第27卷 第7期 2013年7月

Journal of Arid Land Resources and Environment

Vol. 27 No. 7 July. 2013

文章编号:1003-7578(2013)07-119-08

乌鲁木齐河源1号冰川水文断面不同时间尺度径流估算

崔玉环¹ 叶柏生¹ 汪杰² 刘友存³

(1.中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所 冰冻圈科学国家重点实验室,兰州 730000;2.安徽大学 资源与环境工程学院,合肥 230039;3.天津师范大学 水资源与水环境重点实验室,天津 300387)

提 要:通过对乌鲁木齐河源1号冰川水文断面实测径流量与气象数据进行相关性统计,分析不同时间 尺度下径流变化的主要影响因素,建立四种径流模型,并通过比较不同模型间的差异定性分析不同气象因素对 径流变化的贡献,可得出以下结论:1)在日尺度上,径流变化受气温影响最大,其次是太阳辐射和相对湿度;旬、 月尺度上,影响径流的主要因素仍为气温,其他因素的影响较小;夏季尺度上,气温和降水共同影响径流的变 化。2)对于日径流模拟,其低值和波动趋势能够得到较好的模拟,但峰值部分模拟不够,相关系数为0.71标 准误差为2.37mm;旬、月和夏季径流模拟精度比日尺度有明显提高,相关系数分别为0.79,0.83和0.80。以上 结论可为长时间序列冰川径流的动态变化模拟和监测提供科学参考。

关键词:冰川融水;太阳辐射;气候变化;乌鲁木齐河源 中图分类号: P333 文献标识码: A

冰川融水为中国西部社会经济发展提供宝贵的淡水资源。在全球气候变暖背景下,中国西部冰川呈现出不同程度的退缩趋势,准确分析冰川融水量的变化趋势和原因,预估未来变化趋势是当今冰川、水文研究的热点及难点^[12]。全球变暖背景下,蓝永超等^[3,4]分析了天山区水循环各要素变化特征,并得出:从上世纪60年代以来,天山冰川的变化整体上以退缩为主,冰川的强烈退缩和冰川融水的增加,使得近十余年来新疆天山地区大部分冰川补给河流径流量呈增加的趋势。

乌鲁木齐河源1号冰川是我国唯一有长时间序列冰川径流监测的冰川。诸多学者^[5-8]用统计学或径 流模拟的方法对1号冰川水文断面径流的变化趋势和影响因素进行了分析 结果表明:径流与夏季气温和 降水呈正相关关系 其变化主要受夏季气温控制;春季极大值径流呈现轻微增大趋势 夏季呈现出轻微减 小趋势;冰川融水径流与冰川物质平衡、年均气温、消融期气温及年降水量存在良好的瞬时响应关系 其中 消融期气温的振动对冰川融水径流振动能量贡献最大。卿文武等^[9]统计分析发现径流与地温之间的关 系较气温更为紧密。

基于统计基础的冰川融水径流模型的模拟精度取决于不同时间尺度气象因子对径流的贡献。前人仅 依赖径流与气温、降水数据的统计关系来建立日尺度径流估算模型,而忽略对其他气象要素(如太阳辐 射 相对湿度等)对径流估算的贡献,特别是未分开考虑不同时间尺度下径流估算中的影响因素。因而, 文中选择具有长期观测基础的乌鲁木齐河源1号冰川为研究区,分析不同时间尺度下诸多气象要素(如 气温、降水、相对湿度和太阳辐射等)与径流之间的相关性,在此基础上构建了四种不同形式的分布式气 温指数径流模型,分别对乌鲁木齐河源1号水文断面不同尺度下径流进行估算。

1 材料与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于乌鲁木齐河源1号冰川水文断面(43°6.9′N 86°49.3′E ,海拔3659m)以上,流域面积为3. 34km²(图1),其中冰川面积为1.71km²。1号冰川水文站附近设有气象场,对气温、相对湿度等气象要素

 ^{*} 收稿日期: 2012 - 5 - 24; 修回日期: 2012 - 7 - 13。
基金项目: 国家自然科学基金课题(41030527,41130638,41001006)资助。
作者简介: 崔玉环(1983 -),女,汉族,甘肃庄浪人,博士研究生,主要从事寒区水文研究。E - mail: cuiyh@lzb.ac.cn

进行观测,另外有大西沟气象站从1958年至今的长期气象观测资料。

1.2 数据准备

• 120 •

基础数据主要包括 ASTER GDEM 数据,以及由此生成的坡度和坡向数据。模型采用 Alberts 坐标(双标准线等积圆锥投影) 格网大小为 30m × 30m,共 248 × 236 个网格。计算年份为 1980 – 2006 年,时间分辨率分别为天,旬,月和夏季。

水文气象数据包括大西沟气象站 1980 – 2006 年 6 – 8 月逐日气压、气温、风速、降水量、相对湿度和日 照时数 1 号水文断面 1980 – 2006 年逐日径流数据。



图1 乌鲁木齐河源区1号冰川及气象站、水文站位置示意图

Fig. 1 The location of the Glacier No. 1 and the meteorological stations and hydrological stations

1.3 数据处理

1.3.1 常规气象数据处理

计算中采用梯度插值法将大西沟气象数据插值到每一个单元格,气温插值梯度为 – 0.6°/(100m)^[10] 降水数据采用叶柏生等^[11]提出的修正方法进行修正,其插值梯度为4.2 %/(100m)^[12],相对湿度、大气压强用大西沟气象数据代替。

1.3.2 太阳辐射数据校正

文中所用不同时间尺度太阳辐射数据是在阳坤提出的单点晴空逐时太阳辐射模型^[13,14]基础上引入 地形遮蔽因子 地形校正参数和天空视因子校正得到。其中地形遮蔽因子(X_{sun}),当计算单元格在某一时 刻可照时,当太阳高度角(θ_s)大于指向太阳方位角的天空张角($\theta_{h,gs}$)时,其值为1,否则,值为0。具体计 算过程参考文献^[15]。

地形校正公式^[16]如下式:
$$f_c = 1 + \frac{tani}{tan\theta_s} cos(\varphi_s - j)$$
 (1)

式中: $i \ \pi \theta_s$ 分别为坡地的坡度和太阳高度角; $\varphi_s \pi_j$ 分别为太阳方位角和坡地坡向角(以正北向为 0 顺时针方向旋转 360 度)。

天空可视因子的算法采用 Manners^[17,18]等的方法,计算中考虑周围八个方位(正北,东北,东,东南, 南,西南,西和西北)上单元格对计算单元格的影响。

式中: F_{sky} 为天空可视因子 v_{Φ} 表示在一个给定的坡地系统中 Φ 方位的天空张角 , T_{Φ} 表示倾斜角 ,即 坡面和坡面与 Φ 方位顶点连线之间的夹角。

在缺乏详细天气状况,尤其是云的影响情况下,一般是采用日晴空指数对一日内小时尺度或更小尺度的短波辐射进行以日为单位的系统调整。文中采用晴空指数校正方法^[19]。

1.4 研究方法

1.4.1 径流影响因素

自 1980 年以来,1 号水文断面径流呈现明显增加趋势,尤其 1993 年以后增加更为明显。与此同时, 大西沟气象站气温也呈现明显增加趋势,尤其是 1993 以后,呈现急剧增加趋势(图2)。韩添丁等^[5]对气 温、降水变化对径流的影响进行了统计分析,结果表明径流与夏季气温和降水呈正相关关系,其变化主要 受夏季气温控制。在其基础上,文中分别对不同时间尺度下1号水文断面径流量与气温、降水、相对湿度 和太阳辐射的相关关系进行统计。





Fig. 2 The changes of runoff , temperature and precipitation during 1980-2006

而后对 1980 – 2006 年夏季 1 号水文断面径流深和经梯度插值所得的气温、降水和相对湿度数据,1 号冰川区平均太阳辐射等气象要素进行相关性分析(表1)。

表1 不同时间尺度径流量与气象要素相关性分析

1ab. 1	The relationship	between	runoff	and	meteore	ological	elements

	校正后降水	相对湿度	气温	太阳辐射
日径流深/(mm)	0.005	-0.061 * *	0.631**	0.057**
旬日均径深/(mm)	0.116	0.013	0.776**	-0.071
月日均径流深/(mm)	0.172	0.005	0.807**	-0.137
夏季日均径流深/(mm)	0.385*	0.109	0.744 * *	0.114

注: * * 表示在 0.01 水平(双侧) 上显著相关; * 表示在 0.05 水平(双侧) 上显著相关。

从表中可以看出,日尺度下,影响径流的因素主要是气温,其次太阳辐射和相对湿度,降水与其相关性 不显著;旬尺度上,气温与径流的相关性有所提高,太阳辐射和相对湿度对径流的影响减小,降水有所增 加;月尺度上径流的主要影响因素为气温,相关系数达到0.807,降水和太阳辐射影响有所增加,但不显 著;夏季尺度上,径流与气温、降水分别在0.01和0.05的显著性水平上相关,其他影响因素不显著。由此 可以得出:日径流的波动较大,除了受到气温波动影响外,太阳辐射的时空分布也对其有重要影响;随着时 间尺度的增加,降水对径流的影响逐渐增加,其他影响因素作用逐渐被平滑掉了,径流与气温的关系变得 越来越紧密。

1.4.2 融水径流模型构建

基于以上分析 ,用统计回归方法分别建立4类日、旬、月和夏季尺度的融水径流模型。	
R – T 模型(模型 I) : R = a • e ^{bTa} + c	(4)
R – T – Rs 模型(模型 II) : R = a • e ^{b(T_a+d·Rs)} + c	(5)

(6)

(7)

R - T - Rs - Rh模型(模型 III): $R = a \cdot e^{b(T_a + d \cdot Rs)} + f \cdot Rh + c$

R - T - Rs - Rh - P模型(模型 IV): $R = a \cdot e^{b(T_a + d \cdot Rs)} + f \cdot Rh + g \cdot P + c$

式中: a, b, c, d, f, g为率定常数 R, T, Rs, P和 Rh

表 2 径流模型参数率定结果 Tab. 2 The results of parametric regression

分别为单点消融量、气温、太阳短波辐射、降水量和相对湿度。

2 结果与分析

2.1 参数率定

径流模型所需的参数共有6个,计算中选择1980-1995年夏季为模型参数率定期,用非线性回归统计方法率 定得到不同时间尺度下径流模型参数(表2)。

2.2 模型验证

选择 1996 - 2006 年夏季为模型验证期,分别统计了 日,旬,月和夏季不同时间尺度下四种冰川融水径流模型 (Ⅰ,Ⅲ,Ⅲ,Ⅳ)的模拟精度,并分析了不同气象因素的加 入对模型模拟精度的改进效果(图 3 - 6)。

从图中可以看出:对于逐日径流模型,加入太阳辐射 (Ⅱ)和相对湿度(Ⅲ)对模拟精度提高较多,与实测径流的 相关系数均比只考虑气温的气温指数模型(Ⅰ)提高0.03, 标准误差分别减小0.27和0.31mm;对于旬、月均径流模 型,根据气温指数模型(Ⅰ)就能得到较好的模拟结果,与

			口尔达	旬日均	月日均	夏季日均		
			口12元 描刊会称	径流	径流	径流		
			候空参数	模型参数	模型参数	模型参数		
		а	9.215	8.879	6.554	7.782		
]	Ι	b	0.120	0.180	0.258	0.263		
		с	-4.146	-4.512	-2.356	-3.728		
		а	11.489	8.909	6.381	14.955		
	п	\mathbf{b}	0.132	0.18	0.262	0.165		
	ш	с	-3.719	-0.727	1.349	-4.190		
		d	-1.350	-18.300	- 16.800	-34.000		
Ш		а	11.418	8.669	6.109	43.994		
		\mathbf{b}	0.121	0.186	0.27	0.06		
	с	-5.950	-4.605	-1.117	-36.343			
	d	-0.581	-5.790	- 10.800	-26.900			
		f	0.017	0.036	0.037	0.042		
		а	12.871	9.169	7.236	- 5067.846		
		\mathbf{b}	0.099	0.185	0.246	-0.001		
IV	π <i>ι</i>	с	- 19. 169	-17.394	- 10.864	5060.128		
	IV	d	0.578	10.800	0.537	-4.930		
	f	0.011	0.020	0.022	0.024			
	g	0.129	0.136	0.099	0.164			



图 4 旬日均径流模拟精度评价

Fig. 4 The evaluation on the accuracy of ten days average of daily runoff simulation in 1996 - 2006

实测径流的相关系数分别达到 0.79 和 0.83 标准误差分别为 2.68 和 2.18 mm,加入降水、相对湿度和太阳辐射之后模型模拟精度有所提高,但提高不多 模型 Ⅳ 模拟与实测径流的相关系数分别为 0.84 和 0. 85;对于夏季日均径流模型,在气温指数模型(I)上加入太阳辐射(II)和相对湿度(III)对模型精度提高不多,但降水数据的引入明显提高了径流的模拟精度,与实测径流的相关系数比模型 III 提高了 0.03。这



图 6 夏季日均径流模拟精度评价

Fig. 6 The evaluation on the accuracy of daily runoff simulation in summer of 1996 – 2006 一结论也与表 1 中相关分析的结论一致,即逐日径流与气温、太阳辐射和相对湿度显著相关,旬、月均径流 只与气温显著相关,而夏季日均径流与气温和降水显著相关。依据以上分析,对于日,旬,月和夏季不同时 间尺度分别选择模型Ⅲ、I、I和Ⅳ进行深入分析。

日,旬,月和夏季不同时间尺度径流模拟和实测径流对比分析结果(图7-10)。对于日径流模拟,其 低值和波动趋势能够得到较好的模拟,但峰值部分模拟不够,这主要是由于液态降水直接作用于径流,而 模型中没有充分考虑固、液态降水对径流的作用造成的。旬、月径流模拟精度比日尺度模型有明显提高, 相关系数分别达到0.79和0.83 除了个别峰值模拟误差较大外,基本能准确刻画出径流的波动规律。夏 季径流模拟采用模型 IV 模拟与实测径流结果一致,相关系数可达到0.80。



图 7 日均径流模拟值与实测值对比

Fig. 7 Comparison of the summer daily runoff simulation with observation in 1996 - 2006

3 讨论

对于乌鲁木齐河源径流估算方面,康尔泗等^[5]用能量平衡方法做过计算,但由于能量平衡模型所需

• 124 •



图 8 旬日均径流模拟值与实测值对比

Fig. 8 Comparion of the ten days average of daily runoff simulation with observation in 1996 - 2006

图 9 月日均径流模拟值与实测值对比

Fig. 9 Comparion of the monthly average of daily runoff simulation with observation in 1996 - 2006

图 10 夏季日均径流模拟值与实测值对比

Fig. 10 Comparion of the average summer daily runoff simulation with observation in 1996 - 2006

参数较多 推广使用有一定难度;韩添丁等^[7]用统计回归方法估算了1号水文点、空冰斗水文点和总控水 文点逐日径流 模拟结果较好;卿文武^[9]用多个站点气温、降水数据通过统计回归方法分别计算了1号水 文断面和总控水文断面径流,总控水文断面模拟精度高于1号水文断面。前人只是根据径流与气温、降水 数据的统计关系建立日尺度径流估算模型,而没有考虑不同时间尺度下其他气象要素(如太阳辐射、相对 湿度) 对径流估算的影响。因而,文中在前人研究结果的基础上分析不同时间尺度下气象要素(如气温、 降水、相对湿度和太阳辐射等) 与径流之间的统计关系,在此基础上构建了四种不同形式的分布式气温指 数径流模型,并对乌鲁木齐河源1号水文断面径流进行估算,结果表明径流与气温的关系最为密切;太阳 辐射对日尺度径流估算影响较大,其他时间尺度影响不大。

由于气温、降水、相对湿度和太阳辐射等气象要素之间本身具有一定相关性,其相互影响,共同决定了 冰川消融与径流变化的气候环境。因而,诸多气象要素对不同时间尺度径流估算的贡献差异,可从气象要 素之间的相关关系进一步分析。不同时间尺度下不同气象要素之间的相关性分析(表4)。日尺度下各气 象之间都有一定相关性,随着时间尺度的增加,尤其是月、旬尺度下,气温和降水之间几乎没有相关性,气 温和太阳辐射的相关性也明显降低,这也是月、旬尺度下考虑气温的单因子模型就能得到较好模拟的结 果,而加入其它要素之后对模拟精度提高不多。夏季尺度气象要素之间相关性有所提高,这也是回归模型 中加入降水后模拟精度提高较多的原因。

表4 不同时间尺度气象要素相关性

Tab. 4 The correlation between the meteorological elements at the different time scales

	降水(P)					相对湿度(Rh)			气温(T)			太阳辐射(Rs)				
-	日	旬	月	季	日	旬	月	季	日	旬	月	季	日	旬	月	季
Р	1.00	1.00	1.00	1.00	0.53	0.54	0.50	0.31	-0.29	-0.08	0.02	0.29	-0.49	-3.44	-0.18	-0.10
Rh	0.53	0.54	0.50	0.31	1.00	1.00	1.00	1.00	-0.46	-0.24	-0.22	-0.20	-0.68	-0.54	-0.42	-0.48
Т	-0.29	-0.08	0.02	0.29	-0.46	-0.24	-0.22	-0.20	1.00	1.00	1.00	1.00	0.26	0.02	-0.08	0.33
Rs	-0.49	-3.44	-0.18	-0.10	-0.68	-0.54	-0.42	-0.48	0.26	0.02	-0.08	0.33	1.00	1.00	1.00	1.00

需要说明的是,乌河源降水以固态为主,不能直接作用于径流,只能依赖气温对固态降水消融后作用于径流。因而,无论在何种时间尺度下,径流与气温的关系最为密切;太阳辐射与气温有着密切联系,冰面 太阳辐射的空间差异导致产流量的差异,因而有必要引入太阳辐射时空变化数据对现有的气温指数径流 模型进行修正。

4 结论

冰川融水径流是中国西部生态和生活用水的来源之一。文中选择具有长期观测基础的乌鲁木齐河源 1 号冰川为研究区,分析不同时间尺度下气象要素(如气温、降水、太阳辐射、相对湿度等)与径流之间的统 计关系,在此基础上构建了四种不同形式的分布式气温指数径流模型,并对1号水文断面的径流变化进行 分析,得到以下主要结论:

(1) 在日尺度下 影响径流的因素主要是气温,其次太阳辐射和相对湿度;旬、月尺度上,径流的主要 影响因素均为气温;夏季尺度上,径流的影响因素为气温和降水。这是因为日径流的变化除了受到气温影 响外,太阳辐射的时空分布对其也有重要影响;随着时间尺度的增加,降水对径流的影响逐渐增加,其他影 响因素作用逐渐被平滑掉了,径流与气温的关系变得越来越紧密。

(2)对于日径流模拟,其低值和波动趋势能够得到较好的模拟,但峰值部分模拟不够相关系数为0.
71标准误差为2.37mm,是由于现有模型中没有充分考虑固、液态降水对径流的作用;旬、月和夏季径流模拟精度比日尺度有明显提高,除了个别峰值模拟误差较大外,基本能准确刻画出径流的波动规律,相关系数分别为0.79 (0.83 和 0.80。

参考文献

[1] 秦大河, 丁永建. 冰冻圈变化及其影响研究 - 现状、趋势及关键问题[J]. 气候变化研究进展 2009 5(4):187-195.

[2]姚檀栋 刘时银 蒲健辰 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.

[3] 蓝永超 吴素芬 韩萍 等. 全球变暖情境下天山山区水循环要素变化研究[J]. 干旱区资源与环境 2008 22(6):99-104.

- [4] 蓝永超 ,沈永平 ,吴素芬 ,等. 近 50 年来新疆天山南北坡典型流域冰川于冰川水资源的变化 [J]. 干旱区资源与环境 2007 21(11): 1 8.
- [5] 康尔泗 Atsumu Ohmura. 天山冰川作用流域能 水 质平衡和水文流量模型研究[J]. 科学通报 1993 38(10):925 929.

[6] Ye B S, Yang D Q, Jiao K Q, et al. The Urumqi river source glacier No. 1, Tianshan, China: Change over the past 45 years [J]. Geophysical Research Letters, 2005 32: L21504.

[7] 韩添丁,丁永建,焦克勤,等.天山乌鲁木齐河源冰雪径流的极值分析[J].冰川冻土 2005 27(2):276-281.

[8] 焦克勤 叶柏生 韩添丁 .等. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川径流对气候变化的响应分析 [J]. 冰川冻土 2011 33(3):606-611.

[9]卿文武. 典型流域冰川消融及径流估算[D]. 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所博士毕业论文 2012:31-35.

[12]叶柏生. 气候变化对天山山区水资源影响的若干研究[D]. 兰州:中国科学院兰州冰川冻土研究所博士毕业论文 ,1994: 49-50.

- [14]Kun Yang , Toshio Koike , Baisheng Ye. Improving estimation of hourly , daily , and monthly solar radiation by importing global data sets [J]. Agricultural and Forest Meteorology , 2006 , 137: 43 - 55.
- [15] Lee Weiliang, Liou K N Alex Hall. Parameterization of solar fluxes over mountain surfaces for application to climate models [J]. Journal Geophysical Research, 2011, 116: 1101 – 1113.
- [16] Helbig N, Löwe H, Mayer B, et al. Explicit validation of a surface shortwave radiation balance model over snow covered complex terrain [J]. Journal Geophysical Research, 2010, 115, D18113, doi: 0.1029/2010JD013970.
- [17] Manners J, Vosper S B, Robers N. Radiation transfer over resolved topographic features for high resolution weather prediction [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2011 (2011): 956 967.
- [18] Müller D, Dieter Scherer. A grid and subgrid scale radiation parameterization of topographic effects for mesoscale weather forecast models [J]. American Meteorological Society, 2005, 133: 1431 – 1442.
- [19] Rensheng Chen, Ersi Kang, Xibin Ji, et al. An hourly solar radiation model under actual weather and terrain conditions: A case study in Heihe river basin [J]. Energy, 2007, 32 (2007): 1148 – 1157.

The runoff simulations for the Glacier No. 1 hydrologic section at the headwaters of the Urumqi river on the different timescales

CUI Yuhuan¹, YE Baisheng¹, WANG Jie², LIU Youcun³

(1. State Key Laboratory of Cryospheric Sciences, CAREERI, CAS, Lanzhou 730000, P. R. China;

2. Resources and Environmental Engineering Institute , Anhui University , Hefei 230039 , P. R. China;

3. Key Laboratory of Water Environment and Water Resources, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, P. R. China)

Abstract: The correlation analysis between the meteorological factors and the measured runoff from the stations of Glacier No. 1 at the Urumqi River was conducted and the main factors which influence the runoff change on the different time scales were analyzed firstly, and four types of runoff models were established based on regression statistics. Then, the contributions of the meteorological factors to runoff change were analyzed by comparing the different models. The conclusions were showed as follow. 1) Air temperature is the primary factor affecting runoff on day timescale, solar radiation is the second and relative humidity is the third; for the ten – days and month timescale, air temperature is also the primary factor affecting runoff; for the month timescale, air temperature and precipitation become the two main factors to affect runoff. 2) The valley values and volatility trends of daily runoff can be well simulated, but the peak part of the simulation is not enough, with the correlation coefficient 0. 71, a standard deviation 2. 37mm. The runoff simulations for ten – days, month and summer periods are proved with the higher accuracy, comparing to that of daily timescale, with the correlation coefficients of 0. 79, 0. 83 and 0. 80. The above conclusions provide the scientific reference for the simulation and monitoring of the dynamic changes of glacier runoff for long period.

Key words: glacier runoff; solar radiation; climate change; headwaters of the Urumqi River

^[11]叶柏生 杨大庆,丁永建,等. 中国降水观测误差分析及其修正[J]. 地理学报 2007,62(1):3-13.

^[13] Yang K, Huang G W, Tamai N. A hybrid model for estimating global solar radiation [J]. Solar Energy, 2001, 70:13-22.