

# 挠力河流域河流径流量对气候变化的 敏感性分析

姚允龙<sup>1,2</sup>, 王 蕾<sup>3</sup>, 吕宪国<sup>2\*</sup>, 于洪贤<sup>1</sup>

(1. 东北林业大学, 哈尔滨 150040; 2. 中国科学院湿地生态与环境重点实验室, 长春 130012; 3. 黑龙江科技学院建筑工程学院, 哈尔滨 150027)

**摘要:** 流域径流量对气候变化的敏感性分析是理解气候变化对流域水资源影响的重要手段。本文利用非更新式人工神经网络(ANN)模型, 以年平均降雨、年最低气温和最高气温为输入参数, 年平均径流量为输出变量, 构建了三江平原挠力河流域的径流量预测 ANN 模型; 并根据 IPCC 第四次报告的气候变化模式, 设定了 9 种不同的气候变化情景, 利用构建的 ANN 模型分析了流域径流量对气候变化的敏感性。结果表明: 构建的人工神经网络模型能够较好的模拟径流量, 可用于气候变化的敏感性分析; 挠力河流域上游径流量对气候变化的敏感性要大于中游区域的, 降水变化对径流量的影响大于气温对其产生的影响。

**关键词:** 农业流域; 径流量; 气候变化; 敏感性分析; 沼泽湿地

文章编号: 1000-0585(2012)03-0409-08

## 1 前言

在全球气候变化背景下, 东北地区气候趋于暖干化, 在干旱化趋势影响下, 生态系统将更加脆弱, 粮食增产与生态保护之间的用水矛盾也将更加突出<sup>[1]</sup>。未来的流域水资源规划不仅要考虑气候变化的因素, 同时还要考虑流域水资源对气候变化的响应<sup>[2]</sup>。现有气候变化模式并不完全适合进行水文状况预测<sup>[3]</sup>, 而河流径流量对气候变化的敏感性研究可以确定影响径流变化的主要气候因素和次要因素, 对于揭示流域水文要素对气候变化的响应机理和差异有一定的帮助, 是理解气候变化对流域水资源影响的重要手段之一。

国内和国外对于不同流域径流量对气候变化的敏感性研究已开展较多<sup>[4~6]</sup>, 最近也有学者提出了“径流弹性 (elasticity of stream flow)”的概念<sup>[7, 8]</sup>, 并基于该概念评价了气候变化对水资源的影响<sup>[9]</sup>, 径流弹性的大小是由流域的历史数据或者由水文模型计算而来, 但其假设条件是径流的弹性固定, 具有较大的局限性。人工神经网络(ANN)是一种分布式的并行信息处理系统<sup>[10]</sup>, 由于本身的多种优势, 例如可以无限逼近任意连续函数, 无需假定输入、输出之间关系以及能够模拟非线性复杂系统等, 尤其是非更新式的

收稿日期: 2011-08-22; 修订日期: 2011-12-10

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(DL10BA01); 中国科学院湿地生态与环境重点实验室开放基金资助项目(WELF-2009-B-001); 国家自然科学基金重点资助项目(40830535); 国家自然科学基金(41104477)

作者简介: 姚允龙(1982-), 男, 山东蒙阴人, 博士, 讲师, 主要从事湿地与气候变化方面的研究。

E-mail: yl\_yao@163.com

通讯作者: 吕宪国(1957-), 男, 吉林长春人, 研究员, 博士生导师。主要从事湿地变化及其环境效应方面的研究。E-mail: luxg@neigae.ac.cn

ANN 更具优势<sup>[11]</sup>, 现已被较多地运用于水文模拟中<sup>[11~13]</sup>。

平原地区的水文过程模型建立受到多种因素的限制, 挠力河流域作为三江平原的典型流域, 水文过程还受到气候变化和湿地垦殖的双重影响<sup>[14, 15]</sup>, 其气候变化及相应的水文效应显示出更大的复杂性。因此, 本文选择非更新式的 ANN 模型应用于三江平原的挠力河流域, 采用 (IPCC 4) 假定气候情景方案, 分析区域径流量对气候变化的敏感性, 力图为该流域制定减缓和适应气候变化所带来的旱涝灾害对策等方面提供理论参考。

## 2 研究区概况

挠力河流域位于黑龙江省三江平原腹地 (图 1), 地处东经  $131^{\circ}31'$ ~ $134^{\circ}10'$ 、北纬  $45^{\circ}43'$ ~ $47^{\circ}45'$ , 总面积为 2.42 万  $\text{km}^2$ , 占三江平原总面积的 20% 左右。流域中的山地面积占总面积的 38.3%, 平原占 61.7%。气候属中温带大陆性季风气候, 年均温  $1.6^{\circ}\text{C}$ , 1 月平均气温  $-21.6^{\circ}\text{C}$ , 7 月平均气温  $21.4^{\circ}\text{C}$ , 年降水量 565mm, 陆面可能蒸发量 542.4mm。流域内地势低平, 平均海拔 60m 左右, 地表径流不畅, 形成大面积湿地, 曾是以湿地面积占优势的流域——湿地流域<sup>[16]</sup>, 但经过近 50 年的 4 次大规模农业开发活动, 耕地面积由占总面积的 8.2% 增加到 57.4%, 流域景观基质由沼泽湿地转变成了耕地, 湿地流域变成了农业流域, 成为了三江平原粮食生产基地的重要组成部分。气候变化对于该区的粮食增产计划将可能产生负面的影响, 对水资源条件的科学规划是保障该区粮食增产计划顺利实施重要举措之一。

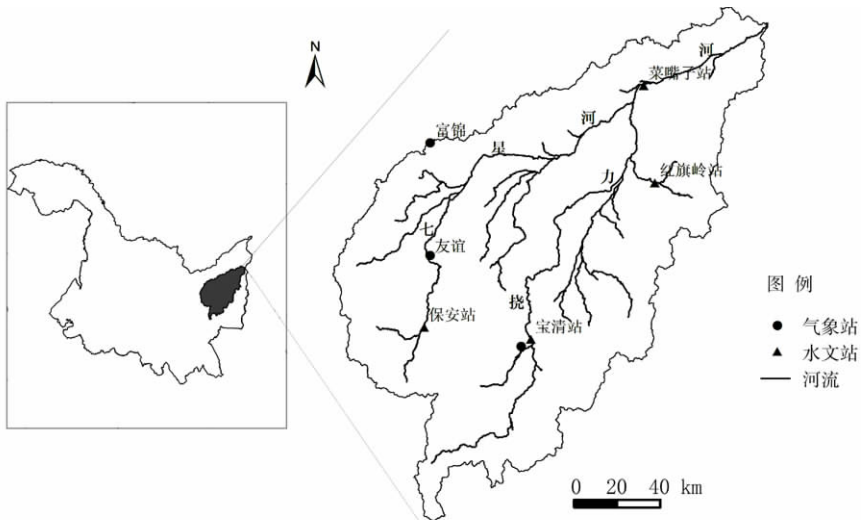


图 1 研究区位置示意图

Fig. 1 The location of the study area

## 3 数据来源与研究方法

### 3.1 数据来源

挠力河流域共有 4 个水文站, 分别为宝清站、保安站、红旗岭站和菜嘴子站, 空间分布位置如图 1, 由于保安站的资料部分缺失, 红旗岭的观测时间较短 (1977~至今)、集水面积较小 (集水面积  $1103\text{km}^2$ ), 不具有代表性, 本文重点对流域上游的宝清站 (集水

面积 3689km<sup>2</sup>, 观测自 1955~至今) 和中下游的菜嘴子站 (集水面积 20796km<sup>2</sup>, 观测自 1956~至今) 的径流量进行分析, 采用的数据是 1956~2005 年两站的实测逐日径流量资料, 逐月平均径流量和逐年平均径流量由实测逐日径流量计算得到。气象数据采用宝清县气象站、友谊县气象站和富锦市气象站的 1956~2005 年的逐日数据, 数据由黑龙江省气象科学数据共享服务中心提供。其中宝清站所采用的降水和气温数据是宝清县气象站 1956~2005 年的年降水量和年均气温, 菜嘴子站采用的是 1956~2005 年宝清县气象站、友谊县气象站和富锦市气象站的三站平均值。

### 3.2 敏感性概念

水文要素对气候变化的敏感性是指流域的径流、蒸发及土壤水对分析计算的可能的气候变化情景或者假定的气候变化情景的响应程度<sup>[17]</sup>。IPCC 给出的敏感性定义是: 系统受到与气候有关的刺激因素影响的程度, 包括不利的和有利的的影响。与气候有关的刺激因素是指所有的气候变化特征, 即平均气候状态、气候变异和极端事件的频率和强度<sup>[18]</sup>。因此, 将河流径流量对气候变化的敏感性定义为:

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

式中:  $S_{\Delta p, \Delta T}$  是河流径流量对气候变化的敏感性,  $R_{p, T}$  为现状径流量,  $R_{p+\Delta p, T+\Delta T}$  为降水变化  $\Delta p$ , 同时气温变化  $\Delta T$  时的径流量。在相同的气候条件下, 径流的响应程度越大, 径流量对气候变化的敏感性越强, 反之则敏感性较低。

### 3.3 研究方法

本研究选用了具有 3 个处理层结构的 BP 神经网络来进行气候—水文关系模拟, 并选用双弯曲函数 (sigmoid function) 作为激活函数和 BP (Back Propagation) 算法来进行模型训练。它是由非线性变换单元组成的一种前馈型网络, 一般由 3 个神经元层次组成, 即输入层、输出层和隐含层。各层的神经元之间形成全互连接, 各层次内的神经元之间没有连接。利用人工神经网络进行计算主要分两步: 首先对网络进行训练 (网络的学习过程); 再利用训练好的网络求解问题 (网络的检验过程)。

本研究中的 3 个层次是输入层、一个中间层也称隐藏层和一个输出层, 其中每一层上的节点分别代表输入变量、隐藏变量和输出变量。输入变量由代表平均气候状况的参数组成, 输出变量为挠力河流域各水文站年平均径流量。宝清站采用的输入变量数据是年均降雨量、年均最低气温和年均最高气温; 考虑到宝清站处于菜嘴子站之上, 对菜嘴子站的径流有较大的影响, 菜嘴子站采用的输入数据是年均降雨量、年均最低气温和年均最高气温以及宝清站年均径流量。

将所有输入及输出数据分为两组, 分别用于训练和检验。根据流域降雨情况, 在保证同年数据始终在同一组的前提下, 从每组中随机抽取数据的 60% 组合起来用于模型训练, 剩余数据用于模型检验。模型精度用检验结果的统计参数和观测值与模拟值的图表对照来进行评价统计参数包括均方差根 (RMSE) 和相关系数 ( $R^2$ ), RMSE 越接近 0 和  $R^2$  越接近 1, 模拟精度越高。

## 4 结果分析

### 4.1 模型验证结果

利用 BP 神经网络模拟气候与径流关系的结果如表 1、图 2 和图 3。训练期内两个水

表 1 BP 神经网络模拟气候与径流关系结果

Tab 1 Relationship between climate and runoff simulated by BP network

站名	模拟期		检验期	
	均方差根 (RMSE)	相关系数 ( $R^2$ )	均方差根 (RMSE)	相关系数 ( $R^2$ )
宝清站	3.6	0.95	6.8	0.74
菜嘴子站	9.3	0.97	17.4	0.87

注：显著水平都为 0.01。

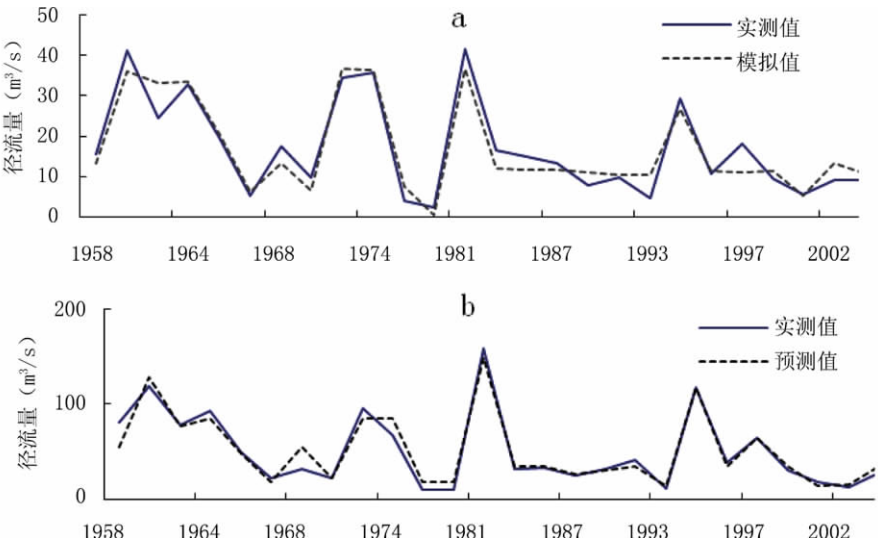


图 2 训练期径流量实测值和模拟值对比结果 (a: 宝清站, b: 菜嘴子站)

Fig. 2 Contrast of measured and simulated runoff in Baoqing station (a: training period, b: test period)

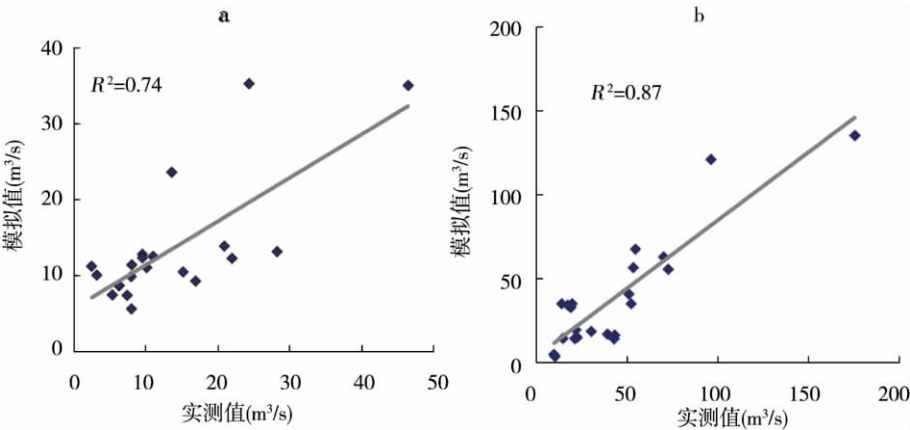


图 3 检验期径流量实测值和模拟值对比结果 (a: 宝清站, b: 菜嘴子站)

Fig. 3 Contrast of measured and simulated runoff

at Baoqing and Caizuizi stations (a: training period, b: test period)

文站的均方差根都在 10 以内，相关系数在 0.9 以上，检验期精度有所降低，宝清站的模

拟结果要好于菜嘴子站的模拟结果, 但结果都达到了较为满意的结果, 可以用于径流对气候变化的敏感性分析。

#### 4.2 河流径流对气候变化的敏感性

**4.2.1 气候变化情景设定** 根据 IPCC 的报告, 全球平均气温未来几十年约增加  $1.4 \sim 5.8^{\circ}\text{C}$ , 降水有不同程度的增减<sup>[16]</sup>。并在其第二次至第四次的评估报告中, 通过不同的气候模式计算出一系列可能的气候变化情景, 如降水的变化 ( $0, \pm 10\%, \pm 20\%$ ) 和气温的升高 ( $0^{\circ}\text{C}, 1^{\circ}\text{C}, 2^{\circ}\text{C}, 3^{\circ}\text{C}$ )。根据已有文献的报道<sup>[19, 20]</sup>, 挠力河流域中上游的降水趋势是趋于减少, 温度是趋于升高。因此, 本文假定以下几种气候变化情景, 降水的变化为 ( $0, -10\%, -20\%$ ), 气温升高为 ( $0^{\circ}\text{C}, 1^{\circ}\text{C}, 2^{\circ}\text{C}$ ), 并将其组合成 9 种气候变化情景。因在人工神经网络构建过程中气温的输入数据采用的是年均最低气温和年均最高气温, 年均最低气温和年均最高气温温度各升高  $1^{\circ}\text{C}$ , 气温升高  $2^{\circ}\text{C}$  时, 依此类推。

**4.2.2 敏感性分析** 在分析径流量对气候变化的敏感性时, 选择了较早的时间段, 选择了 1958~1977 年。原因是挠力河流域在近 50 年的时间经历四次农业大开发, 流域的下垫面发了较大变化。沼泽湿地面积由 1954 年的  $9435.9\text{km}^2$  (占流域整个面积的 39.8%) 下降到 2000 年的  $3460.0\text{km}^2$ , 减少了  $5975.9\text{km}^2$ , 面积仅为原面积的 36.7%。其中: 1954~1986 年期间湿地减少非常剧烈, 共减少  $7038.9\text{km}^2$ , 在 1976~1986 年期间, 则以每年  $318.5\text{km}^2$  的速度锐减; 1986~2000 年期间沼泽湿地减少的趋势有所减缓<sup>[15]</sup>。流域的径流量变化受到了土地利用变化和气候变化的双重影响, 选择 1958~1977 年时段可尽量剔除土地利用变化对径流的影响, 提高敏感性分析结果的准确度。

根据建立好的人工神经网络模型, 以 1958~1977 年为基准期, 把 9 种气候变化情景带入模拟, 模拟径流的变化对气候变化的敏感情况。图 4 是 3 种典型的气候情景下, 径流的模拟情况, 从图上可以看出, 在降水减少和气温升高的情景下, 径流都是趋于减少的, 三种气候情景下, 径流变化的总体趋势基本相似。

图 5 是宝清站和菜嘴子站径流变化与气候变化情景的关系图。从图上可以看出: (1) 径流对降水的敏感性大于气温, 在降雨情景固定的情况下, 气温变化对径流的影响幅度在 20% 左右, 而在气温情景固定的情况下, 降水变化对径流的影响幅度在 30% 左右; (2) 挠力河中上游径流变化对气候变化的敏感度不同, 上游宝清站径流对气候变化的更敏感些。在降水量不变的情景下, 受气温变化的影响, 宝清站的径流变化幅度为 20.6%, 菜嘴子站的径流变化幅度是 5.1%, 仅为宝清站的 1/4; 在气温不变的情景下, 受降水减少的影响, 宝清站的径流变化幅度是 32.9%, 菜嘴子站的径流变化幅度是 30.9%, 较宝清站少 2 个百分点; (3) 气温对径流的影响随降水的减少而有所增加, 但增加程度较小。宝清站在 20% 左右, 菜嘴子站在 6% 左右, 上下幅度较小。总体来说, 挠力河流域上游水资源对气候变化的敏感性要大于中游的。

王国庆等利用月水量平衡模型, 采用假定的气候情景, 分析了牡丹江径流量对气候变化的敏感性, 在气温升高  $2^{\circ}\text{C}$  同时降水减少 10% 情景下, 牡丹江径流量的减少量在 20% 左右<sup>[21]</sup>。其模拟结果与本研究结果基本相同, 说明人工神经网络模型虽然不具有物理意义, 但模拟的结果与具有物理意义的模型基本一致, 可以用于气候变化的敏感性分析。人工神经网络具有构建方便, 计算过程快捷的优势, 但也很难应用于流域内不同集水区的径流量对气候变化的敏感性分析。最近, Michael 等构建了一个径流敏感性研究的技术框架<sup>[22]</sup>, 该框架是基于 Budyko 模型<sup>[23]</sup>, 该模型不仅可以模拟长期径流量变化对气候变化

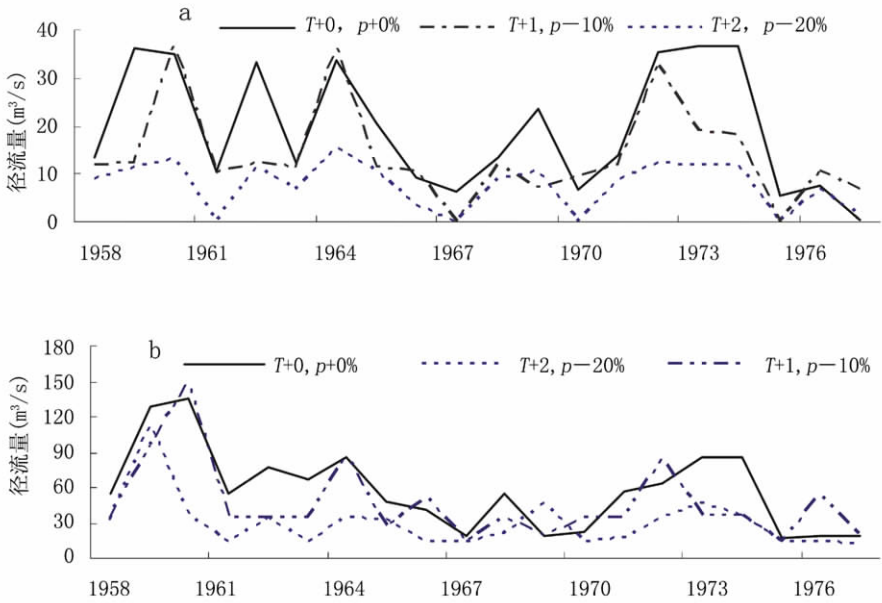


图 4 1958~1977 年挠力河 3 种气候情景下的径流模拟情况 (a: 宝清站, b: 菜嘴子站)  
Fig. 4 Runoff simulation under three climate scenarios in Naoli River Watershed  
from 1958 to 1977 (a: Baoqing station, b: Caizuizi station)

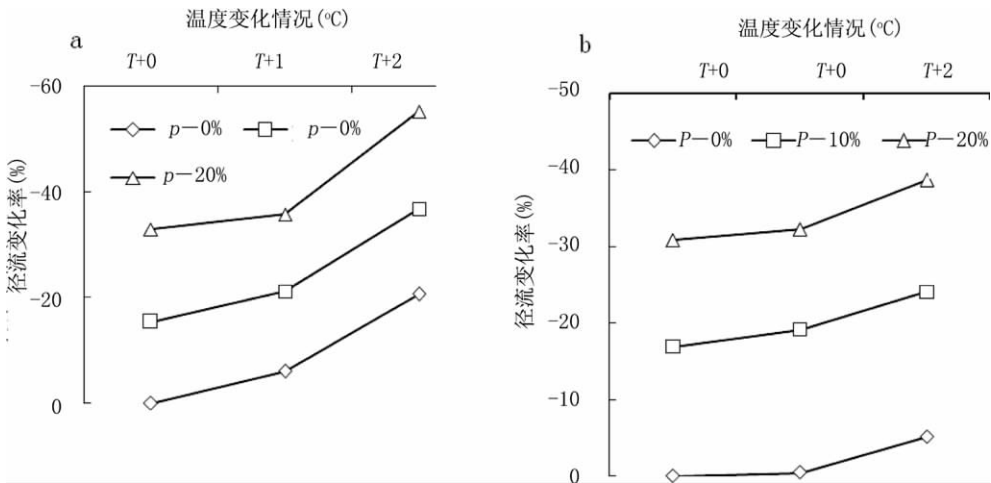


图 5 挠力河中上游地区降水、气温与径流变化关系 (a: 宝清站, b: 菜嘴子站)  
Fig. 5 Relationship among rainfall, temperature and runoff  
in the upper and middle reaches of Naoli River

的敏感性，而且可以分析流域内不同集水区对气候变化的敏感性，但也存有模型参数较多，率定困难的缺点。

## 5 结论

(1) 采用非更新式的人工神经网络模拟气候变化对径流的影响, 其模拟结果达到了较为满意的结果, 可以用于该流域径流量对气候变化的敏感性分析; 总体来看上游的模拟结果好于下游的。

(2) 敏感性分析发现, 流域径流量对降水的敏感性大于气温的, 气温对径流量的影响随降水的减少而有所增加, 增加幅度在 6%~20% 之间; 挠力河上游径流量对气候变化的敏感性要大于中游区域的。

(3) 人工神经网络模型虽不具有物理意义, 但模拟的结果与具有物理意义的模型基本一致, 但对于分析流域内不同集水区对气候变化的敏感性, 具有物理机制意义的模型更具优势。

## 参考文献:

- [1] 郑红星, 刘静. 东北地区近 40 年干燥指数变化趋势及其气候敏感性. 地理研究, 2010, 30(10): 1765~1774.
- [2] Donohue R J, Roderick M L, mcicar T R. Assessing the differences in sensitivities of runoff to changes in climatic conditions across a large basin. Journal of Hydrology, 2011, 406(3-4): 234~244.
- [3] Kundzewicz Z W, stakhiv E Z. Are climate models "ready for prime time" in water resources management applications, or is more research needed? Hydrological Sciences Journal, 2010, 55(7): 1085~1089.
- [4] 蓝永超, 文军, 赵国辉, 等. 黄河河源区径流对气候变化的敏感性分析. 冰川冻土, 2010, 32(1): 175~182.
- [5] Jones R N, Chiew F H S, Boughton W C, *et al.* Estimating the sensitivity of mean annual runoff to climate change using selected hydrological models. Advances in Water Resources, 2006, 29(10): 1419~1429.
- [6] Dooge J C I. Sensitivity of runoff to climate change: A Hortonian approach. Bulletin of the American Meteorological Society, 1992, 73(12): 2013~2024.
- [7] Sankarasubramanian A, Vogel R M. Hydroclimatology of the continental United States. Geophysical Research Letters, 2003, 30(7): 1363.
- [8] Sankarasubramanian A, Vogel R M, limbrunner J F. Climate elasticity of streamflow in the United States. Water Resour Res, 2001, 37(6): 1771~1781.
- [9] Fu G, Charles S P, Chiew F H S. A two-parameter climate elasticity of streamflow index to assess climate change effects on annual streamflow. Water Resour Res, 2007, 43(11): W11419.
- [10] Miller B, Reinhardt J, Strickland M. Neural Networks: An Introduction. Berlin: Springer, 1995.
- [11] 朱云梅, 吕喜玺, 周跃, 等. 纵向岭谷区地表径流对气候变化的敏感性分析: 以长江上游龙川江流域为例. 科学通报, 2006, 26(S2): 73~80.
- [12] Govindaraju R. Artificial neural networks in hydrology. II: Hydrologic applications. Journal of Hydrologic Engineering, 2000, 5(2): 124~137.
- [13] Govindaraju R, Rao A. Artificial Neural Networks in Hydrology. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [14] 姚允龙, 吕宪国, 王蕾, 等. 气候变化对挠力河径流量影响的定量分析. 水科学进展, 2010, 21(6): 765~770.
- [15] 姚允龙, 吕宪国, 于洪贤, 等. 三江平原挠力河流域湿地垦殖的影响因素. 东北林业大学学报, 2011, 39(1): 72~74.
- [16] 刘红玉, 李兆富. 挠力河流域湿地景观演变的累积效应. 地理研究, 2006, 25(4): 606~616.
- [17] 张建云, 王国庆, 等. 气候变化对水文水资源影响研究. 北京: 科学出版社, 2007.
- [18] IPCC. Climate Change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. New York: Cambridge University Press, 2007.
- [19] 闫敏华, 邓伟, 陈泮勤. 三江平原沼泽性河流流域降水、径流变化及影响因素研究. 湿地科学, 2004, 2(4): 267~272.
- [20] 姚允龙, 吕宪国, 王蕾. 1956 年~2005 年挠力河径流演变特征及影响因素分析. 资源科学, 2009, 31(04): 648

~655.

- [21] 王国庆, 张建云, 刘九夫, 等. 中国不同气候区河川径流对气候变化的敏感性. 水科学进展, 2011, 22(3): 307~314.
- [22] Roderick M L, Farquhar G D. A simple framework for relating variations in runoff to variations in climatic conditions and catchment properties. Water Resources Research, 2011, 47(W00G07).
- [23] Budyko M I. Climate and Life. New York: Academic Press, 1974.

## Assessing the sensitivity of runoff to climate change in Naoli River watershed, Northeast China

YAO Yun-long<sup>1,2</sup>, WANG Lei<sup>3</sup>, LU Xian-guo<sup>2</sup>, YU Hong-xian<sup>1</sup>

(1. Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; 2. Key Laboratory of Wetland Ecology and Environment, Northeast Institute of Geography and Agroecology, CAS, Changchun 130012, China;

3. College of Architecture and Civil Engineering, Heilongjiang Institute of Science and Technology, Harbin 150027, China)

**Abstract:** Planning for potential future changes in water yield requires an understanding not only of possible climatic changes but also how a catchment hydrology might respond to such changes. Understanding catchment responsiveness, the sensitivity of catchment stream flow to changes in climatic conditions, was a useful method to examine the impacts of climate change on water resources in a watershed. In this paper, the artificial neural network (ANN) model of Naoli River watershed was constructed to assess the sensitivity of runoff to different climatic conditions. The model took the annual mean rainfall, annual minimum temperature and maximum temperature as the input parameters, and the annual mean runoff as the output parameter. The accuracy of the model was also assessed based on the statistical methods. According to the fourth reports of IPCC, we assumed nine climate change scenarios. Under the scenarios, the sensitivity of runoff to climatic condition was assessed. The results showed that: the constructed ANN model could better simulate runoff, and it could be used for sensitivity analysis of climate change; the runoff in the upper reaches of the watershed was more sensitive than that in the middle reaches, and the runoff was more sensitive to the rainfall than to the temperature. The artificial neural network (ANN) model is a simple method used to analyze the sensitivity of runoff to climatic conditions, but this method does not place emphasis on the spatial variation in runoff sensitivity.

**Key words:** Naoli River watershed; runoff; climatic condition; sensitivity analysis; marshland