

文章编号: 1008-2786-(2018)5-722-09

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000368

天山北坡奎屯河流域径流模拟及 对气候变化的敏感性分析

赵琳林¹, 孙美平^{1, 2*}, 孙 皓¹, 巩宁刚¹, 闫露霞¹

(1. 西北师范大学 地理与环境科学学院, 兰州 730070;

2. 中国科学院西北生态环境资源研究院 冰冻圈科学国家重点实验室, 兰州 730000)

摘 要: 利用乌苏气象站和将军庙水文站 1964—2009 年气象与水文数据, 将月径流分为消融期和非消融期进行研究, 并结合第一和第二冰川编目数据以及 1979—2009 年分辨率为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 的 CMFD 数据, 基于 BP 人工神经网络模型对新疆天山北麓奎屯河流域消融期月径流进行模拟及气候变化的敏感性分析, 结果表明: (1) 奎屯河流域年径流量总体呈上升趋势, 消融期径流增速与年径流增速十分接近, 非消融期径流变化不甚显著。 (2) 通过对比分析, 发现将气温、降水、日照时数、风速和相对湿度等五种气象要素作为输入的神经网络模型性能最佳。根据两次冰川编目的冰川储量变化值确定的 5-7-1 结构的 BP 人工神经网络模拟结果较好, 可用于奎屯河流域径流模拟。 (3) 奎屯河流域消融期径流对气温、降水和日照时数的敏感性较高, 对相对湿度和风速的敏感性较低, 除风速其他四个要素对径流均起促进作用。降水不变, 气温升高 0.5°C 、 1°C 和 2°C 时, 径流分别较 2000—2009 年消融期月径流平均值增加 4.62%、9.13% 和 18.30%; 气温不变, 降水增加 10% 时, 径流将增加 9.78%。气温和降水同时作用时, 径流增加幅度明显高于仅气温或仅降水作用下的情景。

关键词: 月径流模拟; 敏感性分析; 冰川储量; BP 人工神经网络; 奎屯河流域

中图分类号: P933

文献标志码: A

寒区是我国重要的水资源发源地, 在全球变暖背景下, 冰川消融不断加剧, 水资源短缺等问题随之产生, 了解寒区径流变化特征对合理开发利用该区域水资源有着重要意义^[1-2]。寒区自然环境恶劣, 实地数据难以获取, 建立有效径流模拟势在必行。水文模型是水文研究的重要部分, 既可为水文研究提供理论依据, 亦可应用于实际^[3-4], 但水文模型因内在机理复杂, 所需实测变量及参数种类多等特点难以普遍试用^[5], 因此有必要探索新的途径。

人工神经网络是模仿人脑神经结构设计的一种

非线性数学方法, 在数据处理、模式识别及预测等方面具有传统数学方法不具备的优势, 是解决地学中非线性问题的一大利器^[6-9], 能够描述水文系统的复杂非线性特征。人工神经网络已较多地应用于径流模拟预报领域, 在寒区也具有其适用性。Buch A M 等^[10]以喜马拉雅冰川流域的 Chhota Shigri 冰川为例, 通过对比发现人工神经网络模拟冰川径流的结果更佳, Chen and Ding^[11]利用人工神经网络对新疆托木尔峰南坡的科其喀尔冰川进行径流模拟, 证明以气象变量为输入的人工神经网络对冰川融水径

收稿日期 (Received date): 2018-04-05; **改回日期** (Accepted date): 2018-09-20

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金项目 (41561016); 中国博士后科学基金 (2015M572619); 西北师范大学创新团队项目: 冰冻圈变化 (NWN - LKQN - 14 - 4) 资助。[National Natural Science Foundation of China (41561016); China Postdoctoral Science Foundation (2015M572619); Innovative Team Project of Northwest Normal University; Changes of Cryosphere (NWN - LKQN - 14 - 4)]

作者简介 (Biography): 赵琳林 (1994 -), 女, 黑龙江齐齐哈尔人, 硕士研究生, 研究方向为寒旱区水文与气候变化。[ZHAO Linlin (1994 -), female, born in Qiqihaer, Heilongjiang province, M. Sc. candidate, research on hydrology and climate change in cold and arid regions] E-mail: geozhao1994@163.com

* **通讯作者** (Corresponding author): 孙美平 (1982 -), 女, 辽宁沈阳人, 博士, 副教授, 主要从事寒区旱区气候变化及水文过程方面研究。[SUN Meiping (1982 -), female, born in Shenyang, Liaoning province, Ph. D., associate professor, specialized in climate change and hydrological processes in cold and arid regions] E-mail: sunmeiping1982@163.com

流模拟结果理想。Ouiroga V M 等^[12]利用 BP 人工神经网络结合冰川能量平衡模型对安第斯山脉多条冰川进行径流模拟,对比分析证明 BP 人工神经网络模拟精度更高。牟丽琴等^[13]通过优选得到适用于乌鲁木齐河源 1 号冰川径流模拟的最佳人工神经网络结构。研究表明,基于径流分类的人工神经网络具有其优越性,张勃等^[14]基于 BP 人工神经网络分汛期和非汛期对黑河流域莺落峡进行径流模拟预测,证明径流分类后模型模拟精度高于分类前,邵月红等^[5]基于 Elman 动态神经网络,分丰水期、半湿润期和枯水期对沂沭河流域上游的临沂子流域径流进行模拟,证明分类后的神经网络性能更佳。

近几十年来,天山地区持续升温导致山地冰川消融加剧,对该地区水资源产生较大影响^[15-17]。奎屯河流域是新疆天山北坡重要的水资源来源,对该流域的径流模拟预测研究具有现实意义^[18]。穆艾塔尔·赛地等^[19]利用水文气象资料及冰雪遥感数据,基于 SRM 模型对奎屯河流域融雪日平均流量的模拟,证明 SRM 模型在该流域融雪径流模拟中具有较好的适用性;王瑾杰等^[20]通过修正 SCS 模型参数对奎屯河流域春季融雪期进行日径流模拟,可为其他下垫面条件相似的流域径流模拟提供参考;陈心池等^[21]利用 MODIS 遥感数据提取流域积雪覆盖率,结合气象数据,分三种不同模型对奎屯河流域进

行径流模拟,证明三种模型对新疆山区中小流域防洪预警都具有一定指导意义。以上研究对寒区径流模拟奠定了一定的基础,但上述径流模拟方法所需关于冰川的实地测量数据种类较多,对时间分辨率要求较高,操作较困难,获取难度较大。关于 BP 人工神经网络模型的寒区径流模拟研究亦是如此,并且在确定网络隐含层节点数时,以往研究多采用试错法或经验公式法。本文尝试利用两次冰川编目数据计算 1964—2009 年 46 年间奎屯河流域冰川储量变化,并将其作为确定模型隐含层节点数的参数,避免了各冰川分量复杂的测量、处理和计算过程。冰川对径流的贡献主要表现在消融期^[22],有关该流域径流分类模拟及敏感性分析的研究较少,本文利用较易获取的数据将奎屯河流域径流分消融期(5—10 月)和非消融期进行研究,基于 BP 人工神经网络对该流域消融期径流进行模拟,并在此基础上分析了其对气候变化的敏感性,以期对该流域乃至北疆地区水资源开发利用等方面提供科学依据。

1 研究区概况

奎屯河流域($43^{\circ}30' \sim 45^{\circ}00'N$, $83^{\circ}30' \sim 85^{\circ}08'E$)位于天山北麓中段,发源于新疆天山山脉依连哈比尔尕山(图 1),集水面积约 1945 km^2 ,干流全长

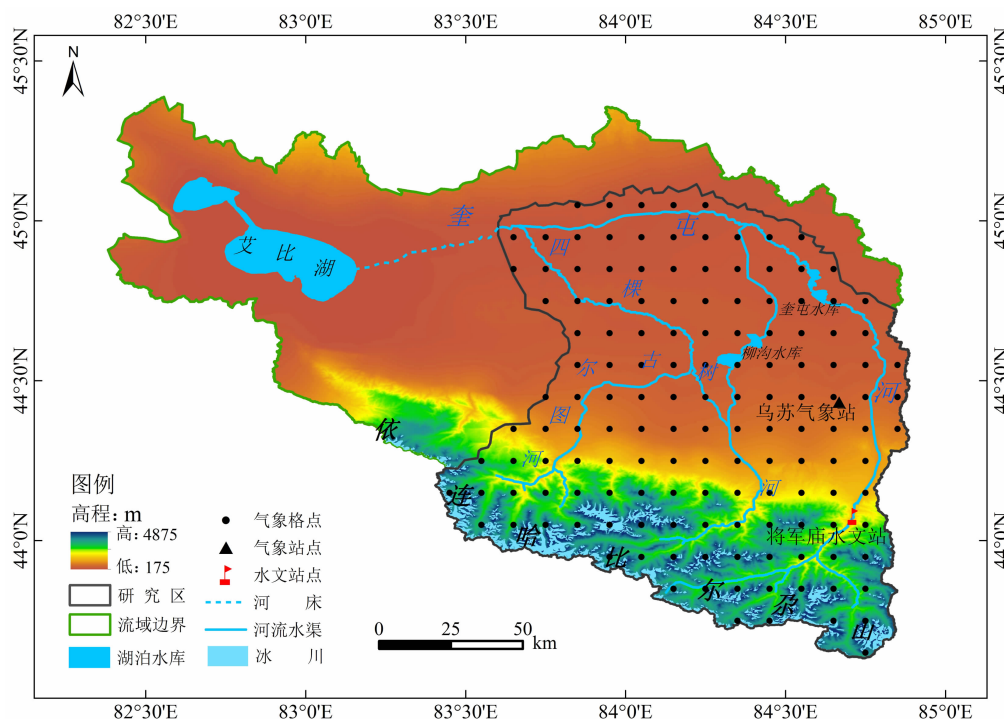


图 1 奎屯河流域、水文气象站点及冰川分布图

Fig. 1 Hydrological and meteorological stations and glaciers in the Kuytun River Basin, Xinjiang province, China

360 km, 自东向西依次为奎屯河、四棵树河和古尔图河, 向北流入艾比湖, 但自 20 世纪 50 年代以来, 由于大规模的开发建设等缘故, 奎屯河已完全断流, 20 多年来几乎无水入湖。该流域主要呈南高北低, 东高西低的态势, 山前平原区地面平坦, 集流缓慢, 下渗量大。海拔 1800~2600 m 以原始森林为主; 海拔 2600~3700 m 主要分布高山草甸和灌木; 海拔 3700 m 以上发育有冰川及永久性积雪。据第二次冰川编目统计, 奎屯河流域共有各类冰川 281 条, 面积约 147.66 km², 冰川储量约 7.21 km³, 冰川覆盖率为 7.59%。该流域年内径流分配主要集中在 6、7、8 月, 多年平均径流量为 6.51×10^8 m³, 属于降水与冰川融水混合补给型河流。奎屯河流域属中温带大陆性干旱气候, 多年平均气温 6.8℃, 降水稀少且年际变化大, 最大与最小年降水量之差 233 mm, 最大降水出现时间主要集中在 6—8 月, 约占全年的 60%。

2 数据与方法

2.1 数据来源

本文所用 BP 人工神经网络输入数据包括中国气象局发布的乌苏气象站 1964—2009 年 5—10 月的日照时数、平均风速和平均相对湿度数据, 1964—1978 年 5—10 月月平均气温和月平均降水数据。来自寒区旱区科学数据中心 (<http://westdc.westgis.ac.cn/data>) 1979—2009 年 5—10 月分辨率为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 的平均气温和平均降水数据, 输出数据为将军庙水文站 1964—2009 年 5—10 月实测径流数据。确定消融期隐含层节点数的数据为第一次冰川编目 (1964 年) 和第二次冰川编目 (2009 年) 数据。

2.2 研究方法

2.2.1 BP 人工神经网络

1986 年, Rumelhart 和 McClelland 等提出 BP 人工神经网络模型, 其基本思想是信息正向传递和误差反向传递的同时修正网络权值和阈值。输入信息传递的方向为输入层—隐含层—输出层, 若输出层未得到期望输出, 就将误差信号转回网络反向传播, 向后传播的同时修正各层神经元的权值和阈值, 将系统误差分给每一层, 直到网络实际输出达到期望输出或学习次数已达到事先设定值。只有当神经元对所有输入信号的综合处理结果超出某一个限定值

后才会输出一个信号^[23]。BP 网络具体算法步骤总结已较为全面^[9-14], 本文不再赘述。

2.2.2 敏感性分析

径流对气候变化的敏感性是指流域的径流对假定气候变化情景的响应程度, 是理解气候变化对流域水资源影响的重要手段。流域径流量对气候变化的敏感性可以表示为^[24-25]:

$$S_{\Delta P, \Delta T} = \frac{R_{P+\Delta P, T+\Delta T} - R_{P, T}}{R_{P, T}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $S_{\Delta P, \Delta T}$ 是径流对气候的敏感性, $R_{P, T}$ 是现状径流量, $R_{P+\Delta P, T+\Delta T}$ 是降水变化 ΔP , 气温变化 ΔT 情景下的径流量。气候条件相同时, 径流的响应程度越大, 径流量对气候变化的敏感性越强; 反之则敏感性越弱。

3 奎屯河流域径流量变化趋势及影响因素分析

3.1 奎屯河流域径流量变化趋势

1964—2009 年奎屯河流域年径流总体呈增加趋势 (图 2(a)), 增速为 0.093×10^8 m³/10a, 最大达 8.45×10^8 m³ (1987 年), 最小仅 4.43×10^8 m³ (2009 年)。46 年来, 该流域出山口多年径流变化大致经历了 4 个阶段, 1964—1981 年径流呈增加趋势, 1981—1992 年呈减少趋势, 1992—1999 年径流逐渐增加, 1999—2009 年逐渐减少。奎屯河流域月径流具有分布不均、季节变化明显的特征。5—10 月径流量占到全年径流量的 82.4%。其中, 7、8 月径流量最大, 占年径流量的 49%, 1—4 月和 11—12 月径流几乎不变 (图 2(b))。

3.2 奎屯河流域径流量变化影响因素分析

乌苏站气象资料分析表明, 1964—2009 年奎屯河流域年平均气温和降水均呈上升趋势, 气温上升速率为 $0.46^\circ\text{C}/10\text{ a}$ (图 3(a)), 降水上升速率为 $10.6\text{ mm}/10\text{ a}$ (图 3(b))。46 年间乌苏站年平均气温、年降水量与将军庙水文站年径流量相关性系数分别为 0.15 (通过 0.01 显著性检验) 和 0.35 (通过 0.01 显著性检验), 但将径流分类后发现, 消融期的月平均气温与月径流量相关性高于全年水平, 而非消融期的月平均气温与月径流量相关性低于全年水平, 降水对两时期的影响由正相关变为负相关, 同时影响程度降低 (表 1), 这是由于消融期气温对山区积雪与冰川消融有着成因关系^[18], 因此, 有必要对径流进行分类研究。将军庙水文站径流资料显示,

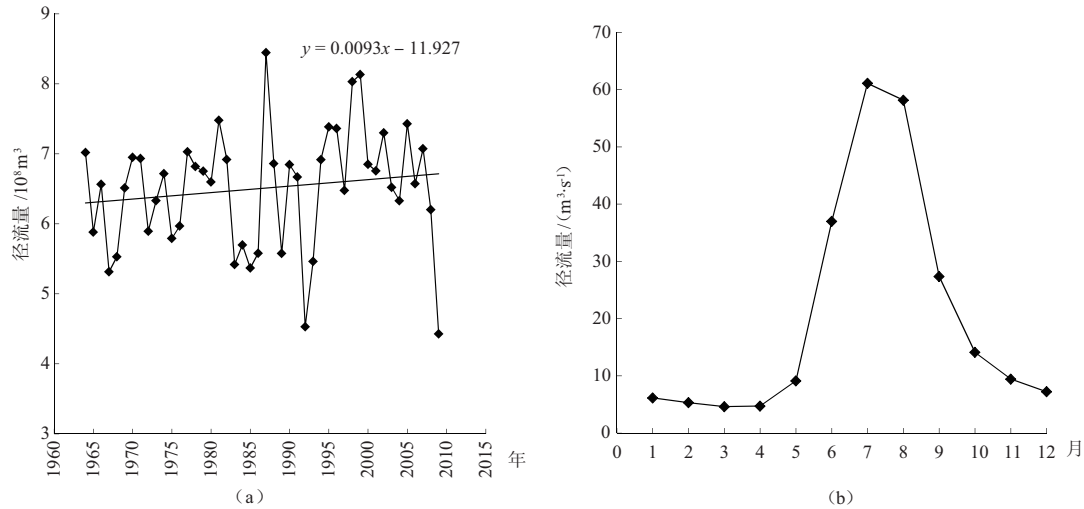


图 2 奎屯河流域年平均径流(a)和月平均径流(b)变化

Fig. 2 Annual discharge (a) and monthly mean discharge (b) from the Kuytun River Basin

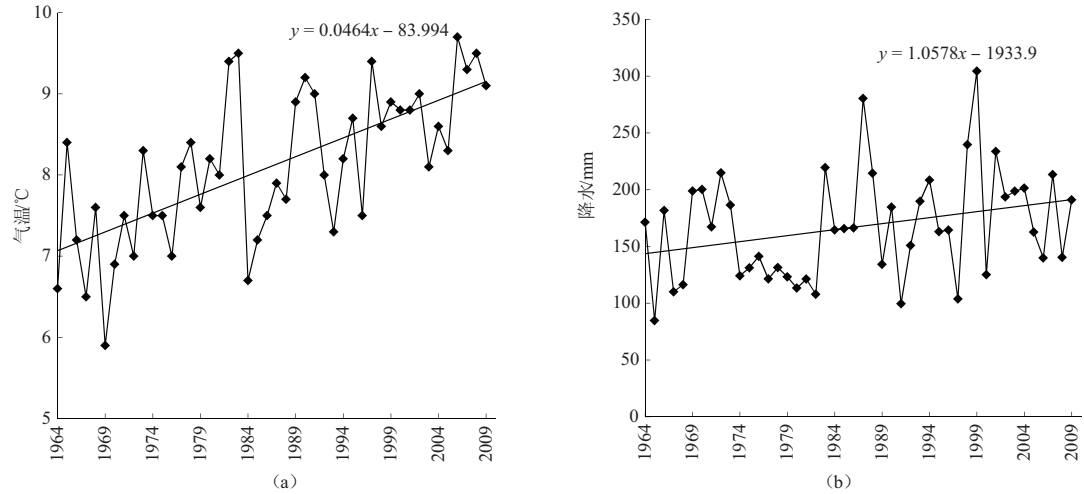


图 3 乌苏气象站年平均气温(a)和降水(b)变化趋势

Fig. 3 Variations of annual mean temperatures (a) and precipitations (b) from Usu Station during 1964—2009

奎屯河流域年径流以 $0.093 \times 10^8 \text{ m}^3/10 \text{ a}$ 的速率增加,消融期以 $0.092 \times 10^8 \text{ m}^3/10 \text{ a}$ 的速率增加,与全年增速十分接近,非消融期以 $0.00000453 \times 10^8 \text{ m}^3/10 \text{ a}$ 的速率增加,变化幅度不甚显著,消融期径流增速明显大于非消融期。本文主要以该流域消融期月径流为研究对象。

据第一次和第二次冰川编目数据显示,1964—2009 年奎屯河流域冰川减少了 12 条,面积缩减了 51.85 km^2 ,体积缩减了 3.60 km^3 (表 2),冰川融水对径流的贡献不容小觑。研究表明,影响冰川消融的因素除气温外,还包括太阳辐射、风速和相对湿度^[11-12],本文所用辐射数据为日照时数数据。

表 1 奎屯河流域径流与气温、降水的相关性分析

Tab. 1 Correlation between temperature and precipitation and discharge of the Kuytun River Basin

径流	气温	降水
年径流	0.15	0.35
消融期	0.71	-0.04
非消融期	-0.19	-0.18

表 2 奎屯河流域两次冰川编目属性值

Tab. 2 Attribute values of the First and Second Chinese Glacier Inventories of the Kuytun River Basin

冰川编目	条数/条	面积/ km^2	体积/ km^3
第一次(1964)	293	199.51	10.81
第二次(2009)	281	147.66	7.21

4 基于 BP 人工神经网络的奎屯河流域径流模拟

4.1 模型评价标准

本文选用相关性系数(R)(式2)、均方根误差(RMSE)(式3)和平均误差(ME)(式4)三个指标作为模型模拟精度评价标准。

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(f_i - \bar{f})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \sum_{i=1}^n (f_i - \bar{f})^2}} \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (f_i - y_i)^2} \quad (3)$$

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (f_i - y_i) \quad (4)$$

式中, y_i 为实测值, \bar{y} 为实测值的平均值, f_i 为模拟值, \bar{f} 为模拟值的平均值, n 为资料序列长度。

4.2 奎屯河消融期月径流 BP 模型

BP 人工神经网络模型建立包括资料预处理、输入神经元、隐含层神经元和输出神经元数目确定以及训练函数选取等模块。可供选用的网络输入要素包括研究区 1964—2009 年 5—10 月的月平均气温(T)、月平均降水量(P)、月日照时数(SD)、月平均风速(W)和月平均相对湿度(RH),网络输出为将军庙水文站 1964—2009 年 5—10 月月径流数据。在神经网络模型中,训练函数的选取与隐含层节点数的确定至关重要。根据前文径流变化特征分析,本文对奎屯河流域消融期月径流建立 BP 模型。隐含层神经元具体数目参照该时段内冰川储量变化值

确定。为使模拟结果更加可靠,将模型分为训练期和检验期,利用 1964—1993 年数据对模型进行训练,1994—2009 年数据对模型进行检验。

为了尽可能地得到最佳网络结构,本文设置了 8 种输入组合(表 3),最终将采用性能最佳的模型进行奎屯河流域消融期径流模拟。参照两次冰川编目的冰川储量变化值确定隐含层节点数为 7,对比几种函数后,模型的训练函数选用 trainlm 函数(Levenberg-Marquardt 法)。整体上,训练期的模型性能明显大于检验期。对比发现,考虑 5 个输入要素的模型 8 性能最佳。最终建立了一个具有 5 个输入神经元、7 个隐含层神经元、1 个输出神经元的结构为 5-7-1 的 BP 模型。图 4 为消融期 BP 模型模拟结果,训练期实测值和模拟值之间的相关性系数为 0.91,均方根误差为 $0.24 \times 10^8 \text{ m}^3$,平均误差为 $-0.37 \times 10^{-9} \times 10^8 \text{ m}^3$;检验期二者相关系数为 0.66,均方根误差为 $0.95 \times 10^8 \text{ m}^3$,平均误差为 $-0.04 \times 10^8 \text{ m}^3$,训练期模型精度高于检验期。

5 奎屯河流域月径流对气候变化的敏感性分析

5.1 气候变化情景设定

气温和降水是气候变化的两个主要指标,为分析奎屯河流域径流对气候变化的敏感性,在该流域 2000—2009 年消融期平均气温和降水的基础上假定了 7 个气候变化情景。降水变化用 ΔP 表示(0, +10%),气温变化用 ΔT 表示(0°C , $+0.5^\circ\text{C}$, $+1^\circ\text{C}$, $+2^\circ\text{C}$),径流变化用 ΔR 表示。此外,由于模型所用的输入数据除气温和降水外,还包括日照

表 3 消融期不同输入要素组合的 BP 模型模拟结果精度评价

Tab.3 Accuracy evaluation of simulation results of BP model with different input elements during the ablation period

模型	输入要素	训练期(1964—1993 年)			检验期(1994—2009 年)		
		R	RMSE/ 10^8 m^3	ME/ 10^8 m^3	R	RMSE/ 10^8 m^3	ME/ 10^8 m^3
模型 1	T、P	0.78	0.35	0.95×10^{-4}	0.64	1.00	-0.22
模型 2	T、P、SD	0.76	0.36	-0.51×10^{-8}	0.72	0.90	-0.45
模型 3	T、P、W	0.85	0.29	0.60×10^{-6}	0.53	1.10	-0.30
模型 4	T、P、RH	0.82	0.32	-0.25×10^{-8}	0.52	1.20	-0.19
模型 5	T、P、SD、W	0.86	0.29	0.75×10^{-10}	0.65	0.96	-0.04
模型 6	T、P、SD、RH	0.82	0.32	0.10×10^{-6}	0.49	1.17	-0.50
模型 7	T、P、W、RH	0.88	0.26	-0.16×10^{-8}	0.52	1.45	-0.16
模型 8	T、P、SD、W、RH	0.91	0.24	-0.37×10^{-9}	0.66	0.95	-0.04

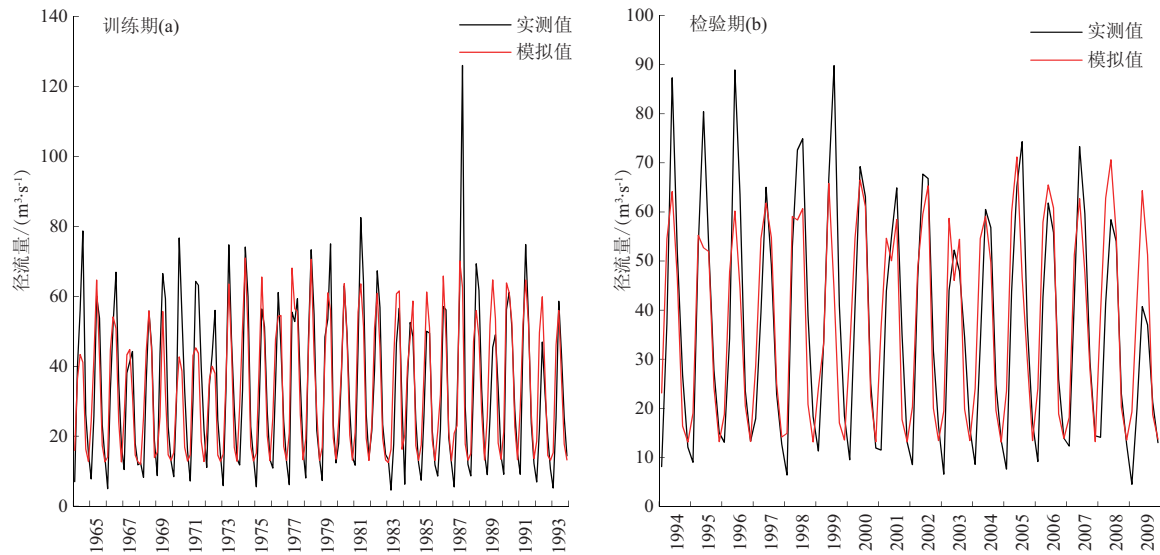


图4 消融期训练期(a)和检验期(b)模拟值和实测值对比

Fig.4 Contrast between predicated value and observed value in training stage (a) and test stage (b) during the ablation period

时数、风速和相对湿度等要素,故在气温和降水不变的条件 下加设了6个情景(表5),日照时数变化用 ΔSD 表示(+5%, +10%),风速变化用 ΔW 表示(+5%, +10%),相对湿度变化用 ΔRH 表示(+5%, +10%)。

5.2 径流对气候变化的敏感性分析

在降水不变,气温升高0.5℃、1℃和2℃的3个情景下,奎屯河流域消融期径流较1990—2009年分别增加4.62%、9.13%和18.30%。气温不变,降水增加10%时,径流较2000—2009年增加9.78%。这说明气温和降水对奎屯河流域消融期月径流均起促进作用。相关研究表明,气温是影响冰川消融的主要因素,降水的影响不甚显著^[22, 26-27]。降水对冰川径流的作用不如气温显著,一方面是由于降水发生时常伴随着降温,另一方面,冰川区降水主要为固态形式^[28-29],但研究区冰川覆盖率不大,仅7.59%,故径流受降水影响较大。此外,日照时数对径流的影响也较为显著,其他要素不变,日照时数增加5%时,径流将增加9.66%;日照时数增加10%时,径流将增加23.02%,前者径流增幅高于气温升高1℃时的结果,后者高于气温升高2℃时的结果。这是由于影响地球表面附近气温的主要因素是太阳辐射,地球通过吸收太阳的热辐射使其表面增温的同时,向周围大气辐射热量,使周围大气也增温。经计算,研究区月平均气温与日照时数的相关性高达0.81,因此日照时数对径流的作用与气温相似,本模

型同时将这两个因素作为输入要素是由于考虑到冰川的消融特性,太阳辐射和感热是构成冰川消融所需能量的两个主要因素,本文用日照时数表示太阳辐射,而研究表明,感热是气温的函数^[10-12],故在建立模型时要同时考虑气温和日照时数。风速对径流起抑制作用(表5),风速分别增加5%和10%时,径流将分别减少2.82%和5.96%。这可能是由于风速大时,蒸发作用强,带走了少部分径流。相对湿度对径流的作用不甚显著,相对湿度分别增加5%和10%时,径流将分别增加1.53%和4.23%,这可能是由于相对湿度的增加,流域蒸散发减少,进而使得产汇流损失减少,径流增加^[30]。

表4 奎屯河流域消融期径流对气温和降水变化的响应				
Tab. 4 Response of the discharge from the Kuytun River Basin during the ablation period to temperature and precipitation				
$\Delta R/\%$	$\Delta T/^\circ\text{C}$			
	0	+0.5	+1	+2
0	0.00	4.62	9.13	18.30
+10	9.78	13.90	18.14	26.92

表5 奎屯河流域消融期径流对其他要素变化的响应					
Tab. 5 Response of the discharge of the Kuytun River Basin during the ablation period to other factors					
变量	$\Delta SD/\%$		$\Delta W/\%$		$\Delta RH/\%$
	+5	+10	+5	+10	+5 +10
$\Delta R/\%$	9.66	23.02	-2.82	-5.96	1.53 4.23

6 结论与讨论

本文分析了奎屯河流域径流变化趋势及影响因素,利用该流域46年气象和水文数据以及冰川编目数据确定了结构为5-7-1的消融期BP神经网络模型,并在此基础上设置13个情景,进行了该流域消融期月径流对气候变化的敏感性分析。得到以下结论:

(1)奎屯河流域年径流量总体呈上升趋势,消融期径流增速与年径流增速接近,非消融期径流变化幅度较小,呈不显著减少趋势。

(2)将气温、降水、日照时数、风速和相对湿度全部作为输入神经元的模型性能最佳。以两次冰川编目数据的冰川储量变化值确定的消融期BP神经网络模拟结果较好,可应用于奎屯河流域消融期月径流模拟。

(3)奎屯河流域消融期气温和降水对径流均起促进作用,气温升高0.5℃,1℃和2℃时,消融期径流较2000—2009年分别增加4.62%,9.13%和18.30%。气温不变,降水增加10%,径流将增加9.78%。此外,日照时数和相对湿度对径流均起促进作用,风速对径流起抑制作用。径流对降水、气温和日照时数的敏感性较高,对相对湿度和风速的敏感性较弱。

本文对奎屯河流域消融期径流模拟结果较好,并对不同气候情景做出相应预测,可为该流域及相关流域径流预估提供借鉴,但也存在一定不足,首先,在确定模型结构时,未充分考虑冰川消融特性,另外,本研究区站点数据稀缺,而相关的格点数据起始时间较晚,种类较少,这可能也是检验期径流拟合度较差的原因。在今后的工作中,将进一步加深对冰川径流影响因素及其特性以及冰川消融机制的了解,提高挖掘数据的能力,从而丰富模型参数,提高模型精度。

参考文献 (References)

[1] 杨针娘,刘新仁,曾群柱,等. 中国寒区水文[M]. 北京:科学出版社,2000 [YANG Zhenniang, LIU Xinren, ZENG Qunzhu, et al. Hydrology in cold regions of China [M]. Beijing: Science Press, 2000; i-iv]

[2] 陈仁升,康尔泗,吴立宗,等. 中国寒区分布探讨[J]. 冰川冻土, 2005, 27(4): 469-475 [CHEN Rensheng, KANG Ersi, WU Lizong, et al. Cold regions in China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, 27(4): 469-475]

[3] 尹振良,冯起,刘时银,等. 水文模型在估算冰川径流研究中的应用现状[J]. 冰川冻土, 2016, 38(1): 248-258 [YIN Zhenliang, FENG Qi, LIU Shiyin, et al. The application progress of hydrological model in quantifying the contribution of glacier runoff to total watershed runoff [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(1): 248-258]

[4] 赵海根,杨胜天,周旭. 基于数据同化技术的延河流域绿水模拟研究[J]. 地理科学, 2017, 37(7): 1112-1119 [ZHAO Haigen, YANG Shengtian, ZHOU Xu. The simulation of green water in the Yanhe River Basin based on data assimilation [J]. Scientia Geographica Sinica, 2017, 37(7): 1112-1119]

[5] 邵月红,林炳章,刘永和. 基于径流分类的流域降雨-径流过程动态神经网络建模[J]. 地理科学, 2012, 32(1): 74-80 [SHAO Yuehong, LIN Bingzhang, LIU Yonghe. Rainfall-runoff simulation based on runoff classification using dynamic artificial neural networks [J]. Scientia Geographica Sinica, 2012, 32(1): 74-80]

[6] CLARKE G K C, BERTHIER E, SCHOOF C G, et al. Neural networks applied to estimating subglacial topography and glacier volume [J]. Journal of Climate, 2009, 22(8): 2146-2160

[7] 李双成,郑度. 人工神经网络模型在地学研究中的应用进展[J]. 地球科学进展, 2003, 18(1): 68-76 [LI Shuangcheng, ZHENG Du. Applications of artificial neural networks to geosciences: review and prospect [J]. Advances in Earth Science, 2003, 18(1): 68-76]

[8] 李净,冯姣姣,王卫东,等. 基于LM-BP神经网络的西北地区太阳辐射时空变化研究[J]. 地理科学, 2016, 36(5): 780-786 [LI Jing, FENG Jiaojiao, WANG Weidong et al. Spatial and temporal changes in solar radiation of northwest China based LM-BP neural network. Scientia Geographica Sinica, 2016, 36(5): 780-786]

[9] 周喻,吴顺川,焦建津,等. 基于BP神经网络的岩土体细观力学参数研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(12): 3821-3826 [ZHOU Yu, WU Shunchuan, JIAO Jianjin et al. Research on mesomechanical parameters of rock and soil mass based on BP neural network [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(12): 3821-3826]

[10] BUCH A M, MAZUMDAR H S, PANDEY P C. Application of artificial neural networks in hydrological modeling: a case study of runoff simulation of a Himalayan Glacier Basin[C]// International Joint Conference on Neural Networks, 1993. IEEE Xplore, 1994: 971-974

[11] CHEN C, DING Y. The application of artificial neural networks to simulate meltwater runoff of Keqikaer Glacier, south slope of Mt. Tuomuer, western China [J]. Environmental Geology, 2009, 57(8): 1839-1845

[12] QUIROGA V M, MANO A, ASOAKA Y, et al. Snow glacier melt estimation in tropical Andean Glaciers using artificial neural networks[J]. Hydrology & Earth System Sciences, 2013, 17(4): 1265-1280

[13] 牟丽琴,田富强,胡和平. 高山寒区径流预报人工神经网络模型研究——以乌鲁木齐河源区为例[J]. 水力发电学报,

- 2009, **28**(1): 62–67 [MOU Liqin, TIAN Fuqiang, HU Heping. Artificial neural network model of runoff prediction in high and cold mountainous regions: a case study in the source drainage area of Urumqi River [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2009, **28**(1): 62–67]
- [14] 张勃, 王海青, 张华. 基于人工神经网络的莺落峡月径流模拟预测[J]. 自然资源学报, 2009, **24**(12): 2169–2177 [ZHANG Bo, WANG Haiqing, ZHANG Hua. The simulation and predication of monthly runoff in Yingluoxia based on artificial neural network [J]. Journal of Natural Resources, 2009, **24**(12): 2169–2177]
- [15] 满苏尔·沙比提, 张雪琪, 马国飞. 近55a托木尔峰国家级自然保护区气候及径流变化特征[J]. 山地学报, 2017, **35**(6): 769–777 [Mansuer · SHABITI, ZHANG Xueqi, MA Guofei. Climatic and runoff characteristics of Tomur national nature reserve for recent 55 years [J]. Mountain Research, 2017, **35**(6): 769–777]
- [16] 陈亚宁, 李稚, 方功焕, 等. 气候变化对中亚天山山区水资源影响研究[J]. 地理学报, 2017, **72**(1): 18–26 [CHEN Yaning, LI Zhi, FANG Gonghuan, et al. Impact of climate change on water resources in the Tianshan Mountains, central Asia [J]. Acta Geographica Sinica, 2017, **72**(1): 18–26]
- [17] 沈永平, 苏宏超, 王国亚, 等. 新疆冰川、积雪对气候变化的响应(I): 水文效应[J]. 冰川冻土, 2013, **35**(3): 513–527 [SHEN Yongping, SU Hongchao, WANG Guoya, et al. The responses of glaciers and snow cover to climate change in Xinjiang (I): hydrological effects [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, **35**(3): 513–527]
- [18] 阿依努尔·孜牙别克, 高婧. 气候变化对天山北坡奎屯河高山区地表径流的影响[J]. 冰川冻土, 2010, **32**(6): 1186–1193 [Ayinuer ZIYABIEKE, GAO Jing. Impact of climate change on the surface runoff in the Kuytun River Basin on the north slope of Tianshan Mountains [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, **32**(6): 1186–1193]
- [19] 穆艾塔尔·赛地, 丁建丽, 阿不都·沙拉木, 等. 天山北坡山区流域融雪径流模拟研究[J]. 干旱区研究, 2016, **33**(3): 636–642 [Muaitaer · SAIDI, DING Jianli, Abudu · SHALAMU, et al. Simulation of snowmelt runoff in the catchments on northern slope of the Tianshan Mountains [J]. Arid Zone Research, 2016, **33**(3): 636–642]
- [20] 王瑾杰, 丁建丽, 张喆, 等. 奎屯河流域春季融雪期 SCS–CN 模型参数取值方法[J]. 生态学报, 2017, **37**(13): 1–10 [WANG Jinjie, DING Jianli, ZHANG Zhe, et al. Calibration of SCS model parameters regarding snowmelt season in Xinjiang Kuitun River Basin [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, **37**(13): 1–10]
- [21] 陈心池, 张利平, 闪丽洁, 等. 新疆山区中小河流洪水预报模型及其应用[J/OL]. 干旱区研究, 2017, **34**(6): 1–16 [CHEN Xinchu, ZHANG Liping, SHAN Lijie, et al. Flood prediction models and their application for the medium and small rivers in alpine area in Xinjiang [J]. Arid Zone Research, 2017, **34**(6): 1–16]
- [22] 孙美平, 李忠勤, 姚晓军, 等. 1959—2008 年乌鲁木齐河源 1 号冰川融水径流变化及其原因[J]. 自然资源学报, 2012(4): 650–660 [SUN Meiping, LI Zhongqin, YAO Xiaojun, et al. Analysis on runoff variation of Glacier No. 1 at the headwaters of the Urumqi River from 1959 to 2008 [J]. Journal of Natural Resources, 2012(4): 650–660]
- [23] 闻新, 周露, 李翔, 等. MATLAB 神经网络仿真与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 258–281 [WEN Xin, ZHOU Lu, LI Xiang, et al. Simulation and application of MATLAB neural network [M]. Beijing: Science Press, 2003: 258–281]
- [24] 姚允龙, 王蕾, 吕宪国, 等. 挠力河流域河流径流量对气候变化的敏感性分析[J]. 地理研究, 2012, **31**(3): 409–416 [YAO Yunlong, WANG Lei, LYU Xiangguo, et al. Assessing the sensitivity of runoff to climate change in Naoli River Watershed, northeast China [J]. Geographical Research, 2012, **31**(3): 409–416]
- [25] SOLOMON S D, QIN M, MANNING Z, et al. IPCC, 2007. Climate change 2007: the physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [J]. Computational Geometry, 2007, **18**(2): 95–123
- [26] 王盛, 蒲健辰, 王宁练. 祁连山七一冰川物质平衡及其对气候变化的敏感性研究[J]. 冰川冻土, 2011, **33**(6): 1214–1221 [WANG Sheng, PU Jianchen, WANG Ninglian. Study of mass balance and sensibility to climate change of Qiyi Glacier in Qilian Mountains [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, **33**(6): 1214–1221]
- [27] 怀保娟, 李忠勤, 孙美平, 等. 近 40a 来天山台兰河流域冰川资源变化分析[J]. 地理科学, 2014, **34**(2): 229–236 [HUAI Baojuan, LI Zhongqin, SUN Meiping, et al. [Glaciers change in the Tailan River Watershed in the last 40 years [J]. Scientia Geographica Sinica, 2014, **34**(2): 229–236]
- [28] 何晓波, 丁永建, 刘时银, 等. 慕士塔格卡爾塔馬克冰川水文观测与特征分析[J]. 冰川冻土, 2005(2): 262–268 [HE Xiaobo, DING Yongjian, LIU Shiyin, et al. Observation and analyses of hydrological process of the Kaltamag Glacier in Muztag Ata [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005(2): 262–268]
- [29] 孙美平, 姚晓军, 李忠勤, 等. 天山东段冰雪消融与产汇流水文过程——以乌鲁木齐河源区为例[J]. 地理学报, 2014, **69**(7): 945–957 [SUN Meiping, YAO Xiaojun, LI Zhongqin, et al. Hydrological process of glacier and snow melting and runoff in Urumqi River source region, eastern Tianshan Mountains, China [J]. Acta Geographica Sinica, 2014, **69**(7): 945–957]
- [30] 刘剑宇, 张强, 陈喜, 等. 气候变化和人类活动对中国地表水文过程影响定量研究[J]. 地理学报, 2016, **71**(11): 1875–1885 [LIU Jianyu, ZHANG Qiang, CHEN Xi, et al. Quantitative evaluations of human- and climate-induced impacts on hydrological processes of China [J]. Acta Geographica Sinica, 2016, **71**(11): 1875–1885]

Discharge Simulation and Sensitivity to Climate Change of the Kuytun River Basin on the North Slope of Tianshan Mountains, China

ZHAO Linlin¹, SUN Meiping^{1, 2}, SUN Hao¹, GONG Ninggang¹, YAN Luxia¹

(1. College of Geography and Environment Sciences, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China;

2. State Key Laboratory of Cryosphere Sciences, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, CAS, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The discharges during the ablation and non-ablation periods of the Kuytun River Basin were analyzed by using the meteorological data from Usu Meteorological Station and hydrological data from Jiangjunmiao Hydrological Station during 1964—2009. Combined with the data from the First and Second Chinese Glacier Inventories and the China Meteorological Forcing Dataset (CMFD) with the resolution of $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$, the discharge during ablation period was simulated using the BP artificial neural network, and the sensitivity analysis of climate change was examined. The results showed that: (1) The annual discharge from the Kuytun River Basin presented an generally increasing trend. The trend magnitude of discharge during ablation period was close to the annual value. There was no significant trend during the non-ablation period. (2) The comparative analysis indicated that the BP artificial neural network model showed a best performance when the five meteorological elements (air temperature, precipitation amount, sunshine duration, wind speed and relative humidity) were applied as input data. The best structure of BP artificial neural network model was 5-7-1, which was determined by the change of glacier volume of the First and Second Chinese Glacier Inventories. (3) The air temperature, precipitation amount, sunshine duration and relative humidity during the ablation period of the Kuytun River Basin all played important roles in promoting discharge, but the wind speed was the opposite. The discharge was more sensitive to air temperature, precipitation amount and sunshine duration. The discharge will rise by 4.62%, 9.13% and 18.30% relative to the mean value during 2000–2009, when precipitation amount remains stable and air temperature rises by 0.5 °C, 1 °C and 2 °C, respectively. When air temperature keeps constant and precipitation amount rises by 10%, the discharge will rise by 9.78%. When air temperature and precipitation amount change simultaneously, the increase of discharge will be significantly higher than that if only air temperature or precipitation amount changes.

Key words: monthly discharge simulation; sensitivity analysis; glacier volume; BP artificial neural network; Kuytun River Basin