

高寒山区融雪模型的改进与应用研究

田龙, 姜卉芳, 穆振侠

(新疆农业大学 水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052)

摘要:以台兰河流域为研究区,采用改进的含融雪结构的新安江模型,利用2003–2009年逐日水文气象资料进行水文模拟。结果表明:改进的融雪计算方法能够很好的应用于含融雪结构的新安江模型中,并能在径流模拟研究中取得令人满意的结果。

关键词:高寒山区;融雪模型;新安江模型;改进的温度指标法;台兰河流域

中图分类号:P334+.92

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2014)04-0084-05

Application and improvement of snow melt model in high cold areas

TIAN Long, JIANG Huifang, MU Zhenxia

(College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agriculture University, Urumqi, 830052, China)

Abstract: Taking Tailan river basin as research area, the paper applied the Xin'anjiang river model of improved containing snowmelt structure and used the daily data of hydro meteorology from 2003 to 2009 for hydrological simulation. The results show that the improved calculation method of snowmelt can be well applied to the Xin'anjiang model and has gotten good results in the study of runoff simulation.

Key words: high cold area; snow melt model; Xin'anjiang model; improved temperature index method; Tailan river basin

新疆的主要河流都发源于高山冰川及多年积雪区,受地形、气候条件的限制,2500m以上山区水文气象观测站点寥寥无几,导致山区资料严重不足,学者们只能通过简单的经验公式(度-日法)对融雪过程进行描述,从而忽略了能量是引发融雪的主要诱因,使得积雪冰川消融产汇流过程的模拟及预报精度受到了制约。改进的温度指标法一方面考虑了能量的概念,另一方面仍以容易获得的气温资料作为模型的输入数据,通过将该法应用于含融雪结构的新安江模型中,以检验该法的适用性及可靠性。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

研究区选择位于新疆阿克苏地区温宿县境内的台兰河流域,地理位置位于东经 $80^{\circ}21'44'' \sim 81^{\circ}10'44''$,北纬 $40^{\circ}41'44'' \sim 42^{\circ}15'13''$ 之间。流域总面积

为 $5\,146\text{ km}^2$,其中山区面积为 $1\,324\text{ km}^2$,平原区的面积为 $3\,822\text{ km}^2$ ^[1]。

流域内多年平均气温为 7.9°C ,极端最高气温为 37.6°C ,极端最低气温为 -27.4°C ;台兰河流域受西风环流和北冰洋水汽以及地形抬升的影响,水汽自西向东,自北向南渐减,平原区多年平均降水量 73.2 mm ,山区多年平均降水量 187.0 mm ;径流年际变化不大,但年内径流分配极不均匀:春季(3–5月)来水量占全年来水量的9%,夏季(6–8月)占全年来水量的69.9%,秋季(9–11月)占全年来水量的16.6%,冬季(12–2月)占全年来水量的4.5%;流域内共发现现代冰川115条,冰川总面积 431 km^2 ,其中长度超过10 km的冰川有4条,总面积达到 307.7 km^2 ,冰川储量 73.132 km^3 ,平均雪线海拔 $4\,290\text{ m}$ ^[2–3]。研究区地理位置及站点分布见图1,多年月平均流量过程见图2,站点情况见表1。

收稿日期:2014-03-01; 修回日期:2014-04-19

基金项目:国家自然科学基金项目(51209181);新疆维吾尔自治区高等学校科研计划项目(XJEDU2011S17);新疆农业大学水利工程博士后经费资助项目;新疆水文学及水资源重点学科基金项目(xjswszyzdxk20101202)。

作者简介:田龙(1988-),男,陕西渭南人,硕士研究生,主要从事水文水资源研究。

通讯作者:姜卉芳(1957-),女,浙江金华人,硕士,教授,博士生导师,主要从事水文水资源研究。

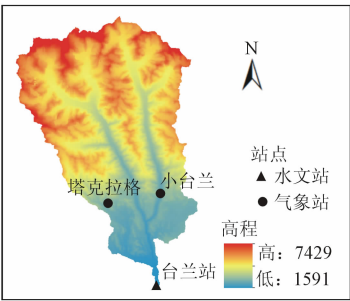


图 1 研究区地理位置及站点布设情况

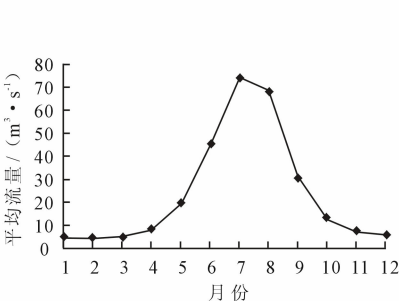


图 2 多年月平均流量过程曲线

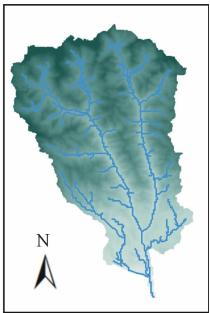


图 3 台兰河流域水系分布图

表 1 研究区水文气象站(点)一览表 (°), m				
站 点	经度	纬度	高程	建站时间
台兰水文站	80.4960	41.56714	1602	1957
小台兰气象站	80.4891	41.75121	2116	2011
塔格拉克气象站	80.3484	41.72344	2381	2011

1.2 流域信息提取

所用的 DEM(数字高程模型)数据是在 <http://srtm.csi.cgiar.org/SELECTION/inputCoord.asp> 上下载的,其精度为 3 弧度秒(水平精度相当于 90 m)。通过上述得到研究区的 DEM 数据以后,再利用 GIS 软件对该 DEM 数据进行填洼削峰、水流方向判定、汇流累计、流域网格及流水线的生成等步骤最终得到我们所要的台兰河流域水系图(见图 3)^[4]。

1.3 水文与气象资料

台兰水文站是国家基本水文站,资料可靠,目前收集到 2003 – 2009 年的日降水、气温和径流资料;塔格拉克和小台兰气象站由于建站时间短,与现有台兰水文站资料不同期,所以选择台兰站 2003 – 2009 年的水文气象资料用于模型参数的率定与模型结果的检验。

1.4 改进的温度指标法

改进的温度指标法旨在克服传统度 – 日法忽略了的太阳辐射、地形特征等因素。该法在选择时基于以下几点考虑:①太阳直接辐射可以直接计算得出,不需要气象数据作为输入;②考虑了地形因素的影响,例如坡度、坡向,从而体现了空间不同单元的差异性;③以一天为一个周期,这也与通常观测的融雪率相符^[5]。计算公式如下:

$$ME = (MF + a_{snow/ice}I)(TP - TB) \tag{1}$$

式中:MF 为融雪因子,mm/℃ · d; $a_{snow/ice}$ 为积雪 / 冰川表面辐射改正系数; I 为冰川积雪表面潜在晴空太阳直接辐射,W/m²; TP 与 TB 分别为日均气温与雪面温度,℃。融雪因子以及太阳辐射改正系数是

按经验取得,I 是通过大气顶部太阳辐射的函数关系式计算得到:

$$I = I_0 \left(\frac{R_m}{R} \right)^2 \varphi_a \left(\frac{P}{P_0 \cos Z} \right) \cos \theta \tag{2}$$

式中: I_0 为太阳常数,1368 W/m²; $\frac{R_m}{R}$ 为地球轨道离心率改正系数,其中 R_m 是平均地 – 日距离,R 为瞬时地 – 日距离; φ_a 为平均大气晴空透射率; P 为大气压力,pa; P_0 为海平面平均大气压力,Pa; Z 是当地天顶角; θ 是太阳光束与地形坡度的入射角^[6]。

I 的分量计算如下:

$$\begin{aligned} \frac{R_m}{R} = & 1.00011 + 0.034221 \cos \Gamma + 0.00128 \sin \Gamma \\ & + 0.000719 \cos 2\Gamma + 0.000077 \sin 2\Gamma \end{aligned} \tag{3}$$

式中 Γ 为天角,计算公式为^[7]:

$$\Gamma = 2\pi \left(\frac{i - 1}{n_a} \right) \tag{4}$$

$$\varphi_a = A + B \cos \left(2\pi \frac{i - i_f}{n_a} \right) \tag{5}$$

式中: A 为平均晴空透射率 0.64; B 为振幅因子 0.12; i 为一年中第几天; i_f 为一年中的天数因子(南半球为 174;北半球为 0)^[8]; n_a 为一年的天数。

$$P = P_0 \exp \left(- \frac{gMh}{RT_0} \right) \tag{6}$$

式中: P_0 为海平面标准大气压,101325Pa; T_0 为海平面标准温度,288.15 K; g 为重力加速度,9.8 m/s²; M 为干燥空气摩尔质量,0.0289644 kg/mol; R 为通用气体常数,8.31447 J/(mol · k); h 为海拔高度,m。

$$\cos z = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos h \tag{7}$$

式中: φ 为纬度(各带形心点的纬度); δ 为太阳赤纬; h 为时角。 δ 的计算公式如下^[9]:

$$\begin{aligned} \delta = & 0.3723 + 23.2567 \sin \omega + 0.1149 \sin 2\omega \\ & - 0.1712 \sin 3\omega - 0.758 \cos \omega + 0.3656 \cos 2\omega \\ & + 0.0201 \cos 3\omega \end{aligned} \tag{8}$$

$$\omega = \frac{2\pi(i - N_0)}{365.2422} \quad (9)$$

$$\cos\varphi_{\text{sun}} = \frac{\sin\delta\cos\varphi - \cos h\cos\delta\sin\varphi}{\cos\theta_s} \quad (13)$$

$$N_0 = 79.6764 + 0.2422(\text{年份} - 1985) - \text{INT}[(\text{年份} - 1985)/4] \quad (10)$$

$$\sin\theta_s = \cos h\cos\delta\cos\varphi + \sin\delta\sin\varphi \quad (14)$$

$$h = 15^\circ(n - 12) \quad (11)$$

式中： φ 为纬度； θ_s 为太阳高度角。 θ_s 计算公式如下：

式中： ω 为日角； i 为一年中的天数； N_0 为积日； h 为时角； n 是 24 小时制^[9]：

$$\cos\theta = \cos\beta\cos\varphi + \sin\beta\sin\varphi\cos(\varphi_{\text{sun}} - \varphi_{\text{slop}}) \quad (12)$$

式中： β 为坡角(各带形心点的坡角)； φ_{sun} 为太阳方位角； φ_{slop} 为坡度方位角(各带主要坡向)。 φ_{sun}

计算公式如下：

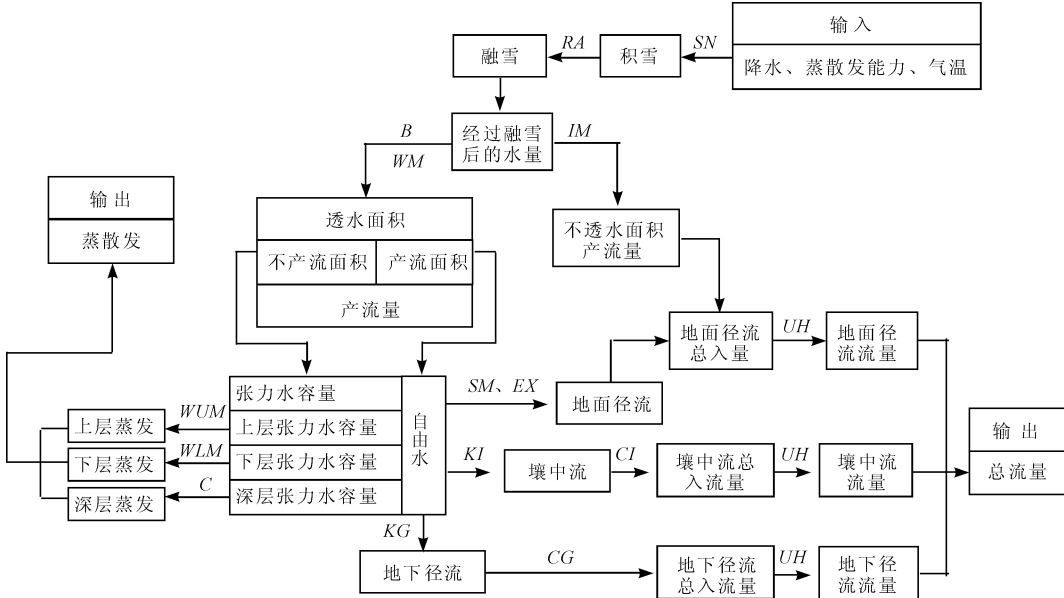


图 4 含融雪模块的新安江模型结构图

表 2 流域分带信息表				m, km ² , %
分带序号	高程范围	平均高程	面积	各分带面积占流域总面积的百分比
1	4601 ~ 7429	5148.00	270.759	19.88
2	3601 ~ 4600	4127.03	552.323	40.56
3	2601 ~ 3600	3152.45	269.349	19.78
4	1591 ~ 2600	2207.89	269.422	19.78

2 结果与分析

2.1 模型参数的确定

模型的参数由人为调试,同时考虑流量过程目标函数优选确定,改进后含融雪模块的新安江模型中的主要参数及取值见表 3^[11]。

表 3 模型主要参数汇总表

mm, mm/度·d

参数	物理意义	取值	参数	物理意义	取值
K	蒸散发能力折算系数	0.4	CG	地下水消退系数	0.992
IM	直接产流面积比例	0.06	CI	壤中流消退系数	0.95
WM	流域平均蓄水容量	200	CS	地表水消退系数	0.55
WUM	上层蓄水容量	20	C	深层蒸发系数	0.09
WLM	下层蓄水容量	80	KI	自由水对壤中流的出流系数	0.3
CM	全流域被雪时积雪水当量	250	KG	自由水对地下水的出流系数	0.35
B	蓄水容量曲线的方次	0.5	TK	临界温度	3
SN	雪量改正系数	1.1	TB	雪面温度	0
SM	最大自由水蓄水容量	30	MF	融雪因子	2.5
EX	自由水蓄水容量曲线的方次	1.5	$\alpha_{\text{snow/ice}}$	太阳辐射改正系数	0.008

2.2 模型检验标准

(1) 径流过程平均误差(*ABS*),模拟与实测径流过程线的吻合程度。

$$ABS = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|Q_{模}(i) - Q_{测}(i)|}{Q_{测}(i)} \tag{15}$$

(2) ΔW 反映了模拟的时间段内实测水量与计算水量的误差,以校正模拟过程中总水量的偏差。

$$\Delta W = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{模}(i) - Q_{测}(i))}{\sum_{i=1}^n Q_{测}(i)} \tag{16}$$

式中: n 是模拟时段数, $Q_{测}(i)$ 、 $Q_{模}(i)$ 分别是第*i*时段的实测流量与模拟流量^[12]。

2.3 模拟结果与分析

将2003-2006年作为率定期,2007-2009年作为检验期,由于篇幅限制,此次结果只列出了改进后率定期2005-2006年、检验期2007-2008年的模拟结果(见图5、图6)。

通过表4、图6分析得到,在率定期(2003-2006),运用传统方法进行模拟的平均径流量相对误差为-17.8%,其中2005年的值达到-37.4%,这是导致平均结果偏大的主要因素,径流过程平均

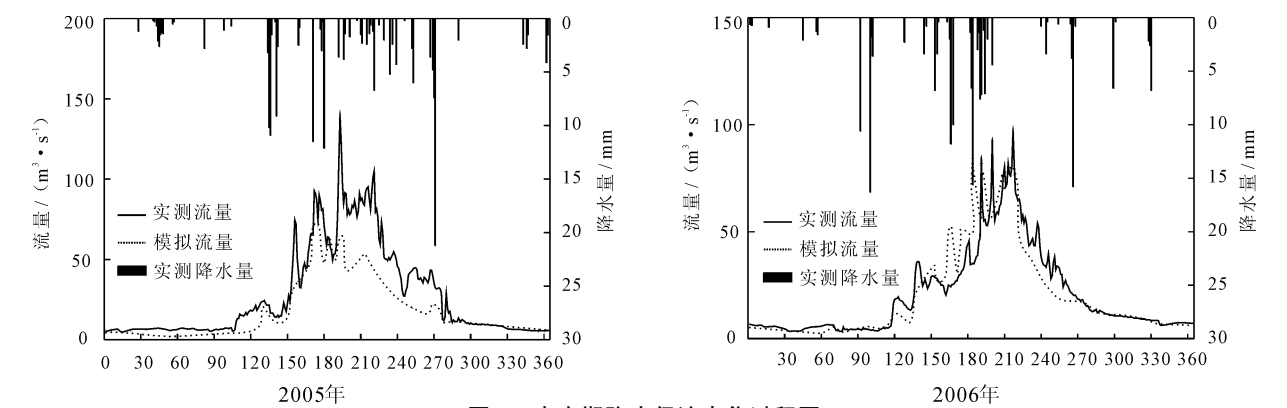


图5 率定期降水径流变化过程图

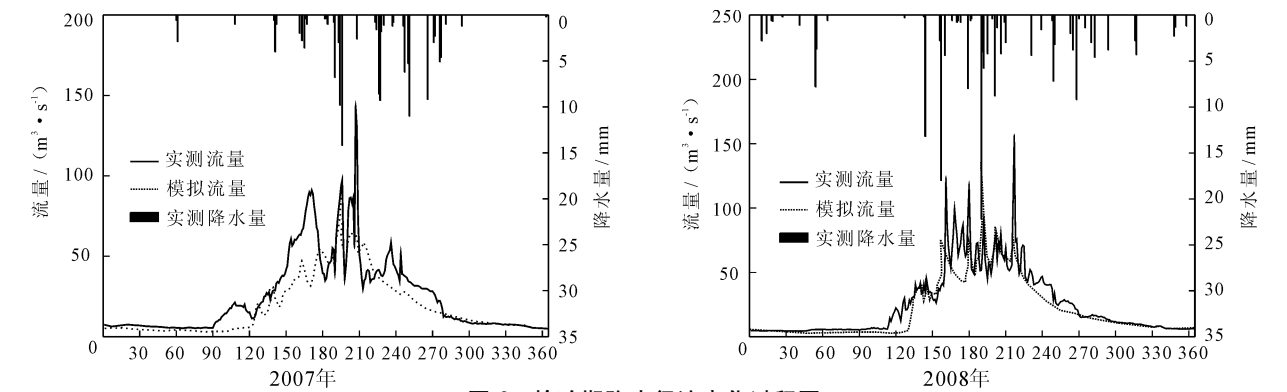


图6 检验期降水径流变化过程图

表4 径流模拟结果统计表							亿 m³, %	
年份	实测径流量	模拟径流量 ¹	模拟径流量 ²	径流量相对误差 ¹	径流量相对误差 ²	径流过程平均误差 ¹	径流过程平均误差 ²	
率定期	2003	7.527	6.618	6.701	-12.2	-11.0	28.1	28.6
	2004	7.187	6.144	6.251	-14.5	-13.0	28.6	29.0
	2005	8.506	5.325	5.431	-37.4	-36.1	30.1	29.3
	2006	6.421	5.958	6.071	-7.2	-5.4	21.8	21.4
	平均	7.410	6.010	6.110	-17.8	-16.4	27.2	27.1
检验期	2007	7.706	5.703	5.838	-26.0	-24.2	29.8	29.6
	2008	7.819	6.512	6.642	-16.7	-15.1	22.5	22.1
	2009	6.516	4.596	4.698	-29.5	-27.9	27.3	26.4
	平均	7.350	5.600	5.73	-24.1	-22.4	26.5	26.0

注:上标1为改进前,上标2为改进后。

误差的平均值为 27.2% ;通过改进的方法,平均径流量相对误差为 -16.4% ,每一年的误差值都小于改进前,径流过程平均误差的平均值为 27.1% ,与传统法几乎相同。在检验期(2007 - 2009),传统方法的平均径流量相对误差为 -24.1% ,径流过程平均误差的平均值为 26.5% ;运用改进的方法,平均径流量相对误差为 -22.4% ,径流过程平均误差的平均值为 26.0% ,两个指标都好于传统方法。

3 结 语

通过以上结果分析,这两种方法都能较好的模拟研究区的径流过程,同时改进后的温度指标法的结果好于改进前的方法。由于影响融雪的因素众多不易确定,传统方法只是根据经验给定一度 - 日因子作为所有影响因素的综合指标,而如果完全按照能量方程去计算出融雪量,又势必投入大量人力物力去准备繁多的数据资料。改进的温度指标法正是从这一点出发,运用相对容易获得的资料,并考虑了影响融雪的主要因素,达到了较好的模拟结果。通过以台兰河流域为典型流域,运用改进的温度指标法在新安江模型中能够达到理想的模拟结果,径流相对平均误差在 20% 以内,但是由于新安江模型本身的限制,并没有完全做到分布式,许多参数仍做了简化处理,这也为今后提出完全分布式的新安江模型提供了依据。

参考文献:

[1] 王 琴,邓铭江,董新光,等. 干旱内陆河地下水库极限蓄

水能力分析[J]. 人民黄河,2008,30(10): 59 - 60.

[2] 沈永平,刘时银,丁永建,等. 天山南坡台兰河流域冰川物质平衡变化及其对径流的影响[J]. 冰川冻土,2003,25(2): 117 - 122.

[3] 王志杰,王新辉,旦木仁加甫,等. 气候变化对台兰河年平均径流量的影响[J]. 干旱区研究,2014,31(1): 125 - 130.

[4] 王 鹏,姜卉芳,穆振侠. 阿克苏河源流径流模拟初探[J]. 水资源与水工程学报,2012,23(3): 51 - 54 + 57.

[5] 乔 鹏,秦 艳,刘志辉. 基于能量平衡的分布式融雪径流模型[J]. 水文,2011,31(3): 22 - 26 + 35.

[6] Hock R. Glacier melt: a review of processes and their modeling[J]. Progress in Physical Geography, 2005, 29(3): 362 - 391.

[7] Wong L T, Chow W K. Solar radiation model[J]. Applied Energy, 2001, 69(3): 191 - 224.

[8] Woodward S J R, Barker D J, Zyskowski R F. A practical model for predicting soil water deficit in New Zealand pastures[J]. 2001, 44(1): 91 - 109.

[9] 陈晓勇,郑科科. 对建筑日照计算中太阳赤纬角公式的探讨[J]. 浙江建筑,2011, 28(9): 6 - 8 + 12.

[10] 王 鹏,穆振侠. KM 河流域融雪径流与积雪面积 - 气温关系分析[J]. 水资源与水工程学报,2013,24(4): 28 - 31 + 36.

[11] 郝改瑞,李抗彬,李智录,等. 新安江模型参数变化对流域降雨径流过程的影响分析[J]. 水资源与水工程学报,2012,23(5): 127 - 129.

[12] 景少波,姜卉芳,穆振侠. 含融雪结构的新安江模型在叶尔羌河流域的应用[J]. 新疆农业大学学报,2010, 33(3): 250 - 254.