

人工神经网络模型预测气候变化对博斯腾湖流域径流影响*

陈喜¹, 吴敬禄², 王玲¹

(1: 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098)

(2: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

摘要: 温室气体排放量增加造成气候变化, 对全球资源环境产生重要影响. 本文利用人工神经网络模型建立月降水、气温与径流关系, 利用开都河流域降水、气温、径流资料对模型进行训练和验证, 通过试算法确定网络模型结构. 气温升高和降水量增加对径流影响的敏感程度分析表明, 气温升高和降水增加对该区域径流影响较大, 且气温升高的影响更为显著, 径流增加主要集中在夏季. 根据区域气候模型(RCMs)推算的CO₂加倍情况下西北地区气候的可能变化, 预测位于博斯腾湖流域的开都河大山口站年径流量增加38.6%, 其中夏季增加71.8%, 冬季增加11.4%.

关键词: 人工神经网络; 气候变化; 径流; 预测

Prediction of Climate Change Impacts on Streamflow of Lake Bosten Using Artificial Neural Network Model

CHEN Xi¹, WU Jinglu² & WANG Ling¹

(1: Key Laboratory of Water Resources Development, Hohai University, Nanjing 210098, P. R. China)

(2: Nanjing Institute of Geography and Limnology, CAS, Nanjing 210008, P. R. China)

Abstract: Climate change takes a great effect on global hydrology and water resources, ecology and environment, and social economic development due to an increasing concentration of greenhouse gases in the atmosphere. Relationship among streamflow and its influences of precipitation and temperature in monthly scale is developed using an artificial neural network model. The model is trained and validated based on inputs of precipitation and temperature data in Bayinbuluke hydrological station within the study catchment and output of streamflow data in the Dashankou hydrological station which controls streamflow of the Kaidu River into the Bosten Lake. The model structure is determined with a trial and error method. Sensitivity analysis of modeling streamflow to temperature rise and precipitation increase demonstrates that influences of temperature rise is more significant than that of precipitation increase, and streamflow increase is primarily concentrated in summer season. Based on input of possible future climate scenarios predicted by regional climate models (RCMs), the model prediction presents that annual streamflow would increase 38.6 percent, 71.8 percent in summer and 11.4 percent in winter.

Keywords: artificial neural network; climate changes; streamflow; prediction

近年来, 温室气体排放量增加引起的气温升高、降雨时空特征的改变等全球环境问题已成为各国政府、社会公众和科学界普遍关注的问题. 根据全球气候模型(GCMs)预测结果, 本世纪末全球气温将会上升1.4–5℃, 且降雨时空分布也会有较大改变, 这也意味着区域水平衡、河川径流和水资源将发生变化^[1]. 按区域气候模型(RCMs)预测结果, 西北地区年均气温将升高2.7℃, 年降水量平均增25%^[2], 因此, 评估气候变化对防洪、区域水资源和水环境的影响, 对未来水资源的评价、规划、开发利用和管理等具有重要意义.

全球和区域气候变化对水文水资源影响研究的开展推动了水文模型的发展, 与GCMs相匹配的水文模型具有两个特点: 分布式和参数化, 如VIC模型^[3]、多重尺度系列化水文模型^[4]、考虑气象要素和地形变化的月水文模型^[5]等. 这些模型是基于有详细地形、土壤、植被资料以及能描述流域降雨、蒸发和径流时空变

* 中国科学院南京地理与湖泊所知识创新工程重要方向性项目(CXNIGLAS-A01-2)和国家自然科学基金(40273004)联合资助. 2004-06-17 收稿; 2004-09-13 收修改稿. 陈喜, 男, 1964年生, 教授, E-mail: xichen@hhu.edu.cn.

化的资料基础上. 在观测资料有限地区, 利用水文物理模型或概念性模型难以准确计算流域径流量. 人工神经网络(ANN)模型被认为是具有输入(降雨、前期径流等)、输出(径流)黑箱系统模型^[6], 它不需要详细辨识流域物理特性, 也不需要广泛的资料, 且具有很强的容错性, 对不完整、含糊和不确定资料可以通过不断地学习做出合理的判断决策, 给出有效的预测和估计, 因此, 在洪水、环境演变预测预报等方面得到广泛应用^[7-12]. Clair 和 Ehrman 于 1996 年首次采用 ANN 模型评估气候变化对河流流量和环境的影响^[13].

开都河径流量约占博斯腾湖入流量的 80%, 因此, 预测气候变化对开都河径流影响对分析博斯腾湖水资源利用和环境演变极其重要. 本文利用人工神经网络模型建立资料系列较长且代表性较好的巴音布鲁克站月降水、气温与大山口站径流关系, 再根据 RCMs 推算的 CO₂ 加倍情况下西北地区气候的可能变化, 估算气候变化对大山口径流量影响.

1 博斯腾湖流域气象和水文特征

博斯腾湖位于中天山南坡焉耆盆地东南部博湖县境内, 是新疆目前湖面积最大的湖泊, 也是我国最大的内陆淡水湖, 盆地集水面积 $2.7 \times 10^4 \text{ km}^2$, 流入博斯腾湖的河流有开都河、黄水沟、清水河等, 常年性河流只有开都河. 开都河发源于西部积雪的高山(天山中部), 由冰雪融水补给, 全长 513 km, 流域面积 $2.2 \times 10^4 \text{ km}^2$, 年径流量达 $39.9 \times 10^8 \text{ m}^3$. 开都河上游主要水文控制站点有巴音布鲁克站、大山口和焉耆站, 下游控制枢纽浪苏木闸迫使河水自西经小湖区流入孔雀河.

开都河流域诸河、沟共有冰川 722 条, 冰川总面积为 445 km^2 ^[14]. 据 1984 年统计, 该河多年平均雪冰融水补给量约 $5.08 \times 10^8 \text{ m}^3$, 占开都河多年平均径流量的 15.2%, 丰富的雪冰水资源, 造就了开都河稳定的基流补给源. 气温变化造成高山冰川和永久性积雪的融水对开都河径流具有较大影响. 自 20 世纪 90 年代开始, 随着降水量增加和气温升高, 流量明显增大, 2000 年达到历史最丰值^[15]. 博斯腾湖水水位最高上升到了海拔 1049.6 m, 远远超过正常水位. 施雅风等认为博斯腾湖的转变被首先确认为是西北气候向暖湿转型的信号^[16]. 开都河大山口站以上实测流量变化主要受气候变化影响, 灌溉等人类活动影响较小. 大山口站以下为焉耆盆地, 该地区是新疆重要的农业基地, 灌溉用水量较大.

开都河流域内的巴音布鲁克站海拔高度为 2458.9 m, 多年平均降水量为 268 mm, 蒸发量为 1113 mm, 年平均气温 -4.6°C , 平均最高气温 10.8°C , 平均最低气温 -19.4°C . 该站降水量、蒸发量、气温等气候要素变化区域代表性较好, 且具有相对较长的实测降雨、气温、蒸发等系列资料. 为此, 本文采用巴音布鲁克站气象资料变化过程作为开都河大山口站以上区域气候变化代表站.

2 气候 - 水文响应的神经网络模型

影响流域水文过程(如流域出口断面流量)的影响因素为: 前期流量、降雨量、蒸发量、前期土壤含水量等. 对于一般流域, 通常具有降雨量、蒸发量及径流量实测系列, 径流过程变化可表述为如下非线性关系式:

$$Q_t = f(Q_{t-n}, P_t, P_{t-n}, E_t, E_{t-n}) \quad (1)$$

式中, Q_t 为当前流量, Q_{t-n} 为前期流量; P_t, P_{t-n} 为当前和前期降雨量; E_t, E_{t-n} 为当前和前期蒸发量. 对于博斯腾湖流域大山口控制站以上, 巴音布鲁克站具有较长的降雨、气温系列, 同期气温和蒸发相关关系较好(图 1), 且未来气候变化预测结果为气温升高和降水变化值, 因此, (1) 式中, 蒸发用气温替代. 影响流量的降雨和气温滞时 n 可以采用自回归滑动平均模型(ARMA)^[11]、相关分析^[12]方法确定, 本文采用试算法选择对出口断面流量影响大的降水、气温滞时.

设流域系统输入为 x_i , 输出为 y_i , u_i 为神经元内部状态, w_i 为 u_i 与其他神经元的连接权重, θ_i 为阈值, 则神经元模型为:

$$u_j = \sum \omega_i x_i - \theta_j \quad (2)$$

$$y_j = f(u_j) \quad (3)$$

各神经元节点的转移函数采用 Sigmoid 函数:

$$f(x) = [1 + \exp(-x)]^{-1} \quad (4)$$

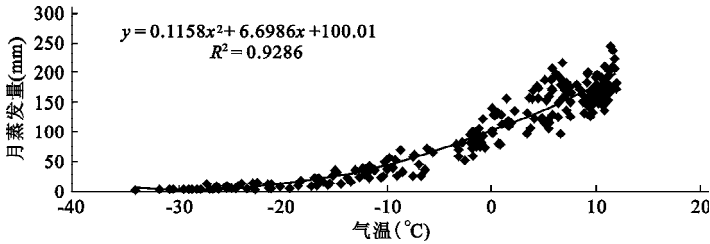


图1 巴音布鲁克站月蒸发量 - 月平均气温关系

Fig.1 Relationship between monthly temperature and monthly pan evaporation

目前,89%降雨-径流过程的神经网络模型为多层识别(MLP)模型^[6],64%采用 Sigmoid 转移函数,68%采用误差反传播的算法(BP算法)进行样本训练.本文采用 MLP 神经网络模型及 BP 算法.

首先对 1978 年 1 月-2001 年 12 月大山口站月流量、巴音布鲁克站月降雨量、月平均气温采用比例压缩法的归一化处理,将可输入的数值都转换到 0-1 之间,以避免 ANN 模型训练时由量级上的差别影响网络的识别精度.

当各神经元节点采用 S 型函数时,两个隐层则足以表示输入图形的任意输出函数^[17,18],确定每个隐层单元数的最好方法是采用试算法^[19].本文误差指标取 0.001,学习率初值随机生成,对不同滞时和神经元个数进行模型训练和验证.经试算,本文确定模型输入为前一时段流量(Q_{t-1})、本时段及前一时段降雨(P_t, P_{t-1})、本时段及前一时段气温(T_t, T_{t-1}),神经元个数为 8,再增加流量、降雨、气温滞时和神经单元数,大山口流量拟合精度增加很小.因此,本文建立五维输入、一维输出的双隐层 ANN 模型.

采用 1977-1990、1995-2001 年气象水文资料进行模型训练.该资料系列平均降水量为 268 mm,与多年平均降水值相同,系列平均气温 -4.69℃,接近多年平均气温 -4.63℃.此外,该系列包括 1983-1997 年枯水期,降水量比多年平均值小 11%,同期气温比多年平均低 0.45℃;丰水期 1999-2001 年,降水量比多年平均值大 31%,同期气温比多年平均高 1.35℃.模型验证期为 1991-1994 年.

模型计算结果采用效率系数进行评估,计算公式为:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (q_i - \hat{q}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (q_i - \bar{q})^2} \quad (5)$$

这里, q_i 、 \hat{q}_i 分别为实测和计算大山口流量, \bar{q} 为实测流量系列均值, n 为观测系列长度.

训练期模型实测和计算系列结果见图 2,模型效率系数为 0.91.模型验证期实测和计算流量系列(图 3a),模型效率系数为 0.85.此外,还对多年平均系列进行验证,模型输入多年平均月降水量、气温系列,计算出多年平均月流量系列,与实测多年平均月流量系列非常接近(图 3b),效率系数 0.97,多年平均误差为 0.8m³/s,因此,建立的 ANN 模型较为可靠.

3 气候变化对径流影响分析

在全球变暖大背景下,中国西北地区主要是西部、中部气候自 19 世纪小冰川期结束后至 20 世纪 80 年代,基本上处于向暖干化发展,施雅风等^[20]认为 1987 年西北西中部气候出现向暖湿转型的突变,1987-2000 年西北地区气温较 1961-1986 年平均升高了 0.7℃,降水量北疆增加了 22%,南疆增加了 33%.90 年代是近 1000 年最暖的时期.

近期与未来 100a 的全球变暖,可能主要由于温室气体 CO₂ 等增加结果.为了分析气候因子变化对流域径流的影响,本文首先进行敏感度分析.图 4、5 分别为年平均气温升高 1-3℃ 和年降水量增加 5%-25% 时,由 ANN 模型预测大山口站径流量变化.统计结果表明:当气温升高 1-3℃ 时,年径流量增加 6.7%-25%;当降水增加 5%-25% 时,年径流量增加 1.4%-11%.因此,该地区气温升高对径流影响较降雨量增加对径流的影响要大.另一方面,气候变化(气温升高和降水增加)对夏季影响远大于其它季节,当气温

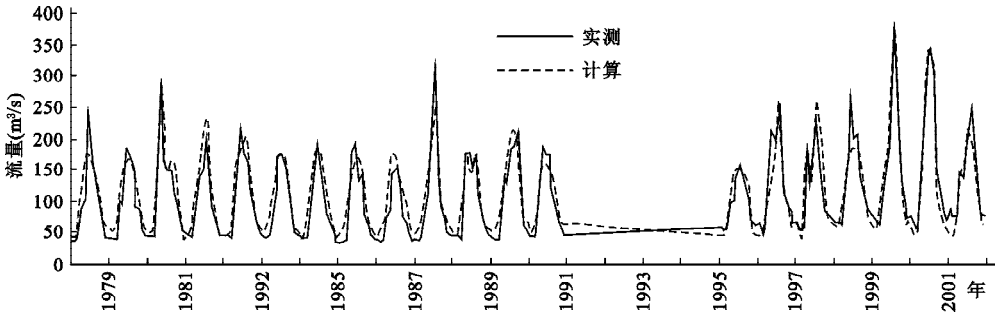


图2 模型训练结果

Fig. 2 Model trained results

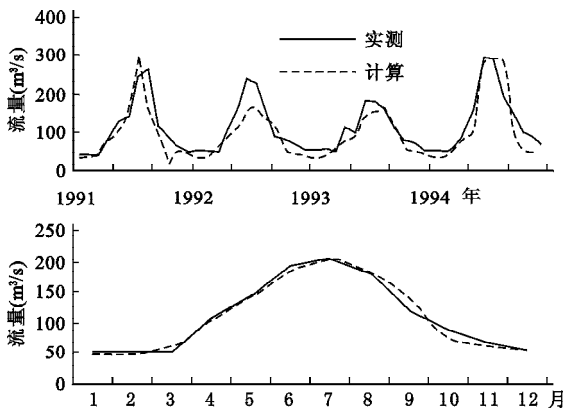


图3 模型验证结果

Fig. 3 Model validation results

升高 1 - 3℃ 时, 大山口流量夏季(6、7、8 月)增加 11% - 62%, 在最寒冷的冬季(1、2、12 月), 流量增加 3% - 10%; 当降水增加 5% - 25% 时, 夏季径流增加 2.7% - 21%, 冬季仅增加 0.2% - 0.8%。

高学杰等应用 RCMs 推算 CO₂ 加倍情况下西北地区气候可能变化情形^[2]: 年平均气温升高 2.7℃, 冬季和春季升高 3.0℃, 夏季升高 2.7℃, 秋季升高 2.0℃; 年平均降雨增加 25%, 冬季增加 47%, 春季增加 36%, 夏季增加 9%, 秋季增加 28%。利用 ANN 模型预测结果见图 5 (PT(高)情形), 年径流量增加 38.6%, 其中夏季增加 71.8%, 冬季增加 11.4%。

由此可以得出, 气温升高和降水量增加有利于缓和目前西北地区干旱状态, 但增加径流量主要集中在 7、8 月份, 夏季发生洪水危险大大增加, 将会改变目前水资源开发利用模式和水利工程规划、运行方案。

4 结论

本文根据博斯腾湖流域影响水文过程的气象水文资料, 建立了月降水、气温与流量系列 ANN 模型, 分析了气温升高和降雨增加对径流过程的影响。根据 RCMs 预测未来气候变化情形, 评估未来大山口站径流量的可能变化情形。分析结果表明: 大山口站径流对降雨和气温变化非常灵敏, 且气温升高影响更为显著。降水和径流的增加将可能使得西北地区干旱现象有所缓解, 但主要增加丰水期径流量, 不利于防洪和水资源开发利用。另一方面, 气候变化预测结果还存在很多不确定性, 对于地处深处大陆的西北地区, 远离海洋水汽源、下垫面极端干旱、严重的植被破坏、地下水位下降等, 不利于升温条件下的水汽补充, 未来气候变化情景以及由此引起的水资源、环境、生态和社会问题还有待于进一步研究。

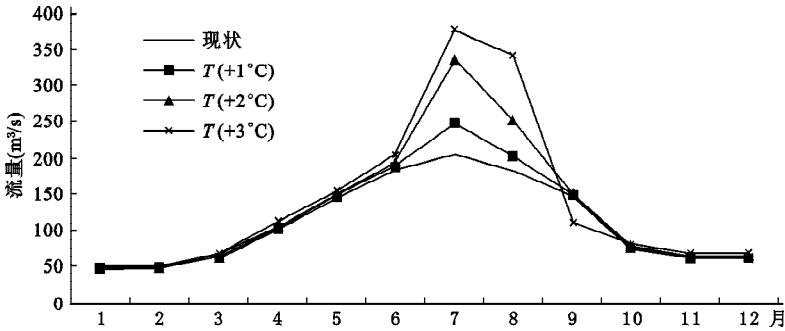


图4 气温升高对径流量影响

Fig. 4 Influences of temperature rises to stream discharge

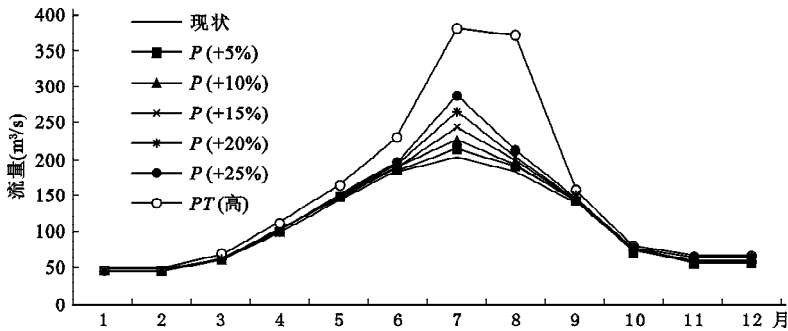


图5 降水增加以及RCM预测未来气候变化对径流影响

Fig. 5 Influences of precipitation increase and predicted climate change by RCM to stream discharge

5 参考文献

- [1] Climate change 2001. Impacts, adaptation, and vulnerability, A Report of Working Group II of the Intergovernmental Panel On Climate Change, 2001.
- [2] 高学杰,赵宗慈,丁一汇.区域气候模式对温室气体引起的中国西北地区气候变化的数值模拟.冰川冻土,2003,25(2):157-164.
- [3] Liang X, Lettenmaier D P, Wood E F, et al. A simple hydrological based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models. *Journal of Geophysics Research*, 1994, 99(14):415-428.
- [4] 刘新仁.大尺度水文模拟若干问题的探讨.淮河流域能量与水文循环研究.气象出版社,1999.
- [5] 陈喜,苏布达,姜彤等.气候变化对沅江流域径流影响研究.湖泊科学,2003,15(增刊):115-122.
- [6] Dawson C W & Wilby R L. Hydrological modeling using artificial neural networks. *Progress in Physical Geography*, 2001, 25(1):80-108.
- [7] 李贤彬,丁晶,李后强.基于子波变换序列的人工神经网络组合预测.水利学报,1999,(2).
- [8] 李鸿雁,刘寒冰,苑希民等.人工神经网络峰值识别理论及其在洪水预报中的应用.水利学报,2002,(6).
- [9] 王栋,曹升乐.人工神经网络在水文水资源水环境系统中的应用研究进展.水利水电技术,1999,(12).
- [10] 李鸿雁,苑希民.提高人工神经网络洪水预报精度的研究.自然灾害学报,2001,4.
- [11] Maier H R, Dandy G C. Neural networks for the prediction and forecasting of water resources variables: a review of modeling issues and applications. *Environmental Modelling and Software*, 2000, 15: 101-23.
- [12] Dawson C W & Wilby R. An artificial neural network approach to rainfall-runoff modeling. *Hydrological Science Journal*, 1998, 43: 47-66.
- [13] Clair T A, Ehrman J M. Variations in discharge and dissolved organic carbon and nitrogen export from terrestrial basins with

- changes in climate: a neural network approach. *Limnology and Oceanography*, 1996, **41**: 921 - 927.
- [14] 中国科学院兰州冰川冻土研究所. 中国冰川目录 III, 天山山区(西南部塔里木内流区). 北京: 科学出版社, 1987: 124 - 172.
- [15] 胡汝骥, 马虹, 樊自立等. 新疆水资源对气候变化的响应. 自然资源学报, 2002, **17**(1): 22 - 27.
- [16] 施雅风, 沈永平, 李栋梁等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨. 第四纪研究, 2003, **23**(2).
- [17] Flood I & Kartam N. Neural Networks in Civil Engineering I: Principles and Understanding. *Journal of computing in Civil Engineering*, 1994, **8**(2): 131 - 139.
- [18] Flood I & Kartam N. Neural Networks in Civil Engineering II: Systems and Application. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 1994, **8**(2): 140 - 148.
- [19] Shamseldin A Y. Application of a neural network technique to rainfall-runoff modeling. *Journal of Hydrology*, 1997, **199**: 272 - 294.
- [20] 施雅风, 沈永平, 李栋梁等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型问题评估. 北京: 气象出版社, 2003.