 遥感数据; 奎屯河流域; 洪水预报

**中图分类号:** P333 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2018)01-0050-07

## Snowmelt runoff model applied in Kuitun River catchment for flood forecasting

CHEN Xinchu<sup>1,2</sup>, ZHANG Liping<sup>1,2</sup>, CHEN Shaodan<sup>1,2</sup>, JIA Junwei<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Hubei Collaborative Innovation Center for Water Resources Security, Wuhan 430072, China;  
3. Jilin Electric Power Survey and Design Institute, Changchun 130000, China)

**Abstract:** The medium and small rivers in China generally have low flood control standards and urgently need strengthened flood forecasting, especially in high cold mountainous areas with insufficient stations and data, where it is difficult to distinguish the runoff produced by snowmelt from that by precipitation, which enhances the difficulty of flood forecasting. Snowmelt Runoff Model (SRM) is a hydrological model for simulating and forecasting the snowmelt runoff in mountainous watersheds. It plays an important role in the study of mountainous watersheds with snowmelt and precipitation as the main runoff sources. Based on SRM and taking Kuitun River as a typical case of medium and small rivers in high cold mountainous areas of Xinjiang, we simulated the daily runoff of the catchment by extracting the snow cover rate through MODIS remote sensing data and collecting meteorological data. The results showed that the snowmelt runoff model could well simulate the runoff process of Kuitun River catchment, and its Nash efficiency coefficients in both calibration and validation periods exceeded 0.7, which means that the snowmelt runoff model can be applied to flood forecasting in Kuitun River. The model has some guiding significance for the flood prevention and early warning in medium and small river catchments of high cold mountainous areas.

**Key words:** snowmelt runoff model; MODIS remote sensing data; Kuitun river catchment; flood forecasting

高山融雪是我国西北干旱地区径流的重要补给来源, 是地区绿洲农业和社会经济的重要支撑, 对当

收稿日期: 2017-03-11 修回日期: 2017-06-11 网络出版时间: 2018-01-12  
网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180111.1330.014.html>  
基金项目: 国家自然科学基金项目(51339004; 51279139)

Funds: National Natural Science Foundation of China (51339004; 51279139)

作者简介: 陈心池(1989-), 男, 湖北天门人, 博士研究生, 主要从事水文水资源方面研究。E-mail: stephencu@outlook.com

通讯作者: 张利平(1971-), 男, 湖北黄冈人, 教授, 主要从事变化环境下水文水资源研究。E-mail: zhanglp@whu.edu.cn

地人们的生活和社会的发展有着决定性的影响<sup>[1,2]</sup>。然而,在高山冰雪融水补给河川径流的同时,也经常伴随着冰川融雪洪水、冰雪崩和风吹雪等一系列灾害的发生,这些灾害严重威胁着当地居民的正常生活以及重要国防干线的安全运营。特别是在中小河流频繁出现的洪水灾害,发生频率高,形成过程复杂,引起的破坏十分严重<sup>[3]</sup>。针对我国中小河流洪水问题,国家也出台了一系列解决此类洪水灾害问题的政策法规<sup>[4]</sup>,对于西北干旱地区中小河流的洪水灾害的处理则存在着一定的不足,对高寒山区河流径流预报工作填补了此类地区中小河流防洪工作的不足,提升了区域预警预告水平和洪水预报效率。

对于有积雪覆盖的流域进行径流预报,积雪消融模型非常重要,尤其在山区地貌中,冰雪对流域水文过程的影响非常明显。解决此问题最常用的是 Martinec 建立的 SRM (Snowmelt Runoff Model) 融雪径流模型,此模型在山区河流模拟和预报融雪径流的研究方面是最重要的水文模型,同时也是国际气象组织建议的研究高山雪盖流域径流模拟的模型<sup>[5]</sup>。从历史研究中不难发现 SRM 模型已普遍应用于全球诸多流域<sup>[6,13]</sup>。我国在 20 世纪 80 年代才开始陆续对有融雪覆盖流域进行径流模拟研究,如冯学智等<sup>[4]</sup>利用 SRM 模型对玛纳斯河肯斯瓦特水文站春季逐日流量进行模拟,取得了较高的精度。马虹等<sup>[15]</sup>将 SRM 应用于天山西部巩乃斯河流域,验证了该模型在我国西部内陆干旱地区的良好应用前景。李宝林等<sup>[16]</sup>重点对 SRM 模型的输入参数积雪覆盖率进行研究,通过遥感数据获得受云层影响较小的长序列镶嵌影像雪盖消融曲线,增大了模型输入参数的精度。房世峰等<sup>[17]</sup>建立了基于能量平衡的栅格融雪模型、基于水量平衡的栅格产流模型以及分布式栅格汇流模型,从而形成了一个完整的能应用于实际业务的分布式融雪径流模型。李弘毅等<sup>[8]</sup>在应用模型时,重点细化了退水系数的获取。

此外,李晶<sup>[19]</sup>、怀保娟<sup>[20]</sup>、赵军<sup>[21]</sup>等人均利用 SRM 融雪径流模型在西北典型干旱内陆河流域开展了一系列的应用研究。可以看出 SRM 融雪径流模型在我国西北干旱地区得到了充分的发展和广泛的应用。

本文以典型高寒山区中小河流奎屯河为例,基于地面实测水文站点与气象站点的观测数据以及 MODIS 遥感数据,利用 SRM 融雪径流模型对将军庙水文站控制流域采用高程分带方式进行日流量径流模拟,同时利用遗传算法对模型参数进行率定,评估其在奎屯河流域的模拟预测精度,进一步说明融雪径流模型在乏资料地区进行洪水预报的可行性,进而为高寒山区中小河流的防洪措施提供准确可靠根据。

## 1 研究区概况及数据来源

### 1.1 研究区概况

奎屯河流域地理位置在新疆地区准葛尔盆地西部,源头位于依连哈比尔尕山北坡,东部与巴音沟河相接,西部与托托河流域接壤,南部与喀什河流域毗邻,北部与玛依尔力山和扎伊尔山的分水岭相接,地理坐标为东经 83°30′ - 85°08′,北纬 43°30′ - 45°0′ 之间。奎屯河上游共有冰川 209 条,总面积 201 km<sup>2</sup>,约占集水面积的 10.3%。

本文所研究的区域为奎屯河流域的高寒山区范围(本文称奎屯河),出山口控制站为将军庙水文站,测站以上的河流长 71 km,出口站控制的流域面积为 1 945 km<sup>2</sup>,多年平均径流量 6.57 亿 m<sup>3</sup>。研究区冬夏分明,夏日酷热,冬日酷寒,全地区降水量少,蒸发量大,全年空气湿度都偏低,且早晚温差比较大,1 000~ 3 500 m 的山地区域年均气温为 4℃,年降水量 400~ 500 mm,积雪厚 10~ 20 cm。奎屯河是降水与高山融雪水混合补给的河流,河川径流主要受到降水、冰川消融和季节融雪水的影响。流域基本情况如图 1 所示。

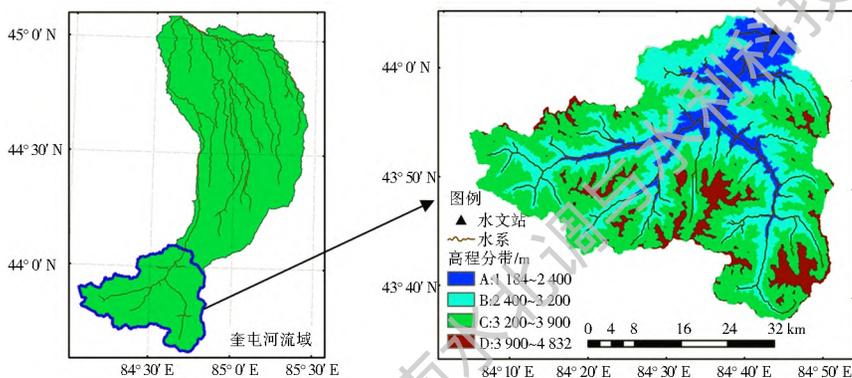


图 1 奎屯河流域与高程分带

Fig. 1 Kuitun River catchment and elevation zoning

## 1.2 数据来源

### 1.2.1 DEM数据

DEM数据来源于SRTMDEMUTM 90M分辨率数字高程数据产品,空间分辨率为 $90\text{ m} \times 90\text{ m}$ 。一般根据DEM数据,每隔500m左右对流域按高程开展分带,每层分带内选取一根等高线,此等高线需要平分其所属分带面积,将等高线的高程作为此分带的平均高程。本文基于奎屯河的特点,将流域按照高程的不同,总共分为4个高程带,具体分带情况与信息见表1和图1。

表1 奎屯河流域分带面积与平均高程

Tab. 1 Zoning area and average elevation of Kuitun River catchment

高程分带	高程范围/m	平均高程/m	分带面积/km <sup>2</sup>	温度梯度(°C)
A	1 184~ 2 400	2060.15	250.05	5.79
B	2 400~ 3 200	2847.79	647.11	10.91
C	3 200~ 3 900	3527.93	834.32	15.33
D	3 900~ 4 832	4078.62	168.51	18.91

### 1.2.2 气象水文数据

研究中所用雨量及径流数据为将军庙水文站2006年1月1日至2011年12月31日共6年逐日资料,来源于《中国水文年鉴内陆河流域(新疆卷)》,站点位于乌苏县独库公路56km处。气象资料采用邻近乌苏站观测资料,来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.nmic.cn/home.do>)地面气候资料日值数据集。

### 1.2.3 遥感数据

文中使用的MODIS数据来源于美国冰雪数据中心(National Snow and Ice Data Center)。MODIS积雪产品共包括6类子产品<sup>[22-23]</sup>,分别为MOD10A1、MOD10A2、MOD10C1、MOD10C2、MOD10\_L2、MOD10L2G。本文采用的是MOD10A2产品数据,是由连续8d逐日积雪分类产品MOD10A1影像数据合成,相比MOD10A1,减少了云层对结果的影响,确保单个影像元素内最高的积雪覆盖面积比例。时间范围为2006年1月1日至2009年12月31日,为正弦曲线投影,格网分辨率为500m。

## 2 模型原理及参数确定

### 2.1 融雪径流模型

SRM基本思想是计算每天消融和降雨分别产生的流量,将它们与前一日计算的退水流量相加,这样就得到每天的日流量,具体计算公式<sup>[24-26]</sup>如下:

$$Q_{n+1} = [C_s \cdot a \cdot (T_n + \Delta T) \cdot S_n + C_r \cdot P_n] \times \frac{A \times 10000}{86400} \cdot (1 - k_{n+1}) + Q_n \cdot k_{n+1} \quad (1)$$

式中: $Q$ 为日均流量( $\text{m}^3/\text{s}$ ); $C$ 为径流系数,其中 $C_r$ 和 $C_s$ 分别表示降雨径流系数和融雪径流系数; $a$ 为度日因子 $[\text{cm}/(\text{°C} \cdot \text{d})]$ ,其物理意义是单位度日因子的雪融化深度; $T$ 为度日因子数( $\text{°C} \cdot \text{d}$ ); $\Delta T$ 是在不同高程处处理后的度日数修正值; $S$ 为雪盖面积与总面积的比值,即冰雪覆盖率; $P$ 为降雨量( $\text{cm}$ ); $A$ 为流域或高度带的面积( $\text{km}^2$ ); $k$ 为流量衰减系数,意味着没有融雪或降水的情况下的径流衰减量; $n$ 为流量观测期内天数的序号;10000/86400是径流深到径流量的转换系数。

### 2.2 模型参变量确定

#### (1) 气温及度日数。

在SRM模型中度日数根据气温值得到。每日平均气温与时间联系起来就是度日数,但是两者单位不同,气温单位为 $\text{°C}$ ,度日数单位为 $\text{°C} \cdot \text{d}$ ,一般度日数值是通过分析研究区周边的气象观测站的每日气温数据,进行插值得到,用下式来确定:

$$T = \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} \quad (2)$$

式中: $T$ 为日均气温,即日均度日数; $T_{\max}$ 和 $T_{\min}$ 分别为逐日的最高及最低气温值。流域的度日数修正值可以表示为:

$$\Delta T = \gamma \cdot (h_s - h_p) \cdot \frac{1}{100} \quad (3)$$

式中: $\gamma$ 是流域的温度直减率,根据以往文献经验,本文取为 $0.65\text{ °C}/100\text{ m}$ ; $h_s$ 是流域选取作为参考的气象站的海拔高度; $h_p$ 是每层高程带的平均海拔高度。基于提取的每个高程带的平均海拔高度,把参考气象站的气温按照温度直减率公式差值到每个分带上,结果见表1。

#### (2) 积雪覆盖率。

流域积雪覆盖率是融雪径流模型的一个决定性变量,其正确与否决定着模型模拟结果的准确与否,逐日覆盖率是从通过遥感手段获取的积雪覆盖率逐日曲线中获取的。本文通过一系列具有时刻间隔的卫星遥感图形,将其进行积雪制图,计算每个时段积雪覆盖面积与流域面积的比值即可得到连续时段的积雪覆盖率,进而可以得到流域逐日积雪覆盖率。为了达到此目的,本文先将下载的DEM栅格数据与MODIS数据统一转换到同一投影坐标系下,然后在进行代数栅格运算。

利用ENVI中MODIS-converstionr toolkit补

丁对 MODIS 数据进行重投影处理,统一到 WGS\_1984\_UTM\_Zone\_45N 投影下,分辨率统一到 500 m × 500 m。空间分辨率重采样为 90 m × 90 m,利于与 SRTM 高程资料进行栅格代数运算之后获得积雪覆盖曲线。由于时间序列较长,图量较大,本文选择 2006 年 1 月 1 日至 8 日积雪影像作为示例,奎屯河流域的积雪影像图如图 2 所示。通过积雪影像与分带图叠加后,可以得出流域各个高程带的积雪分类图,流域 A、B、C、D 4 个高程带的积雪类像元如图 3 所示。



图 2 奎屯河 2006 年 1 月 1 日至 8 日积雪影像  
Fig. 2 Snow image of the catchment during January 1-8, 2006

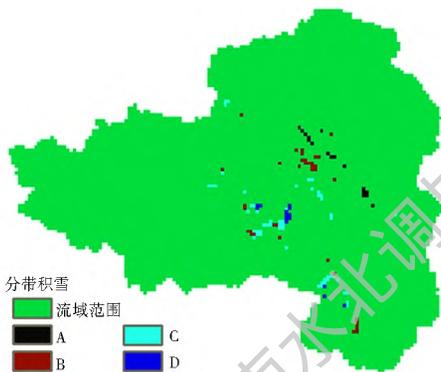


图 3 流域 4 个高程带的积雪类像元  
Fig. 3 Snow pixel of 4 elevations in the catchment

按上述示范过程对流域 184 幅图分别计算,得到流域 4 年的积雪覆盖率,如图 4 所示。由图中不难看出奎屯河流域各个高程带积雪覆盖率的一般特征,6 月-9 月为融雪期,融雪对流量的影响较大,且高程高的分带积雪一般比高程低的分带积雪覆盖程度高。

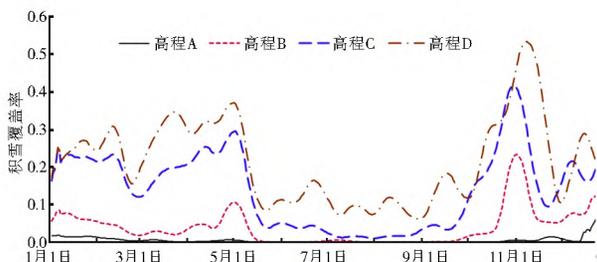


图 4 奎屯河流域的 4 年平均积雪覆盖率衰减过程曲线  
Fig. 4 Attenuation process curve of four year average snow cover rate in the catchment

(3) 退水系数。

退水系数是指在无降雨或融雪水的情况下径流量的减少值。由其能够得到前一日径流量补给到当日径流量的那部分流量,定义为:

$$k_{n+1} = \frac{Q_{n+1}}{Q_n} \quad (4)$$

式中:  $Q_n$  为第  $n$  天的实际径流量。 $k$  是可以有实测的流量资料计算获得的变量:

$$k_{n+1} = x \cdot Q_n^{-y} \quad (5)$$

式中:  $k$  为退水系数,  $x$  和  $y$  是两个基于  $Q_n$  和  $Q_{n+1}$  的双对数散点图得到的常量。

对于退水系数,需先确定其常量参数  $x$  和  $y$ ,首先对退水系数公式取对数:

$$\lg Q_{n+1} = (1 - y) \lg Q_n + \lg x \quad (6)$$

本文选取 2006-2009 年实测日径流量,采用了李弘毅等<sup>[18]</sup>在退水系数获取过程中对径流数据的选取原则,将  $Q_n \geq Q_{n+1}$  时的数据剔除掉,根据式(6)绘制奎屯河流域  $Q_n$  和  $Q_{n+1}$  的双对数退水过程散点图,如图 5 所示。

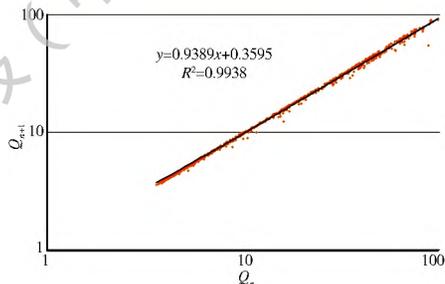


图 5 奎屯河 2006-2009 年退水过程散点图  
Fig. 5 Scatter diagram of recession process of Kuitun River in 2006-2009

根据公式得到奎屯河  $x = 1.05131$ ,  $y = 0.0611$ , 对应的退水系数为:

$$k_{n+1} = 1.05131 \cdot Q_n^{-0.0611} \quad (7)$$

(4) 度日因子与径流系数。

在 SRM 模型中,度日因子  $a$  定义为当天温度上升 1 °C 而形成的雪融深度。获取度日因子的方法一般有两种,一种是利用工具展开野外测量而获取数据;二是通过经验性公式  $a = 1.1 \times \frac{\rho_s}{\rho_w}$  计算获得,式中  $\rho_s$  为积雪密度;  $\rho_w$  为水的密度。

一般在计算中融雪与降水径流系数需要分开研究,在实际应用中一般根据经验选取或者通过流域实测数据进行率定得到。

本文中融雪径流系数  $C_s$ 、降水径流系数  $C_r$  和度日因子  $a$  采用遗传算法根据实测资料进行率定得到,遗传算法基本原理见文献[27]。在率定参数计算开始前,参数范围确定为:融雪径流系数 0~0.8;

降雨径流系数 0~ 0.8; 度日因子 0~ 0.6 cm/(°C·d)。采用遗传算法率定时, 本文交叉概率选为:  $P_{cross} = 0.95$ ; 种群大小  $popsize = 150$ ; 变异概率  $P_{mutation} = 0.05$ ; 最大进化代数  $maxgen = 50$ 。遗传算法率定结果为  $C_s = 0.1$ ,  $C_r = 0.403$ ,  $a = 0.101$ 。

### 2.3 评价指标

为了进一步定量分析融雪径流模型的模拟精度, 文中采用相对误差 (RE) 与 Nash 效率系数 (NSE) 作为模型结果精度评价指标。相对误差与 Nash 效率系数的表达式如下:

$$RE = \frac{|Q - Q'|}{Q} \times 100\% \quad (8)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - Q'_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - Q)^2} \quad (9)$$

式中: RE 为相对误差; NSE 为 Nash 效率系数;  $Q$  为实测流量;  $Q'$  为模拟流量;  $Q$  为实测均值;  $n$  为序列长度。

## 3 结果与讨论

### 3.1 模型结果

对奎屯河流域采用上述方法确定变量以及遗传算法率定参数后, 带入 SRM 模型进行率定期与检验期的径流模拟, 图 6 为奎屯河流域 2006–2009 年率定期结果与实测对比, 图 7 为 2010–2011 年检验期结果与实测对比。

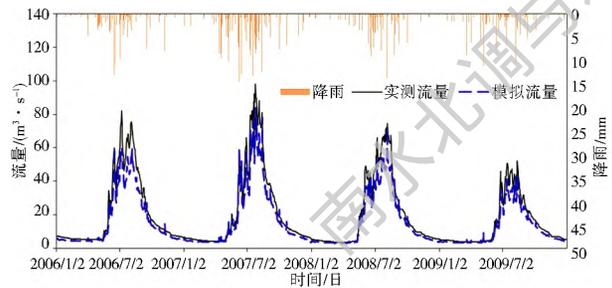


图 6 奎屯河 2006–2009 年实测与率定结果对比

Fig. 6 Comparison between measured and calibrated results from 2006 to 2009

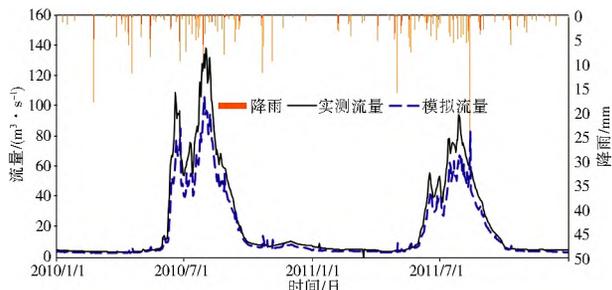


图 7 奎屯河 2010–2011 年实测与检验结果对比

Fig. 7 Comparison between measured and validated results from 2010 to 2011

采用相对误差及 Nash 效率系数两个评价指标对模型在奎屯河流域模拟的结果进行分析, 结果如表 2 所示。

表 2 模型相对误差及 Nash 效率系数

Tab. 2 Relative error and Nash efficiency coefficient of the model

流域	相对误差 (%)		Nash 效率系数	
	率定期	检验期	率定期	检验期
奎屯河	18.95	23.86	0.86	0.75

根据图 6、图 7 可以看出, 融雪径流模型所得的模拟值与实测径流趋势基本相同, 且所得数据间存在较小的误差。奎屯河流域的洪水主要出现在 6 月–9 月, 并且在有些时期存在有较高的洪峰, 主要因为气温持续增加, 融雪也在不断增加, 融雪覆盖率降低, 且在此期间降雨频繁, 径流来源较为复杂, 对峰值的模拟也存在一定的误差。总体来看模型参数率定结果基本合理, 模型模拟结果基本可信。根据表 2 可知, 奎屯河流域模型模拟结果为: 率定期和检验期的相对误差分别为 18.95% 和 23.86%, 率定期和检验期的 Nash 效率系数分别为 0.86 和 0.75。奎屯河流域通过融雪径流模型模拟的结果与实测值虽然存在一定的误差, 但 Nash 效率系数较高, 满足流域预报精度要求。说明本文建立的融雪径流模型预测模拟的结果较好, 能够应用于寒旱区典型中小流域的洪水预报工作。

### 3.2 问题讨论

本文利用融雪径流模型对奎屯河流域进行径流模拟, 模拟效果较为理想, 对西北地区中小流域的洪水预报工作具有一定指导价值, 但是仍存在一些有待解决问题, 主要分为以下几个层面。

(1) 以奎屯河流域为代表的寒旱区中小流域站点稀少, 可用实测资料有限, 流域内只有一个水文站与附近乌苏气象站资料可用, 无法反映整个流域的气温、降雨等气象信息的分布情况, 需加强流域站点建设与资料收集等工作。

(2) 在流域径流模拟过程中, 积雪覆盖率与温度调整值可以根据高程分带进行分带化处理, 但是由遗传算法率定的融雪、降水径流系数和度日因子以及基于实测流量得到的退水系数无法根据现有情况进行分带化处理, 在分带计算中都以统一值进行计算, 一定程度上影响了模型最终结果的模拟精度, 在以后研究工作中需加以改进。

(3) 模型虽然模拟效果较好, 但是仍然存在一些不合理的地方, 如 MOD10A2 会受到一些因素的影响, 使得遥感数据不能反映实际的状况, 进而影响积雪覆盖率的计算, 退水系数、温度调整值等都是根据经验公式求得, 这些因素都会影响模型模拟的精度。在以后的工作中可结合其他手段提高积雪覆盖率的准确性, 优化输入参数, 提高模型模拟的精度。

## 4 结论

针对寒旱区的特点,本文基于 SRM 融雪径流模型,以奎屯河流域为研究对象,根据研究流域 2006–2011 年实测气象、水文资料,结合遥感数据 MODIS10A2,对流域逐日径流量进行模拟,主要得出以下结论。

(1) 根据寒旱山区特点,将流域进行高程分带,对 MODIS10A2 遥感数据进行必要处理,得出奎屯河研究时段内的雪盖制图,与流域高程分带图叠加,获取流域各个高程带积雪覆盖率,积雪覆盖率在融雪期会随着温度的升高而降低,并且高程较高的分带地区积雪覆盖较高,最高达到 0.6 左右,积雪覆盖率在模型应用中对结果影响较大。

(2) 模型在计算过程中,由于可用资料有限,只对部分参变量进行了分带处理,且 MODIS 遥感数据受到某些因素的影响无法真实反映流域积雪覆盖率情况,一定程度上限制了模型的模拟精度。

(3) 从模型的径流模拟效果来看,模拟效果比较理想,率定期与检验期 Nash 效率系数均达到了 0.7 以上,说明 SRM 融雪径流模型在寒旱区中小河流应用较好,可以用于模拟中小河流的径流过程。

### 参考文献(References):

- [1] 张勇,刘时银. 度日模型在冰川与积雪研究中的应用进展[J]. 冰川冻土, 2006(1): 101-107. (ZHANG Y, LIU S Y. Progress of the application of degree day model to study glaciers and snow cover[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006(1): 101-107. (in Chinese))
- [2] 党素珍,刘昌明,王中根,等. 黑河流域上游融雪径流时间变化特征及成因分析[J]. 冰川冻土, 2012(4): 920-926. (DANG S Z, LIU C M, WANG Z G, et al. Analyses on temporal variations of snowmelt runoff time in the upper reaches of Heihe river and its climate causes[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012(4): 920-926. (in Chinese))
- [3] 柳林,安会静. 中小河流洪水预报的难点与解决方案探讨[J]. 海河水利, 2013(5): 51-53. (LIU L, AN H J. Discussion on difficulties and solutions of flood forecasting in medium and small rivers[J]. Haihe Water Resources, 2013(5): 51-53. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.10047328.2013.05.018.
- [4] 亚力昆·马合木提. 探析中小河流洪水预报的难点与解决方案[J]. 黑龙江水利科技, 2014(3): 70-71. (YALIKUN Mahemur ti. Discussion on the difficulties and solutions of flood forecast in middle and small rivers[J]. Heilongjiang Science and Technology of Water Conservancy, 2014(3): 70-71. (in Chinese)) DOI: 10.14122/j.cnki.hskj.2014.03.010.
- [5] MARTINEC J, RANGO A. Parameter values for snowmelt runoff modelling[J]. Journal of Hydrology, 1986, 84(3-4): 197-219. DOI: 10.1016/00221694(86)90123-X.
- [6] RANGO A, MARTINEC J. Application of a snowmelt-runoff model using Landsat data[J]. Nordic Hydrology, 1979, 10(4): 225-238.
- [7] TAHIR A A, CHEVALLIER P, ARNAUD Y, et al. Modeling snowmelt runoff under climate scenarios in the Hunza River basin, Karakoram Range, Northern Pakistan[J]. Journal of Hydrology, 2011, 409(1-2): 104-117. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2011.08.035.
- [8] JONATHAN K, WOONSUP C, JINMU C. Sensitivity of the snowmelt runoff model to snow covered area and temperature inputs[J]. Applied Geography, 2014, 55: 30-38. DOI: 10.1016/j.apgeog.2014.08.011.
- [9] YU M Y, CHEN X, LI L H, et al. Incorporating accumulated temperature and algorithm of snow cover calculation into the snowmelt runoff model[J]. Hydrological Processes, 2013, 27: 3589-3595. DOI: 10.1002/hyp.9372.
- [10] ZHANG G Q, XIE H J, YAO T D, et al. Quantitative water resources assessment of Qinghai Lake basin using Snowmelt Runoff Model (SRM)[J]. Journal of Hydrology, 2014, 519: 976-987. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.08.022.
- [11] VAFAKHAH M, NOURI A, AIAVIPANAH S K. Snowmelt runoff estimation using radiation SRM model in Taleghan watershed[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 73: 993-1003. DOI: 10.1007/s12665-014-3449-5.
- [12] EMILE E, ALBERT R, CAITRIANA M S, et al. Simulated impact of climate change on hydrology of multiple watersheds using traditional and recommended snowmelt runoff model methodology[J]. Journal of Water and Climate Change, 2016, 7(4): 665-682. DOI: 10.2166/wcc.2016.097.
- [13] KARIMI H, ZEINIVAND H, TAHM ASEIPOUR N, et al. Comparison of SRM and WetSpa models efficiency for snowmelt runoff simulation[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75: 664. DOI: 10.1007/s12665-016-5490-z.
- [14] 冯学智,李文君,史正涛,等. 卫星雪盖监测与玛纳斯河融雪径流模拟[J]. 遥感技术与应用, 2000, 15(1): 18-21. (FENG X Z, LI W J, SHI Z T, et al. Satellite snow cover monitoring and snowmelt runoff simulation of Manas River in Tianshan Region[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2000, 15(1): 18-21. (in Chinese))
- [15] 马虹,程国栋. SRM 融雪径流模型在西天山巩乃斯河流域的应用实验[J]. 科学通报, 2003, 48(19): 2088-2093. (MA H, CHENG G D. Application of snowmelt runoff model in Kunes River Basin of Western Tianshan Mountains[J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(19): 2088-2093. (in Chinese))
- [16] 李宝林,张一驰,周成虎. 天山开都河流域雪盖消融曲线研究[J]. 资源科学, 2004, 26(6): 23-29. (LI B L, ZHANG Y C, ZHOU C H. Snow cover depletion curve in Kaidu River Basin, Tianshan Mountains[J]. Resources Science, 2004, 26(6): 23-29. (in Chinese))
- [17] 房世峰. 基于"3S"技术的分布式融雪径流模型的设计和应用[D]. 新疆大学, 2007. (FANG S F. The design and application of distributed snowmelt runoff model based on the "3S" technology[D]. Xinjiang University, 2007. (in Chinese))
- [18] 李弘毅,王建. SRM 融雪径流模型在黑河流域上游的模拟研

- 究[J]. 冰川冻土, 2008, 30(5): 769-775. (LI H Y, WANG J. The snowmelt runoff model applied in the upper Heihe River Basin[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2008, 30(5): 769-775. (in Chinese))
- [19] 李晶, 刘时银, 魏俊峰, 等. 塔里木河源区托什干河流域积雪动态及融雪径流模拟与预估[J]. 冰川冻土, 2014, 36(6): 1508-1516. (LI J, LIU S Y, WEI J F, et al. Snow cover dynamics and snowmelt runoff modeling in the Toxkan River basin, source region of the Tarim River, Xinjiang[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(6): 1508-1516. (in Chinese)) DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2014.0181.
- [20] 怀保娟, 李忠勤, 孙美平, 等. SRM 融雪径流模型在乌鲁木齐河源区的应用研究[J]. 干旱区地理, 2013, 36(1): 41-48. (HUAI B J, LI Z Q, SUN M P, et al. Snowmelt runoff model applied in the headwaters region of Urumqi River[J]. Arid Land Geography, 2013, 36(1): 41-48. (in Chinese)) DOI: 10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.2013.01.010.
- [21] 赵军, 黄永生, 宋闲庆, 等. SRM 融雪径流模型在疏勒河流域上游的应用[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(1): 72-80. (ZHAO J, HUANG Y S, SONG G Q, et al. Application of snowmelt runoff model in upper stream of Shule river basin[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2015, 26(1): 72-80. (in Chinese)) DOI: 10.11705/j.issn.1672-643X.2015.01.014.
- [22] HE Z H, PARA JKA J, TIAN F Q. Estimating degree day factors from MODIS for snowmelt runoff modeling[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2014, 18: 4773-4789. DOI: 10.5194/hess-18-4773-2014.
- [23] 侯慧姝, 杨宏业. MODIS 积雪产品及研究应用概述[J]. 遥感技术与应用, 2009, 24(2): 252-256. (HOU H S, YANG H Y. A general introduction to MODIS snow products and its researching application[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2009, 24(2): 252-256. (in Chinese))
- [24] MARTINEC J, RANGO A, ROBERTS R. The snowmelt runoff model (SRM) user's manual (updated edition 1998, Version 4.0) [M]. Berne: University of Berne, 1998.
- [25] JONATHAN K, WOONSUP C, ANKE K. Snowmelt runoff modeling: Limitations and potential for mitigating water disputes[J]. Journal of Hydrology, 2012, 430-431: 179-181. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2012.01.043.
- [26] MOHSIN J B, MUHAMMAD B. Application of snowmelt runoff model for water resource management[J]. Hydrological Processes, 2011, 25: 3735-3747. DOI: 10.1002/hyp.8099.
- [27] 苑希民, 李鸿雁, 刘树坤, 等. 神经网络和遗传算法在水科学领域的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002. (YUAN X M, LI H Y, LIU S K, et al. Application of neural network and genetic algorithm in water science[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2002. (in Chinese))

## (上接第27页)

- [22] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements[M]. Rome: FAO Food and Agriculture Organization Press, 1998: 23-27, 97-134.
- [23] 李子君, 李秀彬. 水利水保措施对潮河流域年径流量的影响——基于经验统计模型的评估[J]. 地理学报, 2008, 63(9): 958-968. (LI Z J, LI X B. Impacts of engineering measures for water conservancy on annual runoff in the Chaohe River Basin based on an empirical statistical model[J]. Acta Geographica Sinica, 2008, 63(9): 958-968. (in Chinese))
- [24] 刘昌明, 李艳忠, 刘小莽, 等. 黄河中游植被变化对水量转化的影响分析[J]. 人民黄河, 2016, 38(10): 7-12. (LIU C M, LI Y Z, LIU X M, et al. Impact of vegetation change on water transformation in the middle yellow river[J]. Yellow River, 2016, 38(10): 7-12. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2016.10.002.

## (上接第41页)

- [21] DU AN Q, SOROOSHIAN S, GUPTA V K. Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models[J]. Journal of Hydrology, 158(3-4): 265-284. DOI: 10.1016/0022-1694(94)90057-4.
- [22] 陈喜, 张志才, 程勤波. 饱和非饱和水流数值模拟[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2011: 115-119. (CHEN X, ZHANG Z C, CHENG Q B. Numerical modeling saturated and unsaturated groundwater flow[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2011: 115-119. (in Chinese))
- [23] 王中根, 夏军, 刘昌明, 等. 分布式水文模型的参数率定及敏感性分析探讨[J]. 自然资源学报, 2007(4): 649-655. (WANG Z G, XIA J, LIU C M, et al. Comments on sensitivity analysis and calibration of distributed hydrological model[J]. Journal of Natural Resources, 2007(4): 649-655. (in Chinese))
- [24] BABU R G, BABU G R, KUMAR H H. Estimation of crop water requirement, effective rainfall and irrigation water requirement for vegetable crops using CROPWAT[J]. International Journal of Agricultural Engineering, 2015, 8(1): 15-20. DOI: 10.15740/HAS/IJAE/8.1/15-20.
- [25] 凌敏华, 陈喜, 程勤波, 等. 地表水与地下水耦合模型研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2010, 04: 79-84. (LING M H, CHEN X, CHENG Q B, et al. Advances in coupled surface water and groundwater models[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2010, 04: 79-84. DOI: 10.3880/j.issn.1006-9647.2010.04.019 (in Chinese))
- [26] 黄远洋. 平原区地下水动态变化对地表水文过程影响的模拟研究[D]. 南京: 河海大学, 2015. (HUANG Y Y. Research on modeling effects of groundwater dynamic on surface water processes[D]. Nanjing: Hohai University, 2015. (in Chinese))